

## ТРОПИЧЕСКИЕ ЦИКЛОНЫ (ТАЙФУНЫ)

*В статье рассмотрен механизм действия силы Кориолиса на образование и траектории тропических циклонов (тайфунов).*

Ключевые слова: *тропический циклон (тайфун), Кориолиса сила, глаз тайфуна, закон Бэра, эффект Россби, барический градиент.*

А. Sozranov

## TROPICAL CYCLONES (TYPHOONS)

*The article views the effect of Coriolis force under formation and trajectories of tropical cyclones (typhoons).*

Keywords: *tropical cyclone (typhoon), Coriolis force, eyewall, Beer's law, Rossby effect, baric gradient.*

### Анализ экономического ущерба от природных явлений России

Суммарный среднегодовалый экономический ущерб России от всех природных опасностей достигает в настоящее время 20 – 26 млрд долл. в год, или 6 – 7 % валового внутреннего продукта России. В этот ущерб входит и ущерб, наносимый тропическими циклонами (ТЦ) или тайфунами. Ущерб от единичного тайфуна на РДВ достигает до 600 млн долл., что ограничивает социально-экономическое развитие Дальнего Востока.

Ежегодный выход тайфунов на российский Дальний Восток (РДВ) варьирует от 0 до 5 в год, а в 1961 и 1962 годах вышло по 8 тайфунов. На Китай выходит до 10, на Вьетнам до 8, на Филиппины до 20 тайфунов в год. С 1970 по 1999 год на планете образовался 2441 тропический циклон, в среднем 82,4 в год, от тайфунов ежегодно страдают до 50 стран.

В Атлантическом океане ТЦ возникают только в северном полушарии, а в Индийском и Тихом океанах – в обоих полушариях. Наибольшее число ТЦ возникает летом и в начале осени: в северном полушарии – в июне – ноябре, с резко выраженным максимумом повторяемости в августе или в сентябре, в южном полушарии – с ноября по апрель с максимумом в январе или феврале. В северной части Тихого океана ТЦ встречаются от берегов центральной Америки до Азиатского континента.

Дальний Восток является единственным в Российской Федерации регионом, подверженным воздействиям тайфунов. На РДВ (Приморский и часть Хабаровского края, остров Сахалин, Курильские острова и полуостров Камчатка) тайфуны выходят из западной части Тихого океана, на остальной территории России тайфуны не появляются. Они возникают над океаном к северо-востоку от Филиппинских островов или к востоку от них, в районе Каролинских и Марианских островов.

### Зарождение тропических циклонов

Тропические циклоны возникают при неустойчивости атмосферы, наличии зоны низкого давления, окружённой воздушными массами с нормальным или повышенным давлением.

Такая ситуация возникает при нагревании воды в океане до 27 – 28 °С, на значительной территории, что понижает его плотность и, соответственно, атмосферное давление. Насыщение воз-

духа влагой хоть и незначительно, но тоже понижает плотность воздушной смеси. Возникающие локальные воздушные потоки, ориентируясь в направлении постоянных атмосферных потоков и под воздействием сил Кориолиса, начинают закручиваться в спираль. Чередующиеся участки холодного и тёплого воздуха, разделённые фронтами, по этой спирали начинают втягиваться в образовавшуюся зону пониженного давления. Тёплый влажный воздух при этом поднимается вверх, преодолевает точку росы, выделяет теплоту конденсации и продолжает двигаться вверх, отклоняясь и расходясь по сторонам.

Начавшийся процесс конденсации вызывает резкое локальное понижение давления. В нижнем слое тайфуна воздух устремляется к центру, при этом ветер усиливается и достигает максимальных значений (до 100 м/с и более).

В зоне максимальных ветров устанавливается приблизительное равновесие между силой барического градиента, направленного к центру тайфуна, и силами противоположной направленности: центробежной и Кориолиса (так называемый градиентный баланс). Внутри и вблизи зоны максимальных ветров формируется «глаз бури» с окружающей его «стенной» облачностью. Глаз тайфуна образуется тогда, когда давление в центре на уровне моря падает ниже 985 гПа. Динамика глаза, причины и механизм его формирования до сих пор не совсем ясны. В центральных областях тайфунов градиент давления составляет до 60 гПа на 100 км, а иногда до 20 гПа на 20 км.

Тропические циклоны, периодически возникающие в тропической зоне Земли, обладают колоссальной энергией. Ураганные ветры разрушают города, вызывают наводнения и гибель людей. Все попытки подавить тропический циклон или хотя бы уменьшить его мощь пока заканчивались неудачей. Кинетическая энергия среднего по размерам тропического циклона сравнима с энергией взрыва нескольких сотен водородных бомб. Подсчитано, что кинетическая энергия одного тайфуна примерно равна  $10^{18}$  Дж, а полная энергия: кинетическая плюс потенциальная – на полтора два порядка больше.

Расчёты, выполненные различными авторами, указывают на то, что в среднем один ТЦ за сутки выделяет энергию около  $5 \cdot 10^{19}$  Дж, а за время своего существования – до  $10^{21}$  Дж.

Энергия ядерного взрыва одной атомной бомбы, что были сброшены на города Хиросиму и Нагасаки, эквивалентен по количеству выделявшейся энергии 20 000 тонн тринитротолуола (тротила).

Так как 1 кг тротила при взрыве выделяет энергию  $4,19 \cdot 10^6$  Дж, то выделенная энергия одной такой бомбой в тротиловом эквиваленте составит:

$$\mathcal{E} = 20 \cdot 10^6 \cdot 4,19 \cdot 10^6 \approx 10^{14} \text{ Дж.}$$

Следовательно, один тайфун за сутки выделяет энергию, эквивалентную одновременному взрыву полумиллиона атомных бомб, что следует из:

$$K = 5 \cdot 10^{19} \text{ Дж} : 10^{14} \text{ Дж} = 500\,000 \text{ атомных бомб.}$$

Чаще всего тайфуны образуются в тропической и экваториальной зонах, между  $22^\circ$  ю. ш. и  $30^\circ$  с. ш., за исключением узкой экваториальной полосы от  $4^\circ$  с. ш. до  $4^\circ$  ю. ш. В этой зоне, около экватора, из-за недостаточной величины отклоняющей силы вращения Земли (**сила Кориолиса**) тропические циклоны образуются исключительно редко.

Когда тело движется во вращающейся системе координат, например, по поверхности земного шара, то приходится учитывать силу, возникающую за счёт вращения системы. Для учёта её влияния вводится сила инерции, именуемая силой Кориолиса, по имени французского физика Г.Г. Кориолиса, который исследовал явление и ввёл само понятие.

На вращающейся Земле силу барического градиента стремится уравновесить сила Кориолиса, и под действием этих сил около области пониженного давления возникает криволинейное дви-

жение воздуха по концентрическим траекториям, направленное в северном полушарии против часовой стрелки, южном – по часовой. В таком движении возникает центробежная сила, возрастающая к центру. Баланс этих трёх сил возможен только на определённом расстоянии от центра. Рассмотрим более детально механизм действия силы Кориолиса.

### Механизм действия силы Кориолиса

Так как атмосфера участвует в суточном вращении Земли с угловой скоростью  $\bar{\omega}$ , то на каждую частицу воздуха, движущуюся со скоростью  $\bar{c}$  по отношению к земной поверхности, действует сила Кориолиса.

**Сила Кориолиса** – это одна из сил инерции, вводимая для учёта влияния вращения подвижной системы отсчёта на относительное движение тела. Например, учёт силы Кориолиса позволяет также объяснить закон Бэра для движения по поверхности Земли.

Закон Бэра: реки, текущие в направлении меридиана, в северном полушарии подмывают правый берег, в южном – левый. Объясняется влиянием суточного вращения Земли на движение частиц воды в реке.

Сила Кориолиса, действующая на  $1 \text{ м}^3$  воздуха (на массу  $\rho$ ), равна:

$$K = 2 \rho (C \cdot \omega), \quad (1)$$

где  $(C \cdot \omega)$  – векторное произведение  $C$  и  $\omega$ ;

$\omega$  – вектор направлен вдоль оси вращения Земли – положительное направление к северному полюсу.

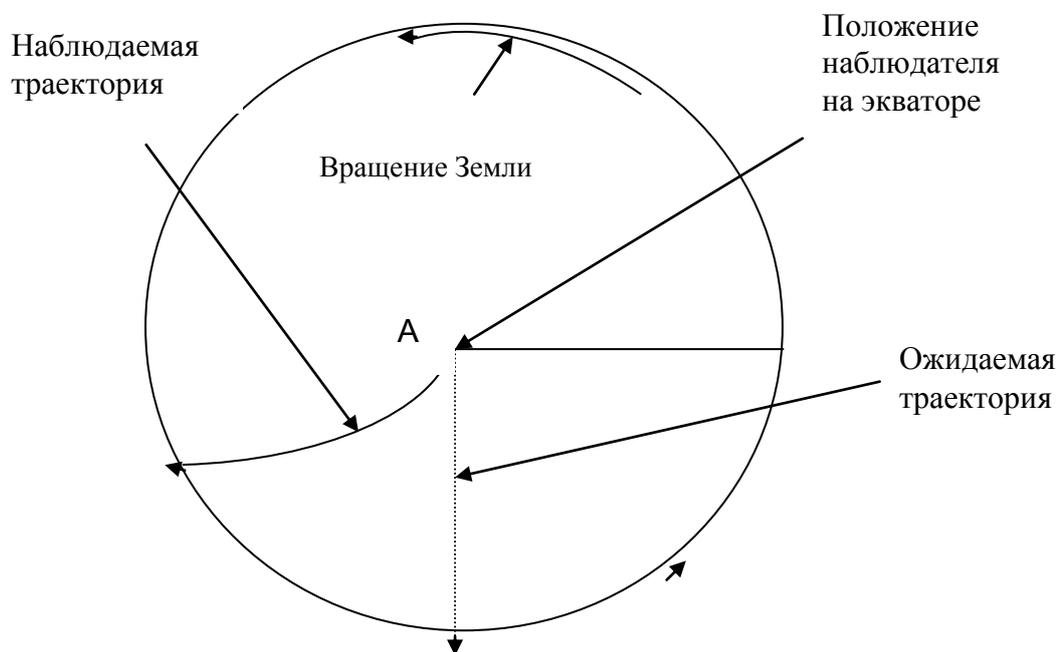


Рис. 1. Действие силы Кориолиса на предмет, движущийся с севера на юг

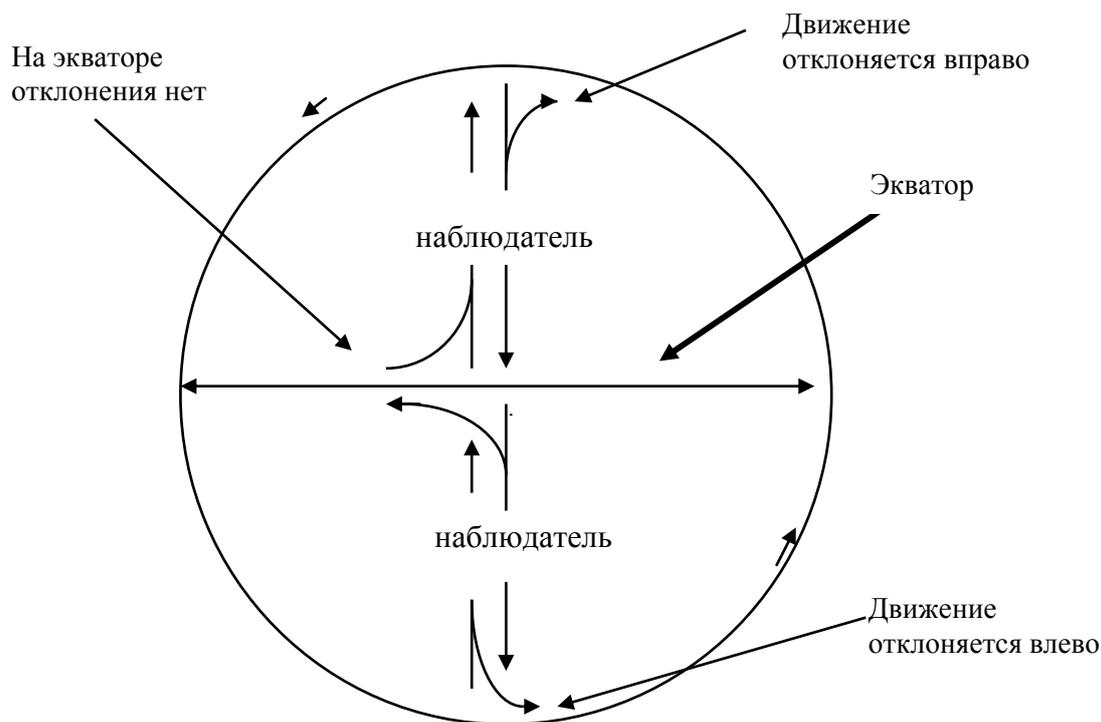


Рис. 2. Отклонение движения на разных широтах

Земля вращается с запада на восток с постоянной угловой скоростью, но это вращение не вызывает изменения траектории объектов, движущихся по земной поверхности вдоль широтных кругов. Если же предмет, например воздушная масса, движется на север или на юг, наблюдатель, находящийся в начальной точке этого движения, заметит, что предмет отклоняется от прямолинейной траектории.

В северном полушарии наблюдатель, стоящий спиной к ветру, заметит, что ветер поворачивает вправо, а в южном полушарии ветер поворачивает (отклоняется) влево. Сила Кориолиса проявляется в результате вращения Земли (рис. 1 и 2).

Если наблюдатель находится на экваторе в точке А, а предмет движется с севера на юг, то действие силы Кориолиса показывает рис. 1, а рис. 2 показывает, когда наблюдатель находится на разных широтах.

Если предмет движется в меридианном направлении, например на север, он пересекает ряд широтных кругов, имеющих последовательно уменьшающиеся радиусы. Поэтому скорость вращательного движения Земли с запада на восток в каждой точке пересечения этим предметом широтных кругов становится меньше, чем вращательная скорость рассматриваемого предмета. Таким образом, вращательная скорость предмета больше, чем скорость каждой точки той широты, которую предмет проходит в данный момент. В связи с этим предмет отклоняется от направления своего движения вправо.

Двигаясь с севера на юг, тот же предмет пересекает увеличивающиеся широтные круги, его вращательная скорость меньше скорости Земли, и будет отклоняться вправо.

Если ось  $X$  относительной системы координат направлена на восток, ось  $Y$  – на север, ось  $Z$  – вертикально вверх (рис. 3), а проекции скорости ветра  $\vec{c}$  и угловой скорости  $\vec{\omega}$  на  $X$ ,

$Y, Z$  соответственно равны:  $C_x, C_y, C_z$  и  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  тогда уравнения для составляющих силы Кориолиса примут вид:

$$K_x = 2 \rho (\omega_z \cdot c_y - \omega_y \cdot c_z), \quad K_y = 2 \rho (\omega_x \cdot c_z - \omega_z \cdot c_x), \quad K_z = 2 \rho (\omega_y \cdot c_x - \omega_x \cdot c_y).$$

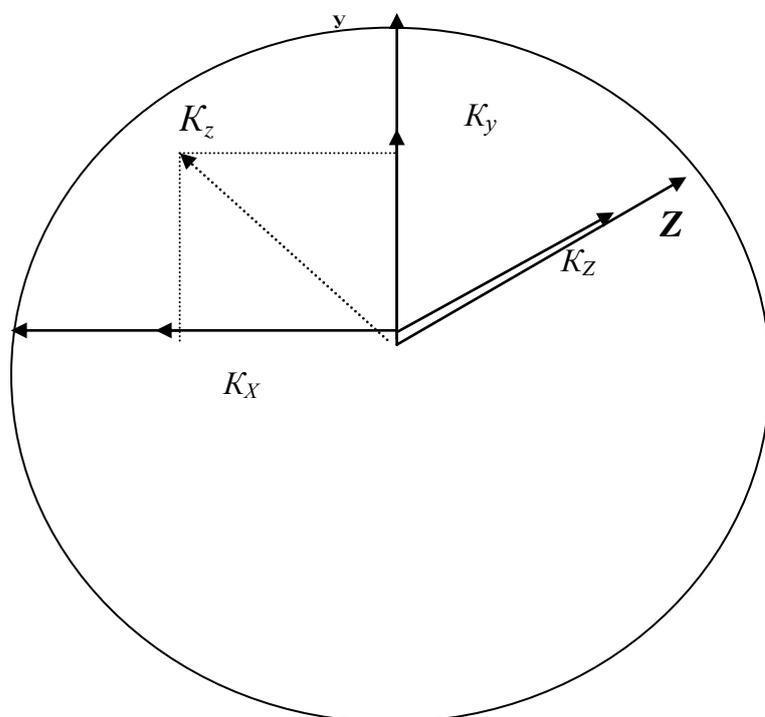


Рис. 3. Составляющие силы Кориолиса

Основную роль играет горизонтальная составляющая силы Кориолиса  $K_z$ .

В выражениях для проекций  $K_x$  и  $K_y$  составляющей  $K_z$  можно пренебречь слагаемыми, содержащими вертикальную скорость  $C_z$ , т. к. она в атмосфере в десятки и сотни раз меньше  $C_x$  и  $C_y$ , тогда:

$$K_x = 2 \rho \cdot \omega_z \cdot c_y, \quad (2)$$

$$K_y = 2 \rho \cdot \omega_z \cdot c_x, \quad (3)$$

$$K_z = \sqrt{K_x^2 + K_y^2} = 2 \rho \cdot \omega_z \cdot c, \quad (4)$$

где  $\omega_z = \omega \cdot \sin \varphi$  – вертикальная составляющая (проекция) угловой скорости вращения Земли, где  $\varphi$  – широта;

$c = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}$  – горизонтальная составляющая силы Кориолиса действует под прямым углом к направлению движения (вправо – в северном направлении, влево – в южном направлении).

### Влияние отклоняющей силы Кориолиса на движение тайфунов

В структуре ТЦ нужно выяснить, какие силы действуют в «глазе». Если там нет ветра, то градиент давления (направленный к центру) уравновешен центробежной и отчасти Кориолиса силами.

$$G = K_s + Z \text{ или} \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dz} = 2w_z \rho_0 c + \rho_0 \frac{c^2}{r} \quad (6)$$

где:  $C$  – скорость градиентного ветра;  
 $r$  – расстояние точки от центра ТЦ;  
 $\rho_0$  – плотность воздуха на уровне моря.

Барический градиент  $\frac{dp}{dr}$  является переменной величиной, зависящий от расстояния ( $r$ ).

Скорость ветра в основной части ТЦ (от центра до расстояния  $r_m$ , где она достигает максимального значения  $C_m$ ) растёт при увеличении  $r$ ;

в первом приближении этот рост можно считать линейным

$$C(r) = \alpha \cdot r, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – постоянная, имеющая смысл угловой скорости вращения воздуха в ядре тропического циклона.

Введём (7) в уравнение (6) и, интегрируя полученное уравнение от  $r = 0$  до произвольного  $r$  и соответственно давление от  $p_0$  до  $p$ , получим

$$P(r) = P_0 + \alpha \cdot \rho_0 (2w_z + \alpha) \cdot \frac{r^2}{2}, \quad (8)$$

где  $p_0$  – давление в центре ТЦ (при  $r = 0$ ).

На внешней границе тропического циклона максимальное давление:

$$P_m = P(r_m), \quad (9)$$

таким образом,

$$P_m = P_0 + \alpha \cdot \rho_0 (2w_z + \alpha) \cdot \frac{r_m^2}{2}. \quad (10)$$

Будем считать, что зависимость скорости ветра от  $r$  вне ядра описывается степенной функцией [x]:

$$C(r) = \beta \cdot r^{-n}, \quad (11)$$

где  $\beta$  и  $n$  – постоянные (для данного ТЦ), т. к. при  $r = r_m$  скорости, определяемые соотношениями (7) и (11), должны совпадать, то

$$\alpha \cdot r_m = \beta \cdot r_m^{-n} \quad \text{или} \quad \beta = \alpha \cdot r_m^{n+1}. \quad (12)$$

Интегрируя (10) от  $r_m$  до произвольного  $r$  и от  $P_m$  до  $P$  при  $C(r)$  в (11), получаем

$$P(r) = P_m + \frac{2w_z \rho_0 \alpha \cdot r_m^2}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{r_m}{r} \right)^{n-1} \right] + \frac{\rho_0 \alpha^2 r_m^2}{2n} \left[ 1 - \left( \frac{r_m}{r} \right)^{2n} \right], \quad (13)$$

таким образом, давление на внешней границе ТЦ  $P_\infty$  определяется

$$P_\infty = P_m + 2w_z \rho_0 \alpha \cdot r_m^2 \left[ 1 - \left( \frac{r_m}{r_\infty} \right)^{n-1} \right] + \frac{\rho_0 \alpha^2 r_m^2}{2n} \left[ 1 - \left( \frac{r_m}{r_\infty} \right)^{2n} \right]. \quad (14)$$

Формулы (13) и (14) определяют распределение давления в ТЦ вдоль радиуса. Взяв производную по  $r$ , найдем зависимость барического градиента от  $r$ . Если в формуле (14) заменить  $P_m$  по соотношению (10), то получим выражение для давления в центре ТЦ:

$$P_0 = P_\infty - \frac{\alpha \rho_0 \cdot r_m^2}{2} \left\{ (2w_z + \alpha) + \frac{4w_z}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{r_m}{r_\infty} \right)^{n-1} \right] + \frac{\alpha}{n} \left[ 1 - \left( \frac{r_m}{r_\infty} \right)^{2n-1} \right] \right\}, \quad (15)$$

т. к. перепад давления  $\Delta P = P_\infty - P_0$  и скорости  $C_m = \alpha \cdot r_m$ , где  $n$  изменяется от 0,5 до 1, если пренебречь отношением  $\left( \frac{r_m}{r_\infty} \right)^{2n}$  по сравнению с единицей, а также Кориолисов параметр ( $2w_z$ ), то получим максимальную скорость ветра в ТЦ:

$$\frac{n+1}{2n} \rho_0 \cdot \alpha^2 \cdot r_m^2 = P_\infty - P_0 \quad \text{или}$$

$$C_m = \sqrt{\frac{2n(P_\infty - P_0)}{S_0(n+1)}}. \quad (16)$$

В Международной системе единиц:

плотность влажного воздуха  $\rho_0 = 1,178 \text{ кг/м}^3$ ;

давление 1 Па (Паскаль) = Н/м<sup>2</sup>;

сила в 1 Н (Ньютон) =  $\frac{\dot{i} \cdot \hat{e}\tilde{a}}{\tilde{n}^2}$ , т. о.  $1 \text{ Па} = \frac{\dot{i} \cdot \hat{e}\tilde{a}}{\tilde{n}^2} \cdot \frac{1}{\dot{i}^2} = \frac{\hat{e}\tilde{a}}{\dot{i} \cdot \tilde{n}^2}$ .

На движение ТЦ в большей степени влияют три основных фактора:  
взаимодействие между фоновым потоком и самим вихрем;  
изменение параметра Кориолиса с широтой (или «эффект Россби»);  
трение о подстилающую поверхность.

#### Литература

1. Добрышман Е.М. Динамика экваториальной атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1980, 286 с.
2. Туноголовец В.П. Тропические циклоны северо-западной части Тихого океана: структура, эволюция, прогноз интенсивности и перемещения статистическими методами //Диссертация на соискание учёной степени доктора географических наук. Владивосток, 1997, 243 с.
3. Созранов А.Х. Отчёт о НИР «Анализ процессов, приводящих к возникновению ЧС гидрометеорологического характера». 2009, 70 с.