

## Математическое моделирование тропических циклонов (торнадо)

Тропические циклоны относятся к погодным системам синоптического масштаба с циклоническим вращением воздуха на нижних уровнях атмосферы. Тропические циклоны возникают и развиваются в тропических широтах над океаном и обычно четко выделяются как отдельные перемещающиеся образования в полях облачности, ветра, приземного давления, температуры и влажности воздуха, осадков. Подчеркивая их существенные отличия от циклонов средних широт, часто указывают на их нефронтальное происхождение и зарождение только над океанами, близкую к концентрической форму и относительно малые размеры. Во всем диапазоне интенсивности - от бесформенных облачных скоплений с ветром менее 10 м/с до супер-тайфунов с ветром более 60 м/с - тропические циклоны постоянно наблюдаются в тропиках, а отдельные, проходя тысячи километров, поднимаются до широт 50-60° с.ш., возмущая циркуляцию атмосферы средних широт. Они являются неотъемлемым элементом картины общей циркуляции атмосферы, определяя в значительной мере взаимодействие атмосферы с океаном и гидрологические характеристики верхних его слоев в районах их перемещения, меридиональный перенос тепла и пара в атмосфере. Области зарождения и эволюции тропических циклонов ограничены примерно параллелями 35 с.ш. и 25 ю.ш., что составляет более 50% площади Мирового океана. Это обуславливает важность научных аспектов исследований самих тропических циклонов и взаимодействия их с океаном. Значительный материальный ущерб, наносимый при выходе интенсивных тропических циклонов на побережье, большое влияние их на хозяйственную деятельность в морях и океанах делают исследования тропических циклонов актуальными с практической точки зрения. При этом обычно целью исследований является решение задач прогноза интенсивности и перемещения ураганов и тайфунов, а также вызванных ими возмущений уровня моря, состояния поверхности, гидрологической структуры верхних слоев океана. Случай тропического циклогенеза на широте 30° ю.ш., зарегистрированный в южной Атлантике, указывает на возможные изменения в географии районов зарождения ТЦ.

Большой научный интерес тропическим циклонам представляют для геофизической гидродинамики, в которой одним из основных объектов исследования являются вихревые образования в атмосфере и океане, процессы и механизмы их возникновения и эволюции. При этом многие черты тропических циклонов, а так же основные физические механизмы, определяющие их структуру и эволюцию, можно найти и в других барических системах атмосферы и в океанских вихрях. Так, по структуре подобными тропические циклоны являются субтропические и зимние циклоны над океаном, полярные мезоциклоны, развивающиеся также над океаном. Кроме этого, в локализованных областях глубокой конвекции в океанах и морях развиваются вихревые структуры, напоминающие тропические циклоны. Известные в геофизической гидродинамике разнообразные эффекты вращения могут проявляться в тропических циклонов в более широком диапазоне характерных чисел подобия, чем это обычно принято в приближениях динамики атмосферы и океана.

Исследования тропических циклонов в настоящее время проводятся по многим направлениям: климатология, зарождение и развитие, структура и энергетика, перемещение и взаимодействие с океаном, численное моделирование эволюции и перемещения тропических циклонов. Задачи, решаемые при этом, тесно связаны с проблемами физики атмосферы и океана, метеорологии и океанологии, динамики системы океан-атмосфера и климата, проблемами интерпретации данных дистанционных методов зондирования атмосферы и океана, которые в последние десятилетия становятся основными в наблюдении и оценке характеристик тропических циклонов. Ниже приведена математическая модель тропических циклонов

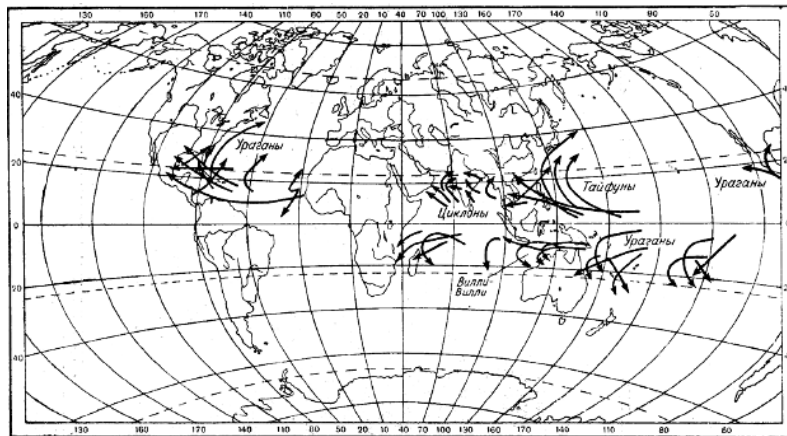


Рис. 4.3 Разные примеры тропических циклонов (торнадо).

$$1) \quad \frac{\partial P_n u}{\partial t} + \frac{\partial u P_n u}{\partial x} + \frac{\partial v P_n u}{\partial y} + \frac{\partial P_n \dot{\sigma} u}{\partial \sigma} = f P_n v - P_n \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} (P_n \Gamma D_T) + \frac{\partial}{\partial y} (P_n \Gamma D_S) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (k \frac{\partial u}{\partial \sigma})$$

$$2) \quad \frac{\partial P_n v}{\partial t} + \frac{\partial u P_n v}{\partial x} + \frac{\partial v P_n v}{\partial y} + \frac{\partial P_n \dot{\sigma} v}{\partial \sigma} = f P_n u - P_n \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} (P_n \Gamma D_S) + \frac{\partial}{\partial y} (P_n \Gamma D_T) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (k \frac{\partial v}{\partial \sigma})$$

$$3) \quad \frac{\partial P_n}{\partial t} = - \int_0^1 \left\{ u \frac{\partial P_n u}{\partial x} + v \frac{\partial P_n v}{\partial y} \right\} d\sigma$$

$$4) \quad \dot{\sigma} = \frac{1}{P_n} \left[ -\sigma \frac{\partial P_n}{\partial t} - \int_0^{\sigma} \left\{ u \frac{\partial P_n u}{\partial x} + v \frac{\partial P_n v}{\partial y} \right\} d\sigma \right]$$

$$5) \quad w = -P_n \sigma \left[ -\frac{\dot{\sigma}}{\sigma} + \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right]$$

$$6) \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -RT$$

$$7) \quad \frac{\partial P_n T}{\partial t} + \frac{\partial u P_n T}{\partial x} + \frac{\partial v P_n T}{\partial y} + \frac{\partial P_n \dot{\sigma} T}{\partial \sigma} = \frac{RT_w}{c_p \sigma} + Q + \\ + \frac{\partial}{\partial x} (P_n \Gamma \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (P_n \Gamma \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (k \frac{\partial T}{\partial \sigma})$$

$$8) \quad \frac{\partial P_n q}{\partial t} + \frac{\partial u P_n q}{\partial x} + \frac{\partial v P_n q}{\partial y} + \frac{\partial P_n \dot{\sigma} q}{\partial \sigma} = C + \\ + \frac{\partial}{\partial x} (P_n \Gamma \frac{\partial q}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (P_n \Gamma \frac{\partial q}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (k \frac{\partial q}{\partial \sigma})$$

где

$$D_S = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad D_T = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad \Gamma = l^2 |D| \quad D = \sqrt{D_S^2 + D_T^2}$$

Для данной системы ставим аналогичные начальные и граничные условия как в главе 4.3.

Первые два уравнения аналогичны главам 4.2 и 4.3. Третье уравнение - давление на поверхности земли. Четвертое - изменение вертикальной скорости. Пятое уравнение описывает локальные изменения скорости. Шестое - изменения геопотенциального давления. Седьмое описывает температуры окружающей среды, а восьмое - изменения влажности.

Здесь  $u$ ,  $v$  и  $w$  компоненты скорости,  $k$  - коэффициенты диффузии,  $\sigma$  - высота,  $T$  - температура,  $q$  - влажность,  $\pi$  - давление на высоте,  $Q$  - температурный баланс,  $P_n$  - давление на

земле,  $\frac{\partial}{\partial \sigma} (k_3 \frac{\partial}{\partial \sigma})$  - движение по вертикали,  $f$  - сила Кориолиса,  $\Phi$  - геопотенциальное изменения,  $R$  - универсальная газовая постоянная,  $g$  - ускорение свободного падения.

**Численный алгоритм для системы уравнений:**

- 1) Решаем уравнение (3) с помощью матричной прогонки.
- 2)  $P_n$  подставляем в (4) уравнение и находим  $\dot{\sigma}$ .
- 3) Подставляя найденные переменные в уравнение (5), решаем конечно разностным методом.
- 4) Найденные значения  $P_n$  подставляем в уравнения (1) и (2) и так же решаем с помощью метода дробных шагов.
- 5) Найденные  $u$  и  $v$  подставляем в уравнения (7) и находим  $w$ .
- 6) Объединяя все известные значения в (8) уравнение, решаем с помощью метода матричной прогонки.