



**ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ, СКОРОСТНЫЕ И
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПРИДОННЫХ ЧАСТЕЙ ТОРНАДО И
ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА**

**Баутин С.П., Волков Р.Е., Крутова И.Ю.,
Обухов А.Г., Опрышко О.В.**

Природное явление



Почему возникают?

Как устроены?

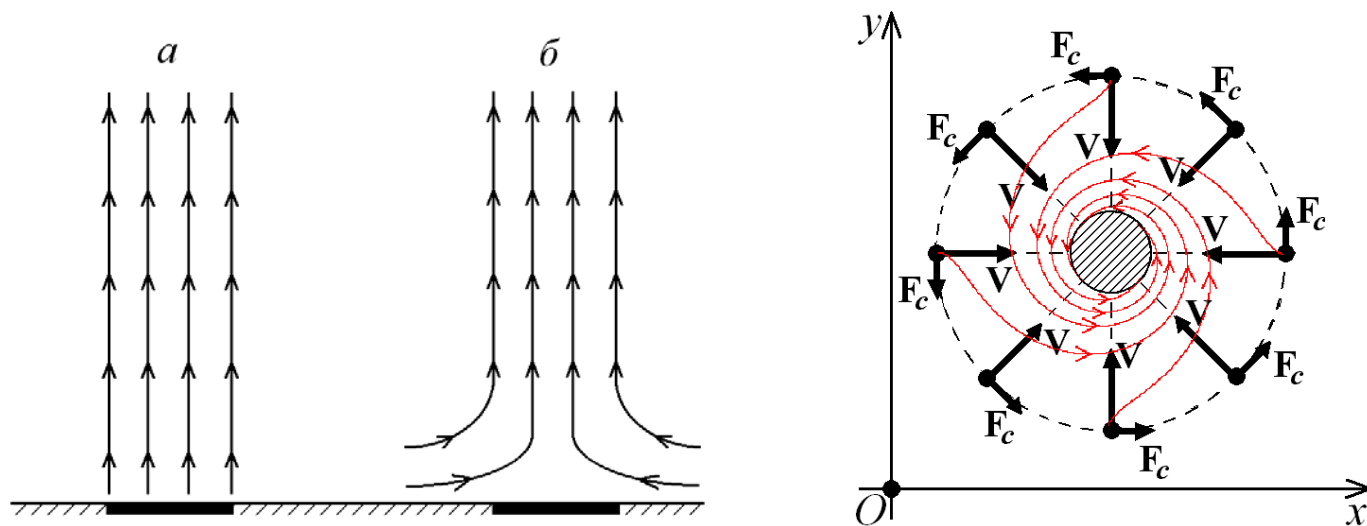
Откуда берется энергия на длительное существование и разрушения?

Баутин С.П. Торнадо и сила Кориолиса. Наука, 2008.

Баутин С.П., Дерябин С.Л., Крутова И.Ю., Обухов А.Г.
Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли
вокруг своей оси. УрГУПС, 2017.

▼ Возникновение восходящего конвективного потока
из-за перепада температур.

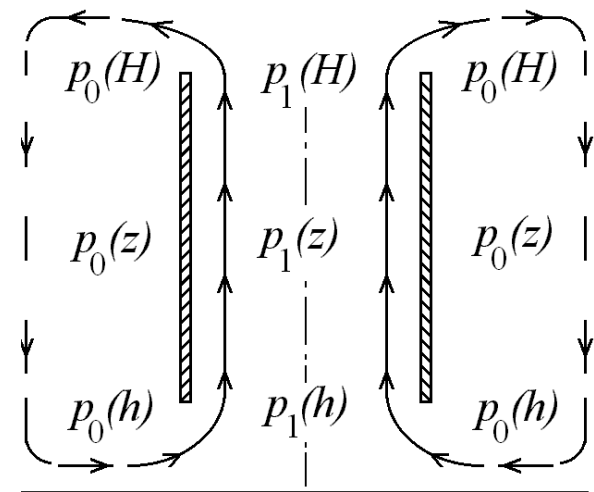
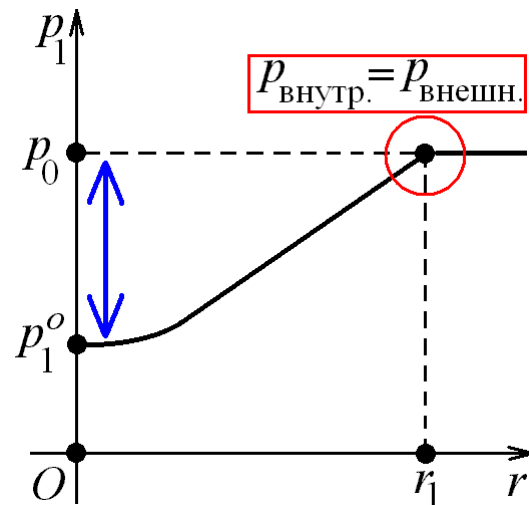
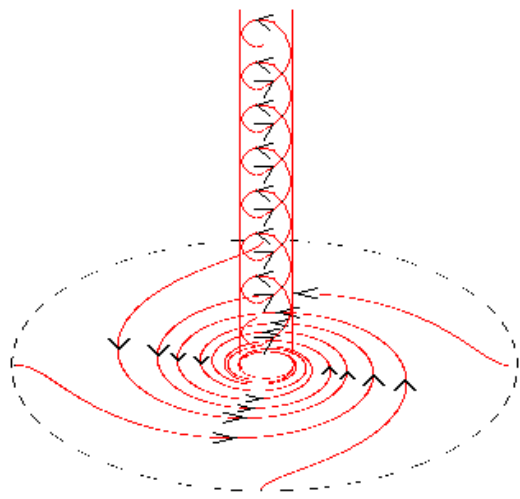
▼ Образование придонной части и возникновение в ней
закрутки воздуха благодаря действию силы Кориолиса.



Солнце дает энергию на начало вертикального движения,
вращение Земли закручивает горизонтальное движение.

Энергия для самоподдержания устойчивого функционирования ВЗП

- ✓ Вращение Земли закручивает газ в придонной части.
- ✓ Закрутка газа передается в вертикальную часть.
- ✓ Центробежная сила создает в вертикальной части: пониженное давление в окрестности оси и эффект непроницаемых стенок — "труба с тягой".
- ✓ Внешний покоящийся воздух под действием силы тяжести вдавливается снизу в "трубу с тягой".



Вращение воздуха в вертикальной части делает устойчивым функционирование всего потока.

Система уравнений газовой динамики

в прямоугольной системе координат, вращающейся вместе с Землей

$$\left\{ \begin{array}{l} c_t + v_1 c_x + v_2 c_y + v_3 c_z + \frac{(\gamma - 1)}{2} c (v_{1x} + v_{2y} + v_{3z}) = 0, \\ v_{1t} + v_1 v_{1x} + v_2 v_{1y} + v_3 v_{1z} + \frac{2}{(\gamma - 1)} c c_x = \underline{2\Omega_3 v_2 - 2\Omega_2 v_3}, \\ v_{2t} + v_1 v_{2x} + v_2 v_{2y} + v_3 v_{2z} + \frac{2}{(\gamma - 1)} c c_y = \underline{-2\Omega_3 v_1}, \\ v_{3t} + v_1 v_{3x} + v_2 v_{3y} + v_3 v_{3z} + \frac{2}{(\gamma - 1)} c c_z = \underline{2\Omega_2 v_1 - g} \end{array} \right.$$
$$S = \text{const}; \quad c = \rho^{(\gamma-1)/2};$$

$$\Omega = (0, \Omega_2, \Omega_3); \quad \Omega_2 = \Omega \cos \psi; \quad \Omega_3 = \Omega \sin \psi$$

Ускорение Кориолиса, присутствующее в уравнениях движения —
в дифференциальной форме закона сохранения импульса —
вносит в газовый поток дополнительный внешний импульс,
т.е. изменяет $m\mathbf{V}$ — количество движения потока!!

Система уравнений газовой динамики

в цилиндрической системе координат, вращающейся вместе с Землей

$$\left\{ \begin{array}{l} c_t + uc_r + \frac{v}{r}c_\varphi + wc_z + \frac{(\gamma-1)}{2}c \left(u_r + \frac{u}{r} + \frac{v_\varphi}{r} + w_z \right) = 0, \\ u_t + uu_r + \frac{v}{r}u_\varphi - \frac{v^2}{r} + wu_z + \frac{2}{(\gamma-1)}cc_r = \underline{av - bw \cos \varphi}, \\ v_t + uv_r + \frac{uv}{r} + \frac{v}{r}v_\varphi + wv_z + \frac{2}{(\gamma-1)}\frac{c}{r}c_\varphi = \underline{-au + bw \sin \varphi}, \\ w_t + uw_r + \frac{v}{r}w_\varphi + ww_z + \frac{2}{(\gamma-1)}cc_z = \underline{bu \cos \varphi - bv \sin \varphi} - g, \\ c = \rho^{(\gamma-1)/2}, \quad p = \frac{1}{\gamma}\rho^\gamma, \quad a = 2\Omega \sin \psi, \quad b = 2\Omega \cos \psi, \quad \Omega = |\mathbf{\Omega}| \end{array} \right.$$

В этом случае в систему уравнений газовой динамики явно входит независимая переменная φ

Теорема 1. *Задача имеет единственное аналитическое решение в некоторой окрестности точки M_0 ($t = 0, r = r_0, \varphi = \varphi_0, z = 0$), где $0 \leq \varphi_0 \leq 2\pi$.*

Если $\Omega = 0$, то единственное аналитическое решение не зависит от φ и течение только радиальное: $v \equiv 0$.

Если $\Omega \neq 0$, то
$$\left. \frac{\partial v}{\partial r} \right|_{C^+} = 0; \quad \left. \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \right|_{C^+} > 0$$

в случае Северного полушария.

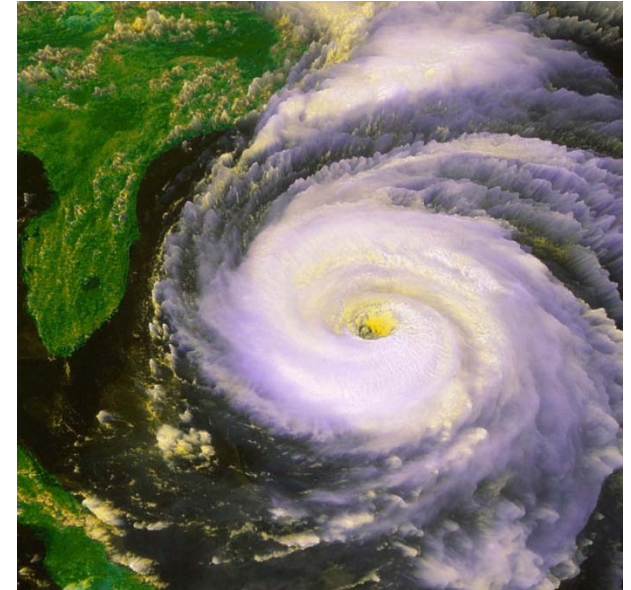
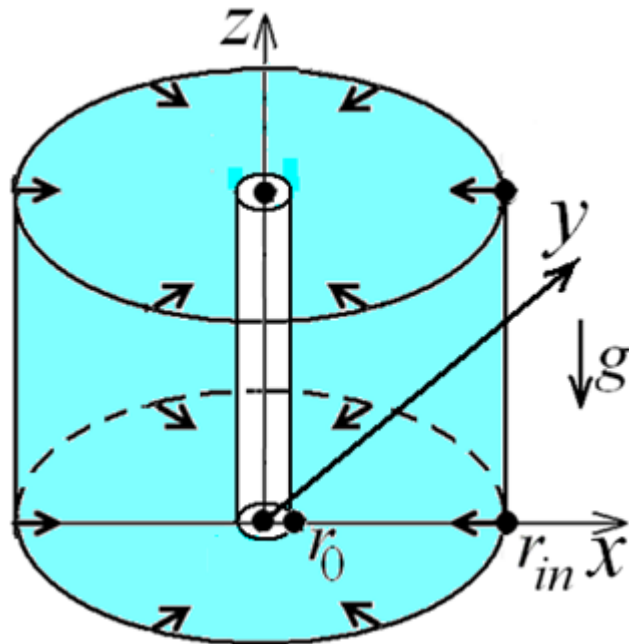
В случае Южного полушария

$$\left. \frac{\partial v}{\partial r} \right|_{C^+} = 0; \quad \left. \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \right|_{C^+} < 0.$$

Тем самым доказано что возникновение закрутки газа при $\Omega \neq 0$ в задаче о плавном радиальном стоке вызвано только вращением Земли во круг своей оси.

Характеристическая задача Коши о заданном радиальном притоке

Будет строиться придонное течение у уже сформировавшегося природного восходящего закрученного потока.



То есть будет строиться стационарное течение газа в цилиндрической области:

$$\left\{ 0 < r \leq r_{in}, r_{in} > 0; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; z \geq 0 \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_t + uc_r + \frac{v}{r}c_\varphi + wc_z + \frac{(\gamma - 1)}{2}c \left(u_r + \frac{u}{r} + \frac{v_\varphi}{r} + w_z \right) = 0, \\ u_t + uu_r + \frac{v}{r}u_\varphi - \frac{v^2}{r} + wu_z + \frac{2}{(\gamma - 1)}cc_r = av - bw \cos \varphi, \\ v_t + uv_r + \frac{uv}{r} + \frac{v}{r}v_\varphi + wv_z + \frac{2}{(\gamma - 1)}\frac{1}{r}cc_\varphi = -au + bw \sin \varphi, \\ w_t + uw_r + \frac{v}{r}w_\varphi + ww_z + \frac{2}{(\gamma - 1)}cc_z = bu \cos \varphi - bv \sin \varphi - g; \\ c(t, r, \varphi, z)|_{z=0} = c_0(r), \\ u(t, r, \varphi, z)|_{z=0} = u_0(r), \\ v(t, r, \varphi, z)|_{z=0} = v_0(r), \\ w(t, r, \varphi, z)|_{z=0} = 0; \\ u(t, r, \varphi, z)|_{r=r_{in}} = u_{in}; \quad u_{in} = \text{const} < 0; \\ v(t, r, \varphi, z)|_{r=r_{in}} = 0. \end{array} \right.$$

условия

**на контактной
характеристике**

**заданный
радиальный
приток**

Надо будет вводить сток газа при каком-то $r = r_0, 0 < r_0 < r_{in}$.

Баутин С.П. Характеристическая задача Коши и ее приложения в газовой динамике. Наука, 2009.

Баутин С.П. Характеристическая задача Коши для квазилинейной аналитической системы // Диф. ур. 1976.

Теорема 2. При выполнении необходимых условий разрешимости

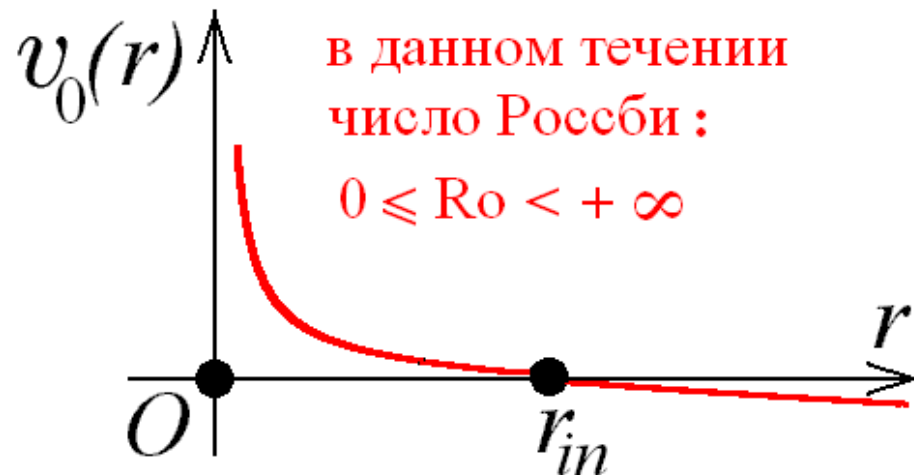
$$\begin{cases} u_0 u_{0r} - \frac{v_0^2}{r} + \frac{2}{(\gamma - 1)} c_0 c_{0r} = a v_0, \\ u_0 v_{0r} + \frac{u_0 v_0}{r} = -a u_0 \end{cases}$$

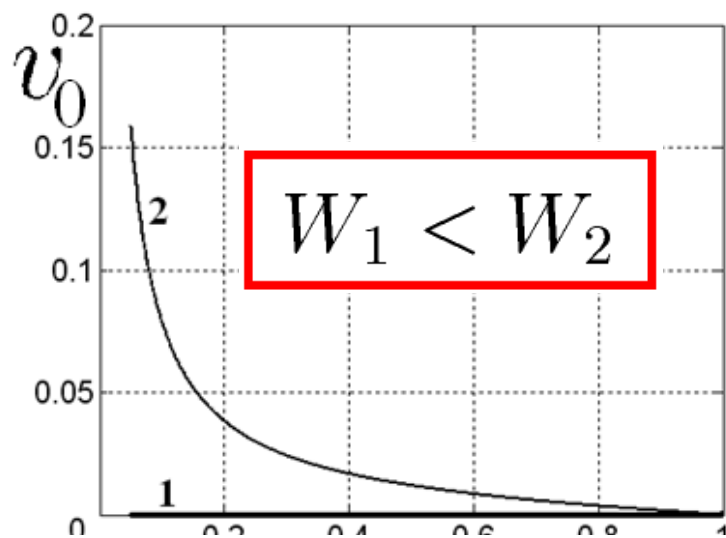
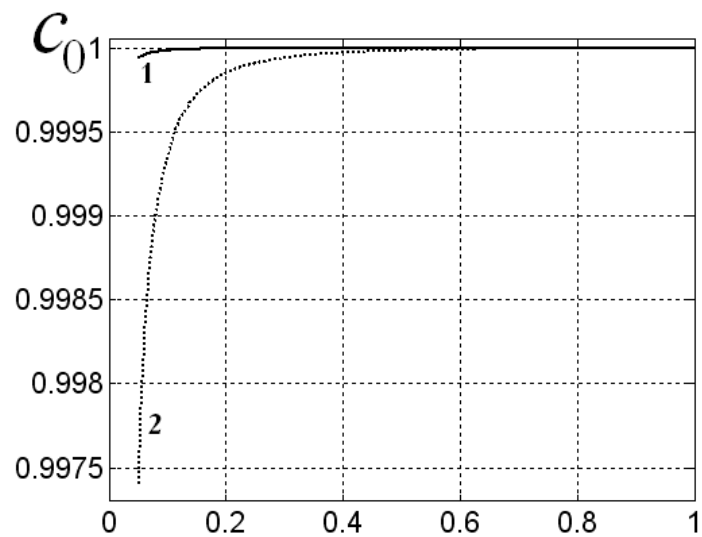
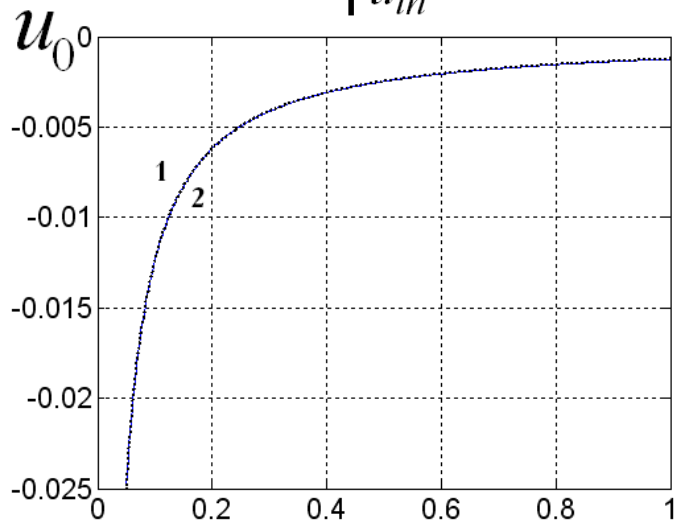
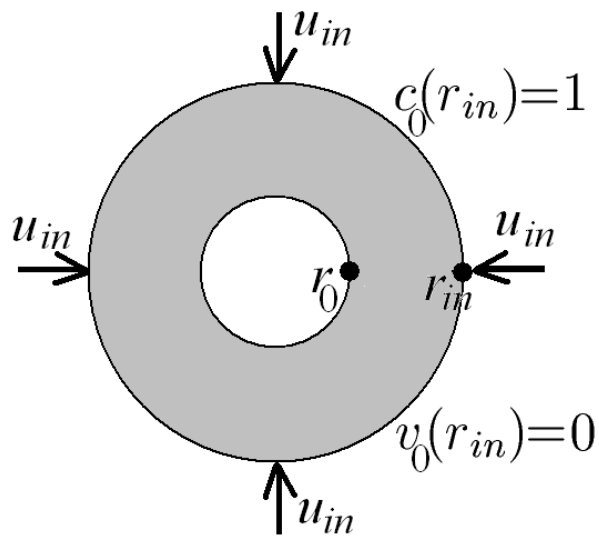
задача имеет единственное аналитическое решение в некоторой окрестности рассматриваемой точки ($r = r_{in}, \varphi = \varphi_0, z = 0$).

1. Если $\Omega = 0$, то в единственном аналитическом решении окружная скорость будет тождественно равна нулю: $v \equiv 0$.

2. Если $\Omega \neq 0$, то однозначно получается:

$$v_0(r) = \frac{a(r_{in}^2 - r^2)}{2r}.$$



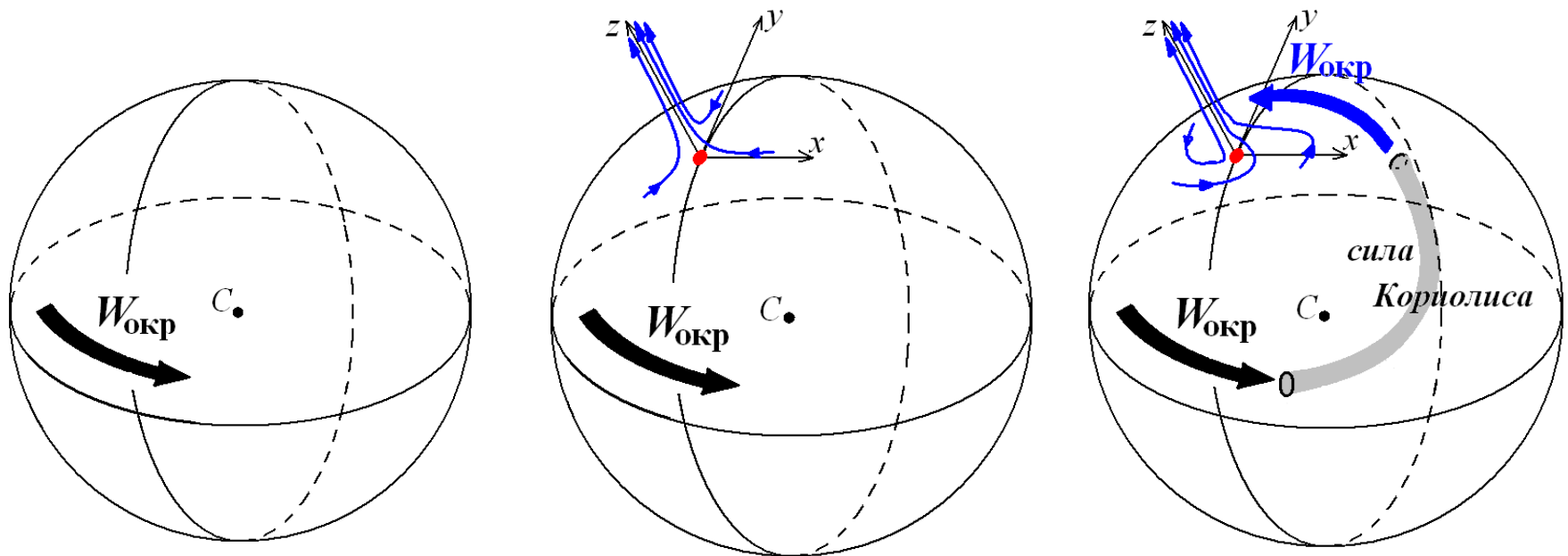


Сила Кориолиса «переводит» часть кинетической энергии вращения Земли в кинетическую энергию вращательного движения специального потока воздуха.

Установлен новый естественнонаучный факт!

Для торнадо и для тропических циклонов
математически строго доказано:

- причина возникновения закрутки газа в этих потоках есть только вращение Земли вокруг своей оси;
- кинетическая энергия вращательного движения воздуха в этих потоках берется только из кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси.



Расчеты течений, согласующиеся с данными натуральных наблюдений

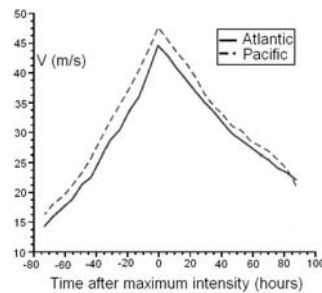
Tatom F.B., Witton S.J. // Seismological Research Letter. 2001.V. 72. № 1.

Emanuel K.A. // Journal of the Atmospheric Sciences. 2000.V. 128.

Классификация торнадо по шкале Фудзиты

Класс торнадо	Скорость ветра, м/с	Ширина следа, м	Средняя длина пути, км	Среднее время жизни, мин
<i>F0</i>	19 – 32	5 – 15	1.9	2.4
<i>F1</i>	33 – 50	16 – 50	4.2	5.2
<i>F2</i>	51 – 70	51 – 160	8.7	10.8
<i>F3</i>	71 – 92	161 – 508	16.1	20.0
<i>F4</i>	93 – 116	547 – 1448	43.8	54.4
<i>F5</i>	117 – 142	1609 – 4989	57.1	71.0

**Статистика
ЦИКЛОНОВ:**



**Время
разрушительного действия**

Плоские изэнтропические течения

$$\begin{cases} c_t + uc_r + \frac{(\gamma - 1)}{2}c \left(u_r + \frac{u}{r} \right) = 0, \\ u_t + uu_r - \frac{v^2}{r} + \frac{2}{(\gamma - 1)}cc_r = av, \\ v_t + uv_r + \frac{uv}{r} = -au \end{cases}$$

Точное стационарное решение

$$c(r) = \left[\frac{A}{ru(r)} \right]^{(\gamma-1)/2}, \quad v(r) = \frac{a(r_{in}^2 - r^2)}{2r}; \quad A, B, r_{in} - \text{const}$$
$$F(r, u) \equiv \frac{2}{(\gamma - 1)} \left(\frac{A}{ru} \right)^{(\gamma-1)} + (u)^2 - B + \frac{a^2 r_{in}^4}{4r^2} + \frac{a^2}{4} r^2 = 0$$

При заданных r_0 , $V_{\text{ветра}}$, $u_{in} = -0.0001$ подобрать r_{in} так, чтобы: $V_{\text{ветра}} \approx |\mathbf{V}(r_0)| = \sqrt{u^2(r_0) + v^2(r_0)}$

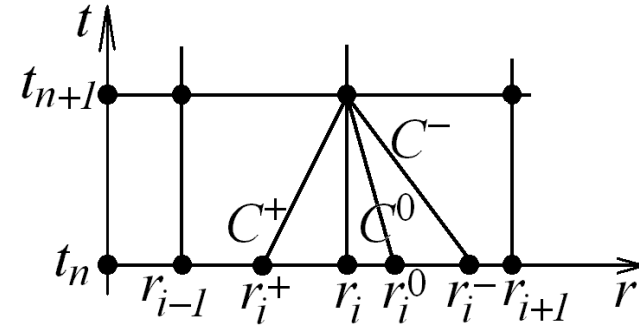
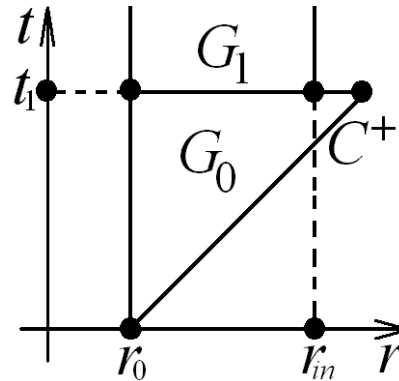
Результаты расчетов стационарных течений

Класс торнадо	$V_{\text{ветра}}$, м/с	$ \mathbf{V}(r_0) $, м/с	r_0 , м	r_{in} , м	W , Дж	W_v/W
F_{-1}	15	14.95	1	410	$1.1 \cdot 10^6$	0.149
F_0	19	19.01	2.5	975	$24.78 \cdot 10^6$	0.497
$F_{0.5}$	25.5	25.5	5.0	1765	$0.307 \cdot 10^9$	0.764
F_1	33	32.97	8.0	2618	$1.895 \cdot 10^9$	0.877
F_2	51	51.02	25.5	5949	$0.096 \cdot 10^9$	0.973
F_3	71	70.96	80.5	12522	$3.56 \cdot 10^{12}$	0.994
F_4	93	93.01	273.5	26450	$132.2 \cdot 10^{12}$	0.9986
F_5	117	116.98	804.5	50890	$3079.6 \cdot 10^{12}$	0.9996
ЦИКЛОН	51	53.01	3650	73050	$15.51 \cdot 10^{15}$	0.998
	природа	расчет	природа расчет	расчет		

Значения r_0 и $V(r_0)$ для введенных классов F_{-1} , $F_{0.5}$ определены линейной интерполяцией по данным из шкалы Фудзиты.

Нестационарные расчеты плоских придонных частей разрушительных атмосферных вихрей

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dR}{dt} \Big|_{C^+} = f_1(r, c, u, v) \Big|_{C^+}, \\ \frac{dL}{dt} \Big|_{C^-} = f_2(r, c, u, v) \Big|_{C^-}, \\ \frac{dv}{dt} \Big|_{C^0} = f_3(r, u, v) \Big|_{C^0}, \end{array} \right.$$



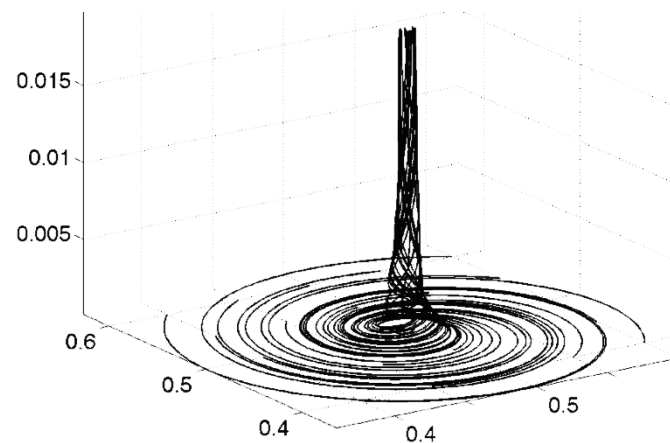
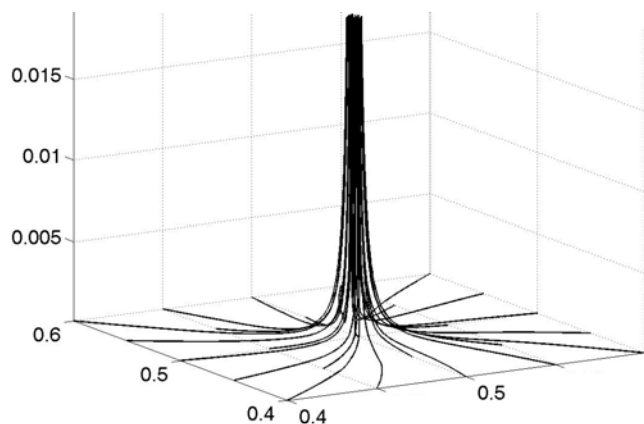
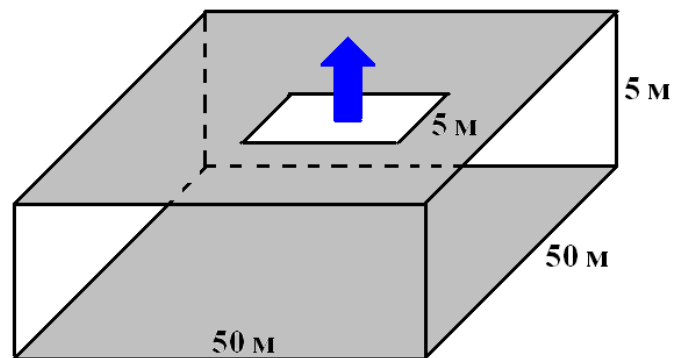
Класс течения	Время выхода на стационар, ч	r_0 , М	r_{in} , КМ
F_0	3.1	2.5	0.975
F_1	4.6	8.0	2.618
F_2	6.8	25.5	5.949
F_3	8.3	80.5	12.522
F_4	13.3	273.5	26.450
F_5	13.6	804.5	50.890
ЦИКЛОН	27.4	3650	73.050
	расчет	природа расчет	расчет

Расчеты трехмерных нестационарных течений

Полная система уравнений Навье–Стокса

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_t + \mathbf{V} \cdot \nabla \rho + \rho \operatorname{div} \mathbf{V} = 0, \\ \mathbf{V}_t + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + \frac{T}{\gamma \rho} \nabla \rho + \frac{1}{\gamma} \nabla T = \mathbf{g} - \underline{2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}} + \\ + \frac{\mu_0}{\rho} \left[\frac{1}{4} \nabla (\operatorname{div} \mathbf{V}) + \frac{3}{4} \Delta \mathbf{V} \right], \\ T_t + \mathbf{V} \cdot \nabla T + (\gamma - 1) T \operatorname{div} \mathbf{V} = \frac{\varkappa_0}{\rho} \Delta T + \\ + \frac{\mu_0 \gamma (\gamma - 1)}{2\rho} \left\{ \left[(u_x - v_y)^2 + (u_x - w_z)^2 + (v_y - w_z)^2 \right] + \right. \\ \left. + \frac{3}{2} \left[(u_y + v_x)^2 + (u_z + w_x)^2 + (v_z + w_y)^2 \right] \right\}, \mu_0, \varkappa_0 = \text{const} \end{array} \right.$$

Расчет эксперимента «продув воздуха по трубе снизу вверх»



Скорость продува, м/с	5	10	12	15	20
W , Дж	$3.5 \cdot 10^3$	$1.4 \cdot 10^4$	$4.2 \cdot 10^4$	$6.5 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^7$
W_v/W	0.19	0.22	0.45	0.58	0.97

Заключение

1. Построены решения системы уравнений газовой динамики при учете действия силы Кориолиса, согласующиеся с данными натурных наблюдений за торнадо и за тропическими циклонами. Эти решения строго математически устанавливают, что закрутку потоку и увеличение ее кинетической энергии в торнадо и в тропических циклонах дает только вращение Земли вокруг своей оси.
3. Установлены геометрические и скоростные характеристики потоков, при которых кинетическая энергия вращательного движения потока больше половины всей кинетической энергии потока.

Спасибо за внимание !

E-mail: SBautin@usurt.ru