

Атмосферная вихревая активность и аэрозоли

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 (ИЗМИРАН)*

² *Институт космических исследований РАН*

Прозрачность атмосферы зависит от накопления в ней смога естественного и антропогенного происхождения. Атмосферные загрязнения переносятся воздушными массами на тысячи километров. Неравномерное мозаичное распределение смога способствует неравномерному нагреву атмосферы и возбуждению на градиентах давления атмосферных вихрей. Загрязнение атмосферы, в частности, аэрозольная примесь, влияет на нагрев атмосферы, она ионизируется внешними источниками, конденсирует влагу, что играет важную роль в образовании вихревых структур в ней как гиротропной среде. Гиротропия атмосферы связана с влиянием на движение частиц силы Кориолиса и, для заряженных частиц в геомагнитном поле, ещё и с влиянием силы Лоренца. При этом в ячеистых пространственных распределениях ионизированных аэрозолей возбуждаются плазменные вихри, влияющие на генезис атмосферных вихревых структур.

Взаимодействие между циклоном, надвигающимся со стороны Атлантики, и антициклоном над центром Европейской части России зависит от устойчивости антициклона. Блокировка антициклонов наблюдается в основном в летний период. Блокирующие антициклоны образуются и над Сибирью. Заметим, что воздушные потоки из пустынь Средней Азии, Казахстана и Монголии переносят пыль и песок в Сибирь и на Дальний восток.

Цель работы показать, что на образование блокирующих антициклонов над центром Европейской части России в летний период влияют следующие факторы:

- нагрев подстилающей поверхности, лишённой растительного покрова, и рост градиентов давления;
- накачка на градиентах давления приземных загрязнений в атмосферу, в частности, дорожной пыли, образующейся при трении, продуктов сгорания углеводородов и других атмосферных примесей;
- ионизация аэрозолей фотонным излучением Солнца и космическими лучами;
- возбуждение вихревых движений и связанных с ними электрических полей в ионизированных аэрозольных облаках на градиентах давления, ортогональных геомагнитному полю;
- взаимодействие вихрей плазменного типа с вихрями Россби.

При усилении антициклона усиливаются струйные течения по его границе с циклоном и турбулентность. Заметим, что визуально не отслеживаемая атмосферная турбулентность ясной погоды опасна для летательных аппаратов.

Влияние аэрозольной плазмы на крупномасштабные вихревые структуры

Для исследования взаимодействия пары циклон - антициклон необходимо учитывать нелинейность возбуждения атмосферных структур в присутствии аэрозольной плазмы. Использование уравнений гидродинамики и магнитной гидродинамики физически обосновано на пространственно-временных масштабах $L \gg l_c, T \gg \tau_c$, где l_c, τ_c - длина и время свободного пробега частиц, причём $l_c \sim (\sigma N)^{-1} \sim 10^{-3}$ см, $\tau_c \sim (\sigma N v)^{-1} \sim 10^{-6}$ с, $\sigma \sim 10^{-16}$ см², $N \sim 10^{19}$ см⁻³, $v \sim 10^3$ см/с для высот образования облачности, а σ, N, v - сечение, концентрация и скорость частиц атмосферы.

Градиент давления, неразрывно связанный с полем столкновений, экспериментально измеряется, а параметры поля столкновений оцениваются математически. Для градиентов давления, не равных нулю, поле столкновений анизотропно и образуются направленные потоки частиц. Вязкость и прилипание частиц в атмосфере учитывается в пограничных слоях. Выше 1 км атмосферу считают свободной, а вязкость достаточно мала. Возникновение колебаний и вихрей в атмосфере связано с локальным избытком кинетической энергии и свободной потенциальной энергией в атмосферном слое.

В результате сложного процесса самоорганизации в атмосфере появляются различные динамические структуры, проявляющие коллективное поведение, в частности, в атмосферной облачности наблюдаются сильные электрические поля и связанные с ними вихри плазменной природы. Согласно баллонным измерениям вертикальная компонента электрического поля в грозовой облачности может составлять десятки и сотни кВ/м. Сопоставление дистанционных наблюдений за тропическими циклонами и молниевыми вспышками показывает, что при увеличении молниевой активности в стене глаза вихря происходит интенсификация тропического циклона. Следовательно, плазменные вихри могут оказывать существенное влияние на динамику тропических циклонов. Связанные с динамикой аэрозольной плазмы в геомагнитном поле плазменные вихри существенно влияют на генезис атмосферных вихревых структур.

Процесс ионизации компонентов атмосферы энергичными частицами космических лучей является каскадным, а число ионизирующих частиц при разрушении ядра атома многократно возрастает. Для фонового потока космических лучей за границами атмосферы имеем $j_1 \sim 0.1$ см⁻² стерад⁻¹ с⁻¹, а поток вторичных частиц j_2 , образующийся при разрушении ядер атмосферных частиц космическими лучами, возрастает в $\sim 10^6$ раз – это каскадные ливни Оже. Скорость ионизации аэрозолей частицами космических лучей на высотах образования облачности порядка $s \sim j_2 \sigma_a N_a \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ см⁻³ с⁻¹ для частиц Айткена, где $\sigma_a \sim 10^{-10}$ см², $N_a \sim 10^2$ см⁻³ - сечение и концентрация частиц. Скорость ионизации резко возрастает с ростом концентрации аэрозольных частиц в атмосфере, с усилением ионизирующих потоков при вспышках на Солнце, а

также при возрастании потоков галактического излучения. При этом скорость ионизации аэрозольных облаков меняется на несколько порядков величины с изменением параметров N_a, σ_a . Отметим, что сечение аэрозолей увеличивается при конденсации влаги. Так концентрация частиц Айткена в загрязнённой атмосфере над Москвой летом 2010 года нарастала до $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$. Приведённые оценки показывают, что космические лучи (КЛ) являются важным источником ионизации частиц в атмосфере даже на фоновом уровне потока космических лучей и концентрации частиц Айткена поскольку каждая частица КЛ может производить порядка 10^6 и более актов ионизации. Однако величина потоков КЛ зависит от времени суток, широты и долготы, а на динамику заряженных частиц влияет геомагнитное поле. С резким локальным увеличением скорости ионизации атмосферных загрязнений КЛ при росте их потока могут быть связаны атмосферная вихревая активность в высоких широтах в зимний период и такие редкие явления, как зимние грозы в средних и высоких широтах.

Ионизирующий поток энергичных частиц солнечного и галактического происхождения влияет на нижнюю атмосферу, погоду и климат. При этом наблюдались синхронные изменения плотности облаков после интенсивных солнечных вспышек по солнечным и глобальным метеорологическим данным. Проникновение потоков энергичных солнечных протонов в магнитосферу Земли и их высыпание особенно влияет на атмосферные процессы в полярных и субполярных широтах.

Солнечно-земные связи при формировании атмосферной облачности и климата являются нелинейными. Отметим, что области высыпания заряженных частиц в экваториальном поясе, возникающие под действием корональных выбросов солнечной плазмы, коррелируют с зонами зарождения тропических циклонов. Важно, что ионизация аэрозольных облаков частицами космических лучей ускоряет процессы конденсации влаги. Поскольку в фазовых переходах выделяется тепло при образовании конденсатов, то воздействие космических лучей на аэрозольные облака при конденсации влаги существенно усиливает вихревую активность ионизированной аэрозольной примеси.

Возбуждение плазменных вихрей и МГД электрических полей в неоднородных распределениях аэрозолей влияет и на вихревые структуры с низким уровнем конденсации влаги. Вихри Россби и плазменные вихри взаимодействуют на роторном "генетическом" уровне как вихри скорости частиц. Ясно, что влияние факторов различной природы на плазменные вихри в атмосфере весьма многообразно. Гидродинамическая гиротропия атмосферы, возбуждение волн и вихрей Россби связаны с широтной зависимостью силы Кориолиса. Масштаб плазменных вихрей соответствует масштабу неоднородных аэрозольных образований. Конденсация влаги незаряженными аэрозолями зависит от их химического состава и структуры поверхности. Ионизированные частицы можно отнести к гидрофильным, поскольку притяжение молекул воды связано с их поляризацией электрическим полем.

Геострофические плазменные течения описываются уравнением

$$\mathbf{j} = [\mathbf{B}_0 \times \nabla P]c / B_0^2 - [\mathbf{B}_0 \times \mathbf{g}](\rho c) / B_0^2, \quad (1)$$

где P - давление, ρ - плотность плазмы, \mathbf{B}_0 - напряженность магнитного поля, \mathbf{j} - плотность тока, \mathbf{g} - ускорение свободного падения. В плазменном вихре имеем $d\mathbf{v}/dt \neq 0$ и вихрь отличается от геострофического течения. При движении в полях градиентов давления вдоль геомагнитных силовых линий вихри могут сливаться и тем самым усиливаться, образуя более мощные вихри. Столкновения вихрей вызывают изменения электрического поля когерентных вихревых структур. Затухание электрических полей, ортогональных геомагнитному полю, приводит к разделению заряда при поляризационном дрейфе. Скорость поляризационного дрейфа составляет величину

$$v_d = m_{e,i} c^2 (\partial E_{\perp} / \partial t) / (q_{e,i} B^2), \quad (2)$$

где $m_{e,i}, q_{e,i}$ - масса и заряд электронов и ионов, E_{\perp} - компонент электрического поля, ортогональный внешнему магнитному полю; B - напряжённость геомагнитного поля. При конденсации влаги на ионизованных частицах пыли аэрозоли становятся более массивными, и это влияет на скорость их дрейфа. Захват частиц разного знака соседними вихревыми структурами при поляризационном дрейфе приводит к появлению разности потенциалов между облаками, между облаками и земной поверхностью, между облаками и ионосферным слоем. Возбуждение плазменных вихрей в неоднородной области нагрева при ионизации частиц может быть причиной генерации спиральных струйных течений.

Выводя уравнение сохранения плазменного вихря для фронтального температурного скачка при $\partial \ln T / \partial y \gg \partial \ln T / \partial x$, можно получить уравнение, похожее на обобщённое уравнение Хасегава – Мимы:

$$\frac{\partial}{\partial x} [-v_{dw} \ln(\Delta\Phi) + \frac{e}{T} v_{dw} \Phi + \frac{e}{M\Omega_{0i}} \frac{e}{T} \frac{\partial \ln T}{\partial y} \frac{\Phi^2}{2}] + \frac{e}{M\Omega_{0i}} J(\Phi, \ln(\Delta\Phi)) = 0, \quad (3)$$

где $J(\Phi, \ln(\Delta\Phi)) = \Phi_x (\ln(\Delta\Phi))_y - \Phi_y (\ln(\Delta\Phi))_x$, v_{dw} - скорость дрейфа вихря, M - масса иона, Ω_{0i} - циклотронная частота иона, ось Z направлена вдоль внешнего магнитного поля, Φ - потенциал электрического поля. Компоненты дрейфовой скорости по осям X и Y определяются формулами соответственно: $u = -e\Phi_y / (M\Omega_{0i})$, $v = e\Phi_x / (M\Omega_{0i})$, а $\Omega' = v_x - u_y = e(\Phi_{xx} + \Phi_{yy}) / (M\Omega_{0i})$ - ротор дрейфовой скорости. Из уравнения вихревой структуры следует, что изменения геомагнитного поля могут привести к возмущениям и расстройству плазменного вихря.

Электрическое поле плазменного вихря составляет величину

$$\mathbf{E} = \ln(N / N_0)(\nabla T) / e + (T / e)\nabla \ln N, \quad (4)$$

а скорость вращения частиц плазмы в скрещенных полях равна

$$\mathbf{V}_d = [c / (eB^2)] \{ \ln(N / N_0) [\nabla T \times \mathbf{B}] + T [\nabla \ln N \times \mathbf{B}] \}. \quad (5)$$

Плотность энергии электрического поля вихря составляет

$$W_1 = (8\pi e^2)^{-1} \{ \ln(N / N_0) \nabla T + T \nabla \ln N \}^2, \quad (6)$$

где распределение концентрации частиц в плазменной вихревой структуре задано в виде $N = N_0 \exp(e\Phi / T(y))$, T - температура электронного компонента, N_0 - концентрация частиц при $\Phi = 0$. Скорость частиц в плазменном вихре зависит от геомагнитных возмущений. От скорости ионизованных аэрозолей зависит и скорость увеличения массы аэрозолей при конденсации влаги.

Аэрозольную плазму можно рассматривать как пылевую плазму. При $\nabla P / \rho < g$ в облаках происходит выпадение осадков, вихревая структура теряет массу и энергию. Возмущения градиентов давления могут быть связаны и с антропогенным шумом. Например, от потоков транспорта пакеты акустико-гравитационных волн при распространении вверх могут вызвать колебания давления на фоне неустойчивого захвата облачной массы и, соответственно, возникают осадки. При распространении акустико-гравитационных возмущений в атмосфере они могут значительно увеличивать амплитуды на градиентах плотности атмосферы и градиентах скорости ветра. Согласно численным расчётам траектория распространения пакетов акустико-гравитационных волн зависит от параметров атмосферы и обычно имеет достаточно сложный вид.

Ионизованные частицы Айткена могут захватываться и удерживаться не только натекающими на них воздушными потоками, но и электрическими полями грозовой облачности. Плазменные неустойчивости неоднородной плазмы провоцируют развитие нелинейных процессов. Переход от однородной плазмы к неоднородной отслеживается для электростатических мод. При малой амплитуде колебаний собственные частоты исчезают ($\varepsilon \neq 0$ ни в одной из точек (ω, \mathbf{k}) -пространства), происходит обрезание спектра электростатических свободных колебаний с уменьшением плотности плазмы, что приводит к нагреву областей пониженной плотности плазмы и вытеснению плазмы из этих областей с ростом градиентов давления при нагреве.

В однородной плазме плотность тока определяется выражениями

$$\begin{aligned} \mathbf{j} = \sigma_{\parallel} \mathbf{E}_{\parallel} + \sigma_{\perp} \mathbf{E}_{\perp} + \sigma_H [\mathbf{B}_0 \times \mathbf{E}] / B_0, \quad \sigma_{\parallel e} = e^2 N_e (v_e - i\omega) / [m_e (\omega^2 + v_e^2)], \\ \sigma_{\perp e} = e^2 N_e (v_e + i\omega) / \{m_e [\Omega_e^2 + (v_e + i\omega)^2]\}, \quad \sigma_{He} = e^2 N_e \Omega_e / \{m_e [\Omega_e^2 + (v_e + i\omega)^2]\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Потери плотности энергии поля составляют $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{E^2}{8\pi} \right) = \mathbf{jE}$. Значит, электрические поля затухают в плазме и в отсутствие столкновений. Различие в затухании электрического поля плазменного вихря и поля электрических колебаний в холодной однородной плазме обусловлено также топологией полей.

При столкновении циклона и антициклона образуется струйное течение и связанная с ним турбулентность, в том числе и турбулентность ясной погоды. Такую турбулентность обнаружить сложно, в отличие от облачного фронта, наблюдаемого визуально. Скорость ветра в струйном течении на высотах более 5 км может достигать нескольких сотен километров в час. Акустические и гравитационные волны, излучаемые различными источниками, в том числе и

грозовым фронтом, могут усиливаться на градиентах скорости ветра. Влияние ветровых сдвигов на распространение волн рассмотрим на простой математической модели, представленной ниже.

Предположим, что горизонтальная направленная скорость зависит только от вертикальной координаты z . В системе координат, движущейся с постоянной по оси x скоростью ветра $U_0(z)$, система линеаризованных гидродинамических уравнений движения для материальной точки может быть выписана в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + w \frac{\partial U_0}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - g \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (8)$$

где u, w - малые возмущения горизонтальной и вертикальной скорости, p, ρ - возмущения давления и плотности. Для рассматриваемых волновых возмущений переход в неподвижную лабораторную систему координат из используемой движущейся системы координат связан с доплеровским сдвигом частоты, так как действие оператора $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U_0 \frac{\partial}{\partial x}$ на волновую функцию $\sim \exp(ikx \pm i\omega t)$ приводит к частотному сдвигу $\pm kU_0$ (знак зависит от направлений U_0 и k). Уравнение непрерывности для несжимаемой среды (дозвуковой предел) в линейном приближении для движения в плоскости x, z представим в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + w \frac{\partial \rho_0}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

Произведя дифференцирование уравнения для w и уравнения несжимаемости $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$ по t и

несложные подстановки $(w, p) \sim (w(z), p(z)) \exp(ikx - i\sigma t)$ для волнового движения, получим с

помощью подстановки $w = W \exp(-c_1 z)$, $c_1 = (\frac{\partial \ln \rho_0}{\partial z} + \frac{k}{\sigma} \frac{\partial U_0}{\partial z}) / 2$:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{\partial \ln \rho_0}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{k}{\sigma} \frac{\partial U_0}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} + [\frac{k^2}{\sigma^2} (-g \frac{\partial \ln \rho_0}{\partial z} - \sigma^2) + \frac{k}{\sigma} (\frac{\partial \ln \rho_0}{\partial z} \frac{\partial U_0}{\partial z} + \frac{\partial^2 U_0}{\partial z^2})] w = 0, \quad (10)$$

$$N^2 = -g \frac{\partial \ln \rho_0}{\partial z}, \quad (11)$$

Для варианта $\frac{\partial U_0}{\partial z} = const$ уравнение (10) может быть приведено к виду

$$\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \left\{ -\frac{1}{4} \left(\frac{\partial \ln \rho_0}{\partial z} + \frac{k}{\sigma} \frac{\partial U_0}{\partial z} \right)^2 + \frac{k^2}{\sigma^2} (N^2 - \sigma^2) + \frac{k}{\sigma} \frac{\partial \ln \rho_0}{\partial z} \frac{\partial U_0}{\partial z} \right\} W = 0, \quad (12)$$

где знак выражения в фигурных скобках определяет тип уравнения. Для выражения $\{...\} = s_1$, где $s_1 > 0$, уравнение (12) является уравнением колебаний, а при $s_1 < 0$ - уравнением затухающих или нарастающих возмущений:

$$\partial^2 W / \partial z^2 - a^2 W = 0, W = c_2 \exp(\pm az); \quad \partial^2 W / \partial z^2 + a^2 W = 0, W = c_2 \exp(\pm iaz),$$

где произвольная постоянная может быть определена, например, из граничных условий при $z = 0$. Переход в лабораторную систему координат производится заменой $\sigma \rightarrow \sigma \pm kU_0$. Из этих уравнений видно, что ветровой сдвиг существенно влияет на волновое возмущение. Связь вертикального и горизонтального движений определяется сложным соотношением параметров среды. В вертикальной плоскости волновое число для уравнения колебаний оказывается зависящим от параметров неоднородной среды, как и амплитуда колебаний. Для $s_1 < 0$ волны плавучести, покидая канал, где горизонтальная скорость ветра постоянна, по-видимому, затухают. В зависимости от соотношения c_1, s_1 возможен рост возмущений на ветровом разрыве. С уменьшением плотности атмосферы $\partial \rho_0 / \partial z < 0$ амплитуда волн также может нарастать. По данным наблюдений турбулентность ясной погоды связана со струйными течениями. Связь турбулентности с параметрами струйного течения – нелинейная. На градиентах скорости ветра усиливаются пакеты акустико-гравитационных волн. Теоретически отслеживается влияние мозаичных ячеистых распределений атмосферных загрязнений на усиление вихревых структур, струйных течений и турбулентности. В приближении сжимаемой среды квадрат частоты Брента-Вяйсяля составляет $N^2 = -g \left[\frac{\partial \ln \rho_0}{\partial z} + \frac{g}{c_s^2} \right]$, где c_s - скорость звука.

Итак, смог влияет на усиление антициклонов. Появление блокирующих антициклонов над центром Европейской части России не случайно – это проявляется влияние источников загрязнений атмосферы, связанных с деятельностью человека. Образование блокирующих антициклонов влияет на масс-энергетический перенос на обширных территориях Евразийского континента. Блокирующие антициклоны вызывают засухи, обмеление рек, и как следствие, выгорание лесов.

Градиенты давления в вихревой ячейке циклонического типа направлены от центра ячейки к периферии. Это связано с конденсацией влаги, ростом оптической толщины ячейки – облака, с ростом градиентов давления в окрестности облачной тени. При движении на градиентах давления влажной воздушной массы от периферии аэрозольной ячейки к её центру молекулы воды переходят в конденсат, и выделяется скрытое тепло. Концентрация молекул воды при образовании конденсата постепенно убывает, поэтому и скорость образования конденсата убывает от периферии аэрозольной ячейки к центру.

В ячейках антициклонического типа градиенты давления направлены к центру. Вследствие этого рассмотренное выше движение влажного воздуха и образование конденсата в ячейках антициклонического типа не происходит. На влажность воздуха в антициклоне влияет испарение влаги с поверхности. Поэтому образование конденсата в ячейках циклонического типа, локальные дожди и вымывание аэрозолей из атмосферы способствуют ослаблению влияния антициклонов на погоду и климат.

При сближении циклона и не блокирующего антициклона наблюдается их смещение под действием градиентов давления и силы Кориолиса. Вихревые структуры угасают с выпадением

осадков. Картина взаимодействия пары циклон - антициклон при накоплении загрязнений, их ионизации внешними источниками и усилении структуры антициклона под воздействием плазменных роторных движений в геомагнитном поле существенно меняется. Блокирующий антициклон отклоняет траекторию движения циклона, надвигающегося с запада (с Атлантики) на север. При этом антициклон неподвижен и продолжает нарастать. Рост антициклона вызван нагревом подстилающей поверхности и атмосферы солнечным излучением, накоплением загрязнений, их ионизацией и влиянием на вихревую активность аэрозольной плазмы.

При неравномерном нагреве и ионизации примесей в атмосфере в геомагнитном поле возбуждаются электрические поля магнитогидродинамической природы. С ростом концентрации загрязнений атмосферы в антициклоне влияние аэрозольной плазмы на антициклон увеличивается. Так летом 2010 г. пожары усилили этот процесс. Антициклон охватил засухой и пожарами Россию. В струйных течениях аэрозоли под действием подъёмной силы забрасываются в верхние слои тропосферы и в стратосферу. Ионизация аэрозолей солнечным фотонным излучением и космическими лучами при этом усиливается, нарастает влияние электрических полей на устойчивость антициклона и циклона непосредственно в зоне их сближения.

Заключение

Вихревая активность атмосферы, струйные течения и турбулентность связаны с неоднородными ячеистыми распределениями атмосферных загрязнений. Часть энергии атмосферных вихревых структур, торнадо, циклонов и антициклонов, генерируется аэрозольными плазменными вихрями. Вихри Россби и плазменные вихри взаимодействуют на роторном «генетическом» уровне. В атмосфере антициклона накапливаются загрязнения. В области фронта циклон - антициклон это приводит к ускорению конденсации влаги и к осадкам. При выпадении осадков циклон теряет энергию. Накопление атмосферных загрязнений способствует образованию блокирующих антициклонов. Влияние Атлантики на климат Евразии проявляется в разнообразии взаимодействий циклон - антициклон. Пара циклон - не блокирующий антициклон под действием градиентов давления от полюса к экватору и силы Кориолиса смещается в восточном направлении. Диффузионное перемешивание воздушных масс приводит к осадкам вдоль фронта. Осадки стимулируются конденсацией влаги на аэрозолях. Пара циклон - антициклон вместе с осадками теряет энергию и вихри угасают. Такая картина взаимодействия вихревых структур меняется с усилением антициклона. По западной границе антициклона и восточной приближающихся к нему циклонов циркуляция воздушной массы направлена с юга на север. Над Европейской частью России это способствует накачке загрязнений и усилению влияния на вихревые структуры процессов в аэрозольной плазме в атмосфере северных широт. В циклоне загрязнения частично вымываются осадками. В сухом воздухе антициклона осадков мало. Усиление вихревой структуры антициклона связано с

накоплением загрязнений, их ионизацией внешними источниками и вследствие этого усилением вихревой активности аэрозольной плазмы в геомагнитном поле. Усиливающийся антициклон и струйные течения по его границе отклоняют траектории приближающихся с Атлантики циклонов на север. Струйные течения на границе циклона и блокирующего антициклона препятствуют диффузному проникновению влажных воздушных масс от периферии к центру антициклона и вымыванию загрязнений в антициклоне. При столкновении циклона и антициклона образуются струйные течения и связанная с ними турбулентность, в том числе не обнаруживаемая визуально турбулентность ясной погоды.

Литература

1. *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.
2. *Izhovkina N.I., Artekha S.N., Erokhin N.S., Mikhailovskaya L.A.* Interaction of atmospheric plasma vortices // Pure and Applied Geophysics. 2016. V. 173. № 8. P. 2945-2957.
3. *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.
4. *Н.И. Ижовкина, С.Н. Артеха, Н.С. Ерохин, Л.А. Михайловская*, Аэрозоль и активность вихрей в атмосфере // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 226–235.
5. *Н.И. Ижовкина, С.Н. Артеха, Н.С. Ерохин, Л.А. Михайловская*, Аэрозоль, плазменные вихри и атмосферные процессы // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 17, № 4. С. 5–25.