

# СТИХИЙНЫЕ БЕДСТВИЯ И КАТАСТРОФЫ

УДК 504.4 / 8 : 351.78 : 614.8

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА

Канд. физ.-мат. наук **В.Ю. Солдатов**<sup>1</sup>, канд. техн. наук **И.И. Потапов**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

<sup>2</sup> Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва  
(ipotapov37@mail.ru)

## SIMULATION MODEL OF THE PROCESSES IN TROPICAL CYCLONE BEGINNING ZONE

**V.Yu. Soldatov, I.I. Potapov**

*Ключевые слова: циклон, корреляция, изменение климата, модель*

*Keywords: cyclone, correlation, climate change, model.*

*Обсуждены прямые и обратные зависимости момента зарождения и мощности тропического циклона от факторов окружающей среды. Приведены некоторые оценки статистических характеристик тропического циклогенеза. Представлена простая модель тропического циклона. Отмечена взаимосвязь между циклонической активностью и изменениями климата.*

*Direct and indirect correlations between the moment and strength of tropical cyclone beginning and environmental factors are discussed. It is represented some assessments of statistic characteristics for tropical cyclogenesis. Simple model of tropical cyclone is given. The interdependence between cyclonic activity and climate change is marked.*

### **Введение**

Тот факт, что в зоне зарождения тропического циклона наблюдается изменение геофизических, экологических и синоптических процессов говорит о том, что для поиска информативных индикаторов этих изменений необходимо указанные процессы рассматривать совместно. Также многие авторы отмечают наличие корреляции между показателями изменения климата и частотой и мощностью тропических циклонов. Например, Knutson и др. [9] ставят и обсуждают вопрос о том, изменятся ли характеристики тропических циклонов с изменением климата, и какой характер будут иметь эти изменения. В частности, отмечается, что анализ исторических данных о параметрах имевших место тропических циклонов не позволяет сделать однозначного вывода о наличии корреляции между климатическим трендом и параметрами тропических циклонов. Тем не менее, современные

климатические модели высокого разрешения указывают на существование глобально усредненного повышения к 2100 г. интенсивности тропических циклонов на 2-11% при сокращении их частоты на 6-34%, но при возрастании частоты мощных циклонов и увеличении скорости осадков на 20% внутри 100-км зоны от центра циклона. Также отмечается большой разброс в результатах моделирования взаимозависимости между климатическими трендами и параметрами тропических циклонов по различным акваториям Мирового океана [1-5, 11].

В работах [1-5, 11] отмечена термодинамическая целостность атмосферы Земли, что проявляется в закономерностях глобального энергетического переноса и волновых процессов на планетарном масштабе. Как результат процесс формирования тропических циклонов служит механизмом сброса избыточного тепла в атмосфере, тем самым предотвращая чрезмерный перегрев атмосферы и поверхностного слоя океана в тропической зоне. По-видимому, здесь существует прямая зависимость между парниковым эффектом и интенсивностью тропических циклонов. Также наличие тропического циклона оказывает воздействие на состояние ионосферы, и, следовательно, изменяет роль приходящей солнечной радиации.

Установлено, что количество и мощность тропических циклонов в конкретном регионе зависят от изменений климата в этом регионе [10].

Особое место по числу проходящих циклонов занимает регион вдоль мексиканского побережья. Имеются случаи зарождения тропических циклонов севернее широты 30°N, что объясняется влиянием холодного Калифорнийского течения. Здесь прослеживается четкая зависимость характеристик циклонов от наличия или отсутствия явления Эль-Ниньо (табл. 1 и 2). Замечено, что тропических циклонов со временем жизни более 12 суток в годы Эль-Ниньо зарождается больше, чем во время его отсутствия.

*Таблица 1*

**Статистика циклонической активности за 1966-2004 гг.  
в северо-восточном секторе Тихого океана.  
В скобках указаны средние числа штормов за год [10].**

Климатические условия	Число тропических циклонов	Категория ураганов					Общее количество ураганов
		1	2	3	4	5	
Годы Эль-Ниньо	98 (6,53)	45 (3,0)	19 (1,3)	27 (1,8)	37 (2,5)	5 (0,33)	231
Годы без Эль-Ниньо	182 (7,9)	88 (3,8)	40 (1,7)	33 (1,4)	41 (1,8)	4 (0,17)	388 (16,9)
Общее количество тропических циклонов	280 (7,4)	133 (3,5)	59 (1,3)	60 (1,6)	78 (2,0)	9 (0,23)	618 (16,3)

**Статистика продолжительности тропических циклонов  
за период 1966-2004 гг. в северо-восточном секторе Тихого океана.  
В скобках указано среднее число событий в каждой категории.**

Климатические условия	Продолжительность жизни ТЦ, сут.					Всего ТЦ
	1-3	4-6	7-9	10-12	Более 12	
Годы Эль-Ниньо	53 (3,5)	92 (6,1)	59 (3,9)	31 (2,1)	14 (0,9)	248 (16,5)
Годы без Эль-Ниньо	85 (3,7)	143 (6,1)	96 (3,9)	40 (2,1)	7 (0,9)	371 (16,13)
Всего ТЦ	138 (3,6)	234 (6,2)	155 (4,1)	71 (1,9)	21 (0,6)	619 (16,3)

В работе [6] изложены ситуации зарождения циклонов над Черным морем. Рассмотрены их особенности и отмечено, что в широтах севернее 30° с.ш. из-за возмущений атмосферы над Северной Атлантикой могут создаваться благоприятные условия для формирования циклона. Перенос холодного воздуха над теплым морем продуцирует интенсивные тепловые потоки от морской поверхности, что создает условия для начала зарождения циклона с характерными классическими признаками: глаз, спиральные облачные полосы, теплое ядро и типичная баротропная структура. Примеры таких циклонов имеются над Средиземным морем. Такие циклоны имеют небольшие размеры с временем жизни до суток. В частности, отмечены ситуации зарождения циклонов над Атлантическим и Тихим океанами в широтном поясе 50-70° в обоих полушариях. Efimov и др. [6] приводят пример зарождения интенсивного мезомасштабного циклона над юго-западным сектором Черного моря 25 сентября 2005 г., который мог быть отнесен по его характеристикам к квази-тропическим циклонам. У него облачная спираль имела 300 м в диаметре, скорость ветра составляла 20-25 м/с, и температура на верхнем ярусе облаков была 223-240К.

### Простая модель тропического циклона

Одной из известных простых аналитических моделей для оценки параметров ТЦ в режиме его эволюции при условии наличия данных о характеристиках окружающей среды на пути его перемещения является следующая модель [7,8]. Ясно, что интенсивность ТЦ является функцией тепловых потоков между поверхностью океана и атмосферой, определяющихся ТПО. Более того, максимальная азимутальная скорость ветра в циклоне напрямую зависит от величины отношения коэффициента обмена теплом и влагой ( $C_k$ ) и коэффициента лобового сопротивления ( $C_D$ ).

Важной характеристикой энергетического обмена в системе океан-атмосфера (СОА) является коэффициент теплосодержания на единицу массы воздуха (энталпия):

$$k = [c_{pd}(1-q) + c_l q] T + L_v q \quad (1)$$

где  $c_{pd}$  и  $c_l$  – теплоемкость сухого воздуха и жидкой воды при постоянном давлении соответственно;  $T$  – абсолютная температура,  $q$  – удельная влажность,  $L_v$  – скрытая теплота парообразования.

Поток энтальпии с поверхности океана описывается соотношением:

$$F_k = \rho_a |V_a| \{C_T [c_{pd}(1-q_a) + c_l q_a] (T_s - T_a) + C_q (L_v + C_l T_a) (q_s - q_a)\} \quad (2)$$

где  $\rho_a$  – плотность сухого воздуха над морской поверхностью,  $|V_a|$  – скорость ветра на некотором предопределенном уровне,  $T_s$  и  $T_a$  – температура морской поверхности и воздуха соответственно,  $q_s$  и  $q_a$  – удельные влажности насыщения при ТПО и давлении ирреальном влагосодержании воздуха соответственно,  $C_T$  и  $C_q$  – коэффициенты переноса тепла и воды соответственно.

В случае  $C_T = C_q$  получаем:

$$F_k = \rho_a |V_a| C_k (k_s - k_a) \quad (3)$$

где  $k_s$  – энтальпия насыщения на уровне океана,  $k_a$  – энтальпия воздуха,  $C_k$  – постоянная передачи энтальпии.

Уравнение движения ТЦ запишем в координатах потенциального радиуса  $R$ :

$$R^2 - r^2 - 2rV \quad (4)$$

где  $r$  – физический радиус,  $V$  – скорость азимутального ветра.

В результате имеем безразмерное уравнение для переменной энтропии подоблачного слоя  $X$ :

$$(2/R^3) \partial X \partial R + r^2 = 0 \quad (5)$$

Для отклонения  $P$  поверхностного давления от давления в окружающей среде справедливо соотношение:

$$P = 0.25(r_0)^2 - X - 0.125 (R^4/r^2 + r^2) \quad (6)$$

где  $r_0$  – внешний радиус до поверхности с нулевой скоростью ветра.

Обозначим через  $T_s$  температуру поверхности океана и через  $T_0$  температуру вытекания. Тогда имеем:

$$X_s = 1 - AP \quad (7)$$

где

$$A = (T_s - T_0)/T_s + X_s [R_d T_s (1 - H)] \quad (8)$$

где  $X_s$  – дефицит энтальпии окружающего пространства в подоблачном слое над океаном,  $R_d$  – газовая постоянная сухого воздуха,  $H$  – относительная влажность окружающего пространства.

По-видимому, можно предположить, что во внутренней зоне ТЦ, включающей глаз и стену глаза, энтропия радиальной адвекции уравновешивает поверхностные потоки. Поэтому безразмерное уравнение энтропии устойчивости во внутренней зоне можно записать в следующем виде:

$$\Psi_0 \partial X \partial r^2 + C_k (1 + c |V|) |V| (X_s - X) = 0 \quad (9)$$

где  $\Psi_0$  – функция истечения на вершине подоблачного слоя,  $c$  – коэффициент, определяющий зависимость скорости ветра от коэффициентов поверхностного обмена.

Баланс углового момента в подоблачном слое описывается соотношением:

$$\Psi_0 \partial R^2 / \partial r^2 - r(1 + c |V|) |V| rV = 0 \quad (10)$$

Соотношение (10) констатирует, что радиальная адвекция уравновешивает потери на вязкость в угловом моменте. Исключая  $\Psi_0$  из (1.19) и (1.20), находим:

$$0.5R^{-1}(R^2-r^2)\partial X\partial R+C_k(X_s-X)/C_D=0 \quad (11)$$

При условии  $r^2 \ll R^2$  из (5) и (11) получаем:

$$0.25R^4/r^2-C_k(X_s-X)/C_D \approx 0 \quad (12)$$

Окончательно из (4) и (12) имеем оценку для скорости ветра:

$$V \approx \sqrt{C_k(X_s-X)/C_D} \quad (13)$$

Таким образом, во внутренней зоне квадрат азимутальной скорости пропорционален степени локальной термодинамической неустойчивости между подобным слоем и поверхностью океана. Далее, исключение  $X_s$  из (13) с учетом соотношений (6) и (7) дает:

$$V^2(1-0.5C_k/C_D)-C_k[1-0.25A(r_0)^2-X(1-A)]/C_D \approx 0 \quad (14)$$

Теперь используем зависимость:

$$X=H(X_s-1) \quad (15)$$

Подставляя (6) и (7) в (14), получаем соотношение для расчета максимальной азимутальной скорости:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{C_k}{C_D} \left( \frac{1-0.25\gamma r_0^2}{1-0.5\gamma C_k/C_D} \right)} \quad (16)$$

где  $\gamma \equiv A(1-H)/(1-HA)$ .

Из (5) и (9) при  $r^2 \ll R^2$  получаем:  $\partial X/\partial R-2V^2/R \approx 0$ . Исключение  $\partial X/\partial R$  из (1.24) дает:

$$V=V_{\max}(R/R_{\max})^\nu \quad (17)$$

где  $R_{\max}$  – потенциальный радиус максимального ветра,

$$\nu=(C_k/C_D)(1-A)/(1-0.5AC_k/C_D) \quad (18)$$

Таким образом, радиальное распределение ветра и давления во внутренней зоне ТЦ зависит от отношения  $C_k/C_D$  по мере того как достигается максимальная скорость ветра. При этом из (6) и (7) для  $R=r=0$  и  $X_s=X$  получаем:

$$P_c = -(1-0.25r_0^2)(1-A)^{-1} \quad (19)$$

Во внешней зоне из (5)-(7) и (15) при предположении, что относительная влажность  $X$  постоянна, находим:

$$R^4(2-XA) = 2r_0^4(r/r_0)^{2XA} - XAr^4 \quad (20)$$

Из (20) и (4) получаем выражение для скорости ветра как функцию радиуса:

$$V \approx 0.5R^2/r$$

Окончательно из (20) имеем:

$$r_0^{4-2XA} = 4r_{\max}^{2(1-XA)} V_{\max}^2 (1-0.5XA) \quad (21)$$

Из (6), (7) и (15) при  $V_{\max} \approx 0.5 R^2/r$  получаем:

$$P_{\max} \approx 0.5 \left( 0.5r_0^2 - V_{\max}^2 \right) / (1-XA) \quad (22)$$

Внутри глаза ТЦ будет выполняться соотношение  $V=V_{\max}R/R_{\max}$ . Для ТЦ справедливо дифференциальное уравнение:

$$\frac{d(P + 0.5V^2)}{dR} = 2 \frac{V^2}{R}$$

Интегрирование этого уравнения по  $R$  до  $R_{\max}$  дает:

$$P_c \approx P_{\max} - 0.5V_{\max}^2$$

откуда с учетом (22) получаем зависимость минимального давления во внешней зоне от соотношения  $C_K/C_D \leq 2$  (наиболее значимые оценки лежат в диапазоне от 1.2 до 1.5):

$$P_c \approx \frac{V_{\max}^2 (1-0.5XA) - 0.25r_0^2}{1-XA}$$

### Литература

1. *Ванина-Дарт Л.Б., Шарков Е.А.* Влияние тропических циклонов на ионосферу и атмосферу в целом как один из наиболее важных составляющих климатических процессов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. научных статей. Вып. 6. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2009.- С. 269-273.

2. *Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А.* Исследование взаимодействия нижней экваториальной ионосферы с тропическими циклонами по данным дистанционного и ракетного зондирования // Исследование Земли из космоса. - 2007.- № 2.- С. 19-27.

3. *Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А.* Отклик экваториальной нижней ионосферы на тропические катастрофы в годы различной солнечной активности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. научных статей. Вып. 4. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2007.- С. 46-55.

4. *Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А.* Реакция нижней экваториальной ионосферы на сильные тропосферные возмущения // Геомагнетизм и аэрономия.- 2008.- Т. 48. № 2.- С. 255-260.

5. *Шарков Е.А., Покровская И.В.* Особенности региональных тропических циклогенезов в поле поверхностной температуры Мирового океана по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физ. основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. научных статей. Вып. 6. Т. 2. М.: Азбука-2000, 2009. - С. 259-268.

6. *Efimov V.V., Stanichnyi S. V., Shokurov M. V., Yarovaya D. A.* Observations of a quasi-tropical cyclone over the Black Sea // Russian Meteorology and Hydrology, - 2008.- Vol. 33, No.4. – P. 233–239.

7. *Emanuel K.* Tropical Cyclones. Annu. Rev. Earth Planet. Sci.- 2003.- V.31.- P.75–104.

8. *Klug J.L., Richardson D.C., Ewing H.A., Hargreaves B.R., Samal N.R., Vachon D., Pierson D.C., Lindsey A.M., O'Donnell D.M., Effler S.W., and Kathleen C., Weathers K.C.* Ecosystem Effects of a Tropical Cyclone on a Network of Lakes in Northeastern North America. // Environ. Sci. Technol. – 2012.- V.46.- P. 11693–11701.

9. *Knutson T.R., Mcbride J., Chan J.C.L., Emanuel K.E.* Tropical Cyclones and Climate Change. // Nature Geoscience.- V. 3, No.3, DOI: 10.1038/ngeo 779.

10. *Romero-Vadillo E., Zaytsev O., and Morales-Perez R.* Tropical cyclone statistics in the northeastern Pacific // Atmosfera.- 2007.- V. 20.- P. 197–213.

11. *Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Springer/PRAXIS, Berlin.- 2003. - 613 p.