

На правах рукописи

Игнатов Роман Юрьевич



**Воспроизведение осадков с помощью гидродинамических
моделей различного пространственного и временного масштаба**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2006

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

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук,
Рубинштейн К.Г.

Официальные оппоненты: Доктор физико-математической наук,
Дмитриева Л.Р.,
кандидат физико-математических наук,
Елисеев А.В.

Ведущая организация: Институт Географии РАН

Защита состоится 20 декабря в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 327.003.01 при Государственном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», 123242, Москва, Б. Предтеченский пер., 9-13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного учреждения «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации Гидрометцентра России»

Автореферат разослан 20 ноября 2006 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор географических наук



Нестеров Е.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Исследование процессов преобразования влаги в атмосфере является одной из наиболее приоритетных задач современной метеорологии. Эти процессы существенно влияют на энергетику атмосферы. Важнейшим элементом гидрологического цикла атмосферы являются осадки. Атмосферные осадки формируются в результате взаимодействия процессов разных масштабов – от молекулярного до глобального. Поэтому близкое к наблюдениям воспроизведение осадков в гидродинамических моделях циркуляции атмосферы различных пространственных и временных масштабов является актуальной задачей численной метеорологии. Именно этой задаче посвящается диссертация.

Для оценки результатов моделирования удобно использовать данные в регулярной сетке точек (эталон), покрывающие всю территорию Земли. Задача подготовки таких эталонов является вполне сравнимой по сложности с задачей моделирования. В большой мере это касается осадков, имеющих сложную пространственно-временную структуру. В работе анализу эталонов уделено большое внимание.

Муссонная циркуляционная система является одной из наиболее устойчивых систем циркуляции атмосферы Земли. Не было ни одного года без летнего влажного муссона. Варьирует лишь время его начала и интенсивность, от которых зависит экономика большого региона. В связи с этим качество воспроизведения муссонной циркуляции и муссонных осадков является важной характеристикой модели общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Анализу муссонной циркуляции и осадков муссоне посвящена одна из частей работы.

В диссертации исследуется влияние изменения газового состава атмосферы на климат. Согласно некоторым современным оценкам, концентрация углекислого газа должна удвоиться, предположительно, к

середине текущего века. Наряду с изменениями газового состава атмосферы механизмом влияния человека на изменение климата является активное землепользование. В частности, на локальный или региональный климат могут влиять территории крупных мегаполисов. Площадь этих «островов тепла» в сравнении с площадями континентов невелика. Вместе с тем, в пределах мегаполисов сосредоточены интенсивные источники энергии, которая поступает в атмосферу, разогревая приземные слои воздуха и изменяя их свойства в течение длительного времени. В работе оценивается влияние подобных эффектов на осадки с помощью численных экспериментов с моделью ОЦА Гидрометцентра России.

Для преодоления ряда недостатков в воспроизведении осадков в модели общей циркуляции атмосферы (ОЦА) были проведены эксперименты с параметризацией крупномасштабных осадков с учётом микрофизики облаков. Так как эта параметризация создавалась для расчёта осадков в средней полосе России, было необходимо провести её тестирование в глобальных масштабах с помощью численных экспериментов на рядах глобальных данных и в модели ОЦА Гидрометцентра России. В параметризации, входящей в базовую версию этой модели, микрофизические характеристики облаков не учитываются. В работе имеются результаты экспериментов с параметризациями обоих типов.

В настоящее время во всех крупных прогностических центрах мира основой технологии прогноза погоды является крупномасштабная (как правило, глобальная) гидродинамическая модель. Несмотря на успехи в гидродинамическом моделировании и в создании систем усвоения данных в последние десятилетия, крупномасштабные модели имеют в ряде регионов различные систематические ошибки в прогнозе осадков, природу которых установить непросто. Источником подобных ошибок могут являться недостатки в описании свойств подстилающей поверхности в сетке с большими пространственными шагами. Для устранения этих ошибок с целью

улучшения прогноза осадков широко используются региональные негидростатические модели циркуляции атмосферы. В таких моделях может иметься набор из нескольких процедур параметризаций основных физических процессов, в том числе, и процессов осадкообразования. Для подобных моделей есть возможность сравнить качество различных алгоритмов и процедур и отобрать оптимальные для дальнейшего использования в пределах заданных регионов и пространственных структур. В работе этому вопросу посвящена 4-я глава.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью работы явилось исследование особенностей моделирования осадков в различных регионах Земли с использованием гидродинамических моделей циркуляции атмосферы различных пространственных и временных масштабов. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Исследовать свойства имеющихся в нашем распоряжении глобальных архивов данных по осадкам и испарению, сопоставить их друг с другом, проанализировать глобальный водный баланс в архивах данных.

2. Разработать и реализовать методику анализа осадков в численных экспериментах с моделью ОЦА Гидрометцентра России, позволяющую оценить характеристики индийского и африканского муссонов, сравнить полученные результаты с результатами экспериментов с другими российскими и зарубежными моделями близкого пространственного разрешения.

3. Проанализировать влияние на осадки антропогенных факторов (удвоение концентрации углекислого газа и городские «острова тепла»).

4. Выполнить тестирование параметризации крупномасштабных осадков с учётом микрофизики облаков и провести эксперименты с моделью ОЦА Гидрометцентра России с этой параметризацией.

5. Провести и проанализировать эксперименты с региональной негидростатической моделью высокого пространственного разрешения для оценки краткосрочного прогноза осадков для регионов России и Европы.

6. Оценить влияние пространственного разрешения региональной негидростатической модели циркуляции атмосферы на прогноз осадков для Центральной России. Исследовать зависимость прогностических осадков от срока заблаговременности прогноза.

Научная новизна

Основные результаты диссертации получены впервые. К ним относятся:

а) оценка многолетнего глобального водного баланса в архивах данных по осадкам и испарению в регулярной сетке точек;

б) постановка и анализ проведённых численных экспериментов по влиянию городских «островов тепла» на глобальные и региональные осадки;

в) тестирование параметризации крупномасштабных осадков с учётом микрофизики облаков на глобальных и региональных сеточных данных;

г) проведение численных экспериментов с моделью ОЦА и анализ их результатов для оценки влияния на расчёт осадков параметризации крупномасштабных осадков, в которой учитывается микрофизика облаков;

е) адаптация региональной негидростатической модели циркуляции атмосферы для территории Европы, постановка и анализ результатов численных экспериментов для исследования влияния различных физических и вычислительных факторов на прогноз осадков.

Практическая ценность результатов работы.

Анализ свойств глобальных архивов данных позволил определить приоритетность их использования для оценки результатов моделирования. Постановка и анализ многолетних численных экспериментов с моделью ОЦА Гидрометцентра России позволили исследовать пространственно-временную структуру модельных осадков в индийском и африканском

муссоне, выявить влияние межгодовой изменчивости температуры поверхности океана (ТПО) на осадки, сравнить полученные результаты с результатами экспериментов с другими моделями близкого пространственного разрешения, проанализировать чувствительность модельных осадков к антропогенным факторам. Тестирование параметризации с учётом микрофизики облаков позволило подобрать оптимальные микрофизические характеристики для её использования в качестве метода расчёта осадков в различных широтных зонах Земли, в том числе, в модели ОЦА Гидрометцентра России. Эксперименты с региональной негидростатической моделью дали возможность сравнить качество имеющихся алгоритмов и процедур, отобрать из них оптимальные для описания пространственных структур для регионов России и Европы.

В работе приведены четыре справки о внедрении результатов работы в прикладные задачи численного моделирования.

Апробация работы

Результаты исследований были доложены на восьми российских и международных конференциях:

1. Конференция молодых учёных «Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата», 19-21 июня 2001 г., г. Санкт-Петербург.

2. Международная научно-практическая конференция «География и регион. Наблюдения, анализ и прогноз метеорологических условий», 30 сентября – 4 октября 2002 г., г. Пермь.

3. Научная конференция по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга природной среды в государствах – участниках СНГ, посвящённая 10-летию образования Межгосударственного совета по гидрометеорологии, 23-26 апреля 2002 г., г. Санкт-Петербург.

4. Международная школа молодых ученых и конференция «Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде: CITES – 2003», 1-11 сентября 2003 г., г. Томск.

5. Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2004, 17–25 июля 2004 г., г. Томск.

6. Международная конференция и школа молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: «CITES-2005», 13-23 марта 2005 г., г. Новосибирск.

7. Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS -2006», 1-8 июля 2006 г., г. Томск.

8. Международная конференция по проблемам гидрометеорологической безопасности (прогнозирование и адаптация общества к экстремальным климатическим изменениям), 26-29 сентября 2006 г., г. Москва.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 6 статей в рецензируемых изданиях, 2 работы без соавторов.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Объём диссертации составляет 190 страниц текста, в котором содержится 42 таблицы и 48 рисунков. Список литературы содержит 117 наименования, из которых 63 отечественные и 54 зарубежные работы.

Личный вклад автора

Основные результаты диссертационной работы получены автором лично. При этом вклад других авторов распределился следующим образом: Постановка экспериментов с моделью Гидрометцентра России выполнена

совместно с Егоровой Е.Н. и Рубинштейном К.Г.. Тестирование и включение в модель Гидрометцентра России параметризации с учётом микрофизики облаков выполнена совместно с Акимовым И.В.. Эксперименты с региональной негидростатической моделью MM5 проведены при содействии Гусевой М.С. и Новиковой И.В.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, приведено краткое содержание четырёх глав диссертации.

Глава 1 посвящена исследованию свойств глобальных архивов данных по осадкам и испарению. Полученные результаты позволяют ответить на вопрос, какому архиву данных отдать предпочтение в том или ином случае. Проводится обзор глобальных архивов данных по осадкам и испарению, архивы сопоставляются друг с другом, по возможности, выявляются достоинства и недостатки каждого из них. Кратко описываются технологии получения анализируемых архивов данных. Перед этим проводится общий обзор методов получения информации об осадках и испарении. Результаты первой главы использованы в последующих главах работы. В диссертации анализируются 6 архивов данных по осадкам: GPCP (Global Precipitation Climatology Project), ре-анализ NCAR/NCEP (National Center for Atmospheric Research / National Centers for Environmental Prediction), ре-анализ NCAR/DOE (National Center for Atmospheric Research / Department of Energy), ре-анализа ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), климат Ягера (Jaeger), климат Легейтса (Legates) и 4 архива по испарению (ре-анализ NCAR/NCEP, ре-анализ NCAR/DOE, ре-анализа ECMWF, атлас теплового баланса Будыко).

Данные реанализов и GPCP усреднялись за интервал с 1980 по 1998 год, который совпадает с интервалом AMIP-2 (Atmospheric Model Intercomparison Project). Все сравниваемые архивы имели разрешение 2.5 x 2.5°. Основной источник информации об осадках при создании месячных

данных GPCP – это данные станционных наблюдений. Однако станции не покрывают информацией всю поверхность Земли, поэтому при создании этого архива для территорий с редкой сетью авторам приходилось привлекать спутниковые наблюдения и модельные данные. Архивы данных в работе анализировались также с точки зрения соблюдения глобального водного баланса.

Разброс среднегодовой величины интенсивности осадков (табл. 1) по разным источникам можно рассматривать в некотором приближении как меру неопределённости нашего знания о данной величине. Из табл. 1 видно, что среднегодовая интенсивность осадков, осреднённая по всей поверхности Земли, лежит в пределах между 2.61 (GPCP) и 3.21 (Климат Легейтса) мм/сут. Разброс составляет около 17% от средней по всем представленным архивам величины. Над сушей разброс интенсивности осадков составляет 14%, а над океанами - 27%. Осадки GPCP над сушей имеют более высокую степень доверия, так как при их создании использовались данные синоптических наблюдений за осадками. Над океанами нельзя отдать предпочтение какому-либо одному архиву данных по осадкам, так как в процессе их создания использовались, в основном, спутниковые и модельные данные. Это косвенно подтверждается большим разбросом среднегодовых глобальных величин осадков (табл. 1), который над океанами больше, чем над сушей.

Интенсивность испарения над сушей (табл. 2) имеет значительный разброс от средней по представленным архивам данных величины и составляет 52%, над океанами он значительно меньше – 17%, так как над океанами рассчитать испарение проще, чем над сушей.

Таблица 1

Среднегодовая интенсивность осадков (мм/сут) и её среднеквадратическое отклонение на сетке 2.5 x 2.5 °

Территория	Климат Ягера	Климат Легейтса	Осадки проекта GPCP	Осадки реанализа N1	Осадки реанализа N2	Осадки реанализа E1	Среднее
Интенсивность осадков							
Суша и океан	2.65	3.21	2.61	2.65	3.08	3.10	2.88
Суша	2.03	1.98	1.99	2.17	2.29	2.15	2.10
Океан	2.90	3.71	2.85	2.84	3.39	3.48	3.20
Дисперсия интенсивности осадков							
Суша и океан	1.75	2.43	1.69	1.95	2.26	2.55	2.11
Суша	1.52	1.59	1.45	2.02	1.93	2.22	1.79
Океан	1.76	2.60	1.70	1.85	2.30	2.56	2.13

Таблица 2

Среднегодовая интенсивность испарения и её среднеквадратическое отклонение на сетке 2.5 x 2.5 ° (мм/сут)

Территория	Испарение с атласа Будыко	Испарение реанализа N1	Испарение реанализа N2	Испарение реанализа ECMWF	Среднее
Интенсивность испарения					
Суша и океан	2.47	2.80	3.08	2.85	2.80
Суша	1.10	1.77	1.80	1.41	1.52
Океан	3.01	3.21	3.60	3.43	3.31
Дисперсия интенсивности испарения					
Суша и океан	1.65	1.74	1.93	1.81	1.78
Суша	0.84	1.27	1.24	1.02	1.09
Океан	1.69	1.79	2.00	1.83	1.83

На рис. 1а представлено внутригодовое изменение глобальной интенсивности осадков над всей Землёй, на рис. 1б – над сушей. На рис. 1а видно, что кривые чётко разделились на две группы. Примечательно то, что кривые из различных групп нигде не пересекаются. Также видно, что в среднем по Земле в годовом ходе максимум осадков приходится на лето северного полушария. Однако выражен он не во всех источниках. На рис. 1б видно, что над сушей все кривые демонстрируют хорошо выраженный

максимум осадков летом северного полушария. Кривые, соответствующие осадкам GPCP и климату Легейтса, практически совпадают. В остальных архивах осадки завышены в сравнении с осадками GPCP и климатом Легейтса. Максимальное превышение по сравнению с осадками GPCP – у осадков реанализа NCAR/DOE. Осадки реанализа ECMWF ближе всего к осадкам GPCP, но всё равно превышают их. Внутригодовой ход интенсивности осадков над океанами похож на рис. 1а.

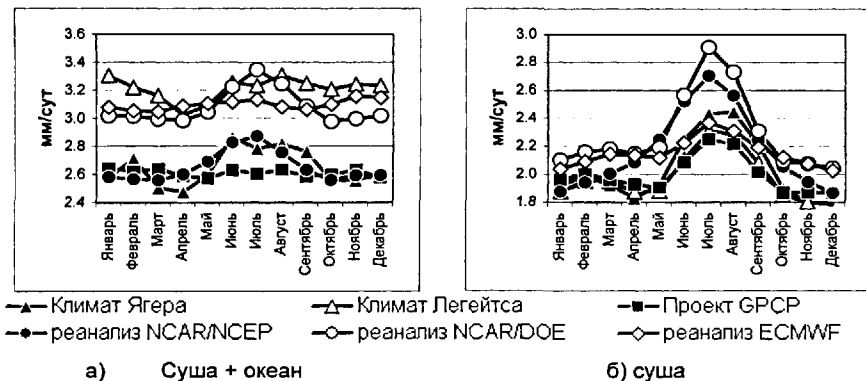


Рис. 1. Внутригодовое изменение среднемесячной интенсивности осадков (мм/сут), осреднённой по всей поверхности Земли.

Внутригодовой ход среднемесячной интенсивности испарения, осреднённого по всей Земле, имеет максимум летом северного полушария, выраженный во всех архивах данных. Максимальная интенсивность испарения наблюдается в реанализе NCAR/DOE. Испарение реанализов NCAR/NCEP и ECMWF близки друг к другу, кривые практически совпадают. Интенсивность испарения из атласа Будыко самая низкая из анализируемых архивов данных. Испарение над сушей имеет ещё более чётко выраженный, чем в случае всей поверхности Земли, максимум, который наблюдается летом северного полушария. Над океанами наблюдаются два максимума испарения – зимой и летом северного полушария.

Было проанализировано межгодовое изменение средней по Земле интенсивности осадков и испарения. На рис. 2 помимо испарения и осадков реанализов, нанесены также среднегодовые осадки GPCP. В реанализе NCAR/NCEP (рис. 2а) кривые интенсивности осадков и испарения не совпадают, но близки к осадкам GPCP. В реанализе NCAR/DOE кривые, соответствующие осадкам и испарению, практически совпали, что говорит о выполнении в этом реанализе глобального водного баланса. Однако в отличие от реанализа NCAR/NCEP, осадки значительно больше отличаются от осадков GPCP. В реанализе ECMWF осадки в течение большей части рассматриваемого промежутка времени превышают испарение. В реанализе ECMWF среднегодовая интенсивность осадков над сушей имеет небольшую межгодовую изменчивость и близка к GPCP, а испарение практически не отличается от 1.4 мм/сут. Во всех трёх реанализах наблюдается увеличение интенсивности осадков со временем внутри рассматриваемого промежутка.

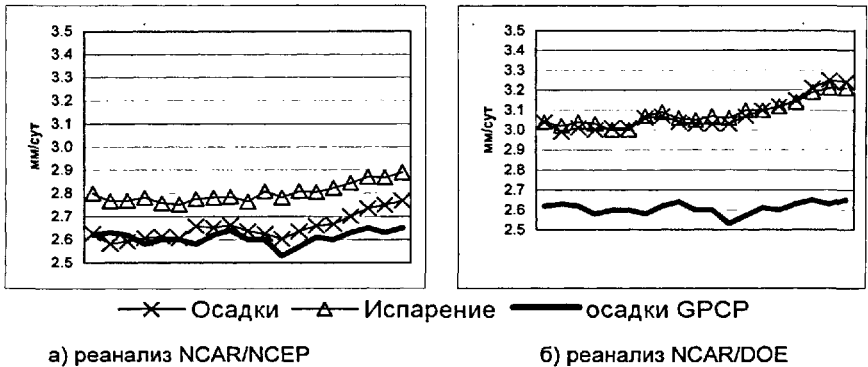


Рис. 2. Изменение со временем среднегодовой интенсивности осадков и испарения (мм/сут) с 1980 по 1998 гг.

В главе 2 анализируются осадки в экспериментах со спектральной моделью ОЦА Гидрометцентра России на длительных интервалах времени и различных пространственных масштабах. Впервые версия модели была внедрена в Гидрометцентре России для целей среднесрочного прогноза

погоды группой сотрудников под руководством Г. П. Курбаткина. В главе кратко описывается версия модели ОЦА, с помощью которой проводились эксперименты. Особое внимание уделяется описанию параметризации крупномасштабных осадков. Затем описывается постановка и анализируются результаты нескольких серий оригинальных численных экспериментов. Приводятся результаты анализа пространственно-временной структуры осадков в индийском и африканском муссоне. Одним из важных показателей качества модели является её способность воспроизводить осадки в муссоне. Рассматриваются средние за 19 лет интегрирования осадки и их внутригодовой ход. Модельные результаты сравниваются с эталоном, в качестве которого в этой главе использовались осадки реанализа NCAR/NCEP.

Для оценки возможности модели ОЦА Гидрометцентра России воспроизводить осадки в летнем индийском муссоне и исследования влияния межгодовой изменчивости ТПО на муссонные осадки были проведены два десятилетних (1979-1988 гг.) численных эксперимента. Оба эксперимента рассчитывались на одинаковой версии модели. Отличие экспериментов состояло в задании ТПО. В первом из экспериментов ТПО задавалась в соответствии со среднемесячными данными наблюдений и содержала внутригодовые изменения и изменения между годами. Для второго эксперимента ТПО получена помесечным осреднением ТПО 1-го эксперимента за 10 лет и содержала внутригодовые изменения. Анализ результатов экспериментов показал, что в обоих экспериментах удовлетворительно воспроизводится структура поля и временной ход осадков над Индостаном. Величины осадков ближе к эталону в 1-м эксперименте.

На рис. 3 представлено изменение со временем аномалий интенсивности осадков за интервал времени с июня по сентябрь. Аномалией является разница между среднемесячной интенсивностью осадков над

Индостаном в каждый год и интенсивностью, осреднённой за 9 лет. Видно, что в 1-м эксперименте эта характеристика воспроизведена близко к данным наблюдений для всех лет, кроме 1985 г. (рис. 3б). Видно также, что многие модели воспроизвели эту характеристику менее реалистично, чем модель Гидрометцентра России в 1-м эксперименте (рис. 3а).

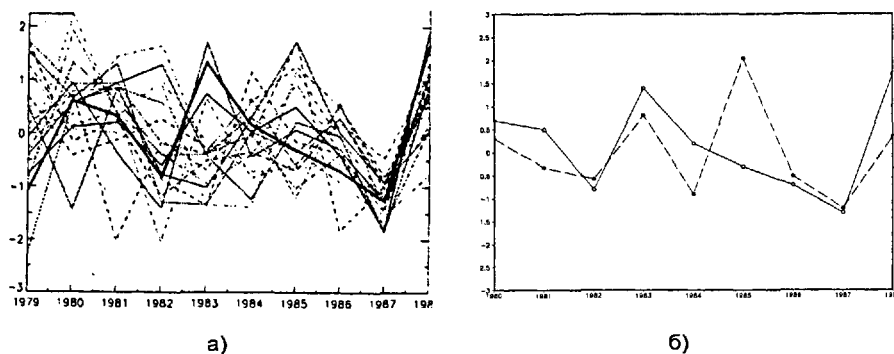


Рис. 3. Изменение со временем нормированных аномалий интенсивности осадков над Индостаном, осредненных за июнь, июль, август, сентябрь: а) – для моделей, участвовавших в АМIP и наблюдений, б) – для первого эксперимента с версией модели T21L15 Гидрометцентра России (пунктирная линия) и наблюдений (сплошная линия).

В проведённых экспериментах с версией модели ОЦА Гидрометцентра России T42L15 удалось более точно воспроизвести пространственную структуру осадков над Индостаном, чем в экспериментах с версией T21L15. Это продемонстрировано в разделе диссертации 2.8.

В работе показано, что модель ОЦА Гидрометцентра России африканский муссон воспроизводит хуже, чем индийский. Возможной причиной этого является недостаточность пространственного разрешения версии модели T21L15 для качественного воспроизведения африканского муссона.

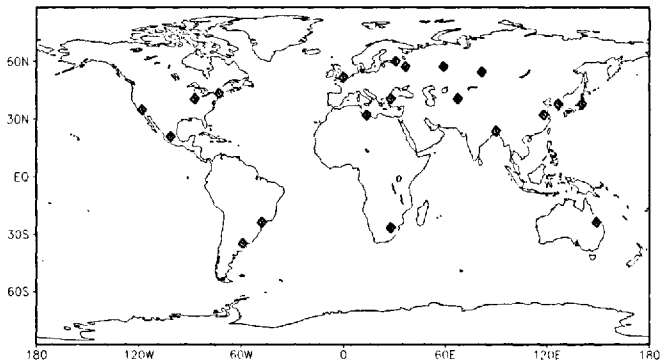
Были проведены серии экспериментов, в которых исследуется влияние удвоения концентрации углекислого газа на осадки в индийском муссоне и в других регионах Земли. Концентрация углекислого газа в модели была удвоена в сравнении с современной и не менялась в процессе интегрирования модели.

В диссертации показано, что в эксперименте с удвоенным CO_2 осадки над Индостаном уменьшились, при этом в структуре поля существенных изменений не произошло. Основные изменения в осадках произошли в тропиках.

Для исследования влияния территорий мегаполисов на региональные и глобальные осадки была проведена серия из пяти 10 летних экспериментов (1979-1988 гг.). Один из экспериментов являлся базовым (BL), без учёта «островов тепла». В четырёх других экспериментах (T1, T2, T3, T4) в местах расположения крупнейших городов (было выбрано 20 городов Земли) температура поверхности суши увеличивалась на определённую величину (на 1.5 или 3 градуса) (рис. 4).

Результаты экспериментов были осреднены за последние 9 лет интегрирования модели (1980-1988 гг.) и сравнивались с базовым экспериментом. В качестве критерия значимости результатов использовалась разница между двумя реанализами – NCAR/NCEP и ECMWF. Если изменение в осадках в базовом эксперименте заметно превышало по модулю разницу между этими реанализами, то оно считалось значимым. Были рассчитаны величины по каждой широтной зоне и по отдельным регионам, характеризующимися высокой степенью урбанизации. Глобальная интенсивность осадков в экспериментах серии T не изменилась. Значимые изменения произошли лишь в отдельных регионах: в январе над Европой и в октябре над Юго-Восточной Азией интенсивность осадков уменьшилась, в октябре над северо-востоком США – увеличилась.

Эксперименты
Т1 и Т2



Эксперименты
Т3 и Т4

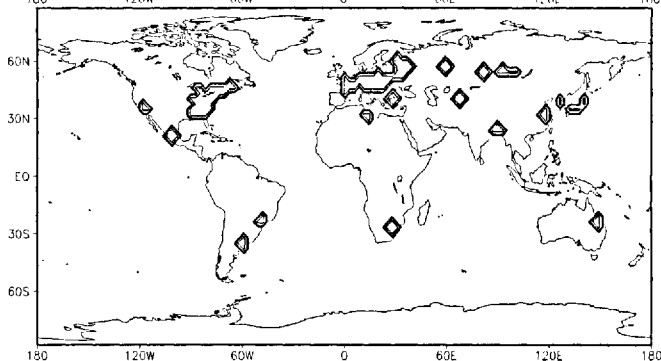


Рис. 4. Географическое распределение городских «островов тепла» в экспериментах с моделью ОЦА Гидрометцентра России.

Глава 3 посвящена исследованию возможности использования параметризации крупномасштабных осадков с учётом микрофизики облаков для моделирования. Эта параметризация была разработана в Гидрометцентре России Дмитриевой Л.Р. совместно с Акимовым И.В. для краткосрочного прогноза осадков в средней полосе России. В диссертации проведено исследование возможности расчёта осадков с помощью этой параметризации на длительных интервалах времени во всех широтных зонах Земли. На первом этапе было проведено тестирование параметризации на глобальных и региональных данных реанализов без включения в модель, что

позволило минимизировать недостатки, присущие тестируемому методу, и подобрать параметры (критическая влажность для определения облачных слоёв, энергия турбулентности внутри облака, критический размер облачных частиц). Проведено исследование данной параметризации на чувствительность к вертикальной структуре входных данных.

Результаты тестирования параметризации крупномасштабных осадков с учётом микрофизики облаков в различных регионах показали, что параметризация воспроизводит пространственно-временную структуру осадков, близкую к структуре осадков GPCP. В частности, на рис.5 видно хорошее совпадение расчётных и эталонных осадков для региона Центральной России. Недостатки параметризации заключаются в занижении экстремумов осадков в годовом ходе и общее занижение осадков в зимний период.

Для исследования зависимости осадков, рассчитанных с помощью тестируемой параметризации, от вертикальной структуры данных использовались данные по температуре и влажности на 15-ти изобарических поверхностях реанализа ECMWF за 2001 год через 6 часов. В базовом эксперименте были рассчитаны осадки с использованием данных на всех 15-ти поверхностях. Затем были проведены эксперименты, в каждом из которых из набора изымалась одна или несколько изобарических поверхностей. Всего было проведено 5 таких экспериментов. Результаты этого исследования показали, что вертикальная структура данных существенно влияет на осадки, причём, влияние зависит от региона.

После тестирования и подборки оптимальных коэффициентов, был проведён и проанализирован 10 летний численный эксперимент с параметризацией крупномасштабных осадков, включённой в модель ОЦА Гидрометцентра России. Результаты этого эксперимента сравнивались с аналогичным базовым экспериментом. Анализ результатов показал, что учёт

в модели микрофизики облаков не привёл к заметному улучшению модельных осадков.

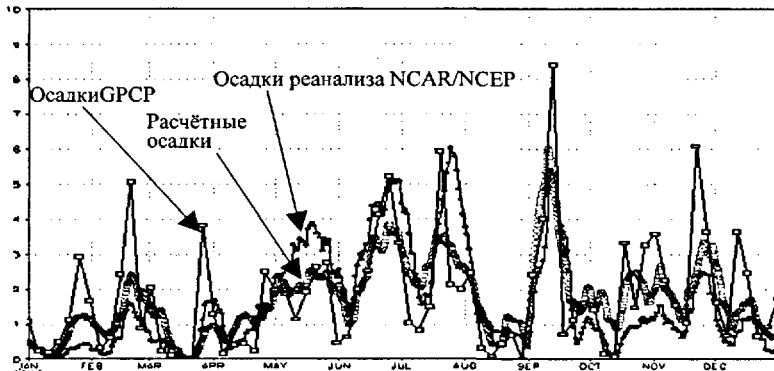
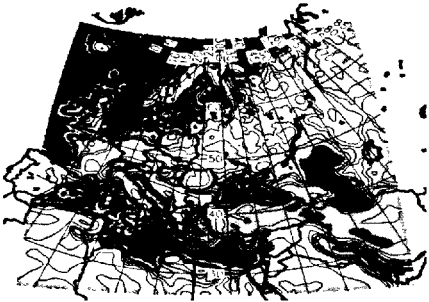


Рис. 5. Изменение со временем интенсивности осадков (мм/сут) над Центральной Россией.

В главе 4 анализируются осадки на временном масштабе порядка нескольких суток в рамках краткосрочного прогноза с помощью региональной негидростатической модели MM5 (США). С этой моделью был проведен эксперимент, в котором модель стартовала 4 раза в сутки (в 00, 06, 12 и 18 СГВ) в течение центральных месяцев сезонов 1999 г. (январь, апрель, июль и октябрь). В качестве начальных и граничных условий задавались поля реанализа ECMWF. Горизонтальный шаг сетки в данных реанализа составлял 2.5°. Граничные условия обновлялись каждые 6 часов. Расчёт проводился до 72 часов. Таким образом, за каждый месяц было произведено 124 (для апреля – 120) модельных прогнозов. Из полученных результатов были выбраны прогнозы на 24, 48 и 72 ч, которые и анализировались. Расчёты проводились на двух сетках. Одна область охватывает большую часть Европы, другая – вложенная в неё – покрывает Центр России (рис.6).

По результатам эксперимента были построены карты осреднённых за месяц прогнозов на 24, 48 и 72 часа. Карты среднемесячных осадков были построены для эталона (осадки GPCP) и осадков реанализа ECMWF.



Сетка 54 км



Сетка 18 км

Рис. 6. Орография для двух сеток в эксперименте с моделью MM5.

Анализ этих карт показал, что в эксперименте удалось воспроизвести пространственную структуру осадков, близкую к структуре осадков эталона.

В табл. 3 представлены осреднённые прогнозы над Центральной Россией для 2-х сеток. Видно, для этой территории увеличение пространственного разрешения на результат заметно не повлияло. Осадки в экспериментах получились ближе к эталону, чем осадки реанализа ECMWF, прогнозы осадков на 48 и 72 ч лучше, чем прогнозы на 24 ч. Схожие выводы были сделаны и для трёх других месяцев, это показано в работе.

Такие же характеристики были рассчитаны для 6 различных регионов Европы в пределах сетки 54 км. Анализ полученных таблиц позволил сделать те же выводы, что и для региона Центральной России.

Был проанализирован внутримесячный ход осадков в сравнении с данными станционных наблюдений для 5 городов Центральной России. Показано, что коэффициенты корреляции между наблюдаемыми и

расчётными осадками в ближайшем от станции узле модели существенно зависят от заблаговременности прогноза: чем меньше заблаговременность, тем выше коэффициент корреляции. Зависимости результата от пространственного разрешения модели не выявлено.

Таблица 3

Среднемесячная интенсивность осадков (мм/сут) в январе 1999 года, в базовом эксперименте в моделью MM5 (разрешение 18 и 54 км, прогнозы на 24, 48 и 72 часа), в реанализе ECMWF и в данных GPCP.

Шаг сетки	24 ч			48 ч			72 ч			ECMWF			GPCP
	Ср	Абс	Отн	Ср	Абс	Отн	Ср	Абс	Отн	Ср	Абс	Отн	Ср
Центр ЕТР, 18 км	2.01	-0.91	69	2.28	-0.64	78	2.28	-0.63	78	1.80	-1.12	62	2.92
Центр ЕТР, 54 км	2.00	-0.91	69	2.27	-0.64	78	2.28	-0.64	78	1.80	-1.12	62	2.92

Примечания: Ср – среднее по области значение, Абс – абсолютная разница с GPCP, Отн – относительная разница с GPCP в процентах от GPCP.

В заклучении работы перечислены основные результаты и выводы диссертации.

В приложении приведены справки о внедрении результатов диссертации в следующие прикладные задачи численного моделирования:

1. Изучение клинико-эпидемиологических последствий продолжительного воздействия на население техногенных факторов окружающей среды.

2. Расчёт переноса примесей в атмосфере из Европы в Сибирь.

3. Прогноз скоростей поверхностных течений и подъёмов уровня воды в Санкт-Петербурге, Невской губе и Финском заливе.

4. Медицинский прогноз для городов-курортов Минеральные Воды, Пятигорск, Железноводск, Ессентуки и Кисловодск.

Основные результаты работы.

1. Проведённый анализ свойств глобальных архивов данных показал, что в реанализе ECMWF и NCAR/NCEP осадки над сушей имеют небольшую

межгодовую изменчивость, близки к осадкам GPCP и могут использоваться в качестве эталона.

2. В реанализе ECMWF глобальный водный баланс не всегда выполняется.

3. В экспериментах с моделью ОЦА Гидрометцентра России удовлетворительно воспроизводится пространственная и временная структура осадков в индийском и африканском муссоне.

4. Осадки в индийском муссоне моделью ОЦА Гидрометцентра России воспроизводятся лучше, чем в африканском муссоне.

5. Учет межгодовой изменчивости ТПО влияет на величины средней для июля интенсивности осадков в муссоне, но почти не сказывается на структуре поля осадков.

6. В проведённых экспериментах модель ОЦА Гидрометцентра России в воспроизведении осадков в индийском муссоне не уступает отечественным и зарубежным моделями близкого пространственного разрешения.

7. При удвоении концентрации углекислого газа основные изменения в осадках произошли в тропиках.

8. Учёт «городских островов тепла» привёл к изменению осадков лишь в отдельных регионах мира и не сказался на глобальных осадках.

9. Тестирование параметризации крупномасштабных осадков с учётом микрофизики облаков на данных реанализов показало, что параметризация удовлетворительно воспроизводит как глобальные, так и региональные осадки и плохо воспроизводит экстремумы. Включение параметризации в модель ОЦА Гидрометцентра России не дала существенных улучшения в воспроизведении осадков.

10. Точность воспроизведения осадков в экспериментах с негидростатической моделью MM5 выше, чем в реанализе ECMWF, данные которого использовались в качестве начальных и граничных условий. Осадки

в прогнозах по модели MM5 на 48 и 72 ч ближе к эталону, чем в прогнозах на 24 ч.

11. Введение дополнительной сетки с более высоким пространственным разрешением не привело к заметному улучшению характеристик прогностических осадков.

12. Заблаговременность прогноза существенно влияет на временной ход суточных сумм прогностических осадков.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Егорова Е.Н. 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.

2. Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Егорова Е.Н. Влияние температуры поверхности океана и вариации уровня шероховатости на свойства азиатского муссона (анализ результатов численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России). // Тезисы докладов конференции молодых учёных: Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата, 19-21 июня 2001 г. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат. – 2001. – с. 29.

3. Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Егорова Е.Н. Влияние удвоения концентрации углекислого газа и аэрозоля на распределение осадков в численных экспериментах с моделью общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России. // Тезисы докладов научной конференции по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга природной среды в государствах – участниках СНГ, посвящённая 10-летию образования Межгосударственного совета по гидрометеорологии, Санкт-Петербург, 23-26 апреля 2002 г. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат. – 2002. – с. 90-92.

4. Акимов И.В., Игнатов Р.Ю. Тестирование метода расчёта осадков, основанного на параметризации микрофизических процессов в облаках, с использованием средних месячных и ежедневных данных. // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации: Проблемы долгосрочного прогнозирования опасных явлений погоды. – Санкт-Петербург: Гидрометеониздат. – 2002. – с 125-140.

5. Игнатов Р.Ю., Гусева М.С., Рубинштейн К. Г. О влиянии удвоения концентрации углекислого газа на температуру и осадки. // География и Регион, III, Наблюдения, анализ и прогноз метеорологических условий: Материалы Международной научно-практической конференции (30 сентября – 4 октября 2002 г., г. Пермь). – Пермь. – 2002. – с. 6-9.

6. Акимов И.В., Игнатов Р.Ю. Использование метода расчёта осадков, основанного на параметризации микрофизических процессов в модели общей циркуляции атмосферы. // Информационные системы. – Вып. 2. – Томск. – 2003. – с. 13-18.

7. Игнатов Р.Ю. Сравнение эмпирических данных по испарению и осадкам. Анализ испарения и осадков в результатах численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России. // Фундаментальные и прикладные гидрометеорологические исследования. – Санкт-Петербург: Гидрометеониздат. – 2003. – с. 131-149.

8. Акимов И.В., Игнатов Р.Ю. Реализация и тестирование на данных реанализа метода расчета интенсивности осадков на основе параметризации микрофизических процессов. // Вычислительные технологии. – Т. 9. – Ч. 1. – Специальный выпуск. – 2004. – с. 95-102.

9. Игнатов Р.Ю., Акимов И.В. Влияние вертикальной структуры температуры и влажности на расчёт осадков. // Вычислительные технологии. – Т. 10. – Ч. 1. – Специальный выпуск. – 2005. – с. 112-117.

10. Рубинштейн К.Г., Громов С.С., Хан В.М., Игнатов Р.Ю. Сравнение характеристик снежного покрова для бассейнов великих сибирских рек по

результатам численных экспериментов, данным наземных и спутниковых наблюдений и реанализов. // Вычислительные технологии. – Т. 10. – Ч. 1. – Специальный выпуск. – 2005. – с. 118-124.

11. Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Новикова И.В., Гусева М.С., Гранберг И.Г. Динамическая детализация краткосрочных численных прогнозов с помощью региональной численной модели на примере курортного региона Минеральные воды. // Метеоспектр. – 2005. – № 3. – с. 68-70.

12. Berkovich L.V., Rubinstein K.G., Ignatov R.Ju., Kalugina G.U., Krichak S.O., Tsidulko M.V., Zacharov I.E. Adaptation of the PSU\NCAR MM5 for high-resolution weather prediction over Russia. // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. – Report N 35. – APRIL 2005. – WMO. – p. 202-205.

13. Игнатов Р.Ю. Воспроизведение осадков над регионами Европы и Центром России. // Метеоспектр. – 2006. – №1. – с. 104-110.

14. Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г. Исследование влияния мегаполисов на региональные осадки. // Тезисы стендовых докладов международной конференции по проблемам гидрометеорологической безопасности (прогнозирование и адаптация общества к экстремальным климатическим изменениям), 26-29 сентября 2006 г., Москва. – 2006, с. 32.

15. Андреев П.Н., Клеванный К.А., Колесов А.М., Мостаманди С., Либерман Ю.М., Цепелев В.Ю., Игнатов Р.Ю., Новикова И.В., Рубинштейн К.Г. Оперативное прогнозирование невыхских наводнений. // Тезисы стендовых докладов международной конференции по проблемам гидрометеорологической безопасности (прогнозирование и адаптация общества к экстремальным климатическим изменениям), 26-29 сентября 2006 г., Москва. – 2006. – с. 78.

16. Арутюнян Р.В., Семенов В.С., Сорокикова О.С., Фокин А.Н., Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Новикова И.В. Экспериментальная информационная система поддержки реагирования на радиационные аварии

в Мурманской области. // Тезисы стендовых докладов международной конференции по проблемам гидрометеорологической безопасности (прогнозирование и адаптация общества к экстремальным климатическим изменениям), 26-29 сентября 2006 г., Москва. – 2006. – с. 79.

17. Рубинштейн К.Г., Громов С.С., Хан В.М., Игнатов Р.Ю., Золоева М.В. Формирование и таяние снежного покрова в бассейнах великих рек Сибири. // Труды государственного учреждения «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»: Морские и речные гидрометеорологические прогнозы. – Вып. 341. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат. – 2006. – с. 151-165.

18. Рубинштейн К.Г., Громов С.С., Игнатов Р.Ю. Оценка воспроизведения характеристик снежного покрова в моделях общей циркуляции атмосферы. // Известия Академии Наук: Серия «Физика атмосферы и океана». –Т.2. – 2007. – Принято к публикации.

