

## О ВРАЩЕНИИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА

А.Г. Боев

Радиоастрономический институт НАНУ, Харьков, Украина

E-mail: boev@ri.kharkov.ua

Предложено объяснение одновременного существования в тропическом циклоне вращений разных направлений. Оно основано на представлении циклона как атмосферно-облачного газового разряда в магнитном поле Земли. Разряд создается электрическими полями нижнего отрицательного и верхнего положительного зарядов системы грозных облаков, образующих циклон. Вращение в циклоне осуществляется силой Лоренца. Изменение ее знака с высотой в поле зарядов и приводит к наблюдаемой картине вращения вихря.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из характерных свойств тропического циклона (ТЦ) является смена направления его вращения с высотой и удалением от центра. При этом наблюдается одновременное существование в теле вихря циклонического вращения центральной части циклона (по всей высоте) и антициклонического вращения на его верхних уровнях.

Картину вращения тропического циклона качественно демонстрирует модель стационарного композиционного тропического циклона (Рис.1) [1].

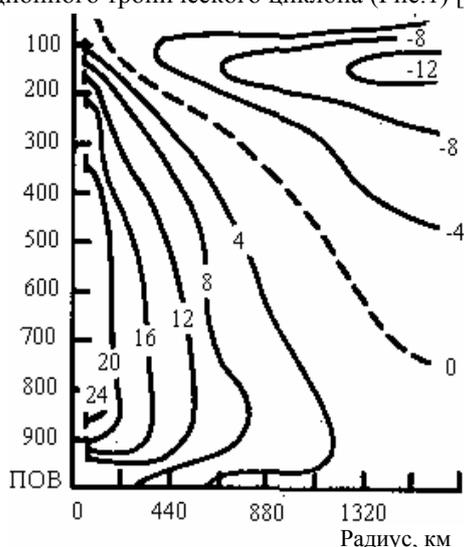


Рис.1. Распределение скорости вращения, м/с, в стационарном композиционном ТЦ.

Положительные значения скорости соответствуют циклоническому вращению, отрицательные – антициклоническому

Эта модель создана на основе обширного наблюдательного материала, с использованием результатов 8000 радиозондирований на 30 островных станциях Тихого океана и Западной Атлантики за 14-летний период.

Отметим характерные особенности вращения ТЦ, видные на рисунке. Во-первых, центральная часть вихря по всей высоте вращается циклонически. Причем, скорость этого вращения имеет максимум на изобарической поверхности 850 ГПа, что соответствует высоте 2 км. На расстоянии, примерно, 50 км от центра вихря данные наблюдений отсутствуют, что говорит о наличии в этой области «глаза бури». Антициклоническое вращение наблюдается

на периферии циклона в его верхней части. Максимальное значение скорости антициклонического вращения достигается на изобарической поверхности 150 ГПа (на высоте примерно 10 км) и на расстоянии 1320 км от оси вихря.

Приведенная на Рис.1 максимальная скорость циклонического вращения (24 м/с) относится к интервалу штормовых скоростей, а не ураганных (более 33 м/с) [1]. Это говорит о том, что приведенные данные относятся к области вязкого турбулентного течения, окружающего стену «глаза циклона». Скорость вращения в этой области медленно убывает с расстоянием от центра. С увеличением высоты турбулентность становится более однородной, коэффициент турбулентной вязкости уменьшается. Уменьшается при этом и толщина вязкой области, что и наблюдается на Рис.1.

Для развитого интенсивного циклона характерна высокая воронка, ограничивающая «глаз циклона». Пример типичной воронки приведен на Рис.2 [2]. До высоты 8 км стенки воронки очень крутые, выше – более пологие. Ширина ее растет от 20 км у земли до 175 км на высоте 8 км. На высоте 10 км ширина ее достигает уже 700 км. Ширина воронки у поверхности по разным наблюдениям может изменяться от 5 до 50 км. Наблюдались воронки шириной и до 300 км [1].

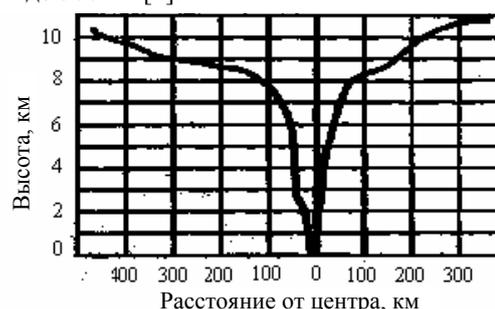


Рис.2. Наблюдаемая форма воронки ТЦ

Основной целью настоящей работы является объяснение наблюдаемого явления изменения направления вращения ТЦ на основе, предлагаемой ниже, его плазменной модели.

Показано, что за это явление ответственна основная электрическая структура грозных облаков, состоящая из двух основных электрических зарядов – нижнего отрицательного и верхнего положительного [3-5]. В электрических полях этих зарядов возникает атмосферно-облачный газовый разряд, в

плазме которого текут сильные токи разных направлений. По этой причине вращающая электромагнитная сила (сила Лоренца) [6-9] с высотой и при удалении от оси вихря меняет знак. В итоге циклоническое вращение вихря в электрическом поле отрицательно заряда постепенно меняется на антициклоническое вращение в электрическом поле положительного заряда, что и отмечается в наблюдениях [1].

## 2. АТМОСФЕРНО-ОБЛАЧНЫЙ ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД. ОЦЕНКА ВРАЩАЮЩЕЙ СИЛЫ

Свойства атмосферно-облачного газового разряда, с которым далее будем связывать механизм вращения ТЦ, подробно описан в работах [6-9]. Здесь же очень кратко остановимся лишь на некоторых деталях его, необходимых для дальнейшего изложения. Этот разряд создается в атмосферном воздухе, в котором присутствуют пары и капли воды. Капли воды способны уменьшать поле пробоя в несколько раз [3], пары воды, дополнительно к рекомбинации, активизируют еще один процесс гибели электронов – прилипание [10]. В этом процессе гибнут электроны достаточно больших энергий, поэтому стационарный разряд существует только при значениях параметра  $E/p$ , больших некоторого порогового значения, зависящего от удельной влажности – отношения массы воды в единице объема к массе сухого воздуха. Здесь и далее  $E$  – напряженность электрического поля, В/см;  $p$  – давление, мм рт.ст. Этот параметр хорошо известен в физике газового разряда [10]. Он ответственен за распределение энергии электрического поля по степеням свободы атомов и молекул. В силу этого разряд является холодным и хорошо излучающим, с богатой цветовой гаммой. При заданном давлении пороговое значение параметра  $E/p$  определяет пороговое поле горения  $E_g$ , ниже которого стационарный разряд уже не существует. Например, при нормальном давлении 750 мм рт.ст. и удельной влажности  $10^{-4}$  пороговое поле горения равно 5.5 кВ/см. В неоднородном электрическом поле наличие порогового поля приводит к появлению у разряда пространственных границ. С ростом высоты пороговое поле уменьшается, однако, по-прежнему остается достаточно большим (~1 кВ/см). С увеличением влажности пороговое значение параметра  $E/p$  и поле горения растут. При значении удельной влажности порядка нескольких процентов разряд перестает существовать, так как все электроны захватываются молекулами воды.

Определение электрического поля в плазме разряда может быть сведено к решению следующего уравнения для электрического потенциала  $\Phi$ :

$$\begin{cases} \varepsilon \Delta \Phi - (1 - \varepsilon) \mu (\vec{\nabla} \ln \zeta \cdot \vec{\nabla} \Phi) = -4\pi \rho_d, \vec{E} = -\vec{\nabla} \Phi, \\ \mu \equiv \zeta \frac{d}{d\zeta} \left( \frac{\varepsilon_l}{kT_e} \right), \quad \zeta \equiv \frac{E}{p} = \frac{\sqrt{(\vec{\nabla} \Phi)^2}}{p}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho_d$  – объемная плотность облачного заряда;  $\varepsilon(\zeta)$  – диэлектрическая проницаемость плазмы, яв-

ляющаяся функцией параметра  $E/p$ ;  $\varepsilon_l$  – потенциал ионизации;  $k$  – постоянная Больцмана. Функцией  $\zeta$  является и температура электронов

$$\frac{T_e}{T_0} \approx 4.35 \zeta^{3/4}, \quad \left( \frac{T_e}{T_0} \gg 1 \right).$$

Уравнение для потенциала нелинейное, однако, в рассматриваемой ситуации его можно линеаризовать. Это связано с тем, что частота столкновений электронов с нейтральными частицами в атмосфере велика и изменяется в интервале  $2.25 \cdot 10^{12} \dots 3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ . При изменении концентрации электронов от  $2.5 \cdot 10^{13}$  до  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  диэлектрическая проницаемость плазмы близка к единице, и в уравнении (1) появляется малый параметр  $\alpha \equiv 1 - \varepsilon \ll 1$ . В нулевом приближении по параметру  $\alpha$  электрический потенциал будет определяться уравнением Пуассона.

На границе плазменного столба  $r = R_r$ , определяемой граничным значением напряженности электрического поля, диэлектрическая проницаемость равна единице. В окружающей плазменный столб среде ( $r > R_r$ ) электрическое поле еще достаточно велико, однако плазмы здесь уже нет.

После задания объемного распределения плотности облачного заряда и вычисления электрических полей находится температура электронов. Концентрация электронов  $n$  находится затем по формуле:

$$n = (v_i - v_s) / \rho_r, \quad (2)$$

где  $\rho_r = 1.7 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$  – коэффициент диссоциативной рекомбинации [10],  $v_s$  – частота прилипания, а

$$v_i = 0.49 \cdot 10^9 p \left( \frac{p}{E} \right)^{3/8} \cdot \exp \left[ -53.93 \left( \frac{p}{E} \right)^{3/4} \right] -$$

частота ионизации молекулярного азота. Эксперимент показывает, что частота ионизации воздуха практически совпадает с его частотой ионизации [11]. Частота прилипания также зависит от параметра  $E/p$ , и равенство ее частоте ионизации определяет пороговое значение этого параметра и границу разряда. Концентрация электронов в объеме разряда изменяется от нуля на его границе до максимального значения, зависящего от удельной влажности атмосферы [6-9].

Далее находятся диэлектрическая проницаемость, проводимость плазмы и электрические токи. По заданным токам вычисляются магнитные поля, а затем и электромагнитные силы, действующие на плазму. При этом появляется и вращающая сила. Для рассматриваемой нами задачи объемная плотность вращающей силы может быть записана следующим выражением [6-9]:

$$F_\varphi = -\frac{1}{c} j_r B_0. \quad (3)$$

Здесь  $r, \varphi, z$  – цилиндрические координаты, связанные с осью циклона;  $c$  – скорость света;  $j_r = \sigma E_r$  – радиальная компонента электрического тока;  $\sigma$  – проводимость плазмы;  $E_r$  – радиальная компонента электрического поля. Значение вертикальной компоненты геомагнитного поля  $B_0$  зависит от ши-

роты и долготы точки на поверхности Земли. Эта компонента геомагнитного поля отсутствует на магнитном экваторе. При  $E_r < 0$  сила (3) положительна и будет приводить к циклоническому вращению. При  $E_r < 0$  вращение среды будет антициклоническим. Сила (3) далее будет именоваться плазменно-геомагнитной силой.

Геомагнитное поле в числителе (3) невелико (среднее значение порядка 0.3 Гс), скорость же света в знаменателе, наоборот, очень велика. Тем не менее, как будет показано ниже, этой силы достаточно, чтобы в условиях типичного атмосферно-облачного разряда создать вращение воздушной массы до очень больших скоростей. Одновременно будет проведена и оценка роли силы Кориолиса.

Для этих оценок используем уравнения гидродинамики, описывающие стационарное вращение среды с плотностью  $\rho$ :

$$\begin{aligned} \frac{V_r}{r} \frac{\partial(rV_\varphi)}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} = -\frac{1}{c\rho} j_r B_0 - fV_r, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rV_r) + \frac{\partial}{\partial z}(V_z) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $V_r, V_\varphi, V_z$  – соответственно радиальная, азимутальная и осевая компоненты скорости;  $f = 2\Omega \sin \psi = 7.27 \cdot 10^{-5} \sin \psi$  ( $c^{-1}$ ) – параметр Кориолиса;  $\psi$  – географическая широта. В первом уравнении отсутствует слагаемое, описывающее вязкую силу, так как роль ее существенна лишь у подстилающей поверхности и на периферии вихря.

Используя уравнение непрерывности, можно получить следующую оценку для радиальной и осевой компонент скорости тропического циклона (ТЦ):

$$V_z \approx V_r \frac{h}{R_r}. \quad (5)$$

Используя (5), можно убедиться, что оба слагаемых в левой части первого уравнения (4) – одного порядка. Поэтому будет справедливо следующее оценочное соотношение:

$$2 \frac{V_r}{r} \frac{\partial(rV_\varphi)}{\partial r} \approx -\frac{1}{c\rho} j_r B_0 - fV_r.$$

Отсюда получаются и оценки для скорости вращения воздуха на расстоянии  $r$  от оси циклона:

а) под действием силы Кориолиса

$$|V_{\varphi, K}| \approx \frac{1}{2} f r, \quad (6)$$

б) под действием электромагнитной силы

$$|V_r \cdot V_{\varphi, E}| \approx \frac{r}{2c\rho} |j_r B_0|. \quad (7)$$

Согласно наблюдениям [1], стенка «глаза урагана» обладает максимальной скоростью вращения порядка нескольких десятков метров в секунду. Под действием силы Кориолиса (см. (6)) стенка, удаленная на расстояние 20 км от оси циклона на широте  $20^\circ$ , будет обладать скоростью вращения

$$|V_{\varphi, K}| \approx \frac{1}{2} 7.27 \cdot 10^{-5} \cdot 0.342 \cdot 2 \cdot 10^6 = 24.9 \text{ см/с},$$

что на два порядка меньше наблюдаемых значений. Отметим, что к аналогичному результату приводит

и масштабный анализ динамических уравнений ТЦ [1]. Кроме того, сила Кориолиса не только не дает правильной количественной оценки скорости вращения, она не согласуется и с качественным ее поведением. Покажем, что в условиях типичного атмосферно-облачного разряда электромагнитная сила способна создать вращение той же стенки до самых больших наблюдаемых скоростей. С этой целью оценим сначала необходимую величину плотности радиального тока, используя следующие данные:

$$\begin{aligned} |V_{\varphi, E}| = 10^4 \text{ см/с}; \quad c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}; \quad \rho = 10^{-3} \text{ г/см}^3; \\ B_0 = 0.3 \text{ Гс}; \quad r = 2 \cdot 10^6 \text{ см}; \quad |V_r| = 10^3 \text{ см/с}. \end{aligned}$$

Из формулы (7) получим

$$|j_r| \approx \frac{2c\rho}{r B_0} |V_{\varphi, E} V_r| = 10^9 \text{ СГС}_1 = 0.33 \text{ А/см}^2. \quad (8)$$

Далее, выразив плотность тока через проводимость и напряженность электрического поля по известной формуле [10], можно оценить необходимое значение концентрации электронов в плазме:

$$n = \frac{m\nu}{e^2} \left| \frac{j_r}{E_r} \right|,$$

где  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона;  $\nu$  – частота столкновений. Для нормального давления, 750 мм рт.ст.,  $E/p = 7.34 \text{ В/см} \cdot \text{мм рт.ст.}$ ,  $|E_r| = 3 \text{ кВ/см}$ ,  $\nu = 2 \cdot 10^{21} \text{ с}^{-1}$  получим:

$$n = 7.8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}. \quad (9)$$

Концентрации электронов такого порядка и выше вполне достижимы в атмосферно-облачном разряде во всем допустимом диапазоне изменения давления и удельной влажности [6-9].

В [6-9] показано, что под относительно низким облачным зарядом ( $h/a < 0.72$ ,  $h$  и  $a$  – высота и радиус заряда) плазменно-геомагнитная сила создает циклоническое вращение вихря в обоих полушариях Земли, если облачный заряд отрицательный. Под относительно низким положительным облачным зарядом эта сила приводит к антициклоническому вращению вихря. На этом свойстве плазменно-геомагнитной силы и будет построено далее объяснение картины вращения тропического циклона в разные стороны.

### 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА

Облачность тропиков над океанами характеризуется наличием больших локальных скоплений (кластеров) конвективных облаков с площадями порядка  $10^3 \dots 10^5 \text{ км}^2$ . При этом 30...40% общей площади кластера занято мощными кучевыми и кучево-дождевыми облаками, с которыми связана преобладающая часть осадков. На широтах, где образуются тропические циклоны ( $5 \dots 20^\circ$  в каждом полушарии), высота кучевых облаков велика и нередко достигает тропопаузы (15...18 км). Для них характерна многоярусность, проявляющаяся в том, что высоты оснований облаков могут различаться на 1...2 км. Нижний слой облаков начинается от уровня конденсации, другие облака образуются в конвективно-неустойчивых слоях, расположенных на больших

высотах [12]. В развитом тропическом циклоне облачность представляет собой почти сплошное гигантское грозное облако размером в несколько сотен (до 1000) километров и более [13].

Известно [3-5], что грозное облако представляет собой как бы вертикальный электрический диполь. Верхний слой облака заряжен положительно, а отрицательный заряженный слой расположен в более низкой части облака. Эти заряды образованы суммой зарядов разных знаков льдинок, снежинок и водяных капель. Положительные заряды гидрометеоров преобладают на высотах выше 7 км, отрицательные – между 2 и 7 км. Для верхнего положительного заряда характерны температуры ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ . Температура на уровне центра отрицательного заряда ниже  $0^{\circ}\text{C}$ . Размеры верхнего положительного заряда по вертикали и горизонтали больше соответствующих размеров отрицательного. Согласно прямым и косвенным наблюдениям объемная плотность основных зарядов оценивается величиной [3-5]:

$$\rho_d = 10^{-9} \dots 10^{-8} \text{ Кл/м}^3. \quad (10)$$

Эта оценка, а также данные о расположении основных зарядов и размерах грозного облака тропического циклона и будут использованы далее для моделирования электрической структуры его облачной системы. Кроме того, будет использована также и картина вращения ТЦ (см. Рис.1).

Поскольку высота ТЦ мала по сравнению с его радиусом, а толщины основных зарядов оцениваются несколькими километрами, то в первом приближении их можно моделировать бесконечно тонкими круглыми соосными дисками. Используя (10) и приняв толщины основных зарядов равными 1 км, получим для поверхностной плотности зарядов этих дисков следующую оценку:

$$\rho_s = 10^{-6} \dots 10^{-5} \text{ Кл/м}^2. \quad (11)$$

Для рассмотрения конкретной ситуации проведем моделирование пространственного расположения зарядов "композиционного" ТЦ (см. Рис.1). Ранее уже отмечались характерные особенности вращения ТЦ. Это циклоническое вращение центральной части вихря с максимумом на высоте около 2 км. Именно на этой высоте в электрической модели циклона расположим отрицательно заряженный диск. Радиус этого диска примем равным 50 км, что соответствует, по нашим оценкам, радиусу "глаза бури". Верхний положительно заряженный диск расположим на высоте 10 км. Здесь, как отмечалось, достигается наибольшая скорость антициклонического вращения. Учитывая, что напряженность электрического поля максимальна вблизи края заряженного диска [6-9], радиус его выберем равным 1320 км.

Таким образом, предлагаемая электрическая модель композиционного ТЦ будет состоять из системы двух бесконечно тонких круглых противоположно заряженных дисков с поверхностной плотностью заряда  $10^{-6} \dots 10^{-5} \text{ Кл/м}^2$ . Нижний отрицательно заряженный диск расположен на высоте 2 км и имеет радиус 50 км. Верхний положительно заряженный диск радиусом 1300 км расположен на высоте

10 км. С использованием этой системы зарядов далее будут найдены электрические поля и области существования плазмы в теле ТЦ. Затем по знаку радиальной компоненты электрического поля будут определены знаки вращающей силы (2.3) и направления вращения различных областей циклона. Области, в которых вращающая сила положительна, будут характеризоваться циклоническим вращением, а области, где она отрицательна – антициклоническим.

#### 4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВРАЩАЮЩАЯ СИЛА В ЦИКЛОНЕ

Расчет электрических полей, области существования плазмы и областей циклонического и антициклонического вращений композиционного циклона проводился аналогично работам [6-9], хотя и по более сложной схеме. Электрические потенциалы дисков представлялись в виде рядов по полиномам Лежандра [14] вплоть до 30 степени, что было связано с необходимостью плавного сопряжения полей на границах дальних и ближних зон зарядов. На Рис.3,4 приведены результаты расчетов областей существования плазмы (затенены) и нормированной вращающей плазменно-геомагнитной силы, взятой с обратным знаком:

$$-\tilde{F}_\phi = -F_\phi / F_{\phi,0}, \quad (12)$$

для шести высотных разрезов циклона от поверхности до 11 км. Нормировочное значение силы соответствует напряженности радиальной компоненты электрического поля, равной 1 кВ/см, знак вращающей силы изменен для удобства графического представления. Расположение областей существования плазмы, их высота и ширина определяются разностью между напряженностью электрического поля, создаваемого электрическими зарядами, и пороговым полем горения разряда  $E_g$ , которое уменьшается с высотой [6-9]. Значение относительной влажности в расчетах для определенности принималось равным  $10^{-4}$ .

Как показывает Рис.3, до высоты 5 км в областях существования плазмы вращающая сила положительна, что указывает на циклоническое направление вращения воздуха. Максимальное значение вращающей силы на этих высотах достигается на краю нижнего заряда ( $r/a \approx 0,038$ ,  $a$  – радиус верхнего заряда), что соответствует расстоянию 50 км от оси вихря. С увеличением высоты вращающая сила ведет себя немонотонно. До высоты 2 км, где расположен нижний отрицательный заряд, она увеличивается, а затем начинает уменьшаться. Антициклоническое вращение в этой области высот отсутствует. Это говорит о том, что роль верхнего заряда в этой области высот еще не существенна.

Качественное влияние верхнего положительного заряда, согласно расчетам, начинает проявляться начиная с высоты 7 км (см. Рис.4). Здесь наряду с областью циклонического вращения на расстоянии  $r = a$ , соответствующему краю положительно заряженного диска, возникает и небольшая область антициклонического вращения (см. Рис.4,а).

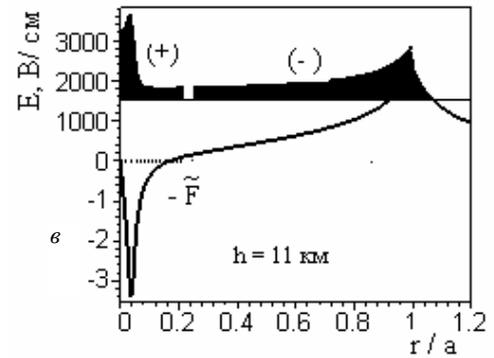
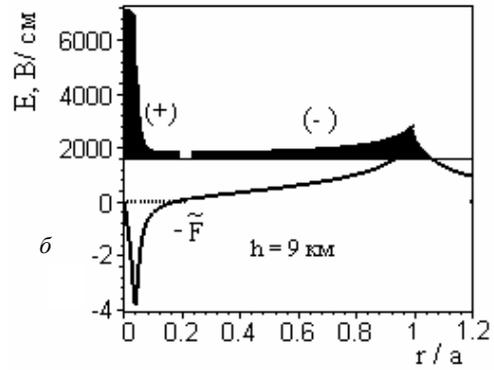
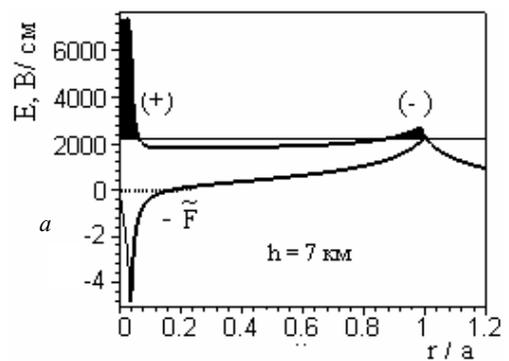
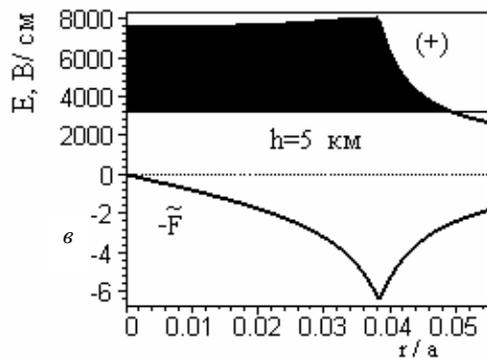
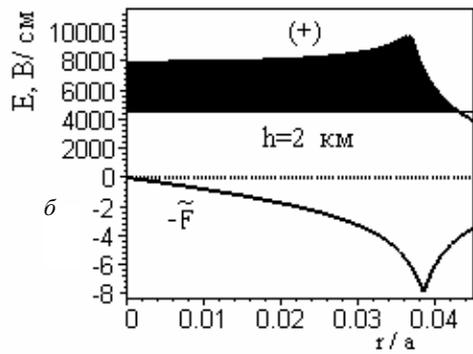
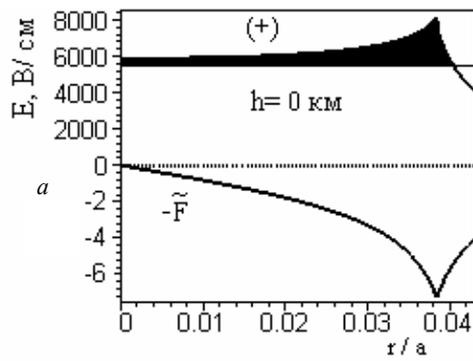


Рис.3. Нормированная вращающая сила  $-\tilde{F}$  и область существования плазмы (затенена) на различных высотах  $h$  от поверхности. Знак (+) соответствует циклоническому направлению вращения

Рис.4. Нормированная вращающая сила  $-\tilde{F}$  и области существования плазмы (затенены) на различных высотах  $h$  от поверхности. Знаком (+) отмечены области циклонического вращения, знаком (-) – области антициклонического вращения

Она отделена от области циклонического вращения широкой областью среды без плазмы, вращающейся под действием вязкой силы. На высотах 9 и 11 км (см. Рис.4,б,в) область антициклонического вращения уже сильно расширена в сторону оси вихря и плавно смыкается с областью циклонического вращения. Область вязкого вращения здесь выродилась в линию, аналогичную линии "00" (см. Рис.1). На высотах более 5 км циклоническое вращение в центральной области ТЦ по-прежнему сохраняется до самых верхних уровней вихря, до 11 км и более.

Величина силы в этой области уменьшается с высотой, однако это уменьшение довольно слабое, как и положено для ближней зоны заряда.

Вращающая сила в области антициклонического вращения увеличивается с высотой и расстоянием от оси циклона. Максимум ее достигается на границе положительно заряженного диска, т.е. на высоте 10 км и расстоянии 1320 км от оси вихря. Именно такая картина вращения композиционного ТЦ, как уже отмечалось, изображена на Рис.1.

По данным Рис.3 и 4 была вычислена внешняя граница между областью действия вращающей силы циклонического направления и областью вязкого вращения среды (Рис.5). Она характеризует как толщину, так и конфигурацию стенок воронки, ограничивающей «глаз циклона». Сравнение с Рис.2 показывает качественное соответствие расчетной и наблюдаемой форм воронки ТЦ.

Рассмотренная электрическая модель циклона является простейшей и не может, естественно, объяснить все детали картины вращения. Для этого необходимо решение полной задачи о турбулентном движении проводящей жидкости на заключительном этапе расчета электромагнитной модели вихря [6-9]. Тем не менее, описанная выше электродинамическая модель, позволяет качественно объяснить сложную картину вращения тропического циклона, что невозможно в моделях, где в качестве вращающей силы используется сила Кориолиса. Сила Кориолиса не может менять знак ни с высотой, ни с удалением от центра циклона.

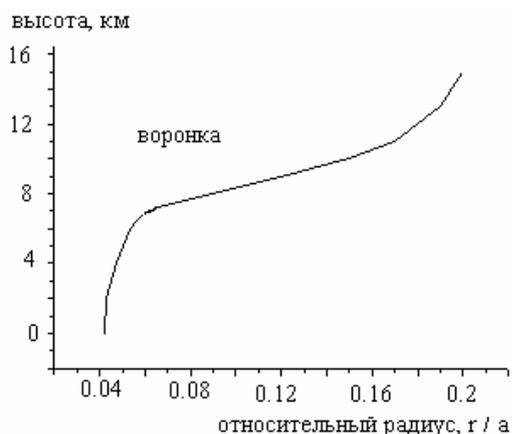


Рис.5. Высотный разрез воронки ТЦ

### ЛИТЕРАТУРА

1. А.П. Хаин, Г.Г. Сутырин. *Тропические ураганы и их взаимодействие с океаном*. Л.: «Гидрометеоздат», 1983, с.272.
2. Д.В. Наливкин. *Ураганы, бури и смерчи*. Л.: «Наука», 1969, с.488.
3. Дж.А. Чалмерс. *Атмосферное электричество*. Л.: «Гидрометеоздат», 1974, с.420.
4. В.М. Мучник. *Физика грозы*. Л.: «Гидрометеоздат», 1974, с.352.
5. М. Юман. *Молния*. М.: «Мир», 1972, с.324.
6. А.Г. Боев. Плазменная теория смерча // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2008, №4, с.133-138.
7. А.Г. Боев. Газоразрядная теория смерча // *Доповіді НАН України*. 2009. №4, с.70-75.
8. А.Г. Боев. Электромагнитная теория смерча. I. Электродинамика вихря // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2009, т.14, № 2, с.121-149.
9. А.Г. Боев. Электромагнитная теория смерча. II. Гидродинамика вихря // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2009, т.14, №3, с.233-253.
10. Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда*. М.: «Наука», 1987, с.592.
11. С. Браун. *Элементарные процессы в плазме газового разряда*. М.: «Госатомиздат», 1961, с.324.
12. И.П. Мазин, С.М. Шметер. *Облака. Строение и физика образования*. Л.: «Гидрометеоздат», 1983, с.280.
13. С.П. Хромов. *Метеорология и климатология для географических факультетов*. Л.: «Гидрометеоздат», 1964, с.500.
14. Ф.М. Морс, Г. Фешбах. *Методы теоретической физики*. М.: «изд-во иностр. лит.», 1960, т.2, с.886.

Статья поступила в редакцию 31.05.2010 г.

### ON A ROTATION OF A TROPICAL CYCLONE

*A.G. Bоеv*

The phenomenon of space changing the rotation direction of tropical cyclone has been explained. The cyclone is considered as a gas discharge created by electric fields of its two main (top positive and bottom negative) electric charges in the Earth's magnetic field.

### ЩО ДО ОБЕРТАННЯ ТРОПІЧНОГО ЦИКЛОНУ

*A.G. Боев*

З'ясовано ефект просторового змінення напрямку обертання тропічного циклону. Циклон розглядається як газовий розряд, що створюється електромагнітними полями його двох головних (верхнім позитивним та нижнім негативним) електричних зарядів в магнітному полі Землі.