

УДК 533.951:551.594.22

## БИСЕРНЫЕ МОЛНИИ КАК СТОХАСТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ДИНАМИКА ВИХРЕЙ

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

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн

им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, e-mail: izhovn@izmiran.ru;

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

На вихревую активность и атмосферные струйные течения влияет неоднородная структура мозаичных распределений воздушных загрязнений. Электрические поля в аэрозольной плазме влияют на возбуждение и нарастание плазменных вихрей. Часть энергии для крупномасштабных вихрей накачивают аэрозольные плазмоподобные подсистемы. В искровых разрядах в атмосфере Земли наблюдаются бисерные молнии. В работе представлены аналитические расчёты параметров электростатических возмущений слоёв гетерогенной плазмы в приближении бесстолкновительного кинетического уравнения Больцмана. При этом рассмотрены: 1) вариант холодной плазмы с дельтаобразным  $v$ -распределением; 2) случай горячей плазмы, принимающей во внимание реальный разброс частиц по скоростям. Проведённый анализ данных случаев доказывает, что неоднородная плазма проявляет себя в отношении электростатического типа возмущений как избирательный фильтр. Показано, что образование бисерных структур молниевых разряда зависит от немоногоного распределения электрических полей в горячей неоднородной плазме. Электрические поля вдоль геомагнитных силовых линий ускоряют взаимодействие плазменных вихрей в геомагнитной силовой трубке, способствуют интенсификации возникающей крупномасштабной воздушной структуры. Двойная гиротропия земной атмосферы обеспечивает усиление возникающих структур также за счёт энергетического взаимодействия плазменных вихрей с вихрями Россби. Загрязнения атмосферы аэрозолями влияют на скорость возбуждения атмосферных вихревых структур, что приводит к изменениям погоды и климата.

**Ключевые слова:** аэрозольная плазма, электростатические возмущения, бисерные молнии, вихревая активность атмосферы, кинетическое приближение

## BEAD LIGHTNING AS STOCHASTIC STRUCTURES OF ELECTROSTATIC DISTURBANCES AND VORTEX DYNAMICS

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

<sup>1</sup>Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS,

Troitsk, e-mail: izhovn@izmiran.ru;

<sup>2</sup>Space Research Institute of RAS, Moscow

Vortex activity and atmospheric jet streams are associated with the heterogeneous structure of mosaic distributions of air pollution. Electric fields in aerosol plasma effect on the origination and magnification of plasma vortices. Part of the energy for large-scale vortices is pumped by aerosol plasma-like subsystems. In spark discharges in the Earth's atmosphere, bead lightnings are observed. The paper presents analytical results for calculated parameters of electrostatic disturbances for heterogeneous plasma layers in the approximation of the collisionless kinetic Boltzmann equation. In this case, the following are considered: 1) a variant of cold plasma with a delta-shaped  $v$ -distribution; 2) the case of a hot plasma, taking into account the real spread of particles in velocities. The analysis of such cases proves that an inhomogeneous plasma manifests itself in relation to the electrostatic type of perturbations as a selective filter. It is shown that the formation of chain structures of lightnings depends on the nonmonotonic distribution of electric fields in hot inhomogeneous plasma. Electric fields along the geomagnetic field lines accelerate the interaction of plasma vortices in the geomagnetic field tube and contribute to the intensification of the emerging large-scale air structure. The double gyrotropy of the Earth's atmosphere ensures the strengthening of the emerging structures also due to the energy interchange of plasma vortices with Rossby vortices. Air pollution by aerosols affects the rate of excitation of atmospheric vortex structures, which leads to changes in weather and climate.

**Keywords:** aerosol plasma, electrostatic disturbances, bead lightning, vortex activity of the atmosphere, kinetic approximation

Заряженные атмосферные подсистемы влияют на погоду и климат. При неоднородном нагреве ячеистых структур в атмосфере возбуждаются вихри. Плазменные вихри взаимодействуют с вихрями Россби как вихри скорости частиц. Образование плазменных ячеистых структур проявляется и в разрядах молний (так называемые бисерные молнии). Влияние атмосферных загрязнений на климат отслеживается в усилении вихревых структур. Так,

интенсивность торнадо в США нарастает ежегодно на 5%, расширяются географические зоны их действия и сезонные периоды активности. Зарождению и усилению крупномасштабных структур (смерчи, тайфуны, антициклоны) способствует нарастание концентрации аэрозольной примеси. На скорость образования атмосферных вихревых структур влияют электрические поля, возбуждаемые в неустойчивой аэрозольной плазме. Среди механизмов ионизации аэро-

золей следует учитывать ионизацию частиц при трении. Потенциал ионизации аэрозоля как единой частицы относительно составляющих её атомов мал. Добавочная ионизация при этом вызвана действием внешних ионизирующих источников [1]. Так, зимой в высокоширотной атмосфере в области геомагнитной полярной шапки генерируются локальные циклонические структуры [2], иногда проникающие до средних широт. Локализация полярных «взрывных» циклонов детерминирована. Как известно, силовые линии земного магнитного поля в области полярной шапки вытянуты в хвост магнитосферы. В результате данный регион менее защищён от проникновения космических лучей в тропосферу и ионизация аэрозолей высыпавшимися заряженными частицами провоцирует генерацию атмосферных вихрей [3–5].

Заряженные подсистемы дополнительно поддерживают структуру атмосферных вихрей. Циклонические структуры интенсифицируются при конденсации атмосферной влаги, но теряют массу с осадками. Их энергия теряется на излучение различных волн, в том числе при вспышках молний. Наблюдаются линейные, горизонтальные, вертикальные, ленточные, ветвящиеся, бисерные, вулканические и шаровые молнии, а также разряды на высоковольтных линиях. Представляют интерес исследования электростатических неустойчивостей плазменных неоднородностей, поскольку возбуждение плазменных вихрей связано с образованием мозаичной ячеистой структуры распределения плазмы.

Аэрозольные плазменные вихри подпитывают некоторой долей энергии атмосферные структуры [6, 7]. Электрические поля аэрозольных плазмоподобных подсистем могут возбуждаться при движении ионизованной системы ортогонально геомагнитному полю, при этом само поле  $\mathbf{H}$  не производит работы над плазмой. Сила Лоренца равна нулю вдоль силовых линий магнитного поля Земли, т.е. можно использовать приближение незамагниченной плазмы для расчётов вдоль данного направления. Настоящая статья представляет результаты анализа самосогласованной модуляции слоёв гетерогенной плазмы электростатическими возмущениями.

Цель исследования: показать, что в слое неоднородной плазмы возмущения электростатического типа являются причиной образования мозаичных структур и инициируют возбуждение атмосферного МГД-генератора. Электрические поля вдоль геомагнитного поля способствуют формированию ячеистых плазменных структур,

ускоряют взаимодействие плазменных вихрей в геомагнитной силовой трубке и нарастание атмосферной вихревой структуры. Ячеистые структуры электростатических возмущений визуально наблюдаются в разрядах молний – так называемые бисерные молнии. Параметры неустойчивости неоднородной нестационарной плазмы расценивались в кинетическом приближении.

*Электростатические возмущения в аэрозольной плазме*

Ионизация аэрозолей усиливает возбуждение вихревых структур. В аэрозольных подсистемах генерируются аperiодические электромагнитные поля. Интенсификация случайных электростатических возмущений получается при расчётах даже в приближении холодной плазмы, т.е. неоднородная плазма гарантированно трансформируется в мозаичную структуру. Следовательно, образование ячеистой структуры определяется электростатической неустойчивостью плазменной системы в направлении, параллельном магнитным силовым линиям. А в приближении горячей плазмы чередующаяся «бисерная» структура возмущений демонстрирует себя даже визуально.

Для вывода аналитического решения воспользуемся приближением бесстолкновительного кинетического уравнения Больцмана и получим выражение для диэлектрической проницаемости плазмы. Записав самосогласованное уравнение Власова для функции распределения электронов

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

и выполнив преобразования Фурье

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

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

для Фурье-образа получаем

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

С помощью функции распределения легко найти макровеличины системы (плотность плазмы, её поток и плотность её энергии):

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

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

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

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

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

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + i \nabla \nabla_{\mathbf{K}} \right) \tilde{f} = -\frac{ie}{m} \mathbf{K} \cdot \mathbf{E} \tilde{f}_0.$$

Это линейризованное уравнение может быть решено методом интегрирующего множителя. Воспользовавшись малостью начальных возмущений, получаем формальное решение:

$$f(t) = \int_0^{\infty} \exp(-i \nabla \nabla_{\mathbf{K}} \tau) F(t - \tau) d\tau,$$

$$F(t - \tau) = -\frac{ie}{m} \mathbf{K} \cdot \mathbf{E} \tilde{f}_0(\mathbf{K}, \mathbf{r}, t - \tau).$$

Чтобы получить выражение для диэлектрической проницаемости, запишем  $\mathbf{E} = \nabla \phi$  и уравнение Пуассона:  $\Delta \phi = -4\pi e \int f d\mathbf{v}$  для возмущённой функции  $f$ . После всех подстановок дисперсионное уравнение имеет в операторной ( $\mathbf{A} \equiv -i\tau \nabla$ ) форме следующий вид:

$$\int k^2 \tilde{\phi}(\mathbf{k}, \omega) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{k} = -\frac{4\pi e^2}{m} \times \left\{ \int_0^{\infty} \exp(i\omega\tau) d\tau \times \exp(\mathbf{A} \nabla_{\mathbf{K}}) \int \mathbf{k} \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \tilde{\phi}(\mathbf{k}, \omega) \mathbf{K} \tilde{f}_0(\mathbf{r}, \mathbf{K}) d\mathbf{k} \right\}_{\mathbf{K}=0}. \quad (1)$$

Начнём с приближения горячей плазмы. Функцию распределения электронов (параллельную оси  $z$ ) выберем в следующем виде:

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

где  $\alpha$  – квазимаксвелловская  $z$ -компонента тепловой скорости. Дисперсионное уравнение для электростатических возмущений может быть выведено из выражения (1), так как спектральные компоненты обладают свойством ортогональности:

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

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

$$Z(x) = i \int_0^{\infty} d\tau \exp(ix\tau - \tau^2 / 4).$$

Итак, в отношении стохастических электростатических возмущений из (2) следует, что неоднородность в случае горячей плазмы проявляет себя как избирательный фильтр.

Перейдём теперь к случаю холодной плазмы. Выберем в качестве распределения по скоростям символическую дельта-функцию:

$$f_0(z, v_z) = N_0 \exp(ct) \exp(-z^2 / b^2) \delta(v_z).$$

Тогда при  $c < 0$  можно получить аналогичное дисперсионное уравнение для электростатических возмущений плазмы:

$$\varepsilon = 1 + \omega_p^2 \exp(ct) \exp(-z^2 / b^2) \times$$

$$\frac{[1 + 2zi / (kb^2)](c^2 - \omega^2 + 2i\omega c)}{(c^2 + \omega^2)^2} = 0. \quad (3)$$

Заметим, что предельный переход  $c \rightarrow 0, b \rightarrow \infty$  даёт  $\varepsilon = 1 - \omega_p^2 / \omega^2 = 0$ , то есть имеем корректный переход к дисперсионному уравнению холодной одномерной плазмы; здесь  $\omega_p = \sqrt{4\pi N_0 e^2 / m}$  – плазменная частота.

Выражение (3) демонстрирует апериодическую модуляцию электростатического возмущения плазмы при  $\omega < \omega_p$ . Для  $f_0(z, v_z) = N_0 \exp(-z^2 / b^2) \delta(v_z)$  окончательно имеем

$$k = \frac{(2zi\omega_p^2 / b^2 \omega^2) \exp(-z^2 / b^2)}{1 - (\omega_p^2 / \omega^2) \exp(-z^2 / b^2)},$$

где  $k$  характеризует пространственный масштаб электростатических флуктуаций.

Таким образом, неоднородность плазмы проявляет себя как немонотонный фильтр для стохастических электростатических возмущений. Возникающее расслоение способствует мозаичному распределению аэрозольных подсистем и возбуждению в них плазменных вихрей. В канале молнии немонотонное расслоение электростатических возмущений неоднородной плазмы наблюдается визуально в виде бисерной молнии.

Для аэрозольной плазмы в атмосфере применимо приближение холодной плазмы за исключением областей искровых разрядов. Для каналов молнии необходимо рассматривать приближение горячей неоднородной плазмы. Поскольку температура в каналах молнии нарастает до  $10^4$  градуса, давление до сотен атмосфер, влияние геомагнитного поля на плазму ослабевает – молнии искрят во всех направлениях. Немонотонная «бисерная» структура электростатических возмущений горячей неоднородной плазмы проявляется и по результатам аналитических расчётов диэлектрической проницаемости – сомножитель  $\exp(-ikz)$  перед интегралом

в формуле (2). Влияние аналогичного члена под интегралом сглаживается интегрированием. Параметры неустойчивости горячей неоднородной плазмы рассчитывались в кинетическом приближении. Из расчётов следует, что электростатические возмущения неоднородной плазмы провоцируют формирование ячеистых структур.

Электрические поля придают подвижность плазменным вихрям, ускоряют их взаимодействие. В среде с двойной гиротропией усиливаются атмосферные вихревые структуры, поскольку плазменные вихри и вихри Россби взаимодействуют как вихри скорости частиц.

Вулканические извержения поставляют довольно много аэрозоля в земную атмосферу. При этом наблюдаются вулканические молнии (плазменные образования), т.е. ионизация может осуществляться не только космическими лучами, но и термически (и трением). Таким образом, атмосферные процессы зависят от многих факторов. Все виды ионизации аэрозолей мы рассматриваем в качестве климатического влияния. В динамике аэрозольных подсистем заметное влияние имеют электрические поля, усиливающие атмосферную вихревую активность [7–9]. При фазовых переходах влаги, инициируемых заряженными аэрозолями, генерируются плазменные вихри, а неравномерный нагрев подобных мозаичных структур влияет и на образование крупномасштабных атмосферных вихрей.

В циклоне градиент давления направлен вдоль радиус-вектора (к периферии), что вызвано конденсацией влаги в облаках и ростом «оптической толщины» вышележащего атмосферного слоя ( $\nabla P$  увеличивается в окрестности облачной тени). Он вынуждает двигаться влажную массу воздуха к центру, а конденсирующуюся влагу выделять скрытую теплоту (при этом движению скорость конденсации уменьшается). Роль аэрозольной плазмы наглядно проявляется в интенсификации смерчей. В антициклоне градиент давления направлен к центру и процесс образования не может быть самоподдерживающимся (хотя внутри антициклона возможно кратковременное образование более мелких циклонических ячеек). Локальные дожди и осаднение аэрозолей из атмосферы способствуют ослаблению погодного влияния антициклонов. Взаимодействие пары циклон – антициклон при накоплении ионизованных аэрозолей и усилении антициклонической структуры имеет свои особенности. Так, блокирующий антициклон, отклоняя циклон, движущийся с запада на север, сам при этом остаётся неподвижным, продолжая усиливаться. Его рост



определяется нагревом подстилающей поверхности и влиянием аэрозольной плазмы.

### Заключение

Неустойчивости аэрозольной плазмы в атмосфере проявляются в разрядах молний. При нагреве мозаичных ячеистых структур плазмы возбуждается МГД-генератор с плазменными вихрями в аэрозольных подсистемах. При последующем объединении плазменных вихрей и их энергообмене с вихрями Россби генерируются различные атмосферные вихри (смерчи, ураганы, антициклоны). Часть энергии структур накапливается плазменными вихрями.

Ячеистые структуры образуются и в разрядах молнии. В бисерных (цепных) молниях ячеистые структуры наблюдаются визуально. Из аналитических расчётов параметров неустойчивости горячей неоднородной плазмы образование таких структур представляется стохастически детерминированным. Электростатические возмущения неоднородной плазмы с магнитным полем связывают с МГД-эффектом, возбуждением электрических полей в потоках плазмы на градиентах давления ортогонально внешнему магнитному полю.

В работе представлены аналитические расчёты параметров неустойчивости горячей неоднородной плазмы. Применительно к атмосфере полученные решения соответствуют направлению электрических полей вдоль геомагнитного поля, а также для областей горячей плазмы в разрядах молнии. В расчётах использовано кинетическое приближение, учитывается распределение частиц в пространстве скоростей (а для холодной плазмы выбрано распределение в виде  $\delta$ -функции). Диэлектрическая проницаемость для электростатических возмущений зависит от координат немонотонно, что вызывает расслоение неоднородной плазмы и образование ячеистых структур в стохастических электрических полях.

Эти поля вдоль геомагнитных силовых линий ускоряют взаимодействие плазменных вихрей в геомагнитной силовой трубке, способствуют усилению атмосферной вихревой структуры. На возбуждение и усиление торнадо влияют и внешние источники ионизации – космические лучи. Расширяются и появляются новые географические зоны действия и временные периоды активности торнадо. Эти эффекты связаны с загрязнениями атмосферы и океана. Нарастает влияние на климатические качели аэрозольных загрязнений антропогенного происхождения.

### Список литературы

1. Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм влияния солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеорологические параметры – обзор // Геомагнетизм и аэронавигация. 1992. Т. 32. № 5. С. 1–22.
2. Луценко Э.И., Лагун В.Е. Полярные мезомасштабные циклонические вихри в атмосфере Арктики. Справочное пособие. СПб.: ФГБУ «АНИИ», 2010.
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. DOI: 10.1134/S1028334X08070283.
4. 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. DOI: 10.1029/93JA01050.
5. Krivolutsky A.A., Repnev A.I. Impact of space energetic particles on the Earth's atmosphere (a review). *Geomagnetism and Aeronomy.* 2012. Vol. 52 (6). P. 685–716. DOI: 10.1134/S0016793212060060.
6. Izhovkina N.I., Artekha S.N., Erokhin N.S., Mikhaylovskaya L.A. Interaction of atmospheric plasma vortices. *Pure and Applied Geophysics.* 2016. Vol. 173. Iss. 8. P. 2945–2957. DOI: 10.1007/s00024-016-1325-9.
7. Izhovkina N.I., Artekha S.N., Erokhin N.S., Mikhaylovskaya L.A. Aerosol, plasma vortices and atmospheric processes. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2018. Vol. 54. No. 11. P. 1513–1524. DOI: 10.1134/s0001433818110038.
8. 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. DOI: 10.5194/npg-20-293-2013.
9. 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. DOI: 10.7868/S0367292117020147.