

## Влияние солнечного и галактического космического излучения на атмосферные вихревые структуры

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

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

*E-mail: izhovn@izmiran.ru*

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

Атмосфера Земли находится под воздействием тепловых и ионизирующих источников. Загрязнения атмосферы, в частности, аэрозоли, влияют на нагрев атмосферы, ионизируются, конденсируют влагу. Гиротропия атмосферы связана с влиянием на движение частиц силы Кориолиса, а для заряженных частиц в геомагнитном поле – с влиянием силы Лоренца. Источники взвешенных частиц – аэрозолей разнообразны. В ячеистых пространственных распределениях ионизованных аэрозолей возбуждаются плазменные вихри. Максимум ионизации атмосферных частиц космическими лучами соответствует высотам образования тропосферной облачности. Конденсация влаги на аэрозольных частицах при ионизации частиц усиливается, поскольку эти частицы гидрофильны. Важная роль аэрозольной примеси проявляется в генерации плазменных вихрей и накоплении вихрями энергии и массы в атмосфере при конденсации влаги. Генезис циклонов и антициклонов связан с нелинейными взаимодействиями гидродинамических и магнитогиродинамических структур. Взаимодействие с плазменными вихрями происходит на роторном уровне. Поскольку процесс образования ионизирующих частиц – каскадный, то влияние космического излучения на вихревые атмосферные процессы оказывается существенно нелинейным. Влияние ионизирующих солнечных и галактических космических лучей на динамику плазменных атмосферных вихрей усиливается с нарастанием загрязнений атмосферы.

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

*Одобрена к печати: 07.02.2017*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-209-220*

### Введение

При дистанционном зондировании атмосферной облачности наблюдаются сильные электрические поля. В неоднородной гиротропной среде возникновение вихревых структур стохастически детерминировано (Абурджания, 2006; Незлин, Черников, 1995; Моисеев и др., 1983; Artekha, Belyan, 2013; Михайловская и др., 2014; Ижовкина, 2014). Гиротропия атмосферы и ионосферы связана с действием силы Кориолиса при вращении Земли и движением заряженных частиц в геомагнитном поле. В атмосфере наблюдаются вихри плазменной природы. Ионизируются частицы атмосферы потоками фотонов, протонов, ионов, электронов и другими частицами, образующимися при разрушении ядер космическими лучами. Процесс ионизации компонентов атмосферы энергичными частицами космических лучей – каскадный, число ионизирующих частиц при разрушении ядра атома многократно нарастает. Отметим, что энергичная частица космических лучей производит порядка миллиона и более актов ионизации в атмосфере. Зарождение электрического поля плазменных вихрей возникает в полях градиентов давления мозаичной ячеистой топологии при ионизации частиц. Немонотонное расслоение неустойчивых плазменных неоднородностей приводит к образованию в атмосфере ячеистых структур. Важную роль в генерации атмосферных вихрей играют аэрозольные частицы (Бондур, Пулинец, 2012; Карелин, 2009). Влияние ионизирующего солнечного и космического излучения на атмосферную вихревую

активность усиливается с нарастанием загрязнений атмосферы. В грозовых фронтах наблюдаются мощные плазменные процессы. Взаимодействие плазменных спиральных токовых вихрей определяется величиной и направлением магнитных моментов вихрей и геометрическими параметрами их распределения в пространстве.

Влияние силы Кориолиса на атмосферные движения оценивают по числу Россби – отношению силы инерции  $v\nabla v \sim U^2/L$  к силе Кориолиса  $f = 2[\Omega_E \times v] = 2\Omega_E \sin \phi$ :  $R_0 = U / Lf$ , где  $\Omega_E, U, L, \phi$  – угловая скорость вращения Земли, характерная скорость частиц, масштаб движения и географическая широта соответственно (Pedlosky, 1987; Monin, 1990). Для торнадо влияние силы Кориолиса мало:  $R_0 \sim 10^3$ . Возникает баланс между градиентом давления и центробежной силой – циклострофический баланс. Подобные структуры генерируются преимущественно в атмосфере низких широт, где при конденсации влаги происходит локальное накопление энергии таких структур. Для циклонов справедлива оценка  $R_0 \sim 0,1-1$ , поэтому центробежная сила мала и возможен баланс между градиентом давления и силой Кориолиса – геострофический баланс. Циклоны и торнадо взаимодействуют с плазменными атмосферными вихрями.

Плазменные атмосферные вихри представляют собой нелинейные структуры ячеистой топологии, а ионизация атмосферы внешними источниками – необходимое условие возбуждения плазменных вихрей. Образование соединений азота и кислорода связано с ионизацией компонентов атмосферы частицами солнечного и галактического происхождения. Как известно, концентрация этих соединений в толще ледников и полярных шапках зависит от циклов солнечной активности (Miroshnichenko, 2001). Взаимодействие космических частиц высоких энергий с ядрами компонентов атмосферы приводит также к образованию радионуклидов. Так изотоп углерода  $^{14}\text{C}$  по отложениям в органических соединениях позволяет обнаружить следы вторжений в атмосферу космических частиц высоких энергий. Галактические космические лучи – поток заряженных частиц, в основном протонов, в диапазоне энергий 100 МэВ – 100 ГэВ и более, проникающих в солнечную систему из межзвездного пространства. В космических потоках наблюдаются ядра атомов с зарядом ядра до  $z \sim 30$ .

Плазменный вихрь можно представить как МГД – генератор ячеистой топологии (Ижовкина и др., 2015, 2016; Izhovkina et al., 2016). МГД-генератор – устройство для перекачки кинетической энергии плазменного потока, направленного ортогонально магнитному полю в электрическую энергию. Влияние вязкости атмосферы существенно в пограничных слоях. Аэрозольная примесь важна для генерации атмосферных вихрей. Ячеистое мозаичное распределение аэрозолей образуется при развитии электростатических неустойчивостей неоднородной плазмы. Локальное накопление энергии и массы нелинейной структуры под воздействием параметров самой структуры (интенсификация структуры) характерна для плазменных вихрей в атмосфере. Гидродинамическая гиротропия атмосферы, возбуждение волн и вихрей Россби связаны с широтной зависимостью силы Кориолиса. Волны и вихри Россби, крупномасштабные (с размерами порядка 1000 км) возмущения, взаимодействуют с плазменными вихрями. В усилении плазменных вихрей важную

роль играет конденсация атмосферной влаги аэрозольными частицами и скрытое тепло (Ижовкина, 2014; Ижовкина и др., 2015; Izhovkina et al., 2016).

Цель настоящей работы – показать, что атмосферные циклоны и антициклоны взаимодействуют с плазменными вихрями. Причём влияние солнечных и галактических космических лучей на динамику плазменных атмосферных вихрей усиливается с нарастанием загрязнений атмосферы. Механизм воздействия космического ионизирующего излучения на генерацию атмосферных плазменных вихрей – нелинейный. Относительно малые по мощности потоки космических лучей и малые по концентрации примеси аэрозолей вызывают существенные изменения мощности атмосферных процессов (Бондур, Пулинец, 2012; Карелин, 2009), поскольку в усилении плазменных вихрей важную роль играют конденсация влаги ионизованными аэрозолями и скрытое тепло.

### **Влияние геомагнитного поля, потоков энергичных солнечных и галактических частиц на динамику вихревых структур**

Механизмы воздействия ионизирующего потока энергичных частиц солнечного и галактического происхождения на нижнюю атмосферу, погоду и климат представлены в обзорах (Пудовкин, Распопов, 1992; Авдюшин, Данилов, 2000; Miroshnichenko, 2001). По солнечным и глобальным метеорологическим данным наблюдались синхронные изменения плотности облаков после интенсивных солнечных вспышек. Обнаружены изменения прозрачности атмосферы под воздействием космических лучей. Статистически прослеживается также связь между солнечной активностью и вариациями геомагнитного поля. С другой стороны, характерная мощность атмосферных процессов составляет порядка  $10^{26} - 10^{27}$  ед. CGSE/день. Отметим, что средняя мощность солнечного ветра, инжектируемого в магнитосферу, а следовательно и в атмосферу, составляет порядка  $10^{23}$  ед. CGSE/день, что на 3–4 порядка ниже мощности атмосферных процессов. Расхождение по мощности для периодов солнечных вспышек и магнитосферных бурь, продолжающихся несколько дней, может быть сглажено при дополнительных предположениях относительно диссипации энергии солнечных потоков в атмосфере (Пудовкин, Распопов, 1992; Miroshnichenko, 2001). Проникновение потоков энергичных солнечных протонов в магнитосферу Земли и их высыпание (Shumilov et al., 1993) влияет на атмосферные процессы в полярных и субполярных широтах. Солнечно-земные связи при формировании атмосферной облачности и климата являются нелинейными (Ижовкина, 2014; Ижовкина и др., 2015; Izhovkina et al., 2016). Это позволяет объяснить существенное расхождение по мощности, отмеченное выше.

Таким образом, генерация плазменных вихрей в атмосфере и ионосфере модифицирует масс-энергетический перенос. В частности, при взаимодействии плазменных вихрей могут образовываться более мощные атмосферные вихревые структуры. При этом важную роль в генерации плазменных вихрей в атмосфере играют аэрозоли. Появление аэрозолей в атмосфере связано с вертикальными градиентами давления. Особую роль в погоде и кли-

мате играют заряженные частицы Айткена с размерами  $r < 0,1$  мкм. Они могут удерживаться в атмосфере не только градиентами давления, но и электрическими полями, а ионизируются атмосферные частицы солнечным и космическим (Пудовкин, Распопов, 1992; Авдюшин, Данилов, 2000; Miroshnichenko, 2001; Бондур и др., 2008) излучением. Нужно отметить, что конвекция аэрозолей в верхние слои тропосферы и стратосферу может быть связана с образованием областей нагрева при затухании плазменных вихрей.

Механизмы захвата аэрозолей струйными течениями и вихревыми структурами в атмосфере с последующим переносом зависят от параметров аэрозолей, их распределений по размерам, форме, массе и химическому составу при конденсации влаги. В одномерной геометрии сила, действующая на аэрозольную частицу в воздушном потоке, составляет:

$$F_s = j_n S_a p_n = N_n (v_n - v_a) S_a m_n (v_n - v_a), \quad (1)$$

где  $j_n$  – поток частиц воздуха, атомов и молекул относительно аэрозольной частицы,  $S_a$  – лобовое сечение аэрозольной частицы,  $p_n$  – передаваемый аэрозольной частице импульс одной частицей воздуха,  $m_n$  – средняя масса частиц воздуха.

Из уравнения движения аэрозольной частицы  $m_a (dv_a / dt) = F_s$  следует оценка времени  $\tau$  ускорения частицы в потоке воздуха до скорости  $V$ :

$$\int_0^V \frac{dv_a}{(v_n - v_a)^2} = -(v_n - v_a)^{-1} \Big|_0^V = \tau N_n S_a m_n / m_a. \quad (2)$$

Отсюда для  $V \sim 0,5v_n$  имеем  $\tau = m_a / (m_n v_n N_n S_a)$ . В оценке времени захвата воздушным потоком частицы (с массой  $m_a$  и лобовым сечением  $S_a$ ) завихрения потока при обтекании частицы не учитываются. Динамическое давление потока на частицу уменьшается при нарастании скорости частицы, и подъем происходит с изменением ускорения. Под действием вертикальных градиентов давления в окрестности облачной тени происходит накачка аэрозольной примеси на высоты облачности порядка несколько километров, а также и в стратосферу. Если подъёмная сила и ускорение при натекании потока на частицу превышают силу тяжести и ускорение свободного падения, частица поднимается и переносится потоком.

Если форма частицы пластинчатая, подобная крылу самолёта, то при обтекании частицы горизонтальным воздушным потоком возникает подъёмная сила. Проекция силы  $F_s$  ортогонально лобовой поверхности составляет  $F_1 = F_s \sin \alpha$ , подъёмная сила  $F = F_1 \cos \alpha = F_s \sin(2\alpha) / 2$ . На углах атаки  $\sim 0$  и  $\pi / 2$  подъёмная сила горизонтального потока стремится к нулю, но аэрозольные частицы могут подниматься в атмосфере на вертикальных градиентах давления вертикальными воздушными потоками, причём подъёмная сила максимальна для угла атаки  $\alpha \sim \pi / 4$ . Лётные свойства аэрозолей зависят от их массы, размеров и формы. Примером хорошо летающих аэрозолей может быть пыльца растений и мелкодисперсная пыль, образующаяся при трении транспорта с поверхностью дорог. Конденсация влаги незаряженными аэрозолями зависит от их химического состава и структуры поверхности. Частицы могут быть гидрофильными и гидрофобными. Ионизи-

ванные частицы можно отнести к гидрофильным, поскольку притяжение молекул воды связано с их поляризацией электрическим полем.

При конденсации влаги аэрозолями увеличивается скорость вращения плазменного вихря и его размеры (Ижовкина, 2014). На генерацию и устойчивость плазменных вихрей влияют и другие факторы, например, акустико-гравитационные волны, постоянные электрическое и магнитное поле и электромагнитное излучение различных источников, в том числе антропогенных, связанных с деятельностью человека. При накоплении массы движущимся плазменным вихрем может быть достигнуто состояние слабоустойчивого удержания вихрем облачной массы в поле силы тяжести. В таком состоянии даже слабые внешние воздействия на структуру плазменного вихря могут стимулировать выпадение осадков и угасание вихря или наоборот усиление вихря.

Геострофические плазменные течения описываются уравнением:

$$\mathbf{j} = [\mathbf{B}_0 \times \nabla P] c / B_0^2 - [\mathbf{B}_0 \times \mathbf{g}] (\rho c) / B_0^2, \quad (3)$$

где  $P$  – давление,  $\rho$  – плотность плазмы,  $\mathbf{B}_0$  – напряженность магнитного поля,  $\mathbf{j}$  – плотность тока,  $\mathbf{g}$  – гравитационное ускорение. В плазменном вихре  $d\mathbf{v}/dt \neq 0$  вихрь отличается от геострофического течения. Движение плазменных вихрей в поле крупномасштабных градиентов давления может привести к столкновениям вихрей и изменениям струйной и вихревой структуры в атмосфере. Вихри при взаимодействии могут сливаться и образовывать более мощные вихревые структуры. При этом крупномасштабная вихревая структура затягивает в себя мелкомасштабные вихри. В целом картина взаимодействия и движения спиральных токовых структур многообразна, зависит от пространственного распределения структур и их магнитных моментов. Возбуждение плазменных вихрей в неоднородной области нагрева при ионизации частиц может быть причиной появления спиральных струйных течений. Столкновения вихрей вызывают изменения электрического поля когерентных вихревых структур. Затухание электрических полей, ортогональных геомагнитному полю, приводит к разделению заряда при поляризационном дрейфе. 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, и это влияет на скорость их дрейфа. Отметим, что захват частиц разного знака соседними вихревыми структурами при поляризационном дрейфе приводит к появлению разности потенциалов между облаками, между облаками и земной поверхностью, между облаками и ионосферным слоем.

На генезис вихревых структур в атмосфере влияют столкновения частиц. Поскольку частота столкновений ионов легких частиц, атомов и молекул атмосферы с компонентами

атмосферы при скорости  $\sim 10^2$  см/с, концентрации частиц  $N_n \sim 10^{19}$  см $^{-3}$  и эффективном сечении столкновений  $\sigma_n \sim 10^{-16}$  см $^2$  составляет  $v_{in} \sim 10^5$  с $^{-1}$ , то генерация плазменных вихрей в атмосфере связана преимущественно с ионами массивных крупных частиц – аэрозолей, что и наблюдается в грозовых фронтах и торнадо. При наличии градиентов давления поле столкновений анизотропно, но вихрь  $[\nabla \cdot \mathbf{v}]$  сохраняется. В итоге происходит перекачка тепловой энергии неравномерного нагрева в плазменное вихревое движение в скрещенных электрическом поле вихря и геомагнитном поле.

Для вывода уравнения сохранения вихря используем уравнения движения и непрерывности в плоскости, ортогональной магнитному полю, для ионного компонента плазмы. Учитывая, что компоненты дрейфовой скорости составляют  $u = -e\Phi_y / (M\Omega_{0i})$ ,  $v = e\Phi_x / (M\Omega_{0i})$  и ротор дрейфовой скорости:

$$\Omega' = v_x - u_y = e(\Phi_{xx} + \Phi_{yy}) / (M\Omega_{0i}), \quad (5)$$

где  $M$  – масса иона,  $\Omega_{0i}$  – циклотронная частота иона, ось  $Z$  направлена вдоль внешнего магнитного поля,  $u, v$  – компоненты скорости иона по осям  $x, y$ , а  $\Phi$  – потенциал электрического поля, получаем уравнение потенциала плазменного вихря:

$$(\Delta\Phi)_t - \frac{e}{T}\Phi_t\Delta\Phi + \frac{e}{M\Omega_{0i}}\Delta\Phi\frac{e}{T}\left(\Phi\frac{\partial\Phi}{\partial x}\frac{\partial\ln T}{\partial y} - \Phi\frac{\partial\Phi}{\partial y}\frac{\partial\ln T}{\partial x}\right) + \frac{e}{M\Omega_{0i}}J(\Phi, \Delta\Phi) = 0, \quad (6)$$

где  $J(\Phi, \Delta\Phi) = \Phi_x(\Delta\Phi)_y - \Phi_y(\Delta\Phi)_x$  – векторная нелинейность (якобиан). Для  $\Omega' \neq 0$  следует  $\Delta\Phi \neq 0$ . Для фронтального температурного скачка при  $\partial\ln T / \partial y \gg \partial\ln T / \partial x$  и скорости дрейфа вихря  $v_{dw}$ , используя преобразование  $\partial / \partial t = -v_{dw} \partial / \partial x$ , можно получить уравнение, похожее на обобщенное уравнение Хасегава – Мимы, ОХМ – уравнение (Незлин, Черников, 1995):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ -v_{dw} \ln(\Delta\Phi) + \frac{e}{T} v_{dw} \Phi + \frac{e}{M\Omega_{0i}} \frac{e}{T} \frac{\partial\ln T}{\partial y} \frac{\Phi^2}{2} \right] + \frac{e}{M\Omega_{0i}} J(\Phi, \ln(\Delta\Phi)) = 0, \quad (7)$$

$J(\Phi, \ln(\Delta\Phi)) = \Phi_x(\ln(\Delta\Phi))_y - \Phi_y(\ln(\Delta\Phi))_x$ . При условии равенства нулю первого слагаемого в (7) в нуль обращается и второе, связанное с векторной нелинейностью. Как видим, 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. Из уравнения вихревой структуры следует, что изменения геомагнитного поля могут привести к возмущениям и расстройству плазменного вихря. Электрическое поле плазменного вихря составляет:

$$\mathbf{E} = \ln(N / N_0)(\nabla T) / e + (T / e)\nabla \ln N, \quad (8)$$

а скорость вращения частиц плазмы в скрещенных полях (электрическом поле вихря и внешнем магнитном поле) равна:

$$\mathbf{V}_d = [c / (eB^2)] \{ \ln(N / N_0) [\nabla T \cdot \mathbf{B}] + T [\nabla \ln N \cdot \mathbf{B}] \}. \quad (9)$$

Плотность энергии электрического поля вихря  $W_1$  составляет:

$$W_1 = (8\pi e^2)^{-1} \{ \ln(N / N_0) \nabla T + T \nabla \ln N \}^2, \quad (10)$$

где распределение концентрации частиц в плазменной вихревой структуре задано в виде  $N = N_0 \exp(e\Phi/T(y))$ ,  $T$  – температура,  $N_0$  – концентрация частиц для  $\Phi=0$ . В используемой системе координат ось  $Z$  направлена вдоль геомагнитного поля. С ростом градиентов давления ортогонально геомагнитному полю нарастает устойчивость когерентных плазменных вихревых структур.

Длина свободного пробега атомов и молекул в атмосфере составляет  $l \sim \sigma_n N_n \sim 10^{-3}$  см для приземного слоя. Аэрозольную плазму можно рассматривать как пылевую плазму, при этом в первом приближении столкновениями аэрозолей между собой можно пренебречь. Аэрозольная масса находится в гравитационном поле, но удерживается в атмосфере градиентами давления. Электрическое поле плазменного вихря также удерживает вихрь. Возмущения градиентов давления могут быть связаны и с антропогенным шумом. Например, пакеты акустико-гравитационных волн при распространении вверх могут вызвать колебания давления (на фоне неустойчивого захвата облачной массы) и, соответственно, осадки.

При увеличении скорости аэрозольной частицы действующая на нее со стороны потока сила уменьшается. В простых приближениях с точностью до порядка величины можно ограничиться оценкой времени  $\tau_a$  при ускорении аэрозолей до скорости  $v_a \sim 0,5 v_n$ . Частица с размерами  $r_a \sim 10^{-4}$  см, массой  $m_a \sim 10^{-12}$  г ускоряется за время  $\tau_a \sim 10^{-3}$  с, причём стартовое ускорение  $\sim 10^6$  см/с<sup>2</sup>, что на три порядка больше ускорения свободного падения. Время подъема частиц Айткена от поверхности Земли до высот формирования облачности при заданных выше параметрах потоков составляет  $\sim 1$  час.

Вторжение космических лучей в атмосферу проявляется по эффектам ионизации. На высоте 4800 км ионизация нарастает в 4 раза относительно ионизации на уровне моря, на высоте 8400 км – в 10 раз (Miroshnichenko, 2001). Геомагнитное поле влияет на процессы переноса плазменных космических частиц в околоземном пространстве. С выпадением энергичных заряженных частиц в авроральной зоне и полярной шапке связано возбуждение атмосферных плазменных вихрей и их влияние на формирование атмосферных вихревых структур – циклонов и антициклонов, в том числе и в условиях полярной ночи. Перенос влажных и теплых воздушных масс в высокие широты на градиентах давления при неравномерном нагреве атмосферы и океана (преимущественно солнечным фотонным потоком) и вторжение в атмосферу ионизирующих космических частиц приводят к возбуждению плазменных вихрей. С влиянием космических лучей на вихревую активность аэро-

зольной плазмы может быть связано такое редкое явление, как зимняя гроза в средних и даже высоких широтах.

Неустойчивости неоднородной плазмы провоцируют развитие нелинейных процессов. Переход от однородной плазмы к неоднородной отслеживается для электростатических мод с  $\mathbf{k} \parallel \mathbf{E}$ . Появление собственных частот возможно при амплитуде колебаний кривой  $\epsilon$ , превышающей 1. При амплитуде колебаний меньше 1 собственные частоты исчезают ( $\epsilon \neq 0$  ни в одной из точек  $(\omega, \mathbf{k})$  пространства), происходит обрезание спектра электростатических свободных колебаний с уменьшением плотности плазмы. Такое поведение спектра свободных колебаний приводит к нагреву областей пониженной плотности плазмы и вытеснению плазмы из этих областей с ростом градиентов давления при нагреве. Нагрев связан с затуханием колебаний при их распространении в область пониженной плазменной плотности. Колебания затухают при переходе из режима свободных мод в режим вынужденных возмущений (Ижовкина и др., 1999; Ижовкина, 2010). В неоднородной плазме ионизованного смога могут возбуждаться электростатические колебания, например, на дрейфовых градиентных неустойчивостях плазмы, если  $\nabla N \uparrow \downarrow \mathbf{g}$ . Для этого типа неустойчивости основную роль играют тяжелые частицы – ионы. В слоях с градиентом плотности плазмы, направленным против силы тяжести, возможно развитие гидродинамической неустойчивости с инкрементом роста, зависящим от вертикального относительного градиента плотности плазмы  $\gamma \sim \sqrt{g \partial \ln(N) / \partial y}$ . В неоднородной замагниченной плазме может развиваться и гравитационно-диссипативная неустойчивость (Михайловский, 1977):

$$\omega = \omega_{ni} + g\kappa / \omega_{ni}, \quad \gamma = (\gamma_0 / \omega_{ni})^2 z_i v, \quad (11)$$

где  $\omega_{ni} = k_y \kappa c T_i / e_i B$ ,  $\gamma_0 = \sqrt{g\kappa}$ ,  $\kappa = \partial \ln N / \partial x$ ,  $c$  – скорость света,  $z_i = k_{\perp}^2 T_i / (m_i \Omega_i^2)$ ,  $T_i, e_i, m_i, \Omega_i$  – соответственно температура, заряд, масса и циклотронная частота ионов,  $(k_{\perp}, k_y)$  – составляющие волнового вектора возмущений, перпендикулярные к геомагнитному полю и вдоль оси  $y$ ,  $x \uparrow \downarrow \mathbf{g}$ ,  $z \parallel \mathbf{B}$ . Для области геомагнитного экватора предполагается, что  $\mathbf{g} \perp \mathbf{B}$ . Гравитационно-диссипативная неустойчивость на низких и средних широтах может способствовать расслоению аэрозольной плазмы в атмосферной облачности и возбуждению плазменных вихрей в неоднородной плазменной структуре.

Возбуждение плазменных вихрей усиливается при нарастании концентрации аэрозолей и потоков ионизирующего излучения. Рост концентрации атмосферных загрязнений, в частности, аэрозолей, и ионизирующего излучения – потоков космических лучей солнечного и галактического происхождения вызывает нелинейный по мощности отклик атмосферных процессов (Бондур, Пулинец, 2012; Карелин, 2009). Нелинейность связана с влиянием конденсации влаги и скрытого тепла при возбуждении аэрозольных плазменных вихрей в атмосфере. Влияние антропогенных источников загрязнений тропосферы проявляется на пути распространения атмосферного фронта. Аэрозоли вымываются из атмосферы с осадками, но при краткосрочном (порядка одного часа) высыхании подстилающей поверхности, например, автомобильных дорог, на градиентах давления они вновь поднима-



ются до высот формирования тропосферной облачности и выше. Как указывалось выше, скорость подъема аэрозолей зависит от их лётных характеристик.

Генезис циклонов и антициклонов связан с нелинейными взаимодействиями гидродинамических и магнитогидродинамических структур. Взаимодействие с плазменными вихрями происходит на роторном («генетическом») уровне. Конденсация влаги на аэрозольных частицах при ионизации частиц усиливается, поскольку в этом случае все частицы гидрофильны. Максимум ионизации атмосферных частиц космическими лучами соответствует высотам образования тропосферной облачности (Miroshnichenko, 2001). Сечение аэрозольной частицы на несколько порядков величины превышает сечение атомов и молекул. Присутствие аэрозольных частиц на высотах формирования облачности усиливает влияние космических лучей на магнитогидродинамический процесс возбуждения плазменных вихрей пропорционально концентрации аэрозолей, умноженной на отношение суммарного сечения аэрозолей к суммарному сечению атомов и молекул. При конденсации влаги сечение аэрозолей увеличивается.

Сопоставление дистанционных наблюдений за тропическими циклонами и молниевыми вспышками показывает (Molinari et al., 1994; Price et al., 2009; Leary, Ritchie, 2009; Fierro et al., 2011), что за увеличением молниевой активности в стене глаза следует интенсификация тропического циклона. Таким образом, плазменные вихри могут оказывать заметное влияние на поведение тропических циклонов. А поскольку считается, что важную роль в молниеобразовании играют космические лучи, то можно сделать вывод, что космическое излучение может оказывать заметное влияние на атмосферные вихревые процессы.

Аэрозольные плазменные вихри взаимодействуют с волнами и вихрями Россби. Возбуждение волн и вихрей Россби в гидродинамических течениях связано с крупномасштабными градиентами давления при неоднородном нагреве атмосферы (и океана) и зависимостью от широты силы Кориолиса.

## **Заключение**

В нелинейной неоднородной структуре суммарный импульс при столкновениях частиц сохраняется, если длина свободного пробега частиц много меньше размеров структуры. Нелинейные полевые структуры, например, плазменный вихрь, имеют дополнительную устойчивость. Ячеистая мозаичная структура полей градиентов давления в атмосфере при нагреве и ионизации частиц способствует генерации плазменных вихрей в геомагнитном поле. Электрическое поле вихря возбуждается на плазменных потоках, ортогональных геомагнитному полю, подобно возбуждению МГД-генератора. В ячейках возбуждается электрическое поле, когерентно вращающееся вместе с частицами плазмы. Проявляется важная роль аэрозольной примеси в генерации плазменных вихрей и накоплении вихрями энергии и массы в атмосфере при конденсации влаги. Рост концентрации атмосферных загрязнений, в частности, аэрозолей, и ионизирующего излучения – потоков космических

лучей солнечного и галактического происхождения вызывает нелинейный по мощности отклик атмосферных процессов. Нелинейность связана с влиянием конденсации влаги и скрытого тепла при возбуждении и усилении аэрозольных плазменных вихрей в атмосфере. Аэрозольные плазменные вихри взаимодействуют с волнами и вихрями Россби. Возбуждение волн и вихрей Россби в гидродинамических течениях связано с крупномасштабными градиентами давления при неоднородном нагреве атмосферы и зависимостью от широты силы Кориолиса.

## Литература

1. *Абурджания Г.Д.* Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диспергирующих средах. М.: КомКнига, 2006. 328 с.
2. *Авдюшин С.И., Данилов А.Д.* Солнце, погода и климат – обзор // Геомagnetизм и аэрономия. 2000. Т. 40. № 5. С. 3–14.
3. *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. С. 244–249.
4. *Бондур В.Г., Пулинец С.А.* Воздействие мезомасштабных атмосферных вихревых процессов на верхнюю атмосферу и ионосферу Земли // Исследование земли из космоса. 2012. № 3. С. 3–11.
5. *Ижовкина Н.И.* Плазменные вихри в ионосфере и атмосфере // Геомagnetизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 6. С. 817–828.
6. *Ижовкина Н.И., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Артеха С.Н.* Особенности взаимодействия плазменных вихрей в атмосфере и ионосфере // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 106–116.
7. *Ижовкина Н.И., Афонин В.В., Карпачев А.Т., Прутенский И.С., Пулинец С.А.* Структура ионосферного провала для разных уровней геомагнитных возмущений и источники нагрева плазмы верхней дневной ионосферы // Геомagnetизм и аэрономия. 1999. Т. 39. № 4. С. 39–43.
8. *Ижовкина Н.И.* Потоки энергии и частиц в неустойчивой плазме с вихревыми структурами в верхней ионосфере в неоднородном геомагнитном поле // Геомagnetизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 6. С. 817–824.
9. *Ижовкина Н.И., Артеха С.Н., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А.* Спиральные токовые структуры в аэрозольной атмосферной плазме // Инженерная физика. 2016. № 7. С. 57–68.
10. *Карелин А.В.* О возможности космического мониторинга процессов возникновения тропических ураганов // Вопросы электромеханики. 2009. Т. 111. С. 43–50.
11. *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. Т. 11. № 2. С. 111–120.
12. *Михайловский А.В.* Теория плазменных неустойчивостей. Т. 2. Неустойчивости неоднородной плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 312 с.
13. *Мусеев 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. *Пудовкин М.И., Распопов О.М.* Механизм влияния солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеорологические параметры – обзор // Геомagnetизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 5. С. 1–22.
16. *Редерер Х.* Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем. М.: Мир, 1972. 192 с.
17. *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.
18. *Fierro A.O., Shao X.-M., Hamlin T., Reisner J.M., Harlin J.* Evolution of eyewall convective events as indicated by intracloud and cloud-to-ground lightning activity during the rapid intensification of hurricanes Rita and Katrina // Month. Weather Rev. 2011. Vol. 139:5. P. 1492–1504.
19. *Izhovkina N.I., Artekha S.N., Erokhin N.S., Mikhailovskaya L.A.* Interaction of atmospheric plasma vortices // Pure and Applied Geophysics. 2016. Vol. 173. Issue 8. P. 2945–2957.
20. *Leary L.A., Ritchie E.A.* Lightning flash rates as an indicator of tropical cyclone genesis in the eastern north pacific // Month. Weather Rev. 2009. Vol. 137:10. P. 3456–3470.
21. *Miroshnichenko L.I.* Solar cosmic rays // Astrophysics and Space Science Library. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht. 2001. Vol. 260. 480 p.
22. *Molinari J., Moore P.K., Idone V.P., Henderson R.W., Saljoughy A.B.* Cloud-to-ground lightning in hurricane Andrew // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. P. 16665–16676.
23. *Monin A.S.* Theoretical geophysical fluid dynamics. Dordrecht: Springer Netherlands. 1990.
24. *Pedlosky J.* Geophysical fluids dynamics. New York: Springer, 1987. 710 p.
25. *Price C., Asfur M., Yair Yo.* Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency // Nature Geosci. 2009. Vol. 2:5. P. 329–332.
26. *Shumilov O.I., Vashenyuk E.V., Henriksen K.* Quasi-drift effects of high-energy solar cosmic rays in the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98. No. A10. P. 17423–17427.

# The impact of solar and galactic cosmic rays on atmospheric vortex structures

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

The Earth's atmosphere is under the influence of ionizing and heat sources. Air pollutants (aerosols, in particular) affect the heating of the atmosphere, make ionized and condense moisture. Gyrotropy of the atmosphere is connected with the influence of the Coriolis force on the movement of particles, and for charged particles in the geomagnetic field – with the influence of the Lorentz force. Sources of suspended particles – aerosols – are diverse. Plasma vortices are built up in cellular spatial distributions of ionized aerosols. The maximum of ionization of atmospheric particles by cosmic rays corresponds to the heights of formation of tropospheric cloudiness. Condensation on aerosols is amplified with particle ionization, because these particles are hydrophilic. An important role of aerosols is manifested in generation of plasma vortices and in accumulation of energy and mass of the vortices in the atmosphere at when condensating. The genesis of cyclones and anticyclones is associated with nonlinear interaction of hydrodynamic and magnetohydrodynamic structures. The interaction with plasma vortices occurs at the rotary level. Since the process of formation of ionizing particles is a cascade one, the influence of cosmic rays on vortex atmospheric processes is essentially nonlinear. The influence of ionizing solar and galactic cosmic rays on the dynamics of plasma atmospheric vortices is enhanced with an increase in air pollution.

**Keywords:** gyrotropy, plasma vortices, the geomagnetic field, atmospheric electric fields, aerosol particles, cosmic radiation

*Accepted: 07.02.2017*

*DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-209-220*

## References

1. Aburdzhania G.D., *Samoorganizatsiya nelineinykh vikhrevykh struktur i vikhrevoi turbulentnosti v dispergi-ruyushchikh sredakh* (Self-organizing nonlinear vortex structures and vortex turbulence in dispersive media), Moscow: KomKniga, 2006, 328 p.
2. Avdyushin S.I., Danilov A.D., Solntse, pogoda i klimat – obzor (The sun, the weather and the climate – overview), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2000, Vol. 40, No. 5, pp. 3–14.
3. Bondur V.G., Pulinets S.A., Kim G.A., O roli variatsii galakticheskikh kosmicheskikh luchej 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.
4. Bondur V.G., Pulinets S.A., Vozdeistvie mezomasshtabnykh atmosferynykh vikhrevykh protsessov na verkhnyuyu atmosferu i ionosferu Zemli (The impact of mesoscale atmospheric vortex processes on the upper atmosphere and ionosphere of the Earth), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 3–11.
5. Izhovkina N.I., Plazmennye vikhri v ionosfere i atmosfere (Plasma vortices in the ionosphere and atmosphere), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2014, Vol. 54, No. 6, pp. 817–828.
6. Izhovkina N.I., Erokhin N.S., Mikhailovskaya L.A., Artekha S.N., Osobennosti vzaimodeistviya plazmennyykh vikhrei v atmosfere i ionosfere (Features of interaction of plasma vortices in the atmosphere and ionosphere), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 4, pp. 106–116.
7. Izhovkina N.I., Afonin V.V., Karpachev A.T., Prutenskii I.S., Pulinets S.A., Struktura ionosfernogo provala dlya raznykh urovnei geomagnitnykh vozmushchenii i istochniki nagreva plazmy verkhnei dnevnoi ionosfery (The structure of the ionospheric trough for different levels of geomagnetic disturbances, and plasma heating sources of the upper daytime ionosphere), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1999, Vol. 39, No. 4, pp. 39–43.
8. 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.
9. Izhovkina N.I., Artekha S.N., Erokhin N.S., Mikhailovskaya L.A., Spiral'nye tokovye struktury v aerol'noi atmosfere (Spiral flow structures in the aerosol atmospheric plasma), *Inzhenernaya fizika*, 2016, No. 7, pp. 57–68.
10. Karelin A.V., O vozmozhnosti kosmicheskogo monitoringa protsessov vozniknoveniya tropicheskikh uraganov (On the possibility of space monitoring processes of occurrence of tropical storms), *Voprosy elektromekhaniki*, 2009, Vol. 111, pp. 43–50.
11. Mikhailovskaya L.A., Erokhin N.S., Krasnova I.A., Artekha S.N., Strukturnye 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), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 111–120.

12. Mikhailovskii A.V., *Teoriya plazmennykh neustoichivostei. T. 2. Neustoichivosti neodnorodnoi plazmy* (Theory of plasma instabilities. Vol. 2. Instability of an inhomogeneous plasma), Moscow: Atomizdat, 1977, 312 p.
13. Moiseev S.S., Sagdeev R.Z., Tur A.V., Yanovskii V.V., *Teoriya vzniknoveniya krupnomasshtabnykh struktur v gidrodinamicheskoi turbulentsii* (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. Pudovkin M.I., Raspopov O.M., *Mekhanizm vliyaniya solnechnoi aktivnosti na sostoyanie nizhnei atmosfery i meteorologicheskie parametry – obzor* (The mechanism of influence of solar activity on the state of the lower atmosphere and meteorological parameters), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1992, Vol. 32, No. 5, pp. 1–22.
16. Roederer H., *Dynamics of geomagnetically trapped radiation*, Moscow: Mir, 1972, 192 p.
17. 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.
18. Fierro A.O., Shao X.-M., Hamlin T., Reisner J.M., Harlin J., *Evolution of eyewall convective events as indicated by intracloud and cloud-to-ground lightning activity during the rapid intensification of hurricanes Rita and Katrina*, *Month. Weather Rev.*, 2011, Vol. 139:5, pp. 1492–1504.
19. Izhovkina N.I., Artekha S.N., Erokhin N.S., Mikhailovskaya L.A., *Interaction of atmospheric plasma vortices*, *Pure and Applied Geophysics*, 2016, Vol. 173, Issue 8, pp. 2945–2957.
20. Leary L.A., Ritchie E.A., *Lightning flash rates as an indicator of tropical cyclone genesis in the eastern north pacific*, *Month. Weather Rev.*, 2009, Vol. 137:10, pp. 3456–3470.
21. Miroshnichenko L.I., *Solar cosmic rays*, Astrophysics and Space Science Library, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2001, Vol. 260, 480 p.
22. Molinari J., Moore P.K., Idone V.P., Henderson R.W., Saljoughy A.B., *Cloud-to-ground lightning in hurricane Andrew*, *J. Geophys. Res.*, 1994, Vol. 99, pp. 16665–16676.
23. Monin A.S., *Theoretical geophysical fluid dynamics*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1990.
24. Pedlosky J. *Geophysical fluids dynamics*, New York: Springer, 1987, 710 p.
25. Price C., Asfur M., Yair Yo., *Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency*, *Nature Geosci.*, 2009, Vol. 2:5, pp. 329–332.
26. Shumilov O.I., Vashenyuk E.V., Henriksen K., *Quasi-drift effects of high-energy solar cosmic rays in the magnetosphere*, *J. Geophys. Res.*, 1993, Vol. 98, No. A10, pp. 17423–17427.