

Грозовая активность и вихревые структуры в атмосфере

Н. И. Ижовкина¹, С. Н. Артеха², Н. С. Ерохин², Л. А. Михайловская²

¹ *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Троицк, 108840, Россия*
E-mail: izhovn@izmiran.ru

² *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

Ионизация аэрозоля в стратосфере и верхней тропосфере высыпающимися частицами космических лучей усиливает вихревую активность атмосферы. Важная роль аэрозольной примеси проявляется в генерации плазменных вихрей и накоплении вихрями энергии и массы в атмосфере при конденсации влаги. Вследствие каскадного характера процесса ионизации влияние космического излучения оказывается нелинейным. В плазменных неоднородностях стохастически возбуждаются аperiodические электростатические возмущения, которые играют заметную роль в генезисе вихрей. Показано, что на процесс усиления вихревых структур в атмосфере влияют обратные связи. Проявление обратных связей стимулируется грозовой активностью. Электромагнитные волны, излучаемые грозowymi разрядами, вызывают высыпание частиц радиационных поясов Земли, в частности протонов внутреннего радиационного пояса с энергией порядка 100 МэВ. Ионизация аэрозолей в каскадах высыпающихся частиц способствует возбуждению плазменных МГД-механизмов в геомагнитном поле. При взаимодействии вихрей Россби с плазменными вихрями происходит усиление атмосферных вихревых структур с нарастанием градиентов давления. Грозовые разряды связаны с плазменными вихрями. С нарастанием грозовой активности пожары в сухих грозах усиливают накачку загрязнений в атмосферу. С повышением концентрации загрязнений увеличивается плазменная вихревая активность и связанная с нею грозовая активность.

Ключевые слова: атмосферные вихревые структуры, электростатические возмущения в плазменных неоднородностях, ячеистые структуры в молниевых разрядах, обратные связи

Одобрена к печати: 09.02.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-267-276

Введение

В атмосфере Земли постоянно генерируются различные крупномасштабные вихревые структуры, такие как циклоны, тайфуны и торнадо, внутри которых часто происходят многочисленные молниевые разряды. Измерения показывают наличие внутри данных вихревых структур ряда протяжённых заряженных слоёв (Black, Hallet, 1999; Marshall, Rust, 1995; Winn et al., 2000). При грозowych разрядах также происходит образование большого количества ионизованных частиц. Все такие области, по сути, представляют собой частично ионизованную плазму (иногда заряженную, что фиксируется самолётными измерениями, иногда квазинейтральную). При этом молниевый разряд приводит к резкому неоднородному нагреву различных областей и, как результат, к генерации плазменных вихрей. Сопоставление дистанционных наблюдений за крупномасштабными вихрями и молниевыми вспышками показывает (Fierro et al., 2011; Pan et al., 2014; Price et al., 2009), что за увеличением молниевой активности очень часто следует интенсификация вихревой структуры. Таким образом, плазменные вихри могут оказывать влияние на поведение атмосферных вихрей.

Известно, что в атмосферах планет вследствие их вращения наблюдаются планетарные волны — так называемые волны Россби. Это гигантские изгибы высотных ветров, причина которых связана с изменением силы Кориолиса в зависимости от широты и с сохранением потенциальной завихренности. Длинноволновые возмущения в нижних широтах представляют собой волны Россби, на нелинейной стадии поддерживающие зональные течения, а в

средних широтах — регулярно чередующиеся циклонические и антициклонические вихри Россби, ротор скорости которых параллелен или антипараллелен вектору локальной угловой скорости вращения системы согласно (Незлин, Снежкин, 1990). Когда данные изгибы становятся достаточно выраженными, массы холодного или тёплого воздуха отрываются в виде гигантских вихревых структур и становятся маломощными циклонами и антициклонами соответственно. Таким образом, волны Россби принимают участие в формировании циклонов, антициклонов (Онищенко и др., 2008) и оказывают серьёзное влияние на погоду. Их фазовая скорость всегда имеет западную составляющую, а групповая скорость (определяющая перемещение энергии) может иметь любое направление.

Любые вихри способны взаимодействовать друг с другом (результат взаимодействия зависит от их взаимной ориентации). В процессе самоорганизации вихревых движений может происходить объединение и усиление вихревой структуры; например, для генерации из спиральной турбулентности известен так называемый обратный каскад энергии (Моисеев и др., 1983). Плазменные вихри также могут взаимодействовать с вихрями Россби на роторном генетическом уровне как вихри скорости частиц, в результате часть энергии атмосферных вихревых структур генерируется плазменными вихрями и может происходить их усиление.

Заметную роль в возбуждении атмосферных плазменных вихрей играет аэрозольная примесь (Sato et al., 2019). Параметры аэрозольного загрязнения атмосферы фиксируются баллонными, самолётными и лидарными измерениями (Арумов, Бухарин, 2017), а также с помощью спутникового дистанционного зондирования. Потенциал ионизации аэрозоля как единой частицы относительно составляющих её атомов мал. Помимо трения добавочная ионизация при этом вызвана действием внешних ионизирующих источников (Пудовкин, Распопов, 1992). Важная роль аэрозольной примеси заключается в генерации плазменных вихрей и накоплении крупномасштабными вихрями энергии и массы в атмосфере при конденсации влаги. Атмосферные загрязнения влияют на погоду и климат (Ginzburg et al., 2009; Lohmann, Feichter, 2005), что проявляется, например, в усилении вихревых структур (Yuan et al., 2011). Так, интенсивность торнадо в США нарастает ежегодно примерно на 5 %. Расширяются и появляются новые географические зоны действия и временные периоды активности торнадо. Нарастают мощности торнадо, чью разрушительную силу наглядно продемонстрировал 2021 г.

С возникающими электрическими полями в атмосферной аэрозольной плазме связано возбуждение и нарастание плазменных вихрей (Ижовкина, 2014; Ижовкина и др., 2019; Синкевич и др., 2017; Artekha, Belyan, 2013; Izhovkina et al., 2016, 2018). Диэлектрическая проницаемость слабо ионизованной плазмы по отношению к электростатическим возмущениям зависит от координат немонотонно, что вызывает расслоение неоднородной плазмы и образование ячеистых структур в стохастических электрических полях (Izhovkina et al., 2020). Возникающее расслоение способствует мозаичному распределению аэрозольных подсистем. При неоднородном нагреве ячеистых структур плазмы в атмосфере возбуждаются вихри. В канале молнии немонотонное расслоение электростатических возмущений неоднородной плазмы иногда наблюдается визуально в виде бисерной молнии (Izhovkina et al., 2020).

Влияние ионизирующего потока энергичных частиц солнечного и галактического происхождения на нижнюю атмосферу, погоду и климат представлено в работах (Авдюшин, Данилов, 2000; Логинов, 2015; Пудовкин, Распопов, 1992; Mironova et al., 2015). Солнечно-земные связи при формировании атмосферной облачности и климата — нелинейные (Izhovkina et al., 2018). Ионизация аэрозолей высыпавшимися заряженными частицами провоцирует генерацию атмосферных вихрей (Бондур и др., 2008; Ижовкина и др., 2019; Кривоуцкий, Репнев, 2012; Shumilov et al., 1993).

Цель работы — показать, что на процесс усиления вихревых структур в атмосфере влияют обратные связи. Электромагнитные волны, излучаемые грозовыми разрядами, стимулируют высыпание частиц радиационных поясов Земли, в частности протонов внутреннего радиационного пояса с энергией ~ 100 МэВ. Ионизация аэрозолей в каскадах высыпавшихся частиц способствует возбуждению плазменных МГД-вихревых (магнитогидродинамических) механизмов в геомагнитном поле.

Влияние обратных связей на динамику атмосферных вихревых структур

Грозовые разряды излучают пакеты электромагнитных волн, проникающие на ионосферные и магнитосферные высоты. В результате электростатические и электромагнитные возмущения в неустойчивой плазме вызывают стимулированное высыпание энергичных заряженных частиц из радиационных поясов Земли. В каскадах высыпающихся энергичных заряженных частиц ионизируются атмосферные аэрозоли. Так возникают положительные обратные связи, которые влияют на процесс усиления вихревых структур в атмосфере и на усиление грозовой активности. Проявление обратных связей стимулируется самой грозовой активностью.

В первом приближении распространение электромагнитных волн в плазменном волноводе можно представить по следующей модели. Зависимость амплитуды волны от координат в бесконечном цилиндрическом волноводе можно рассчитать из волнового уравнения для электромагнитных волн $\Delta \mathbf{A} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = 0$ для векторного потенциала (аналогичное уравнение может быть выписано для векторов \mathbf{E} , \mathbf{H} волны). Для компонент волнового поля вдоль оси волновода для ТМ-волны (электрической) $H = 0$, для ТЕ-волны (магнитной) $E = 0$. Длину волновода можно оценить как расстояние между слоями плотной ионосферной плазмы, отражающих волны в магнитосопряжённых районах (*англ.* magnetically conjugated regions). Это расстояние составляет десятки тысяч километров, что на порядки превышает длину волны электромагнитного излучения.

Для распространения ТЕ-волны в бесконечном идеальном (без затухания) волноводе в геомагнитной силовой трубке круглого сечения, решая следующую задачу методом разделения переменных

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial \varphi^2} + \frac{\omega^2}{c^2} H = 0, \quad 0 < r < a, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi, \quad \frac{\partial H}{\partial \mathbf{n}}(a, \varphi) = 0, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi,$$

получим:

$$H_{n,m} = J_n(\alpha_{n,m} r) \left[A_{n,m} \cos(n\varphi) + B_{n,m} \sin(n\varphi) \right], \quad (1)$$

где H — компонента волнового магнитного поля вдоль оси волновода; \mathbf{n} — нормаль к поверхности волновода; J_n — функции Бесселя первого рода; $\alpha_{n,m} = \lambda_{n,m}/a$, $\lambda_{n,m}$ — m -й положительный корень уравнения $dJ_n/dx = 0$, $x = r\omega/c$.

Для ТМ-волны выражение для электрической компоненты волнового поля вдоль оси бесконечного идеального волновода круглого сечения можно получить, решая аналогичную задачу при граничном условии $E(a, \varphi) = 0$, $0 \leq \varphi < 2\pi$, аналитическое выражение для E совпадает с выражением (1) для H , здесь $\lambda_{n,m}$ — m -й положительный корень уравнения $J_n(x) = 0$. Из граничных условий можно оценить величину волнового вектора (порядок длины волны в направлении, ортогональном геомагнитному полю) для волн, захватываемых волноводом: $\lambda_{\perp} \sim 1/k_{\perp} \sim a$. Формула (1) приведена для идеальных волноводов. Поскольку реально существуют, например, искривлённые волноводы, то при изменении поперечного сечения волновода S и групповой скорости волнового пакета вдоль оси волновода v_g для захваченного пакета вдоль оси волновода меняется величина

$$E^2 \sim E_0^2 \left(v_{g0}/v_g \right) \cdot (S_0/S).$$

Волны могут усиливаться в плазменном волноводе, если плазма неустойчива, или затухать, например при максвелловском распределении заряженных частиц в пространстве скоростей. Однако даже частичный захват волновых пакетов плазменным волноводом (квазахват) способствует обнаружению таких волновых пакетов, поскольку мощность волнового сигнала относительно оси цилиндрического волновода убывает пропорционально $1/r$, а не $1/r^2$ как в случае неканализованного распространения волн от точечного источника. Поляризационные потоки, образующиеся при затухании электростатических колебаний

в областях пониженной плотности плазмы, например в субавроральной зоне, могут захватываться геомагнитным полем. При поляризационном дрейфе частицы могут уходить из волновода в направлении поперёк геомагнитного поля. Рассеяние таких потоков в волноводных каналах может быть связано со столкновениями с компонентами ионосферы и с рассеянием в полях электростатических и электромагнитных возмущений. В последнем случае изменение питч-угла θ заряженной частицы можно оценить как

$$\Delta\theta \sim \Omega(B/B_0)\Delta t,$$

где Ω — циклотронная частота частиц; B — амплитуда волны по магнитной компоненте; Δt — суммарное время рассеяния заряженных частиц в полях электромагнитных волн, излучаемых, например, грозowymi разрядами. Рассеяние частиц способствует их высыпанию в конус потерь и появлению диффузных сияний.

Поскольку в поляризационном дрейфе электронные и ионные потоки, убегающие поперёк внешнего магнитного поля, имеют разную скорость, такие потоки могут инициировать образование поперечного электрического поля и плазменного вихря. Устойчивость относительно диффузии, придаваемая плазменной неоднородности вихревой структурой, способствует сохранению плазменной неоднородности — волноводного канала.

Возбуждение электромагнитных волн в горячей замагниченной плазме можно представить в приближении мод Бернштейна (Шафранов, 1973; Kennel, Petchek, 1966).

На спутниках наблюдаются электромагнитные волны от различных источников, в частности от грозowych разрядов. Для электромагнитного излучения электрическую и магнитную компоненты волнового поля можно представить в следующем виде:

$$E_+ = \frac{E_x + iE_y}{2}, \quad E_- = \frac{E_x - iE_y}{2}, \quad E_z, \quad B_+ = \frac{B_x + iB_y}{2}, \quad B_- = \frac{B_x - iB_y}{2}, \quad B_z.$$

Учитывая коллективные эффекты в горячей замагниченной плазме, можно произвести аналитические решения и численные расчёты инкрементов роста волн различной поляризации, например геликонов:

$$\gamma = \frac{-\mathbf{e}_i^{\sigma*} \text{Im} \Lambda_{ij} \mathbf{e}_j^\sigma}{\mathbf{e}_\xi^{\sigma*} \frac{\partial \Lambda_{\xi\delta}}{\partial \omega} \mathbf{e}_\delta^\sigma},$$

где $\Lambda_{ij} = k^2 \delta_{ij} - k_i k_j - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{ij}$; \mathbf{e}^σ — собственные векторы задачи Эрмита $\Lambda_{ij} \mathbf{e}_j^\sigma = 0$;

$\epsilon_{ij} = \delta_{ij} + \frac{4\pi i}{\omega} \sigma_{ij}$, σ_{ij} — тензор проводимости.

С учётом ортогональности собственных векторов (Шафранов, 1973) для геликонов правой поляризации, например свистов, инкременты могут быть рассчитаны по формуле

$$\gamma_{++} = \frac{-\text{Im} \Lambda_{++}}{\frac{\partial}{\partial \omega} \text{Re} \Lambda_{++}},$$

при операторном виде матричного элемента

$$\sigma_{++} = \frac{e^2 N}{im} \int d\mathbf{v} \frac{v_\perp}{2} \sum_n \frac{J_{n-1}^2 \left(\frac{k_\perp v_\perp}{\Omega} \right)}{\omega - n\Omega - k_z v_z} \tilde{A} f(\mathbf{v}), \quad \tilde{A} = \frac{\partial}{\partial v_\perp} + \frac{k_z}{\omega} \left[v_\perp \frac{\partial}{\partial v_z} - v_z \frac{\partial}{\partial v_\perp} \right],$$

где $f(\mathbf{v})$ — функция распределения частиц по скорости.

Зададим распределение электронов в пространстве скоростей в виде:

$$f(\mathbf{v}_b) = (2\pi)^{-3/2} v_{zb}^{-1} \cdot v_{\perp b}^{-2} \cdot \delta(v_\perp - v_{\perp b}) \cdot \exp \left[- \left(\frac{v_z - U_b}{v_{zb}} \right)^2 \right],$$

где v_{zb} — тепловая скорость потока, направленного со скоростью U_b вдоль внешнего магнитного поля; $v_{\perp b}$ — среднестатистическая скорость для направления, ортогонального магнитному полю \mathbf{B}_0 ; δ — дельта-функция.

Распределение электронов возмущённой фоновой плазмы в пространстве скоростей представим с учётом анизотропии по температуре в виде:

$$f(\mathbf{v}) = (2\pi)^{-3/2} \alpha^{-1} \beta^{-2} \cdot \exp\left(-\frac{v_z^2}{\alpha^2} - \frac{v_{\perp}^2}{\beta^2}\right),$$

где α, β — тепловые скорости для направлений вдоль и поперёк относительно внешнего магнитного поля.

Для функций распределения $f(\mathbf{v})$, $f(v_b)$, представленных выше (p — относительная плотность потока и фоновой плазмы), компоненты тензора $\text{Im} \Lambda_{++} / \frac{\partial}{\partial \omega} \text{Re} \Lambda_{++}$ для волн правой поляризации можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{Im} \Lambda_{++} &= \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \sum_{n>0} \exp\left[-\left(\frac{\omega - n\Omega}{k_z \alpha}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{n\Omega - \omega}{\alpha^2} - \frac{n\Omega}{\beta^2}\right) \frac{\beta^2}{2k_z \alpha} \left(\frac{k_{\perp}^2 \beta^2}{4\Omega^2}\right)^{n-1} \times \\ &\times \frac{1}{\Gamma(n)} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{m+n+1}{m!} \left(-\frac{k_{\perp}^2 \beta^2}{4\Omega^2}\right)^m F(-m, -n+1-m, n, 1) + p \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \frac{\omega_p^2}{\omega k_z v_{zb}} \times \\ &\times \sum_{n>0} \exp\left[-\left(\frac{\omega - n\Omega - k_z U_b}{k_z v_{zb}}\right)^2\right] \cdot \left[\frac{(\omega - n\Omega - k_z U_b) \cdot v_{\perp b}^2}{\omega v_{zb}^2} J_{n-1}^2\left(\frac{k_{\perp} v_{\perp b}}{\Omega}\right) + \frac{n^2 \Omega}{\omega} J_{n-1}^2\left(\frac{k_{\perp} v_{\perp b}}{\Omega}\right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{nk_{\perp} v_{\perp b}}{\omega} J_{n-1}\left(\frac{k_{\perp} v_{\perp b}}{\Omega}\right) J_n\left(\frac{k_{\perp} v_{\perp b}}{\Omega}\right) \right], \\ \frac{\partial}{\partial \omega} \text{Re} \Lambda_{++} &= -\frac{2\omega}{c^2} + \frac{\omega_p^2}{c^2 2^{1/2}} \sum_{n>0} \left(\frac{k_{\perp}^2 \beta^2}{4\Omega^2}\right)^{n-1} \frac{1}{\Gamma(n)} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{m+n+1}{m!} \left(-\frac{k_{\perp}^2 \beta^2}{4\Omega^2}\right)^m F(-m, -n+1-m, n, 1) \times \\ &\times \left[\frac{1}{k_z \alpha} Z(x_n) - \frac{\beta^2}{\omega} \left(\frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{\beta^2}\right) Z'(x_n) \right] + \frac{\omega \omega_p^2}{c^2 2^{1/2}} \sum_{n>0} \left(\frac{k_{\perp}^2 \beta^2}{4\Omega^2}\right)^{n-1} \frac{1}{\Gamma(n)} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{m+n+1}{m!} \left(-\frac{k_{\perp}^2 \beta^2}{4\Omega^2}\right)^m \times \\ &\times F(-m, -n+1-m, n, 1) \left[\frac{1}{(k_z \alpha)^2} Z'(x_n) + \frac{\beta^2}{\omega^2} \left(\frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{\beta^2}\right) Z'(x_n) - \frac{\beta^2}{\omega k_z \alpha} \left(\frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{\beta^2}\right) Z''(x_n) \right], \end{aligned}$$

где $\Omega = e B_0 / mc$; $x_n = (\omega - n\Omega) / (k_z \alpha)$; $Z', Z''(x_n)$ — производные плазменной дисперсионной функции $Z(x_n)$; $Z'(x) = -2xZ(x) - 2$; $\Gamma(n) = (n-1)!$; $F(-m, -n+1-m, n, 1)$ — гипергеометрическая функция; $p = N_b / N_0$, N_b, N_0 — плотности электронного потока и фоновой плазмы соответственно.

В суммировании по n представлены суммы для $n > 0$. Итак, для свистов $\omega < \Omega$ резонансы $\omega - n\Omega = \mathbf{k}\mathbf{v}$ соответствуют $\mathbf{k}\mathbf{v} < 0$. Численные расчёты показывают, что инкременты роста электромагнитных волн на несколько порядков величины меньше инкрементов для электростатических колебаний. Волны свистового диапазона излучаются в направлении, противоположном скорости частиц. Это способствует усилению волн, поскольку волны эффективно взаимодействуют со встречным потоком частиц. Следует учитывать, что для нормального закона дисперсии волн в плазме угол между волновым вектором и групповой скоростью волн не превышает $\pi/2$. Вследствие указанной анизотропии эмиссии свистов волны могут нарастать в потоке электронов в космической плазме.

Следует учитывать, что в области магнитных зеркальных точек скорость захваченных геомагнитным полем частиц вдоль магнитных силовых линий стремится к нулю, поэтому

частицы могут рассеиваться и в полях электростатических колебаний, медленных в сравнении с электромагнитными волнами. Высыпание заряженных частиц, захваченных геомагнитным полем, в конус потерь связано с изменением питч-угла частиц при столкновениях с частицами среды, при рассеянии в полях электромагнитных волн и электростатических колебаний в неустойчивой плазме. Мощные пакеты электромагнитных волн от грозовой активности усиливают электростатическую турбулентность в верхней ионосфере, провоцируя возбуждение параметрических взаимодействий волн и высыпание частиц. Волновая функция в плазме зависит от пространственного распределения коэффициента преломления. Распространение волн в плазменной неоднородности можно представить и как рассеяние на потенциальном барьере с возможностью эффективного туннелирования (Ерохин и др., 2019). В каскадах высыпавшихся энергичных заряженных частиц радиационных поясов Земли ионизируется атмосферный аэрозоль, что способствует усилению плазменных вихрей и атмосферной вихревой структуры, излучающей электромагнитные волны при грозовых разрядах. Спектры электростатических возмущений в вихревой структуре приобретают многомодовый характер, и одна из причин образования мощных вихрей в системе подвижных плазменных вихрей связана с проявлением резонансов в спектрах электрических полей взаимодействующих неоднородностей (Ижовкина и др., 2021). Плазменные вихри взаимодействуют с вихрями Россби на роторном генетическом уровне как вихри скорости частиц. При этом нарастает мощность атмосферных вихревых структур. Усиление мощности и устойчивости вихревых структур, раскачка климатических качелей нелинейным образом связаны с ростом концентрации загрязнений в атмосфере. Грозовая активность не только напрямую, но и через обратные связи влияет на усиление вихревых структур.

Заключение

Разряды молнии излучают пакеты электромагнитных волн. При этом стимулированное высыпание заряженных частиц радиационных поясов магнитосферы приводит к нарастанию потоков, ионизирующих аэрозоли в атмосфере. Аэрозоли в гравитационном поле оседают до высот формирования облачности. Конденсация влаги аэрозолями ускоряется. В интенсифицирующейся структуре ускоряются процессы генерации мощных плазменных вихрей и связанных с ними разрядов молнии. В такой структуре с обратными связями интегральная мощность молниевых разрядов нарастает.

Дополнительное усиление электромагнитных волн при их распространении в геомагнитной силовой трубке связано с резонансными взаимодействиями волн и частиц неустойчивой плазмы. Волны свистового диапазона эффективно усиливаются в магнитосфере на неустойчивой электронной компоненте плазмы, распространяясь по встречному электронному потоку.

С нарастанием концентрации загрязнений в атмосфере усиливается вихревая активность. В 2021 г. резко увеличилось количество и мощность торнадо и циклонов.

Литература

1. *Авдюшин С. И., Данилов А. Д.* Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2000. Т. 40. № 5. С. 3–14.
2. *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. DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-11-22-26.
3. *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. С. 244–249. DOI: 10.1134/S1028334X08070283.
4. *Ерохин Н. С., Артеха С. Н., Артеха Н. С.* Резонансное туннелирование электромагнитных волн через градиентные барьеры в неоднородной плазме // Инженерная физика. 2019. № 8. С. 3–9. DOI: 10.25791/infizik.08.2019.806.

5. *Ижовкина Н. И.* Плазменные вихри в ионосфере и атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 6. С. 817–828. DOI: 10.1134/S0016793214050077.
6. *Ижовкина Н. И., Артеха С. Н., Ерохин Н. С., Михайловская Л. А.* Зимние циклоны в геомагнитной полярной шапке // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 273–281. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-273-281.
7. *Ижовкина Н. И., Артеха С. Н., Ерохин Н. С., Михайловская Л. А.* Атмосферные вихри в геомагнитной аномалии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 299–306. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-299-306.
8. *Криволицкий А. А., Репнев А. И.* Воздействие космических энергичных частиц на атмосферу Земли (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 6. С. 723–754. DOI: 10.1134/S0016793212060060.
9. *Логинов В. Ф.* Влияние солнечной активности и других внешних факторов на климат Земли // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 163–182.
10. *Моисеев С. С., Сагдеев Р. З., Тур А. В., Хоменко Г. А., Шукуров А. М.* Физический механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере // Докл. Акад. наук. 1983. Т. 273. № 3. Р. 549–553.
11. *Незлин М. В., Снежкин Е. Н.* Вихри Россби и спиральные структуры: Астрофизика и физика плазмы в опытах на мелкой воде. М.: Наука, 1990. 237 с.
12. *Онищенко О. Г., Похотелов О. А., Астафьева Н. М.* Генерация крупномасштабных вихрей и зональных ветров в атмосферах планет // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178. № 6. С. 605–618. DOI: 10.3367/UFN.0178.200806c.0605.
13. *Пудовкин М. И., Распопов О. М.* Механизм влияния солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеорологические параметры (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 5. С. 1–22.
14. *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.
15. *Шафранов В. Д.* Электромагнитные волны в плазме // Вопросы теории плазмы. 1973. Т. 3. С. 3–141.
16. *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. DOI: 10.5194/npg-20-293-2013.
17. *Black R. A., Hallet J.* Electrification of the Hurricane // J. Atmospheric Sciences. 1999. V. 56(12). P. 2004–2028. DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<2004:EOTH>2.0.CO;2.
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 // Monthly Weather Review. 2011. V. 139(5). P. 1492–1504. DOI: 10.1175/2010MWR3532.1.
19. *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. V. 79(9). P. 2062–2070. DOI: 10.1134/S1070363209090382.
20. *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. DOI: 10.1007/s00024-016-1325-9.
21. *Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A.* Aerosol. Plasma Vortices and Atmospheric Processes // Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics. 2018. V. 54. No. 11. P. 1513–1524. DOI: 10.1134/s0001433818110038.
22. *Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A.* Electrostatic Disturbances of Aerosol Atmospheric Plasma: Beaded Lightning // Pure and Applied Geophysics. 2020. V. 177. No. 11. P. 5475–5482. DOI: 10.1007/s00024-020-02568-z.
23. *Kennel C. F., Petchek H. E.* Limit on stably trapped particle fluxes // J. Geophysical Research. 1966. V. 71. No. 1. P. 1–28.
24. *Lohmann U., Feichter J.* Global indirect aerosol effects: a review // Atmospheric Chemistry and Physics. 2005. V. 5. P. 715–737. DOI: 10.5194/acp-5-715-2005.
25. *Marshall T. C., Rust W. D.* Electrical Structure and Updraft Speeds in Thunderstorms over the Southern Great Plains // J. Geophysical Research. 1995. V. 100. P. 1001–1015. DOI: 10.1029/94JD02607.
26. *Mironova I. A., Aplin K. L., Arnold F., Bazilevskaya G. A., Harrison R. G., Krivolutsky A. A., Nicoll A., Rozanov E. V., Turunen E., Usoskin I. G.* Energetic particle influence on the Earth's atmosphere // Space Science Reviews. 2015. V. 194. P. 1–96. DOI: 10.1007/s11214-015-0185-4.
27. *Pan L., Qie X., Wang D.* Lightning activity and its relation to the intensity of typhoons over the Northwest Pacific Ocean // Advances in Atmospheric Sciences. 2014. V. 31. P. 581–592. DOI: 10.1007/s00376-013-3115-y.
28. *Price C., Asfur M., Yair Yo.* Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency // Nature Geoscience. 2009. V. 2:5. P. 329–332. DOI: 10.1038/NGEO477.
29. *Sato Y., Miyamoto Y., Tomita H.* Large dependency of charge distribution in a tropical cyclone inner core upon aerosol number concentration // Progress in Earth and Planetary Science. 2019. V. 6. Art. No. 62. DOI: 10.1186/s40645-019-0309-7.

30. Shumilov O. I., Vashenyuk E. V., Henriksen K. Quasi-drift effects of high-energy solar cosmic rays in the magnetosphere // *J. Geophysical Research*. 1993. V. 98. No. A10. P. 17423–17427. DOI: 10.1029/93JA01050.
31. Winn W. P., Hunayday S. J., Aulich G. D. Electric Field at the Ground Tornado // *J. Geophysical Research*. 2000. V. 105. No. D15. P. 20145–20153. DOI: 10.1029/2000JD900215.
32. Yuan T., Remer L. A., Pickering K. E., Yu H. Observational evidence of aerosol enhancement of lightning activity and convective invigoration // *Geophysical Research Letters*. 2011. V. 38. Iss. 4. DOI: 10.1029/2010GL046052.

Thunderstorm activity and vortex structures in the atmosphere

N. I. Izhovkina¹, S. N. Artekha², N. S. Erokhin², L. A. Mikhailovskaya²

¹ *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk 108840, Russia*
E-mail: izhovn@izmiran.ru

² *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

Ionization of aerosol in the stratosphere and upper troposphere by precipitating particles of cosmic rays enhances the vortex activity of the atmosphere. An important role of the aerosol admixture is manifested in the generation of plasma vortices and the accumulation of energy and mass by the vortices in the atmosphere during moisture condensation. Due to the cascade nature of the ionization process, the effect of cosmic radiation turns out to be nonlinear. In plasma inhomogeneities, aperiodic electrostatic disturbances are stochastically excited, which play a significant role in the genesis of vortices. It is shown that the process of amplification of vortex structures in the atmosphere is influenced by feedback. The manifestation of feedbacks is stimulated by thunderstorm activity. Electromagnetic waves emitted by lightning discharges cause precipitation of particles of the Earth's radiation belts, in particular, protons of the inner radiation belt with an energy of about 100 MeV. Ionization of aerosols in cascades of precipitating particles promotes the excitation of plasma MHD-mechanisms in the geomagnetic field. When Rossby vortices interact with plasma vortices, the atmospheric vortex structures intensify with increasing pressure gradients. Lightning discharges are associated with plasma vortices. With the growth of thunderstorm activity, fires in dry thunderstorms intensify the pumping of pollution into the atmosphere. With an increase in the concentration of contaminants, the plasma vortex activity and the associated thunderstorm activity increase.

Keywords: atmospheric vortex structures, electrostatic disturbances in plasma inhomogeneities, cellular structures in lightning discharges, feedback

Accepted: 09.02.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-267-276

References

1. Avdyushin S. I., Danilov A. D., The sun, the weather and the climate: today's view of the problem (overview), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2000, Vol. 40, No. 5, pp. 3–14 (in Russian).
2. Arumov G. P., Bukharin A. V., Use of the nonnormalized moments for determining the statistical parameters of nonspherical particles from their images, *Measurement Techniques*, 2018, Vol. 60, No. 11, pp. 1102–1108, DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-11-22-26.
3. Bondur V. G., Pulinets 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, DOI: 10.1134/S1028334X08070283.
4. Erokhin N. S., Artekha S. N., Artekha N. S., Resonant tunneling of electromagnetic waves through gradient barriers in inhomogeneous plasma, *Inzhenernaya fizika*, 2019, No. 8, pp. 3–9 (in Russian), DOI: 10.25791/infizik.08.2019.806.

5. Izhovkina N. I., Plasma vortices in the ionosphere and atmosphere, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, Vol. 54, No. 6, pp. 802–812, DOI: 10.1134/S0016793214050077.
6. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A., Winter cyclones in the geomagnetic polar cap, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 273–281 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-273-281.
7. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A., Atmospheric vortices in a geomagnetic anomaly, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 299–306 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-299-306.
8. Krivolutsky A. A., Repnev A. I., Impact of space energetic particles on the earth's atmosphere (a review), *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012, Vol. 52, No. 6, pp. 685–716, DOI: 10.1134/S0016793212060060.
9. Loginov V. F., The influence of solar activity and other external factors on the Earth's climate, *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2015, Vol. 1, pp. 163–182 (in Russian).
10. Moiseev S. S., Sagdeev R. Z., Tur A. V., Khomenko G. A., Shukurov A. M., Physical mechanism of amplification of vortex disturbances in the atmosphere, *Doklady Earth Sciences*, 1983, Vol. 273, No. 3, pp. 549–553 (in Russian).
11. Nezlin M. V., Snezhkin E. N., *Rossby Vortices and Spiral Structures: Astrophysics and Plasma Physics in Shallow Water Experiments*, Moscow: Nauka, 1990, 237 p. (in Russian).
12. Onishchenko O. G., Pokhotelov O. A., Astafieva N. M., Generation of large-scale vortices and zonal winds in planetary atmospheres, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2008, Vol. 51, No. 6, pp. 577–589, DOI: 10.1070/PU2008v051n06ABEH006588.
13. Pudovkin M. I., Raspopov O. M., 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 (in Russian).
14. 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, DOI: 10.1134/S1063780X17020131.
15. Shafranov V. D., Electromagnetic waves in plasma, *Voprosy teorii plazmy*, 1973, Vol. 3, pp. 3–141 (in Russian).
16. Artekha S. N., Belyan A. V., On the role of electromagnetic phenomena in some atmospheric processes, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2013, Vol. 20, pp. 293–304, DOI: 10.5194/npg-20-293-2013.
17. Black R. A., Hallet J., Electrification of the Hurricane, *J. Atmospheric Sciences*, 1999, Vol. 56(12), pp. 2004–2028, DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<2004:EOTH>2.0.CO;2.
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, *Monthly Weather Review*, 2011, Vol. 139, No. 5, pp. 1492–1504, DOI: 10.1175/2010MWR3532.1.
19. Ginzburg A. S., Gubanov D. P., Minashkin V. M., Influence of natural and anthropogenic aerosols on global and regional climate, *Russian J. General Chemistry*, 2009, Vol. 79(9), pp. 2062–2070, DOI: 10.1134/S1070363209090382.
20. 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, DOI: 10.1007/s00024-016-1325-9.
21. 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, DOI: 10.1134/s0001433818110038.
22. Izhovkina N. I., Artekha S. N., Erokhin N. S., Mikhailovskaya L. A., Electrostatic Disturbances of Aerosol Atmospheric Plasma: Beaded Lightning, *Pure and Applied Geophysics*, 2020, Vol. 177, No. 11, pp. 5475–5482, DOI: 10.1007/s00024-020-02568-z.
23. Kennel C. F., Petcheck H. E., Limit on stably trapped particle fluxes, *J. Geophysical Research*, 1966, Vol. 71, No. 1, pp. 1–28.
24. Lohmann U., Feichter J., Global indirect aerosol effects: a review, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, Vol. 5, pp. 715–737, DOI: 10.5194/acp-5-715-2005.
25. Marshall T. C., Rust W. D., Electrical Structure and Updraft Speeds in Thunderstorms over the Southern Great Plains, *J. Geophysical Research*, 1995, Vol. 100, pp. 1001–1015, DOI: 10.1029/94JD02607.
26. Mironova I. A., Aplin K. L., Arnold F., Bazilevskaya G. A., Harrison R. G., Krivolutsky A. A., Nicoll A., Rozanov E. V., Turunen E., Usoskin I. G., Energetic particle influence on the Earth's atmosphere, *Space Science Reviews*, 2015, Vol. 194, pp. 1–96, DOI: 10.1007/s11214-015-0185-4.
27. Pan L., Qie X., Wang D., Lightning activity and its relation to the intensity of typhoons over the Northwest Pacific Ocean, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, Vol. 31, pp. 581–592, DOI: 10.1007/s00376-013-3115-y.
28. 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, DOI: 10.1038/NGEO477.

29. Sato Y., Miyamoto Y., Tomita H., Large dependency of charge distribution in a tropical cyclone inner core upon aerosol number concentration, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2019, Vol. 6, Art. No. 62, DOI: 10.1186/s40645-019-0309-7.
30. Shumilov O. I., Vashenyuk E. V., Henriksen K., Quasi-drift effects of high-energy solar cosmic rays in the magnetosphere, *J. Geophysical Research*, 1993, Vol. 98, No. A10, pp. 17423–17427, DOI: 10.1029/93JA01050.
31. Winn W. P., Hunayday S. J., Aulich G. D., Electric Field at the Ground Tornado, *J. Geophysical Research*, 2000, Vol. 105, No. D15, pp. 20145–20153, DOI: 10.1029/2000JD900215.
32. Yuan T., Remer L. A., Pickering K. E., Yu H., Observational evidence of aerosol enhancement of lightning activity and convective invigoration, *Geophysical Research Letters*, 2011, Vol. 38, Issue 4, DOI: 10.1029/2010GL046052.