

# Автоматический расчет траектории тропических циклонов по данным геостационарного спутника MTSAT-1R

А.И. Алексанин, А.С. Еременко

*Институт Автоматики и Процессов Управления ДВО РАН*

*690041, Владивосток, Радио 5, (4232)310468*

*E-mail: [aleks@iacp.vl.ru](mailto:aleks@iacp.vl.ru)*

Создан алгоритм автоматического мониторинга тропических циклонов, состоящий из трех процедур: выделение "глаза" тропического циклона (ТЦ) по спутниковому изображению с оценкой размера последнего; расчет центра ТЦ и геометрических параметров его облачности и оценки параметров циклонической закрутки. Алгоритм выделения глаза основан на t-критерии отделимости области изображения, отличающейся от ее окружения по яркости и имеющую круговую форму. Глаз уверенно выделяется на половине изображений с ТЦ. Более надежная процедура оценки центра ТЦ основана на анализе структуры облачности, представляемой в форме карт доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК). Показано, что ДОТК имеют высокий коэффициент корреляции с направлениями ветра в верхней тропосфере ТЦ. Их использование в качестве направлений ветра позволило создать процедуру расчета центра ТЦ на основе круговой модели циркуляции. Апробация метода показала его высокую надежность (для развитого ТЦ центр рассчитывается практически всегда) и точность при сравнении с результатами расчетов Японского метеорологического агентства (JMA) и Объединенного центра предупреждения о тайфунах (JWTС, США).

Работа поддержана грантом РФФИ № 05-01-01110, г/к № 190506-007 и грантами ДВО РАН.

Ежедневный спутниковый мониторинг ТЦ проводят в Дальневосточном регионе двестраны-США и Япония. Для определения макропараметров тайфунов (положение центра, максимальный перепад давления, максимальная скорость ветра, положения радиусов с фиксированной величиной скорости ветра) используются методика Дворака и ее модификации [1-3], основанные на анализе структуры облачности спутниковых изображений. Методика не позволяет проводить расчеты в автоматическом режиме. Различные модификации методики Дворака дают различные результаты. Например, максимальные скорости ветра в тайфуне, оцениваемые Объединенным Центром Предупреждения о Тайфунах (JWTС, США) и Японским Метеорологическим Агентством (JMA), расходятся, как правило, в 1.3-1.5 раза. Типичные рассогласования оценки центра ТЦ достигают 50-100 км и более. 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 и, в первую очередь, средств автоматического обнаружения ТЦ с оценкой положения его центра, параметров формы и изменчивости этих параметров по спутниковой информации.

Для решения этой задачи авторами был создан алгоритм автоматического мониторинга ТЦ и проведена его апробация на летних изображениях тропических циклонов за три года. В работе использовались изображения с геостационарных спутников GMS-5 (все летние изображения за 3 года) и MTSAT-1R. Алгоритм состоит из трех процедур: выделение крупных массивов облачности, которые могут относиться к ТЦ; нахождение глаза ТЦ с оценкой размера глаза (если он есть); оценка центра, геометрии и параметров циклонической закрутки ТЦ по его структуре облачности в форме доминантных ориентаций термических структур (ДОТК)[4, 5].

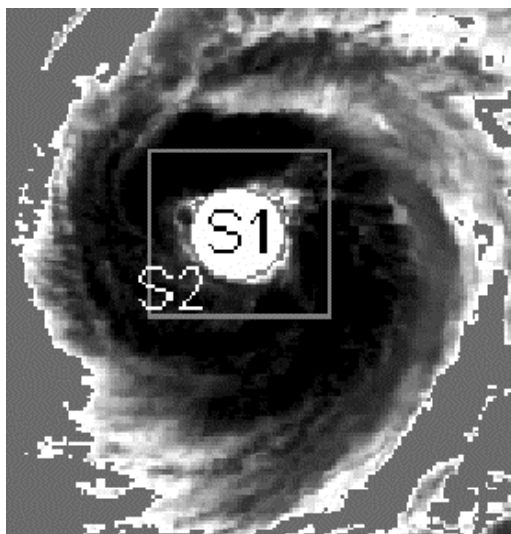
## Автоматическое выделение и расчет размера глаза ТЦ

Для выделения глаза использовался стандартный критерий (t-критерий) делимости двух участков изображения [6]:

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

где  $S1$  и  $S2$  – две выборки с объемами  $m1$  и  $m2$  пиксел,  $s_1$  и  $s_2$  – средние величины,  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$  – оценки дисперсий, полученные по выборкам  $S1$  и  $S2$ . При достижении максимальной в окрестности ТЦ величины  $u$ , превышающей заданный порог  $u_{st}$  считается, что окно  $S1$  обнаружителя расположено в области “глаза” тайфуна, а окно  $S2$  в районе низкотемпературной облачности тайфуна. Т-критерий разделимости двух областей по яркости и дисперсии был модернизирован, так как на спутниковых изображениях не наблюдается стационарности распределения яркости (непостоянства упомянутых параметров при росте размеров площадок). Случайная величина  $u$ , на основе которой рассчитывается вероятность разделимости двух областей, нормировалась на количество точек площадок. Этот алгоритм позволяет обнаружить не только центр глаза (центр ТЦ), но и его размер (рис.1).

Параметры процедуры выделения глаза, выбраны “жесткими”, что обеспечивает высокую надежность его обнаружения (более 95% правильных обнаружений). Однако глаз при этом выделяется примерно на половине изображений.



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

### **Термическая структура облачности**

Структура ТЦ хорошо проявляется на спутниковых ИК-изображениях, что 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 доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК). 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 и показал обнадеживающие результаты [4, 5].

Оценка согласованности ориентаций термических контрастов облачности тайфуна с направлениями скоростей ветра. Для получения такой оценки были проведены два сравнения доминантных структур со скоростями ветра. В первом случае сравнивались скорости ветра, полученные методом прослеживания облачных маркеров, с ориентациями термических контрастов, рассчитанных за то же время. Во втором случае сравнивались доминантные ориентации термических контрастов за 14.09.97 со скоростями ветра композиционной карты, построенной по аэрологическим данным посредством пересчета положений станций относительно центра ТЦ [7]. Процедура

такого пересчета применялась здесь и далее для устранения влияния временного рассогласования между измерениями. Данные выбирались для уровня 150 Гпа, который соответствует основной (по площади) массе облачности тайфуна, наблюдаемой в ИК-диапазоне. Высота облачности на снимках определялась на основе ее температуры.

Для первого варианта сравнения вычислялись средняя корреляция  $\rho$  и среднее рассогласование  $\phi$  между построенными скоростями и структурами и получились значения соответственно **0.84** и **0.46** рад. Сравнение структур с аэрологическими скоростями композиционного поля ветра дало следующий результат - средняя корреляция скоростей и структур и среднее рассогласование:  $\rho = 0.78$ ,  $\phi = 0.6$  рад. Наблюдающееся некоторое ухудшение результатов по сравнению с первым вариантом объясняется временным рассогласованием данных.

Высокие значения корреляции дают возможность оценивать направление 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 постоянной.

Изменчивость доминантных ориентаций. Для получения качественной картины пространственно-временной изменчивости потоков в верхней тропосфере тайфуна оценивалась средняя величина статистически значимых доминант в окрестности заданной точки за заданный временной интервал (от трех часов и более) для уровня в 150 Гпа и рассчитывалось среднее квадратичное отклонение. Строились карты изменчивости доминант в изолиниях и проводился анализ устойчивости структуры. На рис.2. приведен пример такой карты. Поскольку при случайном разбросе направлений ориентаций контрастов среднее квадратичное отклонение составляет величину около 0.8 радиан, то можно отметить высокую стабильность ориентаций в течении нескольких часов. Наибольшая неустойчивость наблюдается вблизи центра (координаты (0,0)) и к северо-востоку от него. Наблюдается также присутствие верхне-тропосферного потока на северо-западной периферии тайфуна с которым он начинает взаимодействовать, что сказывается на временной устойчивости ДОТК.

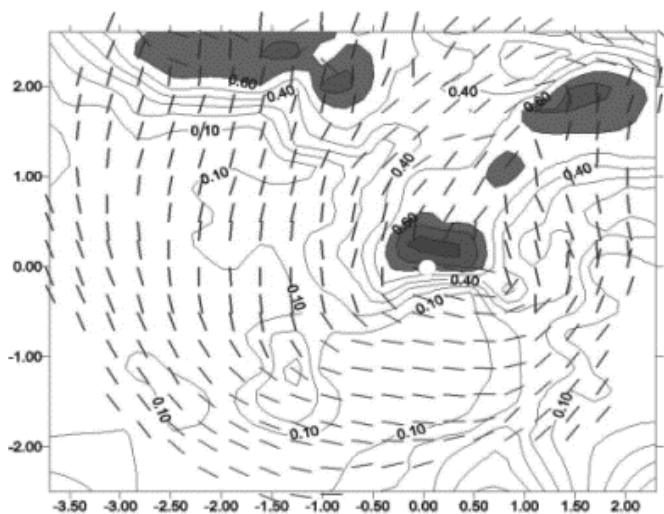


Рис. 2. ДОТК и изолинии изменчивости ориентаций контрастов в верхней тропосфере тайфуна Марти за 14.09.97 (углы в радианах, координаты в градусах относительно центра ТЦ).

Центр тайфуна отмечен кругом и располагался вблизи Японии.  
Закрашенные зоны – зоны нестабильности доминантных ориентаций

Эксперименты показали, 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 нестабильности, положения которых стационарны в течение нескольких часов. Стабильность термической структуры ТЦ можно использовать для создания автоматического алгоритма оценки его центра (когда глаз не выделяется) и параметров формы.

## Автоматическое определение центра ТЦ

Вторая процедура (рис.3) выделяет ядро облачности ТЦ, его центр и параметры циклонической закрутки. Центр ядра является оценкой центра ТЦ. Для этого используется круговая модель циркуляции [5] ветра в верхней тропосфере облачного кластера тайфуна. Вместо векторов облачного ветра используются доминантные ориентации термических контрастов. Процедура рассчитывает положение центра ТЦ и внешний радиус круговой циркуляции. Эта же процедура используется для отбраковки неверно рассчитанных положений глаза по первой процедуре.

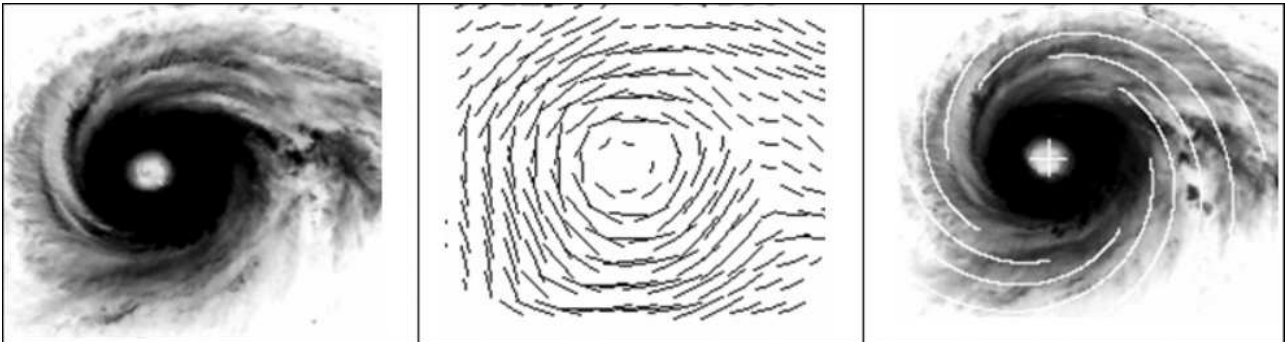


Рис.3. Инфракрасное изображение тайфуна (слева), карта доминантных ориентаций термических контрастов (в центре) и результаты обработки, нанесенные на полутонное изображение (справа) - положение центра, размер глаза, размер круговой зоны и геометрия спиральной закрутки

Процедура основана на нахождении на изображении минимальной величины критерия качества – рассогласования доминант с модельными оценками направления движения ветра:

$$\rho_c = \frac{1}{N} \sum \min(|\Theta_t - \Theta_d|, \pi - |\Theta_t - \Theta_d|), \quad (2)$$

где  $c$  – величина радиуса круга;  $N$  – количество точек;  $\Theta$  и  $\Theta_d$  – значения углов модели и ДОТК. Процедура строит график изменчивости  $\rho_c$  от радиуса ТЦ, находит точку минимума  $\rho^*$ . Считается, что тайфун есть, если  $\rho^* < 20^\circ$ . Оценка размера круговой циркуляции  $R$  – это радиус, превышающий радиус точки минимума с величиной критерия  $\rho_R = 2 \cdot \rho^*$ . Падение величины критерия, а затем его рост при росте радиуса объясняются распределением зон неустойчивости ДОТК в ТЦ.

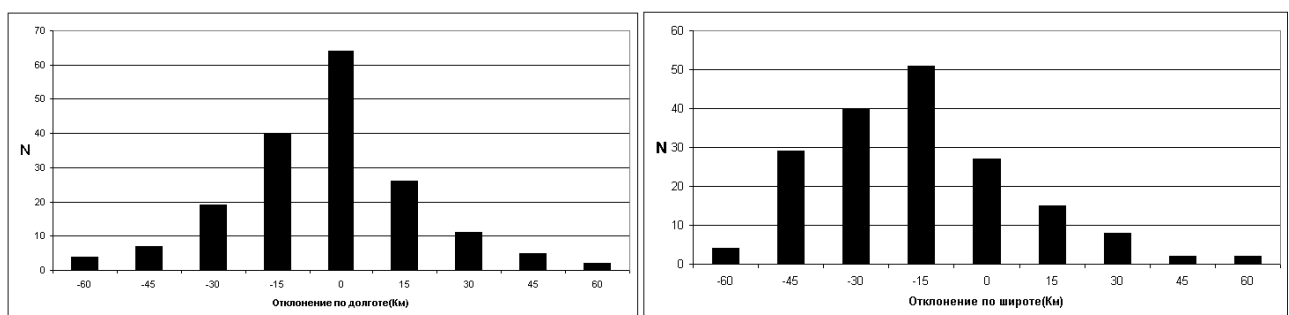


Рис.4. Гистограммы отклонения оценок центра ТЦ от центра глаза. Слева по широте, справа по долготе

Апробация метода проводилась на 200 изображениях ТЦ за 2001-2003 годы и тестировалась на оперативных данных спутника MTSAT-1R при автоматическом мониторинге тайфуна CHANCHU. Все тайфуны были найдены. Для оценки точности расчета центра процедурой предполагалось, что центром является центр глаза, который рассчитывался автоматически и контролировался визуально. При использовании второй процедуры ложных выделений не было, так как все выделенные круговые циркуляции, не относящиеся к тайфуну, были отбракованы по крите-

рию минимума размера ТЦ. Был один выброс, превысивший величину 150 км (точность расчета по ИК-изображениям около 5 км - размер пикселя). На рис. 4 приведены гистограммы отклонений. Максимальные отклонения достигали величины 60 км. Медианные оценки систематических отклонений составили по широте 17 км, по долготе 2 км. Последняя величина не превышает точность оценки. Неточность круговой модели, использование которой (с учетом систематических поправок) будит приводить к случайной ошибке со стандартным отклонением по широте и долготе 15 км, вполне удовлетворительная для первого варианта метода.

На рис. 5 приведены результаты тестирования алгоритма в оперативном режиме при мониторинге тайфуна Chanchu. Тайфун на протяжении своей жизни имел либо маленький размер глаза, либо не имел его вовсе. На левом изображении приведен редкий случай ложного выделения глаза, что отбраковывается при сравнении с более надежными результатами второй процедуры. Траектория, построенная автоматическим методом, сравнивалась с траекториями метеоагентств США и Японии (best tracks). Из-за того, что метеоагентства не перешли в начале 2006 года на обработку данных нового японского спутника MTSAT-1R, поточечное сравнение расчетов траектории 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 сопоставима с величиной рассогласований метеоагентств. Хорошее согласование траекторий на прямолинейных участках и плохое в области резкого поворота объясняется, возможно, тем, что траектории метеоагентств корректируются под модель для наилучшего прогноза положения ТЦ, и в области резкого поворота ТЦ они не соответствуют действительности (сложно ошибиться при оценке центра ТЦ вручную на пол градуса, если сравнивать его положение с траекторией JWTС). Косвенно такой вывод подтверждается тем, что при хорошем совпадении траекторий JMA и JWTС, наибольшие расхождения между ними приходятся на точку поворота.

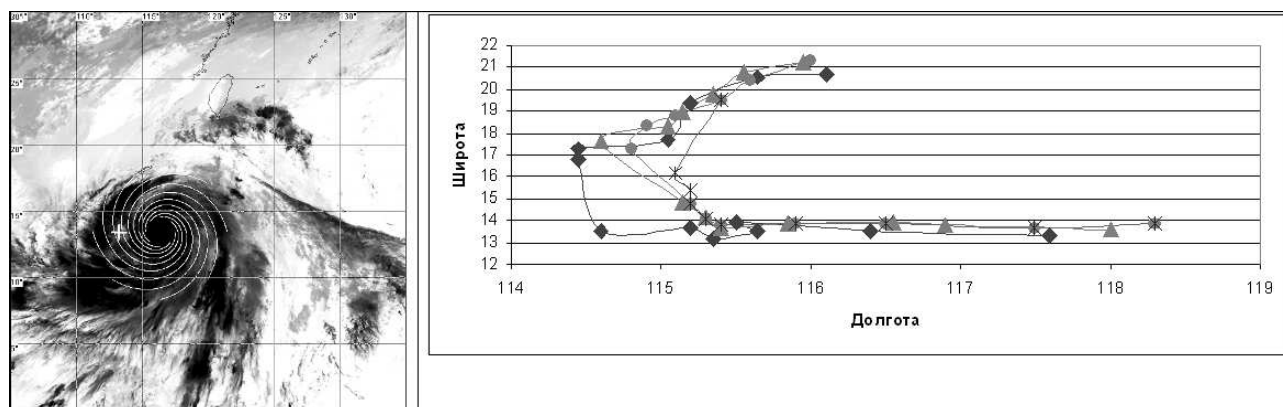


Рис.5. Слева изображение тайфуна CHANCHU (MTSAT-1R, май 2006 года) и его геометрическая модель. Справа траектории тайфуна, построенные автоматически (ромбики), вручную (треугольники), Японским метеорологическим агентством (круги) и Объединенным тайфунным центром США (крестики)

Результаты проделанной работы позволяют сделать следующие выводы.

1. Доминантные ориентации термических контрастов (ДОТК) позволяют рассчитывать характеристики структуры облачности тропических циклонов. В развитом ТЦ наблюдается временная устойчивость ДОТК, за исключением некоторых зон.

2. Автоматический алгоритм, созданный на основе анализа поля ДОТК, позволяет рассчитывать по простейшим моделям такие характеристики ТЦ, как положение центра, размер глаза, размер круговой зоны, величину спиральной закрутки.

3. Наблюдается несимметричность расположения глаза относительно центра круговой циркуляции. Глаз смещен на по широте север в среднем на 15 км.

4. Предложенная первая версия алгоритма демонстрирует надежность автоматического расчета траектории ТЦ и дает удовлетворительные результаты.

## Литература

1. *Dvorak, V.F.* Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery//*Mon. Wea. Rev.*, 1975, 103, 420-430.
2. *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.
3. *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.
4. *Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Горин И.И.* Спутниковые ИК-изображения: от термических структур к полю скоростей //Исследование Земли из космоса, N2,2001,с.7-15.
5. *Алексанин А.И., Алексанина М.Г.* Автоматическое выделение вихрей по спутниковым ИК-изображениям //Материалы Всероссийской конференции “Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса” , Москва, 11-13 ноября.,2003,М:ИКИ РАН, 2004,с.382-386.
6. *Фурман Я.А.* и др. Введение в контурный анализ / “Инвариантные к характеристикам сцены обнаружители границ изображений” , М.: Физматлит, 2002, 590с.
7. *Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Гербек Э.Э., Горин И.И.* Региональный спутниковый мониторинг Дальневосточных морей //Институт автоматизации и процессов управления: Юбилейный сборник: К тридцатилетию ИАПУ ДВО РАН, Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2001, с.203-224.