

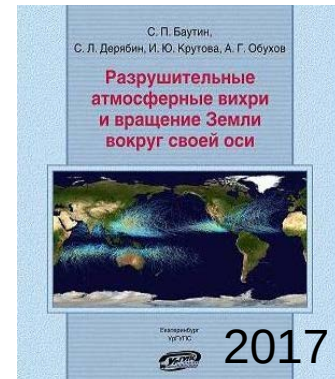
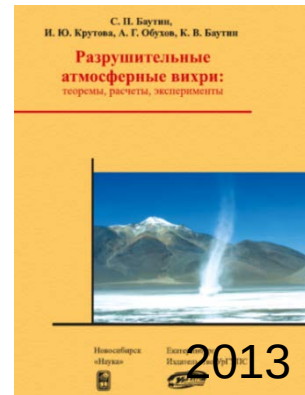


ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ВОСХОДЯЩИХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

С.П. Баутин, И.Ю. Крутова, А.Г. Обухов

Введение

В докладе представлены результаты исследования восходящих закрученных потоков — аналитические, численные, экспериментальные, представляющие газодинамическую теорию этих потоков.



Получены обоснованные ответы на самые главные вопросы про эти течения: как возникают, откуда берутся закрутка воздуха и его гигантская кинетическая энергия.

Никто из предшествующих исследователей обоснованных ответов на поставленные вопросы не получил.

Природное явление

Трагедия 14 июня 2014 года на Ильменском озере Челябинской области







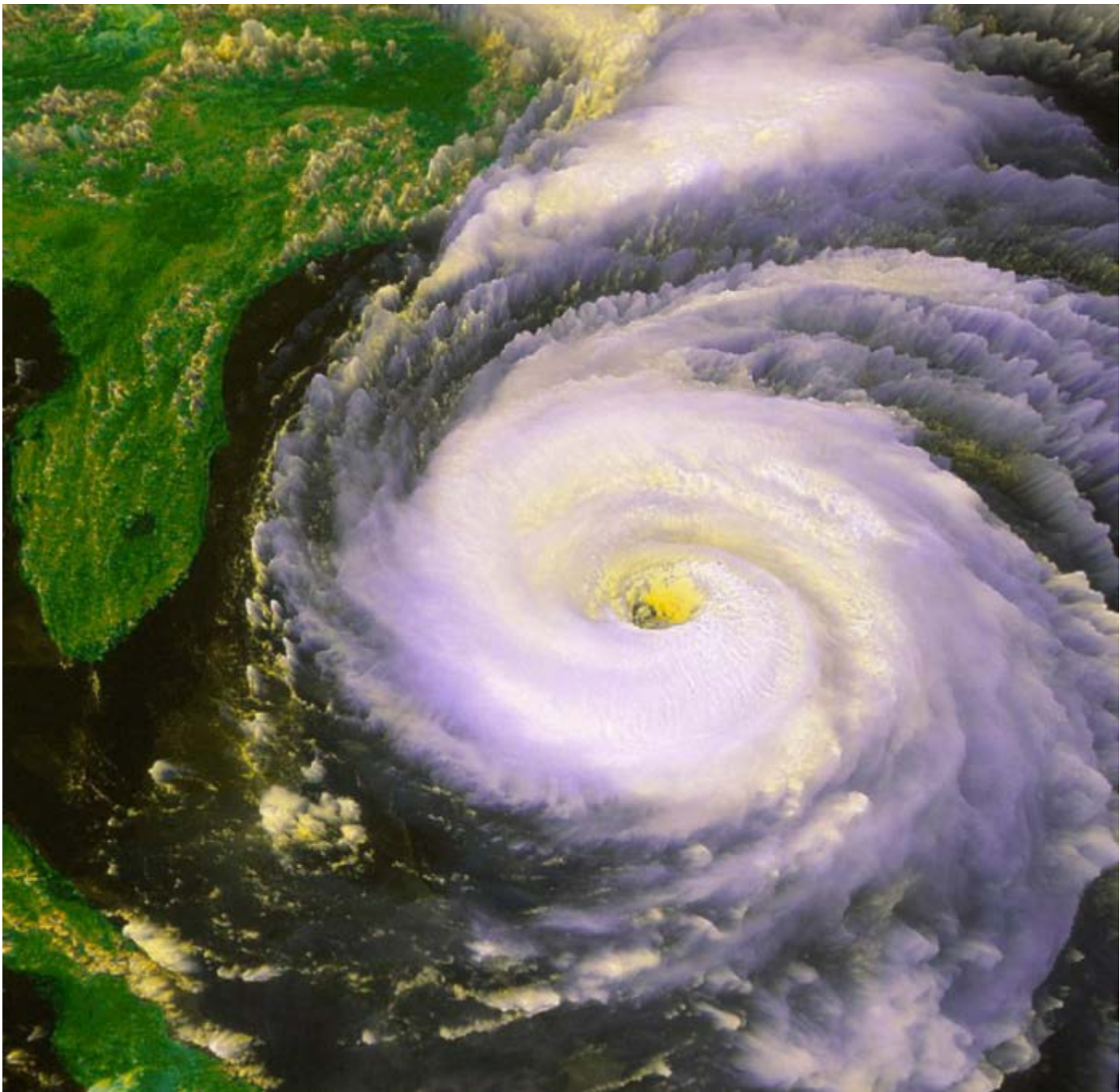
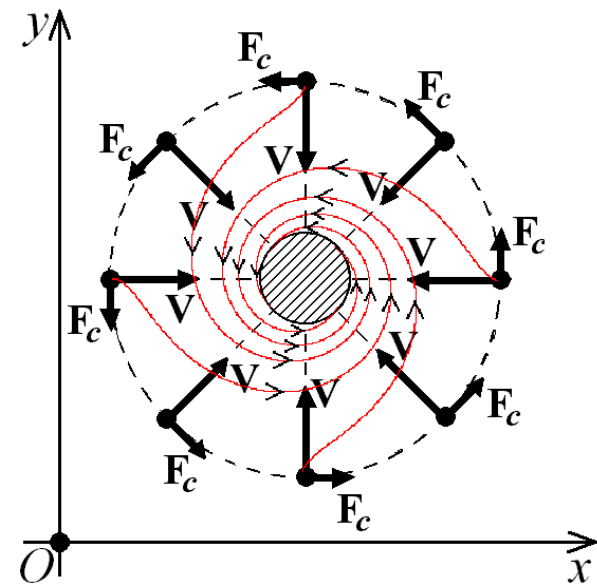
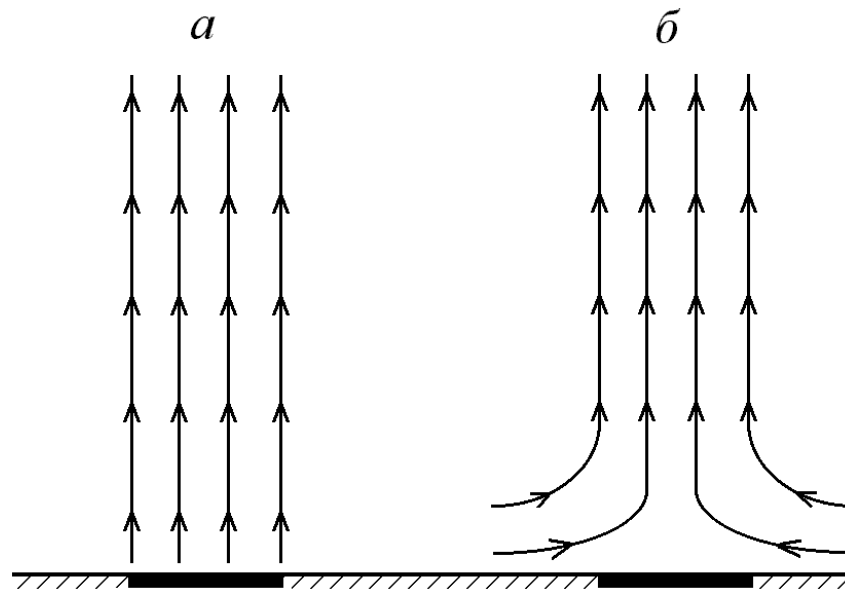


Схема возникновения и функционирования ВЗП

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

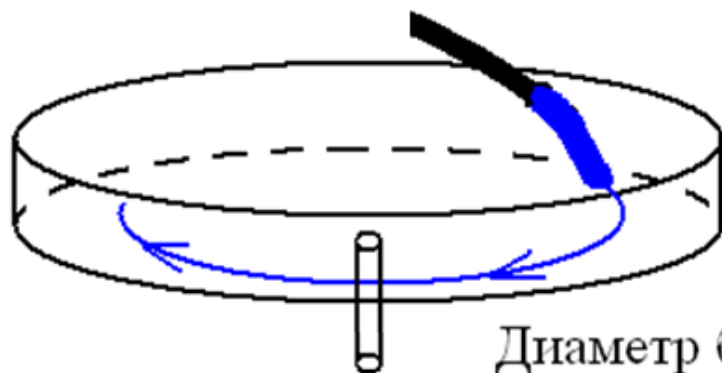
✓ Возникновение восходящего конвективного потока из-за перепада температур.

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



Солнце дает энергию на начало вертикального движения воздуха, вращение Земли закручивает горизонтальное движение воздуха, для этого движения нужна большая ровная поверхность и нет смысла искать подобное движение в кухонной раковине.

Наполнение бака



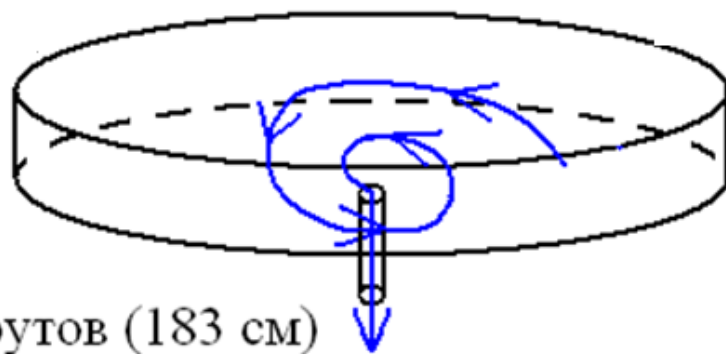
Диаметр бака 6 футов (183 см)

Высота бака 6 дюймов (15 см)

Первые 12-15 минут вращение не воспринимается.

В конце слива один оборот за 3-4 секунды.

Слив из бака



Время устоя 24 часа

Если начало слива через 4-5 часа после начала отстоя, то вначале вращение в отрицательном направлении, потом остановка и вращение в положительном направлении.

Shapiro. A. H. The Bat-Tub Vortex (Вихрь в ванне) // Nature, 1962, vol. 196, N 4859, pp. 1080-1081.

Trefethen L.M, Bilger R.W., Fink P.T., Luxton R.E., Tanner R.I. The Bat-Tub Vortex in the Southern Hemisphere (Вихрь в ванне в Южном полушарии) // Nature, 1965, vol. 207, N 5001, pp. 1084-1085.

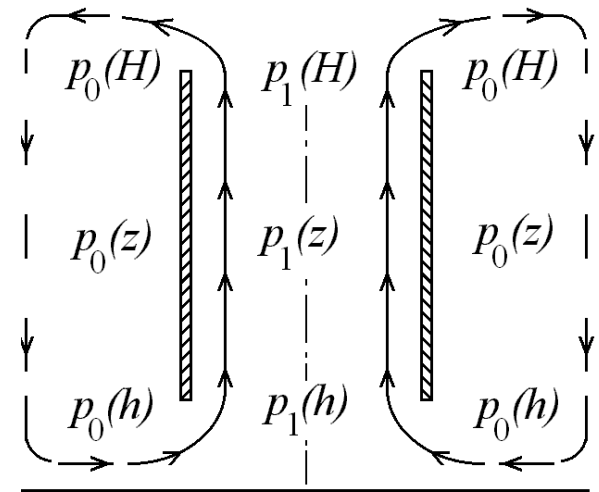
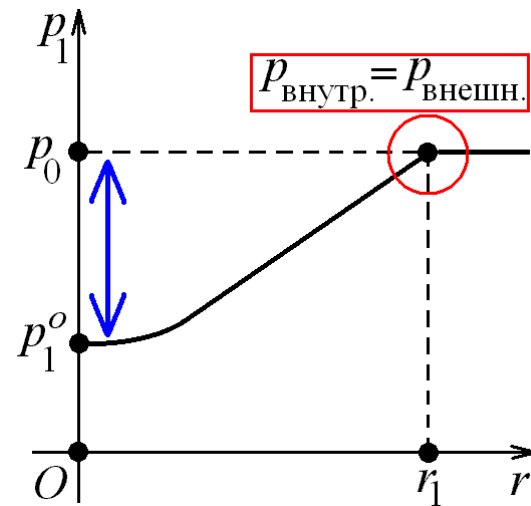
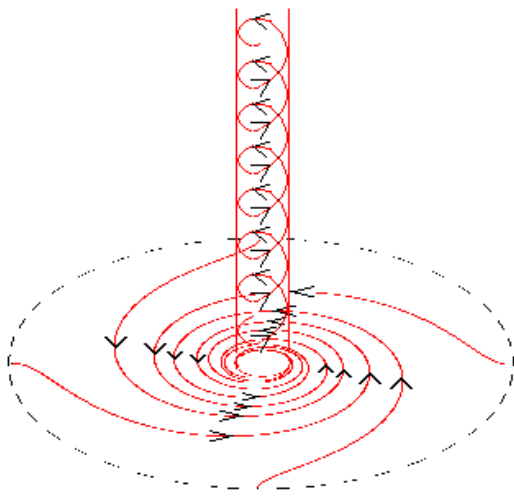
<https://phys.org/news/2018-12-tornadoes-ground-contrary-popular-thought.html>

Научная сенсация: по наблюдениям с помощью радара за торнадо возле американского города Эль-Рено 31 мая 2013 и последующим исследованиям американская ученая Яна Хаузер из Университета Огайо установила, что закрутка воздуха в торнадо возникает сначала на земле, а не в облаке, как многие считали ранее, и только потом передается вверх. Результаты своих исследований она доложила на заседании Американского геофизического союза 13 декабря 2018 года.



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

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

Ускорение Кориолиса, присутствующее во втором, третьем и четвертом уравнениях — в дифференциальной форме закона сохранения импульса — вносит в газовый поток дополнительный внешний импульс, в том числе изменяет скорость потока (см. уравнения) и, следовательно, изменяет кинетическую энергию потока.

Система уравнений газовой динамики

в цилиндрической системе координат, вращающейся вместе с Землей

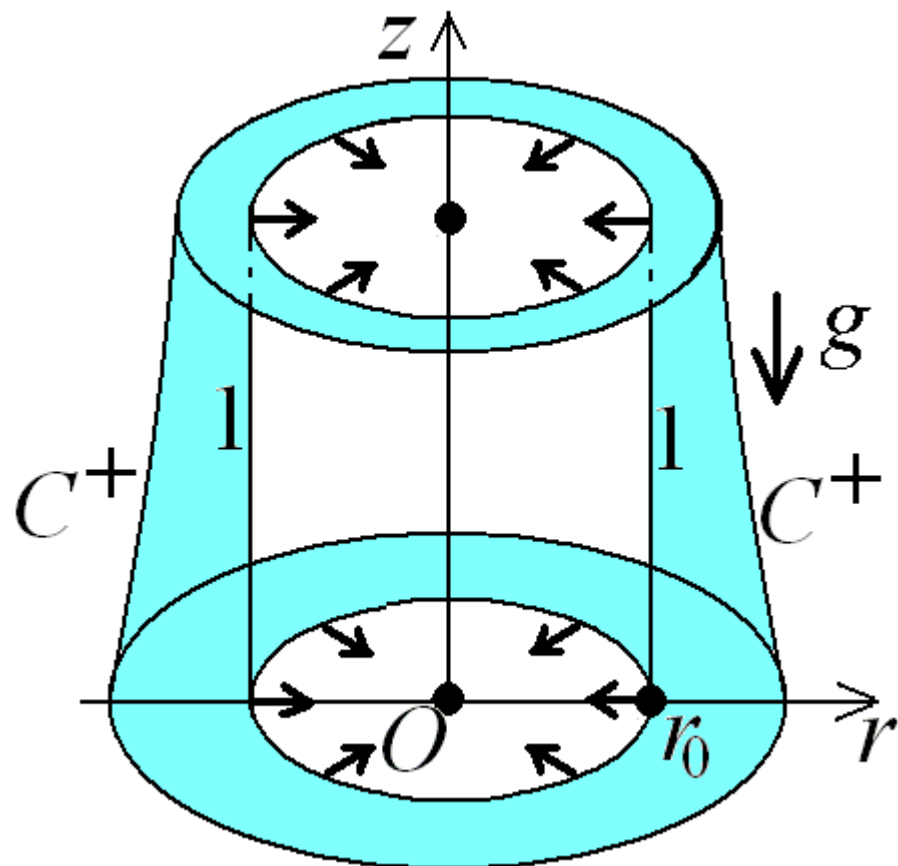
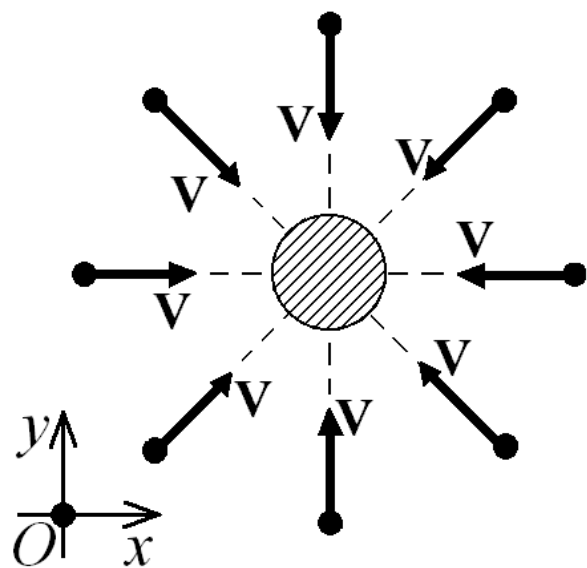
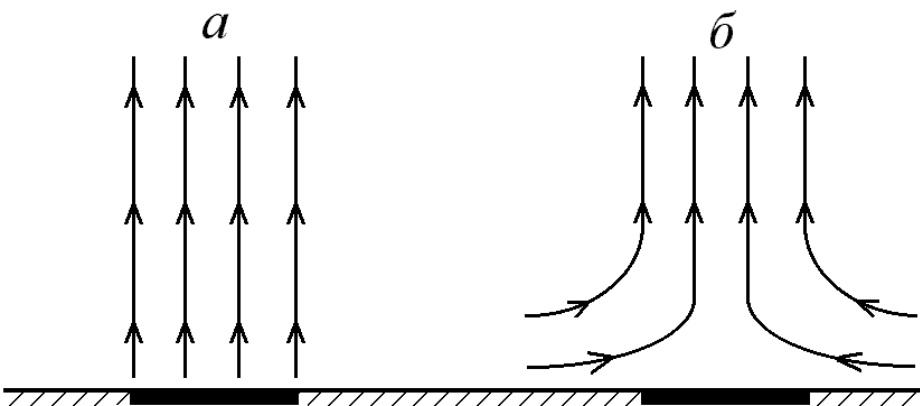
$$\left\{ \begin{array}{l} c_t + uc_r + \frac{v}{r}c_\varphi + wc_z + \frac{(\gamma-1)}{2}c \left(u_r + \frac{u}{r} + \frac{v_\varphi}{r} + w_z \right) = 0, \\ u_t + uu_r + \frac{v}{r}u_\varphi - \frac{v^2}{r} + wu_z + \frac{2}{(\gamma-1)}cc_r = \underline{av - bw \cos \varphi}, \\ v_t + uv_r + \frac{uv}{r}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

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

Полная система уравнений Навье–Стокса

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_t + \mathbf{V} \cdot \nabla \rho + \rho \operatorname{div} \mathbf{V} = 0, \\ \mathbf{V}_t + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + \frac{T}{\gamma \rho} \nabla \rho + \frac{1}{\gamma} \nabla T = \mathbf{g} - \underline{2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}} + \\ + \frac{\mu_0}{\rho} \left[\frac{1}{4} \nabla (\operatorname{div} \mathbf{V}) + \frac{3}{4} \Delta \mathbf{V} \right], \\ T_t + \mathbf{V} \cdot \nabla T + (\gamma - 1) T \operatorname{div} \mathbf{V} = \frac{\kappa_0}{\rho} \Delta T + \\ + \frac{\mu_0 \gamma (\gamma - 1)}{2\rho} \left\{ \left[(u_x - v_y)^2 + (u_x - w_z)^2 + (v_y - w_z)^2 \right] + \right. \\ \left. + \frac{3}{2} \left[(u_y + v_x)^2 + (u_z + w_x)^2 + (v_z + w_y)^2 \right] \right\}, \mu_0, \kappa_0 = \text{const} \end{array} \right.$$

Характеристическая задача Коши о плавном радиальном стоке



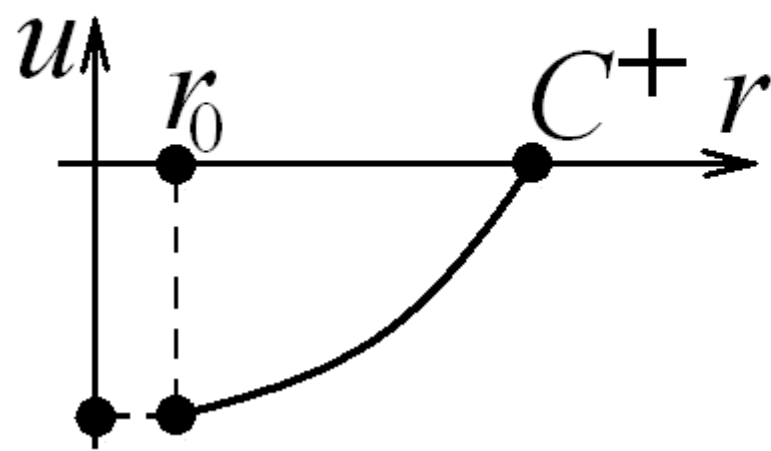
$$\left\{ \begin{array}{l} c_t + uc_r + \frac{v}{r}c_\varphi + wc_z + \frac{(\gamma-1)}{2}c \left(u_r + \frac{u}{r} + \frac{v_\varphi}{r} + w_z \right) = 0, \\ u_t + uu_r + \frac{v}{r}u_\varphi - \frac{v^2}{r} + wu_z + \frac{2}{(\gamma-1)}cc_r = av - bw \cos \varphi, \\ v_t + uv_r + \frac{uv}{r} + \frac{v}{r}v_\varphi + wv_z + \frac{2}{(\gamma-1)}\frac{1}{r}cc_\varphi = -au + bw \sin \varphi, \\ w_t + uw_r + \frac{v}{r}w_\varphi + ww_z + \frac{2}{(\gamma-1)}cc_z = bu \cos \varphi - bv \sin \varphi - g; \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \underline{a = 2\Omega \sin \psi; \quad b = 2\Omega \cos \psi} \\ c(t, r, \varphi, z)|_{C^+} = \sqrt{c_{00}^2 - (\gamma-1)gz}; \\ u(t, r, \varphi, z)|_{C^+} = 0; \\ v(t, r, \varphi, z)|_{C^+} = 0; \\ w(t, r, \varphi, z)|_{C^+} = 0; \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{условия} \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{на звуковой} \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{характеристике} \\ \\ u(t, r, \varphi, z)|_{r=r_0} = u^o(t), \quad | \quad \text{заданный радиальный сток} \\ u^o(t)|_{t=0} = 0, \quad [u^o(t)]'|_{t=0} = u_* = \text{const} < 0. \end{array} \right.$$

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

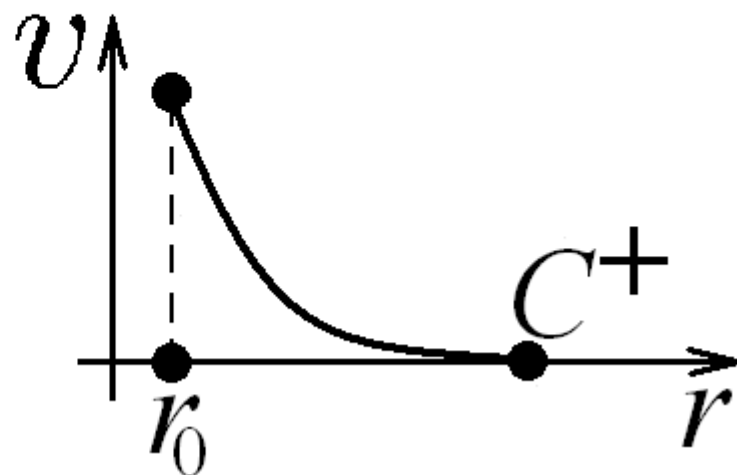
Баутин С.П. Характеристическая задача Коши для квазилинейной аналитической системы // Диф. ур. 1976.

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

$$u_r|_{C^+} > 0$$



$$v_r|_{C^+} = 0, v_{rr}|_{C^+} > 0$$



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

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

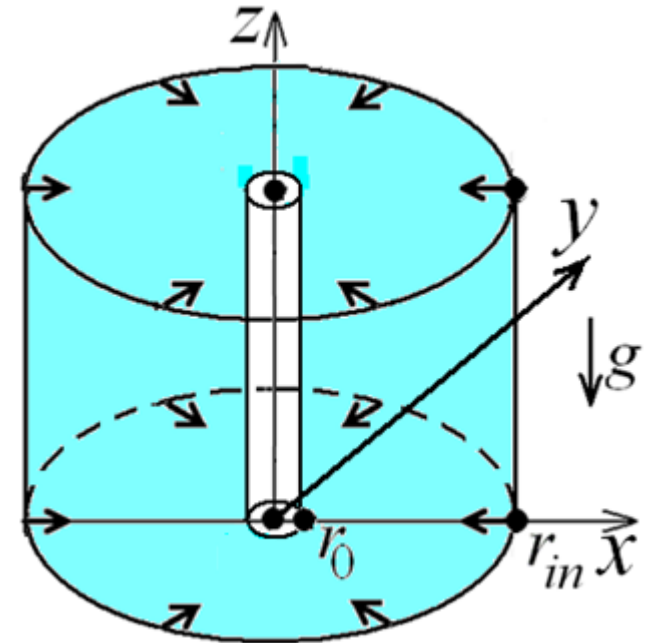
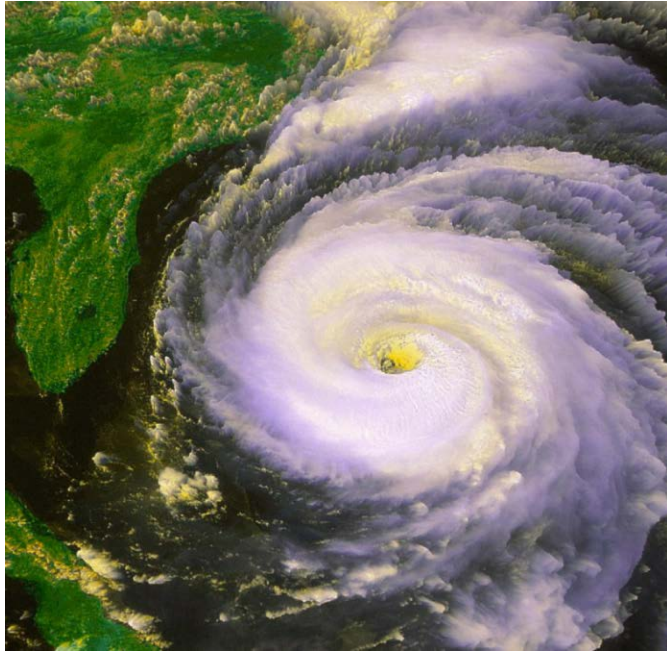
в случае Северного полушария.

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 вокруг своей оси.

Характеристическая задача Коши о заданном радиальном притоке



Будет строиться придонное течение
у сформировавшегося природного
восходящего закрученного потока.

То есть будет строиться стационарное течение
газа в цилиндрической области:

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

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

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

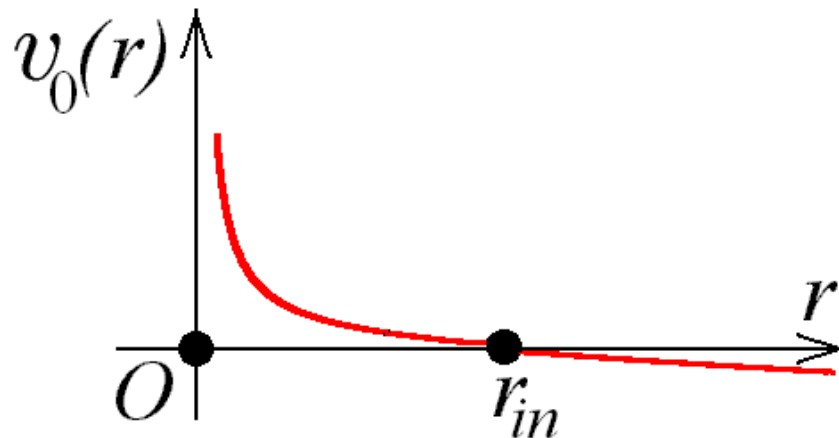
$$\begin{cases} u_0 u_{0r} - \frac{v_0^2}{r} + \frac{2}{(\gamma - 1)} c_0 c_{0r} = a v_0, \\ u_0 v_{0r} + \frac{u_0 v_0}{r} = -a u_0 \end{cases}$$

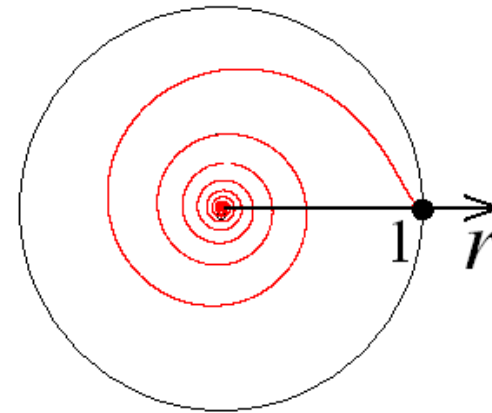
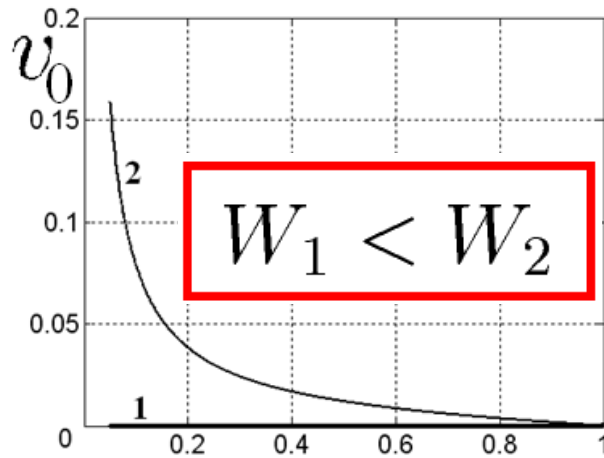
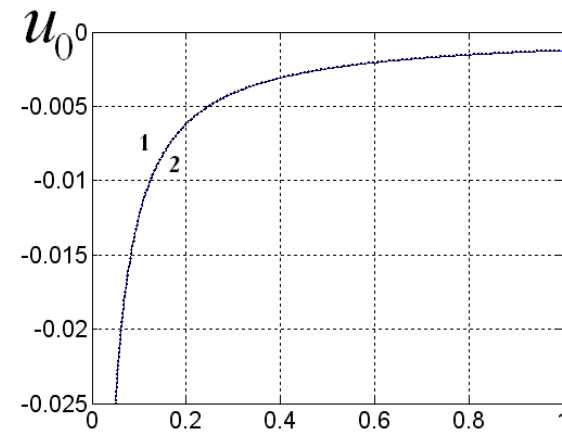
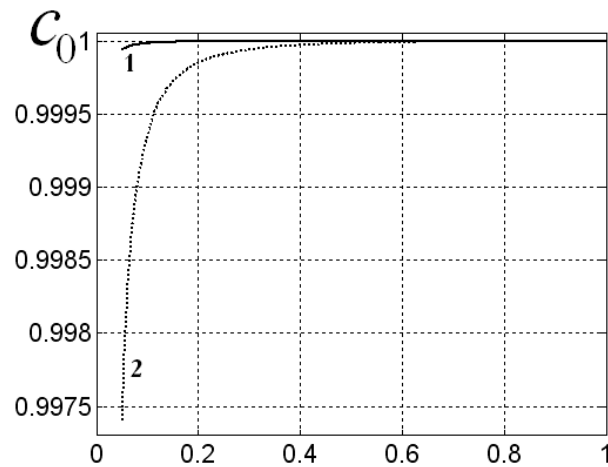
задача имеет единственное аналитическое решение в некоторой окрестности рассматриваемой точки $(r = r_{in}, \varphi = \varphi_0, z = 0)$.

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:

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



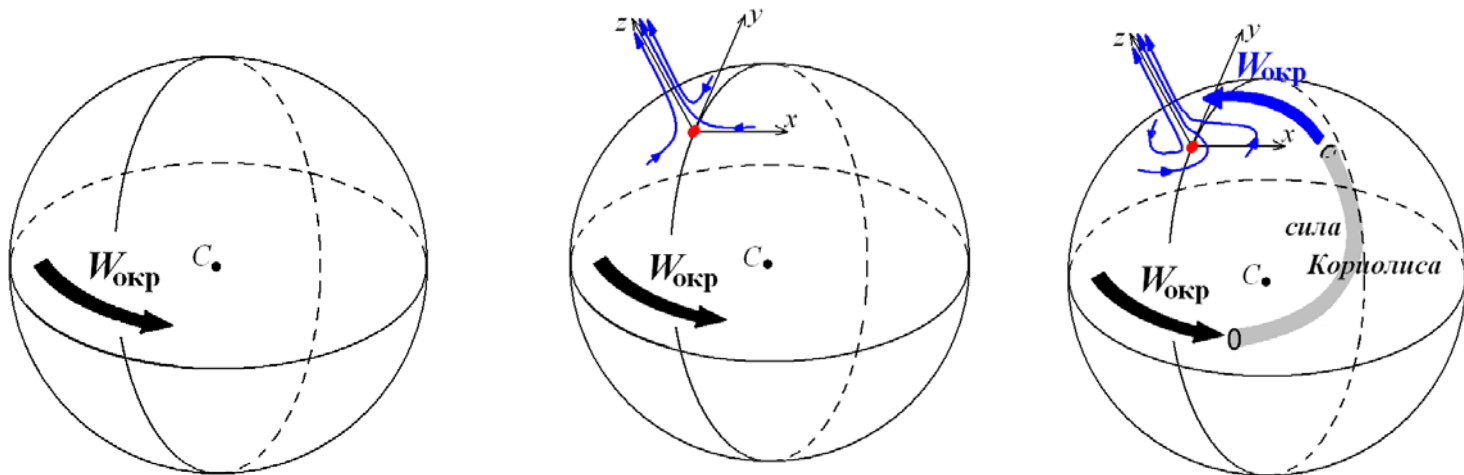


Сила Кориолиса «переводит» часть кинетической энергии вращения Земли в кинетическую энергию вращательного движения специального потока воздуха.

Установлен новый естественнонаучный факт!

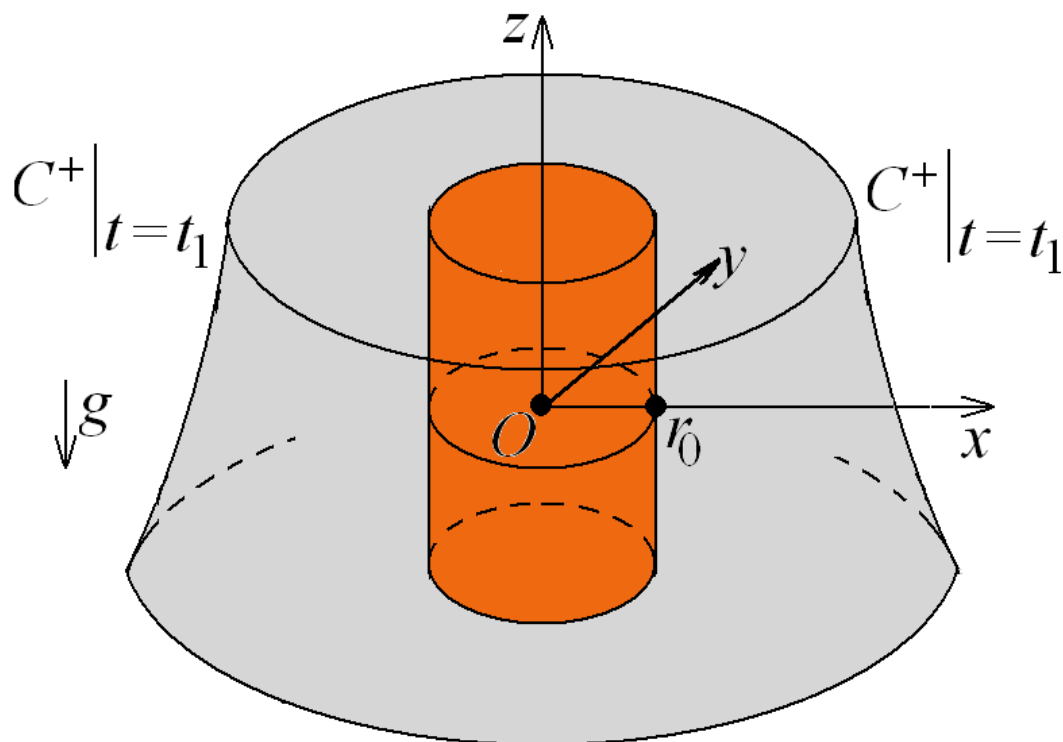
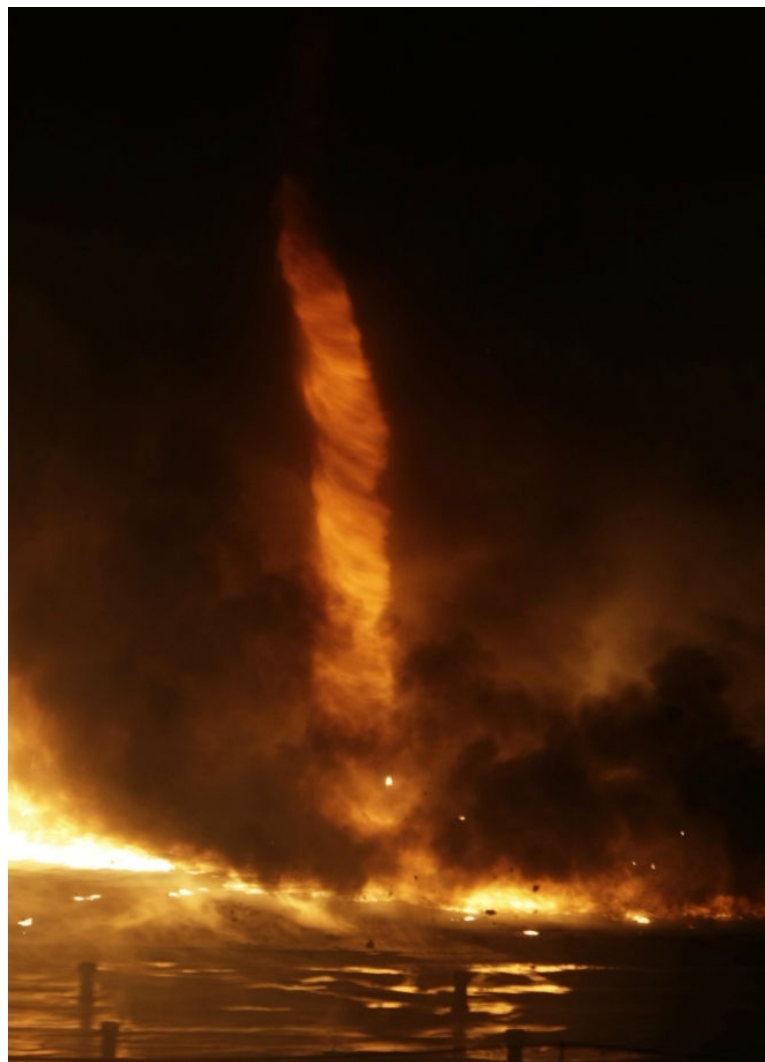
Для торнадо и для тропических циклонов
математически строго доказано:

- 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.



Влияние вращения Земли вокруг своей оси: Кориолис, Фуко, Бэр, Баутин

Задача о трехмерном нестационарном движении газа возле нагревающегося цилиндра



$$\left\{ \begin{array}{l} u_t + uu_r + \frac{v}{r}u_\varphi - \frac{v^2}{r} + wu_z + \frac{1}{(\gamma-1)}T_r = av - bw \cos \varphi, \\ v_t + uv_r + \frac{uv}{r} + \frac{v}{r}v_\varphi + wv_z + \frac{1}{(\gamma-1)}\frac{1}{r}T_\varphi = -au + bw \sin \varphi, \\ w_t + uw_r + \frac{v}{r}w_\varphi + ww_z + \frac{1}{(\gamma-1)}T_z = bu \cos \varphi - bv \sin \varphi - g, \\ T_t + uT_r + \frac{v}{r}T_\varphi + wT_z + (\gamma-1)T \left(u_r + \frac{u}{r} + \frac{v_\varphi}{r} + w_z \right) = 0. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t, r, \varphi, z)|_{C^+} = 0; \\ v(t, r, \varphi, z)|_{C^+} = 0; \\ w(t, r, \varphi, z)|_{C^+} = 0; \\ T(t, r, \varphi, z)|_{C^+} = T_0(z), \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{закрутки нет} \\ \text{условия} \\ \text{на звуковой} \\ \text{характеристике} \end{array}$$

$$T(t, r, \varphi, z)|_{r=r_0} = T_0(z) + T_*t + T^{01}(t)t^2, \quad \begin{array}{l} \text{заданный нагрев на} \\ \text{поверхности цилиндра} \end{array}$$

$T_* > 0$

Теорема 3. *Поставленная задача имеет единственное аналитическое решение в некоторой окрестности точки $M_0(t = 0, r = r_0, \varphi = \varphi_0, z = 0)$.*

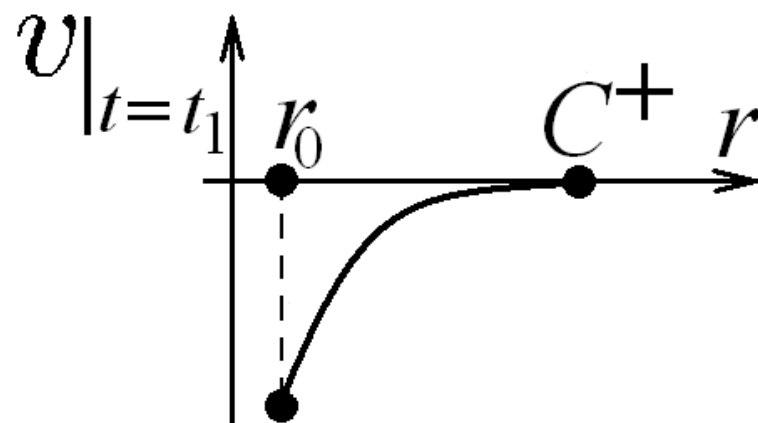
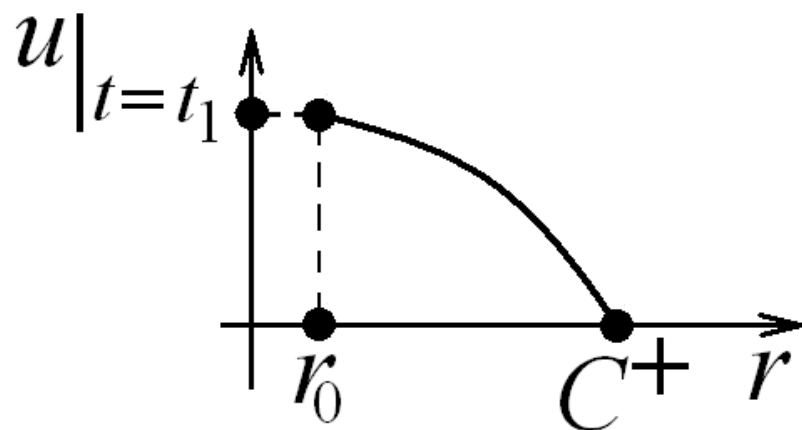
Замена переменных: поверхность звуковой C^+ -характеристики берется за новую координатную плоскость $\xi = 0$, поверхность цилиндра $r = r_0$ – за другую новую координатную плоскость $\zeta = 0$.

$$\begin{cases} \xi = r_0 + r_1(t, z) - r; \\ \zeta = r - r_0; \\ \varphi' = \varphi; \\ \chi = z, \end{cases} \quad \mathbf{U}(\xi, \zeta, \varphi', \chi) = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{U}_k(\zeta, \varphi', \chi) \frac{\xi^k}{k!}$$

В Северном полушарии

$$\left. \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} \right|_{\xi=\zeta=\chi=0} = v_2|_{\zeta=\chi=0} < 0,$$

в Южном полушарии $\left. \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} \right|_{\xi=\zeta=\chi=0} = v_2|_{\zeta=\chi=0} > 0$



В задаче нагрева вертикального цилиндра возникает закрутка газа: в отрицательном направлении для Северного полушария и в положительном направлении – для Южного полушария,
т.е. направление закрутки другое, чем у торнадо и тропического циклона.

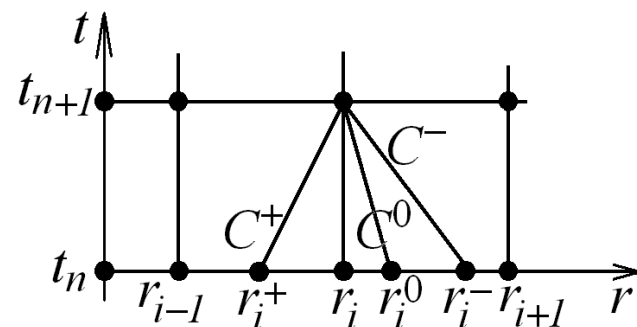
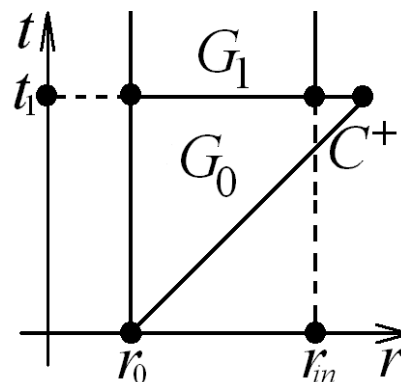
Результаты расчетов одномерных стационарных течений

Класс торнадо	$V_{\text{ветра}},$ м/с	$ V(r_0) ,$ м/с	$r_0, \text{М}$	$r_{in}, \text{М}$	$W, \text{Дж}$	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

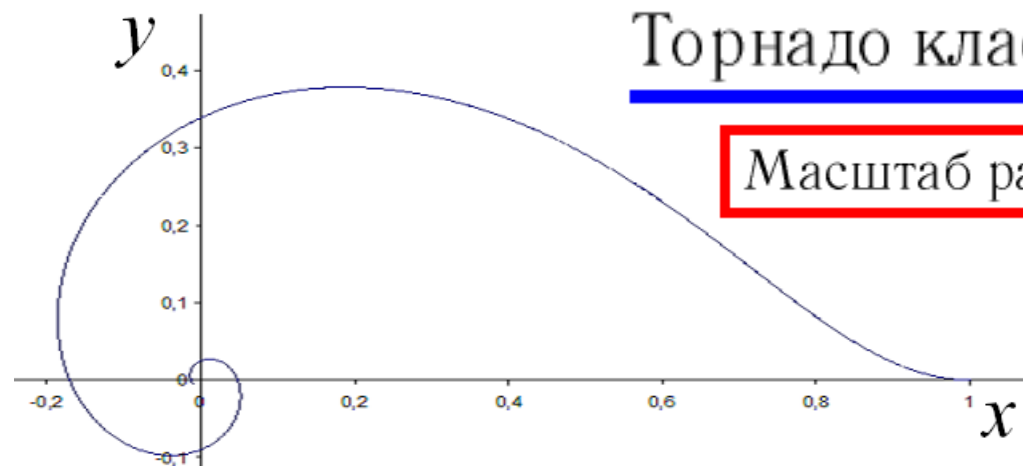
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dR}{dt} \Big|_{C^+} = f_1(r, c, u, v) \Big|_{C^+}, \\ \frac{dL}{dt} \Big|_{C^-} = f_2(r, c, u, v) \Big|_{C^-}, \\ \frac{dv}{dt} \Big|_{C^0} = f_3(r, u, v) \Big|_{C^0}, \end{array} \right.$$



Класс течения	Время выхода на стационар, ч	r_0 , М	r_{in} , КМ
$F0$	3.1	2.5	0.975
$F1$	4.6	8.0	2.618
$F2$	6.8	25.5	5.949
$F3$	8.3	80.5	12.522
$F4$	13.3	273.5	26.450
$F5$	13.6	804.5	50.890
ЦИКЛОН	27.4	3650	73.050
	расчет	природа расчет	расчет

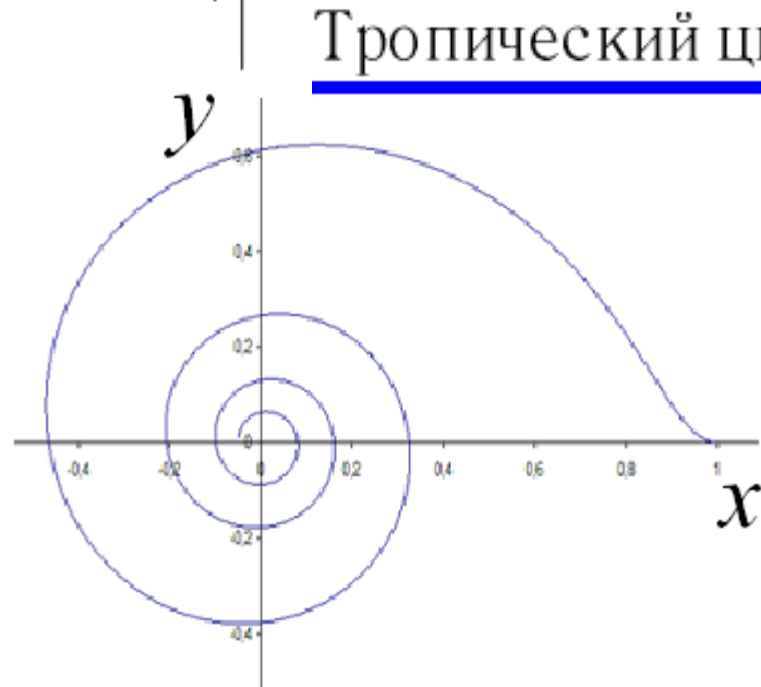
Результаты трехмерных стационарных расчетов, согласующихся с данными натурных наблюдений

Проекция отдельных траекторий



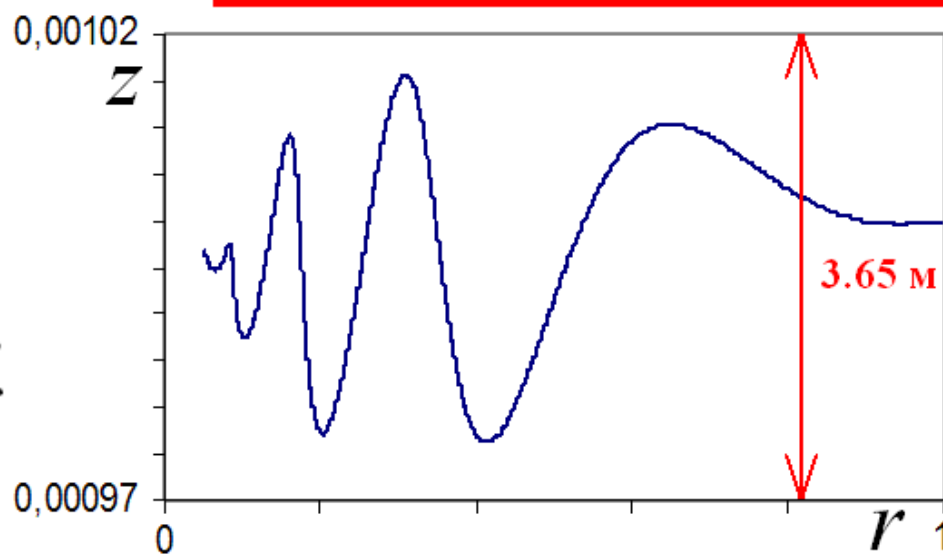
Торнадо класса F3

Масштаб расстояния: $r_{00} = 16$ км

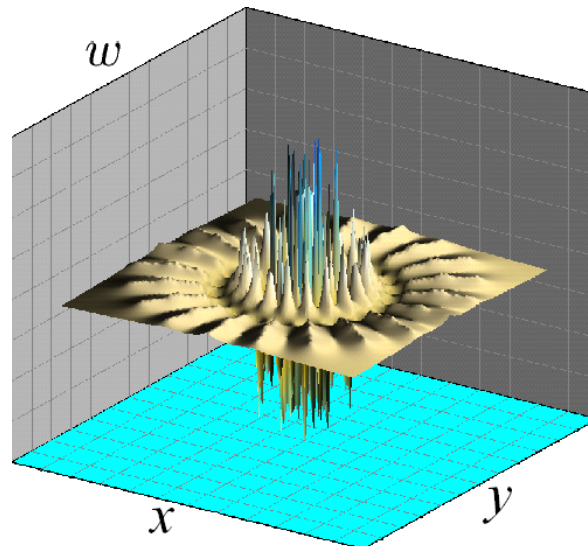
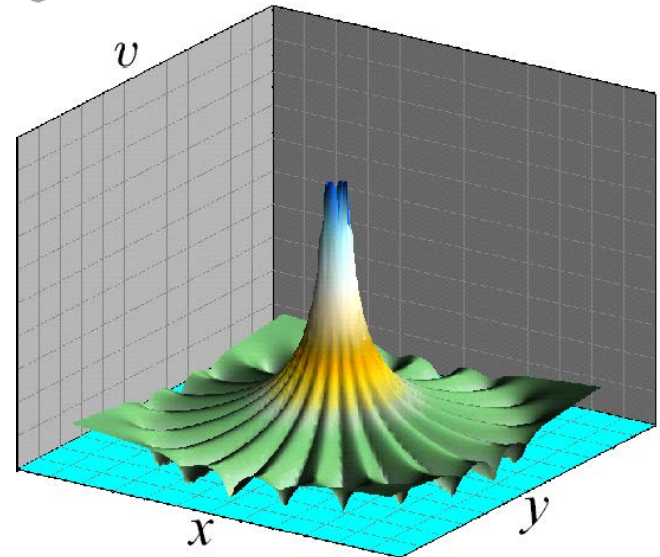
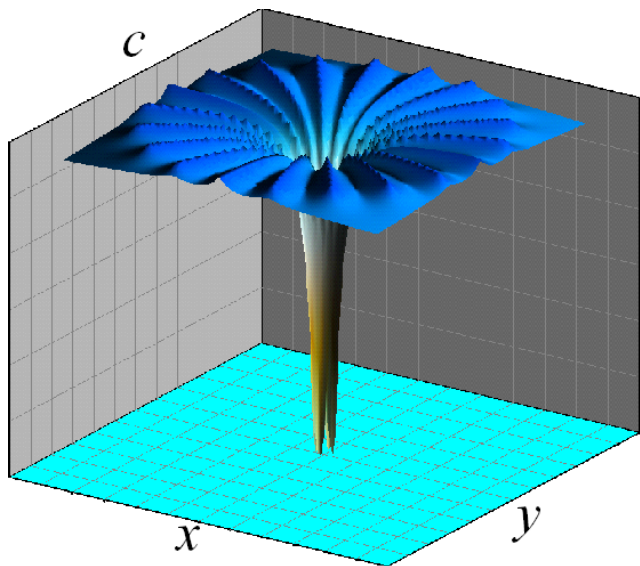


Тропический циклон

Масштаб расстояния: $r_{00} = 73$ км



Поверхности газодинамических параметров тропического циклона при заданной высоте $z_0 = 0.001$



$$\begin{aligned} r_{in} &= 73\text{KM}; \\ r_0 &= 730\text{M}; \\ z_0 &= 73\text{M}; \end{aligned}$$



Эксперимент «Торнадо во дворе Уральского государственного университета путей сообщения»

$d=2\text{ м}$

$h=5\text{ м}$

скорость вертикального
продува $1\text{ м/с} - 20\text{ м/с}$

Цели:

- 1) получить поток,
закрученный
вращением Земли;
- 2) получить значения
окружной скорости
порядка $1\text{ м/с} - 5\text{ м/с}$.





Электродвигатель
мощностью 7.5 кВт,
частота вращения 960 об./мин.
Вентилятор осевой,
вращается в отрицательном
направлении.

Вертикальная скорость в трубе
 w в диапазоне 7.5-10.0 м/с,
радиальная u — 1.8-5.0 м/с,
окружная v — 0.6-1.7 м/с,

В придонной части закрутка
воздуха в положительном
направлении.

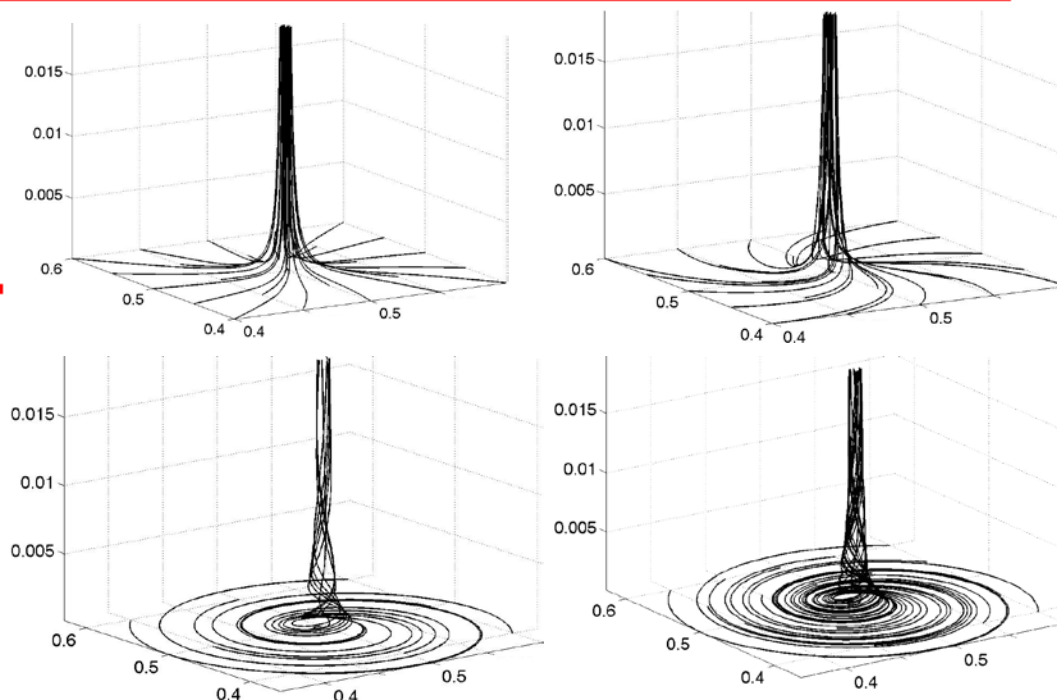
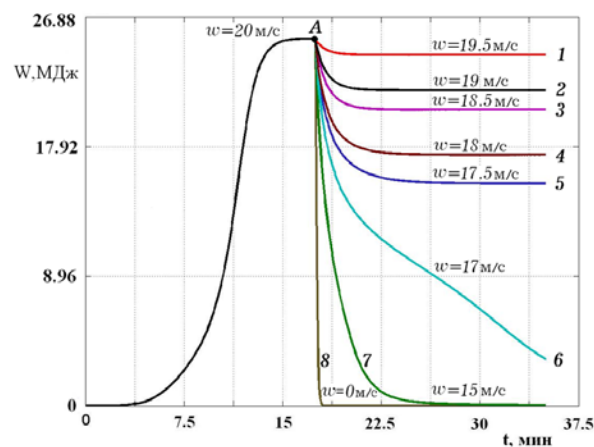
Баутин С.П., Макаров В.В. Создания потока воздуха, закрученного силой Кориолиса при использовании трубы двухметрового диаметра // Вестник УрГУПС. 2016. № 4 (32).

Практическое использование полученных результатов

1. Проект вихревого энергогенератора

Электрическая энергия из кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси.

Расчет эксперимента



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

2. Раннее выявление и уничтожение торнадо

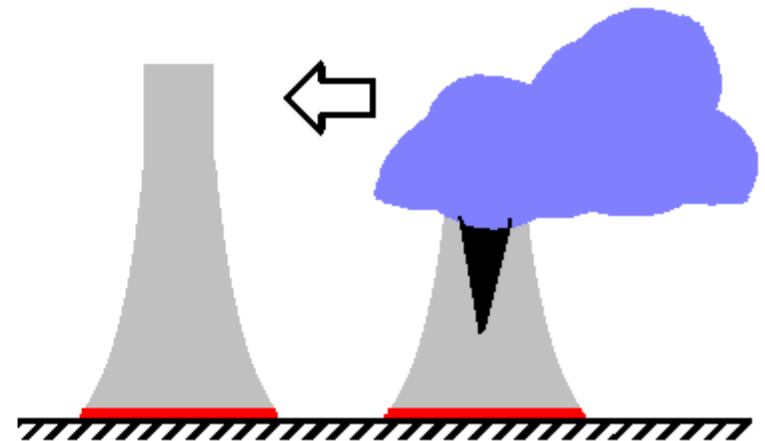
✓ Выявление тепловых пятен на ровной (водной или земляной) поверхности большой площади.



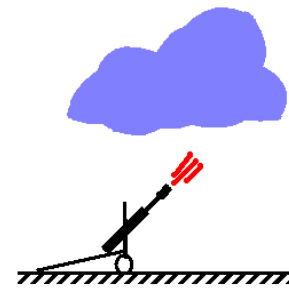
✓ Обнаружение над найденными тепловыми пятнами прозрачных для человеческого глаза восходящих потоков воздуха и "закрутку" вокруг них.



✓ Фиксация грозовых фронтов, приближающихся к восходящим потокам и играющих роль "спускового крючка" для возникновения разрушительной стадии торнадо.



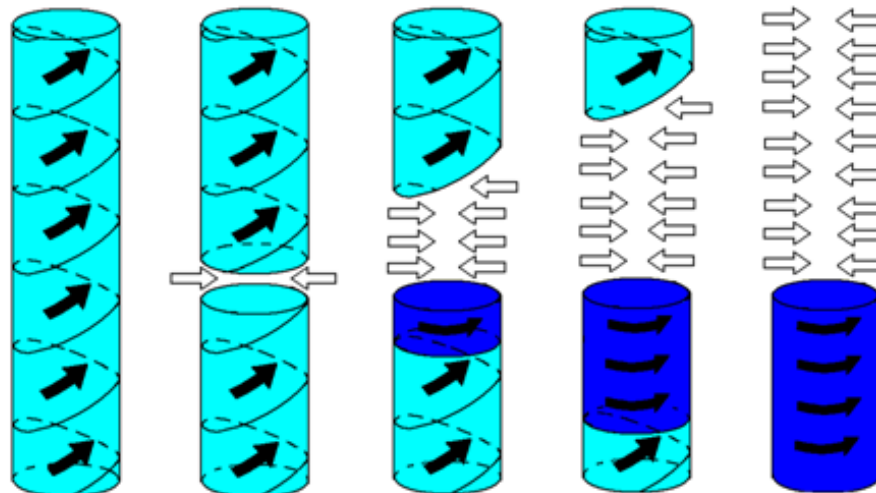
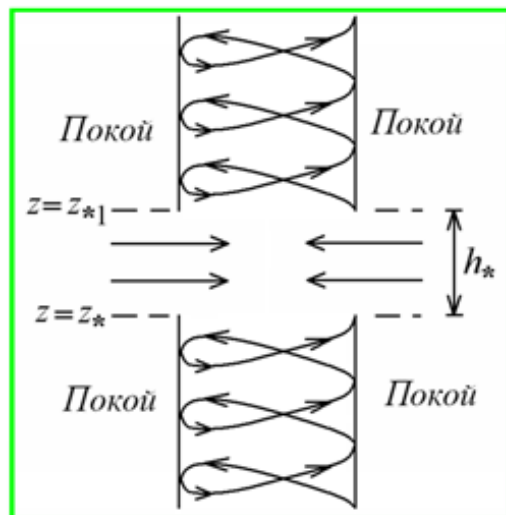
Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г.
Проблема предсказания и уничтожения
смерча // Технологии гражданской
безопасности. 2016. Том 13. № 1 (47).



3. Уничтожение тропических циклонов с разумными энергетическими затратами

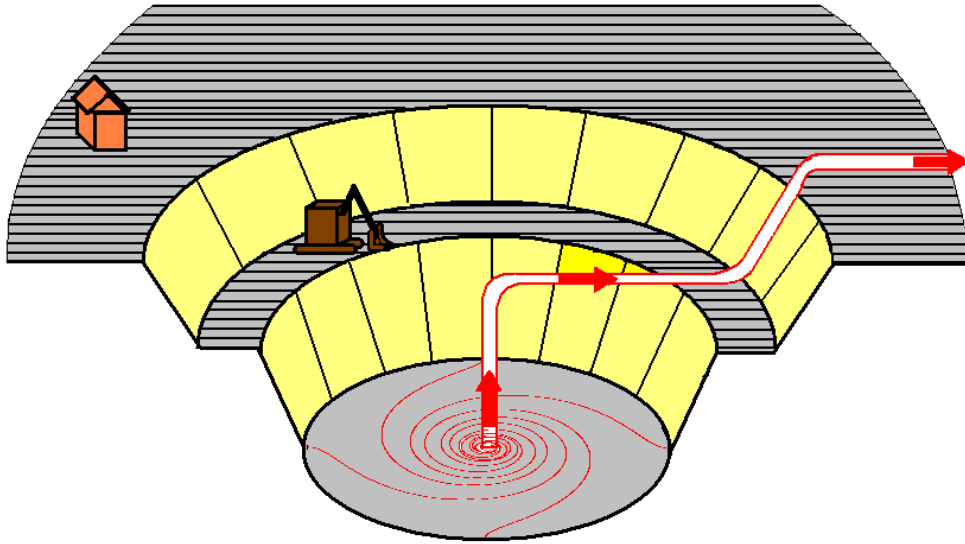
Для России стало актуальным.

Нужно решение на государственном уровне.

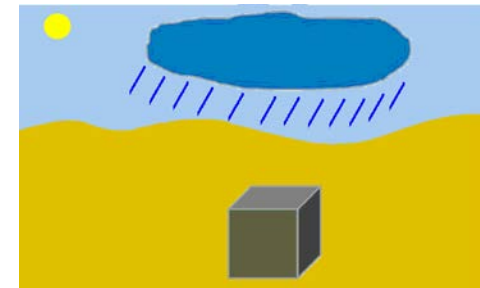
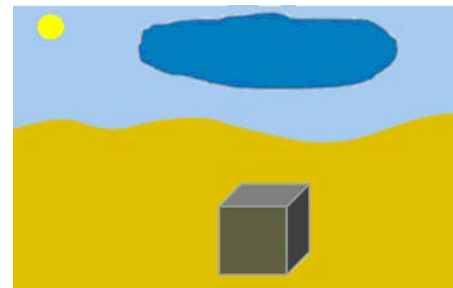
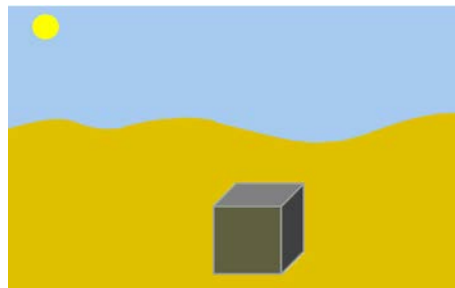


Основную работу по торможению потока
произведет внешний воздух с $w=0$.

4. Вентиляция смога: открытые горные выработки, мегаполисы



5. Вызывание дождя над заданной территорией



Заключение

1. Построена газодинамическая теория природных восходящих закрученных потоков.
2. Даны обоснованные ответы на самые главные вопросы про эти течения.
3. Установлено, что закрутка воздуха в торнадо и в тропических циклонах, а также гигантская кинетическая энергия в этих течениях определяются только вращением Земли вокруг своей оси.
4. Предложены конкретные рекомендации по практическому использованию полученных результатов.

Спасибо за внимание !

E-mail: SBautin@usurt.ru

**✓ Об одном визуальном эффекте
восходящего закрученного потока**

