

## Электростатические возмущения неоднородной аэрозольной плазмы и устойчивость атмосферных вихрей

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, 108840, Россия  
E-mail: izhovn@izmiran.ru*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

Атмосфера Земли находится под постоянным воздействием различных ионизирующих источников. Ионизация аэрозоля в стратосфере и верхней тропосфере высыпавшимися частицами космических лучей усиливает вихревую активность атмосферы. Важная роль заряженной аэрозольной примеси проявляется в генерации плазменных вихрей и накоплении вихрями энергии и массы в атмосфере при конденсации влаги. В работе показано, что в плазменных неоднородностях возбуждаются немонотонные электростатические возмущения. Аналитические решения представлены для плазмы без магнитного поля. Применительно к атмосфере такие решения соответствуют возбуждению электростатических возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля. Расчёты выполнены в приближениях горячей и холодной плазмы. В электрических полях неоднородность распадается на ячеистую структуру. При неоднородном нагреве структуры генерируются ансамбли плазменных вихрей. Электрические поля в направлении вдоль геомагнитного поля ускоряют взаимодействие плазменных вихрей в геомагнитной силовой трубке. Усиливается вихревая активность атмосферы при взаимодействии плазменных вихрей с вихрями Россби. В аналитических расчётах диэлектрической проницаемости неоднородной плазмы использовано кинетическое приближение, при этом учитывается распределение частиц по скорости. Устойчивость и упругость атмосферных вихревых структур связана с электрическими полями в неустойчивой аэрозольной плазме.

**Ключевые слова:** вихревая активность атмосферы, ячеистые структуры аэрозольной плазмы, геомагнитное поле, кинетическое приближение в неоднородной плазме

Одобрена к печати: 21.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-252-259

### Введение

Аэрозоль играет важную роль в возбуждении атмосферных плазменных вихрей. Параметры аэрозольного загрязнения атмосферы фиксируются баллонными, самолётными и лидарными измерениями (Арумов, Бухарин, 2017), а также с помощью спутникового дистанционного зондирования. Аэрозольная частица имеет общую внешнюю электронную оболочку и низкий потенциал ионизации в сравнении с потенциалом для отдельных атомов в её составе. Фоновый уровень концентрации ионизованного аэрозоля в атмосфере связан с ионизацией частиц при трении. Аэрозоли ионизируются также потоками фотонов, потоками космических лучей солнечного и галактического происхождения. Ионизация аэрозолей может быть связана и с антропогенными источниками. Существенный источник аэрозоля — извержение вулканов. Наблюдаются вулканические молнии, следовательно, из вулканов в атмосферу выбрасывается в том числе и плазма. Механизм ионизации в этом случае термический, подобный трению. Кинетическая энергия движения частиц переходит в энергию ионизации. Космические лучи ионизируют частицы непосредственно в атмосфере.

Климатические процессы многопараметричны. Отслеживается усиление влияния пустынь на климат. Это видно на примере Европы. Влияет пустыня Сахара и антропогенная пустыня, уничтожение лесов и растительного покрова. Мы рассматриваем в качестве климатического воздействия и влияние космических лучей на ионизацию аэрозоля, как и авторы работы (Гинзбург и др., 2008).

Зимние грозы — явление редкое, но они наблюдаются в средних и даже высоких широтах. На генерацию плазменных вихрей влияет ионизация аэрозоля космическими лучами солнечного и галактического происхождения. Возбуждение ячеистого магнитогиродинамического (МГД) генератора играет важную роль в динамике быстро нарастающих атмосферных вихревых структур при взаимодействии плазменных вихрей и вихрей Россби. Даже в высоких широтах наблюдаются зимние взрывные циклоны.

В низких широтах генерируются мощные вихревые структуры: торнадо и тайфуны. Тайфун имеет форму глаза. В стене глаза наблюдаются многочисленные вспышки молний. Сопоставление дистанционных наблюдений за тропическими циклонами и молниевыми вспышками показывает, что за увеличением молниевой активности в стене глаза следует интенсификация тропического циклона (Fierro et al., 2011; Leary, Ritchie, 2009; Price et al., 2009). Таким образом, плазменные вихри могут оказывать заметное влияние на поведение тропических циклонов. Размеры крупномасштабной вихревой структуры тайфуна — порядка тысячи километров. Сложная вихревая структура тайфуна видна не только по картине разрядов молнии. Плазменные вихри в ней наблюдаются в виде воронок, свисающих к Земле. Наиболее мощные воронки достигают поверхности Земли. Вихревая масса воронок обладает подъёмной силой. Тайфун — это в том числе сложный ячеистый МГД-генератор (Ижовкина, 2014; Ижовкина и др., 2016, 2018; Artekha, Belyan, 2013; Izhovkina et al., 2016). Образование ячеистой структуры плазмы связано с возбуждением электростатических возмущений в плазменных неоднородностях. Структура тайфуна изменяется под воздействием градиентов давления и электрических полей. Геомагнитное поле работы не совершает, но влияет на возбуждение плазменных вихрей.

При взаимодействии циклона и не блокирующего антициклона наблюдается подталкивание одной структуры другой. Упругость вихревым структурам придают электрические поля, токи и плазменные вихри. В результате дрейфует пара циклон — антициклон, взаимодействие между ними не носит характер простого перемешивания воздушных масс.

Плазменные вихри придают дополнительную устойчивость атмосферным вихревым структурам. В среде с двойной гиротропией атмосферные вихревые структуры образуются при взаимодействии вихрей Россби с плазменными вихрями. Вихри разной природы взаимодействуют на роторном уровне как вихри скорости частиц. Структуры циклонического типа дополнительно накапливают энергию при конденсации влаги и теряют её при выпадении осадков. Потери энергии связаны также с излучением акустико-гравитационных волн, электромагнитных волн и фотонов в широком спектральном диапазоне при молниевых разрядах.

В России нарастает частота мощных ливней. Среднее ежегодное количество осадков меняется слабо. Длительные обложные дожди приносят меньше осадков в сравнении с ливнями. При этом и для ливней отслеживается тенденция: мощность нарастает, время сокращается. Загрязнения атмосферы влияют на погоду и климат. В исследованиях по этим направлениям представляют интерес электростатические неустойчивости аэрозольных плазменных неоднородностей.

Цель работы — показать, что в генезисе вихрей важную роль играют аperiодические электростатические возмущения неоднородной аэрозольной плазмы. По сути, плазменная неоднородность представляет собой немонотонный фильтр относительно электростатических возмущений. В плазменных неоднородностях возбуждаются аperiодические электрические поля. В работе расчёты выполнены в кинетическом приближении для горячей и холодной плазмы. Для холодной плазмы распределение частиц по скорости задано символической дельта-функцией. Диэлектрическая проницаемость электростатических возмущений неоднородной плазмы зависит от координат немонотонно. Это приводит к немонотонному расслоению плазменной неоднородности, появлению мозаичной ячеистой структуры. В таких структурах при неоднородном нагреве возбуждаются плазменные вихри. Разряды молнии при достижении электрическим полем величины пробоя атмосферного слоя служат индикатором областей мощной нелинейной накачки электрического поля. Электромагнитные взаимодействия между плазменными вихрями ускоряют процесс генерации крупномасштабных вихрей.

## Влияние электростатических возмущений аэрозольных подсистем на плазменные вихри в атмосфере

Часть энергии атмосферных вихревых структур генерируется аэрозольными плазменными вихрями. Электрические поля в ячеистых мозаичных распределениях ионизованного аэрозоля связаны с МГД-возмущениями при переносе плазмы поперёк геомагнитного поля на градиентах давления. Плазма в аэрозольном плазменном вихре вращается когерентно с электрическим полем, вращение происходит в скрещенных полях: электрическом поле вихря и геомагнитном поле. Электромагнитные взаимодействия между плазменными вихрями придают дополнительную устойчивость и упругость атмосферным вихревым структурам, например, влияют на траектории движения циклона и антициклона при их сближении. Плазменные структуры с взаимно противоположным направлением токов и магнитных моментов отталкиваются. Энергия электрического поля, накапливаемая в облачности, высвобождается в молниевых разрядах при достижении электрическим полем величины пробоя атмосферного слоя.

Вихревая активность атмосферы зависит от аэрозольной примеси. Загрязнения атмосферы из средних широт переносятся в высокие широты локальными струйными течениями. Вокруг Земли циркулируют глобальные струйные течения: два полярных, два субтропических и одно экваториальное. Электростатические возмущения играют важную роль в образовании ячеистых мозаичных распределений аэрозольной плазмы. При неоднородном нагреве таких распределений в геомагнитном поле возбуждаются ансамбли плазменных вихрей. Возбуждение плазменных вихрей в неоднородной области нагрева при ионизации частиц может быть причиной появления спиральных струйных течений. Появление объёмных спиральных вихрей в геомагнитной силовой трубке связано с градиентами давления и с электрическими полями вдоль силовых линий геомагнитного поля. Заряженные компоненты атмосферы находятся под воздействием гиротропии в геомагнитном поле и в поле вращения Земли.

Образование ячеистой структуры неоднородной плазмы стохастически детерминировано. В плазме с магнитным полем в ячейках возбуждаются плазменные вихри. В плазменных неоднородностях возбуждаются аperiodические электрические поля. Может появиться составляющая электрического поля, параллельная силовым линиям геомагнитного поля. Это важно для усиления плазменных вихрей при их взаимодействии в геомагнитной силовой трубке.

Возбуждение электрических полей в плазменных неоднородностях влияет на образование мозаичной структуры плазмы. В приближении горячей неоднородной плазмы это следует из дисперсионного уравнения электростатических возмущений. Получим аналитические решения для диэлектрической проницаемости горячей и холодной неоднородной плазмы в кинетическом приближении. Из уравнения Власова для функции распределения частиц

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}\nabla + \left[ \frac{e\mathbf{E}}{m} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \right] \nabla_{\mathbf{v}} \right\} f = 0$$

в случае отсутствия магнитного поля путём преобразований

$$f(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int \exp(i\mathbf{Kv}) \cdot f(\mathbf{K}, \mathbf{r}, t) d\mathbf{K},$$

$$f(\mathbf{K}, \mathbf{r}, t) = \int f(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t) \exp(-i\mathbf{Kv}) d\mathbf{v}$$

получим:

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + i\nabla\nabla_{\mathbf{K}} + \frac{ie}{m} \mathbf{K}\mathbf{E} \right\} f = 0.$$

Макроскопические величины плотность, поток, плотность энергии выражаются просто:

$$n(\mathbf{r}, t) = \int f(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t) d\mathbf{v} = f(\mathbf{K} = 0, \mathbf{r}, t),$$

$$\Gamma(\mathbf{r}, t) = \int \mathbf{v} f(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t) d\mathbf{v} = i \nabla_{\mathbf{K}} f(\mathbf{K}, \mathbf{r}, t) \Big|_{\mathbf{K}=0},$$

$$\mathbf{P}(\mathbf{r}, t) = m \int \mathbf{v} \mathbf{v} f(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t) d\mathbf{v} = m \nabla_{\mathbf{K}} \nabla_{\mathbf{K}} f(\mathbf{K}, \mathbf{r}, t) \Big|_{\mathbf{K}=0},$$

$$P(\mathbf{r}, t) = \frac{m}{2} \int v^2 f(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t) d\mathbf{v} = \frac{1}{2} \text{Spur}(\mathbf{P}).$$

В линейном приближении  $f \rightarrow f_0 + f$  для  $E \sim f$  получим:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + i \nabla \nabla_{\mathbf{K}} \right) f = -\frac{ie}{m} \mathbf{K} \mathbf{E} f_0.$$

Данное уравнение решается с помощью интегрирующего множителя. В случае малых начальных возмущений  $f$  решение имеет вид:

$$f(t) = \int_0^{\infty} \exp(-i \nabla \nabla_{\mathbf{K}} \tau) \cdot F(t - \tau) d\tau, \quad F(t - \tau) = -\frac{ie}{m} \mathbf{K} \mathbf{E} f_0(\mathbf{K}, \mathbf{r}, t - \tau).$$

Для расчётов диэлектрической проницаемости используем  $\mathbf{E} = \nabla \phi$  и уравнение Пуассона:  $\text{div} \mathbf{E} = 4\pi e \int f d\mathbf{v}$  для электростатических возмущений  $f$ . В результате получим дисперсионное уравнение в операторной ( $\mathbf{A} \equiv -i\tau \nabla$ ) форме:

$$\int k^2 \phi(\mathbf{k}, \omega) \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}) d\mathbf{k} = -\frac{4\pi e^2}{m} \left\{ \int_0^{\infty} \exp(i\omega\tau) d\tau \cdot \exp(\mathbf{A} \nabla_{\mathbf{K}}) \int \mathbf{k} \cdot \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}) \cdot \phi(\mathbf{k}, \omega) \mathbf{K} f_0(\mathbf{r}, \mathbf{K}) d\mathbf{k} \right\}_{\mathbf{K}=0}. \quad (1)$$

Зададим функцию распределения частиц (например, электронов) одномерной и неоднородной по оси  $z$  в виде:

$$f_0 = (2\pi)^{-1/2} N_0 \exp\left(\frac{-z^2}{b^2}\right) \cdot \alpha^{-1} \exp\left(\frac{-v_z^2}{\alpha^2}\right),$$

где  $\alpha$  — тепловая скорость для распределения Максвелла частиц по скорости. С учётом ортогональности спектральных компонент из выражения (1) получим дисперсионное уравнение электростатических возмущений:

$$\varepsilon = 1 + \frac{\sqrt{\pi} \cdot b \omega_p^2}{\sqrt{2} \cdot k^2 \alpha^2} \exp(-ikz) \int_{-\infty}^{\infty} dk_2 \left\{ \frac{k}{k_2} 2(xZ(x) + 1) \exp\left[-(k_2 - k)^2 \frac{b^2}{4}\right] \cdot \exp(ik_2 z) \right\} = 0, \quad (2)$$

где  $Z(x)$  — плазменная дисперсионная функция,  $x = \omega/(k_2 \alpha)$ ,

$$Z(x) = i \int_0^{\infty} d\tau \cdot \exp\left[ix\tau - \frac{\tau^2}{4}\right].$$

Из выражения (2) видно, что плазменная неоднородность представляет немонотонный фильтр относительно электростатических возмущений.

Для холодной плазмы с символической дельта-функцией по скорости частиц

$$f_0(z, v_z) = N_0 \exp(ct) \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{b^2}\right) \cdot \delta(v_z)$$

для  $c < 0$  дисперсионное уравнение электростатических возмущений плазменной неоднородности имеет вид:

$$\varepsilon = 1 + \omega_p^2 \exp(ct) \cdot \exp\left(\frac{-z^2}{b^2}\right) \cdot \left[ 1 + \frac{2zi}{(kb^2)} \frac{c^2 - \omega^2 + 2i\omega c}{(c^2 + \omega^2)^2} \right] = 0. \quad (3)$$

При переходе к однородной плазме  $c \rightarrow 0$ ,  $b \rightarrow \infty$  из выражения (3) получим  $\varepsilon = 1 - \omega_p^2 / \omega^2 = 0$ , т.е. дисперсионное уравнение холодной однородной плазмы, где  $\omega_p^2 = 4\pi N_0 e^2 / m$  — квадрат плазменной частоты.

Из выражения (3) видна тенденция: появление аperiодического электростатического возмущения в плазменной неоднородности на частотах ниже локальной плазменной. Для

$$f_0(z, v_z) = N_0 \exp\left\{\frac{-z^2}{b^2}\right\} \cdot \delta(v_z)$$

имеем:

$$k = \frac{2zi \frac{\omega_p^2}{b^2 \omega^2} \exp\left\{\frac{-z^2}{b^2}\right\}}{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \exp\left\{\frac{-z^2}{b^2}\right\}},$$

где  $k$  — величина пространственного вектора электростатических возмущений.

Плазменная неоднородность представляет немонотонный фильтр относительно электростатических возмущений. Немонотонное расслоение неоднородности способствует образованию мозаичной структуры и возбуждению плазменных вихрей в такой структуре при её нагреве.

В неустойчивой плазме рост электростатических возмущений оценивается относительно фонового теплового уровня электрических полей. Тепловые флуктуации плотности энергии поля составляют  $E^2 / 8\pi \sim T / r_D^3$ ,  $r_D \sim v_T / \omega_p$ , где  $T$ ,  $v_T$  — тепловая энергия и скорость частиц;  $r_D$  — дебаевский радиус.

Электрическое поле плазменного вихря возбуждается подобно полю МГД-генератора. При условии  $1 - (\omega_p^2 / \omega^2) \exp\{-z^2 / b^2\} < 0$  электрические поля нарастают на частотах меньше локальной плазменной частоты.

Плазменные процессы в атмосфере влияют на погоду и климат. Магнитное поле работу не совершает, но оно подключается к возбуждению электрического поля на градиентах давления в потоках плазмы ортогонально геомагнитному полю. Для направления вдоль геомагнитного поля сила Лоренца равна нулю. В этом случае можно использовать приближение незамагниченной плазмы. Выше были представлены решения для анализа электростатических возмущений неоднородной плазмы без магнитного поля для случаев холодной и горячей плазмы при исследовании ячеистых структур в атмосфере. В динамике атмосферных плазменных неоднородностей важную роль играют электрические поля (включая молниевые разряды) и плазменные вихри, усиливающие вихревую активность атмосферы (Синкевич и др., 2017; Шалимов, 2018). На основании расчётов показано, что электростатическая неустойчивость неоднородной плазмы приводит к образованию немонотонных ячеистых структур. Возбуждение плазменных вихрей в плазменных ячейках при конденсации влаги на аэрозолях и неоднородном нагреве таких структур влияет на образование крупномасштабных вихрей — циклонического и антициклонического типа. При этом взаимодействие плазменных вихрей и вихрей Россби происходит на роторном уровне как вихрей скорости частиц. Часть энергии атмосферных вихревых структур генерируется плазменными вихрями.

В плазменных неоднородностях может появиться составляющая аperiодического электрического поля, параллельная силовым линиям геомагнитного поля, что важно для образования каналов молнии. Ток распространяется по пути наименьшего сопротивления. Проводимость плазмы нарастает с концентрацией заряженных частиц, с ростом плазменной плотности. Молниевые разряды связаны с областями повышенной плотности плазмы и/или напряжённости электрического поля. Экстремумы неоднородной структуры торнадо также проявляются разрядами молнии. Притяжение токов одного направления формирует главный канал молнии. Эффект виден на примере ветвящейся молнии. Одновременное наблюдение нескольких молниевых разрядов в разных местах торнадо связано с его ячеистой структурой

и плазменными вихрями. На генерацию вихревых структур, в частности тайфунов и торнадо, может влиять ионизация атмосферных частиц космическими лучами (Бондур и др., 2008; Ижовкина и др., 2017; Izhovkina et al., 2019).

## Заключение

На градиентах давления и потоках аэрозольной плазмы ортогонально геомагнитному полю в ячеистых структурах генерируются плазменные вихри. В работе показано, что в неоднородной плазме в направлении вдоль геомагнитного поля возбуждаются аperiодические электрические поля. В электрических полях усиливаются взаимодействия плазменных вихрей. Электрические поля влияют на вихревые структуры атмосферы. Такие структуры возбуждаются при взаимодействии вихрей Россби и плазменных вихрей на роторном уровне как вихрей скорости частиц.

Под влиянием блокирующих антициклонов в Московском регионе участились как летние, так и морозные засухи. Загрязнения, запылённость атмосферы способствуют усилению упругости атмосферных вихревых структур, раскачке климатических качелей. На взаимодействие циклонов и антициклонов влияет неустойчивость неоднородной аэрозольной плазмы, электрические поля и токи, плазменные вихри в аэрозольной ионизированной примеси. В работе представлены расчёты параметров неустойчивости плазменной неоднородности для горячей и холодной плазмы. Неустойчивость способствует образованию мозаичных структур аэрозольной плазмы. В таких структурах при их неоднородном нагреве возбуждаются и усиливаются плазменные вихри. Повышается мощность и упругость атмосферных вихревых структур при взаимодействии плазменных вихрей и вихрей Россби.

При взаимодействии циклона и антициклона наблюдаются подталкивания одной структуры другой. Упругость крупномасштабным вихревым структурам придают плазменные вихри. Плазменные структуры с взаимно противоположным направлением токов и магнитных моментов отталкиваются. Циклон обходит мощный блокирующий антициклон по периферии, на взаимодействие этих структур влияют электрические поля.

## Литература

1. Арумов Г. П., Бухарин А. В. Использование ненормализованных моментов для определения статистических параметров несферических частиц по их изображениям // Измерительная техника. 2017. № 11. С. 22–26.
2. Бондур В. Г., Пулинец С. А., Ким Г. А. О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина // Докл. Акад. наук. 2008. Т. 422. № 2. С. 244–249.
3. Гинзбург А. С., Губанова Д. П., Минашкин В. М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Российский хим. журн. 2008. Т. 52. № 5. С. 112–119.
4. Ижовкина Н. И. Плазменные вихри в ионосфере и атмосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. Т. 54. № 6. С. 817–828.
5. 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.
6. Ижовкина Н. И., Артеха С. Н., Ерохин Н. С., Михайловская Л. А. Влияние солнечного и галактического космического излучения на атмосферные вихревые структуры // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 209–220.
7. Ижовкина Н. И., Артеха С. Н., Ерохин Н. С., Михайловская Л. А. Аэрозоль и активность вихрей в атмосфере // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 17. № 4. С. 5–25.
8. Синкевич О. А., Маслов С. А., Гусейн-заде Н. Г. Электрические разряды и их роль в генерации вихрей // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 2. С. 203–226.
9. Шалимов С. Л. Атмосферные волны в плазме ионосферы. М.: ИФЗ РАН, 2018. 390 с.
10. Artekha S. N., Belyan A. V. On the role of electromagnetic phenomena in some atmospheric processes // Nonlinear Processes in Geophysics. 2013. V. 20. P. 293–304.
11. 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 // Monthly Weather Review. 2011. V. 139. No. 5. P. 1492–1504.

12. *Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A.* Interaction of atmospheric plasma vortices // *Pure and Applied Geophysics*. 2016. V. 173. No. 8. P. 2945–2957.
13. *Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A.* Influence of Cosmic Ray Invasions and Aerosol Plasma on Powerful Atmospheric Vortices // *Physical Science Intern. J.* 2019. V. 23. No. 2. P. 1–13.
14. *Leary L. A., Ritchie E. A.* Lightning flash rates as an indicator of tropical cyclone genesis in the eastern north pacific // *Monthly Weather Review*. 2009. V. 137. No. 10. P. 3456–3470.
15. *Price C., Asfur M., Yair Yo.* Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency // *Nature Geoscience*. 2009. V. 2. No. 5. P. 329–332.

## Electrostatic disturbances of inhomogeneous aerosol plasma and stability of atmospheric vortices

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> *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk 108840, Russia*  
E-mail: *izhovn@izmiran.ru*

<sup>2</sup> *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

The atmosphere of the Earth is under constant influence of various ionizing sources. Aerosol ionization in the stratosphere and the upper troposphere by the precipitating particles of cosmic rays enhances vortex activity of the atmosphere. The important role of a charged aerosol impurity is manifested in generation of plasma vortices and accumulation of energy and mass of vortices in the atmosphere during condensation of moisture. It is shown that nonmonotonic electrostatic disturbances are excited in plasma inhomogeneities. Analytical solutions are presented for plasma without magnetic field. As applied to the atmosphere, such solutions correspond to the excitation of electrostatic disturbances along the lines of force of the geomagnetic field. The calculations were performed in the hot and cold plasma approximations. In electric fields, the heterogeneity breaks up into a cellular structure. Upon inhomogeneous heating of the structure, ensembles of plasma vortices are generated. Electric fields in the direction along the geomagnetic field accelerate the interaction of plasma vortices in the geomagnetic power tube. The vortex activity of the atmosphere is enhanced by the interaction of plasma vortices with Rossby vortices. In the analytical calculations of the dielectric constant of inhomogeneous plasma, the kinetic approximation was used and the particle velocity distribution was taken into account. Stability and elasticity of atmospheric vortex structures is associated with electric fields in unstable aerosol plasma.

**Keywords:** vortex activity of the atmosphere, cellular structures of aerosol plasma, geomagnetic field, kinetic approximation in inhomogeneous plasma

Accepted: 21.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-252-259

## References

1. Arumov G. P., Bukharin A. V., Use of non-normalized moments for determining the statistical parameters of nonspherical particles from their images, *Measurement Techniques*, 2018, Vol. 60, No. 11, pp. 1102–1108.
2. Bondur V. G., Pulnits S. A., Kim G. A., Role of variations in galactic cosmic rays in tropical cyclogenesis: evidence of hurricane Katrina, *Doklady Earth Sciences*, 2008, Vol. 422, No. 1, pp. 1124–1128.
3. Ginzburg A. S., Gubanova D. P., Minashkin V. M., Influence of natural and anthropogenic aerosols on global and regional climate, *Russian J. General Chemistry*, 2009, Vol. 79, No. 9, pp. 2062–2070.
4. 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.
5. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A., *Spiral'nye tokovye struktury v aerezol'noi atmosfernoii plazme (Spiral flow structures in the aerosol atmospheric plasma)*, *Inzhenernaya fizika*, 2016, No. 7, pp. 57–68.

6. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A., Vliyanie solnechnogo i galakticheskogo kosmicheskogo izlucheniya na atmosferynye vikhrevye struktury (The impact of solar and galactic cosmic rays on atmospheric vortex structures), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 209–220.
7. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A., Aerosol, plasma vortices and atmospheric processes, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 11, pp. 1513–1524.
8. Sinkevich O. A., Maslov S. A., Gusein-zade N. G., Role of electric discharges in the generation of atmospheric vortices, *Plasma Physics Reports*, 2017, Vol. 43, No. 2, pp. 232–252.
9. Shalimov S. L., *Atmosfernye volny v plasme ionosfery* (Atmospheric waves in the plasma of the ionosphere), Moscow: IFZ RAN, 2018, 390 p.
10. 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.
11. 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, *Monthly Weather Review*, 2011, Vol. 139, No. 5, pp. 1492–1504.
12. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A., Interaction of atmospheric plasma vortices, *Pure and Applied Geophysics*, 2016, Vol. 173, No. 8, pp. 2945–2957.
13. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A., Influence of Cosmic Ray Invasions and Aerosol Plasma on Powerful Atmospheric Vortices, *Physical Science Intern. J.*, 2019, Vol. 23, No. 2, pp. 1–13.
14. Leary L. A., Ritchie E. A., Lightning flash rates as an indicator of tropical cyclone genesis in the eastern north pacific, *Monthly Weather Review*, 2009, Vol. 137, No. 10, pp. 3456–3470.
15. Price C., Asfur M., Yair Yo., Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency, *Nature Geoscience*, 2009, Vol. 2, No. 5, pp. 329–332.