

## Автоматический расчёт параметров спиральной закрутки тропического циклона по спутниковым изображениям для оценки его динамических характеристик

А.И. Алексанин, А.С. Ерёменко

*Институт автоматизи и процессов управления ДВО РАН  
690041 Владивосток, Радио 5  
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru*

В работе была исследована возможность применения модели гиперболически-логарифмической спирали для идентификации 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. Полученные результаты показывают неоднозначность решения данной задачи из-за наличия целого семейства близких по форме спиралей. Оценивается возможность применения спирали для уточнения центра ТЦ.

**Ключевые слова:** тропический циклон, максимальная скорость ветра, облачные полосы, спутниковое изображение.

### Введение

Большое внимание исследователей направлено на получение количественных оценок структуры облачности циклонов и их связи с физическими характеристиками. Одним из применяемых подходов является использование параметров закрутки облачности, аппроксимирующей логарифмической [1], гиперболической, либо архимедовой спиралью. Так, в работе [2] исследуется вопрос о возможности применимости гиперболически-логарифмической спирали (ГЛС) для идентификации спиральной закрутки облачности тропических циклонов (ТЦ), даётся аналитическое описание линии тока ветра в ТЦ на основе ГЛС, исследуются результаты аппроксимации спиральных линий тока ветра и облачно-дождевых полос. К несомненным достоинствам подхода относится использование в качестве основных подбираемых параметров спирали величины максимальной скорости ветра в ТЦ и коэффициента трения. К сожалению, подход апробирован лишь на нескольких изображениях ТЦ. Оптимально подобранные спирали характеризовались параметрами, чьи значения были далеки от допустимых в действительности. Формы спиралей иногда были близки при значительных различиях их параметров. Проблема автоматического построения спирали при этом не рассматривалась.

Целью данной работы является апробация модели ГЛС на данных геостационарных спутников Земли для оценки физических параметров ТЦ в автоматическом режиме, оценка устойчивости получаемых решений и близость рассчитанных физических параметров к действительным значениям.

Алгоритм автоматического построения спирали основан на построении и анализе структурных карт облачности в форме доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК), рассчитываемых по ИК-изображениям. ДОТК – угол генерального направления изотерм в заданной окрестности, которые можно рассматривать как оценки направления ветра. Данный подход хорошо себя зарекомендовал при использовании ДОТК в качестве

оценок направлений течений океана [3], при выделении устойчивых структур моря [4], при автоматическом выделении вихрей воды [5; 6]. Использование этого подхода для анализа структуры облачности и оценки направлений ветра в верхней тропосфере показало обнадеживающие результаты и позволило создать алгоритм автоматического мониторинга ТЦ с расчетом их центра и размера [7].

### Используемые данные

Для проведения исследования были использованы японские архивные изображения региона с координатами ( $20^{\circ}$ – $50^{\circ}$  с.ш.;  $120^{\circ}$ – $150^{\circ}$  в.д.) в ИК-канале, получаемые с геостационарного спутника GMS-5 (летние изображения 2000 – 2002гг.). Пространственное разрешение ИК-изображений составляет около 5 км. Для всех изображений строились карты ДОТК, используемые для автоматического расчёта параметров спирали тропического циклона. Всего было использовано 117 изображений со спутника GMS-5, соответствующих шести ТЦ. На изображениях тропические циклоны проходили все стадии развития – от зарождения до затухания.

Для анализа полученных результатов использовались данные с Интернет-сайтов Японского метеорологического агентства – JMA (<http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>) и Объединённого центра предупреждения о тайфунах США – JTWC (<https://metocph.nmci.navy.mil/jtwc/best-tracks/wp-in-dex.html>) о параметрах тропических циклонов (besttracks).

### Гиперболически-логарифмическая спираль

Структура ТЦ хорошо проявляется на спутниковых ИК-изображениях. Для автоматизации расчёта макропараметров ТЦ по характеристикам спиралевидной закрутки облачных полос используются карты структуры облачности в форме ДОТК. Карта ДОТК – карта направлений, углы которых лежат в диапазоне ( $0 - \pi$ ) [8]. В данной работе для идентификации спиральной облачности ТЦ используется описание линий тока ветра в виде спиральных облачно-дождевых полос (СОДП) [2] (рис. 1):

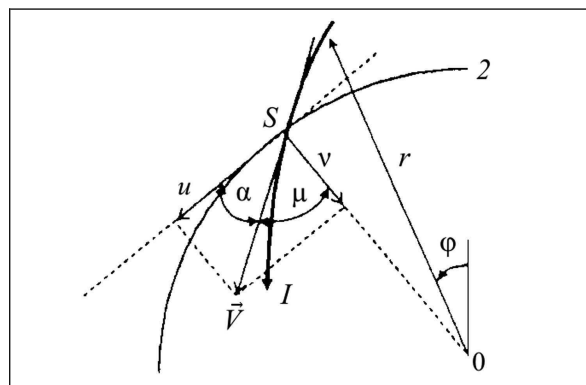


Рис. 1. Схема линии тока ветра в ТЦ:

1 – линия тока ветра; 2 – круговая изобара; O – центр ТЦ; S – произвольная точка на линии тока ветра;  
 $\vec{V}$  – скорость касательного ветра в точке S;  $\alpha$  и  $\mu$  – углы пересечения и втока соответственно;  
 $\varphi$  – полярный угол

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

где  $\varphi$  – углом между радиус-вектором и направлением на север,  $y = r/r_0$  – относительный радиус,

$$A = \left( y_{\max}^n / kr_0(n+1) \right) V_{\max},$$

$y_{\max} = r_{\max}/r_0$ ,  $r_0$  – радиус, при котором считается, что  $\varphi = 0$ ,  $V_{\max}$  – максимальная скорость ветра,

$l = 2\omega \sin \Phi$  – параметр Кориолиса,  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли;  $\Phi$  – широта места,  $a = l/k$ ,  $k$  – коэффициент трения

На рис. 2а представлен пример оптимально подобранной и автоматически нанесённой на изображение ТЦ РАВУК спирали ГЛС. На рис.2б представлена карта ДОТК, рассчитанная для данного ТЦ.

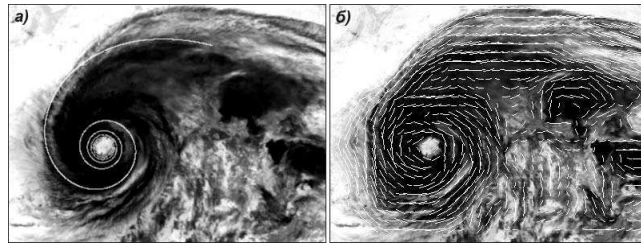


Рис. 2. а) Спираль и полутонное ИК-изображение облачности ТЦ РАВУК (19.08.2001 12:00 UTC).  
б) Карта ДОТК для ТЦ РАВУК

### Оптимальная подгонка

Для оптимальной подгонки параметров спирали использовалась следующая целевая функция:

$$f = \frac{1}{N} \sum \frac{1}{M} \sum \min(|\Theta t - \Theta d|, \pi - |\Theta t - \Theta d|),$$

где  $N$  – количество точек одной спирали,  $\Theta t$  и  $\Theta d$  – значения угла касательной к ГЛС в заданной точке и угла ДОТК,  $M$  – количество строящихся спиралей для одного изображения ТЦ.

В соответствии с пространственным разрешением снимков для вычисления значений целевой функции на каждой спирали бралось по 4096 измерений значений углов касательных, равномерно расположенных от начала спирали до её конца. Исходя из максимальных размеров ТЦ за конечное значение радиуса для спирали было взято значение в 1200км. Точки, выходящие за границу облачного кластера, не учитывались. Граница кластера определялась изотермой  $-20^\circ\text{C}$ .

Одной из первых целей работы было получение оценки устойчивости восстановления параметров спирали. При построении гиперболически-логарифмической спирали (ГЛС) [2] фиксировались следующие параметры:  $n = 0.5$ ,  $r_0 = 75\text{км}$ ,  $r_{\max} = 75\text{км}$ . Парамет-

ры  $n$  и  $r_{\max}$  брались средними для ТЦ [9]. Параметр  $r_0$  не оказывает влияние на форму спирали. Для каждого изображения ТЦ одновременно строилось по 8 спиралей (для каждого набора параметров) равномерно расположенных по окружности радиуса  $r_0$  с центром, взятым по данным японского метеорологического агентства (JMA). Оптимальные спирали выбирались по результатам полного перебора по двум параметрам:  $V_{\max}$  [10 – 1600 м/с] с шагом 10 м/с и  $k$  [0,00001 – 0,0008] с шагом 0,00001 с<sup>-1</sup>.

В результате экспериментов был получен вид целевой функции в зависимости от параметра  $V_{\max}/k$ . Функция многоэкстремальна, и, как видно из рис. 3а имеет хорошо выраженный минимум величин локальных экстремумов в области соотношений  $V_{\max}/k$ , лежащих в диапазоне 2-5  $10^6$  м. На рис. 3б детально представлены величины локальных экстремумов целевой функции.

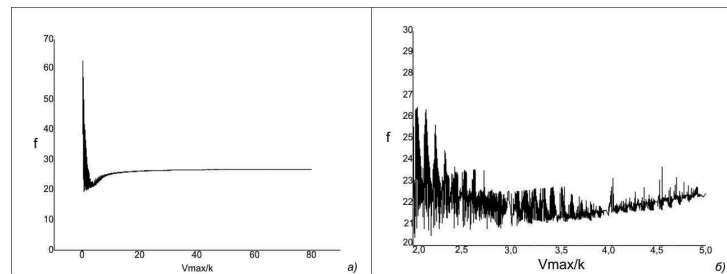


Рис. 3. а) Вид целевой функции и её локальные экстремумы в диапазоне параметров  $0 < V_{\max}/k \leq 80$   
 б) Область минимумов целевой функции

Значения минимумов локальных экстремумов целевой функции в поле параметров  $V_{\max}$  и  $k$  оказались расположены вдоль прямой почти для всех тайфунов (рис. 4)! То есть значения отношения параметров  $V_{\max}/k$  по сути является постоянным, что позволяет говорить о возможности решения задачи подбора физических параметров спирали.

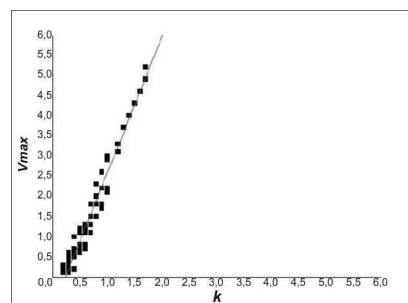


Рис. 4. Значения минимумов локальных экстремумов целевой функции в поле параметров  $V_{\max}$  и  $k$

### Оценка коэффициента трения

Целью эксперимента была оценка коэффициента трения по получившимся спутниковым оценкам  $V_{\max}$  Японского Метеорологического Агентства. По спутниковым оцен-

кам величины  $V_{\max}/k$  можно оценить величину коэффициента трения

$$k = V_{\max\_JP} / \left( V_{\max} / k \right),$$

где  $V_{\max\_JP}$  – оценки максимальных скоростей ветра в ТЦ по данным JMA.

На рис. 5 отражены полученные значения коэффициентов трения для рассматриваемых изображений ТЦ. Данные значения коэффициента трения  $k$  лежат в теоретически допустимых пределах его значений [10] с некоторым смещением в сторону низких значений. Использование значений  $V_{\max}$  Объединённого центра предупреждения о тайфунной опасности (JTWC, США), существенно улучшает величины  $k$ , так как оценки скоростей JTWC обычно выше японских.

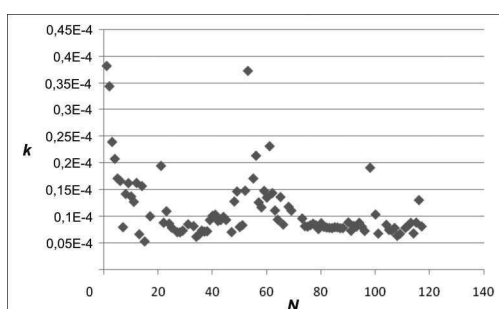


Рис. 5. Значений коэффициента приводного трения в 98 ТЦ, оцененных по спутниковым данным и максимальным скоростям ветра

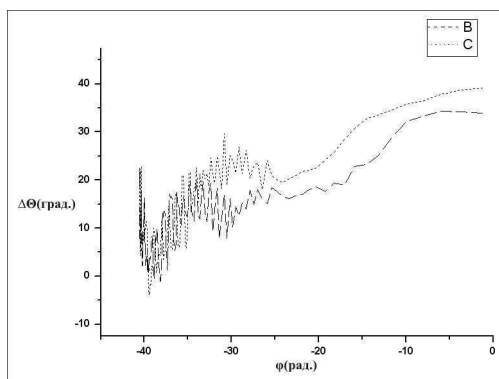


Рис. 6. Сглаженные значения средних рассогласований ДОТК и касательных к спирали в зависимости от полярного угла  $\phi$  (РАВУК, 20.08.2001 00:30 UTC). В – центр спирали взят по данным JMA; С – центр спирали смещён на 50км на северо-восток

### Использование спирали для уточнения центра ТЦ

Для выяснения возможности использования модели ГЛС для уточнения центра ТЦ был проведён анализ средних отклонений касательных к спирали и ДОТК ( $\Delta\theta$ ) в зависимости от  $\phi$  для нескольких циклонов. На рис. 6 представлено 2 типичных графика изменчивости отклонений для различных положений центра ТЦ. Наименьшие величины рассогласований даёт спираль, построенная с точно рассчитанным центром (график В, данные JMA). График (С) соответствует спирали, центр которой был смещён на 50км северо-восточнее центра JMA. Эту закономерность можно использовать для уточнения центра

ТЦ путём минимизации средних отклонений. Причины высоких средних отклонений в начале графика объяснены в [7]. Однако вдали от центра на многих ТЦ эти отклонения существенны. Наиболее вероятным объяснением этого может быть несоответствие форм спирали и циклонической закрутки тайфунов.

Работа выполнена при поддержке гос. контракта № 02.518.11.7152 и грантов ДВО РАН.

## Литература

1. 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
2. Юрчак Б.С. Представление облачно-дождевых полос в тропическом циклоне гиперболически-логарифмической спиралью // Метеорология и Гидрология. 2007. № 1. С. 15–29.
3. Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Горин И.И. Спутниковые ИК-изображения: от термических структур к полю скоростей // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 2. С. 7-15.
4. Aleksanin A.I., Aleksanina M.G. Detection of Stable Synoptical Features of Sea Surface from a Series of Infrared Satellite Images // Pattern Recogn. And Im. Analysis. 2007. V. 17. № 4. P. 480-430.
5. 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.
6. Алексанин А.И., Алексанина М.Г. Автоматическое выделение вихрей по спутниковым ИК-изображениям // Первая Всер. Откр. конф. «Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса». Москва, 11-13 ноября 2003. М.: ИКИ РАН, 2004. С. 382-386.
7. Алексанин А.И., Ерёмченко А.С. Автоматический расчёт траекторий тропических циклонов по данным геостационарных метеорологических спутников // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 22-31.
8. Алексанина М.Г. Автоматическое выделение поверхностных структур океана по инфракрасным данным спутников NOAA // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 3. С. 44–51.
9. Голицын Г.С., Писаренко В.Ф., Родкин М.В., Ярошевич М.И. Статистические характеристики параметров тропических циклонов и задача оценки риска // Известия АН. Физика атмосферы и океана, 1999. Т. 35, № 6. С. 734-741.
10. Гуральник И.И., Дубинский Г.П., Мамиконова С.В. Метеорология // Учебник для вузов. – Л., Гидрометеиздат. 1972.

## Automatic calculation of the parameters of the spiral curvatures for tropical cyclone and estimation cyclone dynamic characteristics on satellite imagery

A.I. Alexanin, A.S. Eremenko

*Institute for Automation and Control Processes, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Science  
690041 Vladivostok, 5 Radio str.  
E-mail: alexs@iacp.dvo.ru*

The possibility of application of the of hyperbolic-logarithmic spiral model for approximation of the wind-cloudy curves of a tropical cyclones (TC) on IR-images from geostationary satellites was researched. There were used the cloud structural charts of TCs in the form of dominant orientation of thermal contrast (DOTC) for automated calculation of the spiral parameters. Two of those parameters are maximum wind speed and coefficient of air friction. The results demonstrate the ambiguity of the task decision. The spiral use for TC center correction is considered.

**Keywords:** tropical cyclone, maximum wind speed, wind-cloudy curves, satellite image.