

## ПЛАЗМЕННАЯ ТЕОРИЯ СМЕРЧА

*А.Г. Боев*

*Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков, Украина*

*E-mail: boev@ri.kharkov.ua*

Предложен механизм образования и построена теория смерча – интенсивного атмосферного вихря, стационарно вращающегося под грозовым облаком. Смерч рассматривается как контролируемый прилипанием стационарный газовый разряд, создаваемый в атмосфере сильным облачным капельным зарядом в присутствии геомагнитного поля. Найдены электрические поля, токи, электромагнитные силы, поля скоростей.

### 1. СМЕРЧ

Смерч (торнадо, тромб) представляет собой воздушно-водяной вихрь между земной поверхностью и движущимся грозовым облаком. Появление смерчей отмечается практически во всех районах земного шара, хотя и с разной частотой. Смерч без грозового облака не возникает, он, по сути дела, представляет собой его часть. Вращение начинается в самом облаке, затем вращающаяся часть облака постепенно опускается к земле, в виде сужающейся к низу воронки. Дойдя до поверхности земли, она становится причиной всех разрушений. Диаметр воронки обычно колеблется от нескольких метров до нескольких сотен метров. Высота же ее обычно достигает нескольких сотен метров, реже – километр, полтора [1-3].

Воронка смерча состоит из внутренней полости – "ядра" и ограничивающей его цилиндрической стенки. Внутренняя полость в разрушительной деятельности смерча играет второстепенную роль. Она наполнена медленно движущимся разреженным воздухом. Давление в полости ядра сильно понижено. По сравнению со стенкой и даже по сравнению с окружающим воздухом она является как бы пустой.

Основной разрушительный элемент смерча – стенка. Она состоит из воздуха, наполненного водой и пылью, и вращается со скоростью в десятки и даже сотни метров секунду. Известны случаи и сверхзвукового движения. Скорости перемещения смерча в пространстве определяются скоростью движения облака. Обычно она много меньше скорости вращения.

Проблема понимания природы смерчей, механизма их образования и источников разрушительной силы является одной из сложнейших в динамике атмосферы. Огромный урон и вред, наносимый ими, делает проблему их изучения не только научной, но и общечеловеческой. Однако, несмотря на усилия, обширный экспериментальный и наблюдательный материал, накопленный в течение почти двух веков, эта проблема до сих пор не имеет решения.

Существующие теории и модели интенсивных атмосферных вихрей традиционно развивались в рамках гидродинамики [4-7]. Они позволяют рассчитывать поля скоростей и давления лишь на периферии вихря – вне "ядра" и стенки смерча. В

основе их, как правило, лежит некая феноменологическая система уравнений, состоящая частично из уравнений Навье-Стокса (для турбулентной жидкости – осредненных) и ряда соотношений, полученных из измерений в природных условиях. Эти соотношения каким-то образом моделируют свойства ядра и обычно играют роль граничных условий, задаваемых на его внешней границе – "стенке". Ни одна из существующих моделей смерча не в состоянии описать ни его пространственной структуры во всей полноте, ни механизма вращения воздушной массы. Тем не менее в настоящее время в литературе [2] и до сих пор используется гипотеза образования смерчей, предложенная Вегенером [1]. Согласно ей источниками смерчей являются горизонтальные цилиндрические вихри, образующиеся в атмосфере на границе горизонтальных ветровых потоков противоположных направлений. Эти вихри под действием восходящих потоков воздуха изгибаются, превращаясь в вертикальные вихри (мезоциклоны), а затем каким-то образом – в смерчи. Однако поперечные масштабы мезоциклонов порядка километров, диаметры же смерчей не превышают сотен метров. Радиус мезоциклонов слишком велик, и расположены они слишком высоко, чтобы создать сильный ветер вблизи земли. Более того наблюдения последних лет указывают на возможность образования смерчей и без мезоциклонов. В силу этого причины образования смерчей и в рамках модели Вегенера остаются не понятными [2].

В связи с этим последние десятилетия все большее внимание обращается на электрические явления, сопровождающие возникновение интенсивных атмосферных вихрей [8-11]. В первых работах (см. [8] и обзор литературы в ней) была показана несостоятельность объяснения достаточно часто наблюдаемого сверхзвукового движения воздуха в торнадо только законами термодинамики. Для устранения этого противоречия была высказана идея нагрева газа электрическими полями, сопровождающими наблюдаемое явление. Обширный анализ морфологических свойств смерчей, проведенный к настоящему времени, дает достаточно оснований считать, что их теория и механизмы должны обязательно учитывать не только атмосферные электрические поля, но и

геомагнитное поле. Однако, кроме качественных и оценочных соображений о роли электромагнитных взаимодействий, в настоящее время не предложено каких-либо конкретных моделей механизмов образования смерчей.

Построение физической и математической моделей механизма смерча, описание сил создающих вращение воздушной массы, описание пространственной структуры смерча не только на периферии, но и в центральной его части и является целью настоящей работы.

Согласно представлениям, которые развиваются в данной работе, смерч имеет плазменную природу и трактуется как газовый разряд в атмосфере, создаваемый сильным электрическим полем облака. Напряженность электрического поля должна превышать некоторую пороговую величину (пороговое поле), определяемое процессом прилипания электронов к молекулам воздуха и воды [12].

Основными элементами предлагаемой модели смерча являются:

- а) достаточно сухая воздушно-капельная атмосфера;
- б) грозовое облако с присутствием сильной флуктуации пространственного заряда, локализованного вдали от зоны дождя. Величина его должна быть такова, чтобы напряженность электрического поля у поверхности земли превышала некую пороговую величину, зависящую от водности атмосферы (несколько киловольт на сантиметр);
- в) геомагнитное поле.

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И ТОКИ В ПЛАЗМЕ ВИХРЯ

Облака – известные генераторы атмосферного электричества [13-15] (Рис.1). Средние значения электрического поля в грозовых облаках порядка 1...2 кВ/см [9,13-15]. Поля в них характеризуются сильными флуктуациями, на несколько порядков превышающими средние значения. Пространственные масштабы флуктуаций изменяются от десятков метров до нескольких километров. Нижняя часть облака вдали от центральной дождящей части обычно заряжена отрицательно. Далее сильный отрицательный облачный заряд, создающий смерч, будем считать бесконечно тонким кругом радиуса  $a$ , расположенным на высоте  $h$ .

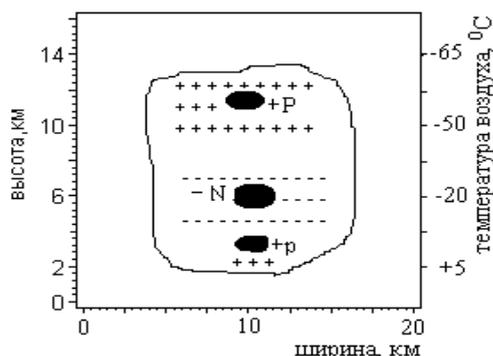


Рис.1. Электрическая структура грозового облака

Уравнение для электрического потенциала в плазме разряда имеет вид:

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi, \Delta\Phi + \mu(\nabla \ln \zeta \cdot \nabla\Phi) = -4\pi\rho_d,$$

$$\zeta \equiv \frac{E}{p} = \frac{\sqrt{(\nabla\Phi)^2}}{p}, \mu = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \zeta \frac{d}{d\zeta} \left( \frac{\varepsilon_I}{kT_e} \right).$$

Здесь  $\varepsilon, T_e, \varepsilon_I, p$  – соответственно диэлектрическая проницаемость, электронная температура, потенциал ионизации и давление. Рассматривалась только "слабая" форма разряда, когда  $\mu \ll 1$ . В этом случае поле определяется по известным формулам [16]. Все дальнейшие расчеты проводились для значения водности атмосферы  $w=10^{-4}$  и нормального атмосферного давления. Величина порогового поля в этих условиях – 5.5 кВ/см. Здесь найдены области существования разряда в зависимости от величины заряда и отношения  $h/a$ , высотные и радиальные распределения электрических полей, диэлектрической проницаемости, проводимости и токов (Рис.2-4).

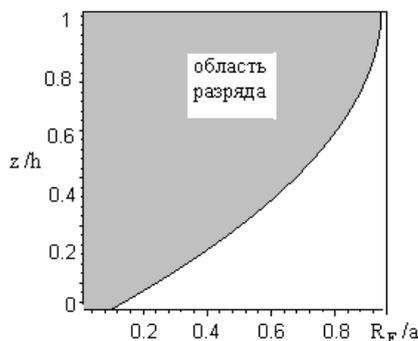


Рис.2. Вертикальное сечение плазменного столба под зарядом ( $h/a=0.5, Q=-64$  Кл,  $a=1$  км)

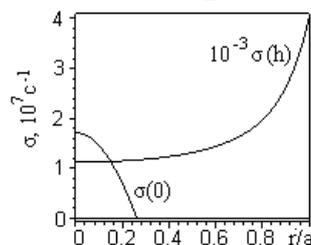


Рис.3. Проводимости в нижнем  $\sigma(0)$  и верхнем  $\sigma(h)$  основаниях вихря ( $h/a=0.5, Q=-64$  Кл,  $a=1$  км)

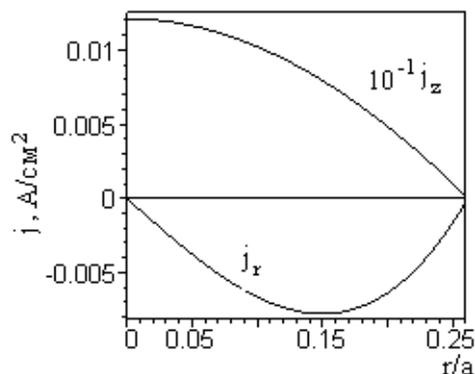


Рис.4. Осевого  $-j_z$  и радиальный  $j_r$  токи в основании вихря ( $h/a=0.5, Q=-64$  Кл,  $a=1$  км)

### 3. ИНДУЦИРОВАННЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ. КАПЕЛЬНЫЙ СОЛЕНОИД. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ

При расчете магнитных полей учитывались не только токи проводимости, но и конвективный ток вращающихся капель  $j_\phi$ . Это связано с отсутствием азимутального тока проводимости вследствие цилиндрической симметрии плазменного столба.

Уравнения для магнитных полей имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_r) + \frac{\partial B_z}{\partial z} &= 0, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial B_r}{\partial r} \right) - \frac{B_r}{r^2} + \frac{\partial^2 B_r}{\partial z^2} &= \frac{4\pi}{c} \frac{\partial j_\phi}{\partial z}, \\ j_r = \sigma E_r, \quad j_z = \sigma E_z, \quad j_\phi = \rho_d V_\phi, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial B_\phi}{\partial r} \right) - \frac{B_\phi}{r^2} + \frac{\partial^2 B_\phi}{\partial z^2} &= \\ &= \frac{4\pi}{c} \left( \frac{\partial j_z}{\partial r} - \frac{\partial j_r}{\partial z} \right), \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial B_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} &= -\frac{4\pi}{c} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r j_\phi). \end{aligned}$$

Здесь  $\rho_d$  и  $V_\phi$  – объемная плотность и скорость вращения капля. Численное исследование показало, что для значений  $h/a \geq 0.5$  радиальные градиенты токов существенно превышают осевые, что позволило упростить решение задачи. В итоге для магнитных полей получены следующие выражения:  $B_r = 0$ ,

$$B_z(r, z) = \begin{cases} \frac{4\pi}{c} \int_0^{R_T} \rho_d V_\phi dr, & 0 \leq r \leq R_T \\ \frac{4\pi}{c} \int_r^\infty \rho_d V_\phi dr, & R_T \leq r < \infty, \end{cases} \quad 0 \leq z \leq h,$$

где  $R_T$  – внутренняя граница капельной стенки. Это есть магнитное поле соленоида, образованного вращающимися заряженными каплями (капельный соленоид). Азимутальная компонента магнитного поля определяется следующей формулой:

$$B_\phi(r; z) = -\frac{4\pi}{c r} \begin{cases} \int_0^r x dx \int_x^{R_E} \left( \frac{\partial j_z}{\partial t} - \frac{\partial j_r}{\partial z} \right) dt, & 0 \leq r \leq R_E, \\ \int_0^{R_E} x dx \int_x^{R_E} \left( \frac{\partial j_z}{\partial t} - \frac{\partial j_r}{\partial z} \right) dt, & R_E \leq r < \infty, \end{cases}$$

где  $R_E$  – граница разряда. Компоненты силы Лоренца, действующей на плазму, находились по формулам:

$$F_r = -\frac{1}{c} j_z B_\phi, \quad F_z = \frac{1}{c} j_r B_\phi, \quad F_\phi = -\frac{1}{c} j_r (B_0 + B_z),$$

где  $B_0$  – вертикальная компонента геомагнитного

поля. В выражении для азимутальной (вращающей) силы учитывалось и магнитное поле капельного соленоида. По этим формулам проводился анализ радиальных и осевых зависимостей азимутального магнитного поля и сил в плазме вихря под облачными зарядами на различных относительных высотах (Рис.5-8).

Видно, что радиальная сила здесь отрицательна, т.е. она сжимает плазму, как в z-пинче. Это говорит о том, что в генерации азимутального магнитного поля основную роль играет осевой ток. С уменьшением относительной высоты заряда становится существенной неоднородность радиального тока по высоте. Радиальная сила при этом может изменить свой знак и приводить не к сжатию плазмы, а к разрежению в ней (Рис.7).

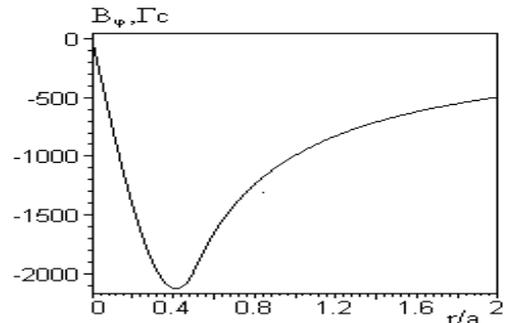


Рис.5. Азимутальное магнитное поле на поверхности земли ( $h/a=0.5$ ,  $Q=-64.2$  Кл,  $a=1$  км)

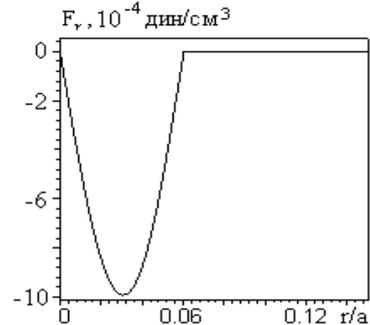


Рис.6. Плотность радиальной силы в нижнем основании вихря ( $h/a=1.3$ ,  $Q=-103.3$  Кл,  $a=1$  км)

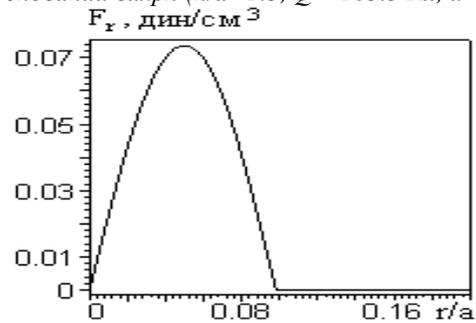


Рис.7. Плотность радиальной силы в нижнем основании вихря ( $h/a=0.5$ ,  $Q=-63.3$  Кл,  $a=1$  км)

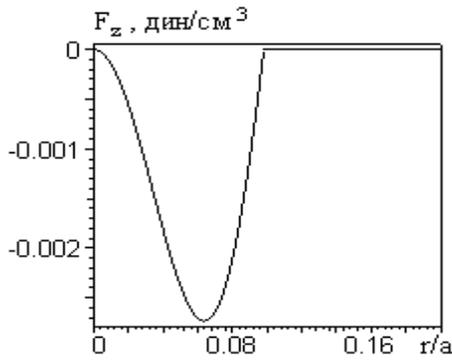


Рис.8. Плотность осевой силы в нижнем основании вихря ( $h/a=0.5$ ,  $Q=-63.3$  Кл,  $a=1$  км)

Осевая сила направлена от облака к земле. Непосредственно под зарядом она многократно усилена и приводит к образованию воронки вихря.

#### 4. ГИДРОДИНАМИКА ВИХРЯ. ВРАЩАЮЩАЯ СИЛА

Вихрь образуется в турбулентной температурно стратифицированной атмосфере, и эти факторы должны учитываться в уравнениях движения. В связи с этим они имеют довольно громоздкий вид и здесь не выписываются. Отметим только, что в них учитывается сильное различие радиальных и осевых градиентов полей, т.е. использовано приближение пограничного слоя [17]. Уравнение для радиального движения при этом интегрируется, и для давления в вихре получается следующее выражение:

$$\frac{p(r, z)}{p_\infty(z)} = \left[ \exp \left\{ -\gamma \int_r^\infty \frac{M_\phi^2(t, z)}{t} dt \right\} + \int_r^\infty \frac{dx}{p_\infty} \frac{j_z B_\phi}{c} \exp \left\{ -\gamma \int_r^x \frac{M_\phi^2(t, z)}{t} dt \right\} \right]$$

Здесь  $p_\infty$  – давление вдали от вихря;  $\gamma=1.4$  – показатель изэнтропы;  $M_\phi$  – вращательное число Маха. Давление внутри вихря, а с ним и плотность экспоненциально уменьшаются с увеличением скорости вращения. Для вращающей силы, отнесенной к единице массы, приведем упрощенное выражение для случая, когда влиянием радиальной силы Лоренца можно пренебречь:

$$\frac{F_\phi \rho_\infty}{F_{\phi,0} \rho} =$$

$$= \exp \left\{ \gamma \int_r^\infty \frac{M_\phi^2(t, z)}{t} dt \right\} \begin{cases} B_0 + \frac{4\pi}{c} \int_{R_T}^\infty \rho_d V_\phi dr, & 0 \leq r \leq R_T, \\ B_0 + \frac{4\pi}{c} \int_r^\infty \rho_d V_\phi dr, & R_T \leq r \leq R_E, \\ 0 & R_E \leq r \leq \infty. \end{cases}$$

Здесь  $F_{\phi,0} = -j_r B_0 / c$  – геомагнитная сила.

Видно, что вращательная сила экспоненциально увеличивается с ростом вращательного числа Маха. Т.е. здесь реализуется ситуация, типичная для неустойчивости. В этих условиях даже слабая геомагнитная сила способна раскрутить среду до больших скоростей. Естественно, что процесс раскручивания среды при этом должен рассматриваться в рамках нестационарной задачи, что выходит за рамки нашего рассмотрения. Стационарный режим вращения будет существовать лишь в условиях, когда при некотором значении скорости сила либо обратится в нуль, либо будет уравновешена вязкой силой. Первый вариант осуществляется в центральной части вихря (ядре), второй – в капельно-воздушной стенке, окружающей ядро.

#### 5. ЯДРО ВИХРЯ. СКОРОСТЬ СТАЦИОНАРНОГО ВРАЩЕНИЯ

Внутри капельного соленоида ( $0 \leq r \leq R_T$ ) магнитное поле постоянно. Постоянно здесь и вертикальная компонента геомагнитного поля, и при условии взаимной компенсации этих полей

$$B_0 = -\frac{4\pi}{c} \int_{R_T}^\infty \rho_d V_{\phi,w} dr$$

вращающая сила будет равна нулю. Для циклонического вращения ( $B_0 V_\phi > 0$ ) это условие

выполняется при  $\rho_d < 0$ . Для среднего (по сечению

капельной стенки) значения скорости вращения  $\bar{V}_\phi$  получаем

$$\bar{V}_\phi = \frac{c}{4\pi} \frac{B_0}{|\bar{\rho}_d| \delta},$$

где  $\delta$  – толщина стенки,  $\bar{\rho}_d$  – средняя объемная плотность капельного заряда. Оценки показывают, что плотность облачного заряда должна на четыре-пять порядков превышать плотности в неоднородностях грозových облаков, наблюдаемых в самолетных измерениях. Это есть одна из причин редкого появления смерчей при грозах.

Расчет радиального распределения давления в ядре проводился приближенно с использованием решения известной задачи о пограничном слое на вращающейся стенке (Рис.9).

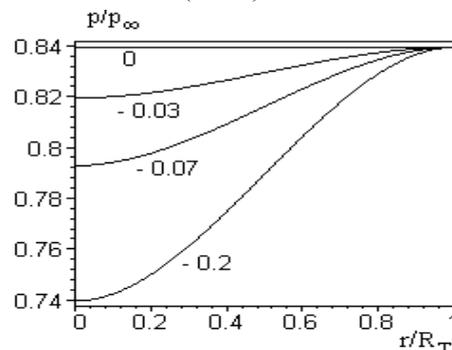


Рис.9. Радиальная зависимость относительного давления в ядре при различных значениях радиального магнитного параметра,  $M_\phi=0.5$

В отсутствие вращения в ядре существует лишь медленное конвективное движение, связанное с вертикальной температурной стратификацией атмосферы.

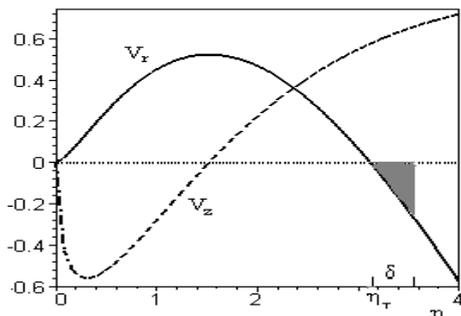


Рис.10. Радиальные распределения нормированных скоростей конвекции в ядре. Граница ядра определяется положением нуля радиальной скорости.

Область расположения капельной стенки затенена

Как показало решение соответствующей задачи, радиальная скорость этого движения не зависит от высоты, а вертикальная линейно растет с высотой. Радиальные распределения нормированных скоростей показаны на Рис.10.

Видно, что вблизи оси вихря воздух опускается, вблизи границы, наоборот, поднимается. Это движение сопровождается радиальным движением воздуха от центра к стенке ядра.

Для стационарного существования капельного солениода необходим механизм радиального удержания вращающихся капель. В работе показано, что удержание капель может быть осуществлено силой лобового сопротивления, возникающей при наличии встречного радиального потока. Уравнение равновесия радиальных сил, действующих на каплю радиуса, массы  $m$  и имеющей заряд  $q$ , имеет вид:

$$\frac{mV_{\varphi}^2}{r} + qE_r(r) = 6\pi a\mu V_r(r),$$

где  $\mu$  – коэффициент вязкости воздуха. Рис.11 дает представление о скоростях радиального потока, необходимых для остановки капель радиусом 0,45 и 0,55 мкм.

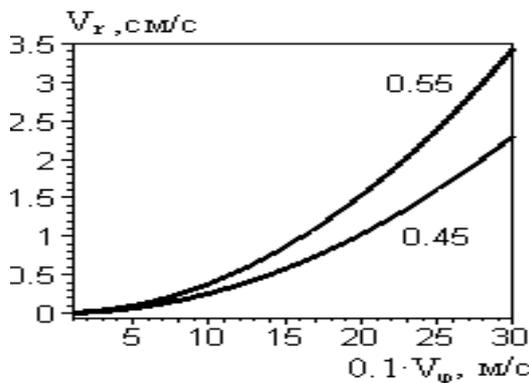


Рис.11. Зависимость скорости торможения капель от скорости вращения вихря

Ясно, что капельная стенка должна располагаться вблизи нулевого значения радиальной скорости в области отрицательных ее значений, как и показано на Рис.10. Толщина ее определяется

величиной дисперсии распределения капель по размерам.

## 6. СТЕНКА ВИХРЯ. КАСКАД

В стенке вихря вращающая сила отлична от нуля, но действие ее уравнивается силой вязкости. Задача нахождения полей здесь более сложная, чем для ядра, и приводится к системе двух интегродифференциальных уравнений от одной переменной. Решение ее показывает, что радиальная скорость направлена к центру вихря и не зависит от высоты.

Осевая скорость и скорость вращения положительны и растут с высотой линейно. Воздух вне ядра совершает ускоренное восходящее спиральное движение, что согласуется с наблюдениями. Радиальная структура скоростей показана на Рис.12. Скорость вращения убывает с радиусом сильнее, чем осевая и радиальная. Поэтому на расстоянии более половины радиуса ядра воздух уже не вращается, а быстро поднимается вверх. Скорость вертикального движения даже вблизи земли может достигать величины до десятка метров в секунду. Такой ветер способен поднимать вверх различные предметы, воду, образуя "каскад". Вне области каскада воздух медленно и с больших расстояний подтекает к вихрю.

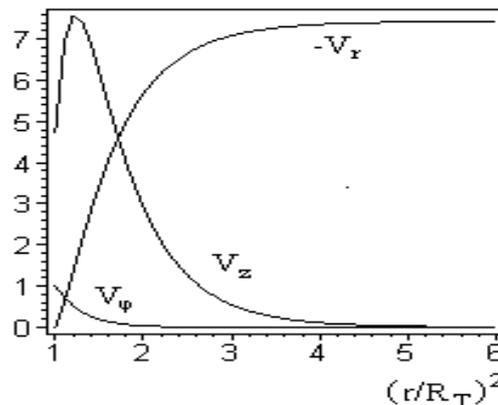


Рис.12. Радиальные зависимости нормированных скоростей движения вне ядра

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты находятся в достаточно хорошем качественном соответствии с данными наблюдений. Проведенные оценки указывают на достижимость необходимых величин облачных и капельных зарядов в реальной атмосфере. Относительная (на фоне гроз) редкость появления смерчей в рамках предлагаемой теории может быть объяснена редкостью образования сильных облачных зарядов на периферии грозовых облаков. Существенно и наличие излишней влажности атмосферного воздуха, мешающей возникновению газового разряда. Вихри должны отсутствовать там, где геомагнитное поле не имеет вертикальной компоненты. Такая ситуация имеет место на магнитном экваторе (широты  $\pm 15^\circ$ ). В районах Земли, характеризующихся максимальной смерчевой активностью (Средний Запад США,

Австралия), вертикальные компоненты геомагнитного поля, хотя и увеличены 0,4...0,55 Гс, но все-таки не сильно отличаются от аналогичных компонент в других районах 0,2...0,3 Гс. Здесь, по-видимому, основную роль играет взаимодействие холодного воздуха из полярных областей с теплым морским тропическим воздухом, создающее благоприятные условия для образования сильных облачных зарядов. В работе обсуждается также и возможность образования не только вертикальных, но и горизонтальных межоблачных вихрей в районах с заметной горизонтальной компонентой геомагнитного поля (Бермудские острова, 0,3 Гс). Проведенные в работе расчеты показывают, что токи в плазме вихря могут создавать азимутальное магнитное поле с напряженностью в сотни и даже более гаусс. Такое поле вполне способно вывести из строя навигационные приборы и может служить причиной различных несчастных случаев с кораблями и самолетами. Азимутальное магнитное поле вихря достаточно медленно убывает с расстоянием и может служить как для диагностики его свойств, так и для проверки предлагаемой теории.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н.В. Колобков. *Грозы и шквалы*. М. – Л.: ГИТТЛ, 1951.
2. Д.Т. Сноу // *В мире науки*. 1984, №6, с.44.
3. Д.В. Наливкин. *Смерчи*. М.: «Наука», 1984.
4. А.П. Хаин, Г.Г. Сутырин. *Тропические ураганы и их взаимодействие с океаном*. Л.: «Гидрометеиздат», 1983.
5. А.П. Хаин. *Математическое моделирование тропических циклонов*. Л.: «Гидрометеиздат», 1984.
6. Л.Н. Гутман // *Изв. АН СССР, Сер. геофиз.* 1957. №1, с.79.
7. В.В. Шулейкин // *Изв. АН СССР. Сер. физ. атм. и океана*. 1970, т.6, №12, с.1219.
8. В. Venneget // *J. Geophys. Res.* 1960, v.65, p.203.
9. T.C. Marshall, W.D. Rust, M. Stolzenburg // *J. Geophys. Res.* 1995, v.100, p.1001.
10. Е.У. Krasilnikov // *J. Geophys. Res.* 1997, v.102, p.13.571.
11. С.Н. Артеха, Е. Гольбрайх, Н.С. Ерохин // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2003, №4, с.9
12. А.Г. Боев, Н.Н. Ясницкая // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2006, №5, с.142.
13. В.М. Мучник. *Физика грозы*. Л.: «Гидрометеиздат», 1974.
14. И.М. Имянитов, Е.В. Чубарова, Я.М. Шварц. *Электричество облаков*. Л.: «Гидрометеиздат», 1971.
15. *Облака и облачная атмосфера*. Справочник / Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: «Гидрометеиздат», 1989.
16. Ф.М. Морс, Г. Фешбах. *Методы теоретической физики*. М.: ИЛ, 1960, т.2.
17. Л.Г. Лойцянский. *Ламинарный пограничный слой*. М.: «Физматгиз», 1962.

Статья поступила в редакцию 03.06.2008 г.

#### TORNADO PLASMA THEORY

*A.G. Boev*

The formation mechanism and plasma theory of tornado are proposed. Tornado is considered as a gas discharge. Electrical fields, currents, electromagnetic forces and velocities fields have been obtained.

#### ПЛАЗМОВА ТЕОРІЯ СМЕРЧА

*A.G. Boev*

Запропоновано механізм утворення та побудована плазмова теорія смерчу. Смерч розглядається як стаціонарний газовий розряд, що створюється крапельним хмарним зарядом. Знайдено електричні поля, струми, електромагнітні сили, поля швидкостей.