

## Особенности взаимодействия плазменных вихрей в атмосфере и ионосфере

Н.И. Ижовкина<sup>1</sup>, Н.С. Ерохин<sup>2</sup>, Л.А. Михайловская<sup>2</sup>, С.Н. Артеха<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, г. Троицк, Россия*

*E-mail: izhovn@izmiran.ru*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

По данным зондирования в атмосферной облачности наблюдаются электрические поля. В неоднородной гиротропной среде возникновение вихревых структур стохастически детерминировано. Гиротропия атмосферы и ионосферы вызвана действием силы Кориолиса и движением заряженных частиц в геомагнитном поле. В атмосфере наблюдаются вихри плазменной природы. Зарождение электрического поля плазменных вихрей возникает в полях градиентов давления мозаичной ячеистой топологии при ионизации частиц, связанной с солнечным фотонным потоком и космическим излучением. Важную роль в генерации атмосферных вихрей играют аэрозольные частицы. Показано, что геомагнитное поле влияет на структурные изменения неоднородной среды при возбуждении плазменных вихрей и их взаимодействии. При столкновениях вихрей с центром на одной геомагнитной силовой линии вероятно их слияние с образованием более мощного вихря. При столкновении вихрей с центром на разных геомагнитных силовых линиях возможно появление областей нагрева и струйных течений. Поскольку вихри переносят массу и энергию, в неоднородной области затухания плазменных вихрей вероятно зарождение новых вихрей.

**Ключевые слова:** гиротропия, плазменные вихри, геомагнитное поле, электрическое поле атмосферы, аэрозольные частицы, ионосфера

### Введение

Процесс зарождения вихрей стохастически детерминирован (Абурджания, 2006; Незлин и Черников, 1995; Моисеев и др., 1982, 1983; Ерохин и др., 2009; Artekha, Belyan, 2013; Михайловская и др., 2014, а, б; Ижовкина, 2014). В частности, перекачка энергии по спектру вихрей в сторону крупного масштаба приводит к появлению мощных вихрей, например, торнадо (Моисеев и др., 1982, 1983).

Влияние смога (включая водяной пар, смесь газообразных и взвешенных частиц – аэрозолей) естественного и антропогенного происхождения на физические параметры атмосферы отражается на изменениях погоды и климата. Он может стимулировать локальные обильные осадки, наводнения, рост блокирующих антициклонов. Неравномерное распределение смога приводит к появлению дополнительного фактора в формировании полей градиентов давления и образовании мощных вихревых структур. Мощные циклоны захватывают и переносят пыль и частицы песка. Аэрозоли влияют на атмосферные процессы (физико-химические, метеорологические, биологические), включая оптику атмосферы (Дейрменджан, 1971). Неравномерное распределение аэрозолей способствует неравномерному нагреву атмосферы, появлению локальных градиентов давления, зарождению и интенсификации вихрей (Ижовкина, 2014). Локальное накопление энергии и массы нелинейной структуры под воздействием параметров самой структуры характерно для плазменных вихрей в атмосфере. Образование мощных циклонов и антициклонов связано с генерацией плазменных вихрей. Плазменные вихри в атмосфере могут возбуждаться при неравномерном ячеистом распределении ионизованных частиц смога (Ижовкина, 2014).

Цель работы – показать, что динамика взаимодействия плазменных вихрей зависит от геомагнитного поля: возможно образование более мощного вихря, областей нагрева, струйных течений, зарождение новых вихрей и изменение траекторий вихрей. Струйные течения и более мощные вихри могут появляться и в ионосфере, чему способствует электростатическая неустойчивость плазмы верхней ионосферы.

### Влияние геомагнитного поля на взаимодействие плазменных вихрей

В отсутствие вертикального градиента давления падение аэрозольных частиц происходит со скоростью порядка скорости Стокса:

$$V_s = \frac{2 r_a^2 g (\rho_p - \rho_f)}{9 \eta}, \quad (1)$$

где  $V_s$  – установившаяся скорость частицы,  $r_a$  – радиус частиц,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\eta$  – динамическая вязкость среды,  $\rho_p, \rho_f$  – плотность частиц, плотность среды.

Особую роль в погоде и климате играют заряженные частицы Айткена с размерами  $r < 0,1$  мкм. Они могут удерживаться в атмосфере не только градиентами давления, но и электрическими полями. Ионизируются атмосферные частицы солнечным и космическим излучением (Бондур и др., 2008). Конвекция аэрозолей в верхние слои тропосферы и стратосферу может быть связана с образованием областей нагрева при затухании плазменных вихрей (вращающихся в скрещенных электрическом и магнитном полях плазменных структур). Влияние различных факторов на плазменные вихри многообразно.

Вокруг высоковольтных линий электропередач, ЛЭП, возникает магнитное поле, превышающее магнитное поле Земли. При постоянном токе возникают постоянные возмущения геомагнитного поля, для линий переменного тока – электромагнитные поля. На частоте  $\nu \sim 50$  Гц длина электромагнитных волн составляет  $\lambda = c / \nu \sim 6000$  км, поэтому ЛЭП в тысячи километров работает как антенна. С ростом напряжения нарастают потери мощности на коронные разряды вокруг проводов, излучающие электромагнитные шумы.

Зарождение плазменных вихрей возможно при ячеистом мозаичном нагреве и ионизации частиц (в том числе аэрозолей). При наличии градиентов давления аэрозоли вовлечены в воздушные потоки и могут переноситься на расстояния в тысячи километров. Аэрозоли наблюдаются даже в стратосфере на высотах  $\geq 30$  км (Дейрменджан, 1971). При конденсации влаги аэрозолями происходит интенсификация плазменных вихрей: увеличивается их скорость вращения и размеры (Ижовкина, 2014). На генерацию и устойчивость вихрей влияют акустико-гравитационные волны, постоянные электрическое и магнитное поле и излучение. При накоплении массы движущимся плазменным вихрем может достигаться состояние слабо устойчивого удержания вихрем облачной массы в поле силы тяжести, когда даже слабые внешние воздействия могут стимулировать выпадение осадков и угасание вихря или его усиление. В грозových фронтах наблюдаются мощные плазменные процессы.

Геострофические плазменные течения описываются уравнением:

$$\mathbf{j} = [\mathbf{B}_0 \times \nabla P]c / B_0^2 - [\mathbf{B}_0 \times \mathbf{g}](\rho c) / B_0^2, \quad (2)$$

которое следует при  $d\mathbf{v} / dt = 0$ ,  $\nu = 0$ ,  $\Omega_0 = 0$  из уравнения движения:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho c} [\mathbf{j} \times \mathbf{B}_0] + \mathbf{g} - 2[\Omega_0 \times \mathbf{v}] + \nu \Delta \mathbf{v}, \quad (3)$$

где  $P$  – давление,  $\mathbf{B}_0$  – напряженность магнитного поля,  $\mathbf{j}$  – плотность тока,  $\Omega_0$  – угловая скорость вращения Земли,  $\nu$  – коэффициент вязкости. Заряженные компоненты атмосферы находятся под воздействием гиротропии в геомагнитном поле и в поле вращения Земли. В плазменном вихре  $d\mathbf{v} / dt \neq 0$ , а вихрь отличается от геострофического течения.

Движение плазменных вихрей в поле крупномасштабных градиентов давления может привести к столкновениям вихрей с импульсами  $\mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{p}_2$  и изменениям струйной и вихревой структуры в атмосфере. Поскольку  $[\nabla \times \mathbf{p}_1] + [\nabla \times \mathbf{p}_2] = [\nabla \times (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)]$ , то возможно образование более мощного вихря, если вихри вращались в одном направлении. Это происходит при движении в полях градиентов давления вдоль геомагнитных силовых линий, если центр вихрей находился на одной геомагнитной силовой линии (рис. 1). При слиянии потоков в первом приближении  $\rho_1 \mathbf{v}_1 + \rho_2 \mathbf{v}_2 = \rho \mathbf{v}$ . Вихри, вращающиеся в противоположных направлениях, в данном случае отдают энергию в тепловое движение, и эффективно выживает более мощная вихревая структура. Столкновения вихрей связаны с изменениями электрического поля когерентных вихревых структур. Если центры сталкивающихся плазменных вихрей находятся на разных геомагнитных силовых линиях (рис. 1), в области столкновения возможен нагрев или образование струйных течений в зависимости от направления вращения вихрей. Потери энергии сталкивающихся вихрей на нагрев вызывают рост градиентов давления в области нагрева, что усиливает вертикальные потоки, выносящие аэрозоли в верхние слои тропосферы и стратосферу.

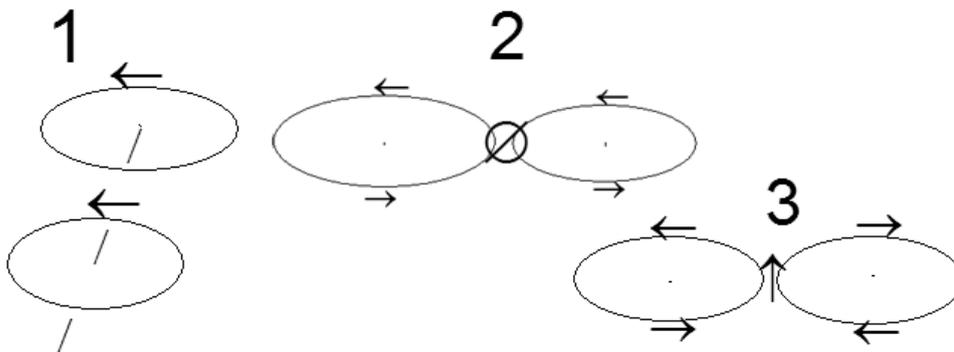


Рис. 1. Взаимодействие вихрей

При затухании электрического поля плазменных вихрей усиливается диффузия заряженных частиц поперек геомагнитного поля, поляризационный дрейф, который, например,

развивается в аэрозольной плазме облачности торнадо. Скорость поляризационного дрейфа составляет (Редерер, 1972):

$$v_d = m_{e,i} c^2 (\partial E_{\perp} / \partial t) / (q_{e,i} B^2), \quad (4)$$

где  $m_{e,i}$ ,  $q_{e,i}$  – масса и заряд электронов и ионов,  $E_{\perp}$  – компонент электрического поля, ортогональный внешнему магнитному полю,  $B$  – напряженность геомагнитного поля. При конденсации влаги на ионизованных частицах пыли аэрозоли становятся более тяжелыми, что влияет на скорость дрейфа. Захват частиц разного знака соседними вихревыми структурами при поляризационном дрейфе приводит к появлению разности потенциалов между облаками, между облаком и земной поверхностью или ионосферным слоем. Вероятно появление ионосферного следа грозовой облачности плазменных тропосферных вихрей. Возбуждение плазменных вихрей в неоднородной области нагрева может быть причиной появления спиральных струйных течений. Для эффективного взаимодействия вихри должны быть спиральными, объемными, т.е. не плоскими (Моисеев и др., 1982, 1983; Михайловская и др., 2014; Ижовкина, 2014). Взаимное разрушение структур циклонического и антициклонического типа зависит от их энергии. Эффективно выживает и сохраняет траекторию структура с большей энергией вихревого движения.

Потенциальную энергию вихря, связанную с накоплением влаги, можно оценить по количеству выпадающих осадков  $\Pi = Mgh$ , где  $M$  – масса выпавших осадков,  $h$  – средняя высота области формирования осадков. Так, при площади выпадения осадков  $S \sim 100 \text{ км}^2$ , толщине слоя осадков  $L \sim 1 \text{ см}$ ,  $h \sim 5 \text{ км}$ , потери энергии вихря  $\Delta\Pi \sim 10^{23}$  эрг.

Поскольку частота столкновений легких ионов, атомов и молекул при скорости ионов  $\sim 10^2 \text{ см/с}$ , концентрации  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и эффективном сечении столкновений  $\sim 10^{-16} \text{ см}^2$  составляет  $v_{in} \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$ , генерация плазменных вихрей связана преимущественно с ионами массивных крупных частиц – аэрозолей, что и наблюдается в грозовых фронтах и торнадо. Движение аэрозолей связано с градиентами давления. При градиентах давления, неравных нулю,  $\nabla P \neq 0$ , поле столкновений анизотропно, но вихрь  $[\nabla \times \mathbf{v}]$  сохраняется. При движении ортогонально геомагнитному полю в ячеистых мозаичных распределениях аэрозолей возбуждаются электрические поля и плазменные вихри. Происходит перекачка тепловой энергии неравномерного нагрева в плазменное вихревое движение в скрещенных электрическом поле вихря и геомагнитном поле.

Для вывода уравнения сохранения вихря используются уравнения движения и непрерывности в плоскости, ортогональной магнитному полю (ось  $z$ ), для ионного компонента плазмы;  $M$  – масса иона,  $\Omega_{oi}$  – циклотронная частота иона,  $u, v$  – компоненты скорости иона по осям  $x, y$ ,  $N$  – концентрация ионизованных частиц,  $\Phi$  – потенциал электрического поля. Используя  $z$ -компоненту ротора скорости  $\Omega' = v_x - u_y$ , имеем уравнение сохранения потенциальной завихренности для бесстолкновительной плазмы:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\Omega' + \Omega_{oi}}{N} \right) = 0. \quad (5)$$

Учитывая, что  $u = -e\Phi_y / (M\Omega_{0i})$ ,  $v = e\Phi_x / (M\Omega_{0i})$  и ротор дрейфовой скорости

$$\Omega' = v_x - u_y = e(\Phi_{xx} + \Phi_{yy}) / (M\Omega_{0i}), \quad (6)$$

из (5), дифференцируя, получаем уравнение потенциала плазменного вихря:

$$(\Delta\Phi)_t - \frac{e}{T} \Phi_t \Delta\Phi + \frac{e}{M\Omega_{0i}} \Delta\Phi \frac{e}{T} (\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \frac{\partial \ln T}{\partial y} - \Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \frac{\partial \ln T}{\partial x}) + \frac{e}{M\Omega_{0i}} J(\Phi, \Delta\Phi) = 0, \quad (7)$$

где  $J(\Phi, \Delta\Phi) = \Phi_x (\Delta\Phi)_y - \Phi_y (\Delta\Phi)_x$ . Для  $\Omega' \neq 0$  следует  $\Delta\Phi \neq 0$ . При  $\partial \ln T / \partial y \gg \partial \ln T / \partial x$ , с учетом  $\partial / \partial t = -v_{dw} \partial / \partial x$ , где  $v_{dw}$  – скорость дрейфа вихря, можно получить уравнение типа обобщенного уравнения Хасегава – Мимы, ОХМ-уравнение (Незлин и Черников, 1995):

$$\frac{\partial}{\partial x} [-v_{dw} \ln(\Delta\Phi) + \frac{e}{T} v_{dw} \Phi + \frac{e}{M\Omega_{0i}} \frac{e}{T} \frac{\partial \ln T}{\partial y} \frac{\Phi^2}{2}] + \frac{e}{M\Omega_{0i}} J(\Phi, \ln(\Delta\Phi)) = 0, \quad (8)$$

где  $J(\Phi, \ln(\Delta\Phi)) = \Phi_x (\ln(\Delta\Phi))_y - \Phi_y (\ln(\Delta\Phi))_x$ . При равенстве нулю первого слагаемого в (8) в нуль обращается и второе, связанное с векторной нелинейностью. Если функция в квадратных скобках в (8) не зависит от  $x$ , член, связанный с векторной нелинейностью, равен нулю. В отличие от вывода ОХМ-уравнения, предполагалась однородность плазмы при  $\Phi = 0$ . При  $\Omega' \neq 0$  наложение дипольного температурного возмущения позволило выделить условия, при которых дисперсия и нелинейность Кортевега – де-Вриза взаимно скомпенсированы. При этом и векторная нелинейность обращается в нуль.

Уравнение вихревой структуры не зависит от массы иона, но зависит от заряда. Ионы, различные по массе, но с одинаковым зарядом могут быть вовлечены в самосогласованное движение. Возмущения и неоднородность геомагнитного поля вызывают расстройтва плазменных вихрей. Многократная ионизация частиц также может быть причиной затухания вихрей и зарождения новых вихрей.

Для электрического поля плазменного вихря имеем:

$$\mathbf{E} = \ln(N / N_0)(\nabla T) / e + (T / e)\nabla \ln N, \quad (9)$$

скорость вращения частиц плазмы в скрещенных полях:

$$\mathbf{V}_d = [c / (eB^2)] \{ \ln(N / N_0)[\nabla T \times \mathbf{B}] + T[\nabla \ln N \times \mathbf{B}] \}, \quad (10)$$

если для самосогласованного плазменного вихря концентрация частиц, температура электронного компонента  $T$  и потенциал электрического поля связаны распределением Больцмана (Незлин и Черников, 1995). Плотность энергии электрического поля вихря:

$$W_1 = (8\pi e^2)^{-1} \{ \ln(N / N_0)\nabla T + T\nabla \ln N \}^2, \quad (11)$$

где распределение концентрации частиц  $N = N_0 \exp(e\Phi / T(y))$ . В сохранении вихревой структуры важную роль играет однородность геомагнитного поля. В реальных геофизических условиях это требование не выполняется при пересечении поверхности геомагнитного экватора и при геомагнитных возмущениях – от них зависит скорость частиц и, следовательно, скорость увеличения массы аэрозолей при конденсации влаги. Потери плотности энергии плазменного вихря при его затухании составляют  $\sim W_1$ . При захвате вихрем нейтральных частиц нарастает масса плазменного вихря, замедляется скорость его вращения при сохранении импульса и энергии в вихревой структуре. Аэрозольную плазму можно рассматривать как пылевую плазму (столкновениями аэрозолей между собой пренебрегаем). Аэрозольная масса удерживается в атмосфере градиентами давления и электрическим полем, зависящим от градиентов температуры и плотности. Пакеты акустико-гравитационных волн при распространении вверх могут вызвать колебания давления на фоне неустойчивого захвата облачной массы  $\nabla P / \rho \sim g$  и, соответственно, осадки. Акустико-гравитационные возмущения в атмосфере могут нарастать на градиентах плотности атмосферы и градиентах скорости ветра (Hines, Reddy, 1967; Gdalevich et al., 1998). Их траектория от тропосферы к ионосфере зависит от параметров атмосферы и имеет сложный вид (Ерохин и др., 2012).

Оценим остаточный пробег ионов аэрозолей при столкновениях с легкими нейтральными частицами. Это несложно сделать при конденсации влаги аэрозолями при их столкновениях с молекулами воды. По закону сохранения импульса:  $m_{a0} \mathbf{v}_{a0} = m_c \mathbf{v}_c$ , где  $m_{a0}, m_c$  – массы сухого иона и конденсата соответственно; если при замедлении в результате столкновений  $v_c \sim 10^{-1} v_{a0}$ , то получаем  $m_c \sim 10 m_{a0}$ . Предположим, что ортогональное скорости сечение аэрозоля при конденсации влаги не меняется и равно начальному сечению  $s_c = s_a$ , аэрозольная частица растет только вдоль скорости движения. Остаточный пробег оценивается по формуле  $l_a \sim 9m_a / (m_n N_n s_a)$ . Для аэрозоля с размерами  $r_a \sim 0,1$  см и массой  $m_a \sim 10^{-3}$  г,  $l_a \sim 10^4$  см ( $m_n \sim 10^{-23}$  г – масса молекул воды), а при размерах  $r_a \sim 10^{-4}$  см и массе  $m_a \sim 10^{-12}$  г, остаточный пробег составляет  $l_a \sim 10$  см. Это много больше свободного пробега легких частиц (атомов, молекул, ионов).

Представленную модель можно использовать при столкновениях аэрозоля с легкими нейтральными частицами различного химического состава в атмосфере. Имеем:

$$\mathbf{v}_c = (m_{a0} \mathbf{v}_a + \sum_n m_n \mathbf{v}_n) / (m_{a0} + \sum_n m_n), \quad (12)$$

$$m_{a0} \mathbf{v}_{a0} = m_{a0} \mathbf{v}_a + \sum_n m_n \mathbf{v}_n = (m_{a0} + \sum_n m_n) \mathbf{v}_c, \quad (13)$$

предполагая  $\mathbf{v}_c \sim 10^{-1} \mathbf{v}_{a0}$ , получим:

$$m_{a0} + \sum_n m_n = 10 m_{a0}. \quad (14)$$

Поскольку  $\sum_n m_n = l_a s_a N_n m_n$ , из (14) следует:

$$m_{a0} + l_a s_a N_n m_n = 10 m_{a0}. \quad (15)$$

При рассмотрении кластера остаточный пробег аэрозоля  $l_a$  можно оценить по модели, аналогичной модели с водяным паром. Столкновениями между аэрозолями пренебрегаем. Оценки показывают, что аэрозольная частица с размерами  $r_a \sim 10^{-4}$  см ускоряется до половины скорости потока  $10^3$  см/с за время  $\tau_a \sim 10^{-3}$  с.

Повышенная грозовая активность может быть связана с областями нагрева, с затуханием электрических полей и разделением зарядов при поляризационном дрейфе. Для генерации структуры плазменного вихря необходимо зарождение электрического поля, ортогонального геомагнитному полю. Дополнительный возможный механизм – затухание электростатических колебаний в неоднородной плазме (Ижовкина, 2010).

Неравномерное распределение оптической толщины атмосферы приводит к усилению градиентов давления при нагреве и ионизации атмосферы. Расчеты спектральной зависимости оптической толщины  $\tau(\lambda)$  для разнообразных аэрозольных ансамблей представлены в работе (Кузнецов и Ижовкина, 1973). Распределения аэрозолей по размерам, составу и высоте изменчивы в пространстве и во времени.

Для масс-энергетического переноса при эволюции циклонических образований:

$$\frac{d}{dt} \int_Q \left( \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + \frac{E^2}{8\pi} \right) d\mathbf{r} = I_1 - I_2, \quad (16)$$

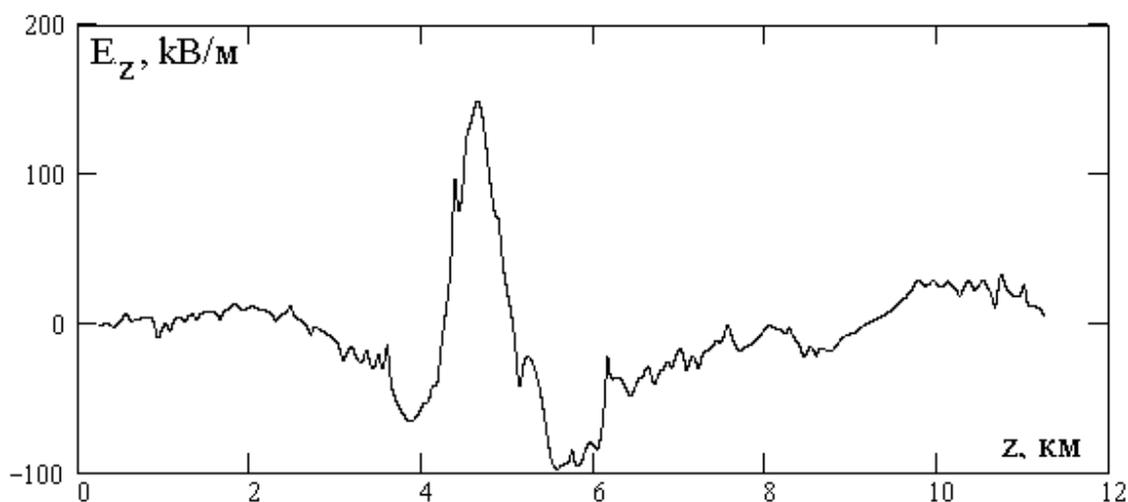
где:  $Q$  – эффективный изменяющийся объем циклона,  $h$  – расстояние от центра Земли,  $E$  – итоговая напряженность электрического поля. Скорость накопления энергии  $I_1$  зависит от увеличения плотности и скорости захваченной аэрозольной и воздушной масс, поглощения всех видов излучений и волн. Скорость потерь энергии  $I_2$  связана с выпадением осадков, излучением волн. Влияние неоднородного и непостоянного магнитного поля на эволюцию вихрей существенно. При перемещении ионизованного облака поперек геомагнитного поля со скоростью торнадо  $\sim 100$  км/час поле динамо составляет  $E \sim vB/c \sim 10^{-3}$  В/м, что существенно ниже полей в грозовых фронтах. Мощные атмосферные вихри – торнадо – имеют природу плазменного вихря, что подтверждают электрические разряды, связанные с разделением заряда и ростом электрических полей до величин пробоя. Заряды облаков составляют десятки и сотни кулон, а напряженность достигает величин  $E \sim 10^5$  В/м (Михайловская и др., 2014, а, б).

В областях пониженной плотности плазмы электростатические колебания затухают при переходе в режим вынужденных возмущений. При этом могут прогреваться области пониженной плазменной плотности любых размеров (Ижовкина 2010). Это связано с сокращением объема собственных электростатических мод в пространстве  $(\omega, \mathbf{k})$  при уменьшении плотности замагниченной плазмы. Электростатические колебания могут возбуждаться (Михайловский, 1977): на дрейфовых градиентных неустойчивостях плазмы, когда  $\nabla N \uparrow \downarrow \mathbf{g}$ ; возможно развитие гидродинамической неустойчивости с инкрементом  $\gamma \sim g \partial \ln(N) / \partial y$ , а также гравитационно-диссипативной неустойчивости:

$$\omega = \omega_{ni} + g\kappa / \omega_{ni}, \quad \gamma = (\gamma_0 / \omega_{ni})^2 z_i v, \quad (17)$$

$$\omega_{ni} = k_y \kappa c T_i / e_i B, \quad \gamma_0 = \sqrt{g\kappa}, \quad \kappa = \partial \ln N / \partial x, \quad z_i = k_{\perp}^2 T_i / (m_i \Omega_i^2), \quad v \sim (0.1-1) v_{ii}, \quad \mathbf{x} \uparrow \downarrow \mathbf{g}, \quad \mathbf{z} \parallel \mathbf{B}.$$

Отметим, что даже для ионосферы возможно влияние примеси тяжелых ионов, железа и магния (Narcisi, Szuszczewicz, 1981) на инкремент роста гравитационно-диссипативной неустойчивости в области критических частот и высот для  $F$ -рассеяния. Характерные масштабы плазменных структур видны из *рис. 2*, где представлены данные электромагнитного зондирования грозовой облачности (видны сильные колебания плотности зарядов). Такие поля могут способствовать генерации интенсивных ветровых потоков в атмосфере и усилению слабых плазменных вихрей.



*Рис. 2. Высотный профиль электрического поля в грозовой облачности*

### Заключение

Возбуждение плазменных вихрей усиливается при нарастании концентрации аэрозолей и потоков ионизирующего излучения. Вынос аэрозолей, в частности частиц Айткена, в верхние слои тропосферы и стратосферу приводит к увеличению времени жизни аэрозолей в атмосфере и их влияния на погоду и климат. При затухании электрического поля плазменных вихрей нарастает грозовая активность. Нарастание концентрации аэрозолей способствует интенсификации плазменных вихрей, локальному накоплению массы и энергии вихря при конденсации влаги.

Геомагнитное поле влияет на формирование мощных плазменных вихрей при взаимодействии слабых вихрей. Столкновение вихрей, вращающихся в одну сторону с центрами на одной геомагнитной силовой линии, приводит к их слиянию и образованию более мощного вихря. Столкновения вихрей с центром на разных геомагнитных силовых линиях ведет к изменению их траекторий, образованию областей нагрева и струйных течений. В поле градиентов давления в областях нагрева возможно зарождение новых вихрей. При столкновении плазменных вихрей области нагрева струйные течения и более мощные вихри могут появляться и в ионосфере, а электростатическая неустойчивость плазмы верхней ионосферы способствует генерации плазменных вихрей.

## Литература

1. *Абурджания Г.Д.* Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диспергирующих средах. М.: КомКнига, 2006. 328 с.
2. *Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А.* О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина // ДАН. 2008. Т. 422. № 2. С. 244–249.
3. *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 166 с.
4. *Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Шалимов С.А.* Об условиях прохождения внутренних гравитационных волн через ветровые структуры из тропосферы в ионосферу // Геофизические процессы и биосфера. 2012. Т. 11. № 4. С. 5–22.
5. *Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А.* Структурные особенности электрической турбулентности атмосферы при наличии когерентных структур // Сборник трудов международной конференции MSS-09 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность». М.: Ленанд. 2009. С. 424–479.
6. *Ижовкина Н.И.* Потоки энергии и частиц в неустойчивой плазме с вихревыми структурами в верхней ионосфере в неоднородном геомагнитном поле // Геомагнетизм и аэрномия. 2010. Т. 50. № 6. С. 817–824.
7. *Ижовкина Н.И.* Плазменные вихри в ионосфере и атмосфере // Геомагнетизм и аэрномия. 2014. Т. 54. № 6. С. 817–828.
8. *Кузнецов Г.И., Ижовкина Н.И.* Две модели атмосферного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9. № 9. С. 947–952.
9. *Михайловская Л.А., Ерохин Н.С., Краснова И.А., Артеха С.Н.* Структурные характеристики электрической турбулентности при вертикальном профиле электрического поля с сильным всплеском // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014-а.Т. 11. № 2. С. 111–120.
10. *Михайловская Л.А., Ерохин Н.С., Краснова И.А., Артеха С.Н.* Структурные характеристики электрической турбулентности в грозовой облачности // Сборник трудов международной конференции MSS-14 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность». М.: Ленанд, 2014-б. С. 424–429.
11. *Михайловский А.В.* Теория плазменных неустойчивостей. Т.2. Неустойчивости неоднородной плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 312 с.
12. *Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Яновский В.В.* Об интегралах в замороженности и лагранжевых инвариантах в гидродинамическом приближении // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. № 1 (7). С. 215–226.
13. *Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Яновский В.В.* Теория возникновения крупномасштабных структур в гидродинамической турбулентности // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. № 6 (12). С. 1979–1987.
14. *Незлин М.В., Черников Г.П.* Аналогия дрейфовых вихрей в плазме и геофизической гидродинамике // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 11. С. 975–999.
15. *Редерер Х.* Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем. М.: Мир, 1972. 192с.
16. *Artekha S.N., Belyan A.V.* On the role of electromagnetic phenomena in some atmospheric processes // Nonlinear Processes in Geophysics. 2013. Vol. 20. P. 293–304.
17. *Gdalevich G.L., Gubsky V.F., Izhovkina N.I., Ozerov V.D.* Experiment and theory of plasma inhomogeneities in mid-latitude ionosphere // J. Atmosph. Terr. and Solar Terrestrial Physics. 1998. Vol. 60. No. 2. P. 247–252.
18. *Hines C.O., Reddy C.A.* On the propagation of atmospheric gravity waves through regions of wind shear // J. Geophys. Res. 1967. Vol. 72. No. 3. P. 1015–1034.
19. *Narcisi R.S., Szuszczewicz E.P.* Direct measurements of electron density, temperature and ion composition in an equatorial spread-F ionosphere // J. Atmosph. Terr. Phys. 1981. Vol. 43. No. 5/6. P. 463–471.

# Features of interaction of plasma vortices in the atmosphere and ionosphere

N.I. Izhovkina<sup>1</sup>, N.S. Erokhin<sup>2</sup>, L.A. Mikhailovskaya<sup>2</sup>, S.N. Artekha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Russia  
E-mail: izhovn@izmiran.ru*

<sup>2</sup>*Space Research Institute RAS, Moscow, Russia*

Electric fields are observed according to the investigation of atmospheric clouds. In an inhomogeneous gyrotropic medium occurrence of vortex structures is stochastically determined. Gyrotropy of atmosphere and ionosphere is caused by the Coriolis force and the motion of charged particles in the geomagnetic field. Vortices of plasma nature are registered in the atmosphere. The origin of the electric field of plasma vortices occurs in the fields of pressure gradients mosaic mesh topology is conditioned by the ionization of particles associated with the solar photon flux and the cosmic radiation. Atmospheric aerosol particles play an important role in generation of vortices. It is shown that the geomagnetic field produces structural changes of an inhomogeneous medium with excitation of plasma vortices and their interaction. During collisions of vortices centered on the same geomagnetic line one powerful vortex can occur. The collision of vortices with centers at different geomagnetic field lines may cause appearance of areas of heating and jet streams production. Since vortices transfer mass and energy, generation of new vortices in an inhomogeneous field of the plasma vortices damping is possible.

**Keywords:** gyrotropy, plasma vortices, the geomagnetic field, electric fields of the atmosphere, aerosol particles, ionosphere

## References

1. Aburdzhania G.D., *Samoorganizatsiya nelineinykh vikhrevykh struktur i vikhrevoi turbulentnosti v dispergiruyushchikh sredakh* (Self-organizing nonlinear vortex structures and vortex turbulence in dispersive media), Moscow: KomKniga, 2006, 328 p.
2. Bondur V.G., Pulnits S.A., Kim G.A., O roli variatsii galakticheskikh kosmicheskikh luchei v tropicheskom tsiklogeneze na primere uragana Katrina (On the role of variations of galactic cosmic rays in tropical cyclogenesis on the example of Hurricane Katrina), *DAN*, 2008, Vol. 422, No. 2, pp. 244–249.
3. Deirmendjian D., *Rasseyaniye elektromagnitnogo izlucheniya sfericheskimi polidispersnymi chastitsami* (Electromagnetic scattering on spherical polydispersions), Moscow: Mir, 1971, 166p.
4. Erokhin N.S., Mikhailovskaya L.A., Shalimov S.A., Ob usloviyakh prokhozheniya vnutrennikh gravitatsionnykh voln cherez vetrovye struktury iz troposfery v ionosferu (On the conditions of internal gravity waves passing through the wind structure from the troposphere to the ionosphere), *Geofizicheskie protsessy i biosfera*, 2012, Vol. 11, No. 4, pp. 5–22.
5. Erokhin N.S., Zol'nikova N.N., Mikhailovskaya L.A., Strukturnye osobennosti elektricheskoi turbulentnosti atmosfery pri nalichii kogerentnykh struktur (Structural features of electrical atmospheric turbulence in the presence of coherent structures), *International Conference MSS-09 "Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence"*, Proc. Conf., Moscow: Lenand, 2009, pp. 424–479.
6. Izhovkina N.I., Potoki energii i chastits v neustoichivoi plazme s vikhrevymi strukturami v verkhnei ionosfere v neodnorodnom geomagnitnom pole (Energy and particle flows in the unstable plasma with vortex structures in the upper ionosphere in an inhomogeneous geomagnetic field), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2010, Vol. 50, No. 6, pp. 817–824.
7. Izhovkina N.I., Plazmennyye vikhri v ionosfere i atmosfere (Plasma vortices in the ionosphere and atmosphere), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2014, Vol. 54, No. 6, pp. 817–828.
8. Kuznetsov G.I., Izhovkina N.I., Dve modeli atmosfernogo aerolya (Two models of atmospheric aerosol), *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1973, Vol. 9, No. 9, pp. 947–952.
9. Mikhailovskaya L.A., Erokhin N.S., Krasnova I.A., Artekha S.N., Strukturnyye kharakteristiki elektricheskoi turbulentnosti pri vertikal'nom profile elektricheskogo polya s sil'nym vspleskom (Structural characteristics of electrical turbulence for vertical profile of electric field with a strong splash), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 111–120.
10. Mikhailovskaya L.A., Erokhin N.S., Krasnova I.A., Artekha S.N., Strukturnyye kharakteristiki elektricheskoi turbulentnosti v grozovoi oblachnosti (Structural characteristics of electrical turbulence in storm clouds), *International Conference MSS-14 "Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence"*, Proc. Conf., Moscow: Lenand, 2014, pp. 424–429.
11. Mikhailovskii A.V., *Teoriya plazmennyykh neustoichivostei. T.2. Neustoichivosti neodnorodnoi plazmy* (Theory of plasma instabilities. Vol. 2. Instability of an inhomogeneous plasma), Moscow: Atomizdat, 1977, 312 p.
12. Moiseev S.S., Sagdeev R.Z., Tur A.V., Yanovskii V.V., Ob integralakh vmorozhennosti i lagranzhevyykh invariantakh v gidrodinamicheskom priblizhenii (On frozen-in integrals and Lagrangian invariant in the hydrodynamic approximation), *ZhETF*, 1982, Vol. 83, No. 1(7), pp. 215–226.

13. Moiseev S.S., Sagdeev R.Z., Tur A.V., Yanovskii V.V., Teoriya vozniknoveniya krupnomasshtabnykh struktur v gidrodinamicheskoi turbulentnosti (The theory of large-scale structures origin in hydrodynamic turbulence), *ZhETF*, 1983, Vol. 85, No. 6(12), pp. 1979–1987.
14. Nezlin M.V., Chernikov G.P., Analogiya dreifovykh vikhrei v plazme i geofizicheskoi gidrodinamike (The analogy of drift vortices in the plasma and geophysical hydrodynamics), *Fizika plazmy*, 1995, Vol. 21, No. 11, pp. 975–999.
15. Roederer J.G., *Dynamics of geomagnetically trapped radiation*, Moscow: Mir, 1972, 192 p.
16. Artekha S.N., Belyan A.V., On the role of electromagnetic phenomena in some atmospheric processes, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2013, Vol. 20, pp. 293–304.
17. Gdalevich G.L., Gubsky V.F., Izhovkina N.I., Ozerov V.D., Experiment and theory of plasma inhomogeneities in mid-latitude ionosphere, *J. Atmosph. Terr. and Solar Terrestrial Physics*, 1998, Vol. 60, No. 2, pp. 247–252.
18. Hines C.O., Reddy C.A., On the propagation of atmospheric gravity waves through regions of wind shear, *J. Geophys. Res.*, 1967, Vol. 72, No. 3, pp. 1015–1034.
19. Narcisi R.S., Szuszczewicz E.P., Direct measurements of electron density, temperature and ion composition in an equatorial spread-F ionosphere, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 1981, Vol. 43, No. 5/6, pp. 463–471.