

УДК 551.511.072

На правах рукописи



Ваниха Паскаль Феликс

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ  
В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АССИМИЛЯЦИИ ДАННЫХ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

10 ДЕК 2009

г. Санкт-Петербург 2009 г.

Диссертация выполнена на кафедре метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,  
*С.П. Смышляев*

Официальные оппоненты : доктор географических наук, профессор  
*И.Н.Русин*  
кандидат физико-математических наук, доцент  
*К.Л.Егоров*

Ведущая организация: Главная геофизическая обсерватория  
имени А.И.Воейкова

Защита диссертации состоится "17" Декабря 2009 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу:  
**195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 444-41-63.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу:  
**195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.**

Автореферат разослан "17" ноября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,



доктор физ.-мат. наук  
профессор А.Д. Кузнецов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Тропические циклоны (ТЦ) относятся к наиболее интенсивным вихрям синоптического масштаба тропической атмосферы, образующимся, главным образом, над океанской поверхностью. Скорость ветра в них достигает до 50 м/с, что может привести к значительному экономическому ущербу и человеческим жертвам в случае выхода ТЦ на сушу. По статистическим данным ООН, из крупных стихийных бедствий, которые произошли во всем мире за последние 50 лет, на вызванные тропическими циклонами приходится 30% от значительных ущербов, 19% от потерь жизни, и 20% от общего числа пострадавших. Заблаговременный прогноз траекторий тропических циклонов позволяет провести эвакуацию населения и имущества из района, на который надвигается стихийное бедствие.

Проблема прогноза эволюции тропических циклонов является особенно актуальной для Юго-Восточной Африки. Несмотря на то, что над юго-западной частью Индийского океана бывает в среднем до 10 тропических циклонов в год, особенности их развития в этом регионе очень мало изучены по сравнению с тропической зоной северного полушария, для которой в последнее время было проведено достаточно много экспериментов с целью улучшения прогнозирования развития тропических циклонов с использованием разных подходов. Между тем, регион Юго-Восточной Африки сталкивается со многими проблемами в прогнозировании тропических циклонов в силу различных факторов (недостаток данных наблюдений над Индийским океаном, несовершенные технологии в методах прогнозирования, плохая экономическая ситуация и т.д.), поэтому любой, даже самый маленький, шаг в направлении улучшения качества прогнозирования траекторий и интенсивности ТЦ и места их выхода на сушу, может быть использован для предотвращения или, хотя бы, для уменьшения влияния ТЦ, выходящих на сушу и вызывающих много ущерба, потерь имущества и даже гибели людей.

В этой связи, одной из актуальных задач тропической метеорологии является разработка и усовершенствование методов прогнозирования эволюции тропических циклонов в Юго-Западной части Индийского океана, а особенно прогноза их траекторий, интенсивности, места и времени выхода на сушу. В ряду методов прогнозирования развития ТЦ одним из основных является численное моделирование с использованием региональных гидродинамических моделей. При этом одной из важнейших задач численного моделирования эволюции тропических циклонов является задание начальных данных о структуре тропических циклонов и соответствующих синоптических условиях. Тропические циклоны, в основном, зарождаются и развиваются над океанами и морями, где метеорологических наблюдений очень мало, или они отсутствуют, что приводит к проблемам качества начальных данных для моделей прогноза траекторий и интенсивности тропических циклонов.

Один из наиболее общепринятых подходов в деле улучшения качества исходных данных для численного моделирования – это использование процедуры ассимиляции данных (комбинирование данных наблюдений с результатами модельных расчетов). Однако, как показывает практика, качество прогноза тропических циклонов зависит не только от точности модельных расчетов (фоновое поле) и выбранного метода ассимиляции данных, но и от достоверности исходной информации о циклоне: его положении, значении давления в центре ТЦ, максимальной скорости ветра и т.д.

Для решения актуальной проблемы точности задания начальных данных о структуре ТЦ для моделирования развития тропических циклонов в Юго-Западной части Индийского океана в настоящей работе предлагается метод задания искусственного асимметричного вихря в том месте, где фактически располагался ТЦ. Для тестирования метода искусственного вихря и исследования его влияния на качество прогнозов развития тропических циклонов используется региональная модель высокого разрешения WRF с блоком ассимиляции данных.

**Целью работы** является - разработка и усовершенствование метода прогнозирования траекторий тропических циклонов и их интенсивности над юго-западной частью Индийского океана с помощью ассимиляции искусственных данных региональной гидродинамической моделью

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Выбор модели и ее оптимальная настройка для прогноза тропических циклонов в юго-западной части Индийского океана:
  - Исследование чувствительности модели к разным схемам микрофизики,
  - Исследование влияния схем описания пограничного слоя на прогноз эволюции тропических циклонов в исследуемом регионе
2. Подготовка данных метеорологических наблюдений наземного базирования (синоптических и радиозондов ) для проведения ассимиляции данных в гидродинамической модели.
3. Разработка методики и практическая реализация генерирования искусственных симметричных профилей ветра и давления на основе данных наблюдений из сводок о тропическом циклоне.
4. Разработка методики добавления асимметричной компоненты к симметричным искусственным профилям для получения окончательной асимметричной структуры начальных данных о ТЦ, ассимилируемой моделью;
5. Проведение модельных экспериментов развития ТЦ с разными методами задания начальных данных;
6. Оценка успешности прогноза интенсивности и траекторий ТЦ при использовании разных методов ассимиляции данных над исследуемым регионом.

**Методы исследования.** Для достижения целей исследования и решения поставленных задач проводились численные эксперименты с региональной гидродинамической моделью WRF, с использованием ассимиляции данных для формирования исходной информации о тропическом циклоне, и последующим статистическим анализом результатов расчетов.

**Научная новизна**

- Впервые для формирования исходной информации о тропическом циклоне при моделировании его эволюции в Юго-Западной части Индийского океана использовался метод искусственного вихря;
- Получены новые оценки чувствительности прогностической системы WRF к схемам микрофизики и схемам описания пограничных слоёв прогнозов траекто-

рий и интенсивности тропических циклонов в юго-западной части Индийского океана;

- Получены новые оценки успешности прогнозов траекторий и интенсивности тропических циклонов в юго-западной части Индийского океана при использовании искусственных данных ассимиляции на основе: а) определения начального положения тропического циклона; б) интенсивности траектории и скорости перемещения тропического циклона; в) оценки выхода тропического циклона на сушу.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

- Метод ассимиляции искусственных начальных данных (BDA), предназначенный для улучшения качества моделирования траекторий и интенсивности тропических циклонов в юго-Западной части Индийского океана.
- Результаты чувствительности моделирования эволюции ТЦ к схемам микрофизики и описания процессов в пограничном слое.
- Оценки качества прогнозов траекторий и интенсивности тропических циклонов при использовании разных способов модельной ассимиляции данных.
- Оценки влияния метода задания начальных данных на прогноз места и времени выхода ТЦ на сушу.

#### **Личный вклад автора**

Все положения, выносимые на защиту, основаны на результатах исследований, проведённых непосредственно и лично автором. В публикациях, содержащих основные результаты диссертационной работы, автору принадлежат идеи исследования, формулировка проблем, постановка задач и интерпретация полученных результатов. Выбор подходов к решению задач, разработка методов и алгоритмов расчетов проведены автором совместно с учёными из NCAR, Национального Университета Сеула и РГТМУ.

#### **Теоретическая и практическая значимость**

Полученные оценки успешности прогнозов траекторий и интенсивности тропических циклонов с использованием метода задания искусственных данных, чувствительности модели к схемам микрофизики и схемам пограничных слоёв позволяют сделать вывод о целесообразности использования предлагаемой методики в прогностической системе WRF для прогноза тропических циклонов в юго-западной части Индийского океана. Разработанный метод использования ассимиляции искусственного вихря будет рассматриваться на предмет внедрения в оперативную практику в Метеорологическом Агентстве Танзании.

#### **Апробация диссертационной работы**

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались:

- На научном межфакультетском семинаре метеорологического факультета Российского государственного гидрометеорологического университета,
- На научном семинаре в Национальном Университете Сеула (Сеул, Корея, сентябрь 2008).

- На Международном научном семинаре “Третий WRF семинар Восточной Азии” Сеул, Корея, 14 апреля 2009 г.

**Публикации:** Результаты диссертации опубликованы в 2 печатных работах, материалы использованы в научно-исследовательских отчётах.

**Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников, включающего 127 наименований. Общий объем работы составляет 146 страниц, включая 56 рисунков и 16 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, теоретическая новизна и практическая значимость работы, а также приводится краткое изложение содержания диссертации.

**В первой главе** раскрывается роль тропических циклонов в формировании экстремальных условий погоды и стихийных бедствий в разных регионах мира, кратко описываются характеристики тропических циклонов мира: области возникновения, названия и классификация ТЦ в зависимости от места, где возник ТЦ, регулярность появления, интенсивность и преобладающие траектории перемещения, а также приведен обзор литературы, посвященной вопросам образования и развития тропических циклонов.

В данной главе также изложено краткое описание региональных особенностей юго-западной части Индийского океана. Необходимость такого описания связана с тем, что дальнейшие исследования и численные эксперименты проводились для данного региона. Этот регион расположен к югу от экватора от побережья Африканского континента до 90 в. д. Юго-западная часть Индийского океана является второй в мире по количеству ТЦ в год. Сезон тропических циклонов в этом регионе начинается с сентября по май, а пик достигается в январе. В среднем в данном регионе регистрируется до 10 тропических штормов за сезон и около 40% из них достигает категории интенсивного тропического циклона. Негативные последствия циклонов, формирующихся в юго-западной части Индийского океана, могут распространяться на все острова, находящиеся в этом регионе, в том числе Мадагаскар, Маврикий, Реюньон, Коморские Острова, а также на побережья Мозамбика, Танзании и Кении, и даже затронуть Малави и Зимбабве.

Во заключительной части первой главы приведен обзор методов экспериментальных и теоретических исследований процессов формирования и эволюции тропических циклонов. Описаны методы получения экспериментальных данных о зарождении и развитии ТЦ, обоснована целесообразность использования региональных гидродинамических моделей для прогноза эволюции тропических циклонов и приведено хронологическое описание развития методов гидродинамического моделирования траекторий ТЦ, показана важность повышения точности задания начальных данных о ТЦ для повышения успешности гидродинамических прогнозов их развития. Наконец, в заключение первой главы приведено описание используемых методов ассимиляции дан-

ных измерений о структуре тропических циклонов как наиболее перспективного метода для формирования поля начальных данных для гидродинамической модели, а также описаны их проблемы для юго-западной части Индийского океана, связанные с отсутствием регулярной сети наблюдений. Обосновывается выбор системы регионального моделирования на базе гидродинамической модели высокого разрешения WRF, позволяющей гибкое использование различных методов ассимиляции данных наблюдений.

**Во второй главе** даётся описание используемой в настоящей работе системы регионального гидродинамического моделирования WRF, которая содержит три основные составляющие. Первой компонентой моделирования системы WRF является:

Предварительная система WRF (WPS), выполняющая следующие задачи: а) определение областей моделирования, б) интерполирование наземных данных (например, ландшафта, землепользования и типа почвы) в области моделирования, с) интерполяция метеорологических данных из других моделей на домен исследования.

Второй составляющей системы уравнивания гидродинамической модели WRF (ARW). ARW-это главная часть системы моделирования WRF, которая включает в себя:

- основные уравнения системы моделирования WRF (уравнения Эйлера для полностью сжимаемой среды в негидростатическом приближении с доступом гидростатической опции),
- прогностические переменные (компоненты горизонтальных скоростей в декартовой системе координат, вертикальная скорость  $w$ , возмущение потенциальной температуры, возмущение геопотенциала и возмущение давления для сухого воздуха),
- вертикальную координату (гидростатическое давление сухого воздуха с вертикальной сеткой растяжения),
- горизонтальную сетку (стратегия сетки C Аракавы),
- интегрирование по времени (использование метода расщепления по времени для схем Рунге-Кутты 2 и 3 порядка точности с малым временным шагом для акустических и гравитационных волн),
- пространственную дискретизацию (с опциями от 2 до 6-го порядка в горизонтальной и вертикальной адвекции),
- турбулентное перемешивание и модели фильтров: (подсеточная турбулентность в разработке как физического пространства, так и в координатах, расходимость затухания, внешнего режима фильтрации, вертикально неявного акустического шага для центровки, явные опции фильтра),
- начальные условия (трёхмерные на реальных данных, инициализация цифровой фильтрации (DFI)),
- боковые граничные условия (периодические, открытые, симметричные и специфические),
- верхние и нижние граничные условия (гравитационные волны поглощения (диффузия, затухание Рэлея, или неявные затухания Рэлея для вертикальной скорости), постоянный уровень давления на верхней границе вдоль поверхности материала, и опции жёсткой крышки и свободного скольжения),
- вращение Земли (включены полные условия Кориолиса),
- картографирование сферы (поддерживаются четыре проекции карты для реальной си-

муляции данных: полярно стереографическая, конформная Ламберта, Меркатора и широта-долгота),

– вложенные сетки (односторонняя, двусторонняя и движущаяся),

Во второй главе диссертационной работы также описаны схемы модели физики, которые классифицируются по микрофизике, параметризации конвекции, планетарному пограничному слою (PBL), земля-поверхность модели, и радиации.

**Третья глава** состоит из двух частей, первая часть - описание третьей компоненты моделирование системы WRF, вариационной системы WRF (WRF-Var), и вторая часть - описание алгоритма и ассимиляции искусственных данных с помощью системы WRF-Var. Хотя модель WRF может работать и без использования системы ассимиляции данных, но в данной диссертационной работе компонента WRF-Var является главной.

Основная цель системы WRF-Var заключается в том, чтобы подготовить "оптимальную" оценку состояния атмосферы при анализе с помощью минимизации функционала качества,

$$J(x) = J^b + J^o \quad (1),$$

где  $J^b$  и  $J^o$  - составляющие функции стоимости за счет фона и наблюдения, соответственно, определяемые по формулам

$$J^b = \frac{1}{2} (x - x^b)^T B_N^{-1} (x - x^b) \quad (2),$$

$$J^o = \frac{1}{2} (y - y^o)^T O^{-1} (y - y^o) \quad (3)$$

где  $B_N^{-1}$  - ошибка фона предыдущего прогноза, рассчитанная по формуле

$$B_N^{-1} = \overline{x' x'^T} \approx A \overline{(x^{i24} - x^{i12})(x^{i24} - x^{i12})^T} \quad (4),$$

где  $O_N^{-1}$  - диагональная матрица ковариаций ошибок наблюдений.

Ковариационная матрица фоновых ошибок позволяет отдельно определять вертикальные и горизонтальные корреляционные функции. Горизонтальные параметры фильтра зависят от вертикального собственного вектора. Вертикальные режимы получаются в результате разложения статистической модели прогноза ковариационной ошибки по естественным ортогональным функциям. Статистическая разница между 24-часовыми и 12-часовыми прогнозами используется для определения фоновой ковариационной ошибки (формула 2).

В третьей главе также приводится описание предложенного автором для использования в юго-западной части Индийского океана алгоритма ассимиляции искусственных данных с помощью системы WRF-Var. Использование искусственных данных в той или иной форме является необходимым условием включения тропических циклонов в численные модели. Схема искусственных данных служит для того, чтобы удалить недостоверные данные о вихре, полученные из крупномасштабного анализа, и заменить их данными, полученными искусственным путем, с учетом размера циклона

(радиуса максимальных значений скорости ветра), его положения, интенсивности и значения давления в его центре на уровне моря.

В данном исследовании искусственный вихрь строится по методу Уэно. Искусственные наблюдения содержат две составляющие: симметричную и асимметричную. Симметричная составляющая строится по оперативным данным наблюдений тропического циклона, имеющимся в региональном центре тропических циклонов ВМО, а асимметричная составляющая получается из фоновых данных WRF-Var (в данном случае - прогнозы WRF в цикличном режиме). Симметричная составляющая искусственного поля данных ТЦ строится по радиусу значений скорости ветра, равных 15 м/с, и давления в центре тропического циклона. Радиус области искусственного тропического циклона рассчитывается с помощью эмпирического уравнения:

$$R_B = \left( 1 + \frac{2V_{15}}{f R_{15}} \right)^{\frac{1}{2}} R_{15} \quad (5),$$

где  $R_B$  – вычисленный радиус области искусственного тропического циклона,  $R_{15}$  – радиус ветра 15 м/с из сводки тропического циклона.

Поля вихря искусственного тропического циклона включают давление на уровне моря и профили ветра на разных уровнях. Распределение давления на уровне моря внутри области тропического циклона вычисляется по следующему уравнению, основанному на формуле Фуджитца.

$$P(r) = P_{\max} - \frac{\Delta P}{\left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{r}{R_0} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (6),$$

$$\text{Где } \Delta P = P_{\max} - P_c \quad (7)$$

$$P_{\max} = \frac{P_B - P_c}{\left( 1 - \frac{1}{1 + (R_B/R_0)^2} \right)} \quad (8)$$

Симметричный ветер базируется на соотношении градиента ветра,

$$V(r) = \left( \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{f^2 r^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{r|f|}{2} \quad (9).$$

где  $r$  – расстояние от центра тропического циклона (км),  $R_0$  – радиус максимального ветра,  $P_c$  – центральное давление на уровне моря из сводки о тропическом циклоне, и  $P_B$  – среднее давление на уровне моря в  $R_B$ .

Эффект поверхностного трения вблизи пограничного слоя включён малыми коэффициентами ( $f$ ) на 7 уровнях (уровень моря, 1000, 925, 850, 700, 600, 500 гПа) в профиль ветра искусственного ТЦ. Коэффициенты симметричной скорости ветра для каждого слоя составляют соответственно: 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,0; 1,0 и 1,0. Дивергенцию

верхнего слоя атмосферы трудно определить, поэтому симметричные ветры искусственного ТЦ обнуляются на уровнях выше 400 гПа.

Асимметричная составляющая тропического циклона представляет собой разницу между фоновыми полями WRF-Vар и фоном симметричной составляющей искусственного тропического циклона. Такие асимметричные составляющие перемещаются, занимая правильное положение, и добавляются к полям симметричного тропического циклона. Как сказано выше, поля симметричного искусственного тропического циклона основаны на сводке наблюдений о положении этого тропического циклона. Перемещение асимметричной составляющей тропического циклона и добавление симметричных полей, создает набор давлений искусственного тропического циклона на уровне моря и профили ветра в области наблюдения тропического циклона. Данные устанавливаются на модели сетками точек таким образом, чтобы разрешение данных искусственного тропического циклона были совместимы с моделью разрешения. При введении искусственных данных величин давления и ветра в WRF-Vар ассимиляционную систему уравнение (1) принимает следующий вид:

$$J_{3DV}(x) = J^b + J^o + J^p(bogus) + J^v(bogus) \quad (10)$$

где  $J^p(bogus)$  - слагаемое, вычисляемое по полям искусственных данных давления

$$J^p(bogus) = \sum_{r \in R_p} [(P(r) - P^{bogus})]^T O_p^{-1} \times [(P(r) - P^{bogus})] \quad (11)$$

$J^v(bogus)$  - отражает вклад ложных данных о полях ветра

$$J^v(bogus) = \sum_k \sum_{r \in R_v} [(V(r,k) - V^{bogus})]^T O_v^{-1} \times [(V(r,k) - V^{bogus})] \quad (12)$$

где  $P(r)$  и  $V(r,k)$  представляют собой давление на уровне моря и данные полей ветра ( $u$  и  $v$  компоненты) в модели атмосферы;  $P^{bogus}(r)$  и  $V^{bogus}(r,k)$  являются искусственными данными давления на уровне моря и полей ветра,  $O_p$  и  $O_v$  - ковариационные ошибки диагональной матрицы, возникающие за счет использования искусственных данных давления на уровне моря и полей ветра,  $r$  является радиусом от центра тропического циклона, а  $k$  обозначает вертикальные слои искусственных данных о профиле ветра (7 слоев упомянутых выше). В WRF-Vар, искусственные поля тропического циклона рассматриваются в качестве дополнительных наблюдений и ассимилируются вместе с другими наблюдениями во время анализа.

**В четвертой главе** представлены полученные автором оценки чувствительности моделирования прогностической системы WRF к схемам микрофизики и схемам описания пограничных слоев прогнозов траекторий и интенсивности тропических циклонов в юго-западной части Индийского океана и получены оценки результатов (рисунков 1). Четыре разные микрофизические схемы (Lin et., WSM3, WSM5 and WSM5) и две планетарные пограничные (YSU and MJY) были использованы в прогнозе двух тропических циклонов Jaya and Indlala.

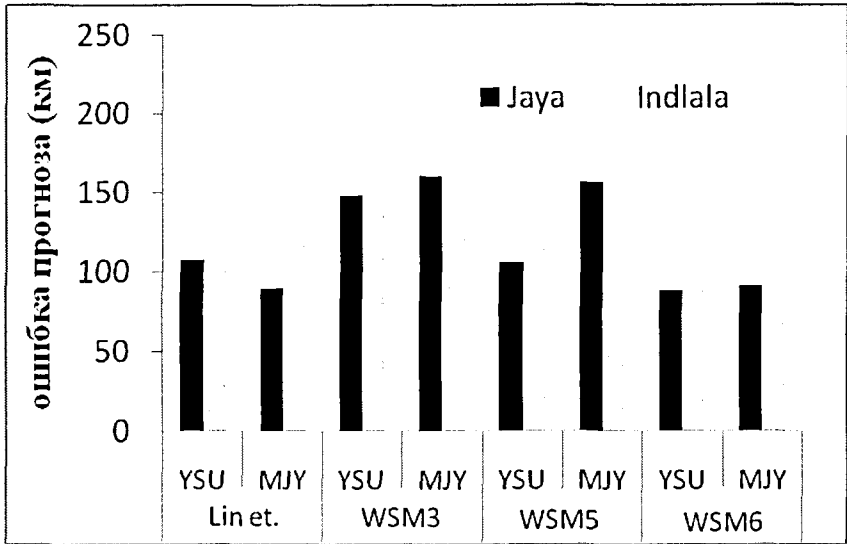


Рисунок 1. Трёхдневная средняя ошибка прогноза положения тропических циклонов Jaya и Indlala

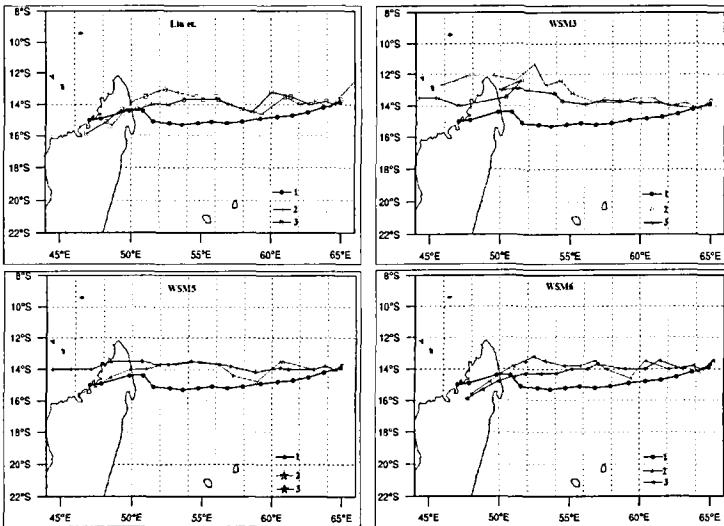


Рисунок 2. Четырёхдневный прогноз тропического циклона Indlala с использованием четырёх разных схем микрофизики: а) Lin et б) WSM3 в) WSM5 д) and WSM6, и 1-фактическая траектория; 2-YSU траектория; 3- MJY траектория.

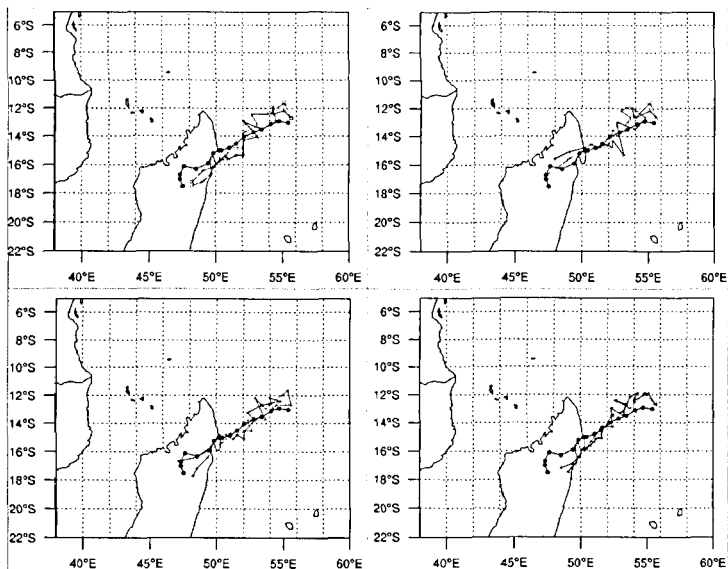


Рисунок 3. Четырехдневный прогноз тропического циклона Jaya с использованием четырёх разных схем микрофизики: а) Lin et б) WSM3 в) WSM5 д) and WSM6, и 1- фактическая траектория; 2-YSU траектория; 3- MJY траектория

Сравнивая все результаты численных экспериментов тропических циклонов Jaya и Indlala автор пришел к следующим выводам:

- а) без добавления искусственных вихрей в процедуре инициализации было очень трудно получить реалистичную структуру тропического циклона в регионе в связи с недостатком наблюдений в Индийском океане.
- б) Выбор подходящих схем планетарного пограничного слоя PBL может играть большую роль в улучшении траектории тропических циклонов в регионе. Схема YSU PBL показала хорошую прогнозируемость тропического циклона по сравнению со схемой MJY. Но все эксперименты показали большое значение центрального давления по сравнению с наблюдаемым.
- в) выбор микрофизики также очень важен в прогнозировании тропического циклона с помощью модели WRF в регионе.
  - WMS6 показали хорошие общие навыки в области прогнозирования траектории тропического циклона Jaya и Indlala.
  - WMS3 показал относительно хорошую траекторию циклона Indlala, но имел маленькую скорость перемещения по сравнению с наблюдаемой траекторией, но показывал наихудший прогноз траектории тропического циклона Jaya.
  - Эксперимент Lin et , хотя имеющий относительно хорошую траекторию, но показал очень низкий уровень подготовки в определении первоначальной позиции тропического циклона.

- WMS5 показал также относительно хорошие траектории тропического циклона, но не смог определить место выхода тропического циклона Яау на сушу, которое очень важно для прогнозирования траектории тропического циклона

**В пятой главе** представлены выполненные автором оценки успешности численного прогноза траектории и интенсивности тропических циклонов в юго-западной части Индийского океана при использовании искусственных данных ассимиляции по сравнению с другими методами ассимиляции данных для: а) определения начального положения тропического циклона; б) интенсивности траектории и скорости перемещения тропического циклона; в) оценки выхода тропического циклона на сушу.

Из результатов инициализации (таблица. 1), основанных на данных NCEP - GFS (CTR - контрольный эксперимент прогноза WRF без ассимиляции), анализ циклона WRF Бондо дает не только слабые вихри около 1004 гПа, но также показывает погрешности позиции циклона около 57 км в начальный момент времени.

Таблица 1:

**Ошибки определения положения ( $\Delta r$ ) и центрального давления ( $\Delta P$ ) тропического циклона Бондо в начальный момент времени.**

Время инициализации	CTR		3DVR		CYC		BDA	
	$\Delta P(\text{гПа})$	$\Delta r(\text{км})$	$\Delta P(\text{гПа})$	$\Delta r(\text{км})$	$\Delta P(\text{гПа})$	$\Delta r(\text{км})$	$\Delta P(\text{гПа})$	$\Delta r(\text{км})$
20/12/06 12:00	-74	58	-74	58	-65	65	-11	03
21/12/06 00:00	-64	44	-64	44	-40	40	-11	15
21/12/06 12:00	-57	38	-57	38	-46	46	-15	11

После традиционной ассимиляции данных WRF с использованием данных GTS (Глобальная телекоммуникационная система), (т.е. 3DVR - WRF прогноз после ассимиляции GTS и CYC - WRF прогноз после ассимиляции данных GTS в циклическом режиме) наблюдаются улучшения в определении позиции ТЦ в 36км, и центральное давление вихря углубляется до 991 для эксперимента CYC (рис. 4а и 4б).

Однако этого по-прежнему недостаточно для того, чтобы установить позицию циклона и его интенсивность. В 2100 UTC 21 декабря 2006 года, ТЦ Бондо имел центральное давление на уровне моря 940 гПа, однако ассимиляции только данных GTS недостаточно для того, чтобы получить наблюдаемую структуру ТЦ.

При эксперименте BDA (WRF прогноз после ассимиляции GTS и искусственных данных давления и ветра начальные условия получены из экспериментов CYC) в системе WRF-Vар удалось получить реалистичную структуру и интенсивность ТЦ с центральным давлением на уровне моря 850 гПа (рис. 4г), с погрешностью в 0,3 км от истинного положения циклона (таблица 1).

Анализ полученных результатов полей давления на уровне моря, ветра на уровне 850 гПа и относительной влажности над вихрем на всю толщину тропосферы (рис. 5) показывает, что анализ CTR-IV дает очень незначительную скорость ветра на уровне 850 гПа, а вертикальный разрез АВ через центр ТС (рис. 5в) показывает равномерное горизонтальное распределение влажности над циклоном и, следовательно, не может определить структуру, которую мог бы иметь зрелый циклон. Это объясняется

главным образом тем, что не было каких-либо наблюдений радиозондов, поскольку циркуляция циклона происходит над открытым океаном, и поэтому аномалии влажности, связанные с циклоном, не могут быть захвачены в глобальном анализе.

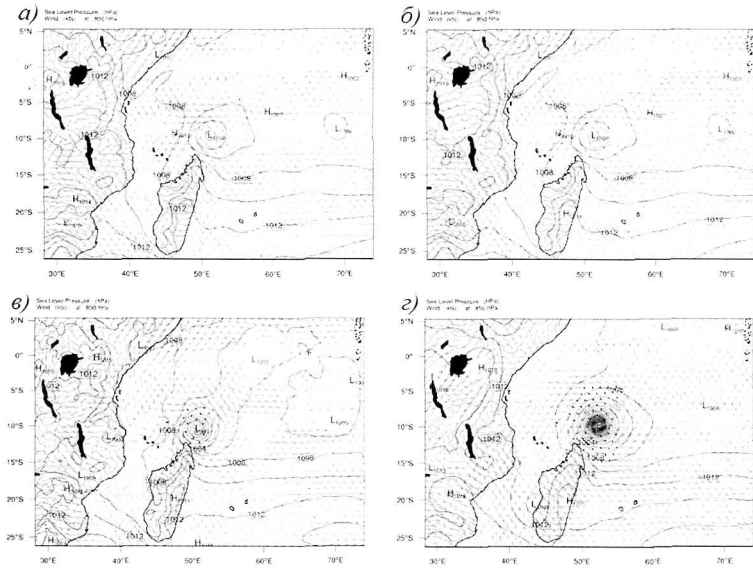


Рис. 4. Горизонтальное распределение давления на уровне моря и поля ветра на уровне 850 гПа в начальный момент времени 1200 UTC 21 Декабря 2006 года для экспериментов а)CTLR б)3DVR в)CYC и д)BDA

После ассимиляции искусственных данных (эксперимент BDA) явно видны изменения структуры ТЦ не только по горизонтали, где скорость ветра на уровне 850ГПа достигает 50 кт и давление на уровне моря 951 гПа (рис. 5б), но также по вертикали. Вертикальный разрез АВ через центр ТЦ (рис. 5г) показывает значительные изменения структуры влажности: 1) равномерное горизонтальное распределение влажности над циклоном уже не наблюдается; 2) значительно увеличивается вертикальный слой, где наблюдается относительная влажность более 90% (около 8 км от земной поверхности при BDA и только 1км при CRT).

Для того чтобы оценить успешность прогноза перемещения и интенсивности ТЦ Бондо с использованием WRF-модели, рассматривалась чувствительность прогностической модели к ошибкам определения исходного положения ТЦ с использованием стандартных методов (без и со стандартными ассимиляционными подходами).

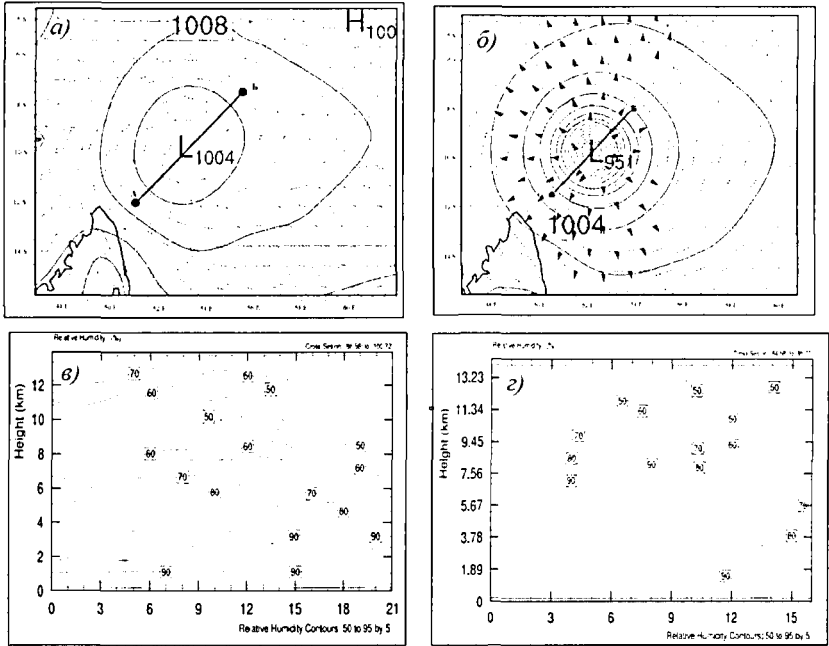


Рисунок 5. Горизонтальное распределение давления на уровне моря и поля ветра на уровне 850 гПа в начальный момент времени 1200 UTC 21<sup>st</sup> December 2006 для экспериментов CTL (3а) и BDA. Вертикальные разрезы АВ через центр ТЦ экспериментов CTLR (3в) и BDA (3г).

Согласно расчетам наиболее неточный прогноз траектории был получен при экспериментах CTR. В начальный момент времени  $t_0$  ошибка прогноза (расстояние между фактическим и прогностическим положением ТЦ) составила 38 км для CRT. Заниженные значения интенсивности ТЦ при равномерном распределении величин относительной влажности над тропическим циклоном (рис. 5в) привели к тому, что среднеарифметическая ошибка в расчете положения ТЦ за 72 часа прогноза составила 321 км CTR. Ошибка CRT в определении места выхода ТЦ Бодно на берег составила 426 км (таб. 3 и рис. 4).

Таблица 2.

### Ошибки определения положения тропического циклона Бондо

	$t_0$	$t_6$	$T_{12}$	$t_{18}$	$t_{24}$	$t_{30}$	$t_{36}$	$T_{42}$	$t_{48}$	$t_{54}$	$t_{60}$	$t_{66}$	$t_{72}$	Средне
CRT	38	82	168	319	353	267	256	303	359	433	475	542	575	321
3DVR	38	87	138	228	262	179	198	242	267	342	384	481	484	256
CYC	36	27	30	94	119	225	270	208	171	206	216	179	163	149
BDA	11	24	20	16	13	101	145	94	69	60	79	70	68	59

Хотя результаты экспериментов с процедурой ассимиляции, традиционной для WRF, несколько лучше результатов экспериментов CRT по определению положению ТЦ в начальный момент времени  $t_0$  (табл.2), но они показали более интенсивную завихренность по сравнению с экспериментами без ассимиляции, а именно 980 гПа (значение давления ниже более чем на 20 гПа по сравнению с CRT) в начальный момент времени от 21.12 00:00UTC. С WRF ассимиляцией ошибка в определении положения ТЦ в исходный момент времени уменьшалась до 36 км СУС. При этом за 72 часа среднеарифметическая ошибка прогноза позиции ТЦ (положение ТЦ рассчитывалось каждые 6 часов) составила 149 км.

После введения искусственных данных о давлении и ветре в процедуру ассимиляции WRF-Var были получены наиболее успешные результаты прогноза перемещения и интенсивности тропического циклона. Ошибки прогноза расстояния уменьшились до 11 км BDA, а среднеарифметическая ошибка положения ТЦ за 72 часа прогноза составила 59 км. Ошибка эксперимента BDA в определении места выхода ТЦ Бондо на сушу составила 11 км, хотя и не удалось точно определить время выхода ТЦ на берег (в эксперименте BDA ТЦ вышел на сушу на 6 часов ранее, чем фактически). На рис. 4а представлены фактические и прогностические траектории ТЦ Бондо в период с 21 по 26 декабря 2006 г. Хорошо видно то, что наилучшие прогнозы траектории получены при эксперименте BDA. Его траектория очень близка к фактическим траекториям в первые 24 часа прогноза, а затем смещалась к западу от фактической траектории (из-за особенностей перемещения ТЦ Бондо). За нескольких часов до выхода на берег имело место смещение к востоку.

Согласно расчётам при BDA-III Бондо вышел на берег в 0600UTC (на 6 часов раньше, чем фактически) за 11 км от места наблюдения с центральным давлением на уровня моря 971гПа. В экспериментах CRT и 3DVR имело место смещения траектории к востоку от фактической за весь период прогноза. Это главным образом связано с тем, что в исходный момент времени они имели очень слабую интенсивность ТЦ, (рис. 4а и 4б), большую погрешность в определении начального положения и интенсивности ТЦ (табл. 1) и в итоге плохой прогноз траектории ТЦ Бондо.

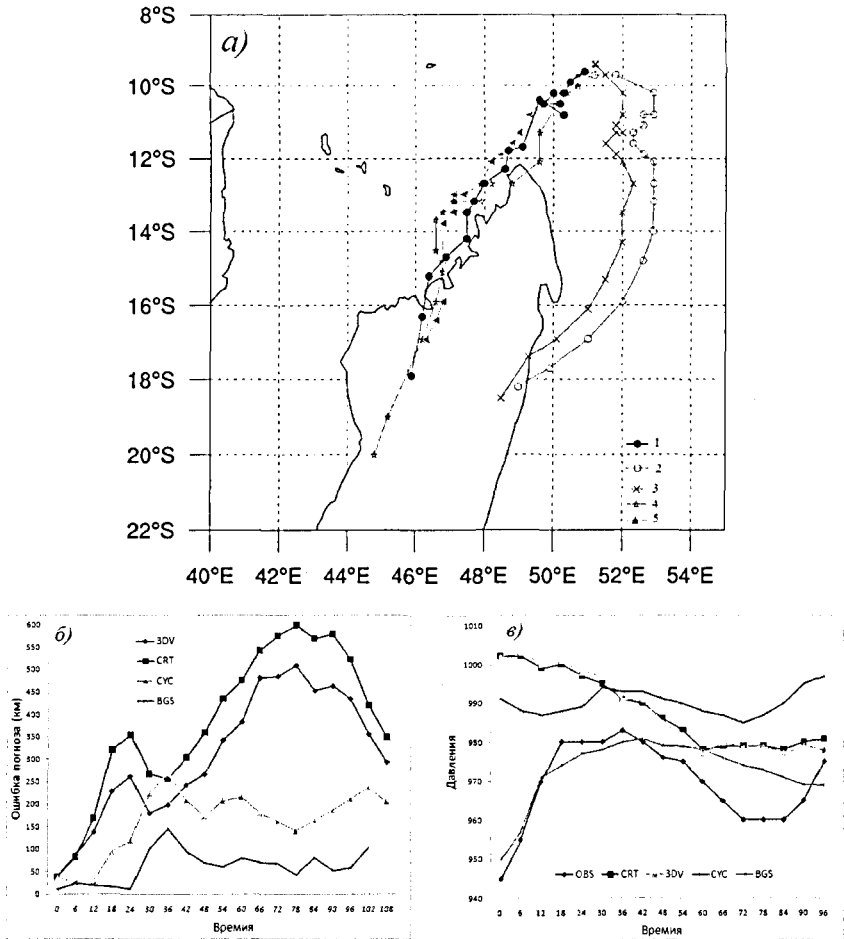


Рис.4 а) Фактические(1), и прогностические (CRT(2), 3DVR(3), CYC(4), BDA(5)) траектории ТЦ Бондо (21-26 Декабря 2006); б) ошибки прогноза в км между прогнозируемой и фактической траекторией; в) изменение центрального давления ТЦ на уровне моря.

Хотя эксперимент CYC-III не имел очень сильную интенсивность в исходный момент времени по сравнению с наблюдениями (но больше, чем CRT и 3DVR), он, также как эксперимент BDA-III, приближался к фактической траектории, но вышел на берег намного раньше, чем все остальные эксперименты (рис. 4), и быстро наполнился над сушей. Это объясняет, почему в исходный момент эксперимент CYC-III имел более сильную интенсивность, чем эксперименты CRT и 3DVR, а через 48 часов стал самым слабым из всех экспериментов (рис. 4г).

**В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования:**

1. Предложен и реализован для Юго-Восточной Африки метод ассимиляции искусственного вихря региональной гидродинамической моделью, позволивший существенно улучшить качество прогнозирования эволюции тропических циклонов;
2. Показано, что результаты прогнозирования судьбы ТЦ критично зависят от метода параметризации микрофизики и схем процессов в пограничном слое;
3. Использование ассимиляции данных наблюдений гидродинамической моделью позволило принципиально улучшить прогноз траекторий и интенсивности тропических циклонов;
4. Главным преимуществом использования метода ассимиляции искусственного вихря является принципиальное улучшение прогноза места выхода ТЦ на сушу, что позволит минимизировать его разрушительные последствия;
5. Разработанный метод использования ассимиляции искусственного вихря будет предложен для внедрения в оперативную практику в Танзанийском Метеорологическом Агентстве.

На основании полученных результатов можно прийти к выводу, что алгоритм искусственных данных в региональной модели WRF может быть использован с целью преодоления проблемы недостатка сети наблюдений в морских районах, где зарождаются тропические циклоны.

#### Основные публикации автора по теме диссертации

##### Статьи в изданиях из списка ВАК

1. Численный прогноз траекторий тропических циклонов над юго-восточной частью индийского океана с использованием ассимиляции данных // Естественные и технические науки. М., 2009. № 5. С. 214 – 224 (соавторы Смышляев С.П)

##### Публикации в материалах конференций

2. The impact of Bogus Data Assimilation methods (BDA) on landfalling tropical cyclone over Southwest Indian Ocean (Bondo – 2006) // Международном научном семинаре " Третий WRF семинар Восточной Азии " Сеул, Корея, 14 апреля 2009 г. ; с.25-26, <http://jhwc.snu.ac.kr/wrf2009/wagenda.htm> (соавторы Смышляев С.П, Донг К. Л, Сьяо К.)



Отпечатано с готового оригинал-макета в ЦНИТ «АСТЕРИОН»  
Заказ № 318. Подписано в печать 16.11.2009 г. Бумага офсетная  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.  
Санкт-Петербург, 191015, а/я 83, тел. /факс (812) 275-73-00, 970-35-70  
asterion@asterion.ru