

На правах рукописи

Еременко Александр Сергеевич

**АВТОМАТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ ПО  
ДАНЫМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Владивосток — 2014

Работа выполнена в лаборатории спутникового мониторинга Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН.

Научный руководитель:       Алексанин Анатолий Иванович,  
доктор технических наук,  
заведующий лабораторией  
спутникового мониторинга  
ИАПУ ДВО РАН

Официальные оппоненты:   Ламаш Борис Евгеньевич,  
доктор физико-математических наук,  
доцент, профессор кафедры океанологии и  
гидрометеорологии Дальневосточного  
федерального университета

Мелкий Вячеслав Анатольевич,  
доктор технических наук, профессор,  
декан технического нефтегазового института  
Сахалинского государственного университета

Ведущая организация:       Дальневосточный региональный научно -  
исследовательский гидрометеорологический  
институт, г. Владивосток

Защита состоится «11» июля 2014 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 005.007.01 в Институте автоматизации и процессов управления ДВО РАН по адресу: 690041, Владивосток, ул. Радио, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН и на сайте ИАПУ ДВО РАН по адресу <http://iacp.dvo.ru/russian/institute/dissertation/represent.html>

Автореферат разослан «    » июня 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 005.007.01, д.т.н.



А.В. Лебедев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Детектирование тропических циклонов (ТЦ) и определение их макропараметров (положение центра, геометрические размеры, перепад давления, максимальная скорость ветра) является одной из важных задач дистанционного зондирования. Чаще всего ТЦ проходят над поверхностью океана, где в большинстве случаев недоступны прямые метеорологические и аэрологические измерения. Спутниковые методы обладают преимуществом по сравнению с традиционными методами измерения: высокая частота получаемой информации (интервал между изображениями с геостационарного спутника MTSAT-1R составляет около 15 минут); покрытие больших районов интересов; высокая детальность изображений; регулярное получение данных для расчета профилей температуры и влажности атмосферы (ATOVS и другие радиометры).

Для определения положения центра и макропараметров ТЦ по изображениям геостационарных спутников на сегодняшний момент времени широко применяется методика Дворака и ее модификации. Она основана на анализе структуры облачности экспертами. Для ее работы применяются спутниковые данные в видимом и ИК-диапазоне. Данная методика не позволяет проводить все расчеты полностью автоматически. По этой причине разные эксперты, применяя данный подход, могут давать различные оценки. Сравнение оценок параметров ТЦ США и Японии (best-tracks), показывают различия в оценках местоположений центра ТЦ (до 50-100 км). Особенно большие - в начальной и конечной стадии жизни ТЦ. Влияние же этих ошибок на прогноз перемещения ТЦ велико. Попытки создать автоматические алгоритмы на основе геостационарных спутниковых данных предпринимаются постоянно, но представленные результаты демонстрируются только лишь на отдельных примерах и не получают широкого использования на практике.

В связи с этим является актуальной проблема автоматического мониторинга и нахождения геометрических и термодинамических параметров ТЦ.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование моделей, методов, алгоритмов и технологий, обеспечивающих автоматический мониторинг тропических циклонов по данным спутникового дистанционного зондирования с определением их геометрических и динамических параметров.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели работы решались следующие задачи:

1. Разработка и программная реализация алгоритма автоматической идентификации ТЦ с расчетом его центра и геометрии.
2. Разработка и программная реализация алгоритма автоматического нахождения и расчета размера «глаза» ТЦ.
3. Исследование и верификация модели гиперболически-логарифмической спирали облачности с целью применения ее для расчета физических и геометрических параметров ТЦ.

4. Разработка и программная реализация системы автоматического мониторинга тропических циклонов с привлечением данных вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы.
5. Интеграция системы автоматического мониторинга тропических циклонов в структуру распределенной системы обработки спутниковых данных Центра коллективного пользования (ЦКП) регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

#### **Научная новизна.**

1. Впервые создана и исследована технология автоматического обнаружения ТЦ по данным карт доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК), показавшая высокую надежность обнаружения ТЦ на всех стадиях его эволюции.
2. Создан и апробирован новый подход выделения «глаза» ТЦ с оценкой его размера по полутоновым изображениям, основанный на использовании эмпирической модификации  $t$ -критерия Стьюдента о разделимости двух областей по яркости и дисперсии.
3. Показана применимость гиперболически-логарифмической спирали облачности для оценки физических и геометрических параметров ТЦ при исследовании структуры облачности в форме ДОТК.

#### **Практическая значимость и реализация результатов работы.**

Результаты работы направлены на обеспечение отраслей народного хозяйства и научных объединений своевременной информацией о геометрических и динамических характеристиках тропических циклонов в Дальневосточном регионе.

Созданная система мониторинга тропических циклонов позволяет в оперативном режиме отслеживать положение центра и размер ТЦ, оценивать положение и размер «глаза» ТЦ, строить траекторию его движения, рассчитывать по вертикальным профилям температуры и влажности атмосферы динамические параметры ТЦ, в том числе перепад давления, интегральное влагосодержание и характеристики теплого ядра ТЦ. Система внедрена в ЦКП Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

Решение задач диссертационной работы выполнялось в рамках следующих научных проектов и программ: гранты РФФИ 05-01-01110, 04-07-90350, 09-05-00698, 11-01-00593, гос.-контракты 02.518.11.7152, 190506-007, гранты ДВО РАН 10-III-B-07-176, 11-III-B-07-141.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод автоматической идентификации ТЦ по изображениям геостационарных спутников на основе критерия рассогласования ДОТК вдоль радиуса.
2. Метод автоматического нахождения «глаза» ТЦ с расчетом размера «глаза» на основе эмпирической модификации  $t$ -критерия Стьюдента.

3. Доказательство применимости модели гиперболически-логарифмической спирали облачности для оценки динамических параметров ТЦ по спутниковой информации.
4. Технология и программный комплекс для автоматического мониторинга ТЦ с расчетом его геометрических параметров в режиме реального времени.

**Обоснованность и достоверность результатов работы** обеспечивается корректным применением методов исследования и подтверждается результатами вычислительных экспериментов, непосредственных измерений, существующими закономерностями, а также сопоставлением с результатами, полученными на основе общепризнанных методов.

**Апробация результатов работы.** Полученные результаты обсуждались на Международном экологическом форуме «Природа без границ» (Владивосток, 2008); Дальневосточной математической школе-семинаре им. Академика Е.В. Золотова (Хабаровск, 2005; Владивосток, 2008); «International Conference Advances of Satellite Oceanography: Understanding and Monitoring of Asian Marginal Seas» (Vladivostok, 2007); Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва 2006, 2011); на четвертой международной конференции «Земля из космоса - наиболее эффективные решения» (Москва, 2009); «First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC)» (Vladivostok, Russia, 2010); конференции «Использование средств и ресурсов единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане для информационного обеспечения морской деятельности в Российской Федерации (ЕСИМО'2012)» (Обнинск, 2012); а также различных научных семинарах.

**Публикации результатов работы.** По материалам диссертации опубликовано 13 работ, из них 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 83 наименования. Основное содержание диссертации изложено на 104 страницах машинописного текста, включает 31 рисунок.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность выполненных в диссертации исследований, формулируется цель работы, рассматривается научная и практическая значимость результатов, приводятся сведения об апробации и реализации основных положений диссертации.

**Первая глава** посвящена обзору литературы предметной области. В ней анализируется современное состояние исследований в области мониторинга ТЦ. В первой части главы дается введение в предметную область. Рассматриваются общие подходы к оценке параметров ТЦ; диагностика с

помощью радиозондов; моделирование атмосферы при метеорологическом прогнозировании; применение методов дистанционного зондирования Земли из космоса. Так же приводится обзор существующих методов и подходов ручного и автоматического мониторинга ТЦ. В конце главы обозначены направления исследований для решения проблемы автоматического мониторинга ТЦ, нахождения его геометрических и термодинамических характеристик.

**Вторая глава** диссертации посвящена исследованию и разработке алгоритмов автоматического детектирования «глаза» ТЦ, центра ТЦ на основе модели круговой циркуляции ветра, приведены результаты апробации методов на 3-х летней серии изображений облачности Дальневосточного региона.

В работе используются методы расчета доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) и вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы. ДОТК – это угол статистически значимой касательной к изотермам в заданной окрестности точки изображения. Сдвиговой характер атмосферных потоков приводит к тому, что изотермы в таком потоке вытягиваются вдоль его направления. Поэтому ДОТК можно использовать для оценки направлений потока. Вертикальные профили температуры и влажности рассчитываются на основе измерений радиометров ATOVS/NOAA пакетами программ Европейского космического агентства (AAPP, RTTOV и MetOffice-1Dvar).

#### *Алгоритм обнаружения «глаза» ТЦ.*

Данный алгоритм основан на расчете модифицированного  $t$ -критерия разделимости двух участков изображения с различной яркостью (Алексанин, Еременко, 2009). Данный алгоритм использует для расчетов ИК-изображения со спутника MTSAT-1R. В работе алгоритма можно выделить 3 основных шага:

*Шаг 1.* По заданному облачному кластеру скользит квадратное окно  $S_2$ , внутри которого есть круглое окно  $S_1$  меньшего размера (рис. 1). В двух областях  $S_1$  и  $S_2$ , на которые делятся пиксели изображения, происходит расчет критерия  $U$ , характеризующего разделимость областей. Для каждого квадратного окна подсчитываются несколько значений  $U$  при разных размерах окна  $S_1$ . Выбирается размер окна  $S_1$ , который дает максимальное значение критерия. Размер окон определяли исходя из предположений о максимально возможном размере глаза ТЦ. Так, размер квадратного окна был выбран равным 120 км. Минимальный радиус внутреннего окна составлял 5, а максимальный – 100 км.

*Шаг 2.* В кластере ищется такая комбинация параметров областей,

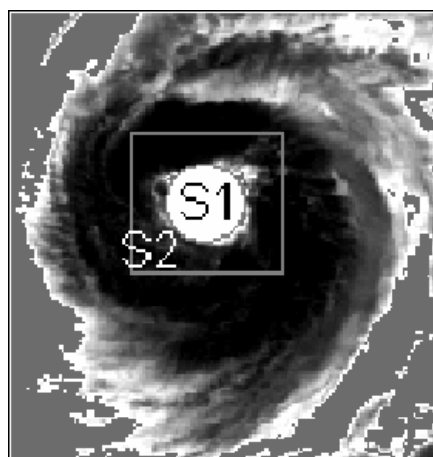


Рис. 1 Полутоновое изображение облачности тропического циклона и геометрия площадок, по которым оцениваются положение центра и размер глаза ТЦ.



которая дает максимальную величину критерия  $U$ . Если это значение превышает заданный порог  $U_{st}$ , то считается, что область  $S_1$  является областью глаза тайфуна. А радиус области  $S_1$  берется за радиус глаза.

За основу для расчета критерия  $U$  взята нормализованная величина разницы средних яркостей  $t$ -критерия разделимости двух участков изображения с разной яркостью:

$$U = \sqrt{\frac{m_1 m_2 (m_1 + m_2 - 2)}{m_1 + m_2}} \frac{\bar{s}_1 - \bar{s}_2}{\sqrt{m_1 \sigma_1^2 + m_2 \sigma_2^2}} \quad (1)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – области ИК изображения с объемами в  $m_1$  и  $m_2$  пикселей;  $s_1$  и  $s_2$  – средние величины яркости областей  $S_1$  и  $S_2$  соответственно;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – оценки дисперсий. В исходной методике параметр  $U^*$  служит основой для расчета статистической значимости разделимости областей. Расчеты выявили, что  $t$ -критерий показывает низкую эффективность при обработке ИК изображений, что может объясняться нестационарностью характеристик распределения яркости при изменении размеров окон. Он был модернизирован – величина  $U^*$  делилась на корень из суммы числа пикселей двух областей. Критерий  $U$  является безразмерной величиной, не зависящей от размера площадок. Это позволяет использовать единый порог отбраковки для различных ТЦ. При достижении  $U$  величины, превышающей заданный порог  $U_{st}$ , считается, что окно  $S_1$  обнаружителя расположено в области глаза ТЦ, а область  $S_2$  в районе низкотемпературной облачности ТЦ. Этот алгоритм позволяет уверенно определять как центр глаза (центр ТЦ), так и его размер.

Алгоритм автоматического выделения центра глаза ТЦ, как правило, дает наилучшую оценку центра ТЦ, но отсутствие видимого глаза на стадии зарождения и разрушения ТЦ, а также в случае затянутости глаза облачностью и наличие случаев ложного выделения глаза затрудняет получение оценки положения центра ТЦ. В общей схеме поиска центра ТЦ алгоритм поиска глаза используется как вспомогательный. Данный алгоритм, анализируя кластеры низкотемпературной облачности, позволяет с высокой степенью достоверности (более 95% верных обнаружений) уточнить координаты центра глаза ТЦ в случае его наличия на ИК-изображении.

*Алгоритм обнаружения круговой циркуляции ТЦ.* Данный алгоритм основан на построении и анализе структурных карт облачности в форме доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК), рассчитываемых по ИК-изображениям. В основной процедуре выделения центра используется простейшая модель замкнутой циркуляции – круговая. И хотя спиралевидная модель циркуляции больше подходит к описанию структуры изображения ТЦ, ее использование не позволяет достичь необходимой надежности определения центра циклона. На рис. 2 приведены этапы обработки изображения.

Схема основной процедуры идентична схеме расчета глаза ТЦ. В скользящем окне заданного размера по картам ДОТК рассчитывается критерий наличия замкнутой круговой циркуляции и оценивается ее размер. Величина

критерия - рассогласование доминант с модельными оценками направлений движения ветра:

$$\rho(r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min(|\theta_i^i(r) - \theta_d^i|, \pi - |\theta_i^i(r) - \theta_d^i|) \quad (2)$$

где  $r$  – радиус окружности;  $N$  - число точек, равномерно расположенных на окружности;  $\theta_i^i(r)$  - угол касательной в  $i$ -й точке на окружности радиуса  $r$ ;  $\theta_d^i$  - значение ближайшего угла ДОТК в  $\varepsilon$ -окрестности  $i$ -й точки на окружности.

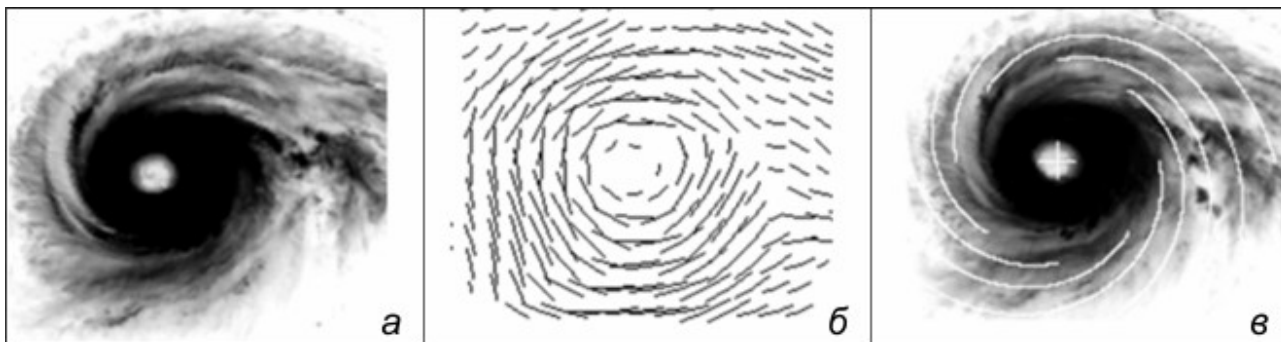


Рис. 2 (а) – инфракрасное изображение тайфуна; (б) – карта доминантных ориентаций термических контрастов и результаты обработки; (в) – положение центра, размер глаза, размер круговой зоны и геометрия спиральной закрутки, нанесенные на полутоновое изображение.

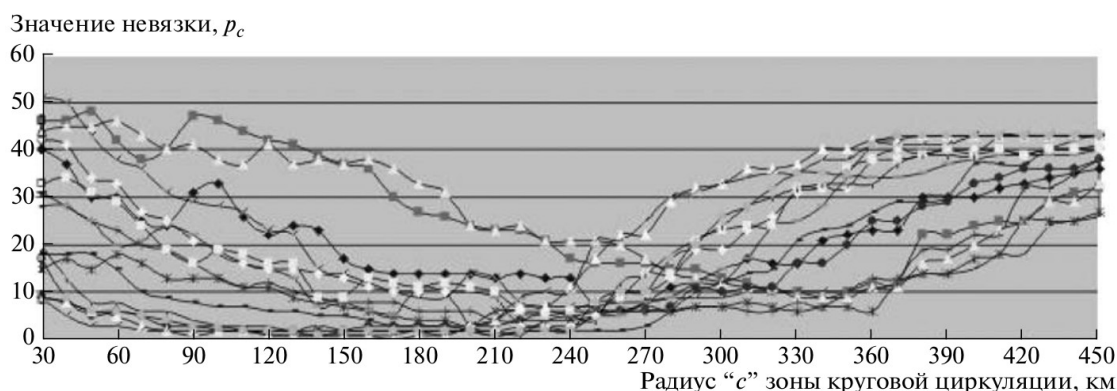


Рис. 3 График изменения величины  $\rho_c$  в зависимости от радиуса  $r$  для 15-ти изображений произвольных ТЦ.

Эксперименты показали, что при росте радиуса  $r$  величина критерия  $\rho_c$  сначала убывает, достигая своей минимальной величины  $\rho^*$ , а затем растет (рис. 3). Это свойство и было положено в основу алгоритма. Было также выяснено, что если  $\rho^* < 20^\circ$ , то такая циркуляция с высокой вероятностью соответствует ТЦ. В качестве оценки размера круговой циркуляции  $R$  был взят радиус, превышающий радиус точки минимума, с величиной критерия  $\rho_R = 2\rho^*$ . Падение величины критерия, а затем его рост при росте радиуса объясняются распределением зон неустойчивости ДОТК в ТЦ.

В результате экспериментов было выявлено, что для успешной фильтрации ложных объектов обычно достаточно задействовать серию из 3х



поряд идущих ИК-изображений. У ложно выделенных объектов расстояние до соседних объектов, выделенных на предыдущем изображении, обычно не менее 500 км. ТЦ физически не в состоянии переместиться на указанное расстояние в течении времени, прошедшего с момента предыдущего ИК-снимка (от 15 - 60 мин). Данное свойство успешно используется для отбраковки ложных объектов.

**Третья глава** посвящена методам улучшения точности определения центра ТЦ, а также методикам оценки некоторых динамических характеристик ТЦ (характеристик теплого ядра ТЦ, перепада давления, максимальной скорости ветра в ТЦ).

*Гиперболически-логарифмическая спираль.* Структура ТЦ хорошо проявляется на спутниковых ИК-изображениях. Для расчета макропараметров ТЦ по характеристикам спирали облачных полос используются карты структуры облачности в форме ДОТК. В данной работе для автоматического расчета параметров спирали используется описание линий тока ветра в виде спиральных облачно-дождевых полос (СОДП) (Юрчак, 2007) в полярных координатах:

$$\varphi = A \left( \frac{1}{y^{n+1}} - 1 \right) - a \ln y \quad (3)$$

где  $\varphi$  - угол между радиус-вектором и положительным направлением оси X;  $y = r/r_0$  - относительный радиус;  $A = (y_{max}^n / k r_0 (n+1)) V_{max}$ ,  $y_{max} = r_{max} / r_0$ ,  $r_0$  — радиус, при котором считается, что  $\varphi = 0$ ;  $l = 2 \omega \sin \Phi$  - параметр Кориолиса ( $\omega$  - угловая скорость вращения Земли,  $\Phi$  - широта места);  $a = l/k$ ,  $k$  — коэффициент трения;  $n$  — показатель степени;  $V_{max}$  - максимальная скорость ветра в ТЦ,  $r_{max}$  - радиус максимального ветра в ТЦ.

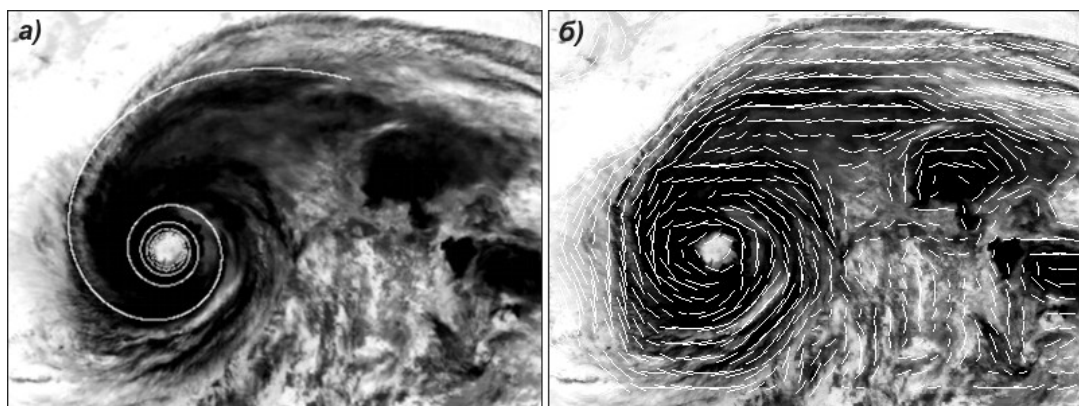


Рис. 4. а). Спираль и полутоновое ИК-изображение облачности ТЦ РАВУК (19.08.2001 12:00 UTC), б). Карта ДОТК для ТЦ РАВУК.

На рис. 4а представлен пример оптимально подобранной и нанесенной на изображение ТЦ РАВУК гиперболически-логарифмической спирали. На рис. 4б представлена карта ДОТК, рассчитанная для данного ТЦ.

*Оптимальная подгонка.* Для оптимальной подгонки параметров спирали использовалась следующая целевая функция:

$$f(P) = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \min(|\Theta t_j^i(P) - \Theta d_j^i|, \pi - |\Theta t_j^i(P) - \Theta d_j^i|), \quad (4)$$

где  $M$  - число строящихся спиралей для одного изображения ТЦ;  $N$  - число точек на спирали;  $\Theta t_j^i$  и  $\Theta d_j^i$  - значение угла касательной в  $i$ -й точке  $j$ -й ГЛС и значение ближайшего угла ДОТК в  $\varepsilon$ -окрестности данной точки;  $P$  — параметры спирали. Начальные точки спиралей равномерно распределены по окружности радиуса  $r_0$ .

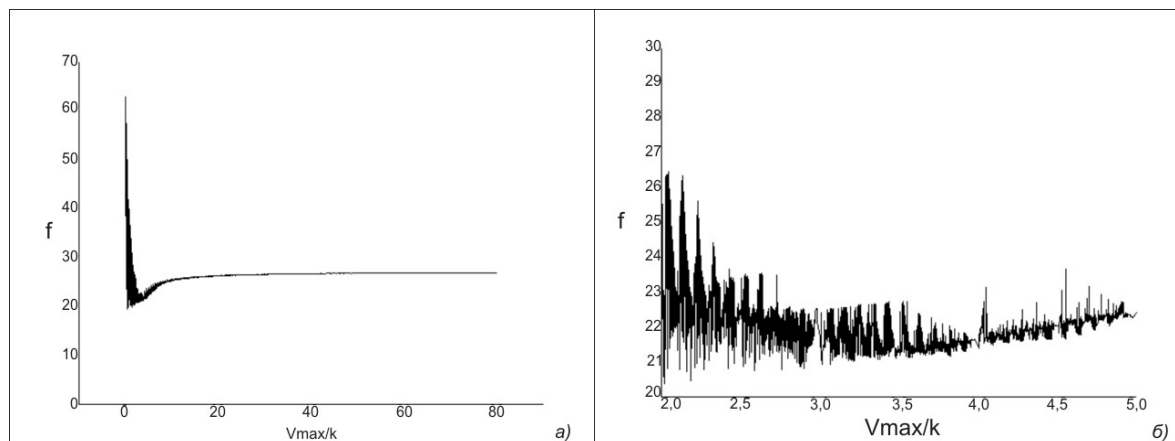


Рис. 5. а) - Вид целевой функции по одиночному изображению ТЦ в диапазоне параметров:  $0 < V_{max}/k \leq 80$ . б) Область минимальных значений целевой функции.

В результате экспериментов был получен вид целевой функции в зависимости от соотношения параметров  $V_{max}$  и  $k$ . При этом фиксировались следующие параметры:  $n = 0.5$ ,  $r_0 = 75$  км,  $r_{max} = 75$  км. Параметры  $n$  и  $r_{max}$  брались средними для ТЦ, а параметр  $r_0$  не оказывал существенного влияния на форму спирали. Функция многоэкстремальна, и, как видно из рис. 5А, имеет ярко выраженный минимум величин локальных экстремумов в области соотношений  $V_{max}$  и  $k$ , лежащих в диапазоне 2-5. На рис. 5б детально представлены величины локальных экстремумов целевой функции.

Значения локальных минимумов целевой функции в поле параметров  $V_{max}$  и  $k$  оказались расположены вдоль прямой для большинства тайфунов (рис. 6). То есть значения отношения параметров  $V_{max}/k$  по сути являются постоянными, что позволяет говорить о возможности использования ГЛС для подбора физических параметров ТЦ.

*Оценка коэффициента трения.* Целью эксперимента была оценка коэффициента трения по получившимся спутниковым оценкам  $V_{max}$  Японского метеорологического агентства. По спутниковым оценкам величины  $V_{max}/k$  можно оценить величину коэффициента трения:

$$k = V_{max\_JP} / (V_{max}/k_{model}), \quad (5)$$

где  $V_{max\_JP}$  - оценки максимальных скоростей ветра в ТЦ по данным ЖМА;  $V_{max}$  - максимальная скорость ветра в ТЦ;  $k$  - коэффициент силы трения, рассчитанной на единицу массы воздуха.

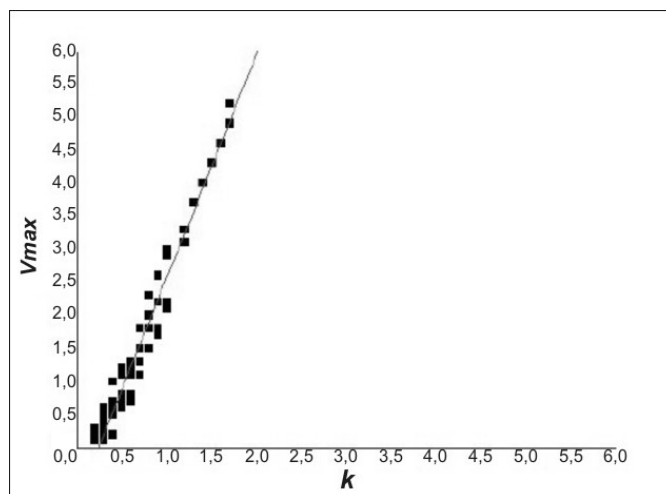


Рис. 6. Значения минимумов локальных экстремумов целевой функции в поле параметров  $V_{max}$  и  $k$ .

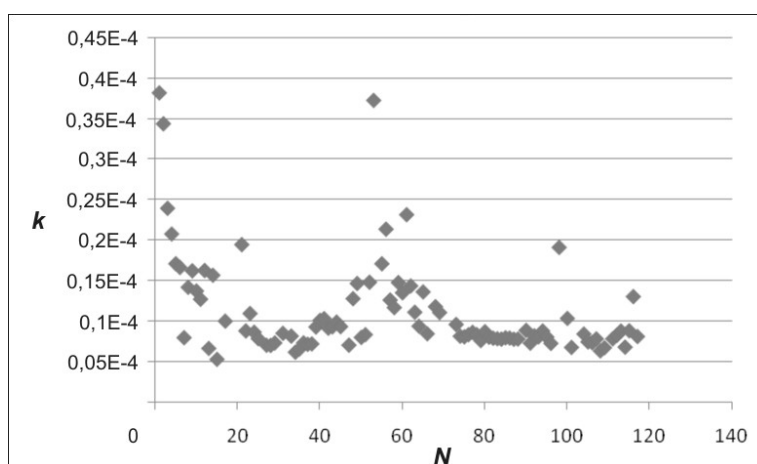


Рис. 7. Значений коэффициента приводного трения в 98 ТЦ, оцененных по спутниковым данным и максимальным скоростям ветра Японского метеорологического агентства.

На рис. 7 отражены полученные значения коэффициентов трения для набора изображений ТЦ. Данные значения коэффициента трения  $k$  лежат в теоретически допустимых пределах его значений с некоторым смещением в сторону низких значений. Использование значений  $V_{max}$  Объединенного центра предупреждения о тайфунной опасности (JTWC, США), существенно улучшает величины  $k$ , так как оценки скоростей JTWC обычно существенно выше японских.

*Использование спирали для уточнения центра ТЦ.* Для выяснения возможности использования модели ГЛС для уточнения центра ТЦ был проведен анализ средних отклонений касательных к спирали и ДОТК ( $\Delta\Theta$ ) в зависимости от  $\varphi$  для нескольких циклонов. На рис. 8 представлено 2 типичных графика изменчивости отклонений для различных положений центра ТЦ.

Наименьшие величины рассогласований дает спираль, построенная с точно рассчитанным центром (график В). График (С) соответствует спирали, центр которой был смещен на 50 км северо-восточнее центра ЖМА. Эту закономерность можно использовать для уточнения центра ТЦ путем минимизации средних отклонений.

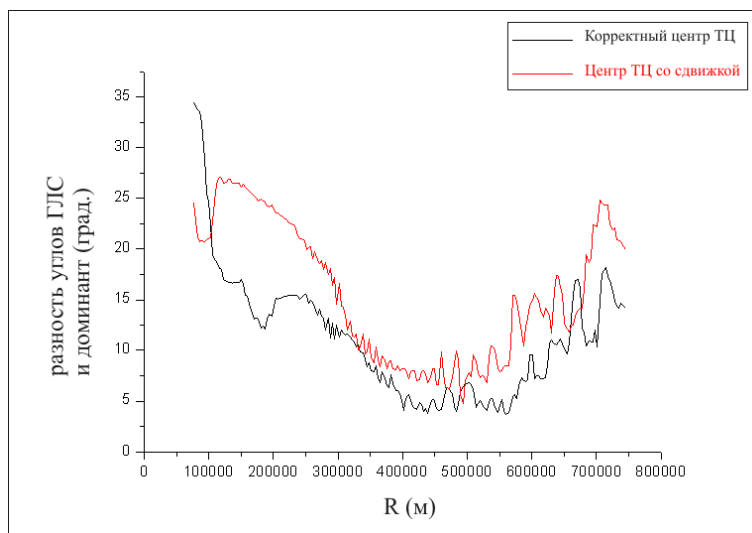


Рис. 8 Значения средних рассогласований ДОТК и касательных к спирали в зависимости от полярного угла  $\varphi$  (РАВУК, 20.08.2001 00:30 UTC).

Нижний график – центр спирали взят по данным ЖМА;  
 верхний график – центр спирали смещен на 50 км на северо-восток.

*Вертикальные профили температуры и влажности.* Еще одним информативным источником информации о тайфунах являются атмосферные профили, рассчитываемые по данным микроволнового пассивного зондирования Земли. Атмосферное зондирование со спутников в настоящее время является основным источником информации о профилях водяного пара, температуры и о полях ветра. Ключевым здесь является вертикальный зондировщик ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder). Вертикальные профили температуры и влажности, рассчитываемые на основе измерений радиометров ATOVS/NOAA пакетами программ Европейского космического агентства (AAPP, RTTOV и MetOffice-1Dvar), используются для проведения анализа ТЦ. Профили предоставляют информацию для вычисления в ТЦ вертикальных разрезов поля аномалий температуры атмосферы.

Для оценки потенциала применения спутниковых атмосферных профилей и верификации полученного программного обеспечения был проведен ряд экспериментов по расчету теплового ядра ТЦ, радиальных профилей интегральной влажности и оценке падения давления в центре ТЦ. Для того, чтобы обеспечить полное покрытие ТЦ данными со спутника NOAA, его трехмерная структура строилась на основе данных двух смежных витков с временной разницей в 1,5 часа. Эксперименты показали, что при такой разнице

во времени изменчивость температурных полей незначительна. В то же время наблюдающиеся редкие, но значительные «выбросы» в отдельных точках, убирались с помощью медианной фильтрации. Для анализа трехмерной структуры ТЦ строились вертикальные сечения поля температур, проходящих через центр ТЦ (вдоль меридиана) с усреднением по радиусу в каждой полуплоскости.

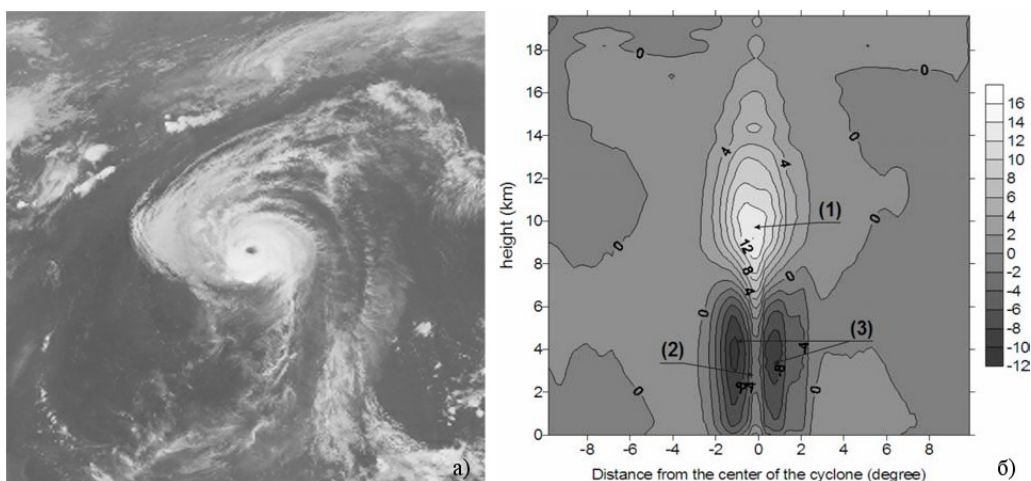


Рис. 9. Тайфун Usagi: а) Изображение облачности ТЦ за 1 августа 2007 года; б) Меридиональный разрез аномалии температуры тайфуна (1 – теплое ядро ТЦ, 2 – глаз, 3 – зоны ливневых осадков).

Для построения теплового ядра ТЦ рассчитывались аномалии температуры. Для этого считался средний вертикальный профиль температуры на периферии тайфуна (на расстоянии  $5^\circ$  от центра). Далее этот профиль вычитался из спутниковых профилей ТЦ и для получившихся значений аномалии температуры производилось построение вертикальных сечений.

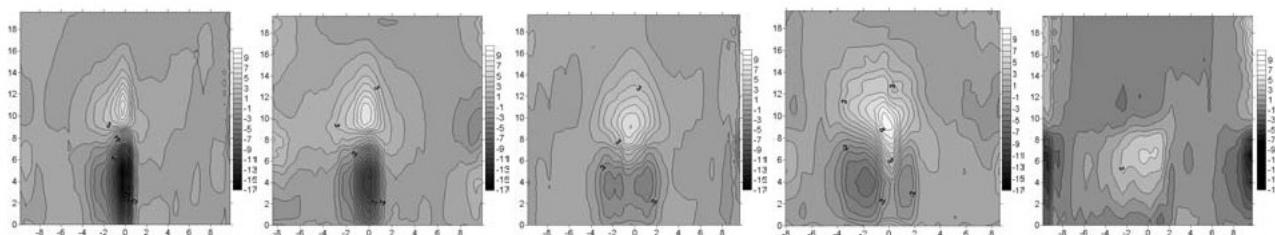


Рис. 10. Изменчивость структуры аномалии температуры ТЦ Usagi в течение его жизни. Согласно оценкам Японского метеорологического агентства сила тайфуна в балах менялась следующим образом: баллы 3,4,5,5,3.

На рис. 9 приведен пример разреза, а на рис. 10 представлены 5 разрезов аномалии температуры тайфуна Usagi на различных стадиях его жизни. Четко видны стадии зарождения (высота и интенсивность) тайфуна, достижения максимальной интенсивности и затухания. Характеристики ядра ТЦ, которые сейчас можно проследивать в режиме реального времени, коррелируют с его интенсивностью. Эксперименты показали, что ошибки в определении



положения центра ТЦ приводят к размытости ядра, его асимметрии и падению величины аномалии температуры, что можно использовать для коррекции положения центра. Особенно это актуально для стадий зарождения ТЦ и его разрушения, когда оценки положения центра, определяемые на основе современных технологий анализа облачности и центр реальной циркуляции ветра у поверхности расходятся на 100 и более километров.

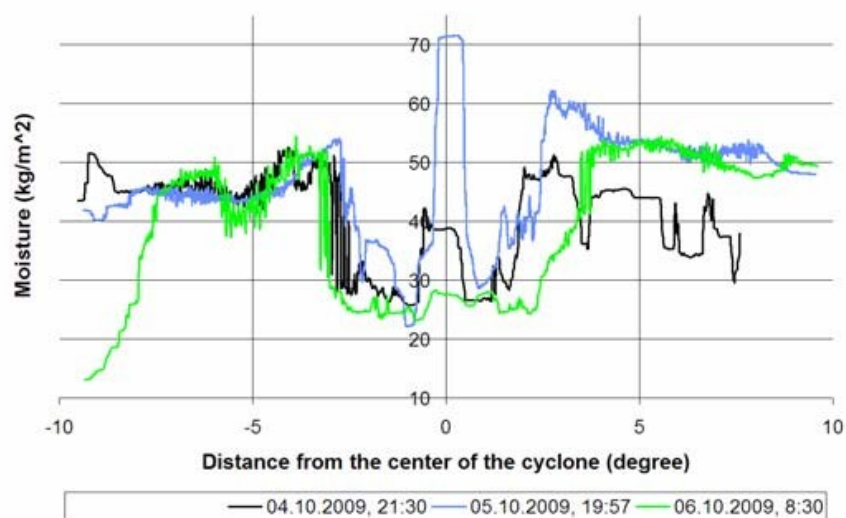


Рис. 11 Графики распределения интегрального влагосодержания тайфуна Melor (2009 год).

Информативным параметром ТЦ является изменчивость средней (по вертикали) величины водяного пара вдоль радиуса (рис. 11). Эта величина на периферии ТЦ (5° от центра) характеризует потенциал «подпитки» энергией ТЦ за счет водяного пара атмосферы. Изменение концентрации водяного пара в ТЦ характеризует процессы углубления циклона и влияет на его эволюцию. Следует отметить, что в центре ТЦ влагосодержание часто имеет ярко выраженный узкий пик. Это свойство можно использовать также для уточнения положения центра развитого тайфуна, когда глаз закрыт облачными образованиями в верхней тропосфере ТЦ.

Атмосферные профили позволяют вычислять в произвольной точке скорость ветра и перепад давления – ключевые параметры для оценки интенсивности тропического циклона. Для оценки перепада давления в ТЦ использовалась барометрическая формула:

$$P = P_0 e^{-g\Delta z / (RT_m)} \quad (6)$$

где  $P_0$  – давление на нижнем уровне,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\Delta z$  – разность высот между двумя уровнями,  $T_m$  – средняя барометрическая температура столба воздуха между взятыми уровнями,  $P$  – давление на верхнем уровне,  $R$  – газовая постоянная. Также предполагалось, что в верхней тропосфере на уровне, где влиянием тайфуна можно пренебречь, давление можно считать постоянным и не зависящим от расстояния до центра. В качестве такого уровня был взят уровень в 5 ГПа. Для оценки перепада давления



достаточно взять две точки, соответствующие атмосферным профилям в центре ТЦ и на его периферии. Они позволяют, исключив  $P$ , получить соотношение между давлениями в центре и на периферии. Величина  $\Delta z/Tm$  рассчитывается через интегрирование температуры в слое. Полагая давление на периферии близким к стандартному (1010 ГПа), можно оценить величину падения давления в ТЦ.

Проведенные пробные расчеты для нескольких тайфунов (MELOR и VAMCO) показали соответствие рассчитанного падения давления с оценками Японского метеорологического агентства (перепад давления был около 30 ГПа). Смещение точки расчета давления в центре ТЦ в зону ливневых осадков (где наблюдается наибольшая неточность расчета температуры воздуха) не меняло перепад давления существенно.

**Четвертая глава** посвящена особенностям реализации системы автоматического мониторинга ТЦ.

Метод автоматического выделения центра ТЦ основан на совместной работе нескольких алгоритмов (рис. 12).

Тематическая обработка спутниковой информации является вычислительно емкой и требует распараллеливания процессов вычислений. Возможность «распараллеливания по данным», то есть нарезка изображения на участки и обработка участка на отдельном процессоре, является существенным преимуществом спутниковой информации. Это позволяет использовать сторонние программные комплексы в параллельных вычислениях без их

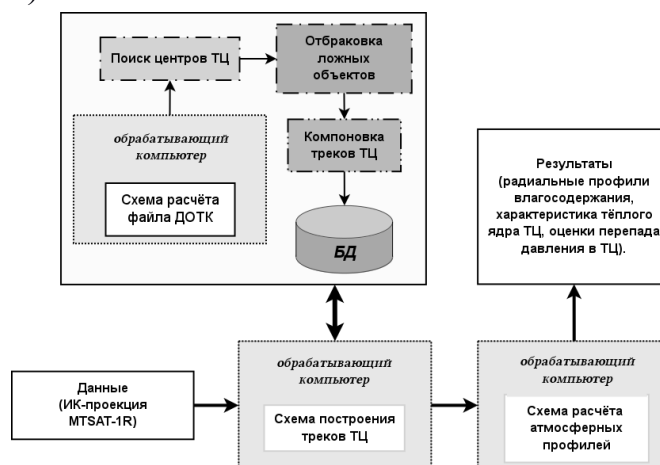


Рис. 12 Общая схема работы автоматической системы.

адаптации под различные библиотеки параллельного программирования. Таким образом, была использована соответствующая автономная процедура «нарезки» данных для расчета структурных карт облачности в виде ДОТК.

Для решения задачи используются возможности Grid-сети ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» (ЦКП ДВВР). В настоящее время Grid-сеть ЦКП ДВВР объединяет ряд вычислительных систем различной архитектуры. Общая производительность ресурсов сети более 18 Тфлопс.

В результате реализации процедуры распараллеливания вычисления карт ДОТК удалось добиться уменьшения времени вычисления с одного часа на изображение (2101x2101 пиксель) до 7 – 8 минут, что в свою очередь положительным образом отразилось на общем времени работы всей системы.

*Работа алгоритма обнаружения круговой циркуляции ТЦ.* Алгоритм основан на построении и анализе структурных карт облачности в форме

доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК), рассчитываемых по ИК-изображениям.

Для работы алгоритма используется одиночное ИК-изображение. При поступлении очередного ИК-изображения в режиме оперативного мониторинга по нему строятся структурные карты облачности в виде ДОТК. Для достижения максимальной эффективности по времени процесс построения карты ДОТК осуществляется на многопроцессорном кластере (SMH-11 с пиковой производительностью до 18Тфлопс) с использованием до 20-ти процессоров одновременно.

После расчета карты ДОТК автоматически производится запуск алгоритма поиска центра ТЦ по круговой циркуляции с использованием карт ДОТК. Результатом работы алгоритма являются начальные приближения предполагаемых центров ТЦ. Все полученные в результате пересчета значения точек заносятся далее в базу данных.

*Построение треков ТЦ.* После прохождения процедуры отбраковки, по полученным центрам ТЦ происходит автоматическое построение треков (временные последовательности, состоящие из координат центров ТЦ). Однако в результате ранее проводимых экспериментов по отбраковке ложных объектов встречался случай, когда размер, структура облачности, форма облачных полос и скорость его перемещения не отличались от параметров обычного тайфуна. Данное циклоническое образование существовало во времени около суток. В связи с этим в процедуре построения треков было введено дополнительное условие фильтрации треков на время их жизни - трек отбраковывается, если его время жизни составляет менее суток.

*Схема распределенной системы обработки.* Для реализации представленной системы используется распределенная система обработки данных. Вся система построена на GRID-вычислениях, где каждый вычислительный узел (в том числе задействованный для вычислений многопроцессорный кластер) является независимым компьютером, связанным с другими посредством сети. Это позволяет одновременно решать несколько задач независимо друг от друга.

При срабатывании установленных триггеров (чаще всего - по появлению новых данных) происходит запуск схемы, обрабатывающей данную задачу. Схема является формальным описанием того, как и на каких обрабатывающих машинах должна запускаться та или иная задача. При запуске схемы она получает порядковый номер, который в дальнейшем используется для контроля процесса выполнения данной задачи. Все соединения с сервером управления обработкой, а также обрабатывающими машинами, происходят по протоколу *ssh*, что обеспечивает простоту взаимодействия и высокий уровень безопасности устанавливаемых соединений. После успешного выполнения задачи обрабатывающий сервер выставляет соответствующий флаг. Все результаты работы задачи сохраняются на сервере базы данных.

Такая автоматическая распределенная система позволяет достичь

нескольких целей: полностью автоматический запуск необходимых задач с возможностью их ручного запуска; оперативность обработки поступающих данных; автоматическое распределение вычислительных ресурсов между задачами; устойчивость к выходу из строя тех или иных обрабатывающих машин; все поставленные в очередь задачи в конечном итоге будут обработаны.

Во время построения треков ТЦ происходит автоматический запуск процедуры расчета атмосферных профилей температуры и влажности для регионов с центром в узлах трека и геометрическими размерами 1000x1000 км.

*Взаимодействие системы с пользователем.* Система автоматического мониторинга ТЦ реализована в виде набора управляющих скриптов, которые в свою очередь обеспечивают непрерывный процесс обработки поступающих данных и осуществляют запуск соответствующих программ и алгоритмов.

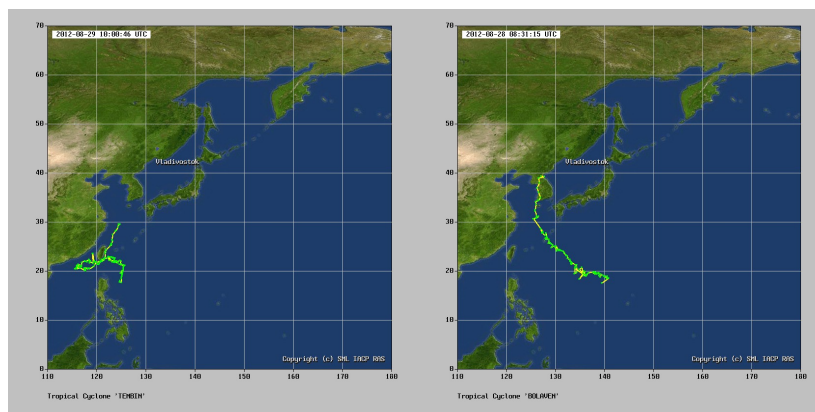


Рис. 13. Траектория ТЦ «BOLAVEN» за период времени 2012-08-21 03:00:45 - 2012-08-28 09:31:15 UTC (слева) и ТЦ «TEMBIN» за период времени 2012-08-20 01:31:14 - 2012-08-29 10:00:46 UTC (справа) построенные автоматически.

*Результаты опытной эксплуатации системы.* Опытная эксплуатация системы автоматического мониторинга ТЦ проводилась на ТЦ 2011 - 2012гг. В результате опытной эксплуатации системы автоматически были построены треки для ТЦ: **HAIMA** (2011.06.16 - 2011.06.25 UTC); **MA-ON** (2011.07.11 - 2011.07.31 UTC); **MUIFA** (2011.07.27 - 2011.08.15 UTC); **BOLAVEN** (2012-08-21 03:00:45 - 2012-08-28 09:31:15 UTC) (рис 13, слева); **TEMBIN** (2012-08-20 01:31:14 - 2012-08-29 10:00:46 UTC) (рис. 13, справа). При наличии глаза в ТЦ его центр определяется с пиксельной точностью (до 4 км). В целом треки ТЦ строятся устойчиво, но довольно редкие большие отклонения точек (до 150 км) приводят к разрывам треков. Также разрывы треков могут происходить в результате задержки ИК-изображений, либо их выпадения из оперативной обработки. Данные проблемы решаются дополнительным пересчетом частей треков при поступлении недостающих данных и корректировкой выбросов выбросов процедурой интерполяции трека в точках отклонения.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Создан алгоритм поиска глаза ТЦ и оценки его геометрических размеров с использованием модифицированного  $t$ -критерия делимости участков облачности. Произведен подбор оптимальных параметров для алгоритма.
2. Создан алгоритм поиска центра ТЦ по картам ДОТК с использованием круговой модели циркуляции облачности и произведен подбор оптимальных параметров для его работы.
3. Доказана возможность применения модели гиперболически-логарифмической спирали облачно-дождевых полос для оценки динамических параметров ТЦ по спутниковой информации.
4. Исследована и решена проблема отбраковки ложных объектов.
5. Создана система автоматического мониторинга ТЦ. Данная система содержит следующие подсистемы: поиск центров ТЦ на основе круговой модели циркуляции; поиск центра глаза ТЦ и оценка его геометрических размеров; автоматическое построение треков устойчивых во времени объектов.
6. Выполнена интеграция системы в структуру распределенной системы обработки ЦКП Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН. Проведена апробация работы системы на примере нескольких ТЦ в летние периоды 2011 и 2012 гг.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Алексанин А.И., Еременко А.С. Автоматический расчет траектории тропических циклонов по данным геостационарного спутника MTSAT-1R // **Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса**. 2007. вып. 4, Т. II. С. 9 – 14.
2. Алексанин А.И., Еременко А.С. Автоматический расчет траекторий тропических циклонов по данным геостационарных метеорологических спутников // **Исследование Земли из космоса**. 2009. №5. С. 22-31.
3. Алексанин А.И., Еременко А.С. Автоматический расчет параметров спиральной закрутки тропического циклона по спутниковым изображениям для оценки его динамических характеристик // **Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса**. 2010. Т.7. №4. С.21-26.
4. Еременко А.С. Опытная эксплуатация системы автоматического мониторинга тропических циклонов // **Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса**. 2013. Т.10. №1. С. 320-327.
5. Еременко А.С., Алексанин А.И. Расчет траектории и параметров глаза тайфуна по серии спутниковых изображений // Сборник тезисов XXX Дальневосточной математической школы-семинара имени академика Е.В.

- Золотова, Хабаровск. 2005. С.27.
6. Алексанин А.И., Еременко А.С. Автоматический расчет траектории тропических циклонов по данным геостационарного спутника MTSAT-1R // Сборник тезисов четвертой всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. 2006. С. 95.
  7. Alexanin A.I., Diakov S.E., Eremenko A.S., Naumkin Yu.V., Nedoluzhko I.V. Atmosphere and ocean monitoring in FEB RAS satellite centre: tasks and present state // Proc. of the International Conference Advances of Satellite Oceanography: Understanding and Monitoring of Asian Marginal Seas. Vladivostok, Russia. 2007. pp.15-16.
  8. Еременко А.С. Опытная эксплуатация алгоритмов автоматического расчета траектории тропических циклонов по данным геостационарных спутников Земли // Сборник тезисов XXXIII Дальневосточной математической школы-семинара имени академика Е.В. Золотова. Владивосток. 2008. С.13.
  9. Алексанин А.И., Еременко А.С., Боловин Д.А., Дьяков С.Е. «Возможности спутникового центра Дальневосточного отделения Российской академии наук по диагностике и мониторингу тропических циклонов» // Материалы Третьего международного экологического форума «Природа без границ». Владивосток. 2008. С.438-440.
  10. Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Бабяк П.В., Боловин Д.А., Громов А.В., Наумкин Ю.В., Фомин Е.В., Недолужко И.Е., Еременко А.С., Круглов М.В. Спутниковое информационное обеспечение мониторинга океана и атмосферы в ДВО РАН // Сборник тезисов четвертой международной конференции «Земля из космоса – наиболее эффективные решения». Москва. 2009. С. 206-207.
  11. Alexanin A.I., Eremenko A.S., Bolovin D.A., Dyakov S.E. Automatic Computation of Tropical Cyclone Tracks on Geostationary Satellite Imagery // Proceedings of First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2010). Vladivostok, Russia. pp. 255-258.
  12. Еременко А.С., Боловин Д.А. Опытная эксплуатация системы автоматического мониторинга тропических циклонов // Сборник тезисов Девятой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. 2011. С. 88.
  13. Еременко А.С., Боловин Д.А. Система автоматического обнаружения тропических циклонов с вычислением их геометрических и термодинамических характеристик // Материалы конференции «Использование средств и ресурсов Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане для информационного обеспечения морской деятельности в Российской Федерации (ЕСИМО'2012)», Обнинск. 2012. С.114.



**Личный вклад автора.** Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В работе [5] автором разработан и реализован алгоритм поиска глаза ТЦ по спутниковым изображениям. В работах [1, 6, 7] автору принадлежит разработка и реализация алгоритма идентификации ТЦ на основе круговой модели с привлечением карт структуры облачности в виде доминантных ориентаций термических контрастов. В работах [9, 10] автору принадлежит разработка и реализации опытного варианта системы автоматического построения траектории ТЦ. В работе [2] автором разработана общая схема работы системы построения траекторий ТЦ с одновременной отбраковкой ложных объектов. В работах [3, 11] автором исследована модель гиперболически-логарифмической спирали на возможность ее применения для идентификации спиральной облачности ТЦ с целью получения физических характеристик тропического циклона, а также для уточнения центра тропического циклона. В работах [12, 13] автору принадлежит работающий прототип системы автоматического мониторинга ТЦ.

Еременко Александр Сергеевич

Автоматический мониторинг тропических циклонов по данным  
метеорологических спутников Земли

Автореферат

Подписано к печати: \_\_.\_\_.2014      Усл. Печ. л. 1,0      Уч.-изд. л. 0,8  
Формат 60x84/16                      Тираж 100                      Заказ \_\_

---

Издано ИАПУ ДВО РАН. Владивосток, Радио, 5

Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН

Владивосток, Радио, 5