# Вихревые структуры в аэрозольной атмосферной плазме

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, г. Троицк, Россия E-mail: izhovn@izmiran.ru <sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

При зондировании атмосферной облачности в ней обнаруживаются сильные электрические поля. Распределение токов определяется электрическими полями и проводимостью среды. В неоднородной гиротропной среде возникновение вихревых структур стохастически детерминировано. 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. Немонотонное расслоение неустойчивых плазменных неоднородностей приводит к образованию ячеистых структур. В полях градиентов давления мозаичной ячеистой топологии при ионизации частиц возможно проявление электрического поля плазменных вихрей. Важную роль в генерации атмосферных вихрей играют аэрозольные частицы. В работе учтено, что в аэрозольной плазме атмосферной облачности силы электромагнитного взаимодействия между элементами потоковой структуры способствуют интенсификации структуры (увеличению энергии и вовлечению в неё атмосферной массы) мощным плазменным вихрем. Взаимодействие плазменных спиральных токовых вихрей определяется их интенсивностью и геометрическими параметрами распределения в пространстве.

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

Одобрена к печати: 20.06.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-157-167

### Введение

В возбуждении МГД-генератора и плазменных вихрей в атмосфере и ионосфере заметны фундаментальное сходство и существенные различия (Ижовкина и др., 2015). МГД-генератор используется для перекачки кинетической энергии плазменного потока, направленного ортогонально магнитному полю, в электрическую энергию. МГД-генераторы работают в самых разных средах, диапазон параметров потоков и ионизованных примесей практически не ограничен. Генерация электрического поля столкновениями частиц не подавлена. Для увеличения КПД применяются присадки – примеси с низким потенциалом ионизации. Используемая аналогия применима не только к ионосферным плазменным вихрям, но и к вихрям в аэрозольной атмосферной плазме.

Атмосфера и ионосфера – диффузные среды с вязкостью. При неоднородном нагреве и ионизации атмосферных аэрозолей различными видами излучения в геомагнитном поле возникают условия для возбуждения плазменных вихрей в ячеистых мозаичных распределениях частиц (Ижовкина, 2014). Ячеистое мозаичное распределение аэрозолей образуется при электростатических неустойчивостях неоднородной плазмы. Локальное накопление энергии и массы нелинейной структуры под воздействием параметров самой структуры характерно для плазмоподобных вихрей в атмосфере. Образование мощных циклонов и антициклонов может быть инициировано генерацией плазменных вихрей. В неоднородной гиротропной среде возникновение вихревых структур стохастически детерминировано (Абурджаниа, 2006; Михайловская и др., 2014а, 2014б). При перекачке энергии по спектру вихрей в область крупных масштабов могут генерироваться мощные вихри типа

тропических циклонов (Моисеев и др., 1983). Влияние внешних источников атмосферных и магнитосферных возмущений на атмосферные процессы, погоду и климат представлено в работах (Иванов, Харшиладзе, 2011; Бондур и др., 2008; Artekha, Belyan, 2013).

Влияние смога естественного и антропогенного происхождения (включая водяной пар и аэрозоли) на физические параметры атмосферы отражается в изменениях погоды и климата. Смог может стимулировать локальные обильные осадки, наводнения. А при недостатке влаги загрязнения атмосферы провоцируют рост блокирующих антициклонов (комментарии от Гидрометцентра). Такие антициклоны наблюдаются, например, над европейской территорией России. Как наводнения, вызванные резким локальным увеличением количества осадков, так и сильные засухи возникают в последние десятилетия регулярно. Мощные циклоны захватывают и переносят пыль и частицы песка, например, из пустынь Монголии и Казахстана на Дальний Восток.

Цель работы — показать, что в аэрозольной плазме атмосферной облачности силы электромагнитного взаимодействия спиральных токовых структур способствуют образованию мощных плазменных вихрей. Образование и затухание вихрей можно отследить по пространственно-временным изменениям электрического и магнитного полей. Взаимодействие плазменных спиральных токовых вихрей определяется величиной и направлением магнитных моментов вихрей и геометрическими параметрами их распределения в пространстве. Крупномасштабный плазменный вихрь (плазмоподобная подсистема атмосферы), захватывая вихри малого масштаба, может накапливать энергию и массу. При взаимодействии плазменных вихрей области нагрева, струйные течения и мощные вихри могут появляться и в ионосфере, причём электростатическая неустойчивость ионосферной плазмы способствует их возбуждению.

# Влияние геомагнитного поля, электрических и магнитных полей на динамику вихревых структур

Нагрев солнечным фотонным потоком земной поверхности, потоки скрытого тепла, раскалённые потоки выхлопных газов автомобильного транспорта и иные источники теплового воздействия на атмосферу приводят к росту вертикальных градиентов давления и переносу смога в слои атмосферы на высоты h > 4 км на пути распространения облачных фронтов. В грозовых фронтах атмосферы наблюдаются плазменные процессы. Плазменный вихрь – вращающаяся в скрещенных электрическом и магнитном полях плазменная структура. Важную роль в генерации плазменных вихрей в атмосфере играют аэрозоли. Перенос аэрозолей в атмосфере связан с вертикальными градиентами давления. Особую роль в погоде и климате играют заряженные частицы Айткена с размерами г < 0,1 мкм. Они могут удерживаться в атмосфере не только градиентами давления, но и электрическими полями. При конденсации влаги аэрозолями мощность плазменного вихря нарастает, увеличиваются скорость вращения и размеры плазменного вихря

(Ижовкина, 2014; Ижовкина и др., 2015). 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, либо, наоборот, усиление вихря.

Картина взаимодействия и движения спиральных токовых структур многообразна. Она зависит от пространственного распределения структур и их магнитных моментов. Потери энергии сталкивающихся вихрей на нагрев вызывают рост локальных градиентов давления в области нагрева. С ростом вертикальных градиентов усиливаются вертикальные потоки. Атмосферные частицы, в том числе и крупные аэрозоли, попадают в вертикальные восходящие потоки и выносятся в верхние слои тропосферы и стратосферу. В дальнейшем при выпадении в поле силы тяжести они влияют на генерацию новых вихрей — эффект последействия.

Столкновения вихрей вызывают изменения электрического поля когерентных вихревых структур. При затухании электрических полей, ортогональных геомагнитному полю, усиливаются диффузия заряженных частиц поперёк геомагнитного поля и поляризационный дрейф, что приводит к разделению зарядов.

Взаимодействие спиральных вихрей с током зависит от магнитного момента вихрей, подобно взаимодействию соленоидов. Магнитный момент соленоида с током равен сумме магнитных моментов витков  $\mathbf{P}_m = \sum \mathbf{p}_m$ ,  $\mathbf{p}_m = I\mathbf{S}/c$ , где  $\mathbf{S}$  — вектор, численно равный площади, охватываемой контуром с током, направлен по нормали к плоскости контура так, чтобы из конца вектора магнитного момента ток казался направленным против часовой стрелки, I — сила тока. Магнитное взаимодействие спиральных токовых вихрей связано с силой Лоренца  $\mathbf{F}_L = [\mathbf{j} \times \mathbf{B}]/c$ , где  $\mathbf{B}$  представляет сумму геомагнитного поля и магнитных полей спиральных токовых вихрей для заданной точки,  $\mathbf{j}$  — локальная плотность тока. В зависимости от ориентации вихрей возможно их отталкивание, поворот, или же притяжение и объединение, с поглощением вихрей меньшего масштаба. При нарушении условия  $\nabla P/\rho > g$  из облачности торнадо к Земле вытягиваются крутящиеся воронки, обладающие большой разрушительной энергией.

Размеры аэрозолей на несколько порядков величины превышают размеры молекул. Ионизованная аэрозольная частица набирает импульс, на несколько порядков величины превышающий импульс малых частиц, возбуждая электрические поля и структуры плазменных вихрей. Кроме того, возникает вихревое движение в скрещенных полях (электрическом поле вихря и геомагнитном поле). В поле столкновений крупных массивных частиц – аэрозолей с атомами и молекулами атмосферы следует перейти от кинематики к гидродинамике и использовать градиенты давления, непосредственно связанные с полем столкновений. В поле градиентов давления вихрь сохраняется, т.е.  $[\nabla \times \mathbf{v}] = \text{const}$ .

Так как вязкость атмосферы мала, то можно получить уравнение типа обобщённого уравнения Хасегава—Мимы. Наложение дипольного температурного возмущения  $\partial \ln T / \partial y >> \partial \ln T / \partial x$  позволяет выделить условия, при которых дисперсия и нелиней-

ность Кортевега – де Фриза взаимно скомпенсированы (Незлин, Черников, 1995; Ижовкина и др., 2015):

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

где  $J(\Phi, \ln(\Delta\Phi)) = \Phi_x(\ln(\Delta\Phi))_y - \Phi_y(\ln(\Delta\Phi))_x$ , M — масса иона,  $\Omega_{0i}$  — ионная циклотронная частота,  $V_{dw}$  — скорость дрейфа вихря,  $\Phi$  — потенциал электрического поля.

Скорость вращения частиц плазмы в скрещенных полях:

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

где распределение концентрации частиц  $N=N_0\exp(e\Phi/T(y))$ . От скорости ионизованных аэрозолей зависит и скорость увеличения массы аэрозолей при конденсации влаги. При напряжённости электрического поля  $E\sim 10^5~{\rm B/m}$  плотность энергии поля сопоставима с плотностью кинетической энергии частиц в атмосферной облачности для скорости частиц  $\sim 10~{\rm m/c}$ , средней массы  $\sim 10^{-23}\,{\rm r}$  и плотности частиц  $\sim 10^{19}\,{\rm cm}^{-3}$ . С ростом градиентов давления ортогонально геомагнитному полю увеличивается устойчивость когерентных плазменных вихревых структур.

Уравнения плазменного вихря зависят от градиентов плотности и температуры плазмы, т.е. от градиента давления. Подобные нелинейные полевые структуры имеют дополнительную устойчивость – плазменный вихрь в атмосфере вращается в скрещенных полях: электрическом поле вихря и геомагнитном поле. В полях градиентов давления вихрь сохраняется. Это следует из уравнения движения и наблюдается в природе. В уравнениях плазменного вихря градиенты плотности и температуры несут информацию о поле импульсов и поле столкновений частиц. Появление спиральных вихрей может быть связано дополнительно с градиентами давления вдоль силовых линий геомагнитного поля. При захвате вихрем нейтральных частиц эффективно нарастает масса плазменного вихря, замедляется скорость его вращения при сохранении импульса и энергии в вихревой структуре. Длина свободного пробега атомов и молекул в атмосфере составляет для приземного слоя  $l\sim\sigma_{n}N_{n}\sim10^{-3}$  см, где  $\sigma_{n}\sim10^{-16}$  см²,  $N_{n}\sim10^{19}$  см³. Для нижних слоёв атмосферы выполняется условие  $N_a/N_n\ll 1$ ,  $N_a$  — концентрация аэрозолей. Аэрозольную плазму в грозовой облачности можно рассматривать как пылевую плазму. Аэрозольная масса находится в гравитационном поле, но удерживается в атмосфере градиентами давления, если  $\nabla P/\rho > g$  . Электрическое поле плазменного вихря также удерживает вихрь.

Ионы аэрозолей могут формировать плазменные вихри в атмосфере при непрерывно действующих источниках ионизации и при нагреве солнечным потоком ячеистых мозаичных распределений аэрозолей. Частица с размерами  $r_a \sim 0.1$  мм в направленном потоке малых частиц, атомов и молекул атмосферы ускоряется при столкновениях до скорости, сопоставимой со скоростью потока  $v_n \sim 10^3$  см/с, в приземном слое за время  $\tau_a \sim 1$  с. Направленные потоки связаны с неоднородным нагревом, градиентами давления. Поляризационный дрейф, вынос ионов аэрозолей из областей нагрева, образующихся при

затухании электрического поля электростатических колебаний и/или плазменных вихрей, усиливают диффузию ионизованных аэрозолей ортогонально геомагнитному полю. В областях нагрева может проявляться повышенная грозовая активность. Она иногда наблюдается в средних широтах даже в зимний период.

При пересечении облаком плазмы силовых линий геомагнитного поля в облаке возникает электрическое поле и ток, т.е. эффект динамо. При перемещении ионизованного облака поперёк геомагнитного поля со скоростью движения торнадо  $v \sim 100$  км/час электрическое поле динамо составляет всего  $E \sim vB/c \sim 10^{-3}$  В/м, что на несколько порядков величины ниже полей, появляющихся в грозовых фронтах. При разряде молнии с силой тока  $\sim 10^5$  А и длительности импульса порядка секунды накопленный заряд составляет q > 1 Кл. Для облака с размерами  $r \sim 1$  км электрическое поле будет  $E \sim q/(4\pi r^2) \sim 10^2$  В/м. Электрические поля в окрестности грозовых облаков (см.  $puc.\ 1$ ) выше приведённой оценки на несколько порядков (Михайловская и др., 2014а, 2014б). Поэтому такие поля могут способствовать генерации интенсивных ветровых потоков в атмосфере и усилению слабых плазменных вихрей.

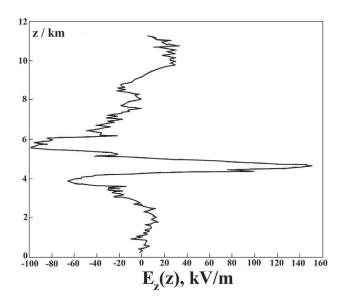


Рис. 1. Высотный профиль электрического поля в грозовой облачности

На образование канала разряда молнии влияет сила Ампера. В случае двух токовых каналов  $I_1$ ,  $I_2$  длиной l, расположенных на расстоянии d, действует сила притяжения  $F = 2(\mu/c^2)(I_1I_2l/d)$ , если токи направлены в одну сторону, и сила отталкивания, если направление токов взаимно противоположное,  $\mu$  — магнитная проницаемость среды. Тенденция сохраняется для криволинейных токовых каналов, но силы взаимодействия между ними имеют существенно более сложный вид. Силы притяжения между токовыми плазменными структурами способствуют накоплению энергии и массы образующейся мощной нелинейной плазмоподобной структуры.

Для ионосферы плазменные неустойчивости неоднородной плазмы провоцируют развитие нелинейных процессов (Гдалевич и др., 2003, 2006). Переход от однородной плаз-

мы к неоднородной отслеживается для электростатических ( $\mathbf{k} \parallel \mathbf{E}$ ) мод. Операторная форма диэлектрической проницаемости имеет вид (Kennel, Engelman, 1966; Kennel, Ashour-Abdalla, 1982):

 $\varepsilon = 1 + \frac{\omega_p^2}{k^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int d\mathbf{v} J_n^2 \left(\frac{k_{\perp} \mathbf{V}_{\perp}}{\Omega}\right) \left(k_z \frac{\partial f_0}{\partial \mathbf{V}_z} + \frac{n\Omega}{\mathbf{V}_{\perp}} \frac{\partial f_0}{\partial \mathbf{V}_{\perp}}\right) / \left(\omega - n\Omega - k_z \mathbf{V}_z\right) ,$ 

где  $f_0$  — функция распределения частиц по скорости,  $\mathbf{v}_\perp, \mathbf{v}_z$  — ортогональная и параллельная относительно внешнего магнитного поля составляющие скорости частиц,  $k_z, k_\perp$  – соответственно продольная и ортогональная составляющие волнового вектора к электростатических возмущений;  $\boldsymbol{\omega}_p$  – электронная плазменная и  $\Omega$  – электронная циклотронная частоты. Из формулы видно, что амплитуда колебаний кривой  $\varepsilon(\omega, \mathbf{k})$  относительно 1, связанная с изменением параметров задачи, пропорциональна плотности плазмы. Появление собственных частот возможно при амплитуде колебаний кривой є, превышающей 1. При амплитуде колебаний меньше 1 собственные частоты исчезают ( $\varepsilon \neq 0$  ни в одной из точек  $(\omega, \mathbf{k})$  -пространства), происходит обрезание спектра электростатических свободных колебаний с уменьшением плотности плазмы. Такое поведение спектра свободных колебаний свидетельствует о возможном нагреве областей ионосферной плазмы с пониженной плотностью и вытеснении 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). При затухании компонента электрического поля колебаний, ортогонального геомагнитному полю, появляются поляризационные потоки заряженных частиц. Такие потоки наблюдаются в ионосфере в виде всплесков на хвосте функции распределения частиц по скорости (Шютте, Ижовкина, 1989; Ижовкина и др., 2000). Разделение заряда при поляризационном дрейфе частиц приводит к возбуждению электрического поля плазменных вихрей.

В однородном случае затухание осциллирующего электрического поля в атмосфере можно оценить по следующей схеме. Уравнения движения заряженных частиц в холодной плазме имеют вид

$$\frac{d\mathbf{v}_{\perp}}{dt} = \frac{z_{i}e\mathbf{E}_{\perp}}{m_{i}} + [\mathbf{v}_{\perp} \times \Omega_{i}] - \nu_{in}\mathbf{v}_{\perp}, \frac{d\mathbf{v}_{II}}{dt} = ze\mathbf{E}_{II} / m_{i} - \nu_{in}\mathbf{v}_{II}, \quad \mathbf{v}, \mathbf{E} \sim \exp(i\omega t - i \mathbf{k} \mathbf{r}),$$

где  $V_{in}$  — частота столкновений ионов с нейтралами (это уравнения для каждой ионной компоненты плазмы). Плотность тока составляет:

$$\mathbf{j} = \sigma_{\text{II}} \mathbf{E}_{\text{II}} + \sigma_{P} \mathbf{E}_{\perp} + \sigma_{H} [\mathbf{B}_{0} \times \mathbf{E}] / B_{0},$$

$$\sigma_{\text{II}} = z^{2} e^{2} N_{i} (v_{in} - i\omega) / [m_{i} (\omega^{2} + v_{in}^{2})],$$

$$\sigma_{\perp} = z^{2} e^{2} N_{i} (v_{in} + i\omega) / \{m_{i} [\Omega_{i}^{2} + (v_{in} + i\omega)^{2}]\},$$

$$\sigma_{H} = z^{2} e^{2} N_{i} \Omega_{i} / \{m_{i} [\Omega_{i}^{2} + (v_{in} + i\omega)^{2}]\}.$$

Подставляя параметры каждого из ионных компонентов плазмоподобной структуры, получим формулы проводимости для этих компонент. Уменьшение плотности энергии поля

определяется выражением 
$$\frac{\partial}{\partial t}(\frac{E^2}{8\pi}) = \mathbf{j}\mathbf{E}$$
. В холодной плазме с наименьшими потерями

распространяется и проецируется вдоль геомагнитного поля параллельная ему низкочастотная составляющая электрического поля. Плазменные вихри нарастают за счёт нагрева и ионизации аэрозолей. Различие в затухании электрического поля плазменного вихря и поля электрических колебаний в холодной плазме обусловлено топологией полей. Заряженные частицы в поле плазменного вихря вращаются вместе с полем в одном направлении. При столкновениях с нейтральными частицами нейтральные частицы будут вовлечены в движение в том же направлении. Суммарный импульс сталкивающихся частиц сохраняет величину и направление. В осциллирующем электрическом поле направление поля и скорости движения заряженных частиц в заданной точке меняются в течение каждого периода осцилляций на противоположное. В этом случае поле скоростей нейтральных частиц при столкновениях с заряженными частицами не имеет выделенного направления. Импульс частиц при столкновениях рассеивается.

Процессы интенсификации нелинейных структур, нелинейные волны, солитоны, вихри развиваются в столкновительных средах при условии  $l_{\it fp} << L$ , где  $l_{\it fp}, L$  — длина свободного пробега частиц и размеры неоднородности. Расслоение плазменной неоднородности на мелкомасштабные структуры может быть инициировано немонотонной зависимостью диэлектрической проницаемости электростатических колебаний от координат при монотонной начальной зависимости от координат плотности плазмы (Ижовкина, 2010). Появление ячеистых мозаичных распределений аэрозолей в атмосфере может быть вызвано немонотонным расслоением аэрозольного облака в полях электростатических колебаний.

Образование вихрей в замагниченной плазме связано с зависимостью от параметров плазмы фазового объёма электростатических колебаний в пространстве частота — волновой вектор,  $(\omega, \mathbf{k})$  — в пространстве (Ижовкина, 2010). При затухании колебаний и усилении градиентов плотности и температуры плазмы ортогонально геомагнитному полю в ионосфере могут возбуждаться плазменные вихри. При затухании электростатических колебаний компонент плазмы и плазменных вихрей могут возбуждаться более мощные плазменные вихри. Классификация неустойчивостей неоднородной плазмы представлена в работе (Михайловский, 1977). В ионизованной облачности может возбуждаться примесная неустойчивость, если градиент плотности примеси тяжёлых холодных ионов направлен против градиента плотности «горячей» фоновой плазмы.

В зависимости от параметров среды в пылевой аэрозольной плазме могут возбуждаться электростатические колебания тяжёлого ионного компонента на неустойчивостях градиентного типа. Конденсация влаги на частицах ионизованного смога при формировании облачности может привести к развитию неустойчивости слоя тяжёлых частиц, расположенного над слоем лёгких частиц.

Сезонная зависимость освещённости атмосферы отражается на накоплении заряда в облаках: вероятность появления грозовых разрядов в зимнее время мала. Смог, газ и взвешенные частицы — аэрозоли, изменяют оптические свойства атмосферы и усиливают поглощение ею солнечного излучения. При конденсации влаги на аэрозольных частицах нарастает непрозрачность атмосферного слоя. С ростом облаков увеличиваются градиенты температуры и давления в окрестности облачной тени. В результате происходит нарастание энергии вихрей. В дополнение к потокам скрытого тепла, аэрозоли влияют на динамику влажных воздушных масс. Накопление влаги в облачности ограничено влиянием гравитационного поля Земли: при условии  $\nabla P/\rho < g$  происходит выпадение осадков. Вынос аэрозолей струйными течениями на градиентах давления из областей нагрева в верхнюю тропосферу и стратосферу приводит к нарастанию времени жизни аэрозолей в атмосфере и эффектам последействия в погоде и климате. Атмосферные вихри влияют и на ионосферу (Ерохин и др., 2012).

#### Заключение

Уравнения плазменного вихря зависят от градиентов плотности и температуры плазмы, т.е. от градиентов давления. В полях градиентов давления вихрь сохраняется. В уравнениях плазменного вихря градиенты плотности и температуры несут информацию о поле импульсов и поле столкновений частиц. Нелинейные полевые структуры, например, плазменный вихрь, имеют дополнительную устойчивость. Плазменный вихрь в атмосфере вращается в скрещенных полях: электрическом поле вихря и геомагнитном поле. Ячеистая мозаичная структура полей градиентов давления в атмосфере при нагреве и ионизации частиц способствует генерации плазменных вихрей в геомагнитном поле. Электрическое поле вихря возбуждается плазменными потоками, ортогональными геомагнитному полю, подобно возбуждению МГД-генератора. При больших напряжённостях электрического поля плотность энергии поля сопоставима с плотностью кинетической энергии частиц в атмосфере. С ростом градиентов давления (ортогонально геомагнитному полю) нарастает устойчивость когерентных плазменных вихревых структур. В ячейках возбуждается электрическое поле, когерентно вращающееся вместе с частицами плазмы. Захват нейтральных частиц вихревой структурой приводит к нарастанию эффективной массы вихря. В генерации плазменных вихрей и накоплении вихрями энергии и массы в атмосфере при конденсации влаги проявляется заметное влияние аэрозольной примеси. При взаимодействии вихрей может образоваться мощный атмосферный вихрь. Яркий пример – торнадо: вращается крупномасштабный вихрь, а в его структуре видны вихри меньшего масштаба, в виде воронок, спускающихся к Земле. Взаимодействие токовых спиральных вихрей подобно взаимодействию соленоидов. Поскольку атмосфера – среда диффузионная и плазменные вихри – не металлические, можно отметить влияние магнитных моментов токовых плазменных вихрей на интенсификацию вихревой структуры нейтральной компоненты

атмосферы. В результате электромагнитных взаимодействий спиральных токовых вихрей образуется вихрь с нарастающим магнитным моментом.

## Литература

- Абурджаниа Г.Д. Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диспергирующих средах. М.: КомКнига, 2006. 328 с. *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. Гдалевич Г.Л., Ижовкина Н.И., Озеров В.Д. Структура плазменной каверны в F-слое ионосферы на геомагнитном экваторе по данным спутника КОСМОС-900 // Космич. исслед. 2003. Т. 41. № 6. С. 596—606.
- 4. Гдалевич Г.Л., Ижовкина Н.И., Озеров В.Д., Банков Н., Чапканов С., Тодориева Л. Плазменные неоднородности в неустойчивой внешней ионосфере по данным спутника Интеркосмос-Болгария-1300 // Космич. исслед. 2006. Т. 44. № 5. С. 438–443.
- 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. T. 11. № 4. C. 5–22.
- Иванов К.Г., Харишладзе А.Ф. Динамика солнечной активности и аномальной погоды лета 2010 г. 1. Секторное становление и разрушение структуры антициклона // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51. № 4. Č. 450–455.
- 7. Ижовкина Н.И., Прутенский И.С., Пулинец С.А., Шютте Н.М., Плохова О.А., Клос З., Роткель Х. Потоки заряженных частиц и электромагнитное излучение в верхней авроральной ионосфере по данным эксперимента АПЭКС // Геомагнетизм и аэрономия. 2000. Т. 40. № 4. С. 53–59.
- Ижовкина Н.И. Потоки энергии и частиц в неустойчивой плазме с вихревыми структурами в верхней ионосфере в неоднородном геомагнитном поле // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 6. С. 817–824.
- Ижовкина Н.И. Плазменные вихри в ионосфере и атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 6. C. 817-828.
- 10. 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 // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39. № 4. С. 39–43.
- 11. 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.
- 12. 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. 2014а. Т. 11. № 2. С. 111–120.
- 13. 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, 2014б. С. 424–429.
- 14. Михайловский А.В. Теория плазменных неустойчивостей. Т. 2. Неустойчивости неоднородной плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 312 с.
- 15. 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.
- 16. Незлин М.В., Черников Г.П. Аналогия дрейфовых вихрей в плазме и геофизической гидродинамике // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 11. С. 975–999.
- 17. Шютте Н.М., Ижовкина Н.И. О динамике резонансных заряженных частиц в поле циклотронных волн //
- Космические исследования. 1989. Т. 27. № 1. С. 71–75.

  18. *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.
- 19. Kennel C.F., Ashour-Abdalla M. Electrostatic waves and strong diffusion of magnetospheric electrons // Magnetospheric plasma physics. Dordrecht: Reidel Publishing Co., 1982. P. 245-344.
- 20. Kennel C.F., Engelman F. Velocity space diffusion from week plasma turbulence // Phys. Fluids. 1966. Vol. 9. No. 12. P. 2377–2388.

# Vortex structures in aerosol atmospheric plasma

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

Strong electric fields are observed when probing atmospheric clouds. The current distribution is determined by electric fields and the environment conductivity. The emergence of vortex structures is stochastically determined in a heterogeneous gyrotropic environment. The gyrotropy of the ionosphere and the atmosphere is associated with Coriolis force due to a rotation of the Earth and also with movements of charged particles in the geomagnetic field. The vortices of plasma nature are observed in the atmosphere. Non-monotonic stratification of unstable plasma irregularities leads to the formation of cellular structures. The manifestation of the electric field of plasma vortices may occur in fields of pressure gradient with a mosaic mesh topology under particles ionization. Aerosol particles play an important role in the atmospheric vortices generation. It is taken into consideration that the forces of the electromagnetic interaction between elements of a flow structure contribute to the intensification of this structure (increase of its energy and involvement of the atmospheric mass into it) by the powerful plasma vortex in the aerosol plasma of atmospheric clouds. The interaction of currents in spiral plasma vortices is determined by their intensity and geometrical parameters of their distribution in space.

Keywords: gyrotropy, plasma vortices, the geomagnetic field, atmospheric electric fields, aerosol particles, ionosphere

Accepted: 20.06.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-157-167

## References

- 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.
- Bondur V.G., Pulinets 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.
- Gdalevich G.L., Izhovkina N.I., Ozerov V.D., Struktura plazmennoi kaverny v F-sloe ionosfery na geomagnit-nom ekvatore po dannym sputnika KOSMOS-900 (The structure of the plasma cavity in the F-layer of the iono-sphere in the geomagnetic equator, according to satellite COSMOS-900), *Kosmich. issled.*, 2003, Vol. 41, No. 6,
- Gdalevich G.L., Izhovkina N.I., Ozerov V.D., Bankov N., Chapkanov S., Todorieva L., Plazmennye neodnorodnosti v neustoichivoi vneshnei ionosfere po dannym sputnika Interkosmos-Bolgariya-1300 (Plasma inhomogeneities in unstable outer ionosphere according to the satellite Intercosmos-Bulgaria-1300), Kosmich. issled., 2006, Vol. 44, No. 5, pp. 438–443.
- Erokhin N.S., Mikhailovskaya L.A., Shalimov S.A., Ob usloviyakh prokhozhdeniya 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.
- Ivanov K.G., Kharshiladze A.F., Dinamika solnechnoi aktivnosti i anomal'noi pogody leta 2010 g. 1. Sektornoe stanovlenie i razrushenie struktury antitsiklona (Dynamics of the solar activity and anomalous weather of summer 2010. 1. Sectoral formation and destruction of anti-cyclone structure), Geomagnetizm i aeronomiya, 2011,
- Vol. 51, No. 4, pp. 450–455. Izhovkina N.I., Prutenskii I.S., Pulinets S.A., Shyutte N.M., Plokhova O.A., Klos Z., Rotkel' Kh., Potoki zaryazhennykh chastits i elektromagnitnoe izluchenie v verkhnei avroral'noi ionosfere po dannym eksperimenta APEKS (Flows of charged particles and electromagnetic radiation at the top of the auroral ionosphere according to the APEX experiment), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2000, Vol. 40, No. 4, pp. 53–59. 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.
- 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.
  10. Izhovkina N.I., Afonin V.V., Karpachev A.T., Prutenskii I.S., Pulinets S.A., Struktura ionosfernogo provala dlya raznykh urovnej geomagnitnykh vozmushchenii i istochniki nagreva plazmy verkhnej dnevnoj 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.
- 11. Izhovkina N.I., Erokhin N.S., Mikhailovskaya L.A., Artekha S.N., Osobennosti vzaimodeistviya plazmennykh 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.

- 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.
   Mikhailovskaya L.A., Erokhin N.S., Krasnova I.A., Artekha S.N., Strukturnye kharakteristiki elektricheskoi
- 13. Mikhailovskaya L.A., Erokhin N.S., Krasnova I.A., Artekha S.N., Strukturnye kharakteristiki elektricheskoi turbulentnosti v grozovoi oblachnosti (Structural characteristics of electrical turbulence in storm clouds), *Proc. International Conference MSS-14 "Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence"*, Moscow: Lenand, 2014, pp. 424–429.
- 14. 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.
- 15. 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.
- ZhETF, 1983, Vol. 85, No. 6 (12), pp. 1979–1987.
  16. 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.
- 17. Shyutte N.M., Izhovkina N.I., O dinamike rezonansnykh zaryazhennykh chastits v pole tsiklotronnykh voln (On the dynamics of the resonance charged particles in the field of cyclotron waves), *Kosmicheskie issledovaniya*, 1989, Vol. 27, No. 1, pp. 71–75.
- 18. 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.
- 19. Kennel C.F., Ashour-Abdalla M., Electrostatic waves and strong diffusion of magnetospheric electrons, *Magnetospheric plasma physics*, Dordrecht: Reidel Publishing Co., 1982, pp. 245–344.
- 20. Kennel C.F., Engelman F., Velocity space diffusion from week plasma turbulence, *Phys. Fluids.*, 1966. Vol. 9, No. 12, pp. 2377–2388.