



УДК 533.9.03,533.52

© 2009

А. Г. Боев

Газоразрядная теория смерча

(Представлено академиком НАН Украины Л. Н. Литвиненко)

Пропонується електромагнітний механізм утворення смерчу. Смерч розглядається як контрольований прилипанням газовий розряд, що створюється в атмосфері сильним хмарним зарядом у присутності геомагнітного поля. Обертання середовища в ньому здійснюється електромагнітною силою Лоренца. Проведено розрахунок електричних, магнітних і гідродинамічних полів дозвукового вихору. Одержані результати якісно та кількісно відповідають даним спостережень.

1. Проблема понимания природы интенсивных атмосферных вихрей (смерчей, тайфунов), механизма их образования и источников их разрушительной силы является одной из сложнейших в физике атмосферы. Учитывая огромный материальный урон, наносимый ими ежегодно, эту проблему можно считать не только научной, но и общечеловеческой. Вместе с тем, несмотря на многие усилия и обширный наблюдательный материал, накопленный в течение почти двух веков, эта проблема до сих пор не решена.

Предлагаемый механизм предполагает одновременное существование трех элементов: а) сильного плоского облачного заряда на периферии грозового облака; б) достаточно сухой атмосферы под ним; в) геомагнитного поля. При этом смерч рассматривается как стационарный газовый разряд, контролируемый прилипанием, создаваемый в атмосфере электрическим полем облачного заряда в присутствии геомагнитного поля. Токи, текущие в плазме разряда, создают магнитные поля и электромагнитные силы (силы Лоренца), которые и приводят в движение атмосферу под зарядом. При этом появляется и вращающая сила. Она пропорциональна вертикальной компоненте геомагнитного поля.

2. Смерч представляет собой часть грозового облака [1], поэтому в теле смерча присутствуют и облачные капли. При вращении центробежная сила стремится выбросить капли на периферию, но этого не происходит, так как они останавливаются силой лобового сопротивления (силой Стокса [2]), создаваемой встречным радиальным потоком воздуха, сопровождающим вращение вихря. В результате капли начинают вращаться на некотором расстоянии от оси вихря, образуя капельную стенку. Толщина ее определяется степенью разброса капель по размерам. Внутренняя граница стенки R_T , как показывают расчеты, находится вблизи нулевого значения скорости радиального потока $V_r(R_T) \approx 0$.

Капли заряжены [3], поэтому при вращении они создают конвективный азимутальный ток $j_\varphi = \rho_d V_\varphi$ (ρ_d — плотность капельного заряда в теле вихря, V_φ — скорость вращения). Таким образом, капельная стенка представляет собой капельный соленоид. Магнитное поле соленоида внутри него постоянно и убывает до нуля на толщине стенки [4].

3. Математическая формулировка предлагаемого механизма включает в себя три связанные между собой задачи: электрическую, магнитную и гидродинамическую. В рамках электрической задачи на основе уравнения для электрического потенциала Φ

$$\Delta\Phi + \mu(\vec{\nabla}\ln\varsigma \cdot \vec{\nabla}\Phi) = -\frac{4\pi\rho_{d,0}}{\varepsilon}, \quad \vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi, \quad (1)$$

$$\mu \equiv \frac{\varsigma\partial\ln\varsigma}{\partial\varsigma}, \quad \varsigma \equiv \frac{E}{p}, \quad \varepsilon\left(\frac{E}{p}\right) \neq 0$$

и балансовых уравнений для концентрации и температур частиц [5] находится электрическое поле в плазме разряда и все ее параметры. В уравнении (1) E — напряженность электрического поля; p — давление; ε — диэлектрическая проницаемость плазмы; $\rho_{d,0}$ — плотность облачного заряда. При нормальном давлении уравнение (1) может быть линеаризовано почти без ограничений на концентрацию заряженных частиц. В конкретных расчетах облачный заряд моделировался круглым бесконечно тонким заряженным диском.

Процесс прилипания [5] электронов к молекулам воды и кислорода, характерный для атмосферы, допускает существование стационарного разряда лишь в достаточно сухой атмосфере [6]. Кроме того, этот процесс характеризуется большим пороговым полем горения, ниже которого разряд существовать не может. В неоднородном электрическом поле это приводит к возникновению у разряда пространственных границ.

4. По найденным токам ставится и решается задача определения магнитных полей. В цилиндрической системе координат r, φ, z , связанной с осью вихря, она сводится к решению следующих уравнений ($j_r = \sigma E_r, j_z = \sigma E_z, j_\varphi = \rho_d V_\varphi$, где j_r, j_z, j_φ — плотности токов, σ — проводимость плазмы):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial B_r}{\partial r} \right) - \frac{B_r}{r^2} + \frac{\partial^2 B_r}{\partial z^2} = \frac{4\pi}{c} \frac{\partial j_\varphi}{\partial z}, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial B_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} = -\frac{4\pi}{c} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r j_\varphi), \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial B_\varphi}{\partial r} \right) - \frac{B_\varphi}{r^2} + \frac{\partial^2 B_\varphi}{\partial z^2} = \frac{4\pi}{c} \left(\frac{\partial j_z}{\partial r} - \frac{\partial j_r}{\partial z} \right), \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_r) + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Здесь B_z описывает поле капельного соленоида, азимутальное магнитное поле B_φ определяется токами проводимости и может быть очень большим (достигать значений сотен и тысяч Гаусс). Кроме того, B_φ может изменять знак в зависимости от расстояния до заряда. Это связано со знакопеременностью правой части уравнения.

Компоненты силы Лоренца, действующей на плазму, находятся по следующим формулам:

$$F_r = -\frac{1}{c} j_z B_\varphi, \quad F_\varphi = -\frac{1}{c} j_r (B_0 + B_z), \quad F_z = \frac{1}{c} j_r B_\varphi, \quad (4)$$

где B_0 — вертикальная компонента геомагнитного поля, азимутальная компонента F_φ (вращающая сила) строится с учетом магнитного поля капельного соленоида B_z . Следует отметить, что радиальная F_r и вертикальная F_z компоненты силы могут менять направления

в зависимости от расстояния до заряда вместе с B_φ . Например, радиальная компонента вдали от заряда ($h/a > 0,72$, h — высота заряда, a — его радиус) приводит к сжатию плазмы как в Z -пинче, а вблизи заряда — к разрежению ее.

5. Вихрь образуется в турбулентной атмосфере, поэтому в качестве уравнений движения среды использовались осредненные уравнения гидродинамики с коэффициентом турбулентной вязкости. Они анализировались в приближении пограничного слоя ($\partial/\partial r \gg \partial/\partial z$, $V_r \ll \ll V_z$, V_φ). При этом плотность среды в вихре задается следующим выражением:

$$\frac{\rho(r, z)}{\rho_\infty(z)} = \frac{T_\infty}{T} \left[\exp \left\{ -\gamma \int_r^\infty \frac{M_\varphi^2(t, z)}{t} dt \right\} + \int_r^\infty \frac{dx}{p_\infty} \frac{j_z B_\varphi}{c} \exp \left\{ -\gamma \int_r^x \frac{M_\varphi^2(t, z)}{t} dt \right\} \right]. \quad (5)$$

Здесь ρ_∞ , p_∞ , T_∞ — плотность, давление и температура вдали от вихря; $\gamma = 1,4$ — показатель изэнтропы; M_φ — вращательное число Маха, определенное по скорости звука в невозмущенной атмосфере. Первое слагаемое в скобках описывает влияние центробежной силы, второе — радиальной компоненты силы Лоренца. Центробежная сила приводит к разрежению среды всегда, сила Лоренца — лишь под невысоким облаком. Вращающая сила, действующая на единицу массы среды, с учетом (5) и магнитного поля капельного соленоида имеет следующий вид:

$$\frac{F_\varphi}{\rho} = \frac{j_r \begin{cases} B_0 + \frac{4\pi}{c} \int_0^\infty \rho_d V_\varphi dr, & 0 \leq r \leq R_T, \\ B_0 + \frac{4\pi}{c} \int_r^{R_T} \rho_d V_\varphi dr, & R_T \leq r \leq R_E, \\ 0, & R_E \leq r < \infty. \end{cases}}{c \rho_\infty \frac{T_\infty}{T} \left[\exp \left\{ -\gamma \int_r^\infty \frac{M_\varphi^2(t, z)}{t} dt \right\} + \int_r^\infty \frac{dx}{p_\infty} \frac{j_z B_\varphi}{c} \exp \left\{ -\gamma \int_r^x \frac{M_\varphi^2(t, z)}{t} dt \right\} \right]}. \quad (6)$$

Интегралы в числителе описывают магнитное поле капельного соленоида. Верхняя строка в нем соответствует вращающей силе внутри капельного соленоида. Строки ниже — силе в его стенке и вне границы разряда R_E .

Анализ показывает, что сила (6) будет вызывать циклоническое вращение, если облачный заряд отрицательный. Кроме того, вращение не возникает там, где отсутствует вертикальная компонента геомагнитного поля, например, на магнитном экваторе. Далее, чем быстрее вращается вихрь, тем больше становится вращающая сила, действующая на него. Таким образом, здесь возникает ситуация, типичная для неустойчивостей. Под действием такой силы вихрь будет раскручиваться, пока не схлопнется. Для существования стационарных вихрей, наблюдаемых в природе, сила (6) должна быть чем-то компенсирована. И такую компенсацию частично осуществляет капельный соленоид. При отрицательных каплях и определенной скорости вращения магнитное поле капельного соленоида уничтожает внутри него вертикальную компоненту геомагнитного поля, а вместе с ней и вращающую силу. В результате, внутри капельного соленоида возникает невращающаяся область — ядро вихря. Вне ядра вращающая сила есть, но здесь она, вследствие радиальной неоднородности, компенсируется силой вязкости. Так возникает стационарный вихрь. Средняя

по сечению стенки скорость стационарного вращения его может быть оценена следующим образом:

$$\bar{V}_\varphi \approx \frac{cB_0}{2\pi|\rho_{d,0}|R_T}. \quad (7)$$

Здесь c — скорость света; $\rho_{d,0}$ — плотность облачного заряда. Для создания вихря со скоростью вращения $100 \sim 150$ м/с, радиусом $10 \sim 30$ м, в магнитном поле $(2 \div 5) \cdot 10^{-5}$ Тл необходима плотность облачного заряда $\rho_{d,0} \sim 10^{-3} \div 10^{-2}$ Кл/м³. Эта величина на 3–5 порядков превышает обычно наблюдаемые в самолетных и зондовых измерениях флуктуации облачного заряда [3]. Это есть, по-видимому, одна из причин относительно редкого появления смерчей на фоне большого числа гроз.

Расчет гидродинамических полей сводится к следующей системе уравнений (V_r , V_z — радиальная и вертикальная скорости, p — давление, g — ускорение свободного падения).

В области ядра и вне его ($0 \leq r < \infty$, $0 < z < h$, радиальное и осевое движения):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho V_r) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho V_z) = 0, \quad V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = \frac{F_z}{\rho} + \tilde{\nu} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right),$$

где

$$\frac{F_z}{\rho} \equiv -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g = \begin{cases} \int_1^\infty \frac{dt}{t} \frac{\partial V_\varphi^2}{\partial z}, & 0 \leq r \leq R_T, \\ \int_{r/R_T}^\infty \frac{dt}{t} \frac{\partial V_\varphi^2}{\partial z}, & R_T \leq r < \infty. \end{cases} \quad (8)$$

На оси вихря ($r = 0$): $V_r = 0$, $V_z < C$. Вдали от вихря ($r \rightarrow \infty$): $V_r, V_z \rightarrow 0$. Вне ядра ($R_T \leq r < \infty$, $0 < z < h$, вращение):

$$\frac{V_r}{r} \frac{\partial(rV_\varphi)}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} = \frac{F_\varphi}{\rho} + \tilde{\nu} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rV_\varphi)}{\partial r} \right).$$

Скорость вращения должна удовлетворять следующим условиям:

$$B_0 = \frac{4\pi}{c} \int_{R_T}^\infty |\rho_d| V_\varphi dr, \quad V_\varphi \rightarrow 0, \quad r \rightarrow \infty.$$

Эффективный коэффициент кинематической вязкости имеет вид

$$\tilde{\nu} = \nu_T \exp \left\{ \gamma \int_r^\infty \frac{M_\varphi^2(t, z)}{t} dt \right\}.$$

Здесь ν_T — кинематический коэффициент турбулентной вязкости. В случае дозвукового вихря с тонкой капельной стенкой и линейной зависимости радиального тока проводимости от высоты эта система уравнений сведена к системе обыкновенных интегро-дифференциальных уравнений, которая затем решалась численно. В разреженном ядре существует

медленное радиально-вертикальное движение, вне его — восходящее спиральное движение. Скорость вращения и скорость вертикального движения экспоненциально убывают при удалении от границы ядра. При этом скорость вращения характеризуется более сильным законом убывания, так как вращение, согласно (8), является источником вертикального и радиального движений. В результате, на некотором расстоянии от стенки ядра имеется интервал, где вращение почти отсутствует, а вертикальная скорость еще достаточно велика. Это область каскада. Для соотношения компонент скоростей получаем:

$$\frac{V_z}{V_\varphi} \approx 0,3, \quad \frac{V_r}{V_z} = \frac{R_T}{2h}.$$

При решении этой задачи определяется радиус ядра R_T и шаг спирального движения λ в стенке вихря:

$$R_T \sim \nu_T^{1/2} V_\varphi^{-1/2}, \quad \frac{\lambda}{R_T} \approx 1,86.$$

Для кинематического коэффициента турбулентной вязкости $\nu_T = 10 \text{ м}^2/\text{с}$ [7], высоты заряда 500 м и скорости вращения $V_\varphi = 150 \text{ м}/\text{с}$ получим: $R_T \approx 39,2 \text{ м}$, $V_z \approx 43 \text{ м}/\text{с}$, $V_r \approx 1,7 \text{ м}/\text{с}$.

Полученное распределение скоростей хорошо согласуется с картиной наблюдаемого движения в смерчах.

Согласно описанному механизму, возникновение и существование смерча определяется следующими факторами.

1. Сильным ($\rho_{d,0} \sim 10^{-3} \div 10^{-2} \text{ Кл}/\text{м}^3$), относительно низким ($h/a < 0,72$) периферийным облачным зарядом. Вихрь под отрицательным зарядом имеет циклоническое направление вращения.

2. Достаточно сухой атмосферой под зарядом и вертикальной компонентой геомагнитного поля B_0 .

3. Источником энергии вихря является облачный заряд. Электрическая энергия заряда радиусом 1 км и толщиной 10 м имеет порядок 10^{12} – 10^{14} МДж, мощность, развиваемая им в течение полчаса — $5 \cdot 10^8 \div 10^{10}$ МВт.

4. Среда приводится во вращение плазменно-геомагнитной силой $F_{\varphi,0} = -j_r B_0/c$, увеличенной радиальной компонентой силы Лоренца и центробежной силой.

5. Стационарный режим вращения вихря характеризуется образованием в нем капельного соленоида, состоящего из вращающихся заряженных капель. Магнитное поле соленоида уничтожает в центре вихря геомагнитное поле и вращающую силу, приводя к образованию невращающегося разрезанного ядра.

6. Положение границы ядра характеризуется нулевым значением радиальной скорости движения среды. Радиус ядра уменьшается с увеличением скорости вращения ($R_T \sim \sim V_\varphi^{-1/2}$), толщина капельной стенки определяется распределением капель по размерам.

7. Капли рассеивают свет и радиоволны, определяя видимый образ вихря. При малодисперсном распределении капель вихрь представляется в виде тонкого кругового цилиндра. В противном случае — в виде широкого кругового конуса.

8. Кроме вертикальных смерчей возможны и межоблачные (в том числе и горизонтальные) вихри с аналогичными свойствами.

9. Смерч характеризуется сильными, достаточно слабо убывающими с расстоянием электрическим и магнитным полями. Плазма разряда, образующего смерч, способна отражать

радиоволны сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Эти обстоятельства могут быть использованы для диагностики смерчей.

10. Проведенный анализ и корреляция с наблюдательными данными позволяют трактовать смерч как атмосферно-облачный газовый разряд.

1. *Наливкин Д. В.* Смерчи. – Москва: Наука, 1984. – 112 с.
2. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Механика сплошных сред. – Москва: ГИТТЛ, 1953. – 788 с.
3. *Имянитов И. М., Чубарова Е. В., Шварц Я. М.* Электричество облаков. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1971. – 92 с.
4. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. – Москва: Наука, 1966. – 624 с.
5. *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда. – Москва: Наука, 1987. – 592 с.
6. *Боев А. Г., Ясницкая Н. Н.* Холодный атмосферный разряд // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2006. – № 5. – С. 142–145.
7. *Матвеев Л. Т.* Курс общей метеорологии. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1976. – 640 с.

*Радиоастрономический институт
НАН Украины, Харьков*

Поступило в редакцию 07.11.2008

A. G. Bоеv

Gas discharge theory of tornado

An electromagnetic mechanism of the tornado formation is proposed. A tornado is considered as a gas discharge controllable by attachment which is created in the atmosphere by a strong cloudy charge in the presence of the geomagnetic field. The medium rotation is initiated by the electromagnetic Lorentz force. The calculation of the electrical, magnetic, and hydrodynamic fields of a subsonic whirlwind has been conducted. The obtained results correspond qualitatively and quantitatively to the observational data.