

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ)

На правах рукописи



Бундель Анастасия Юрьевна

Гидродинамическое моделирование атмосферных осадков на  
длительных интервалах времени

Специальность 25.00.30 - метеорология, климатология и агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2005

Работа выполнена в Гидрометеорологическом научно-исследовательском центре Российской Федерации (Гидрометцентр России)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
А.В. Муравьев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
В.П. Садоков

доктор физико-математических наук  
Е.М. Володин

Ведущая организация: Кафедра метеорологии и климатологии Географического факультета Московского Государственного Университета им. М.В.Ломоносова.

Защита состоится 2 марта 2005 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д327.003.01 Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации (Гидрометцентр России) по адресу: 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11-13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Гидрометцентра России

Автореферат разослан, 31 января 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор географических наук



Нестеров Е.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Гидродинамическое моделирование является одним из важнейших инструментов исследования геофизических процессов, в том числе и метеорологических. Существует целый ряд проблем, связанных с моделированием атмосферных процессов. Одна из них обусловлена наличием так называемого предела предсказуемости состояния самой атмосферы. Этот предел ограничивает применимость дифференциальных моделей такими интервалами времени, за пределами которых в прогностической практике используется термин «долгосрочный», или «длительный». Именно такое разделение интервалов определило название данной работы. В качестве модели рассматривается глобальная спектральная модель общей циркуляции атмосферы (ОЦА) Гидрометцентра России среднего класса (Т41L15).

Преодолеть предел предсказуемости невозможно по самому определению. Однако, как заметил в своей классической работе А.С. Монин в 1969 г., «оценки пределов предсказуемости следует рассматривать лишь как оценки *снизу*». Конструктивное решение проблемы долгосрочного прогноза заключается в нахождении тех или иных «характеристик метеорологических полей, являющихся предсказуемыми на эти сроки»

Отмеченная А.С. Мониним проблема до сих пор актуальна. Продолжаются активные поиски метеорологических величин (полей, процессов, явлений) и их характеристик (динамических, кинематических или статистических), которые можно использовать при решении методологических и прогностических вопросов долгосрочного моделирования.

Среди метеорологических величин естественно отбирать такие, которые обнаруживают «пространственную регулярность» и некоторую временную устойчивость. В списке труднопредсказуемых оказываются метеорологические элементы, которые сложно представить в виде более или менее гладкого поля. Гладкость поля (непрерывность до определенного порядка) важна при решении

дифференциальных уравнений, в которых приходится оперировать пространственными производными.

Такое погодное явление, как осадки, трудно представлять в виде гладкого поля, если не прибегать к осреднениям или суммированиям. В последние годы для более или менее адекватного описания «разрывного поля осадков» используется даже техника фрактальных множеств. Это «разрывное поле» трудно представить в виде разложения по гармоническим составляющим. Остается стандартная статистическая пространственно-временная фильтрация на сфере, сводящаяся к осреднениям или суммированиям по «физически однородным» пространственным областям. Особенность осадков как метеорологического элемента в первую очередь состоит в том, что в их формировании участвуют процессы разных масштабов - от молекулярного вязкого уровня через циклонический перенос к грандиозной глобальной зональной цепи внутритропической зоны конвергенции.

В моделировании и прогнозировании статистических характеристик непрерывных во времени и пространстве метеорологических полей (например, полей высот изобарических поверхностей и температуры в свободной атмосфере) к настоящему времени достигнуты заметные успехи, в то время как прогресс в моделировании «полей» осадков на длительных интервалах времени по указанным выше причинам идет гораздо более медленными темпами.

В настоящее время во всех основных метеорологических центрах мира проводятся испытания методов гидродинамического долгосрочного прогноза осадков. Можно утверждать, что успех в предсказании и моделировании глобальных осадков и их статистических характеристик является критической оценкой качества гидродинамического моделирования в целом.

Переход к прогнозу осредненных по некоторому региону и по времени величин с использованием ансамблей интегрированных модели, которые генерируются на основе каких-либо соображений (возмущенные начальные условия, стохастизация физики модели, использование нескольких моделей и т.д.), по-

звоняет *увеличить* период заблаговременности долгосрочного прогноза статистических характеристик метеорологических величин.

В практике мировых метеорологических центров наметилась вполне четкая тенденция в использовании класса моделей для двух диапазонов заблаговременности. Если для оперативного среднесрочного прогноза применяется модель некоторого пространственного разрешения, то для долгосрочного прогноза (на месяц - сезон - полугодие) используется, как правило, модель в два раза меньшего разрешения. И это обычно «предыдущая модель» оперативного использования. Экономия в разрешении позволяет реализовать ансамблевый подход.

При долгосрочном моделировании основной источник полезного сигнала создают аномалии медленно меняющихся граничных условий модели, главным образом, температуры поверхности океана (ТПО). При прогнозе реальные поля ТПО отсутствуют. Для их моделирования используются совместные модели океана и атмосферы, или статистические схемы прогноза полей ТПО, служащих граничными условиями атмосферной модели. Для оценки потенциала таких прогностических схем важно исследовать наличие чувствительности атмосферной модели к изменению граничных условий.

Таким образом, очевидна актуальность исследования результатов гидродинамического моделирования осадков в спектральной модели ОЦА Гидрометцентра России среднего класса на интервалах времени, превышающих средние сроки.

**Целью диссертационной работы** явилось решение следующих задач:

- оценка возможностей спектральной модели Гидрометцентра Т41L15 при моделировании аномалий осадков на месячных и сезонных интервалах времени; анализ систематических особенностей моделирования полей осадков с предписанными реальными значениями полей температуры поверхности океана (такой анализ позволяет оценить потенциальную предсказуемость аномалий осадков);

- исследование чувствительности осадков в модели к изменению условий на нижней границе атмосферы (температуры поверхности океана);
- исследование чувствительности осадков в модели T41L15 к изменению начальных условий, исследование эффекта ансамблевого моделирования;
- поиск взаимосвязи характеристик атмосферной циркуляции и полей осадков.

### **Научная новизна.**

Произведено выделение границ регионов на территории СНГ для оценки осредненных сумм осадков. Выделение делается на основе статистических характеристик полей осадков и физико-географической однородности регионов таким образом, чтобы значения ошибки осреднения были одного порядка в выбранных регионах.

Проведен анализ систематических ошибок спектральной модели ОЦЛ Гидрометцентра T41L15 при воспроизведении полей осадков на основе архива данных наблюдений GPCP.

Разработана система оценки качества воспроизведения среднемесячных аномалий осадков в спектральной модели ОЦА с учетом их пространственно-временного распределения. На основе этой методики рассчитаны оценки для среднемесячных полей осадков в регионах различного масштаба за период 1983-2002 гг. с учетом коррекции систематической ошибки и без него.

Сделана оценка чувствительности модели T41L15 к изменению начальных и граничных условий при интегрировании на временных интервалах, превышающих среднесрочный.

Применен метод вейвлет-анализа для выявления связи характеристик циркуляции и осредненных количеств осадков.

Применен метод ранговых диаграмм для оценки ансамбля интегрированных модели T41L15.

**Практическая ценность.**

Полученные среднемесячные поля осадков в модели T41L15 при осреднении за 20 лет (так называемый «климат модельных осадков») необходимы для дальнейших исследований по долгосрочному прогнозированию. Анализ систематических ошибок в модельных полях осадков позволяет сделать выводы о качестве модели в целом, о взаимодействии ее динамического блока и физических параметризаций.

Разработанная методика расчета оценок на основе таблиц сопряженности, учитывающая пространственно-временное распределение оцениваемой величины, примененная в диссертации для оценки аномалий осадков в трех градациях, может быть применена как для оценки аномалий, так и для любых других величин.

Оценка чувствительности атмосферной модели T41L15 к изменению нижних граничных условий (ТПО) важна для определения перспективы использования данной модели при создании совместной модели атмосферы и океана.

Выделенные на территории СНГ однородные регионы для сравнения осредненных количеств осадков могут быть использованы при верификации модельных осадков.

**Апробация работы.**

Результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах Гидрометцентра России, на конференции молодых ученых "Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата" (Санкт-Петербург, Россия, 2001 г.), на 26-й ассамблее Европейского геофизического общества (XXVI Assembly of the European Geophysical Society) (Ницца, Франция, 2001 г.), на совместной ассамблее Европейского геофизического общества, Американского геофизического союза и Европейского союза по наукам о Земле (European Geophysical Society, American Geophysical Union and European Geosciences Union Joint Assembly) (Ницца, Франция, 2003 г.), на Всемирной конференции по

изменению климата (WCCC 2003) (Москва, Россия, 2003 г.) и на 1-й Ассамблее Европейского союза по наукам о Земле (1<sup>st</sup> European Geosciences Union Assembly) (Ницца, Франция, 2004 г.).

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 140 страниц и содержит кроме основного текста 27 рисунков, 12 таблиц и список литературы из 131 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дается обоснование актуальности решаемых задач, показана научная новизна работы и кратко изложено содержание диссертации.

**В Главе 1** обсуждаются особенности объекта исследования — поля осадков, его распределения и факторов осадкообразования. Приводится краткое описание развития методов гидродинамического моделирования крупномасштабных и конвективных осадков.

Отдельный параграф посвящен теоретическому обоснованию и практической реализации метода гидродинамического прогнозирования на долгие сроки в разных странах.

Рассматриваются наземные и спутниковые методы измерения осадков, источники ошибок измерения, которые необходимо учитывать, особенности интерполяции стационарных измерений, методы объединения разнородных данных наблюдений за осадками. Проанализированы основные существующие в мире глобальные многолетние архивы количеств осадков, в частности, массивы использующихся для их создания данных измерений разных видов и особенности алгоритмов их объединения. Показано, что часть различий между архивами возникает из-за различия процедур интерполяции и объединения данных на-

блюдений за осадками, однако основные различия между архивами наблюдаются в регионах скудных данных прямых измерений осадков, главным образом, над океанами. Два сеточных архива рекомендованы ВМО (WMO - World Meteorological Organization), в качестве стандарта для оценки качества осадков, рассчитанных по моделям ОЦА - GPCP (Global Precipitation Climatology Program - Программа Глобального Климата Осадков) и CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation - Объединенный анализ осадков Центра предсказания климата). Они описываются подробно с анализом различий между ними. В работе выбор архива наблюдений для верификации модельных осадков был остановлен на GPCP, поскольку в нем наряду с месячными и пентадными данными имеются также суточные данные. Тем не менее, при оценке результатов моделирования осадков в регионах, плохо охваченных данными наблюдений, следует иметь в виду, что сами архивы наблюдений могут быть неточными. Это составляет одну из принципиальных проблем при моделировании осадков, пока непреодолимую.

**В Главе 2** дается описание глобальной спектральной модели ОЦА Гидрометцентра России T41L15, интегрирование которой с различными начальными и граничными условиями составляет метод данного исследования. Подробно описывается параметризация крупномасштабной конденсации влаги, в результате которой образуются крупномасштабные осадки в модели, и параметризация конвекции по методу Куо, в которой рассчитывается количество конвективных осадков. В модели T41L15 результаты расчетов представляются на гауссовой сетке с пространственным разрешением 128X64 точек. В некоторых случаях они интерполируются на регулярную широтно-долготную сетку 144 x 73 ( $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ).

Описывается методика выделения границ регионов на территории СНГ для оценки осредненных сумм осадков. Регионы различной площади на территории СНГ для сравнения модельных осадков выделялись по признаку их физико-географической однородности с учетом пространственного распределения климатического значения коэффициента вариации осадков, радиуса корреляции

корреляционной функции поля осадков и меры ошибки измерений. При этом рассчитывалась ошибка осреднения стационарных данных в каждом из регионов по выведенной Л.С. Гандиным и Р.Л. Каганом формуле (3) в случае, когда корреляционная функция поля осадков описывается экспоненциальной зависимостью:

$$r'(\rho) = r'(0)e^{-\frac{\rho}{l_0}}, \quad (1)$$

где  $l_0$  - радиус корреляции,  $\rho$  - расстояние,  $r'(0)$  - значение корреляционной функции при  $\rho = 0$ . Значение  $r'(0)$  эмпирической корреляционной функции не равно 1 и связано с мерой ошибки в исходных данных  $\eta^2$  соотношением

$$\eta^2 = \frac{1 - r'(0)}{r'(0)}. \quad (2)$$

Мера  $\eta^2$  характеризует вклад в общую дисперсию поля случайных ошибок измерений и, особенно, микроклиматической изменчивости осадков. Формула относительной средней квадратической погрешности среднего арифметического из  $n$  наблюдений на станциях, расположенных на площади  $S$  при  $\sqrt{S/n} < 2l_0$  и при корреляционной функции (1) дается выражением

$$Z(n, S) = C_v \sqrt{\frac{\eta^2}{n} + 0.23 \frac{\sqrt{S}}{l_0 n^{3/2}}}, \quad (3)$$

где  $C_v = \frac{\sigma}{\bar{R}}$  - коэффициент вариации сумм осадков во времени,  $\sigma$  - среднее квадратическое отклонение,  $\bar{R}$  - средняя многолетняя осадков по площади. Эта формула выведена в предположении равномерно расположенных по площади станций. Данные  $C_v$ ,  $\eta^2$  и  $l_0$  взяты с карт, построенных А.А. Исаевым. Окончательные размеры регионов определялись таким образом, чтобы значения этой ошибки осреднения были близки. Для расчета ошибки осреднения использовался архив по 120 станциям на территории СНГ, подготовленный в ВНИИГ-

МИ-МЦД (Обнинск). В результате выделено 11 однородных регионов на территории СНГ для сравнения осредненных сумм осадков.

**Глава 3** посвящена анализу воспроизведения модельных осадков, осредненных за 20-летний период ретроспективных интегрирований (model hindcasts) модели, т.е., «модельному климату» осадков, анализу систематических ошибок в модельных полях осадков, а также оценке качества воспроизведения модельных среднемесячных аномалий осадков.

Ретроспективные интегрирования глобальной модели ОЦА T41L15 проводились от начальных данных за последнее число каждого месяца на месяц вперед в течение двадцатилетнего периода с 1983 по 2002 гг. В качестве начальных и граничных условий для модели использовались данные реанализа NCEP-NCAR.

Эксперименты проведены в условиях предписанных реальных полей нижних граничных условий модели (ГПО), и таким образом, представляют собой идеализированный вариант моделирования, который нельзя реализовать при *прогнозе*. Такое исследование дает представление о верхней границе потенциальной предсказуемости.

Климат модельных суммарных осадков получен среднеарифметическим осреднением данных каждого месяца за 20 лет. Для сравнения с модельными данными климат данных наблюдений GPCP получен осреднением за тот же период (1983-2002 гг.).

На рис. 1 представлены графики зонально осредненных среднемесячных количеств осадков по модельным расчетам и по данным наблюдений. Установлено, что в среднезональном распределении осадков в модели и по данным наблюдений в январе и июле имеется как бы зеркальная симметрия. В зимнем полушарии количество осадков завышается, за исключением полос около 55-65° широты и 25-40° широты. В летнем полушарии количество осадков в модели значительно ниже, чем по данным наблюдений, за исключением околополяр-

ных широт. Такое распределение может объясняться недостатками параметризации радиационных процессов в модели.

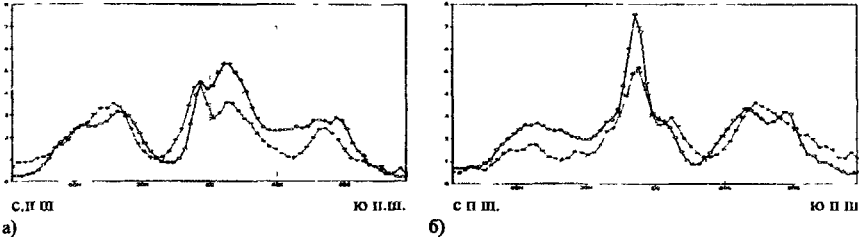


Рис. 1. Зонально осредненные количества суммарных осадков в январе (а) и июле (б) по модельным расчетам (линия с залитыми кружочками) и по данным наблюдений GPCP (линия с пустыми кружочками), мм/сут. 1983-2002 гг.

Сравнение карт суммарных осадков по модельным расчетам и данным наблюдений GPCP показало, что основные географические особенности климатического распределения осадков воспроизводятся моделью.

Анализ карт распределения систематических ошибок *Model - Fact*, где *Model* - модельные данные, *Fact* - данные наблюдений, позволяет сделать следующие выводы:

В январе:

- Модель занижает количество осадков над преобладающей частью континентов южного полушария и в районе Индонезии.
- Модель завышает количество осадков в тропиках над Северным Индийским океаном, к востоку от п-ова Мадагаскар, у п-ова Индокитай, над Центральной Америкой, и в районе 20° западного побережья Южной Америки. Во внетропических широтах - на западных побережьях материков северного полушария.

В июле:

- Модель занижает количество осадков к северу от экватора, т.е., в модели плохо воспроизводится климатическое смещение внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) в северное полушарие в июле. Также сильно занижаются осадки над Северной Индией и Южным Китаем, что, скорее всего, связано с недостатками представления орографии в модели.

- В связи с этим модель завышает количество осадков к юго-западу от п-ова Индостан, где насыщенный влагой экваториальный воздух, пришедший с юго-западными потоками летнего Индийского муссона, наталкивается на орографическое препятствие.

Постоянное занижение осадков над Сахарой, а также постоянное завышение осадков над Гренландией и Антарктидой может быть связано с недостатками параметризации процессов на поверхности суши. В Северо-Западной Атлантике наблюдается занижение модельных осадков.

Анализ относительных ошибок осадков  $RE = \frac{Model - Fact}{Fact} \times 100\%$  показал, что значения минимальных  $RE$  постоянно наблюдаются над всей территорией Африки, Австралии, большей части Бразилии. Максимальные  $RE$  в январе наблюдаются в Центральной Америке, северной части Индийского океана, в полярных широтах Северной Америки, над Сибирским антициклоном, и Антарктидой. Максимальные  $RE$  в июле наблюдаются на востоке Тихого океана к югу от экватора, над Мадагаскаром, к северо-востоку от побережья Австралии, что говорит о невоспроизведении сдвига ВЗК в северное полушарие в июле. В июле сохраняются большие положительные  $RE$  над Антарктидой и Гренландией.

**Для оценки качества воспроизведения среднемесячных аномалий за каждый год периода 1983-2002 г.** предложена методика, основанная на построении таблиц сопряженности с градациями ниже, около и выше нормы. Нижняя и верхняя границы градации «около нормы» определяются как значения 33 и 66 перцентилей распределения фактических аномалий за период эксперимента в каждой точке сетки. При этом в каждую градацию попадает треть случаев. Для расчета перцентилей используется метод порядковой статистики, обладающий свойством робастности. Робастный метод удобен тем, что при определении границ «около нормы» автоматически учитывается функция распределения конкретного ряда, и не требуется ее явный расчет. Это особенно важно для оценки осадков, распределение которых отличается от нормального, даже

при осреднении. Таким образом учитываются особенности климатического распределения аномалий в конкретной точке.

Рассчитаны аномалии с учетом коррекции систематических ошибок модели и без учета. Значение коррекции в каждой точке сетки определяется по

формуле  $\frac{\sum_{u=1}^{N_y} (Model_u - Fact_u)}{N_y}$ , где  $N_y$  - количество лет,  $Model$  - значение модельных осадков,  $Fact$  - значение осадков по данным наблюдений (в данном случае использовались среднемесячные значения). Значение коррекции затем вычитается из модельного значения, таким образом учитывается «модельный дрейф».

На основе таблиц сопряженности в регионах разных масштабов, от регионов на территории СНГ, до региона, охватывающего внетропические широты северного полушария, рассчитываются показатель качества  $P_1$  (4) и мера мастерства Хайдке (5).

$$P_1 = (n_{11} + n_{22} + n_{33}) / N. \quad (4)$$

$P_1$  характеризует долю точных прогнозов - отношение суммы диагональных элементов таблицы сопряженности  $(n_{11} + n_{22} + n_{33})$  к общему числу прогнозов  $N$ .

$$HSS = (C - E) / (N - E), \quad (5)$$

где  $C$  - сумма точных прогнозов, т.е. диагональных элементов таблицы сопряженности  $(n_{11} + n_{22} + n_{33})$ ,  $E$  - число прогнозов, которые оправдались бы за счет случайного прогноза,  $E = (n_{01}n_{10} + n_{02}n_{20} + n_{03}n_{30}) / N$ ,  $N$  - общее количество случаев. Отрицательные значения  $HSS$  означают, что численный прогноз дает результаты хуже случайного прогноза.

Для регионов различного масштаба построены графики квартильного анализа (boxes and whiskers) (пример такого графика для внетропических широт северного полушария приведен на рис. 2), характеризующие годовой ход распределения оценок за исследуемый 20-летний период. На графиках квартильного анализа линия в центре прямоугольника обозначает медиану, верхняя и нижняя границы прямоугольника 75 и 25 процентиля (или квартили) соответственно, верхняя и нижняя засечки линий обозначают диапазон остального распре-

деления. Крестик обозначает выброс. Точка внизу ставится, если выбросы отсутствуют.

Проанализированы процентные разности оценок расчета модельных аномалий осадков с коррекцией и без коррекции, что позволяет оценить эффект учета систематических ошибок модели. Показано, что качество практически во всех случаях превышает качество случайного прогноза. Учет систематической ошибки позволяет улучшить воспроизведение аномалий осадков, но не так значительно, как учет систематической ошибки в гладких полях, распределение которых близко к нормальному. Наблюдается сезонный ход ошибки моделирования среднемесячной аномалии. В большинстве регионов наилучшее качество достигается в весенне-осенние месяцы, хуже всего качество модельных аномалий в большинстве регионов в августе (внетропические широты северного полушария, 1 Естественный синоптический регион (ЕСР), Европа). В 3 ЕСР и регионе Северная Америка наиболее высокие оценки наблюдаются в мае-июне-июле. Показано, что случаи успешного воспроизведения аномалий осадков совпадают с успешным воспроизведением поля циркуляции.

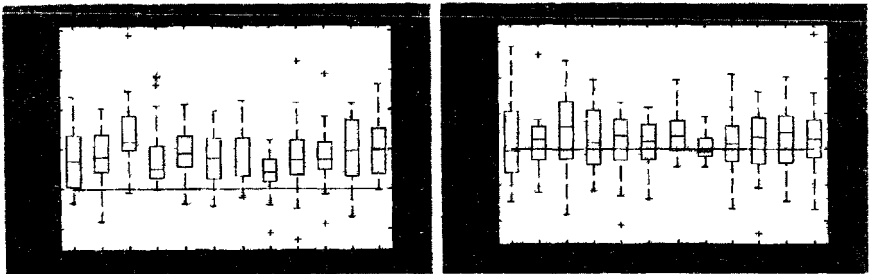


Рис. 2. Графики квартального анализа (boxes and whiskers) по 20 годам оценки HSS (5), построенной по модельным данным с коррекцией систематической ошибки (слева) и разности оценки HSS по модельным данным с коррекцией и без коррекции, умноженной на 100% (справа).

**В Главе 4** дается оценка влияния различных внешних воздействий, выражающихся в изменении нижних граничных условий модели (полей температуры поверхности океана - ТПО), на результаты глобального сезонного моделирования атмосферы при неизменных начальных условиях.

Переход к сезонному интервалу времени обусловлен следующими причинами:

- Прогноз на сезонном интервале представляет наибольший практический интерес.
- Влияние ТПО начинает сказываться лишь после двухнедельного интегрирования модели.

В рамках этого исследования разработана схема проведения экспериментов с различными комбинациями полей граничных условий ТПО по данным наблюдений, отражающими наиболее важные характерные состояния ТПО - ТПО конкретного года (эксперимент S1), климатические поля ТПО (S2), ТПО, характерные для явлений Эль-Ниньо (S3) и Ла-Нинья (S4). Данные моделирования сравниваются с данными наблюдений - данными реанализа NCEP/NCAR для полей циркуляции и с данными GPCP для полей осадков. Модель интегрировалась от начальной даты 30 апреля 2003 г. на 4 месяца вперед (130 дней).

Для внетропических широт северного полушария для каждого месяца периода сезонного интегрирования модели с реальными ТПО (эксперимент S1) с мая по август 2003 года рассчитаны оценки (4) и (5). В большинстве регионов мера мастерства Хайдке (HSS) в июне значительно выше, чем в мае. В последние месяцы также имеется значительное превышение качества над случайным прогнозом. В августе оценки в целом хуже, но в 1 ЕСР, в регионах Европа и Северная Атлантика HSS весьма высоки. Таким образом, данные эксперимента S1 демонстрируют определенный потенциал модели в воспроизведении аномалий осадков во внетропических широтах.

Чтобы проверить гипотезу о происхождении основного источника сигнала из тропиков были проведены эксперименты с введением реальных ТПО только в тропических и только во внетропических широтах (на остальной территории задавались климатические значения ТПО). Показано, что характерные черты поля циркуляции (например, гребень высокого давления в Европе, определяющий успешность моделирования осадков в августе в регионе Европа и в 1

ЕСР) воспроизводятся только при задании реальных ТПО в тропических широтах.

Существует множество данных о наличии взаимного влияния аномалий внетропической циркуляции и аномалий муссонных осадков. Не уточняя причинно-следственных механизмов, композитные разности поля высоты геопотенциала H200 гПа по данным реанализа NCEP-NCAR в годы с сильным и слабым Индийско-Азиатским муссоном свидетельствуют о наличии связи между полем высоты геопотенциала и муссонными аномалиями. В июне сильный Индийско-Азиатский муссон соответствует значительной положительной аномалии высоты геопотенциала над средиземноморским регионом и в субтропических широтах в Северной Атлантике, а также отрицательной аномалии в умеренных и высоких широтах Атлантического океана и Северной Европы. В августе, когда Индийско-Азиатский муссон постепенно ослабевает, связи несколько слабее.

Карты аномалий месячных осадков и расчеты оценок свидетельствуют об успешном воспроизведении осадков моделью T41L15 в регионе Индийско-Азиатского муссона в 2003 г. По данным наблюдений в 2003 г. наблюдалась в целом положительная аномалия осадков данном регионе.

Смоделированные и наблюдаемые аномалии циркуляции для региона Северная Атлантика-Европа находятся в хорошем соответствии между собой в июне, июле и августе. Структура их близко соответствует структуре, формирующейся в годы сильного Индийско-Азиатского муссона. Это свидетельствует в пользу предположения о связи успешного воспроизведения осадков Индийско-Азиатского муссона и циркуляции в субтропиках и умеренных широтах Атлантики и Европы, которое в свою очередь способствует правильному моделированию аномалий осадков в 1 ЕСР и в регионах Северной Атлантики и Европы. Данный вывод подтверждается также данными суточных коэффициентов корреляции между поверхностью геопотенциала H200 гПа и осадками в районе Индийско-Азиатского муссона.

Для выявления связи осадков и циркуляции используются различные статистические методики. В данной работе на примере Европейского региона показано, что удобным средством поиска этих связей является вейвлет-анализ.

Данные получены в результате непрерывного интегрирования модели на три месяца с климатическими значениями ТПО («контрольный» эксперимент) и с реальными данными о ТПО за конкретный год («аномальный» эксперимент).  
Период эксперимента: 1 января - 31 марта 2000 г.

Режимы циркуляции хорошо характеризуются индексами атмосферных колебаний, предложенными Дж.М. Уоллесом и Д.С. Гатцлером. В общем виде такие индексы представляются следующим образом:

$$I = \frac{1}{p_j} \sum_{j=1}^k \left( \frac{\pm \Delta H_{j500}}{\sigma_j} \right),$$

где  $\Delta H_{j500}$  - аномалия поля H500 гПа в точке j, взятая со знаком + или - в зависимости от знака соответствующей структуры;  $\sigma_j$  - ее среднее квадратическое отклонение, k - число точек,  $p_j$  - вес точки j ( $\sum_{j=1}^k p_j = 1$ ). Индекс Восточно-Атлантического колебания определяется как

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta H_{500}(55N,20W)}{\sigma(55N,20W)} - \frac{1}{4} \frac{\Delta H_{500}(25N,25W)}{\sigma(25N,25W)} - \frac{1}{4} \frac{\Delta H_{500}(50N,40E)}{\sigma(50N,40E)}.$$

Рассматривались разности этих индексов, рассчитанные по результатам «аномального» и «контрольного» экспериментов,  $\Delta EA = EA_A - EA_K$ .

На рис. 3 представлены графики временного хода осредненных по территории Европы разностей суточных сумм осадков и индекса Восточно-Атлантического колебания, рассчитанных по результатам «аномального» и «контрольного» экспериментов. На рис. 3, а представлены исходные данные, а на рис. 3, б данные с вейвлет-фильтрацией высокочастотных составляющих (третий уровень аппроксимации, вейвлет-функция - dmeu). Как видно из рисунка, увеличение индекса Восточно-Атлантического колебания, соответствующее усилению ложбины над Европой, на интервалах от 20 до 30 сут. приводит к увеличению количества осадков на территории Европы. И наоборот, на

интервале от 35 до 50 сут, когда значения индексов оказываются заниженными и указывают на развитие блокирующего процесса на территории Европы, количество осадков уменьшается. Таким образом, применение вейвлет-анализа позволяет произвести фильтрацию данных и выявить локальные особенности временного распределения, общие для крупномасштабных осадков и индексов циркуляции. Обнаруживается взаимосвязь изменчивости атмосферной циркуляции и осадков, обусловленной влиянием граничных условий (вынужденная изменчивость).

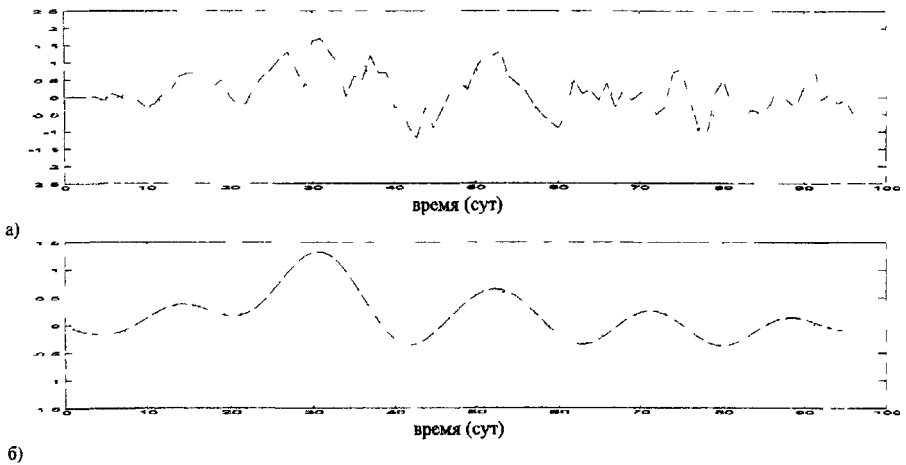


Рис. 3. (а) - временной ход разностей суточных сумм осадков (мм/сут) в Европейском регионе ( $0-40^{\circ}$  в д.,  $40-65^{\circ}$  с.ш.) и индексов Восточно-Атлантического колебания (ДЕЛ), рассчитанных по результатам «аномального» и «контрольного» экспериментов, (б) - те же элементы, но подвергшиеся вейвлет-разложению. (Третий уровень аппроксимации, вейвлет-функция -  $dmey$ ).

Линия с длинным пунктиром - ДЕА, линия с коротким пунктиром - осадки.

К числу основных предполагаемых источников полезного сигнала в умеренных широтах при сезонном прогнозировании относится явление Эль-Ниньо и противоположное ему явление Ла-Нинья. В связи с этим для оценки чувствительности модели к аномалиям ТПО при Эль-Ниньо/Ла-Нинье проведены эксперименты S3 и S4, в которых в качестве граничных условий задается композитное среднее поле ТПО, характерное для лет с Эль-Ниньо/Ла-Нинья соответ-

ственно. Для оценки адекватности отклика модельных полей осадков и циркуляции на внешнее воздействие ТПО использован метод композитных разностей. Такой метод предполагает, что важнейшие для создания отклика черты внешнего воздействия (в данном случае, ТПО) могут быть отражены в едином индексе (в данном случае, в значении индекса Nino-3). Композитные разности строятся для полей, в которых предполагается найти отклик, осредненных за периоды, когда значения индекса приобретают экстремальные значения. Модельные разности среднемесячных полей в экспериментах S3 и S4 сравниваются с аналогичными полями разностей по данным наблюдений, т.е., с разностями композитных средних полей за годы с сильными проявлениями Эль-Ниньо и Ла-Ниньи.

Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

- Воспроизводится увеличение осадков в центральной и восточной части приэкваториальной зоны Тихого океана.
- По модельным данным прослеживается подковообразная структура положительных разностей у экватора, окруженных отрицательными разностями, однако не очень хорошо воспроизводятся отрицательные разности в южной части этой структуры (над Индонезией). В августе воспроизведение подковообразной структуры хуже.
- Уменьшение осадков на северо-востоке Южной Америки в годы с Эль-Ниньо относительно лет с ла-Ниньей не воспроизводится моделью.
- Над континентами в умеренных широтах чувствительность к введению среднекомпозитных полей ТПО, характерных для Эль-Ниньо/Ла-Ниньи завышена по сравнению с данными наблюдений.
- Области наилучшего воспроизведения сигнала в полях осадков и геопотенциала совпадают.

**В Главе 5** для оценки масштаба внутренней изменчивости модельных полей проведен эксперимент с использованием ансамблей, построенных по ва-

риациям начальных данных. Вариации создаются с помощью лагового метода (от английского «lagged» - со сдвигом по времени), состоящего в том, что начальные данные берутся со сдвигом назад от исходной даты. В данной работе был выбран сдвиг, равный 12 часам. Было получено 10 членов ансамбля.

Изменчивость регионально осредненных суточных сумм осадков по ансамблю сравнивалась с изменчивостью суточных сумм осадков по данным наблюдений GPCP за 5 лет, которая в определенной мере отражает степень климатической изменчивости. Данные для Восточно-Атлантического-Европейского региона показали, что разброс траекторий членов ансамбля сопоставим с изменчивостью осадков по данным наблюдений GPCP и несколько уменьшается к концу периода интегрирования. За исключением небольшого периода модели не удается воспроизвести реальную аномалию конкретного года в суточных значениях.

Для оценки качества ансамблевого прогноза был применен метод ранговых гистограмм, в котором учитывается попадание факта  $F$  в пределы одной из  $m+1$  градаций ранжированного ряда из  $t$  членов ансамбля. Функция распределения членов прогностического ансамбля по идеальной модели совпадает с функцией распределения фактической величины. Это выражается в строго равномерном расположении результирующей кривой. Более или менее равномерное расположение кривой свидетельствует об удовлетворительном качестве построенной ансамблевой схемы. Пики в ранговой гистограмме обнаруживают систематику модельного ансамбля.

Гистограммы строились по количеству случаев, равному количеству точек модельной сетки, умноженному на 90 дней интегрирования. Т.о., выполняется условие достаточности прогностических эпизодов. Ранговые гистограммы для Восточно-Атлантического-Европейского и Тихоокеанско-Северо-Американского регионов показали, что в большинстве случаев только меньший по рангу член ансамбля из 10 членов воспроизводит реальное значение, т.е., как правило, ансамбль завышает количество осадков.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведено сопоставление основных мировых архивов наблюдений за глобальными осадками и выделены регионы удовлетворительного согласования и регионы крупных различий в характеристиках крупномасштабных осадков.
2. На основе физико-статистических принципов проведено районирование территории СНГ по однородности полей суммарных осадков.
3. Впервые для спектральной модели Гидрометцентра России на основе архива осадков (ГРСР) проанализирован «климатический дрейф» при гидродинамическом воспроизведении осредненных сумм осадков за 20-летний период с детализацией годового хода систематической ошибки.
4. Разработана и реализована в программных кодах система оценок качества воспроизведения аномалий осадков с учетом их пространственного распределения.
5. Проведены численные эксперименты и даны оценки чувствительности полей осадков и характеристик общей циркуляции атмосферы к вариациям температуры поверхности океана на сезонном интервале интегрирования.
6. Для выявления взаимосвязи между характеристиками циркуляции (ВАО) и осредненными крупномасштабными осадками (Европа) использованы вэйвлет-фильтры, учитывающие нестационарные особенности временных рядов.
7. Проведены численные эксперименты и даны ранговые оценки качества ансамблевого моделирования полей осадков в зимний сезон.

### **По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. Бундель А.Ю. Коррекция осредненных модельных полей осадков с использованием обобщенных критериев бароклинической неустойчивости. // Труды конференции молодых ученых "Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата". Под ред. В.П. Мелешко и Б.Е. Шнеерова. Санкт-Петербург, Гидрометеиздат - 2002 - с. 215-222.

2. Муравьев, А.В., В.Д. Казначеева, Е.Н. Круглова, И.А. Куликова, А.Ю. Бундель. Комплексный гидродинамико-статистический прогноз средних 10-, 20- и 30-суточных полей высоты изобарических поверхностей 500, 850 и 100 гПа, приземного давления в узлах сетки по северному полушарию и приземной температуры воздуха по станциям России и СНГ. // Гидрометцентр, Информационный сборник №29. Результаты испытания новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов. Под ред. Г.К. Веселовой - Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат - 2002. - с. 17-35.
3. Бундель А.Ю. Моделирование зимних осадков с учетом реальных аномалий температуры поверхности океана. // В сб. Фундаментальные и прикладные гидрометеорологические исследования. Под ред. Р.М. Вильфанда - Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат - 2003 г. - с. 109-115.
4. Муравьев А.В., Куликова И.А., Круглова Е.Н., Бундель А.Ю. Анализ вынужденной изменчивости атмосферы с помощью вейвлет-фильтрации модельных данных. В сб. Фундаментальные и прикладные гидрометеорологические исследования. Под ред. Р.М. Вильфанда - Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат. 2003 г., с. 24-36.
5. А.Ю. Бундель. Анализ согласованности облачности и осадков при моделировании атмосферных процессов на долгосрочных интервалах. // Тезисы докладов конференции молодых ученых национальных гидрометслужб стран СНГ, Москва, декабрь, 1999. 1999. - с.29-30.
6. Bundel A.Yu., Murav'ev A.V. The Role of Different Scale Processes in Precipitation Modeling. // Geophysical Research Abstracts, Vol. 3, GRA3, 3956. European Geophysical Society. - 2001.
7. Бундель А.Ю. Коррекция осредненных модельных полей осадков с использованием обобщенных критериев бароклинной неустойчивости. // Тезисы конференции молодых ученых "Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата", Санкт-Петербург, 19-21 июня 2001.
8. Bundel A., I. Kulikova, E. Kruglova, A. Muraviev. Large-Scale Circulation Patterns, Instability Factors and Global Precipitation Modeling as Influenced by External

Forcing. // Geophysical Research Abstracts Vol.5, 00533. European Geophysical Society.-2003.

9. Бундель А.Ю. Анализ чувствительности модельных осадков к аномалиям ГПО. // Тезисы Всемирной конференции по изменению климата (WCCC 2003), Москва, 2003. - 2003. - с. 488.

10. Meneguzzo, F., M. Baldi, A. Bundel, F. Cesarone, F. Piani. Links of the seasonal precipitation in Europe and Northern Africa to the global sea surface temperatures in gridded observational datasets and in model integrations. // Geophysical Research Abstracts, Vol. 6, 01630. - 2004.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. Bundel', written in a cursive style.



Издательская лицензия ЛР № 065802 от 09.04.98.

Подписано в печать 26.01.2005.

Усл. печ. л. 1,5

Тираж 100 экз. Заказ 20.

Отпечатано в типографии ООО «Мультипринт»  
121352, г. Москва, ул. Давыдовская, д. 10, корп. 6.

Тел.: 230-44-17



25.00

22 MAR 2005

14