

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

**ЕРЁМЕНКО Александр Сергеевич**

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

Специальность 05.13.18 — Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н. Алексанин А.И.



Владивосток — 2014

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 1. МОНИТОРИНГ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ</b> .....	<b>17</b>
1.1 О тропических циклонах.....	17
1.2 Источники информации о тропических циклонах.....	20
1.3 Тропические циклоны, методы и подходы к их диагностике.....	26
1.3.1 Методика Дворака.....	26
1.3.2 Возможности диагностики ТЦ по микроволновым изменениям.....	29
1.3.3. Оценка макропараметров ТЦ.....	34
1.3.4 Автоматическое прослеживание ТЦ.....	35
1.4 Выводы по главе.....	37
<b>ГЛАВА 2. АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРА ТЦ</b> .....	<b>39</b>
2.1 Используемые данные.....	39
2.2 Алгоритм обнаружения «глаза» ТЦ.....	41
2.2.1 «Глаз» ТЦ.....	41
2.2.2 Критерий разделимости участков изображений по яркости.....	42
2.2.3 Эффективность работы алгоритма.....	44
2.3 Алгоритм обнаружения ТЦ и расчёта его центра.....	44
2.3.1 Структурные карты облачности в виде доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК).....	45
2.3.2 Сопоставление направлений скоростей ветра в ТЦ с ДОТК.....	47
2.3.3 Обнаружение ТЦ.....	51
2.3.4 Оценка точности работы алгоритма.....	55
2.4 Сравнение разработанного подхода с существующими методиками.....	58
2.5 Проблема отбраковки ложных объектов.....	63
2.6 Выводы по главе.....	64

<b>ГЛАВА 3. МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРА ТЦ.....</b>	<b>66</b>
3.1 Применение гиперболически-логарифмической спирали (ГЛС) для расчёта геометрии облачных полос.....	66
3.2 Использование вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы для расчёта параметров ТЦ.....	73
3.3 Выводы по главе.....	78
<b>ГЛАВА 4. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЦ.....</b>	<b>79</b>
4.1 Схема работы системы построения треков ТЦ.....	80
4.1.1 Распараллеливание расчёта карта доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК).....	81
4.1.2 Схема работы алгоритма обнаружения круговой циркуляции ТЦ.....	82
4.1.3 Фильтрация «ложных» объектов.....	82
4.1.4 Схема работы алгоритма поиска «глаза» ТЦ.....	83
4.1.5 Построение треков ТЦ.....	84
4.1.6 Трёхмерная структура ТЦ.....	85
4.2 Структура распределённой системы обработки.....	86
4.3 Результаты опытной эксплуатации системы.....	91
4.4 Выводы по главе.....	93
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>95</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>97</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность работы**

Обнаружение тропических циклонов (ТЦ) и определение их макропараметров (положение центра, геометрические размеры, перепад давления, максимальная скорость ветра) является одной из важных задач дистанционного зондирования атмосферы. 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: частота получаемой информации (интервал между изображениями с геостационарных спутников достигает 15 минут); практически мгновенное покрытие больших площадей; высокая детальность изображений; возможность получения трёхмерной картины распределения характеристик температуры и влагосодержания атмосферы, а также параметров поверхности океана.

Спутниковые данные являются основой для мониторинга ТЦ. Поэтому актуальна проблема определения положения центра и макропараметров ТЦ. На сегодняшний момент времени широко применяется методика Дворака и её модификации. Она основана на анализе структуры облачности экспертами по изображениям с геостационарных спутников. Для её работы применяются спутниковые данные в видимом и ИК-диапазоне. Методика не позволяет проводить все расчёты полностью автоматически. По этой причине разные эксперты, применяя данный подход, могут давать различные оценки. Сравнение оценок параметров ТЦ Объединённого тайфунного центра США [59] и Японского метеорологического агентства [72], показывают различия в оценках местоположений центра ТЦ (50 — 100 км). Особенно большие ошибки на

начальной и конечной стадиях жизни. Влияние 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.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является исследование, разработка и реализация технологии автоматического мониторинга тропических циклонов по данным спутникового дистанционного зондирования с определением их геометрических характеристик и построением траектории движения. В работе используются спутниковые структурные карты облачности в форме доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) и вертикальные профили температуры и влажности атмосферы, определяемые по микроволновым данным. ДОТК – это угол статистически значимой касательной к изотермам в заданной окрестности точки изображения. Сдвиговый характер атмосферных потоков в ТЦ 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).

### **Задачи исследования**

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка и программная реализация алгоритма автоматической идентификации ТЦ с расчётом его центра и геометрии.
2. Разработка и программная реализация алгоритма автоматического нахождения и расчёта размера «глаза» ТЦ.
3. Исследование модели гиперболически-логарифмической облачной спирали на предмет применения её для расчёта максимальной скорости ветра в ТЦ.
4. Разработка и реализация системы автоматического мониторинга тропических циклонов с привлечением данных вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы.
5. Интеграция системы автоматического мониторинга тропических циклонов в структуру распределённой системы обработки спутниковых данных Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

### **Методы исследования**

Проведённые исследования основываются на применении вычислительных методов линейной алгебры, методов распознавания образов, методов статистики, методов оптимизации, а также технологии параллельных и распределённых вычислений.

### **Научная новизна**

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

### **На защиту выносятся**

1. Использование изменчивости рассогласования ДОТК вдоль радиуса ТЦ позволило создать критерий и построить алгоритм автоматической идентификации ТЦ по изображениям геостационарных спутников.
2. Использование эмпирической модификации  $t$ -критерия Стьюдента о разделимости двух областей по яркости позволило построить алгоритм автоматического нахождения глаза ТЦ с расчётом размера глаза.
3. Эксперименты с использованием модели гиперболически-логарифмической спирали облачности показали возможность оценки динамических параметров ТЦ по спутниковой информации.
4. Разработка и апробация новых методов позволили реализовать технологию автоматического мониторинга ТЦ с расчётом его геометрических параметров и термодинамических параметров в режиме

реального времени. Совместное использование строящейся траектории ТЦ и спутниковых профилей температуры и влажности атмосферы позволяют оценивать: перепад давления, интегральное влагосодержание и характеристики тёплого ядра ТЦ.

**Достоверность результатов работы** обеспечивается корректным применением методов исследования и подтверждается результатами вычислительных экспериментов, существующими закономерностями, а также сопоставлением с результатами общепризнанных методов.

### **Практическая ценность работы**

Результаты работы направлены на обеспечение гидрометеорологических центров своевременной информацией о геометрических и динамических характеристиках тропических циклонов в Дальневосточном регионе. Создана система мониторинга тропических циклонов, которая позволяет в оперативном режиме отслеживать положение центра, оценивать положение и размер «глаза» ТЦ, строить траекторию его движения, рассчитывать по вертикальным профилям температуры и влажности атмосферы динамические параметры ТЦ. Система внедрена в ЦКП Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

### **Апробация результатов работы**

Основные научные и практические результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и отечественных конференциях и семинарах:

- Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва 2006, 2007, 2009, 2010, 2011);
- Дальневосточная математическая школа-семинар им. Академика Е.В. Золотова (Владивосток, 2008);
- Международный экологический форум «Природа без границ» (Владивосток 2008, 2009);
- Первая международная Российско-Тихоокеанская конференция по компьютерным технологиям и приложениям (RPC) (Владивосток, 2010);
- Конференция “Использование средств и ресурсов единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане для информационного обеспечения морской деятельности в Российской Федерации” (ЕСИМО'2012);
- Международная конференция “Remote Sensing of Environment: Scientific and Applied Research in Asia-Pacific” (RSAP2013) (Vladivostok, 2013).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 13 работ, среди которых 4 из списка изданий, рекомендованных ВАК, и 1 из базы Scopus.

### **Научные программы**

Решение задач диссертационной работы выполнялось в рамках следующих научных проектов и программ:

1. Проект РФФИ 05-01-01110-а: «Мониторинг и диагностика тропических циклонов в режиме реального времени»;
2. Проект РФФИ 08-07-00227-а: «Информационная система спутникового мониторинга океана и атмосферы Тихоокеанского региона»;
3. Проект РФФИ 11-01-00593-а: «Разработка технологии и моделей автоматического мониторинга тропических циклонов по данным спутникового дистанционного зондирования»;
4. Проекты ДВО РАН (автор является руководителем):
  - 10-III-B-07-176: «Создание технологии автоматического мониторинга тропических циклонов с использованием температурных атмосферных профилей»;
  - 11-III-B-07-141: «Апробация и внедрение системы автоматического мониторинга тропических циклонов с использованием атмосферных профилей температуры и влажности в оперативном режиме».

### **Структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Основной объём диссертации составляет 104 страницы, в который входят: библиографический список из 83 наименований, 31 рисунок.

**Первая глава** посвящена обзору литературы по теме диссертации. В ней представлен обзор и анализ существующих методов и подходов ручного и автоматического мониторинга ТЦ.

**Во второй главе** описываются алгоритмы автоматического детектирования «глаза» ТЦ, центра ТЦ на основе модели круговой циркуляции

ветра, приведены результаты апробации методов на 3-х летней серии изображений Дальневосточного региона.

Алгоритм обнаружения «глаза» ТЦ основан на расчёте модифицированного  $t$ -критерия делимости двух участков изображения с различной яркостью [3]. Данный алгоритм использует для расчётов ИК-изображения со спутников MT-SAT. Алгоритм автоматического выделения центра «глаза» ТЦ, как правило, даёт наилучшую оценку центра ТЦ, но отсутствие видимого «глаза» на стадии зарождения и разрушения ТЦ, а также в случае затянутости «глаза» облачностью и наличие ложных объектов 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 основан на построении и анализе структурных карт облачности в форме доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК), рассчитываемых по ИК-изображениям.

В результате экспериментов было выявлено, что для успешной фильтрации ложных объектов необходимо задействовать серию как минимум из 3-х подряд 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). Таким образом, 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 тёплого ядра ТЦ, перепада давления, максимальной скорости ветра в ТЦ).

В работе была исследована возможность применения модели гиперболически-логарифмической спирали для расчёта геометрии облачных полос тропических циклонов (ТЦ) на ИК-изображениях геостационарных спутников. Использовались структурные карты облачности ТЦ в форме доминантных ориентаций термических контрастов для автоматического расчета параметров спирали, два из которых являются оценками максимальной скорости ветра и коэффициента трения. Приводятся результаты исследований зависимостей между параметрами спирали и величиной максимальной скорости ветра.

Траектория ТЦ является основой для автоматического вычисления и анализа трёхмерной структуры ТЦ. 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 кросс-секций поля аномалий температуры атмосферы [39]. Кросс-секция - плоское изображение вертикального сечения пространства, проходящего через центр ТЦ. Данное изображение получается путём упорядочивания точек по расстоянию на каждом уровне с последующим осреднением значений (по горизонтали) [71].

Атмосферные профили могут быть использованы для вычисления скорости ветра и/или перепада давления. Эти параметры являются ключевыми в оценке интенсивности ТЦ в любой его точке. Также атмосферные профили позволяют уточнить центр ТЦ в тех случаях, когда ТЦ находится в фазе зарождения или затухания. Во время процесса затухания происходит размытие структуры облачности ТЦ, в то время как вертикальный разрез температурной

аномалии, проходящий через его центр, сохраняет явно выраженные границы ядра. Таким образом, оценив положение центра тёплого ядра ТЦ мы получим положение его центра.

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

Для работы системы автоматического построения треков ТЦ используются ИК-изображения с геостационарных спутников MTSAT с пространственным разрешением в 4 км. Все снимки поступают в оперативном режиме. Для каждого изображения производится расчёт карты доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) на многопроцессорном кластере. Для автоматического обнаружения центра ТЦ используются ранее разработанные алгоритмы обнаружения “глаза” и центра ТЦ по циркуляции на основе карт ДОТК. В общей схеме работы системы также имеется модуль построения треков ТЦ с последующей автоматической отбраковкой ложных объектов на основе накопленных данных.

Профили температуры и влажности атмосферы рассчитываются по данным радиометров ATOVS полярно-орбитальных метеорологических спутников серии NOAA европейскими пакетами программ AAPP, RTTOV и MetOffice-1Dvar. Исходные спутниковые данные для построения профилей в тропической зоне берутся из NOAA Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS) с помощью автоматической системы оформления и получения заказов собственной разработки в оперативном режиме.

После прохождения процедуры отбраковки, по полученным центрам ТЦ строятся их треки (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 [3]. 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 забраковывается, если его время жизни составляет менее суток.

Во время построения треков ТЦ происходит автоматическая подкачка данных для запуска процедуры расчёта атмосферных профилей температуры и влажности для регионов с центром, совпадающими с текущими центрами ТЦ. Регионы имеют геометрические размеры — 1000x1000 км.

## ГЛАВА 1. МОНИТОРИНГ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

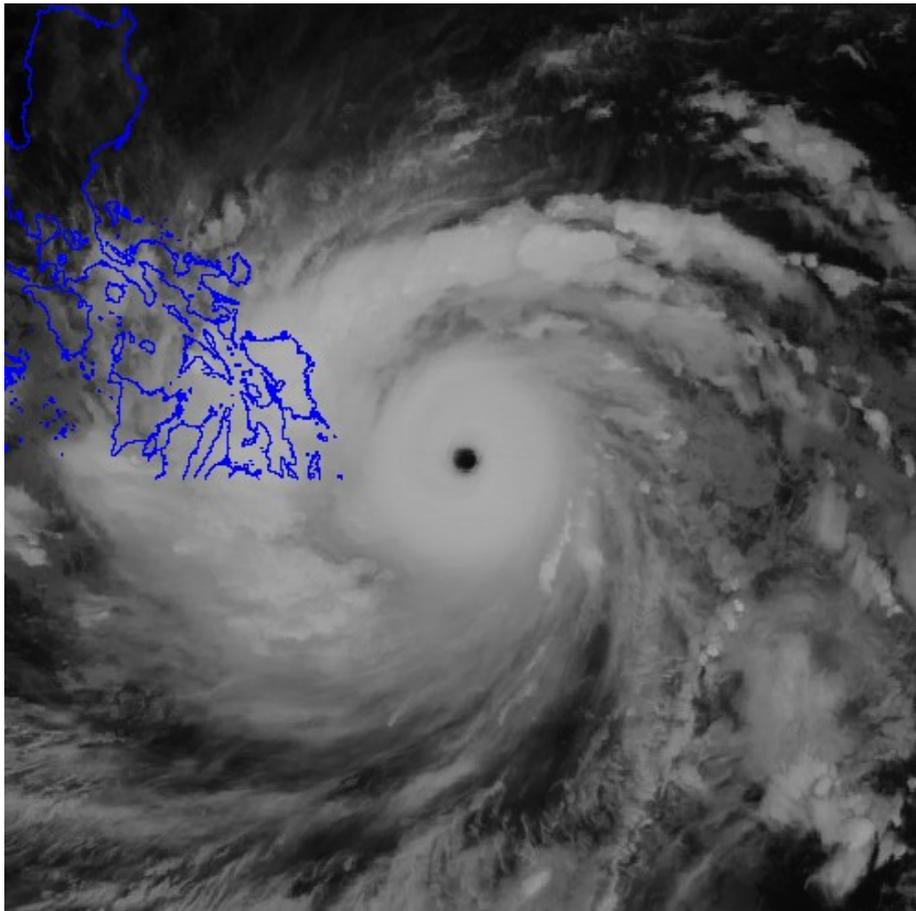
### 1.1 О тропических циклонах

Тропические циклоны могут возникать в любое время года в тропических частях всех океанов, за исключением юго-восточной части Тихого океана и южной Атлантики. Их число сильно меняется от района к району и от года к году. Чаще всего тропические циклоны возникают в северной части тропической зоны Тихого океана. Здесь в среднем за год прослеживается около 32 ТЦ. Наибольшая их повторяемость отмечается в августе и сентябре, т.е. в конце лета. Наиболее часто (в 65% случаев) ТЦ возникают между широтами 10 и 20 градусов. В более высоких широтах они возникают лишь в 13% случаев [14].

Скорость ветра в ТЦ может достигать 50 м/с и более, поэтому они представляют серьёзную опасность для судов и вызывают значительные разрушения, когда выходят на сушу. Сформировавшийся ТЦ можно рассматривать как осе-симметричный. Сильные ветры направлены по спирали к центру против хода часовой стрелки в Северном полушарии и по часовой – в южном. В центре располагается область затишья и небо часто безоблачное – это «глаз» ТЦ. На удалении от центра ТЦ наблюдаются спиральные полосы перистых и перисто-слоистых облаков. Чем ближе к центру, тем мощнее облачность, сопровождаемая сильными осадками. Глаз ТЦ окружён плотными и мощными кучево-дождевыми облаками. Именно здесь происходит быстрый подъём воздуха, и при конденсации водяного пара выделяется огромное количество скрытой энергии. Здесь идут ливневые дожди, сопровождаемые

грозами. Благодаря выделению скрытой теплоты развитый циклон имеет тёплое ядро [18].

Тропические циклоны (Рисунок 1), называемые тайфунами в северо-западной части Тихого океана, достигают территорий российского Дальнего Востока, оказывая влияние на погодные условия. Наиболее подвержены их влиянию Приморский край, Сахалинская область, Японское море и южная часть Охотского моря. При выходе на побережье тропические циклоны приносят сильный ветер и обильные осадки, что приводит к возникновению чрезвычайных ситуаций и наносит значительный ущерб хозяйству региона. По этой причине предсказание траектории тропического циклона, его интенсивности и ожидаемых осадков является актуальной задачей.



**Рисунок 1** Тайфун «HAIYAN», изображение в ИК спектральном диапазоне за 07.11.2013 (MTSAT-2).

Широко распространенный в мировой практике подход к прогнозу перемещения ТЦ и его интенсивности базируется на численных моделях прогноза погоды [26, 32, 57], основным источником данных для которых в настоящее время становятся профили температуры и влажности, рассчитываемые по данным радиометров ATOVS, либо сами данные ATOVS. Для прогноза траектории тайфуна в числовые поля модели прогноза погоды вносятся модельные поля ТЦ, построенные на основе оцененных (в основном по спутниковой информации) макропараметров. К последним относятся: положение центра ТЦ, минимальное давление в центре тропического циклона, максимальный ветер, размеры зон ураганных и сильных ветров. Эти параметры используются и как предикторы при применении статистических методов прогноза [33]. Они же востребованы и в моделях эволюции ТЦ. Поэтому точность их определения играет ключевую роль при прогнозе эволюции ТЦ [29].

Обычно тропический циклон (тайфун) проходит над океаном, где мало метео- и аэрологических измерений. Поэтому информацию о тайфуне можно получить в основном дистанционными спутниковыми методами. В первую очередь – это изображения облачности, анализ структуры которой лежит в основе мониторинга ТЦ, и оценки основных динамических и геометрических параметров тайфунов.

Ежедневный многолетний спутниковый мониторинг ТЦ проводят в нашем регионе две страны - США и Япония, чьи архивы сейчас открыты для использования [59, 72]. Для определения макропараметров тайфунов используются методика Дворака и ее модификации [46, 47, 48], основанные на анализе спутниковых изображений. Конечной целью мониторинга ТЦ является обеспечение моделей прогноза перемещения тайфуна необходимой информацией. Различные модификации методики Дворака дают различные

результаты. Например, максимальные скорости ветра в тайфуне, оцениваемые Объединенным Центром Предупреждения о Тайфунах (США) и Японским Метеорологическим Агентством, расходятся, как правило, в 1.3-1.5 раза. Типичные рассогласования оценки центра ТЦ достигают 50-100 км и более. Значительные рассогласования достигаются и при оценке падения давления в центре циклона [32]. При таких рассогласованиях в результатах диагностики ТЦ трудно надеяться на высокую точность прогноза движения ТЦ и оценке последствий его прохождения. Задача состоит в развитии новых технологий расчета метеополей в режиме реального времени (ветра, водяного пара, температуры атмосферы и поверхности океана (ТПО)) с целью диагностики макропараметров ТЦ и моделирования их эволюции. К основным задачам спутникового мониторинга ТЦ относятся: автоматическое обнаружение ТЦ с оценкой положения его центра, параметров формы, динамики и изменчивости этих параметров по спутниковой информации и аэрологическим измерениям.

## **1.2 Источники информации о тропических циклонах**

Можно выделить следующие источники информации:

1. Источниками информации о состоянии атмосферы могут являться прямые измерения, осуществляющиеся аэрологическими станциями. Это радиозонды, которые запускаются с этих станций. Они представляют собой воздушные шары, заполненные гелием, с прикрепленными к ним датчиками. Радиозонды летят по направлению ветра, и они, как бы, "освещают" атмосферу над планетой, сообщая сведения о состоянии атмосферы до высот 10 и более километров. Плотность аэрологических станций довольно низкая (в частности в

нашей стране) и ее часто не хватает для диагностики ТЦ. Если учесть, что при сильных ветрах, сопровождающих тайфуны, зонды обычно не запускают, а в открытом океане станций просто нет, то данный источник информации не может быть ключевым при организации мониторинга ТЦ. Так же, прямыми измерениями являются самолетные измерения. Иногда практикуют самолетные измерения состояния атмосферы посредством сбрасывания зонда при пролете через тропический циклон. Такие измерения практиковались ранее в тихоокеанском регионе, но опыт показал, что для изучения тайфунов такой способ чреват тяжелыми последствиями: самолет, залетая в тайфун, часто терпел крушение. Так же данные вылеты сопровождались большими затратами. Поэтому, в настоящее время этот способ измерения атмосферной информации используется редко.

2. Наиболее перспективным источником информации о ТЦ являются дистанционные наблюдения Земли из космоса. Наиболее ранними и широко используемыми наблюдениями являются изображения Земли в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах. Первые результаты спутниковых наблюдений за тропическими циклонами были сделаны низкоорбитальными погодными спутниками. Более того, с этого момента спутниковые наблюдения стали вестись в оперативном режиме (примерно с середины 1960-х гг.) С появлением геостационарных спутников, с их способностью часто делать снимки, наблюдение за тропическими циклонами постепенно перешло с низкоорбитальных (либо полярно-орбитальных) спутников на геостационарные [71]. Источником информации о тайфуне служат цифровые данные метеорологических искусственных спутников земли, представляющие собой измерительную информацию, поддающуюся калибровке и прямо предназначенную для обработки на компьютерах. Данная информация является многоканальной, имеет достаточно высокое разрешение и мало подвержена влиянию помех. Так же, эта информация может быть легко представлена в виде

изображений. По данным изображениям можно проследить эволюцию тропических циклонов, а так же рассчитать «облачный» ветер. Восстанавливать поля приводного ветра или давления по таким снимкам затруднительно. Но, несмотря на то, что спутники являются практически единственным источником регулярной оперативной информации о больших территориях земной поверхности, всё же этот инструмент не универсален. Тому есть множество причин, из которых наиболее существенные – чрезвычайная сложность объектов наблюдения, отсутствие моделей, адекватных для любых районов Земли, и специфика спутниковых данных, в формировании которых вносят свой вклад практически все процессы и объекты, находящиеся в поле зрения датчиков. В Дальневосточном регионе, описанную выше информацию, передают полярно-орбитальные ИСЗ NOAA, METOP, Метеор, Aqua, Terra, Suomi-Npp, Fy-3 и геостационары MTSAT-1R, MTSAT-2, GOES-9, а также корейский и китайские геостационары. Спутники MTSAT наиболее удобно расположены для целей мониторинга ТЦ и наблюдают объекты и процессы в инфракрасном и видимом диапазоне спектра. Они обеспечивают громадный захват территории (вся тропическая и среднеширотная зоны Тихого океана) и существенно более высокую повторяемость съемок - в среднем раз в полчаса (имеются и 15-ти минутные интервалы наблюдения, использующиеся обычно для расчета облачного ветра). Измерения в ИК и видимом диапазоне спектра наблюдают "верхушки" облаков. В тайфуне, верхушки облаков – это верхняя тропосфера (10-15 км). Более интересна информация у поверхности земли, а также трехмерная информация по всему объему ТЦ.

3. Для получения информации о подстилающей поверхности под облаками а также трехмерной информации используются спутниковые приборы дистанционного зондирования, но уже в другом диапазоне спектра - микроволновом (сверхвысокочастотном) диапазоне. Этому диапазону радиоволн присущ целый ряд достоинств. Прежде всего это относительная

прозрачность облачности и зависимость прохождения измерения от температуры и влажности атмосферы. Степень влияния атмосферных параметров зависит от длины волны излучения, что позволяет использовать микроволновые измерения как для зондирования подстилающей поверхности под облаками, так и для получения трёхмерной картины распределения этих параметров. Микроволновое измерение можно проводить независимо от времени суток. Такое зондирование позволяет исследовать эволюцию различных погодных систем и использовать спутниковые данные для решения задач анализа и прогноза погоды – особенно при их сочетании с другими видами дистанционных наблюдений.

По данным микроволнового зондирования можно определять скорость ветра над поверхностью океана [52, 60]. Данные о скоростях и направлении приповерхностного ветра необходимы для уточнения прогнозов погоды, выявления зарождающихся ураганов, тропических циклонов, прослеживания путей их следования, расчёта интенсивности штормов на море. Поле приводного ветра (скорость и направление ветра у поверхности) может быть измерено только над океаном микроволновыми скаттерометрами. Скаттерометр – это микроволновой радар, определяющий направление и скорость ветра в приповерхностном слое над морской поверхностью. Радиолокационная система скаттерометра посылает микроволновые импульсы и принимает отражённый от поверхности сигнал. Интенсивность возвращённого сигнала зависит от шероховатости поверхности: для морской поверхности шероховатость, вызванная ветровым волнением, тем сильнее, чем больше скорость ветра.

Первый скаттерометр был установлен на борту американского спутника SeaSat (1978г.), он впервые показал возможность точного измерения скорости ветра из космоса. Однопроходный скаттерометр АМІ (Active Microwave Instrument), имевший трёхантенный радар, работал на борту европейского

спутника ERS-1 с 1991 по 1996гг. В 1996г. НАСА и национальным космическим агентством Японии NASDA был выведен на орбиту спутник ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite), имеющий на борту скаттерометр NSCAT, обеспечивший получение данных о приводном ветре с разрешением 50 км на протяжении 9 месяцев 1996-97гг. В июне 1999г. НАСА был запущен спутник QuikScat, имеющий на борту новый скаттерометр SeaWinds. В зону его видимости попадает 90% территории Мирового океана, не покрытой льдом, таким образом пути атлантических и азиатских тропических циклонов прослеживаются дважды в сутки, что позволяет существенно повысить точность определения их траектории и прогноза интенсивности. В 2002г были запущены спутники ADEOS-II и Aqua, имеющие в числе многочисленной аппаратуры микроволновые радиометры AMSR и AMSR-E, данные которых позволяют получать информацию о направлении и скорости приповерхностных ветров над Мировым океаном [25]. В настоящее время функционирует улучшенный радиометр AMSR-2.

На сегодняшний день, применительно к ТЦ, в случае больших скоростей ветра не удаётся произвести восстановление скорости приводного ветра в центре ТЦ с использованием данных скаттерометров с приемлемой точностью [27]. В случае со слабыми ТЦ взаимодействие ветра с фоновыми воздушными потоками не позволяет отделить их скорости от скоростей в ТЦ.

Спутниковые микроволновые измерения позволяют также получать трёхмерную информацию об основных параметрах атмосферы - температуре и влажности. Ключевым радиометром для получения информации о трёхмерных параметрах атмосферы является радиометр ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder), функционирующий на спутниках NOAA и METOP. ATOVS состоит из модуля расширенного микроволнового (AMSU) и инфракрасного (HIRS) зондировщиков. Основной целью разработки AMSU

было улучшение точности зондирования температуры по сравнению с MSU. Для достижения этого результата подмодуль AMSU-A имеет 12 каналов в диапазоне волн 50-60 ГГц, позволяющих проводить температурное зондирование от поверхности до уровня в 1 мб. Так же AMSU-A имеет каналы 31.4 и 8-ГГц для мониторинга свойств подстилающей поверхности и осадков и канал 23.8GHz для получения интегрального содержания капельной влаги над океаном [53]. Подмодуль AMSU-B имеет в своём составе 5 каналов 89 и 150 ГГц, а так же три канала в районе 183.31 ГГц для получения профилей влажности на низких и средних уровнях. Все каналы AMSU-A имеют пространственное разрешение в 48 км в надире. В свою очередь каналы AMSU-B имеют пространственное разрешение в 16 км в надире. В дополнение к информации о температуре можно получать оценки о зонах осадков, содержании капельной и парообразной влаги [71].

4). В последние годы появился новый источник данных о паросодержании атмосферы - измерения задержки сигналов со спутников GPS (Global Position System) и ГЛОНАСС, принимаемых наземными станциями [50, 58]. Одним из преимуществ данного подхода является то, что в отличие от радиозондовых станций (число которых не велико) сеть островных, береговых и материковых приёмных станций GPS/ГЛОНАСС позволяет проводить измерения с интервалом в 5 мин (GPS). При этом полученные значения интегрального влагосодержания не уступают по точности значениям, полученным с помощью радиозондовых измерений [69]. В то же время, так как использование такого источника данных позволяет получать информацию только об интегральном влагосодержании, это не позволяет использовать его в полной мере для диагностики ТЦ.

### 1.3 Тропические циклоны, методы и подходы к их диагностике

#### 1.3.1 Методика Дворака

Используя изображения, полученные с полярно-орбитальных спутников, Дворак разработал методику [47], которая используется для оценки интенсивности тропических циклонов. Эта методика использует информацию, извлечённую из формы облаков циклона (спиральная закрутка и её кривизна, глаз, центральный облачный покров (ЦДО)) и ежедневные изменения формы циклона по визуальным изображениям для оценки стадии развития тропического шторма.

Позднее методика была расширена и адаптирована для использования в ней информации с инфракрасных изображений, полученных с геостационарных спутников земли [48]. Используя данную идею, другим автором был разработан компьютерный алгоритм для использования в интерактивной среде Системы Прямого Доступа (McIDAS) [68]. Алгоритм использует специальные функции McIDAS для чтения и анализа инфракрасных изображений с геостационарных спутников, вычисляет и выдаёт оценку интенсивности конкретного тропического циклона. Методика не предназначена для слабых тропических систем, таких как депрессии или небольшие тропические штормы. Единственная информация, которую требуется ввести оператору – это текущее расположение центра тропического циклона.

*Описание методики Дворака*

Целью данной методики является предоставление хороших оценок текущей и будущей интенсивности тропических циклонов, используя спутниковые данные. Для достижения этой цели методика использует процедуры и правила, которые сочетают в себе метеорологический анализ спутниковых изображений с использованием модели развития тропического циклона. Данная модель состоит из набора кривых (зависимостей), описывающих изменения интенсивности тропического циклона по прошествии времени, и описаний облачного покрова тропического циклона в интервалах вдоль этих кривых. Кривые отображают изменения интенсивности типичного циклона на протяжении его жизненного цикла с отклонениями от этой кривой для быстро и медленно развивающихся циклонов [77].

Свойства облачности, содержащиеся в модели, описывают характеристики тропического циклона, используемые для оценки как его прежней, так и будущей интенсивности. Свойства облачности, используемые для оценки интенсивности циклона ко времени спутникового снимка, разделяются на «центральную облачность» и «внешнюю закрученную облачность». Эти свойства анализируются 3-х ступенчатой процедурой, которая присваивает т.н. Т-числа атмосферному вихрю, используя качественные и количественные описания интенсивности тропического циклона.

Т-числа, находящиеся в диапазоне от 1 – 8, описывают тропические (субтропические) возмущения в порядке возрастания их интенсивности от самого минимального, но всё ещё значимого (число Т1), до максимально возможного значения интенсивности (число Т8). Последовательность Т-чисел, определённая для циклонов, используется для того, что бы поставить циклон в соответствие одной из 3-х модельных кривых или показать отклонения от одной из них.

Свойства облачности, связанные с будущей интенсификацией циклона, затем исследуются для того, что бы определить останется ли циклон на модельной кривой в течение последующих 24 часов. Свойства облачности, используемые на данном шаге, позволяют сделать вывод о происходящих изменениях интенсивности циклона ко времени спутникового снимка, а так же об изменениях в окружающей среде, которые приведут к последующему росту циклона.

Процедуры и правила данной методики дают руководство (а так же накладывают ограничения) к анализу интенсивности и дальнейшему прогнозу циклонов. Развитие циклона на протяжении всего его жизненного цикла непрерывно анализируется путём сравнения свойств его облачности и её изменений с ожидаемыми модельными изменениями, основанных на предыстории развития данного циклона. Как только обнаруживается начало развития тропического циклона, процедура «помещает» данное атмосферное возмущение на типичную модельную кривую до тех пор, пока не зафиксирует его отклонения от этой кривой. Типичные возмущения, как правило, распознаются в их начальной стадии по специфической комбинации облачного покрова примерно за 36 часов до того, как они достигнут интенсивности шторма. Если развитие не прерывается радикальным изменением окружающей среды, то типичный циклон, как ожидается, будет развиваться, непрерывно отражая модельное поведение его облачного покрова. Так же ожидается, что циклон достигнет его максимальной интенсивности через промежуток времени, определённый направлением его движения. Нужно отметить, что вдобавок к типичному развитию циклона методика так же учитывает быстрое или медленное развитие циклона, а так же прекращение его развития.

### 1.3.2 Возможности диагностики ТЦ по микроволновым изменениям

Параллельно с достижениями наблюдений в видимом и инфракрасном спектре велись наблюдения в микроволновом диапазоне электромагнитных волн. Все наблюдения велись с низкоорбитальных спутников. Микроволновые измерения имеют два преимущества по сравнению с наблюдениями в видимом и инфракрасном спектрах:

1. микроволновая радиация проходит сквозь облачный покров;
2. микроволновая радиация является чувствительной к широкому спектру геофизических параметров. Среди таких параметров: температура и влажность атмосферы, количество капельной влаги и кристаллов льда в облаках, осадки и скорость приповерхностного ветра.

#### *История микроволновых измерений ТЦ*

Микроволновые измерения тропических циклонов имеют длинную историю, достаточно полно описанную в работе [71]. Остановимся лишь на некоторых ключевых работах. Rozenkranz [67] впервые заметил тепловую аномалию в данных, полученных со Сканирующего Микроволнового Спектрометра на Nimbus-6 по тайфуну June. Kidder и др. [60] показали, что тепловая аномалия стала результатом верхне-уровневого нагревания над тропическим циклоном, что и может быть зафиксирована сквозь облака с помощью микроволнового зондирования. В дальнейшем они показали, что величина тепловой аномалии по данным микроволновых изменений связана с центральным давлением в тропическом циклоне, а так же со скоростью внешнего ветра.

Velden и Smith в 1983г [76], Velden в 1989г [74] и Velden и др. в 1991г [75] использовали радиояркостную температуру и температуру на уровне в 250мб., полученных по микроволновым измерениям, для оценки интенсивности и центрального давления для большого количества тропических циклонов, и нашли хорошее сходство результатов с результатами самолётных измерений и других методов.

Grody в 1979г [52] ввёл концепцию весовой функции ветра для изучения поведения ветра в Тропическом циклоне “June”, используя горизонтальный градиент микроволновых измерений. Grody и Shen в 1982г [54] дополнили эту работу, используя данные микроволновых измерений для урагана “David”. В этом исследовании привлекались данные радиовеетровых зондов для того, чтобы показать высокий уровень корреляции ( $> 0.9$ ) между градиентом радиояркостной температуры микроволновых измерений и фактическим значением скорости ветра на уровне в 500мб.

Данные микроволновых измерений так же были использованы для изучения количества осадков в тропических циклонах. Allison в 1974г [43] использовала данные с Электронного Сканирующего Микроволнового Радиометра на Nimbus-5 о выпадении осадков в тропических циклонах. Многие другие учёные продолжили изучение данного вопроса (например, Adler и Rodgers в 1977г [41] и 1981г [65]). В 1993г Spencer [70] успешно получил измерения выпадающих осадков по данным микроволновых измерений, даже не смотря на то, что датчики были разработаны не для измерения количества осадков, а для зондирования. В 2000г вышла работа Roy W. Spencer и William D. Braswell [66] посвящённая оценке максимальной скорости ветра в ТЦ над Атлантикой на основе данных радиометра AMSU-A.

Большинство предыдущих работ по тропическим циклонам с использованием данных микроволновых измерений имели недостатки из-за

низкой разрешающей способности. Но, на сегодняшний день существует улучшенная версия прибора, которая имеет лучшее пространственное разрешение (до 16-ти км на пиксель) [71].

### *Возможности микроволновых измерений*

Одними из ключевых полей атмосферы являются вертикальные профили температуры и влажности. Профили, 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 кросс-секций поля аномалий температуры атмосферы [39]. Кросс-секция - плоское изображение вертикального сечения пространства, проходящего через центр ТЦ. Данное изображение получается путём упорядочивания точек по расстоянию на каждом уровне с последующим осреднением значений (по горизонтали) [71].

Атмосферные профили могут быть использованы для вычисления скорости ветра и/или перепада давления [39]. Эти параметры являются ключевыми в оценке интенсивности ТЦ в любой его точке. Также атмосферные профили могут позволить уточнить центр ТЦ в тех случаях, когда ТЦ находится в фазе зарождения или затухания. Во время процесса затухания происходит размытие структуры облачности ТЦ, в то время как вертикальный разрез температурной аномалии, проходящий через его центр, сохраняет явно выраженные границы ядра. Таким образом, оценив положение центра тёплого ядра ТЦ мы получим положение его центра.

Наиболее полно возможности применения профилей температуры и влажности атмосферы описаны в работах [44, 71]. Благодаря тому, что

микроволновое излучение обладает свойством прохождения сквозь плотный облачный покров, имеется возможность построения трёхмерных полей различных геофизических параметров ТЦ: а) верхнеуровневые температурные аномалии (тёплое ядро ТЦ); б) оценки интенсивности; в) расчёт градиентного ветра; г) оценка потенциального количества осадков. В то же время получаемые характеристики обладают следующими недостатками: 1) пространственное разрешение в 48 км, что в большинстве случаев превосходит размеры зон максимальных ветров, и тем самым не позволяет получать точные оценки динамических параметров в центре ТЦ. 2) невозможность получения точного профиля температуры на нижних уровнях ТЦ из-за влияния на измерения зон ливневых осадков; 3) неоднозначность решения обратной задачи по восстановлению профилей.

Если бы данные радиометры на функционирующих сейчас спутниках (NOAA-15,-16,-17,-18,-19, МЕТОР, AQUA) работали безотказно, то профили температуры и влажности атмосферы можно было бы строить в среднем каждые 2 часа. Несмотря на перечисленные недостатки профили температуры и влажности атмосферы являются наиболее информативным источником информации о 3-х мерной структуре ТЦ.

#### *Алгоритмы построения профилей температуры и влажности*

Для построения профилей температуры и влажности атмосферы существуют два программных комплекса: IAPP (International ATOVS Processing Package, США) и RTTOV, SSMIS-1Dvar/MetOffice- 1Dvar Европейского космического агентства. Первый из них в качестве начального приближения профиля использует регрессионные зависимости между излучением и соответствующими ему профилями атмосферных измерений из базы данных [61, 55]. Второй комплекс использует профили региональной модели прогноза.

Данный комплекс интенсивнее развивается и используется в Европе при расчёте прогноза погоды. Поэтому он и был выбран в качестве комплекса по расчёту профилей.

Пакеты программ Европейского космического агентства основаны на решении обратной задачи прохождения излучения через атмосферу (в первую очередь микроволнового излучения):

- AAPP (ATOVS and AVHRR Processing Package) – программный пакет выполняющий предварительную обработку данных: географическую привязку данных; преобразование отсчетов инструментов к физическим величинам (калибровка); предварительную обработку данных (включая маскирование облачности); геометрическое совмещение данных зондировщиков к одному из них (HIRS, AMSU, MHS или IASI) и др.;
- RTTOV (Radiative Transfer for TOVS) – это быстрая модель радиационного переноса для пассивных инфракрасных и микроволновых радиометров и спектрометров. Программа моделирования плотности излучения, воспринимаемой спутником, написана на языке Fortran-90, и спроектирована таким образом, чтобы облегчить её взаимодействие с приложениями пользователя;
- пакеты SSMIS-1Dvar и MetOffice-1Dvar - используются для решения обратной задачи прохождения излучения атмосферы и восстановления вертикальных профилей атмосферы [51, 63].

Для работы пакетов использовалось задание стандартного атмосферного профиля в качестве начального приближения, соответствующего тропической атмосфере.

### 1.3.3. Оценка макропараметров ТЦ

Большое внимание исследователей направлено на получение количественных оценок структуры облачности циклонов и их связи с физическими характеристиками. Одним из применяемых подходов является использование аппроксимации облачной спирали ТЦ: логарифмической, гиперболической, либо архимедовой спиралями. Так в работе [10] исследуется возможность применения математической модели логарифмической кривой для задачи восстановления барического поля по структуре облачности на примере внетропических циклонов. В результате исследования получены регрессионные соотношения, позволяющие оценить давление в центре циклона у поверхности земли по снимкам облачности с точностью до 8-9 гПа. Недостатком данного подхода является использование геометрической модели спирали без учёта физики явления. Не приведены оценки применимости подхода к анализу ТЦ.

В работе [37] автор статьи приводит обзор работ по данной проблеме и создаёт новое аналитическое описание спиральной формы ТЦ, используя гипотезу вовлечения. Она состоит в том, что профиль спиральных облачно-дождевых полос (СОПД) - спиральная линия, вдоль которой выстраиваются облака в циклоне, совпадает с линией тока ветра, втекающего в центр циклона. На основе зависимости угла втока ветра в циклоне от радиуса автором получено выражение для описания СОПД, параметры которого являются функциями распределения скорости ветра и других физических характеристик среды. Это выражение для формы СОПД представляется в виде комбинации гиперболической и логарифмической спиралей (ГЛС). К достоинствам работы можно отнести качественное соответствие формы ГЛС и СОПД для ТЦ, а так же тот факт, что создание модели основывается на физических предположениях о ТЦ. К сожалению оптимальная подгонка

аналитической кривой к реальным дождевым полосам не позволила автору статьи получить хоть сколь-либо похожее на действительность физические параметры ТЦ.

#### 1.3.4 Автоматическое прослеживание ТЦ

Нахождение центра ТЦ является важным шагом в анализе и прогнозировании этого природного явления. Различные работы показывают важность точности определения начального положения ТЦ для оценки его интенсивности и оперативного прогнозирования [38, 79]. Принимая во внимание тот факт, что большинство ТЦ находятся вдали от источников непосредственных измерений, средства дистанционного зондирования становятся основным источником информации о ТЦ.

В метеорологических агентствах обычно положение ТЦ оценивается вручную. Основным инструментом для анализа являются снимки в видимом и инфракрасном (ИК) диапазоне спектра, получаемые с геостационарных спутников. Структура облачности на одиночных изображениях и анимационных последовательностях используется для нахождения центра ТЦ. Во многих случаях по хорошо просматриваемому «глазу» можно определить центр ТЦ. Но, визуальные методы определения центра ТЦ могут не точно работать в ситуациях, когда «глаз» ТЦ полностью закрыт облачностью или отсутствует. Тогда оценки положения центра зависят от эксперта и могут значительно отличаться.

Значительное количество работ было посвящено созданию объективных методов поиска центра ТЦ, основанных на радарных снимках поверхности

океана. Wood (1994) [82] сопоставлял Допплеровское поле скоростей с вихрем Рэнкина для оценки положения центра вращения. Wong Ka Yan и др. [80] представляют алгоритм для нахождения центра шаблонов облачных спиралей также основанного на радарных измерениях. Wong K. Y. и др. [81] разработали алгоритм, вычисляющий центр вращения ТЦ с использованием маркеров облачности на последовательности радарных снимков. Chang и др. (2009) [45] описывают алгоритм, который определяет центр низкого альbedo «глаза» ТЦ и использует последовательность изображений для верификации. Lee и Liu (2001) [62] и Zhang и др. (2005) [83] используют изображения с геостационарных спутников. В работе авторы приводят несколько методов по определению положения центра ТЦ на основе одиночных изображений. Главным условием применимости методов является нахождение ТЦ в развитой стадии, что в свою очередь предполагает наличие визуально определяемой спиральной структуры ТЦ. В то же время результаты применения методов приводятся только для одиночных изображений, не исследуются вопросы надежности идентификации ТЦ и оценок его макропараметров при длительной серии наблюдений, нет оценок пределов применимости методик, отсутствуют анализ временной изменчивости оцениваемых автоматически макропараметров и алгоритмы контроля качества результатов.

Отдельно можно выделить работу Wimmers и Velden (2010) [79], в которой представлен автоматизированный алгоритм оценки положения центра ТЦ. Он основан на работе с данными пассивных микроволновых измерений с полярно-орбитальных спутников. Данный алгоритм имеет преимущество в том, что позволяет изучить структуру ТЦ под облачностью. Но в, то же время, у данного подхода есть следующие недостатки с точки зрения используемых данных: а) нерегулярное временное покрытие обзереваемых территорий (от 30 мин. – 24 часов, но в среднем от 3 – 6 часов); б) сравнительно низкая

разрешающая способность (от 6 – 16 км); в) необходимость во взаимной привязке и нормализации между различными сенсорами, а также коррекция геометрии сканеров. Рассматривая сам алгоритм можно выделить следующие недостатки в его работе: а) Необходимость задания начального приближения центра ТЦ. б) Способность алгоритма производить оценку центра ТЦ с приемлемой точностью только при наличии сформированных спиральных полос и облачной стены «глаза» на изображении. Таким образом в случае слабых ТЦ (находящихся на стадии зарождения или затухания) ошибки оценки положения центра ТЦ могут достигать 100 км и более.

#### **1.4 Выводы по главе**

Диагностика тропических циклонов является одной из важных задач современной метеорологии. Методика Дворака, применяемая для диагностики ТЦ в различных метеорологических агентствах, основана на дешифрировании изображений облачности ТЦ. Данная методика является полуэмпирической, а так же не полностью автоматизирована. Различные метеорологические агентства, использующие данную методику, дают различные результаты по диагностике ТЦ.

Использование микроволновых измерений для диагностики ТЦ имеет ряд преимуществ, таких как способность микроволнового излучения проникать сквозь плотную облачность и возможность оценки параметров ТЦ (температурная аномалия, скорость ветра, зоны осадков). В то же время, такие факторы как нерегулярность получения изображений с радиометров, их низкое пространственное разрешение, существенные погрешности при оценке

физических параметров океана и атмосферы накладывают ограничения на применение этих данных для оперативного мониторинга ТЦ. В свою очередь, данные микроволнового зондирования могут дополнить и уточнить измерения в ИК- и видимом спектральных диапазонах, имеющие более высокое пространственное и временное разрешение.

Обзор литературы позволяет сделать выводы, что существующие работы, связанные с нахождением геометрических и физических характеристик ТЦ, на сегодняшний момент времени не позволяют проводить расчёты в автоматическом режиме, допуская субъективизм и зависимость от квалификации эксперта. Остаётся актуальной проблема автоматического мониторинга ТЦ, нахождение его геометрических и термодинамических характеристик.

## ГЛАВА 2. АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРА ТЦ

В качестве информационной основы создаваемого метода автоматического мониторинга ТЦ были взяты изображения облачности в видимом и ИК- спектральных диапазонах. Для выделения ТЦ и расчёта его центра использовался подход, основанный на анализе циркуляции облачности, проводящемся по одиночным изображениям. Также решено было разработать алгоритм выделения «глаза» ТЦ. Такой алгоритм позволяет существенно точнее выделять центр ТЦ, но не пригоден для надёжного обнаружения ТЦ. Кроме того, около половины изображений ТЦ «глаз» не содержат. Поэтому алгоритм выделения «глаза» является вспомогательным.

Метод автоматического мониторинга ТЦ основан на выделении «глаза» и центра замкнутых циркуляций ТЦ [1, 6, 8, 28, 40]. В основной процедуре выделения центра используется простейшая модель замкнутой циркуляции – круговая. И хотя спиралевидная модель циркуляции больше подходит к описанию структуры изображения ТЦ, её использование не позволяет достичь необходимой надёжности и точности определения центра ТЦ [39].

### 2.1 Используемые данные

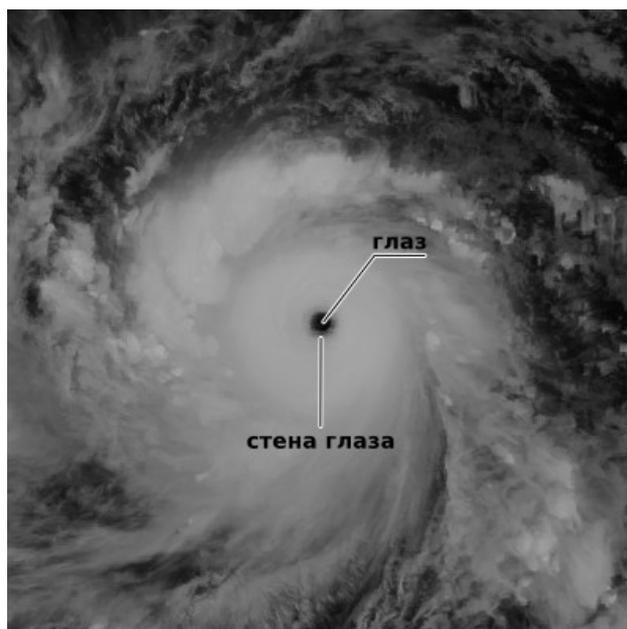
При проведении исследований создаваемых алгоритмов автоматического выделения тропического циклона использовались японские архивные изображения региона с координатами ( $20^{\circ}$ – $50^{\circ}$  с.ш.;  $120^{\circ}$ –  $150^{\circ}$  в.д.) в ИК и

видимом каналах, получаемые с геостационарного спутника GMS-5 (летние изображения 2000–2002гг), а также изображения с геостационарного спутника MTSAT 1R. Пространственное разрешение ИК изображений составляет около 4 км. Изображения со спутника GMS-5 удобны тем, что позволяют проводить сравнения с результатами различных метеоагентств. Для всех изображений были построены карты доминантных ориентаций термических контрастов, используемые для выделения круговой циркуляции в кластере облачности. Для анализа полученных результатов привлекались данные с Интернет сайтов Японского метеорологического агентства (JMA ) [72] и Объединенного центра предупреждения о тайфунах США (JTWC) [59], содержащие параметры тропических циклонов (besttracks). Всего было 206 изображений со спутника GMS-5, соответствующих 8 ТЦ. Выбранные изображения по времени соответствовали записям параметров ТЦ в файлах JMA и JWTС, которые были сделаны с шагом в 3ч. На изображениях тропические циклоны проходили все стадии развития – от зарождения до затухания. Для анализа использовались также поля ветра Национальной администрации по исследованию океанов и атмосферы США (NOAA, сайт <http://nomads.ncdc.noaa.gov>). Поля рассчитывались четыре раза в день по микроволновым измерениям нескольких спутников с интерполяцией на сетку с шагом  $0.25^\circ$ . Анализ проводился для “слабых” тайфунов, так как при сильных ветрах поля ветра не рассчитываются.

## 2.2 Алгоритм обнаружения «глаза» ТЦ

### 2.2.1 «Глаз» ТЦ

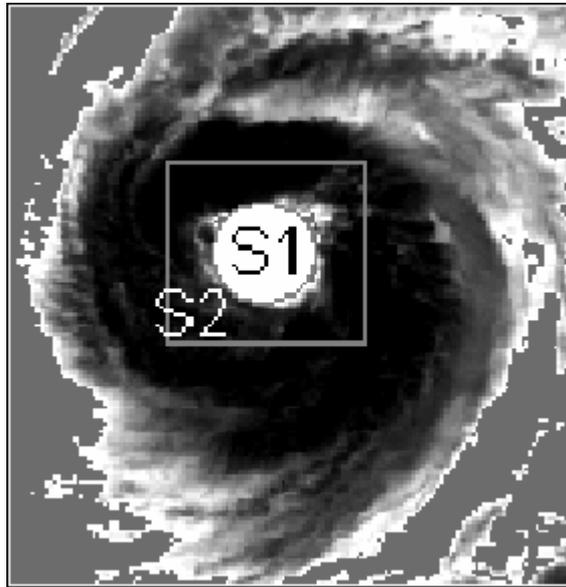
Глаз ТЦ – это воронка размером около 30 км, стены которой образованы плотной облачностью. Он характеризуется безветренной, ясной погодой, имеет круглую или овальную форму (Рисунок 2). С развитием ТЦ изменяется и размер глаза. В молодом ТЦ он больше, в зрелом – меньше. При затухании ТЦ размер глаза вновь увеличивается. Средний диаметр глаза в хорошо развитом ТЦ равен 20 — 25 км, а в разрушительных ураганах и тайфунах Тихого океана он составляет 60 — 70 км. Отмечены единичные случаи, когда средний диаметр «глаза» ТЦ достигал 300 км. Значительное увеличение размеров «глаза» обычно свидетельствует о падении интенсивности ТЦ. Однако в затухающем циклоне не всегда удаётся определить размеры «глаза» ТЦ, так как при этом границы его сильно размываются и форма становится весьма неопределённой [14]. Глаз не всегда расположен в центре ТЦ - на ранних стадиях он находится на краю облачного массива. По мере развития циклона глаз смещается к его центру.



**Рисунок 2** «Глаз» циклона на примере ТЦ HAYAN 2013-11-07 07:30 UTC.

### 2.2.2 Критерий разделимости участков изображений по яркости

Существуют различные подходы к выделению глаза, использующие средства обработки изображений и шаблоны структуры облачности [73, 80]. Их анализ приведён в первой главе. Автором был создан подход по обнаружению границ глаза на основе  $t$  критерия разделимости двух участков изображения с различной яркостью [34]. Метод состоит из нескольких шагов:



**Рисунок 3** Полутоновое изображение облачности тропического циклона и геометрия площадок, по которым оцениваются положение центра и размер глаза ТЦ.

*Шаг 1.* По заданному облачному кластеру скользит квадратное окно, внутри которого есть круглое окно  $S_1$  меньшего размера (Рисунок 3). 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  $S_l$ . Выбирается такой размер окна  $S_l$ , 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 км, а максимальный – 100 км.

*Шаг 2.* В кластере ищется такая комбинация параметров областей, которая дает максимальную величину критерия  $U$ . Если это значение превышает заданный порог  $U_{st}$ , то считается, что область  $S_l$  является областью глаза тайфуна. Радиус области  $S_l$  берется за радиус глаза.

За основу для расчета критерия  $U$  взята нормализованная величина разницы средних яркостей  $t$ -критерия делимости 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;  $\bar{s}_1$  и  $\bar{s}_2$  – 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 делимости 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 и использовалась в качестве критерия делимости. При достижении  $U$  величины, превышающей заданный порог  $U_{st}$ , считается, что окно  $S_l$  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 [2, 7].

### **2.2.3 Эффективность работы алгоритма**

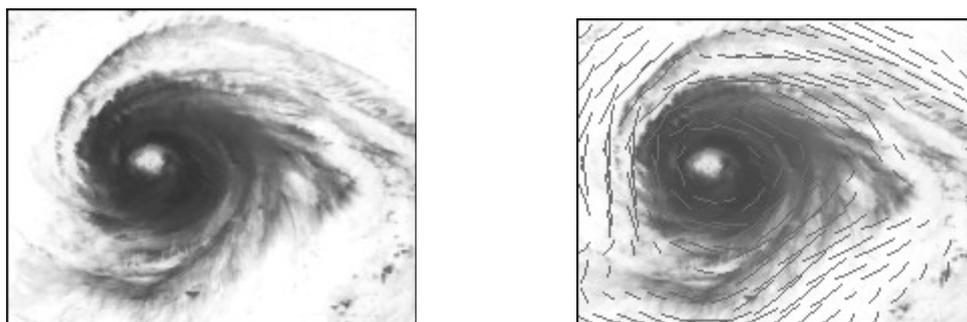
Для выяснения величины порогового значения коэффициента  $U_{st}$  было взято 146 изображений ТЦ, на которых присутствовал глаз. Значение порога  $U_{st}$  было установлено равным 0,8. Ослабление критериев отбраковки было признано не целесообразным, так как это приводило к появлению ложных объектов вблизи центра циркуляции ТЦ. Такие ложные объекты сложно отбраковать. В результате эксперимента алгоритмом был найден 81 глаз ТЦ. Параметры процедуры выделения глаза выбраны жёсткими, что обеспечивает высокую надежность его обнаружения (более 95% правильных обнаружений при небольшом количестве ложных объектов).

### **2.3 Алгоритм обнаружения ТЦ и расчёта его центра**

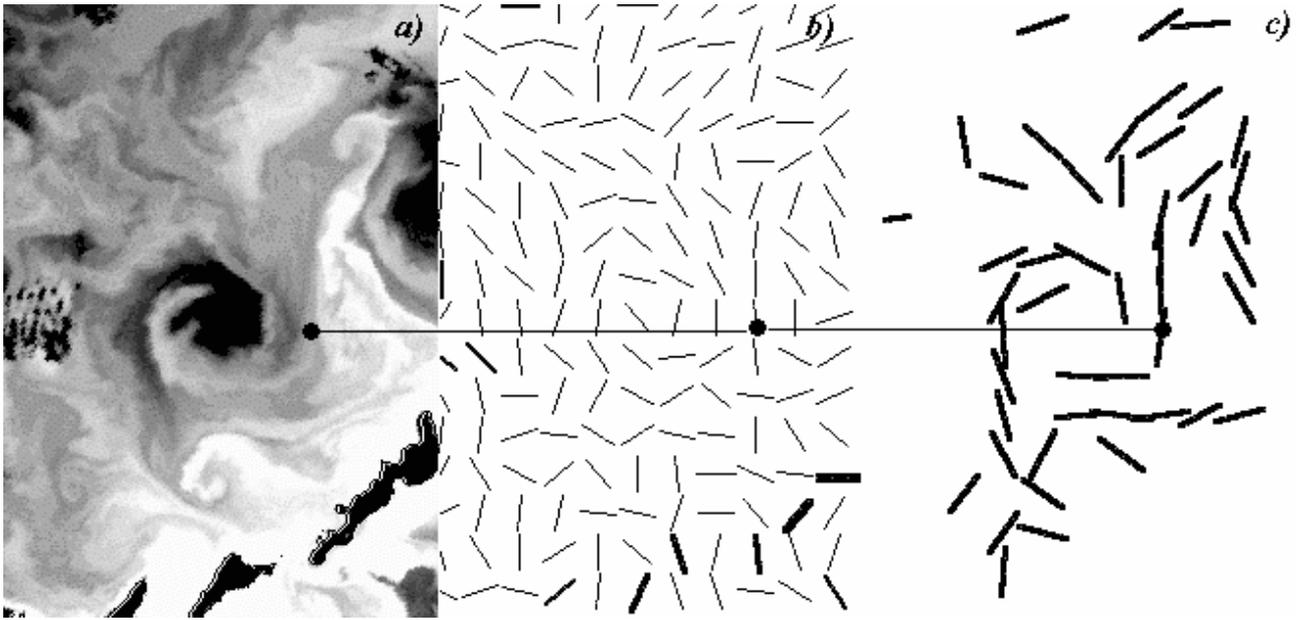
Ввиду того, что глаз не проявляется на стадиях зарождения и разрушения ТЦ, а также может быть затянута облачностью, необходима методика, которая бы позволила определять центр ТЦ и его параметры в данных условиях.

### 2.3.1 Структурные карты облачности в виде доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК)

Структура ТЦ хорошо проявляется на спутниковых ИК изображениях (Рисунок 4). Она же используется в методике Дворака для расчета макропараметров циклона. С целью автоматизации расчета параметров (в первую очередь центра ТЦ и характеристики спиралевидной закрутки облачных полос) была предпринята попытка использовать карты структуры облачности в форме ДОТК (Рисунок 5) [6, 9]. ДОТК – это угол статистически значимой касательной к изотермам в заданной окрестности точки поля. Сдвиговый характер атмосферных потоков приводит к тому, что изотермы в таком потоке вытягиваются вдоль его направления. Поэтому ДОТК можно использовать для оценки направлений потока. Данный подход был апробирован при оценке направлений поверхностных течений моря и автоматическом выделении вихрей воды и показал обнадеживающие результаты [4, 5].



**Рисунок 4** (слева) фрагмент ИК-снимка ТЦ; (справа) фрагмент того же ИК-снимка с наложением карты ДОТК.



**Рисунок 5.** а) фрагмент ИК-изображения – поле термической яркости моря; б) соответствующее поле ориентаций термических контрастов; в) поле доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК).

Направление яркостного контраста  $\theta_{ij}$  в точке  $(i, j)$ , рассчитанное в окрестности  $a \times a$ , – это направление, ортогональное вектору яркостного градиента:

$$\nabla u_{ij} = G e^{-i\phi} \quad (2)$$

Оценка доминантной ориентации термического контраста (ДОТК) в окрестности  $b \times b$  заданной точки  $(m,n)$ :

$$\theta^{mn} : \dots \sum \Delta \theta_{ij} \rightarrow \min \quad (3)$$

$$\Delta \theta_{ij} = W(\theta_{ij}) \cdot \min \left[ |\theta_{ij} - \theta_{mn}|, |\theta_{ij} - \theta_{mn} - \pi| \right], \quad (4)$$

где  $W(\theta_{ij})$  – весовой коэффициент.

Карта ДОТК – карта направлений, углы которых лежат в диапазоне (0 –  $\pi$ ). Для оценки статистической значимости ДОТК используется неравенство Маркова:

$$P \cdot P\{\Delta\theta_{ij} < \varepsilon\} > 1 - (M\Delta\theta_{ij})/\varepsilon, \quad (5)$$

где  $P$  – вероятность;  $\varepsilon$  – допустимая точность оценки  $\theta^*$ . В работе использовалось значение точности, равное  $\varepsilon = \pi/4$ . Таким образом, доминанта характеризуется двумя величинами – углом и его статистической значимостью. Аналогичным образом можно рассчитать устойчивость доминант во времени [42] с оценкой их “времени жизни” при проведении расчетов в системе координат движущегося тайфуна. Статистически значимые и устойчивые во времени ДОТК можно использовать для анализа структуры облачности.

Следует отметить, что в структуре облачности тайфуна часто прослеживаются полосы поперек направления основной циркуляции, возникающие из-за различных волновых процессов, происходящих в тайфуне. Для того чтобы метод не учитывал эти структуры, необходимо размер окон осреднения и расчета градиента выбирать больше характерных масштабов этих процессов. Хорошие результаты дает использование следующих размеров окон расчета градиента и ДОТК:  $a = 55$  км,  $b = 155$  км.

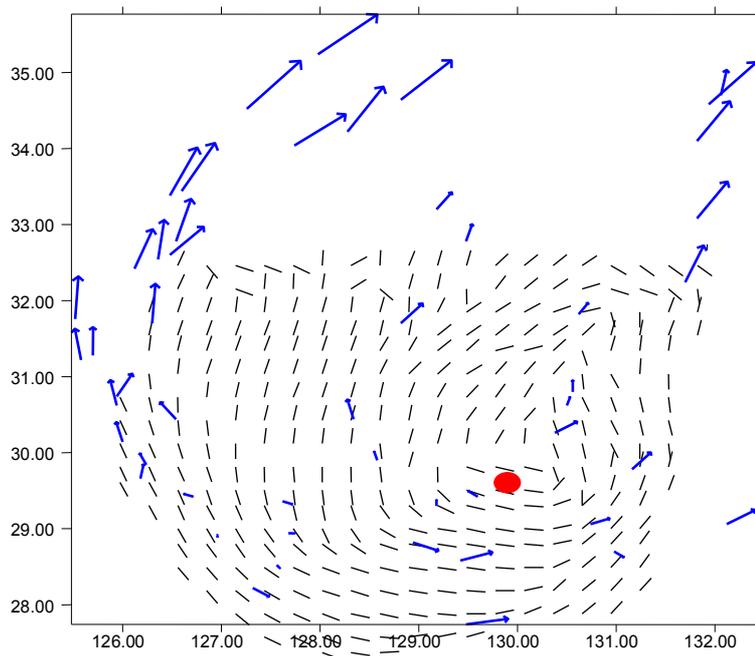
### 2.3.2 Сопоставление направлений скоростей ветра в ТЦ с ДОТК

Для обоснования использования ДОТК в качестве направления ветра использовались результаты сравнения доминантных ориентаций со скоростями ветра [6]. В первом случае сравнивались скорости ветра, полученные методом

прослеживания облачных маркеров, с ДОТК, рассчитанных за то же время. Во втором случае сравнивались доминантные ориентации термических контрастов за 14.09.97 (Рисунок 6) со скоростями ветра композиционной карты, построенной по аэрологическим данным посредством пересчёта положений станций относительно центра ТЦ. Данные выбирались для уровня 150 ГПа, который соответствует основной (по площади) облачности тайфуна, наблюдаемой в ИК-диапазоне.

Для первого варианта сравнения вычислялись средняя корреляция  $\rho$  и среднее рассогласование углов  $\phi$  между скоростями «облачного» ветра и ДОТК. Получились значения 0.84 и 0.46 радиан соответственно. Сравнение структур с аэрологическими скоростями ветра дало следующий результат – средняя корреляция направлений скоростей (единичные вектора) и структур и среднее рассогласование:  $\rho = 0.78$ ,  $\phi = 0.6$  рад. Наблюдающееся некоторое ухудшение результатов по сравнению с первым вариантом имеет естественное объяснение временным рассогласованием данных.

Высокие значения корреляции доказывают возможность оценки направлений ветра тайфуна в верхней тропосфере по картам термических структур. Однако требуется аккуратно выделять зоны неустойчивых направлений ветров и интервал времени жизни тайфуна, на котором структуру его потоков можно считать стабильной. Следует также отметить, что общая термическая структура в верхней тропосфере стабильна в течение длительного времени.

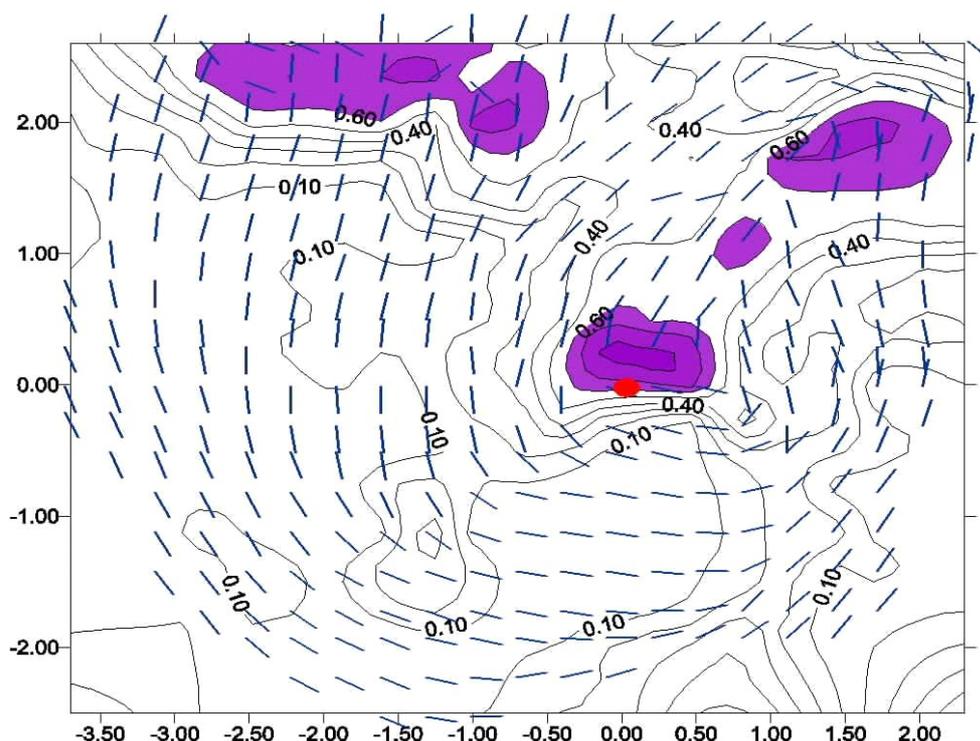


**Рисунок 6.** Карта термических структур тайфуна за 14.09.97 и скоростей ветра для уровня 150 ГПа за весь период наблюдения в системе координат движущегося тайфуна [6].

#### *Временная изменчивость доминантных ориентаций*

Для получения качественной картины пространственно-временной изменчивости потоков в верхней тропосфере тайфуна использовались результаты оценки средней величины статистически значимых доминант в окрестности заданной точки за заданный временной интервал (от трёх часов и более) для уровня в 150 ГПа и рассчитывалось среднеквадратичное отклонение [6]. Строились карты изменчивости доминант в изолиниях и проводился анализ устойчивости структуры. На Рисунке 7 приведён пример такой карты. Поскольку при случайном разбросе направлений ориентаций контрастов среднеквадратичное отклонение составляет величину около 0.8 радиан, то можно отметить высокую стабильность ориентаций в течение нескольких часов. Наибольшая неустойчивость наблюдается вблизи центра (координаты

(0,0)) и к северо-востоку от него. Наблюдается также присутствие тропосферного потока на северо-западной периферии тайфуна, с которым он начинает взаимодействовать, что сказывается на временной устойчивости ДОТК.



**Рисунок 7.** ДОТК и изолинии изменчивости ориентаций контрастов в верхней тропосфере тайфуна Марти за 14.09.97 (углы в радианах, координаты в градусах относительно центра ТЦ). Центр тайфуна отмечен кругом и располагался вблизи Японии. Закрашенные зоны – зоны неустойчивости доминантных ориентаций [6].

Эксперименты показали [6], что термическая структура в верхней тропосфере развитого тайфуна стабильна в течение длительного времени. Наибольшая устойчивость ДОТК проявляется в ТЦ вдали от суши. В то же время имеются зоны неустойчивости, положение которых стационарно в

течение нескольких часов. Чаще всего это зона глаза и зоны на периферии облачного ядра. Стабильность термической структуры ТЦ можно использовать для создания автоматического алгоритма оценки его центра (когда глаз не выделяется) и параметров формы.

### 2.3.3 Обнаружение ТЦ

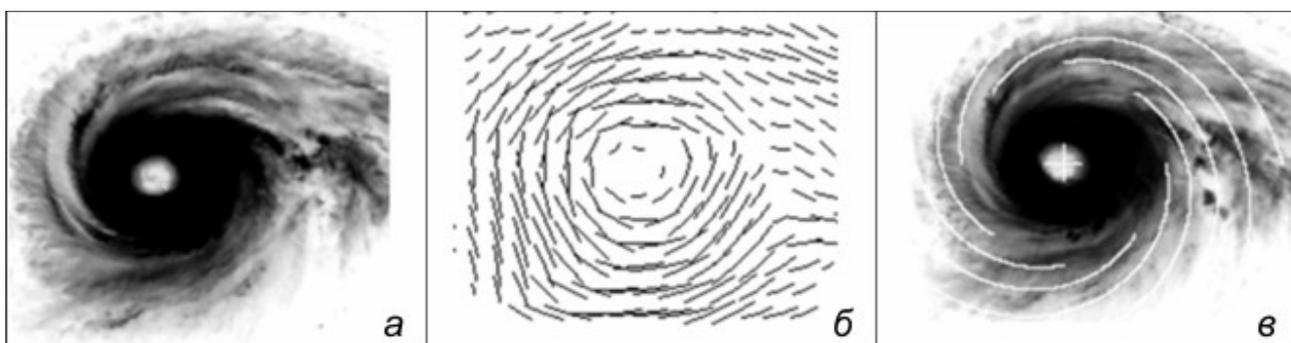
Обнаружение ТЦ происходит на основе анализа полей облачности изображения. В силу низких температур вершины облачности тропических циклонов используется простой пороговый метод выделения облачных кластеров — температура ниже  $-25^{\circ}\text{C}$  при линейном размере кластера, превышающем 200 км. В случае если алгоритм обнаруживает в заданном кластере ТЦ, из кластера вырезается регион с линейным размером в 600 км, содержащий обнаруженный циклон. Оставшаяся часть кластера проходит дальнейший анализ на наличие в ней ТЦ. В основной процедуре обнаружения и выделения центра используется простейшая модель замкнутой циркуляции — круговая. На Рисунке 8 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. Процедура используется как для обнаружения ТЦ, так и для одновременного расчёта его геометрических характеристик. Это происходит на основе анализа изменчивости рассогласований доминант с модельными направлениями. Центром ТЦ считается центр окна, на котором критерий достигает

минимальной величины. Величина критерия – рассогласования доминант с модельными оценками направлений движения ветра:

$$\rho(r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \min(|\theta_i^i(r) - \theta_d^i|, \pi - |\theta_i^i(r) - \theta_d^i|) \quad (6)$$

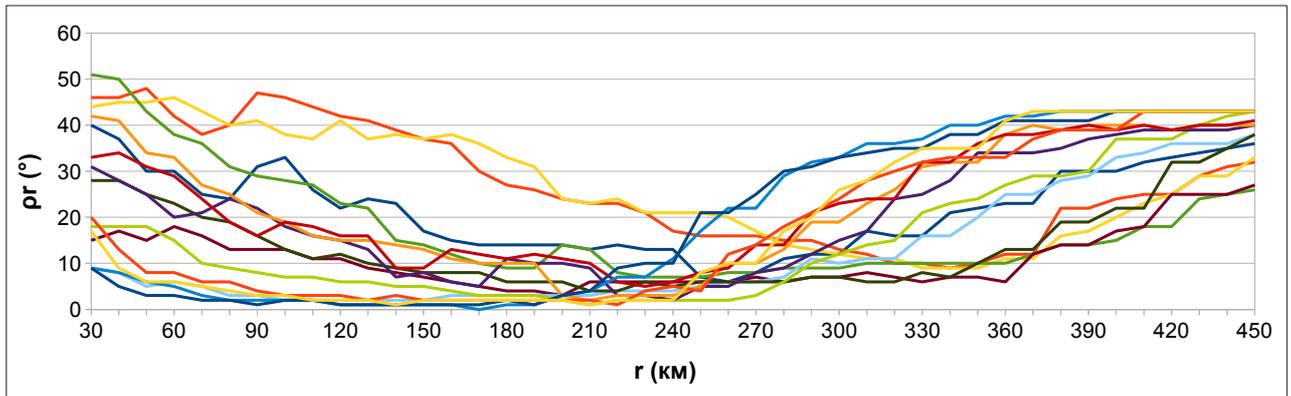
где  $r$  – радиус окружности;  $N$  – число точек, равномерно расположенных на окружности;  $\theta_i^i(r)$  – угол касательной в  $i$ -й точке на окружности радиуса  $r$ ;  $\theta_d$  – значение ближайшего угла ДОТК в  $\varepsilon$ -окрестности  $i$ -й точки на окружности.



**Рисунок 8.** (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.

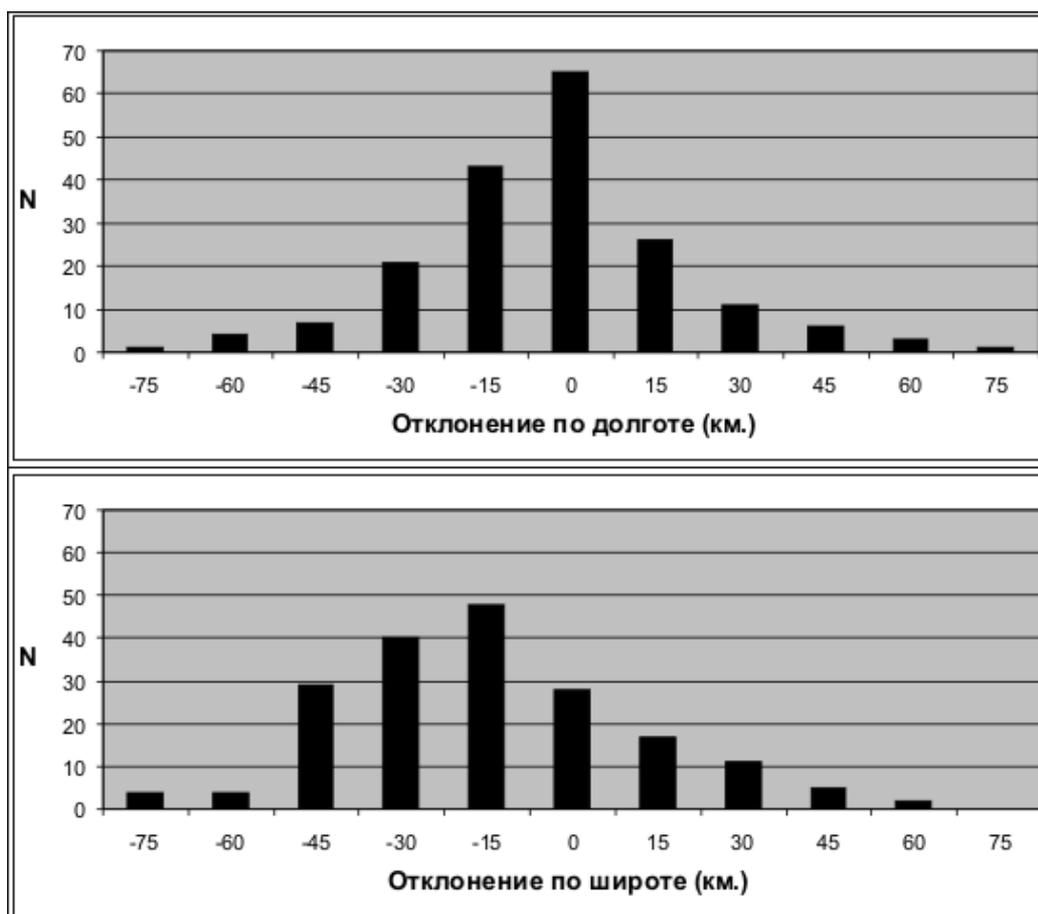
Эксперименты показали, что при росте радиуса  $r$  величина критерия  $\rho_r$  сначала убывает, достигая своей минимальной величины  $\rho^*$ , а затем растёт (Рисунок 9). Это свойство и было положено в основу алгоритма. Было также выяснено, что если  $\rho^* < 20^\circ$ , то такая циркуляция с высокой 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.



**Рисунок 9.** График изменения величины  $\rho_r$  в зависимости от радиуса  $r$  для 15-ти изображений произвольных ТЦ.

Для оценки качества расчета центра ТЦ было проведено сопоставление данных, полученных основной процедурой, с данными расчета центра на основе алгоритма выделения глаза, прошедшими визуальный контроль на точность. В тестовую серию вошло 188 изображений ТЦ с четко выраженным центром, точность определения которого была около 1 пикселя (5 км). Гistogramмы рассогласований центров получились довольно компактными и напоминающими нормальное распределение (Рисунок 10). Максимальное рассогласование по каждой координате не превышало 75 км. Стандартное отклонение расстояний между центрами составило величину 37 км. Величины систематических отклонений оказались равными 15 км по долготе и 4 км по широте (реальный центр - «глаз» - расположен северо-восточнее) и использовались далее для коррекции при расчете центра ТЦ основной процедурой.



**Рисунок 10.** Гистограммы отклонения оценок центра ТЦ, выделенного основной процедурой, от центра глаза. Вверху - по долготе, внизу - по широте.

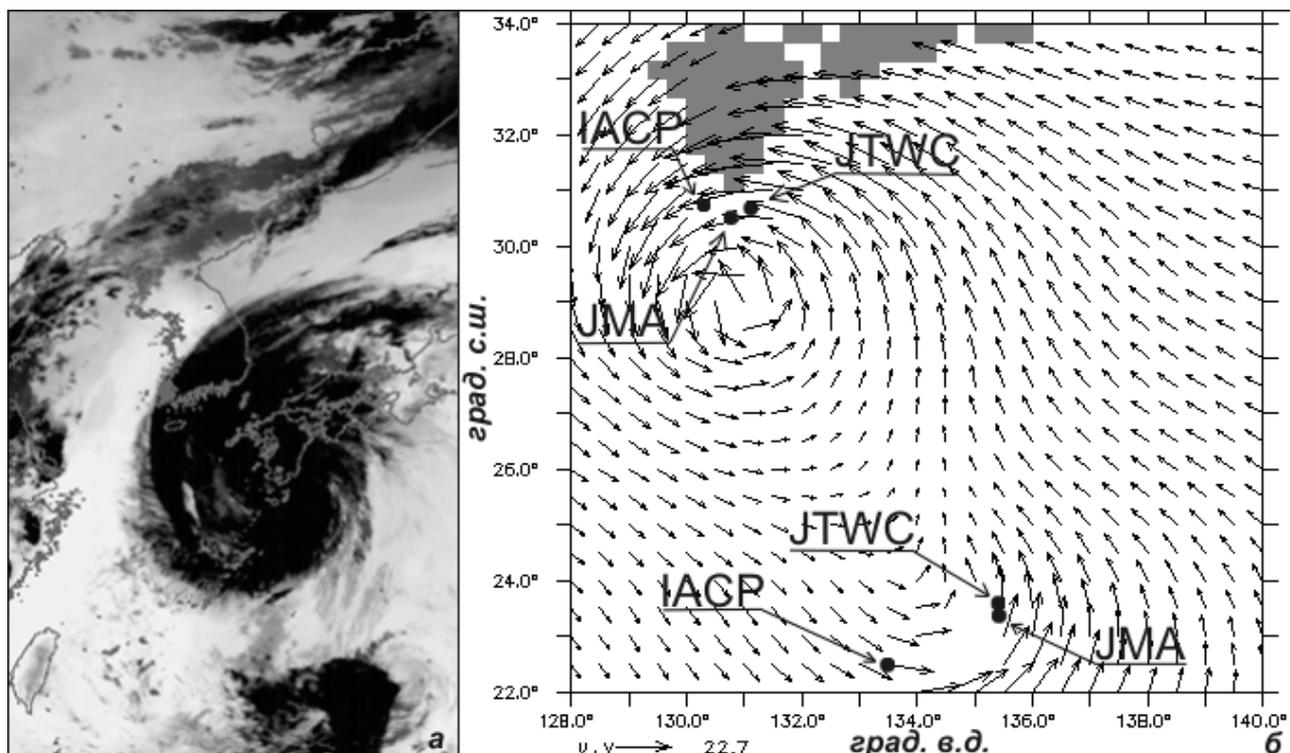
Для выяснения возможности использования изображений в видимом канале с целью улучшения точности определения центра ТЦ было взято 103 изображения с визуально определяемым глазом тайфуна. Все изображения попадают во временной интервал 20:40 – 8:40 UTC (местное дневное время). При сравнении с тестовыми данными стандартное отклонение расстояний между центрами составило величину 57 км. Максимальное отклонение достигало 150 км. Систематические отклонения были 15 км по долготе и 20 км по широте. В целом, по данным видимого канала, центр выделяется несколько

хуже, что можно объяснить лучшим соответствием между направлениями реальной циркуляции и ДОТК, рассчитанным по ИК каналам.

#### 2.3.4 Оценка точности работы алгоритма

Предложенная процедура демонстрирует высокую устойчивость автоматического выделения ТЦ – семь пропусков при обработке 206 изображений, которые пришлось на два тайфуна. Анализ пропусков показал, что на трех изображениях тайфун был выделен, но отбракован по порогу критерия  $\rho^*$ . При этом используемый в исследованиях порог критерия выделения  $\rho^*$  не был настроен оптимальным образом, а был определен по небольшой выборке. По видимому, следует использовать разные величины порога для выделения ТЦ и для расчета его центра. Вторая причина пропуска ТЦ – слишком высокая температура верхней кромки облачности. Как правило, наблюдается расслоение облачности на холодный кластер с отсутствующей закруткой облачных полос и на теплую облачность с характерной закруткой. В нижней части Рисунка 11а приведено изображение такой облачности с температурой верхней кромки облачных полос около  $+12^{\circ}\text{C}$ , и холодной облачностью, по которой ТЦ «Fung Wong» ещё был выделен основной процедурой. На рисунке 2.10б приведено поле ветра, соответствующее данному изображению, где отмечены центры ТЦ, выделенные основной процедурой (IACP), JMA и JTWC. Следует отметить, что замкнутой циркуляции ветра для тайфуна «Fung Wong» не наблюдается вообще. Выше на изображении присутствует второй слабый тайфун «Fengshen», оценки положения центра

которого одинаково неточны и довольно далеки от центра циркуляции ветра (около 50 км).



**Рисунок 11.** Пример расслоения облачности на холодный кластер с отсутствующей закруткой облачных полос и на теплую облачность с характерной закруткой: (а) – полутоновое ИК изображение облачности тайфуна «Fung Wong» внизу и тайфуна «Fengshen» вверху за 25.07.2002 12:00 UTC; (б) – поле ветра, соответствующее этому изображению с отметками центров ТЦ, выделенных JMA, JTWC и основной процедурой.

Полученная на тестовой выборке величина стандартного отклонения в 37 км для основной процедуры объясняется, в первую очередь, изменчивостью формы циркуляции ДОТК. Поскольку в тестовой выборке присутствовали, в основном, сильные тайфуны, то ошибка определение центра относительно

небольшая. Она сопоставима с расхождениями оценок центра по версиям JTWC и JMA в случае отсутствия глаза. На слабых тайфунах форма циркуляции отличается от круговой более существенно. Круговая форма – это простейшая форма циркуляции. Применение более сложных форм с большим количеством подбираемых параметров должно существенно улучшить точность определения центра, но при этом обычно падает устойчивость выделения объекта. Отдельные примеры сопоставления выделенных центров слабых тайфунов с полем ветра, построенным по данным микроволновых пассивных измерений, показывают, что рассогласование с центром ветровой циркуляции велико, и улучшение модели формы не улучшит точность решения за дачи. Использование только карт ветра также не решает задачу, так как расчет поля приводного ветра по микроволновым измерениям не происходит с нужной периодичностью, а при сильных ветрах оценки скорости часто отсутствуют.

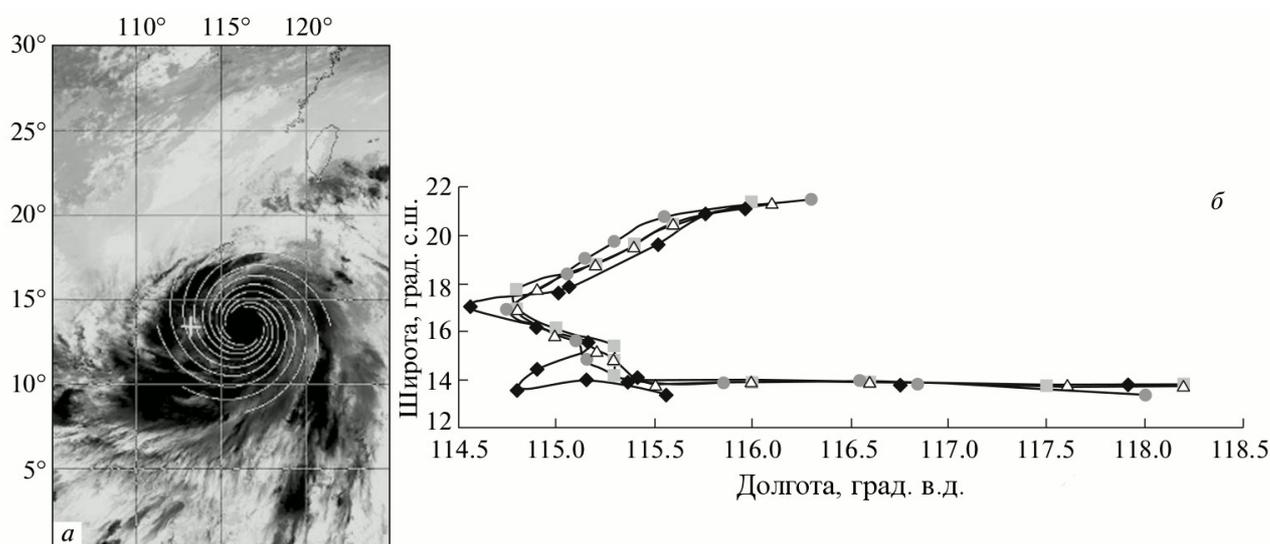
Анализ наибольших рассогласований выявил ряд случаев, когда неточность расчета центра объяснялась плохим соответствием доминант с направлениями облачно-дождевых полос ТЦ. Это обычно наблюдается на периферии облачного ядра ТЦ, где контрасты яркости ИК изображения в силу быстрого нарастания температуры облачности вдоль радиуса разворачиваются в сторону от доминирующей циркуляции. Второй причиной плохого соответствия может быть наличие двух ярусов облачности с существенно различной температурой верхнего слоя (пример на Рисунке 11, тайфун «Fung Wong»). Обычно такие зоны отсекаются по порогу величины  $\rho^*$ , но часть некорректных ДОТК остается и может влиять на финальную точность. Есть несколько вариантов решения этой проблемы на основе сопоставления результатов расчета центра с расчетами по картам доминант, оцененными по другим типам данных. Так, можно привлекать видимый канал для оценки центра, либо оценивать временную устойчивость ДОТК [6] и отбраковывать неустойчивые доминанты. Хорошо рассчитывается структура облачности и по изображению

разности радиационных температур двух ИК каналов. Использование разностей показало, что ДОТК, построенные по таким изображениям, лишены указанного недостатка. Эти изображения, как и ДОТК видимого канала, позволяют устойчиво выделять ТЦ, но показывают меньшую точность. Тем не менее, они могут использоваться, так как анализ перемещения ТЦ легко позволяет отсеять грубые ошибки расчета центра.

#### **2.4 Сравнение разработанного подхода с существующими методиками**

Апробация основной процедуры была проведена при мониторинге тайфуна CHANCHU по данным со спутника MTSAT 1R [20]. Целью экспериментов было сравнение работы процедуры с данными визуального анализа и результатами агентств JMA и JTWC. Данный тайфун выделяется нестабильной структурой облачности на протяжении всего времени существования, что ухудшает характеристики результата основной процедуры. И хотя имеется мало изображений с глазом, центр на большинстве из них визуально выделяется с высокой точностью. На Рисунке 12 справа приведены результаты работы метода. На левом изображении приведен редкий случай ложного выделения глаза, который отбраковывается при сравнении с более надежными результатами основной процедуры. Траектория, построенная автоматическим методом, сравнивалась с траекториями метеоагентств США и Японии. Из за того, что метеоагентства не перешли в начале 2006г на обработку данных нового японского спутника MTSAT 1R, поточечное сравнение расчетов траекторий невозможно в силу временной рассогласованности используемых изображений разных спутников. В целом построенная автоматическим методом

траектория хорошо соответствует траекториям метеоагентств. Максимальные рассогласования наблюдаются в области резкого изменения траектории. Величина рассогласований в основном сопоставима с величиной рассогласований траекторий метеоагентств. Наблюдается хорошее согласование траекторий на прямолинейных участках и низкое в области резкого поворота. Рассогласования метеоагентств с визуальными оценками достигали величины 35 км, а между собой – 20 км.



**Рисунок 12.** Результаты работы метода: (а) – изображение тайфуна CHANCHU (MTSAT 1R, май 2006г) и его геометрическая модель; (б) – траектории тайфуна, построенные автоматически (ромбики), вручную (круги), Японским метеорологическим агентством (треугольники) и Объединенным центром предупреждения о тайфунах США (квадраты).

Цель следующей серии экспериментов – сравнение результатов применения основной процедуры с оценками ЖМА на изображениях всех тайфунов, а также оценка пределов применимости рассматриваемого подхода.

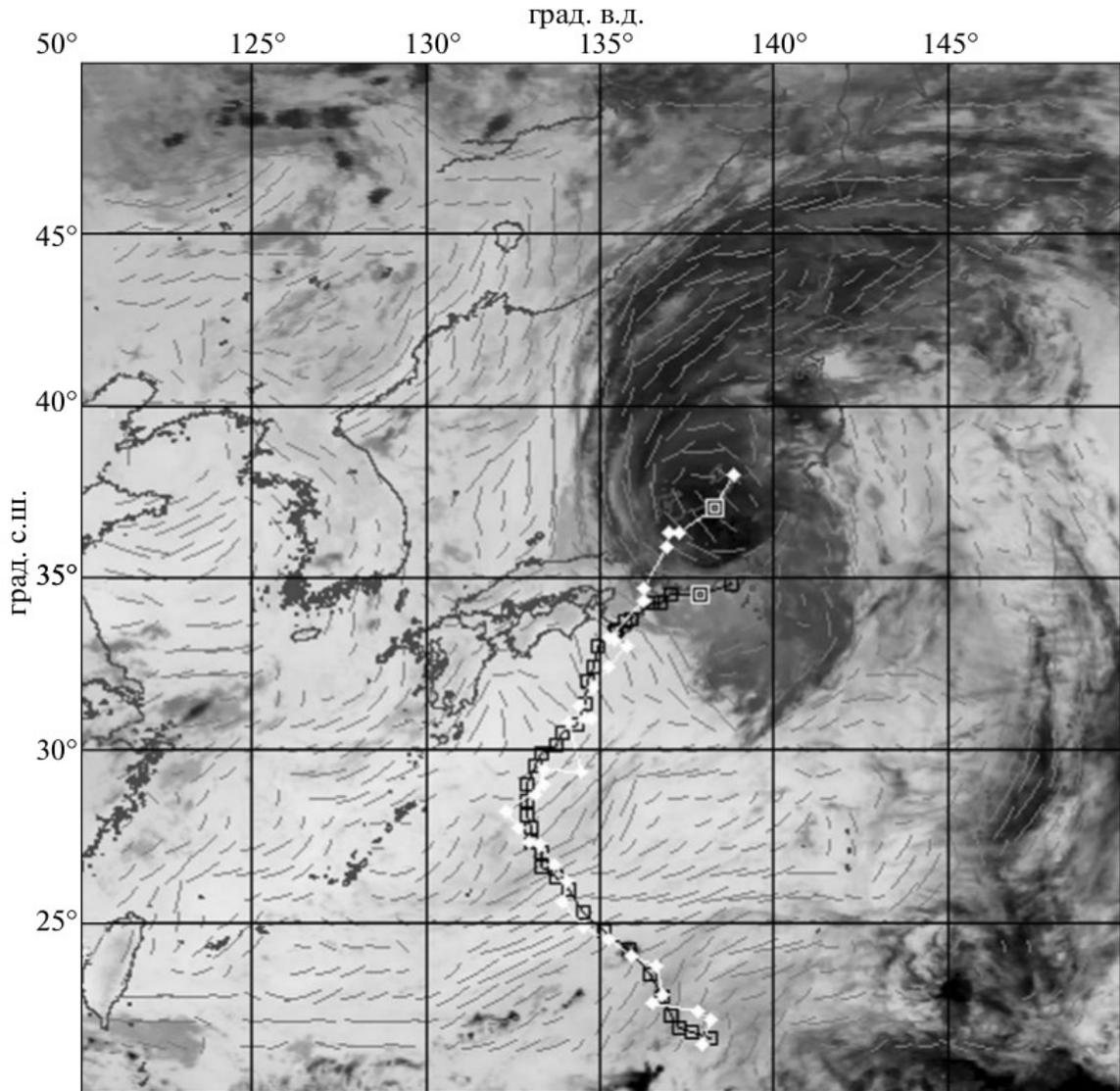
Было взято 206 изображений, на которых ЖМА обнаружило ТЦ. Максимальная скорость ветра в тайфунах колебалась от 95 узлов до менее 30 узлов, когда центр ТЦ еще выделялся агентством, а максимальная скорость ветра в нем уже не оценивалась. Вся выборка была разбита по величине скорости ветра на две группы: первую составили ТЦ со скоростью не менее 50 узлов (162 изображения); во вторую вошли оставшиеся “слабые” тайфуны (44 изображения).

На изображениях ТЦ с максимальной скоростью ветра более 45 узлов имели хорошо выраженную структуру. Все тайфуны были выделены алгоритмом. Сравнение показало, что систематические рассогласования по каждой координате (с учетом введенных поправок к основной процедуре) лежали в пределах точности измерений – 5 км. В двух случаях максимальное отклонение достигало 125 км (тайфун «PABUK»). Стандартное отклонение расстояний между центрами составило величину 54 км. Роста последнего по сравнению с тестовой серией следовало ожидать. Методика Дворака при отсутствии глаза имеет существенно более низкую точность определения центра. Наличие выбросов, упомянутых выше, также приводит к резкому росту указанной величины. ТЦ с максимальной скоростью менее 50 узлов в основном находятся на стадии разрушения с плохо выраженной структурой облачности и, в основном, без глаза. Алгоритм не смог выделить ТЦ на 7 изображениях из 44 (причины пропуска рассматривались ранее). Стандартное отклонение расстояний между рассчитанными центрами достигло величины 113 км, а максимальный “выброс” был опять же у тайфуна «PABUK» – 265 км.

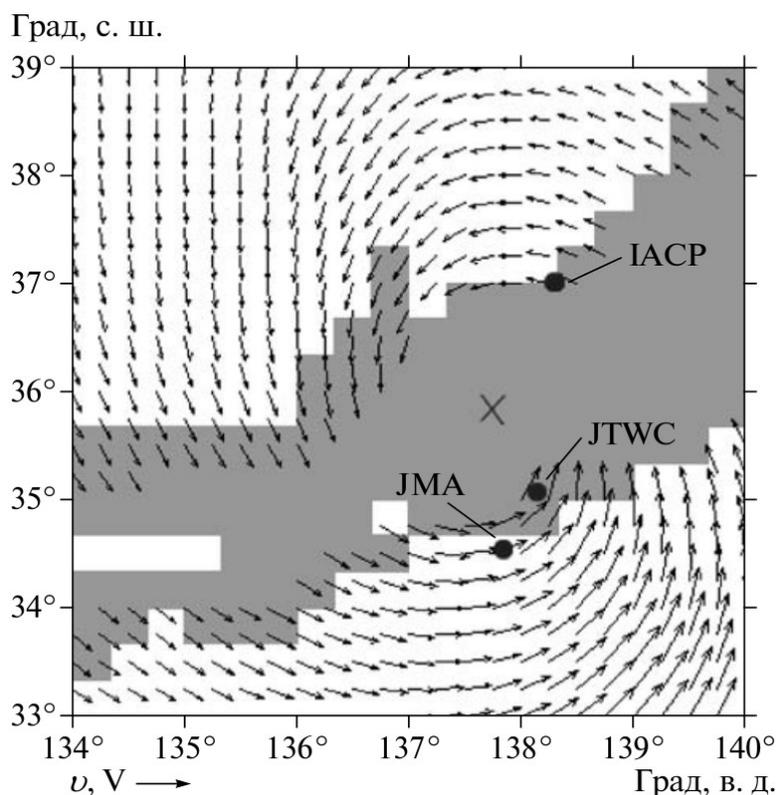
Отдельно остановимся на результатах мониторинга тайфуна «PABUK», обеспечившего наибольшие рассогласования японских и наших оценок. На Рисунке 13 приведены результаты работы алгоритма за время его жизни (17.08.2001–22.08.2001). Практически на всем протяжении наблюдается

хорошее соответствие траектории с данными JMA. На протяжении почти всей траектории было лишь одно значительное отклонение на 95 км по долготе и 45 км по широте. Этот выброс хорошо корректировался с помощью алгоритма автоматического выделения глаза и на основе результатов анализа изменчивости положения центра во времени. Однако для последних пяти изображений наблюдаются большие отклонения (125–265 км).

Эти отклонения возникли в ситуации, когда тайфун находился над сушей на этапе разрушения. Возможно, это объясняется тем, что Японское метеорологическое агентство брало центр, привлекая прямые измерения, в то время как алгоритм выделил центр по структуре облачности. Применение методики Дворака [47] для этого случая дает оценки центра ТЦ ближе к нашим, чем к оценкам JMA и JTWC. Сравнение с полем приводного ветра, рассчитанного по спутниковой информации, показывает, что положение центра циркуляции ветра на нижних горизонтах значительно отличается от всех трех оценок положения ТЦ. На Рисунке 14 отображены точки найденного центра тайфуна «PABUK» за 22.08.2001. При этом рассогласования измерений между нашими оценками и JMA 210 км, между нашими и JTWC – 170 км, между JMA и JTWC – 40 км.



**Рисунок 13.** Полутоновое изображение с нанесенной на него картой ДОТК за 22.08.2001 23:39 UTC. На изображение нанесены две траектории тайфуна «РАВУК»: белым цветом с центрами в виде ромбиков – траектория, построенная автоматическим методом; черным цветом с центрами в виде пустых квадратов – траектория JMA. Специальным символом выделены точки, соответствующие центрам ТЦ, рассчитанным для данного изображения. По оси абсцисс отложены – град, в.д., по оси ординат – град, с.ш.



**Рисунок 14.** Поле приводного ветра для тайфуна RABUK на уровне 10 м за 22.08.2001г 24:00 UTC: подписями со стрелочками обозначены центры тайфуна, найденные нами (IACP) и метеоагентствами Японии и США; крестиком – предполагаемый центр, проставленный вручную в соответствие с полем приводного ветра.

## 2.5 Проблема отбраковки ложных объектов

Эксперименты на трёхлетней серии изображений показали, что четыре из пяти автоматически выделенных объектов не являются ТЦ. У таких объектов среднее квадратичное расстояние с ближайшим соседом на предшествующем по времени изображении составляет величину более 500 км, на которые тайфун

за 3ч переместиться не может. Уже по последовательности из трех изображений фактически все ложные объекты могут быть отбракованы по данному критерию.

Однако в результате проводимых экспериментов по отбраковке ложных объектов встречался случай, когда размер, структура облачности, форма облачных полос и скорость перемещения объекта не отличались от параметров обычного тайфуна [3]. Данное циклоническое образование существовало во времени около суток. В связи с этим было введено дополнительное условие фильтрации объектов на время их жизни - объект забраковывается, если его время жизни составляет менее суток.

## **2.6 Выводы по главе**

Разработаны два автоматических метода: оценка местоположения центра ТЦ по структурным картам облачности в форме доминантных ориентаций ее контрастов и вспомогательный - выделение «глаза» ТЦ с оценкой его размера по полутоновым изображениям. Методы прошли апробацию на летних изображениях ТЦ северо-западной части Тихоокеанского региона за три года и показывают достаточную точность и информативность для использования их на практике. Приведены сопоставления результатов с данными Японского метеорологического агентства и Объединенного центра предупреждения о тайфунах США. Для верификации подхода привлекались также поля приводного ветра, рассчитанные по спутниковым микроволновым измерениям.

Для алгоритма поиска «глаза» ТЦ, основанного на критерии делимости двух участков изображения с разной яркостью, было получено значение порога

по его выделению. Данный алгоритм позволяет уточнить положение центра ТЦ в случае наличия «глаза» у ТЦ. Параметры процедуры выделения «глаза» ТЦ выбраны жёсткими, что позволяет осуществить обнаружение «глаза» ТЦ более чем в 95% случаев при небольшом количестве ложных объектов. Ввиду того, что «глаз» не проявляется на стадиях зарождения и разрушения ТЦ, а так же может быть затянута облачностью, данный алгоритм является вспомогательным.

Предложенная основная процедура демонстрирует высокую устойчивость автоматического выделения ТЦ - семь пропусков при обработке 206 изображений, которые пришлись на два тайфуна. Одной из причин пропусков является установленное значение критерия для выделения замкнутой циркуляции, позволяющее осуществить отбраковку большинства ложных объектов. Поэтому понижение порогового значения критерия привело бы к росту числа этих объектов. Другая причина пропусков ТЦ – слишком высокая температура верхней кромки облачности. Как правило, наблюдается расслоение облачности на холодный кластер с отсутствующей спиральностью облачных полос и на теплую облачность с характерной спиральностью. Полученная на тестовой выборке величина стандартного отклонения в 37 км для сильных ТЦ сопоставима с расхождениями оценок центра ТЦ по версиям JTWC и JMA в случае отсутствия «глаза». На слабых ТЦ форма циркуляции отличается от круговой более существенно, и величина стандартного отклонения достигает значения в 113 км, а максимальное единичное отклонение при сравнении с данными JMA составило 265 км. Анализ этого случая показал, что при сравнении с полем приводного ветра возникают существенные отклонения для всех рассматриваемых оценок центра ТЦ, включая оценки JMA и JTWC. В связи с этим возникает вопрос о положении центра в случае со слабыми ТЦ.

## ГЛАВА 3. МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНТРА ТЦ

### 3.1 Применение гиперболически-логарифмической спирали (ГЛС) для расчёта геометрии облачных полос

Целью проведённой работы была апробация модели ГЛС на структурных картах облачности для оценки физических параметров ТЦ в автоматическом режиме, оценка устойчивости получаемых решений и близость рассчитанных физических параметров к действительным значениям. Для проведения исследования было использовано 117 структурных карт облачности в форме карт ДОТК, построенных на основе изображений со спутника GMS-5, соответствующих шести ТЦ.

*Гиперболически-логарифмическая спираль.* Структура ТЦ хорошо проявляется на спутниковых ИК-изображениях. В данной работе для расчета параметров спирали используется описание линий тока ветра в виде спиральных облачно-дождевых полос (СОДП) [37] (Рисунок 15):

$$\varphi = A \left( \frac{1}{y^{n+1}} - 1 \right) - a \ln y \quad (7)$$

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













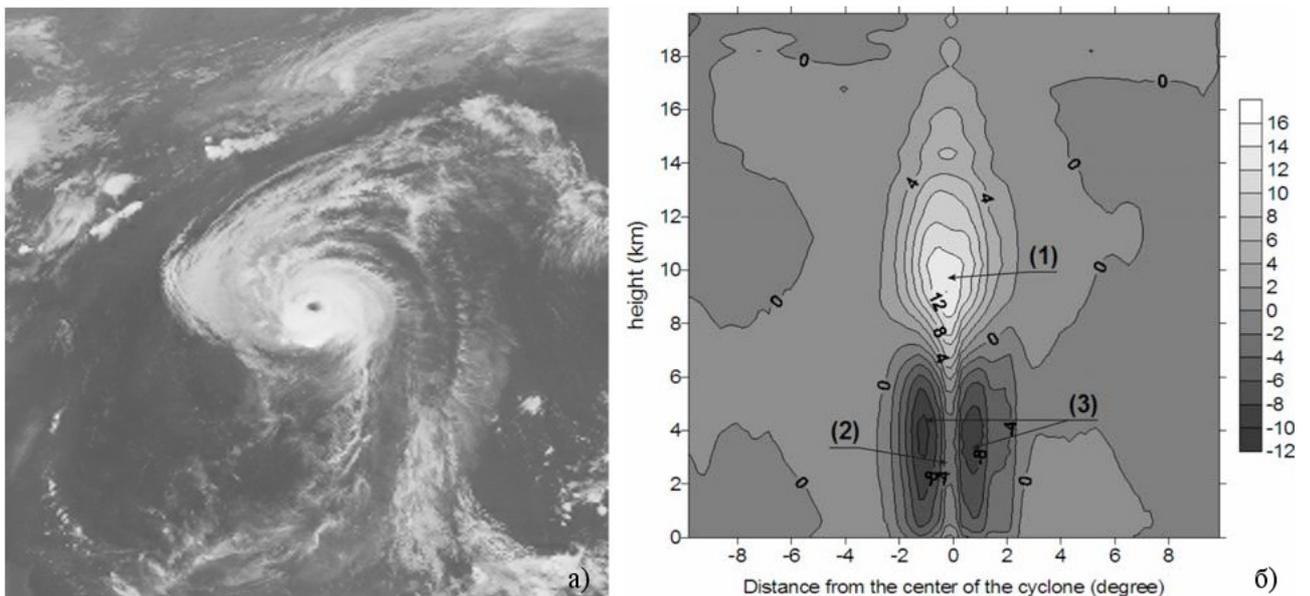
### **3.2 Использование вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы для расчёта параметров ТЦ**

Еще одним источником данных 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 кросс-секций поля аномалий температуры атмосферы [39]. Кросс-секция - плоское изображение вертикального сечения пространства, проходящего через центр ТЦ. Данное изображение получается путём упорядочивания точек по расстоянию на каждом уровне с последующим осреднением значений точек, близких по радиусу и лежащих на одном уровне [71].

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. Трёхмерная структура ТЦ строилась по асинхронным данным. Эксперименты показали, что при разнице во времени в 1,5 часа (данные смежных витков) изменчивость температурных полей незначительна (линия «сшивки» асинхронных данных не проявляется в картах температуры конкретного атмосферного уровня). 2 смежных витка полностью покрывают тайфун. В то же время наблюдаются

редкие, но значительные «выбросы» в отдельных точках. Для анализа трехмерной структуры ТЦ строились осредненные сечения, проходящие через центр вдоль меридиана. Данные восточной области ТЦ (разрез проводился по долготе) упорядочивались вдоль радиуса и сглаживались медианным фильтром. Расстояния вдоль радиуса считались положительными величинами. Аналогично делалось осреднение и для западной части ТЦ, но расстояния считались отрицательными.

Для построения теплового ядра ТЦ рассчитывались аномалии температуры. Для этого считался средний вертикальный профиль температуры на периферии тайфуна (на расстоянии 500 км от центра). Он вычитался из спутниковых профилей и получившиеся значения аномалии температуры усреднялись в соответствии с описанной процедурой [71].



**Рисунок 21.** 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).





Также как и в [71] 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 расчета перепада давления достаточно взять два уравнения, соответствующие атмосферным профилям в центре ТЦ и на его периферии. Они позволяют, исключив  $P$ , получить соотношение между давлениями в центре и на периферии. Величина  $\Delta z/T_m$  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.

Одна из важных задач спутникового мониторинга на Дальнем Востоке России – априорная оценка максимальной потенциальной интенсивности ТЦ при выходе их на побережье. Для этого может применяться подход [30, 56], требующий детальную трехмерную информацию о состоянии атмосферы ТЦ и подстилающей поверхности. Созданные средства и технологии, внедренные в ЦКП Спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН, позволяют получать необходимую информацию в режиме реального времени для решения этой задачи.

### 3.3 Выводы по главе

В главе были применены различные подходы к улучшению точности определения центра ТЦ, и оценки интенсивности ТЦ. Проведённые расчёты для двух ТЦ (MELOR и VAMCO) показали соответствие рассчитанного падения давления с оценками JMA. Для восстановления динамических характеристик ТЦ перспективным представляется использование вертикальных атмосферных профилей температуры и влажности, восстанавливаемых европейскими пакетами программ AAPP, RTTOV, MetOffice-1Dvar.

В результате экспериментов с использованием гиперболически-логарифмической спирали были получены значения коэффициента трения  $k$  для нескольких ТЦ. Данные значения коэффициента лежат в теоретически допустимых пределах его значений с некоторым смещением в сторону нижней границы [17]. Показана возможность использования спирали для расчёта максимальной скорости ветра в ТЦ. В то же время регулярное несоответствие формы спирали облачно-дождевых полосах требует пересмотра физической модели её формирования. Получена возможность использования гиперболически-логарифмической спирали для уточнения центра ТЦ путём минимизации средних отклонений между ДОТК и касательными к спирали.

## ГЛАВА 4. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЦ

Конечной целью представленной работы было создание системы автоматического мониторинга тропических циклонов для построения треков ТЦ. В качестве базовой информации используются ИК-изображения с геостационарных спутников MTSAT с пространственным разрешением в 4 км. Изображения поступают в оперативном режиме с приёмных станций спутникового центра ДВО РАН. Для каждого изображения производится расчёт карты доминантных ориентаций термических контрастов на многопроцессорном кластере.

Для автоматического обнаружения центра ТЦ используются ранее разработанные алгоритмы обнаружения “глаза” и центра ТЦ по циркуляции на основе карт ДОТК. В общей схеме работы системы также имеется модуль построения треков ТЦ с последующей автоматической отбраковкой ложных объектов на основе накопленных данных.

Профили температуры и влажности атмосферы рассчитываются по данным радиометров ATOVS полярно-орбитальных метеорологических спутников серии NOAA и METOP европейскими пакетами программ AAPP, RTTOV и MetOffice-1Dvar. Они выбираются по области прохождения ТЦ с центром, совпадающим с текущим центром тайфуна и накапливаются для дальнейшей обработки. Исходные спутниковые данные для построения профилей в тропической зоне (вне зоны наблюдения спутникового центра ДВО РАН) берутся из NOAA Comprehensive Large Array-data Stewardship System



#### **4.1.1 Распараллеливание расчёта карта доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК)**

Тематическая обработка спутниковой информации является вычислительно ёмкой 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 адаптации под различные библиотека параллельного программирования. Таким образом, была реализована соответствующая автономная процедура «нарезки» данных для расчёта структурных карт облачности в виде ДОТК.

Для решения данной задачи, используется возможности Grid-сети ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» (ЦКП ДВВР) [31]. В настоящее время Grid-сеть ЦКП ДВВР объединяет ряд вычислительных систем различной архитектуры.

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. В результате реализации процедуры распараллеливания вычисления карт ДОТК удалось добиться уменьшения времени вычисления с одного часа на изображение (2101x2101 пикс.) до 7 – 8 минут, что в свою очередь положительным образом отразилось на общем времени работы всей системы в целом. Помимо этого использование свойств распределённой обработки данных спутникового центра ДВО РАН позволяет распараллеливать расчёты нескольких задач одновременно.

#### **4.1.2 Схема работы 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. После расчёта 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 пересчёта значения точек заносятся далее в базу данных.

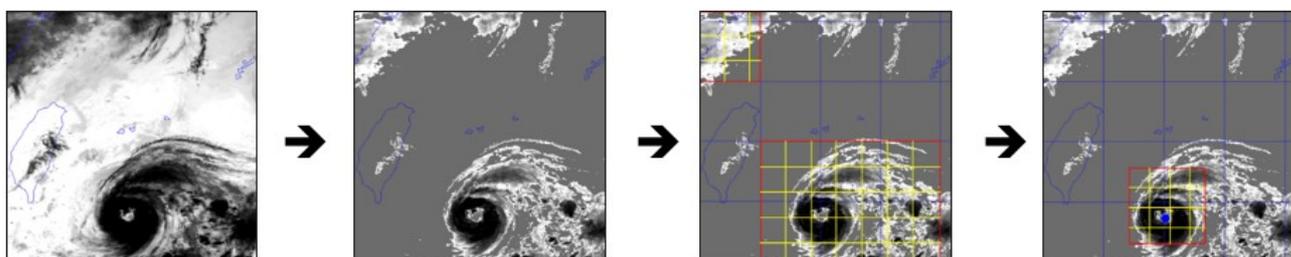
#### **4.1.3 Фильтрация «ложных» объектов**

На каждый выделенный ТЦ приходится 3-4 ложных объекта. В результате экспериментов было выявлено, что для успешной фильтрации ложных объектов необходимо задействовать серию как минимум из 3-х подряд идущих ИК-изображений. У ложно выделенных объектов расстояние до соседних объектов, выделенных на предыдущем изображении, обычно 500 км и более. ТЦ физически не в состоянии переместиться на указанное расстояние в течение времени, прошедшего с момента предыдущего ИК-снимка (от 15 до 60 мин). Таким образом, данное свойство успешно используется для отбраковки ложных объектов.

#### 4.1.4 Схема работы алгоритма поиска «глаза» ТЦ

Алгоритм основан на расчёте модифицированного  $t$ -критерия разделимости двух участков изображения с различной яркостью [3]. Данный алгоритм использует для расчётов по ИК-изображениям со спутников MTSAT. Алгоритм автоматического выделения центра «глаза» ТЦ, как правило, даёт наилучшую оценку центра ТЦ, но отсутствие видимого «глаза» на стадии зарождения и разрушения ТЦ, а также в случае затянутости «глаза» облачностью и наличие ложных объектов затрудняет получение оценки положения центра ТЦ. Данный алгоритм, анализируя кластеры низкотемпературной облачности, позволяет с высокой степенью достоверности уточнить координаты центра «глаза» ТЦ в случае его наличия на ИК-изображении (Рисунок 25).

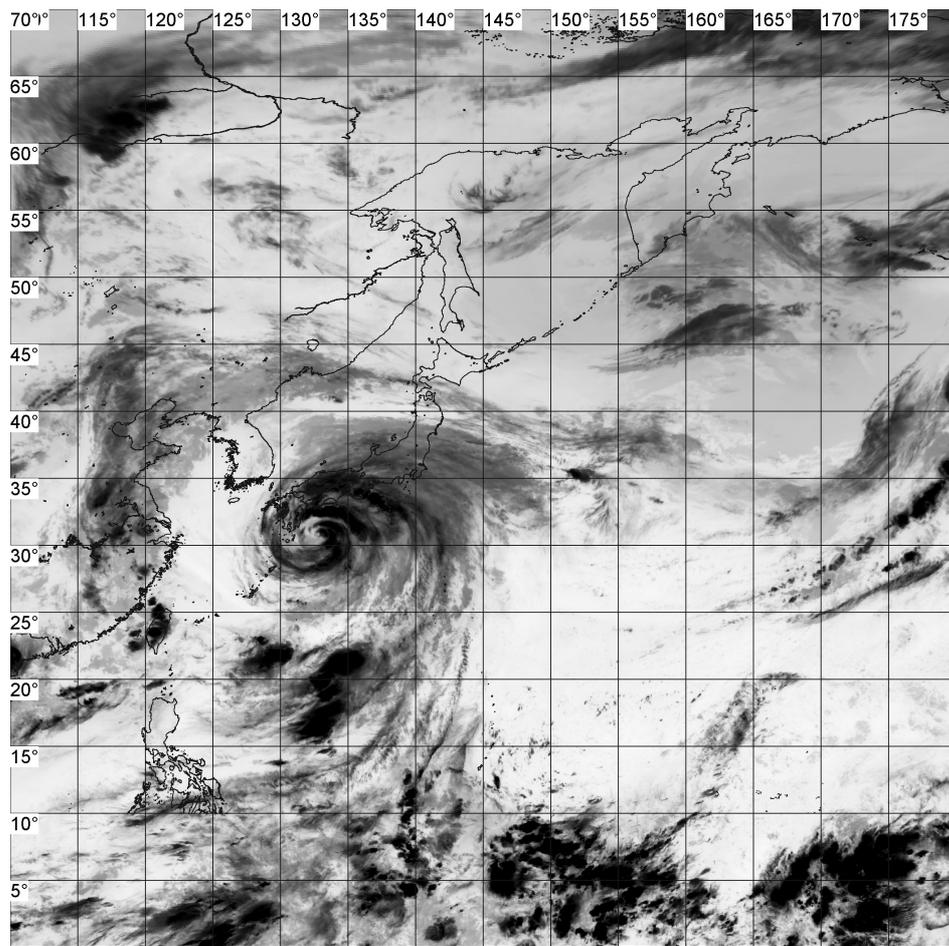
При работе алгоритма возникают ситуации, когда на заданном облачном кластере присутствует несколько объектов, которые можно рассматривать как «глаз». Отбраковка ложных объектов осуществляется по порогу расстояния между центром круговой циркуляции и «глазом». Ближайший к центру «глаз» используется для уточнения центра ТЦ.



**Рисунок 25.** (слева-направо): входное ИК-изображение; обработка по порогу температуры; выделение кластеров низкотемпературной облачности; расчёт «глаза» ТЦ.

#### 4.1.5 Построение треков ТЦ

Для работы системы построения треков ТЦ используются ИК-изображения со спутника MTSAT, получаемые в оперативном режиме в ЦКП Спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН. ИК-изображения охватывают следующий регион: координаты левого нижнего угла по широте -  $0^{\circ}00'00''S$  и долготы -  $110^{\circ}00'00''E$ ; размер по широте и долготы -  $70^{\circ}$  (Рисунок 26). Размер пикселя изображения в надире составляет около 4 км. После построения предполагаемых центров ТЦ основной процедурой запускается алгоритм поиска “глаза” ТЦ, который независимо от первого алгоритма производит оценку положений “глаза” ТЦ. После того, как алгоритм поиска “глаза” ТЦ завершил свою работу, запускается процесс построения треков ТЦ на основе полученных точек. При этом, если расстояние от рассматриваемого центра по циркуляции до ближайшего центра по “глазу” составляет не более 80 км, то в качестве оценки центра ТЦ берётся значение по “глазу”, как более точное. Далее каждая точка проверяется на наличие соседа на предыдущем снимке. Соседняя точка определяется установленными критериями близости: по расстоянию и по времени. В ходе ранее проведённых экспериментов была установлена величина стандартного отклонения центров ТЦ по *базовой процедуре*, равная 37 км [3]. Время между точками не должно превышать 1 час. После завершения данной процедуры все точки будут либо отнесены к какому-либо существующему треку ТЦ, либо будут образовывать новый трек, либо будут забракованы, как не имеющие соседей. Все существующие треки также проходят проверку на время их жизни. Если время жизни какого-либо из треков составляет менее суток, то такой трек будет отбракован.



**Рисунок 26.** Пример исходного изображения области поиска ТЦ.

По оси абсцисс отложены град. в.д., по оси ординат - град. с.ш.

#### 4.1.6 Трёхмерная структура ТЦ

Траектория ТЦ является основой для автоматического вычисления и анализа трёхмерной структуры ТЦ. 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 кросс-секций поля аномалий температуры атмосферы [39].

Атмосферные профили могут быть использованы для вычисления скорости ветра и/или перепада давления [39]. Эти параметры являются ключевыми в оценке интенсивности ТЦ в любой его точке. Также атмосферные профили могут позволить уточнить центр ТЦ в тех случаях, когда ТЦ находится в фазе зарождения или затухания. Во время процесса затухания происходит размытие структуры облачности ТЦ, в то время как вертикальный разрез температурной аномалии, проходящий через его центр, сохраняет явно выраженные границы ядра. Таким образом, оценив положение центра тёплого ядра ТЦ мы получим положение его центра.

Вертикальные профили можно использовать для уточнения центра ТЦ, находящегося как на стадиях развитого тайфуна при отсутствии «глаза», так и стадиях слабой интенсивности. Уточнение центра слабых ТЦ особенно важно, так как используемые в настоящее время экспертные оценки могут различаться на сотни километров. На этой стадии можно также использовать структуру циркуляции приводного ветра ТЦ, получаемую по микроволновым измерениям. Три подхода к оценке центра дают существенно разные результаты. Какой из них лучше заранее сказать нельзя, так как нет чётких критериев оценки точности положения центра. Таким критерием может быть влияние расчёта центра на оценку точности прогноза перемещения ТЦ при выбранной модели прогноза погоды. Но это требует дополнительных исследований.

#### **4.2 Структура распределённой системы обработки**

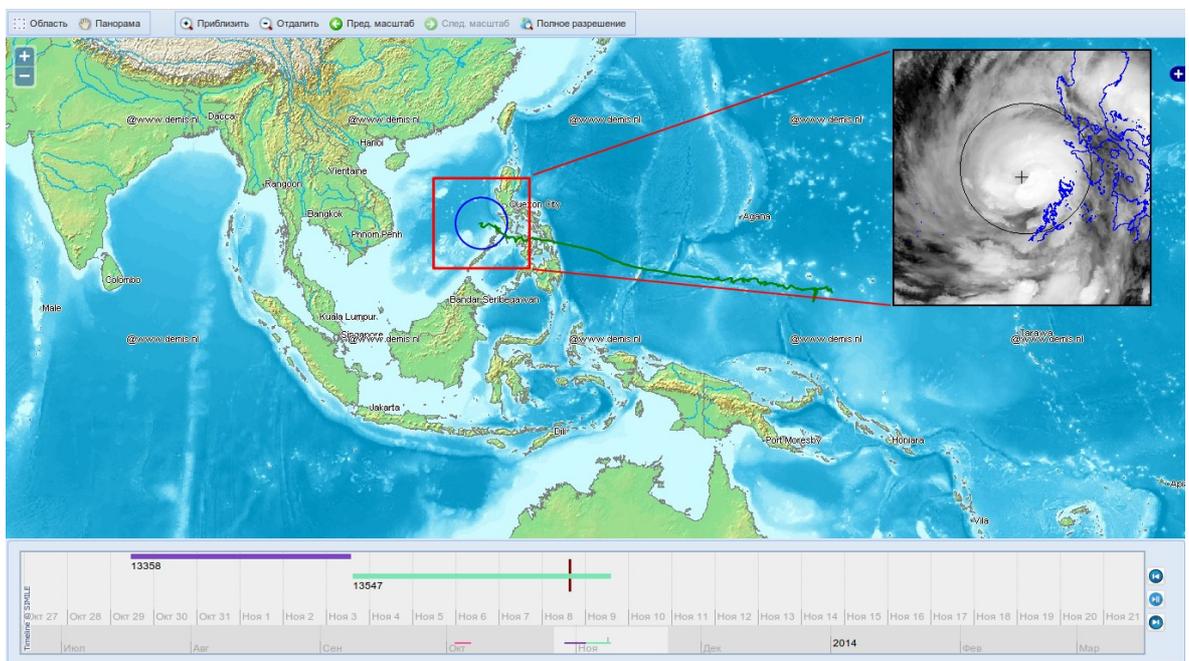
Для реализации представленной системы используется распределённая система обработки данных [11, 12]. Вся система построена на GRID-вычислениях, где каждый вычислительный узел (в том числе

задействованный для вычислений многопроцессорный кластер) является независимым компьютером, связанным с другими посредством сети (Рисунок 27). В «БД объектов системы» хранится: формализованное описание задач для запуска в распределённой системе обработки; счётных машин, на которых эти задачи запускаются; триггеры, контролирующие последовательность выполнения задач; разграничения прав доступа к запускаемым задачам. «Брокер сообщений» отвечает за приём и отправку сообщений от запуска и завершения различных задач внутри системы. «Диспетчер» отвечает за запуск задач на «Обрабатывающих компьютерах». Такая схема 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. Запуская задачу по *ssh*, по её завершению мы получаем код возврата. Этот код сохраняется в описании задачи в БД. Так же по завершении задачи «Диспетчер» посылает сообщение о её завершении, в котором присутствует некоторая описательная информация о задаче.



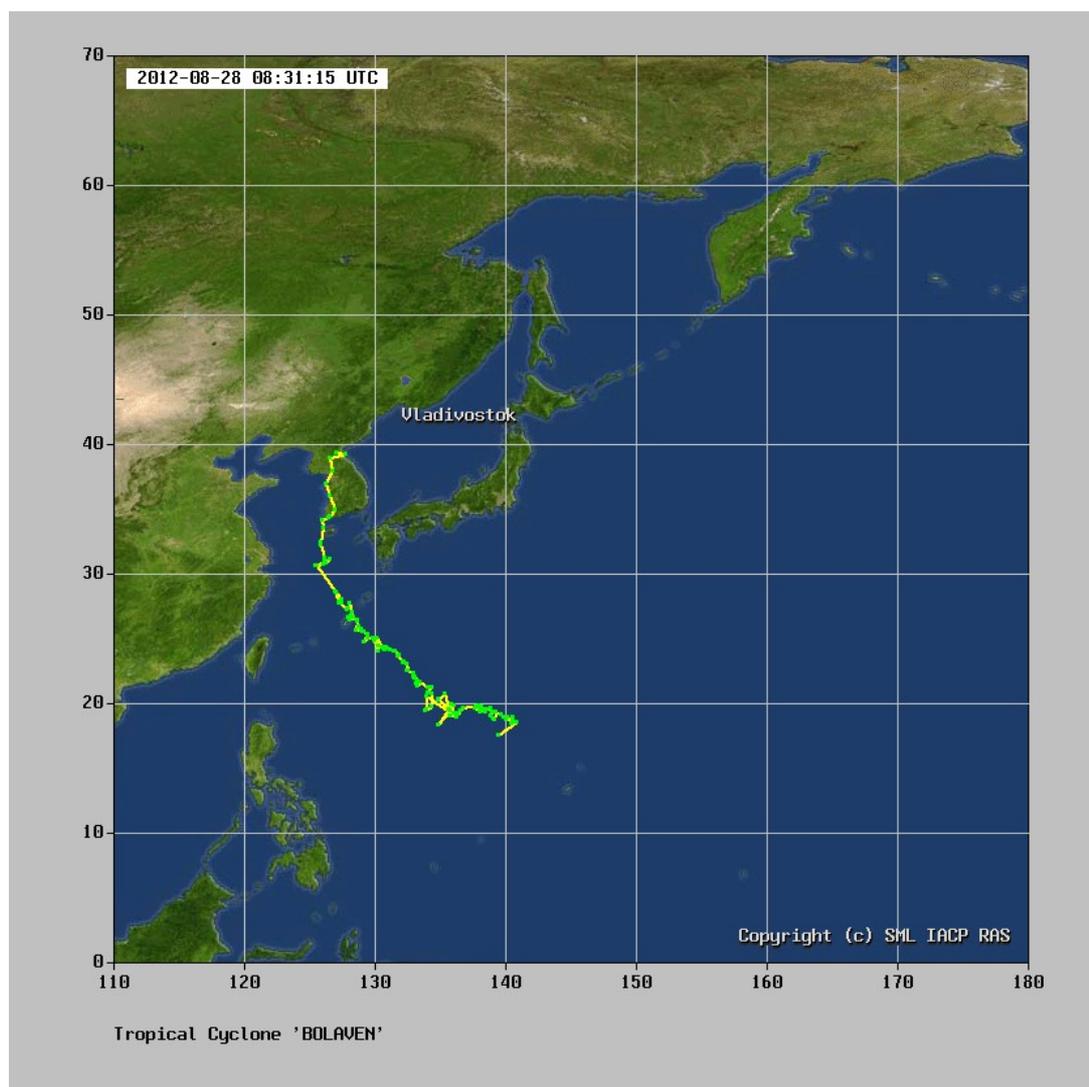
процесс обработки поступающих данных и осуществляют запуск соответствующих программ и алгоритмов. Система развернута на базе спутникового центра ДВО РАН [24]. Организован доступ (Рисунок 28) к результатам обработки (траектория, оценки координат центра ТЦ, координаты «глаза» ТЦ) с применением стандарта WFS (Web Feature Service) [78], утверждённого Открытым геопространственным консорциумом (OGC) [64]. Для этого обеспечена автоматическая генерация наборов данных, описывающих ТЦ в виде векторных объектов согласно стандарту OGC GML (Geography Markup Language) [49]. Их усвоение производится с использованием языка Bash. Доступ к сервису предусматривает как использование ГИС-клиента, так и с помощью специально разработанного веб-интерфейса. Веб-интерфейс позволяет пользователю производить выборку и просмотр траекторий ТЦ за выбранную дату.



**Рисунок 28.** Веб-интерфейс для работы с данными о траекториях на примере ТЦ «HAYAN» за период времени 03.11.2013 - 09.11.2013. Окружностью обозначен центр ТЦ на момент времени 08.11.2013 15:30 UTC.

### 4.3 Результаты опытной эксплуатации системы

Опытная эксплуатация системы автоматического мониторинга ТЦ проводилась на ТЦ 2011г [21, 22]. В результате опытной эксплуатации системы автоматически были построены треки для нескольких 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) (Рисунок 29); **TEMBIN** (2012-08-20 01:31:14 - 2012-08-29 10:00:46 UTC). При детальном анализе полученных треков можно обнаружить, что существующие отклонения точек от центров ТЦ лежат в пределах точности работы алгоритмов (37 км от реального центра ТЦ) [3]. 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 происходят в результате задержки ИК-изображений, либо их выпадения из оперативной обработки. Данные проблемы решаются дополнительным пересчётом частей треков при поступлении недостающих данных и корректировкой выбросов процедурой интерполяции трека в точках отклонения.

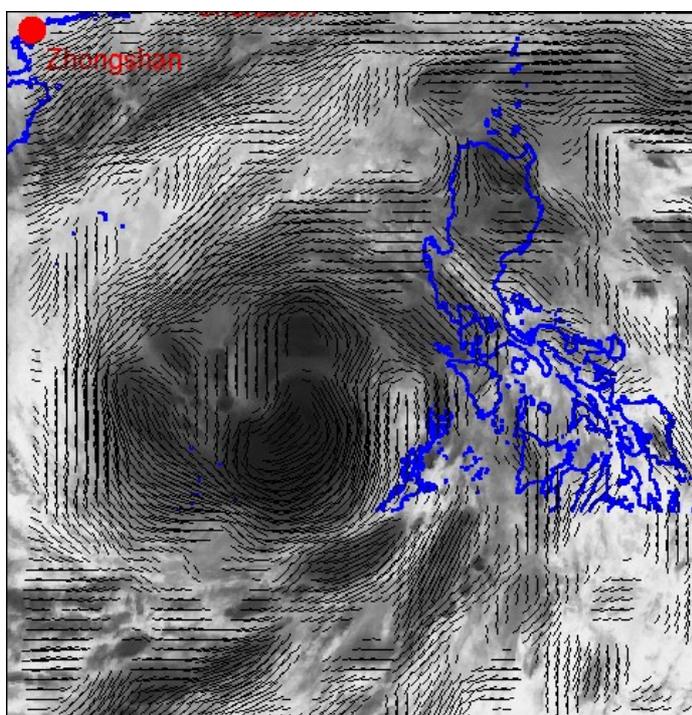


**Рисунок 29.** Траектория ТЦ «BOLAVEN», построенная автоматически за период времени 2012-08-21 03:00:45 - 2012-08-28 09:31:15 UTC.

#### 4.4 Выводы по главе

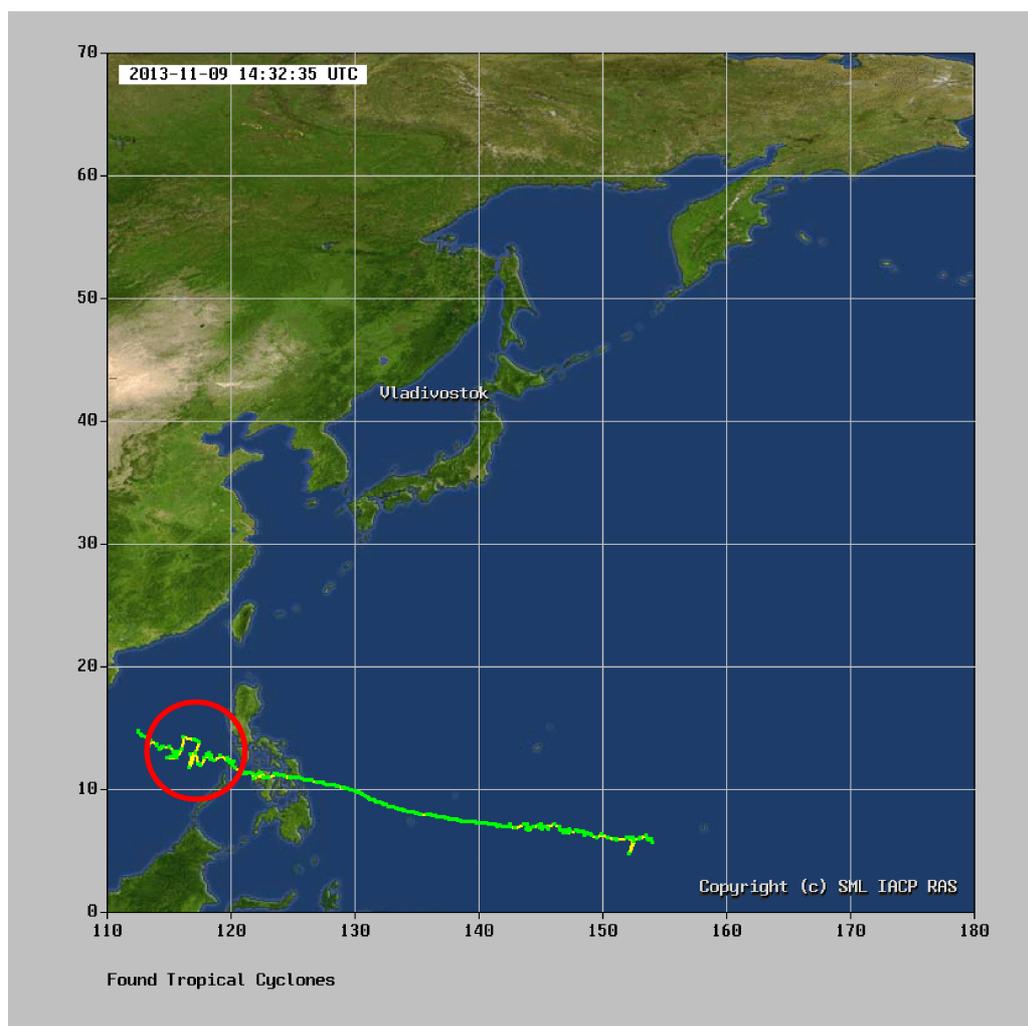
В работе рассмотрена опытная эксплуатация созданной системы автоматического построения треков ТЦ на основе алгоритмов выделения центра ТЦ с привлечением данных атмосферных профилей температуры и влажности.

Система прошла апробацию на нескольких ТЦ за 2011г. Во время опытной эксплуатации системы выявились некоторые особенности, связанные с работой приёмных систем, а именно - пропуск одного или более ИК-изображений из непрерывной серии с возможным поступление их позднее. В связи с этим была реализована возможность добавления точек в существующие треки, а так же “склейка” разорванных треков ТЦ.



**Рисунок 30.** Пример разделения генеральной циркуляции ТЦ «HAYAN» на две.

Кроме того возможна неопределённость определения центра для слабых ТЦ, когда наблюдается несколько центров циркуляции. Пример такого случая приведён на Рисунке 30. Он возник при мониторинге ТЦ «HAYAN», чья траектория представлена на Рисунке 31.



**Рисунок 31.** Траектория ТЦ «HAYAN», построенная автоматической системой мониторинга.

Как показано в работе [19] на этапах зарождения и затухания ТЦ могут быть представлены скоплением нескольких мезомасштабных вихрей. По мере интенсификации ТЦ область, покрываемая мезовихрями, сжимается, концентрируясь в центральной области ТЦ примерно на радиусах максимального ветра. Таким образом в зависимости от способа определения положения центра ТЦ расхождения в его определении могут достигать 100 км и более. Соответственно на этапах зарождения и затухания вопрос, что считать центром ТЦ, остаётся открытым.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным направлением представленной работы являлось создание и реализация технологии автоматического мониторинга тропических циклонов по данным дистанционного зондирования с метеорологических спутников Земли.

1. Разработаны два автоматических метода: основной - оценка местоположения центра ТЦ по структурным картам облачности в форме доминантных ориентаций ее контрастов и вспомогательный - выделение «глаза» ТЦ с оценкой его размера по полутоновым изображениям. Методы прошли апробацию на летних изображениях ТЦ северо-западной части Тихоокеанского региона за три года и показывают достаточную точность и информативность для использования их на практике. Приведены сопоставления результатов с данными Японского метеорологического агентства и Объединенного центра предупреждения о тайфунах США. Для верификации подхода привлекались также поля приводного ветра, рассчитанные по спутниковым микроволновым измерениям.

2. Показана возможность использования гиперболически-логарифмической спирали для уточнения положения центра и расчёта максимальной скорости ветра в ТЦ с использованием структурных карт облачности в виде ДОТК. В результате экспериментов с использованием спирали были получены значения коэффициента трения  $k$  для различных ТЦ. Данные значения коэффициента лежат в теоретически допустимых пределах его значений с некоторым смещением в сторону нижней границы. В то же время регулярное несоответствие формы спирали облачно-дождевым полосам требует пересмотра физической модели её формирования.

3. Использование траектории ТЦ совместно с вертикальными атмосферными профилями температуры и влажности, восстанавливаемыми европейскими пакетами программ AAPP, RTTOV и MetOffice-1Dvar, позволяет получать трёхмерную структуру ТЦ и оценивать перепад давления.

4. Разработана система автоматического мониторинга ТЦ с использованием созданных методов автоматического поиска ТЦ. Система была интегрирована в структуру распределённой системы обработки ЦКП «Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН». Проведена опытная эксплуатация созданной системы автоматического построения треков ТЦ с привлечением данных атмосферных профилей температуры и влажности. Система прошла апробацию на ТЦ за 2011-2012гг. Были выявлены случаи неопределённости в нахождении центра для слабых ТЦ и предложены три способа решения этой проблемы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.И. Алексанин, А.С. Ерёменко Автоматический расчёт 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.
2. А.С. Еременко, А.И. Алексанин Расчет траектории и параметров глаза тайфуна по серии спутниковых изображений // XXX Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова, Хабаровск, 21-27 августа 2005г., С.27.
3. Алексанин А., Ерёменко А. Автоматический расчёт траекторий тропических циклонов по данным геостационарных метеорологических спутников // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. С. 22 – 31.
4. Алексанин А.И., Алексанина М.Г. Автоматическое выделение вихрей по спутниковым ИК-изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2004, Т.1, с.382 – 386.
5. Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Горин И.И.. Спутниковые ИК-изображения: от термических структур к полю скоростей // Исследование Земли из космоса. 2001. N 2. С.7 – 15.
6. Алексанин А.И., Еременко А.С. Автоматический расчет траектории тропических циклонов по данным геостационарного спутника MTSAT\_1R // Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 2. С. 9 – 14.
7. Алексанин А.И., Еременко А.С. Автоматический расчет траектории тропических циклонов по данным геостационарного спутника MTSAT-1R // Четвёртая всероссийская открытая конференция

- «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2006г. Сборник тезисов конференции, с. 95.
8. Алексанин А.И., Ерёменко 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" 12-13 ноября, 2008, Владивосток, Россия.
  9. Алексанина М.Г. Автоматическое выделение поверхностных структур океана по инфракрасным данным спутников NOAA // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 3. С. 44 – 51.
  10. Андронников В.В., Кудрянь А.П. Восстановление давления в центре циклона у поверхности земли по вихревой структуре облачности на снимках метеорологических спутников Земли // Вопросы прогноза погоды, климата и циркуляции атмосферы. Межвузовский сборник научных трудов. Пермь, 1992. С. 18 – 26.
  11. Бабяк П.В., Недолужко И.В., Тарасов Г.В. Инфраструктура приёма, распределённой обработки и поставки спутниковых данных ЦКП Регионального Спутникового Мониторинга ДВО РАН. // Девятая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2011 г.: Сборник тезисов конференции.
  12. Бабяк П.В., Недолужко И.В., Фомин Е.В. Подход к предоставлению услуг по обработке спутниковых данных в Центре коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 3. № 9. С. 324-331.

13. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат. 1991. 616 с.
14. Г.Г. Тараканов Тропическая метеорология // Ленинград гидрометеиздатб 1980.
15. Гавриков А.В. Эволюция влаги в атлантических циклонах// Метеорология и гидрология. 2007. №11. С.26 – 36.
16. Голицын Г.С. и др. Статистические характеристики параметров тропических циклонов и задача оценки риска // Известия АН. Физика атмосферы и океана, 1999. Т. 35, № 6. С. 734 – 741.
17. Гуральник И.И., Дубинский Г.П., Мамиконова С.В. Метеорология // Учебник для вузов. – Л., Гидрометеиздат. 1972.
18. Дж. Гарвей Атмосфера и океан/Пер. с англ. – М.: Прогресс, 1982.
19. Е. Ю. Поталова, М. С. Пермяков, Т. И. Клещева Мезомасштабная структура тропических циклонов в поле приводного ветра // Метеорология и гидрология.
20. Еременко А.С. Опытная эксплуатация алгоритмов автоматического расчета траектории тропических циклонов по данным геостационарных спутников Земли // XXXIII Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова: тезисы докладов. Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2008. С.13.
21. Ерёменко А.С. Опытная эксплуатация системы автоматического мониторинга тропических циклонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. №1. С. 320-327.
22. Ерёменко А.С., Боловин Д.А. Опытная эксплуатация системы автоматического мониторинга тропических циклонов // Девятая Всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” Москва ИКИ РАН, 14-18

- ноября 2011г. Сборник тезисов конференции.  
[http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/2011.html](http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011.html)
23. Ерёменко 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: ФГБУ "ВНИИГМИ-МЦД". 2012. с.114.
24. И.В. Недолужко, П.В. Бабяк, Г.В. Тарасов, В.С. Ерёменко. Инфраструктура приёма, распределённой обработки и поставки спутниковых данных в Центре коллективного пользования Регионального спутникового мониторинга ДВО РАН. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №3. сс. 324-331.
25. Исследования Мирового океана средствами дистанционного зондирования. - URL: [http://www.geogr.msu.ru/science/aero/center/int\\_sem7/winds.htm](http://www.geogr.msu.ru/science/aero/center/int_sem7/winds.htm) . Дата обращения: 21.12.2013.
26. Калашник М.В., Калашник А.М. Аналитическая модель интенсификации тропического циклона // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 829–844.
27. Л.М. Митник, М.Л. Митник, Е.В. Заболотских. Спутник Японии GCOM-W1: моделирование, калибровка и первые результаты восстановления параметров океана и атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 135–141.
28. 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., Ерёменко А.С., Круглов М.В. Спутниковое информационное обеспечение мониторинга

океана и атмосферы в ДВО РАН // «Земля из космоса – наиболее эффективные решения», четвертая международная конференция 1-3 декабря 2009г. Сборник тезисов. – Москва: ИТЦ «СканЭкс», НП «Прозрачный мир», ООО «Издательство БИНОМ», 2009, с. 206-207.

29. Машкович С.А. О чувствительности численного прогноза траекторий тропических циклонов к погрешностям данных об их исходных координатах. Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 42-48.
30. Петрова Л.И. Об оценках максимальной потенциальной интенсивности тропических циклонов// Метеорология и гидрология. 2010. №6. 16-25.
31. Тарасов Г.В., Харитонов Д.И., Шиян Д.С. Опыт применения GRID-технологий в Приморском сегменте сети ДВО РАН// Тр. Междунар. науч. конф. «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ’2008) / Санкт-Петербург, 28 янв. – 1 февр. 2008 г. – Челябинск: Изд.ЮУрГУ. 2008. С. 470 – 475.
32. Тунеголовец В.П. Прогноз и моделирование тропических циклонов северо-западной части Тихого океана в ДВНИГМИ. Тр. ДВНИГМИ. 2000. Тем. вып. №3. С. 136 – 149.
33. Тунеголовец В.П. Статистический метод прогноза интенсивности тайфунов // Тр. ДВНИГМИ. 1987. Вып. 138. С. 146 – 179.
34. Фурман Я.А. Введение в контурный анализ. М.: Физматлит, 2002. 590с.
35. Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В. Эволюция тропического циклона GONU и его связь с полем интегрального водяного пара в экваториальной облачности// Исследование Земли из космоса. 2008. №6. С.25 – 30.
36. Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В. Энергетические особенности множественного тропического циклогенеза по мультиспектральным спутниковым наблюдениям// Исследование Земли из космоса. 2011. №2. С.18 – 25.

37. Юрчак Б.С. Представление облачно-дождевых полос в тропическом циклоне гиперболически-логарифмической спиралью // *Метеорология и Гидрология*. 2007. № 1. С. 15 – 29.
38. A. Talukder, S.-S. Ho, T. Liu, W. Tang, A. Bingham, and E. Rigor, Global Cyclone Detection and Tracking using Multiple Remote Satellite Data, NASA Earth Science Technology Conference, Aldephi, MD, 24 June, 2008.
39. A.I. Alexanin, A.S. Eremenko, D. A. Bolovin, S. E. Dyakov. Automatic Computation of Tropical Cyclone Tracks on Geostationary Satellite Imagery // *Proceedings of First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2010)*, 6-9 September 2010, Vladivostok (Russia). – Vladivostok: IACP FEB RAS. – 2010. – ISBN: 978-0-9803267-3-4 (CD), pp. 255 – 258.
40. A.I. Alexanin, S.E. Diakov, A.S. Eremenko, Yu.V. Naumkin, I.V. Nedoluzhko Atmosphere and ocean monitoring in feb ras satellite centre: tasks and present state // *Proc. of the International Conference 3-6 October, 2007*, Vladovostok: Dalnauka, 2007, pp.15-16.
41. Adler, R. F., and E. B. Rodgers, 1977: Satellite-observed latent heat release in tropical cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 956 – 963.
42. Aleksanin A.I., Aleksanina M.G. Quantative analysis of thermal sea surface structures ON NOAA IR\_images // *Proc. CREAMS'2000 Int. Symp. Oceanography Japan sea. Vladivostok, 2001*. P. 158 – 165.
43. Allison, L. J., 1974: Tropical cyclone rainfall as measured by the Nimbus 5 electrically scanning microwave radiometer. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 55, 1074 – 1089.
44. Brueske, Kurt F., Christopher S. Velden, 2003: Satellite-Based Tropical Cyclone Intensity Estimation Using the NOAA-KLM Series Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU). *Mon. Wea. Rev.*, 131, 687–697.

45. Chang, P.-L., B.J.-D. Jou, and J.Zhang, 2009: An algorithm for tracking eyes of tropical cyclones. *Wea. Forecasting*, 24, 245-261.
46. Dvorak, V.F. Tropical clouds and cloud systems observed in satellite imagery: Tropical cyclones. Workbook Volume 2. Available from NOAA/NESDIS, 5200 Auth Rd., Washington DC, 20233. 1995. 359 pp.
47. Dvorak, V.F. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery// *Mon. Wea. Rev.* 1975. 103. P.420 – 430.
48. Dvorak, V.F. Tropical cyclone intensity analysis using satellite data// NOAA Tech. Report NESDIS 11. Available from NOAA/NESDIS, 5200 Auth Rd., Washington DC, 20233. 1984. 47p.
49. Geography Markup Language. URL: <http://www.opengeospatial.org/standards/gml> (Дата обращения: 12.01.2014).
50. Godelieve Deblonde, Stephen Macpherson, Yves Mireault, Pierre Héroux, 2005: Evaluation of GPS Precipitable Water over Canada and the IGS Network, *Journal of Applied Meteorology*, Volume 44, Issue 1, pp. 153-166.
51. Griersmith D. Report on the Sixth Asia-Pacific Satellite Data Exchange and Utilization (APSDEU) // Meeting. Seoul, Korea, Korea Meteorological Administration, 1-3 June, 2005. KMA. 2005. P.34.
52. Grody, N. C., 1979: Typhoon “June” winds estimated from scanning microwave spectrometer measurements at 55.45 GHz. *J. Geophys. Res.*, 84, 3689 – 3695.
53. Grody, N. C., F. Weng, and R. Ferraro, 1999: Application of AMSU for obtaining water vapor, cloud liquid water, precipitation, snow cover, and sea ice concentration. 10Th Int. AROVS Study Conf., Boulder, CO, 230-240.
54. Grody, N.C. and W. C. Shen, 1982: Observation of Hurricane David (1979) using the Microwave Sounding Unit. NOAA Tech. Rep. NESS 88, Washington, DC, 52 pp.

55. Harris, B., Tingwell, C., Steinle, P., Bourke, W., Naughton, M., Roff, G. and Paevere, J. Use of Level-1d ATOVS Radiances in GASP// Proc. of ITSC-XIV, Beijing, China, 25-31 May 2005.
56. Holland G.J., “The maximum Potential Intensity of Tropical Cyclones”// Journal of the Atmospheric Sciences. 1997. V54. P. 2519 – 2541.
57. Hollingsworth A, P.Viterbo and A.J. Simmons The relevance of numerical weather prediction for forecasting natural hazards and for monitoring the global environment. ECMWF Tech Memo 361, March 2002. 29p.
58. Jingping Duan, Michael Bevis, Peng Fang, Yehuda Bock, Steven Chiswell, Steven Businger, Christian Rocken, Frederick Solheim, Terasa van Hove, Randolph Ware, Simon McClusky, Thomas A. Herring, Robert W. King, 1996: GPS Meteorology: Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water, Journal of Applied Meteorology, Volume 35, Issue 6, pp. 830-838.
59. JTWC Tropical Cyclone Best Track Data Site. - URL: [http://jtwccdn.appspot.com/NOOC/nmfc-ph/RSS/jtwc/best\\_tracks](http://jtwccdn.appspot.com/NOOC/nmfc-ph/RSS/jtwc/best_tracks). Дата обращения: 20.01.2013.
60. Kidder, S.Q., W.M. Garg and T.H. Vonder Harr, 1978: Estimating tropical cyclone pressure and outer winds from satellite microwave data. Mon.Wea.Rev., 106,1458 – 1464.
61. Li, J., W. Wolf, W. P. Menzel, W. Zhang, H.-L. Huang, and T. H. Achtor, 2000: Global soundings of the atmosphere from ATOVS measurements: The algorithm and validation, J. Appl. Meteorol., 39: 1248 - 1268.
62. Lee, R.S.T., and J.N.K. Liu, 2001: An elastic contour matching model for tropical cyclone pattern recognition. IEEE Trans. Syst. Man Cybernetics, 31, 413 – 417.
63. Ohring G., Lord S., Derber J. et al. Applications of satellite remote sensing in numerical weather and climate prediction // Adv. Space Res. 2002. Vol. 30. N 11. P. 2433–2439.

64. Open Geospatial Consortium. URL: <http://www.opengeospatial.org/> (Дата обращения 12.01.2014)
65. Rodgers, E. B., R. F. Adler, 1981: Tropical cyclone rainfall characteristics as determined from satellite passive microwave radiometer. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 506-521.
66. Roy W. Spencer, William D. Braswell, 2000: Atlantic Tropical Cyclone Monitoring with AMSU-A: Estimation of Maximum Sustained Wind Speeds, *Monthly Weather Review*, Volume 129, Issue 6, pp. 1518-1532.
67. Rozenkranz, P.W., and D.H. Staelin, 1976: Summary of operations: The scanning microwave spectrometer (SCAMS) experiment. *The Nimbus 6 Data Catalog*, Vol 3, NASA / Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 2 – 6 pp.
68. Santek, D., T. Whittaker, J. T. Young, and W. Hibbard, 1991: The implementation plan for McIDAS-AIX. Preprints, Seventh Int. Conf. on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, New Orleans, LA., Amer. Meteor. Soc., 177 – 179.
69. Shuanggen Jin, Z. Li, J. Cho, 2008: Integrated Water Vapor Field and Multiscale Variations over China from GPS Measurements, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Volume 47, Issue 11, pp. 3008-3015.
70. Stanley Q. Kidder, Mitchell D. Goldberg, Raymond M. Zehr, Mark DeMaria, James F. W. Purdom, Christopher S. Velden, Norman C. Grody, and Sheldon J. Kusselson. Satellite Analysis of Tropical Cyclones Using the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) // *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 81, Issue 6 (June 2000), Article pp. 1241 – 1259.
71. Stanley Q. Kidder, Mitchell D. Goldberg, Raymond M. Zehr, Mark DeMaria, James F. W. Purdom, Christopher S. Velden, Norman C. Grody, and Sheldon J. Kusselson. Satellite Analysis of Tropical Cyclones Using the Advanced

- Microwave Sounding Unit (AMSU) // Bulletin of the American Meteorological Society, Volume 81, Issue 6 (June 2000), Article pp. 1241 – 1259.
72. Tropical Cyclone Information. Analysis Archive. - URL: <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html> . Дата обращения: 30.01.2013.
  73. Tsang Long Pao, Jun Heng Yeh, Min Yen Liu et al. Locating the Typhoon Center from the IR Satellite Cloud Images // Proc. System, Man and Cybern. 2006. V. 1. P. 484 – 488.
  74. Velden, C. S., 1989: DMSP Microwave Imagery over Selected Tropical Cyclones. 43rd Interdepartmental Hurricane Conf., Homestead AFB, Miami, FL.
  75. Velden, C. S., and L. Leslie, 1991: The Relationship between Tropical Cyclone Intensity and the Depth of the Environmental Steering Layer in the Australian Region. Preprints, 19th Conf. Hurr. Trop. Meteor., Miami, FL, Amer. Meteor. Soc.
  76. Velden, C. S., and W. Smith, 1983: Monitoring Tropical Cyclone Evolution with NOAA Satellite Microwave Observations. J. Climate Appl. Meteor., 22, 714 – 724.
  77. Vernon F. Dvorak Tropical Cyclone Intensity Analysis and Forecasting from Satellite Imagery // Applications Group, National Environmental Satellite Service, NOAA, Washington, D.C., 1975.
  78. Web Feature Service. URL: <http://www.opengeospatial.org/standards/wfs> (Дата обращения: 11.01.2014).
  79. Wimmers, Anthony J., Christopher S. Velden, 2010: Objectively Determining the Rotational Center of Tropical Cyclones in Passive Microwave Satellite Imagery. J. Appl. Meteor. Climatol., 49, 2013 – 2034.
  80. Wong Ka Yan, Yip Chi Lap, Li Ping Wah et al. Automatic Template Matching Method for Tropical Cyclone Eye Fix. // 17th Int. Conf. on Pattern Recogn. (ICPR'04). 2004. V. 3. P. 650 – 653.

81. Wong, K.Y., and C.L. Yip, 2009: Identifying centers of circulating and spiral vector field patterns and its applications. *Pattern Recognit.*, 42, 1371 – 1387.
82. Wood, V.T., 1994: A technique for detecting a tropical cyclone center using a Doppler radar, *J, Atmos. Oceanic Technol.*, 11, 1207 – 1216.
83. Zhang, Q.P., L.L. Lai, and W.C. Sun, 2005: Location of tropical cyclone center with intelligent image processing technique, *ICMLC 2005. Lect. Notes artif. Intell.*, 3930, 898 – 907.