

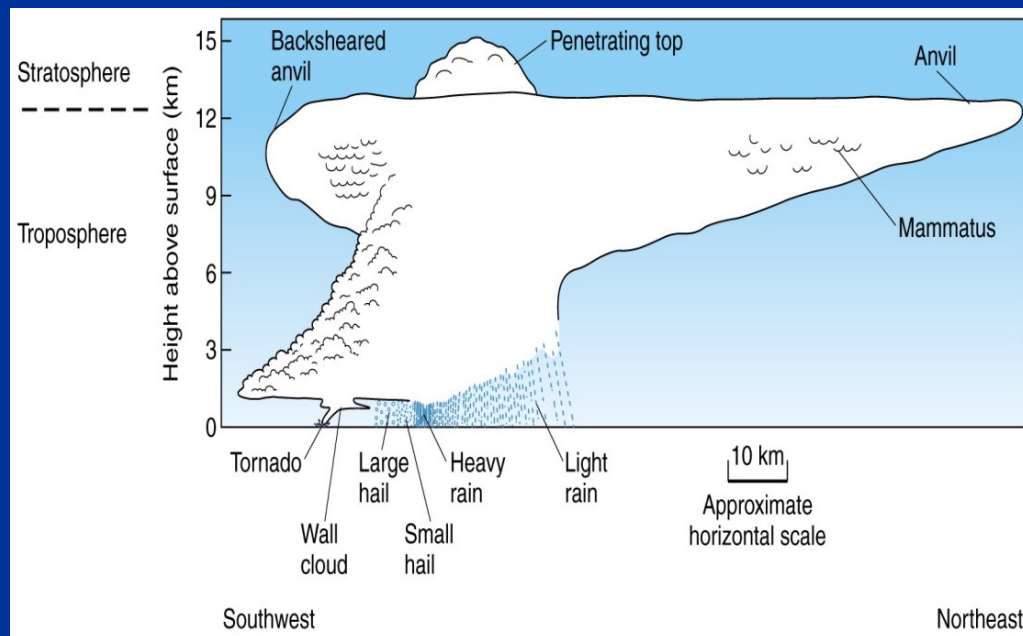


***О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ  
ФОРМИРОВАНИЯ ТОРНАДО  
ПОДОБНЫХ ВИХРЕЙ***

*Е. Гольбрайх, А. Еликашвили*  
Ben-Gurion University of the Negev, Israel

# Грозы (Thunderstorms)

- A thunderstorm — облако или скопление облаков.
- Компактная область облака, имеющая сильные вертикальные восходящие потоки, называется грозовой ячейкой.
- Обычные ячейки могут иметь диаметр в несколько км.
- Не все грозовые ячейки могут вызывать торнадо.



- Торнадо называют воронкообразными структуры до того, как они достигнут поверхности земли.
- Торнадо состоят из влажного воздуха.
- Точные процессы их формирования пока не известны.

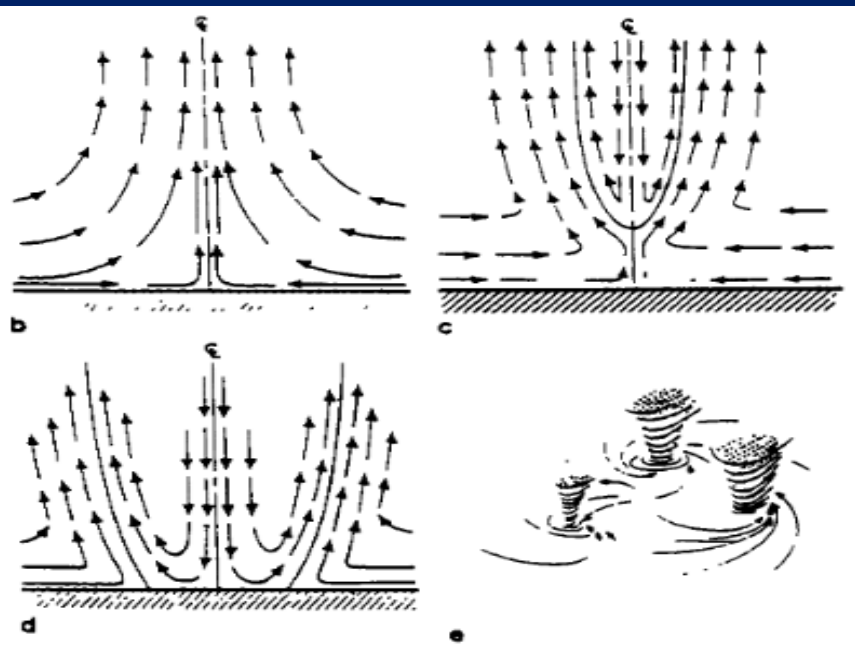


- Диаметр торнадо составляет 100–600 м (в среднем).
- Торнадо длятся от нескольких секунд до более часа, но большинство длятся менее 10–20 минут.
- Средняя длина пути  $\sim 7$  км (самый большой 470 км, длиялся 7 часов в Иллинойсе и Индиане в 1917 году).
- Размер и форма торнадо не являются мерой его силы. Иногда небольшие торнадо наносят значительный ущерб, а некоторые очень большие торнадо наносят лишь легкий ущерб.



# Структура торнадо

Davis-Jones [1986].

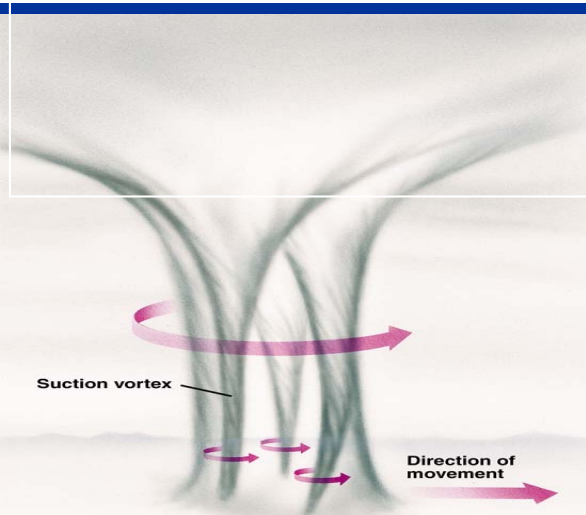


б. Одноячейстый вихрь.

с. Распад вихря над поверхностью.

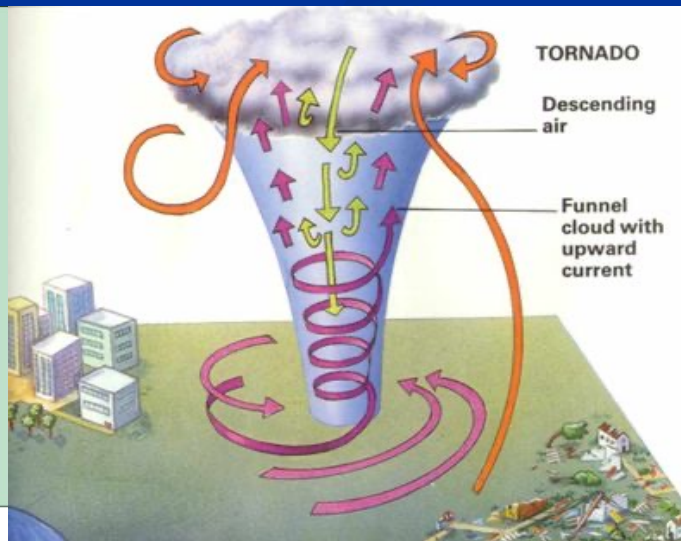
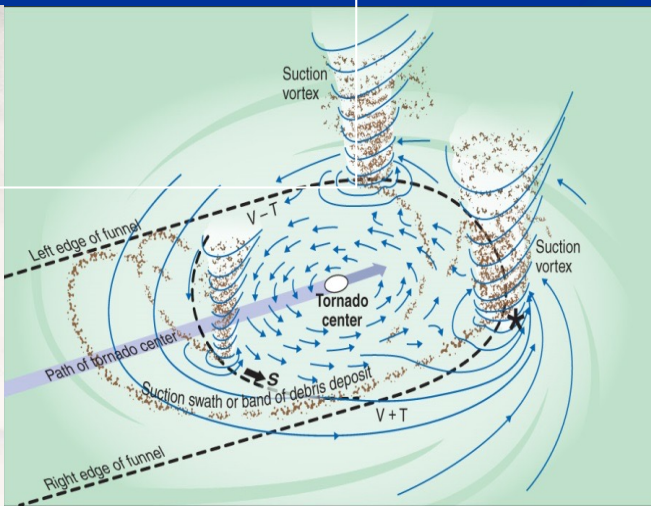
д. Двухячейстый вихрь с нисходящим потоком, проникающим к поверхности.

е. Множественные вихри, вращающиеся вокруг центра, разделяющего ячейки.



©2001 Brooks/Cole - Thomson Learning

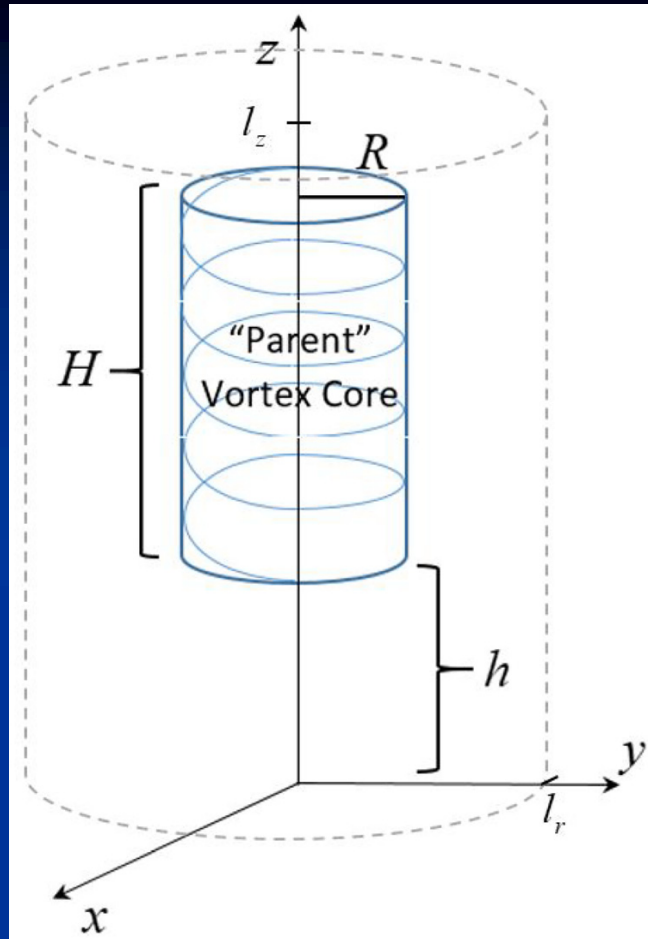
Multiple-vortex tornado



Single cell tornado

## *“ Простая “ модель торнадо*

Первоначально имеется область вращающегося воздуха с заданным профилем скорости вращения, некоторым характерным радиусом и высотой, расположенная на некотором расстоянии от земли (локальный первичный вихрь в суперячейке).



Система координат  $(r, \varphi, z)$ .

Вращение осесимметрично.

$u$  – радиальная скорость

$v$  – тангенциальная скорость

$w$  – вертикальная скорость

$$T(r, l_z, 0) = 1 - \delta l_z$$

$$T(r, 0, 0) = 1$$

$$T(l_r, z, 0) = 1 - \delta z$$

$$\frac{\partial}{\partial r} T(0, z, 0) = 0$$

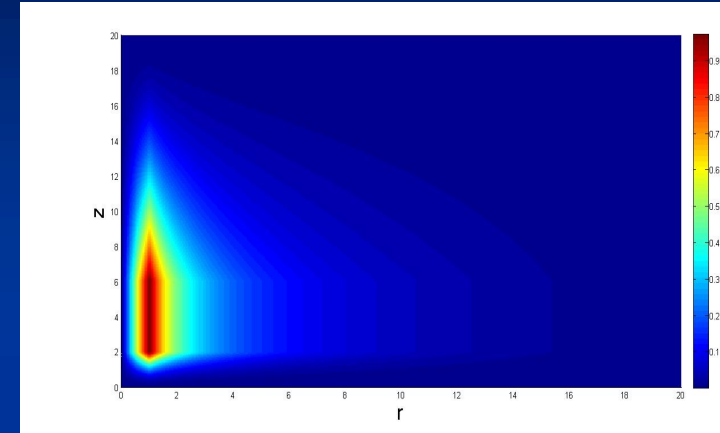
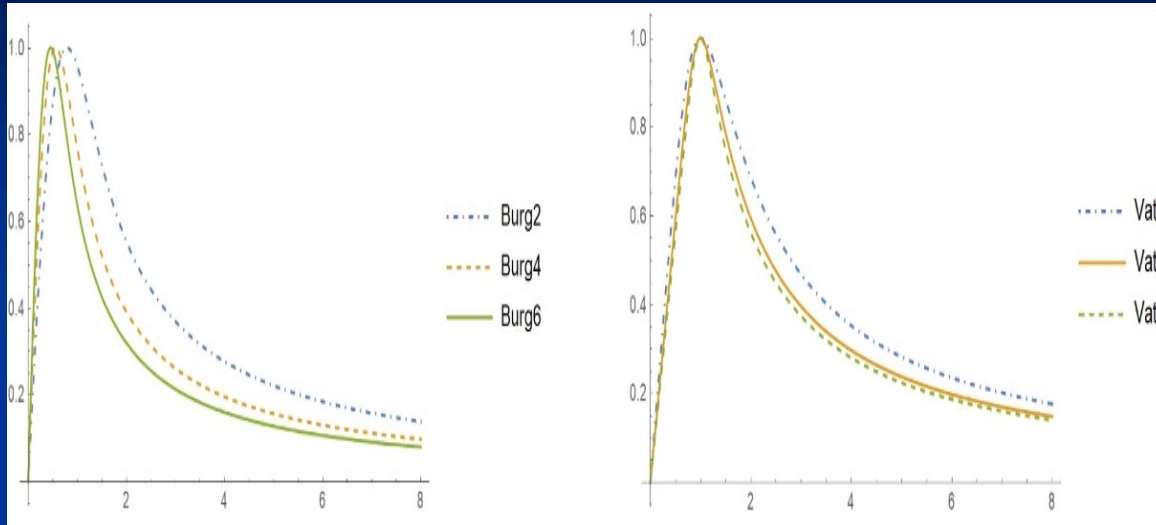
$A$  – азимутальная компонента внешней силы.

$B$  – сила плавучести.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial r} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + \frac{u^2 - v^2}{r} \\ = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} \right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial r} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} + \frac{2uv}{r} \\ = \frac{1}{Re} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \frac{v}{r^2} \right) + A(r, z, t), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial r} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} + \frac{uw}{r} \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g + B(r, z, t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial r} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} + \frac{uT}{r} \\ = \frac{1}{RePr} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

# Начальный профиль



Профиль Бюргерса <sup>(a)</sup>

Профиль Ватистаса <sup>(b)</sup>

$$v(r, z, 0) = \begin{cases} \frac{\alpha(1-e^{-k_1 r^2})}{r} \cdot \frac{z^2}{h^2}, \\ \frac{\alpha(1-e^{-k_1 r^2})}{r}, \\ \frac{\alpha(1-e^{-k_1 r^2})}{r} \cdot \frac{(z-l_z)^2}{(h+H-l_z)^2}, \end{cases}$$

$$v(r, z, 0) = \begin{cases} \frac{\beta r}{(1+r^{2k_2})^{1/k_2}} \cdot \frac{z^2}{h^2} \\ \frac{\beta r}{(1+r^{2k_2})^{1/k_2}} \\ \frac{\beta r}{(1+r^{2k_2})^{1/k_2}} \cdot \frac{(z-l_z)^2}{(h+H-l_z)^2} \end{cases}$$

Профиль Ранкина возникает при  $k_2 \rightarrow \infty$

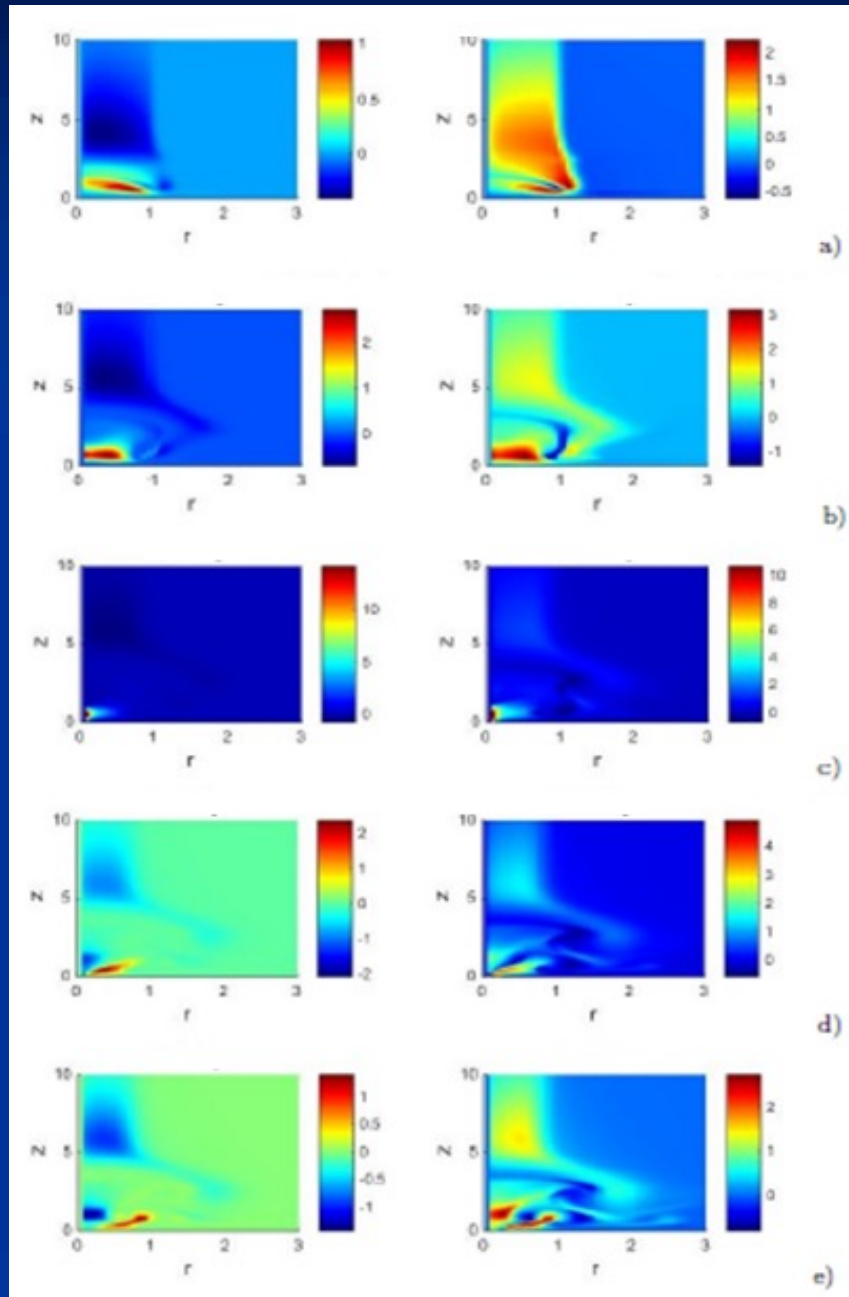
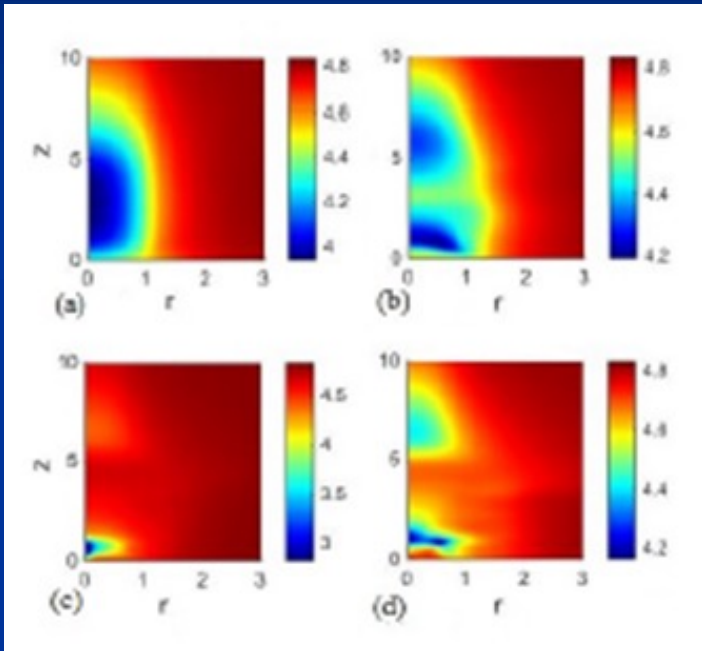


# Эволюция исходной завихренности (нет сил)

Helicity

Vorticity

Давление



$h_{in} = 0.5$ .

$t = :$

a) 2.5;

b) 7.5;

c) 11.25;

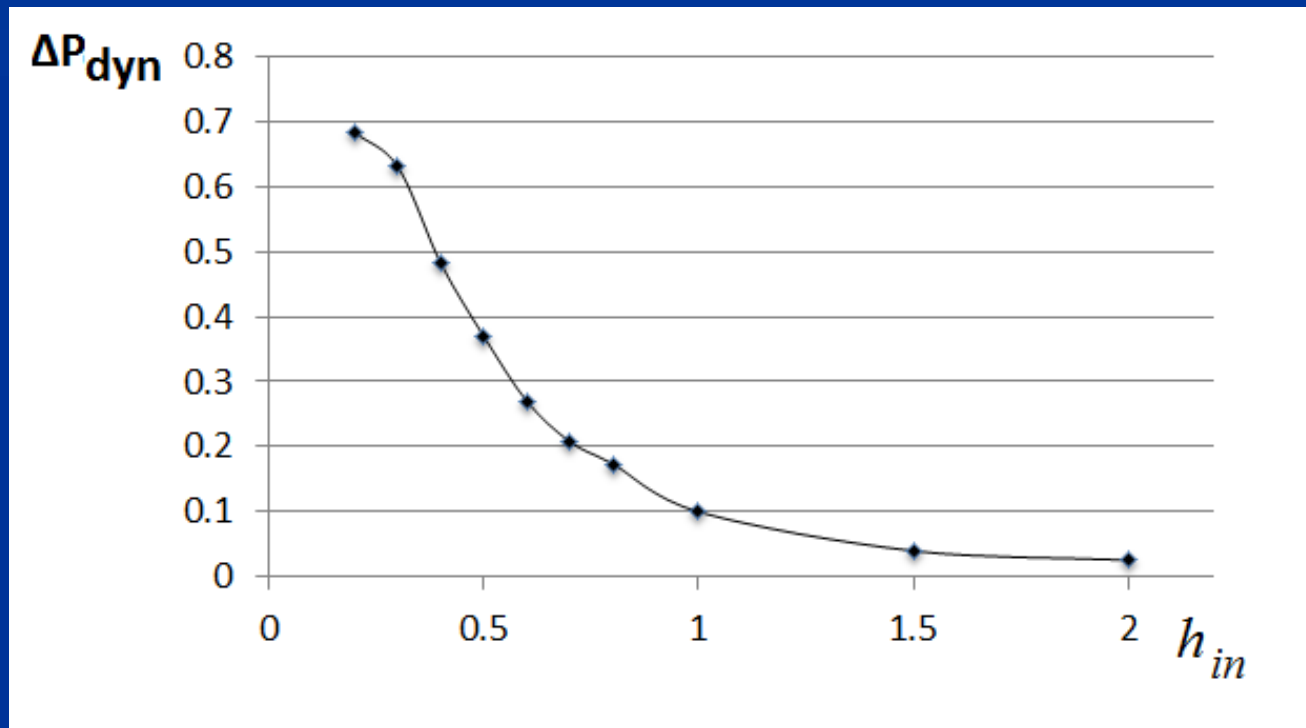
d) 12.5;

e) 13.75;



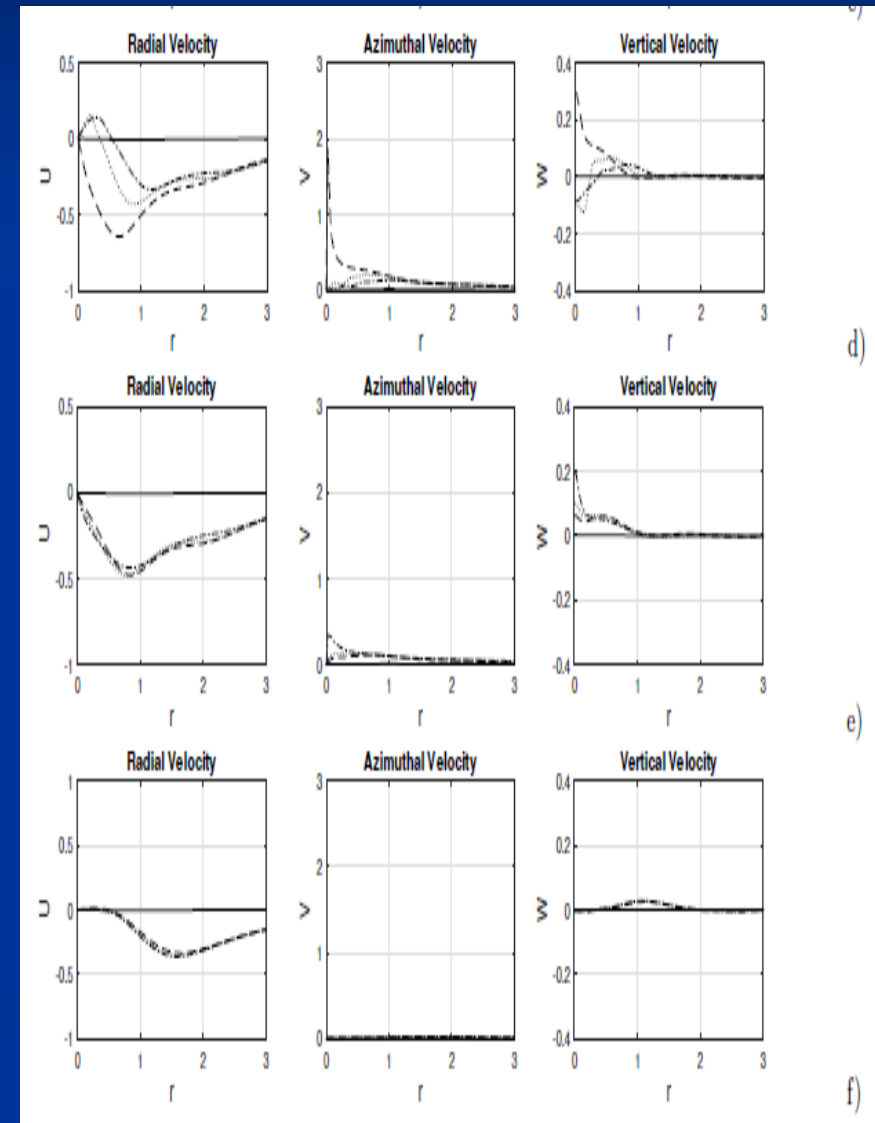
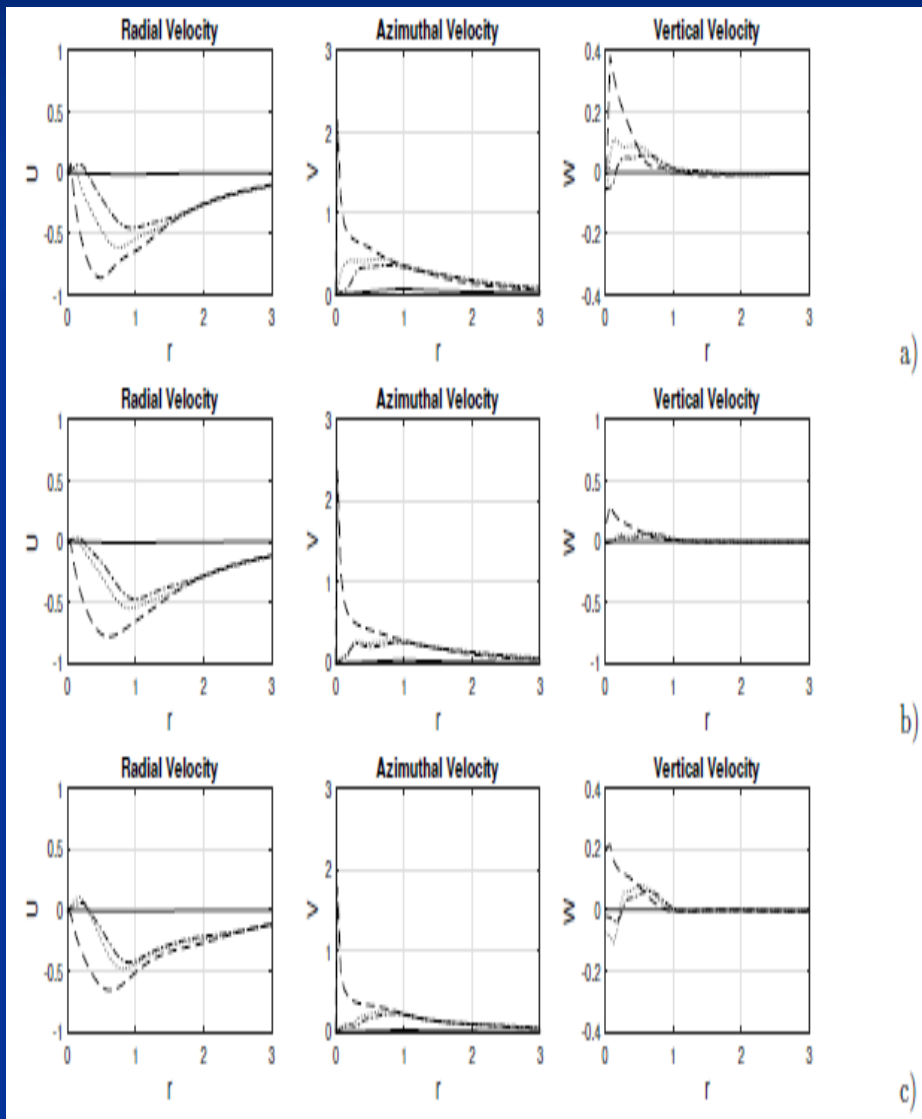
# Зависимость $\Delta P_{dyn}$ от $h_{in}$

$$\Delta P_{dyn} = 0.5(v_{rup}^2 - v_{rdown}^2)$$

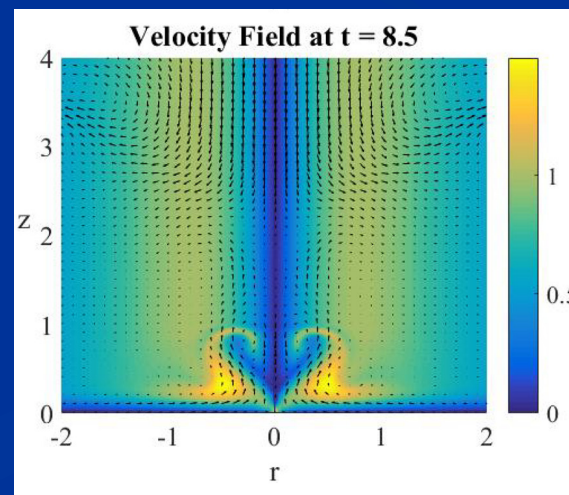
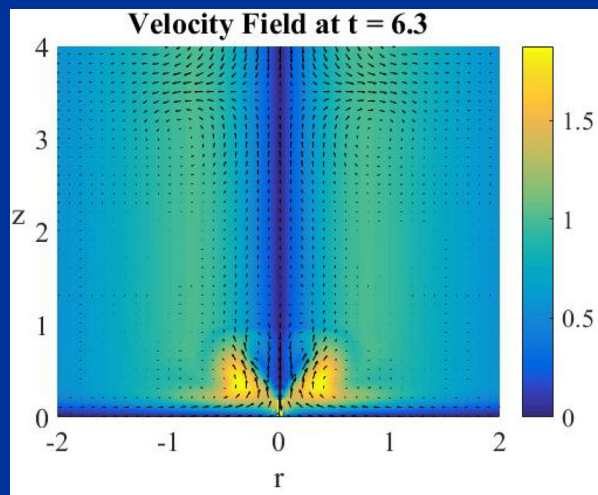
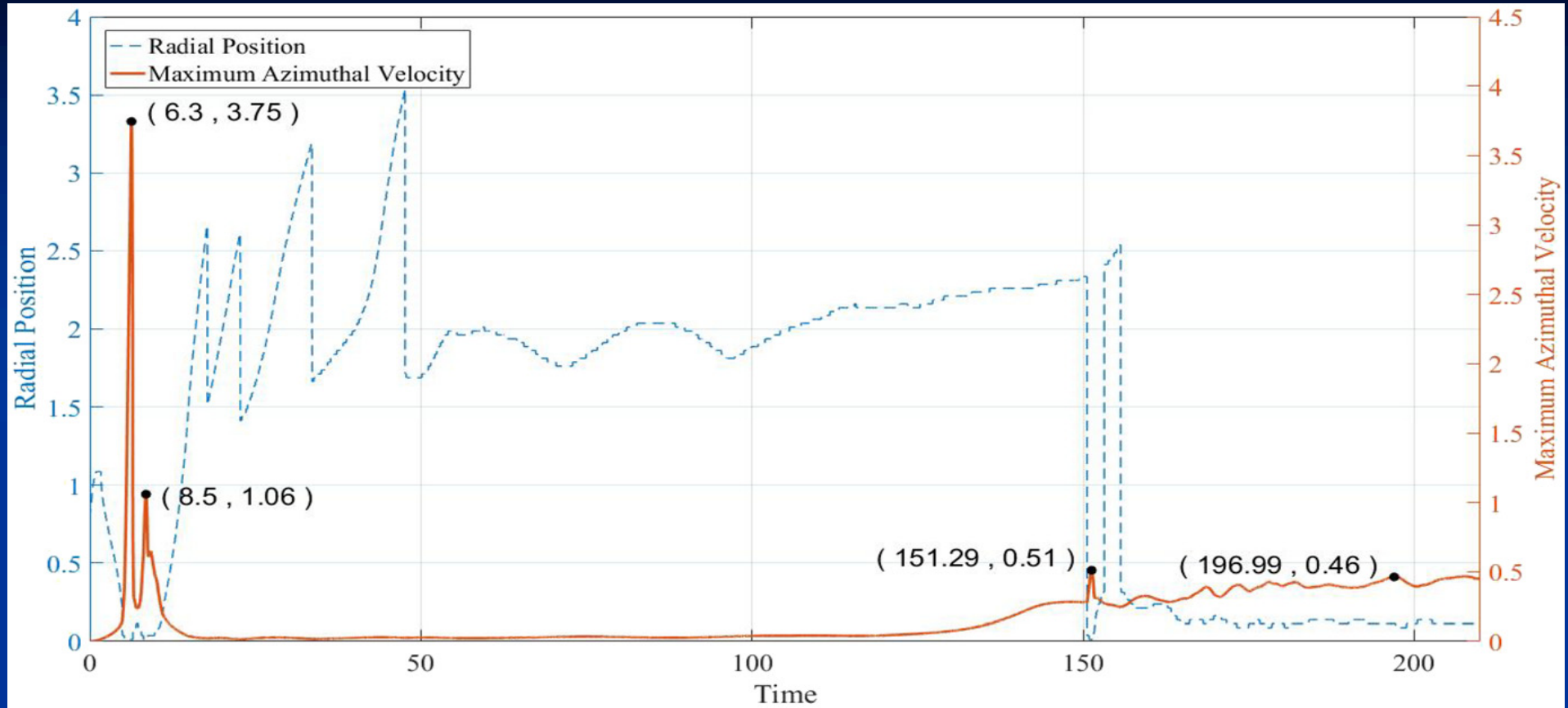


# Профили компонент скорости на $h=0.1$ для различных $h_{in}$

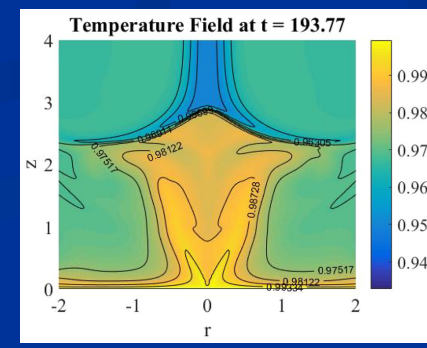
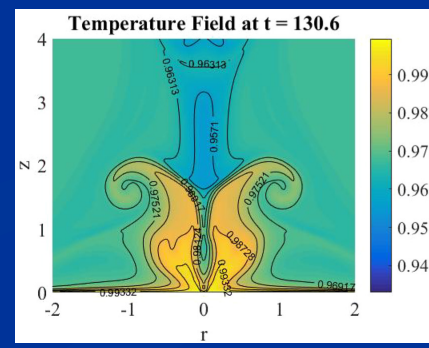
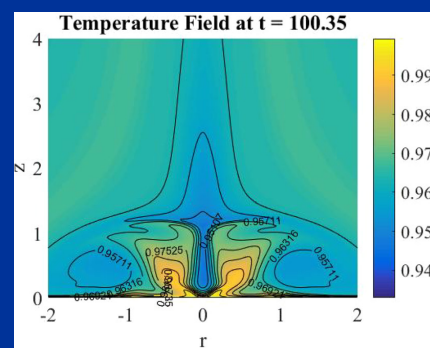
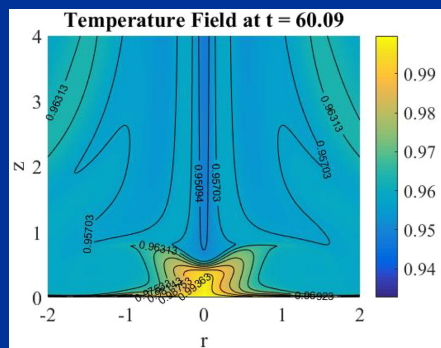
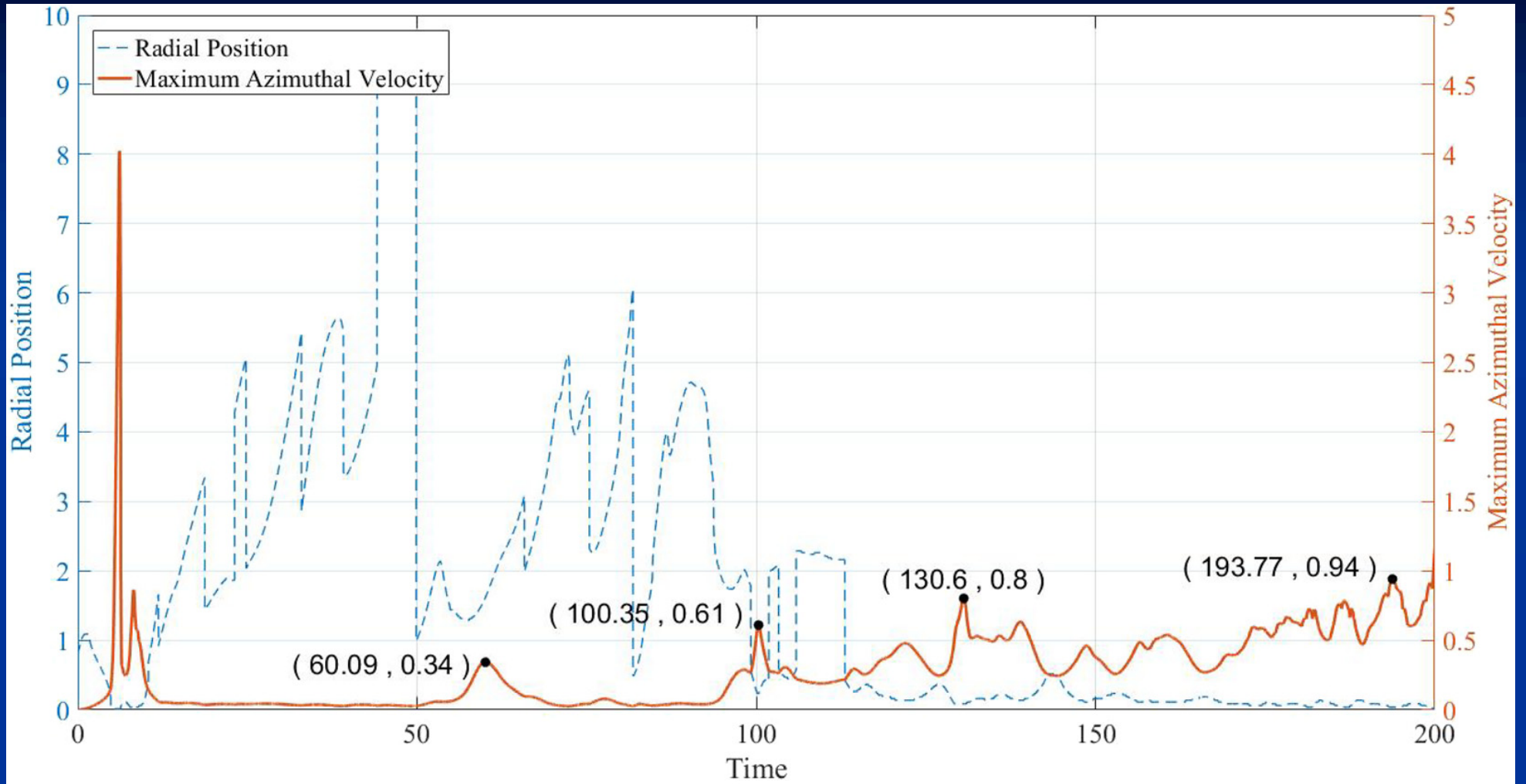
$h_{in}$ : a-0.3; b-0.4; c-0.5; d-0.6; e-0.8; f= 1.



# Эволюция исходной завихренности ( $\delta = 0$ )

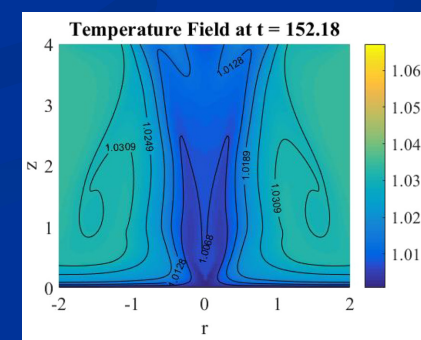
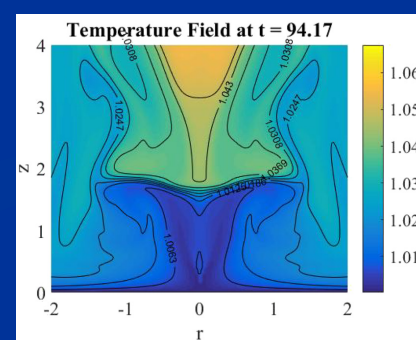
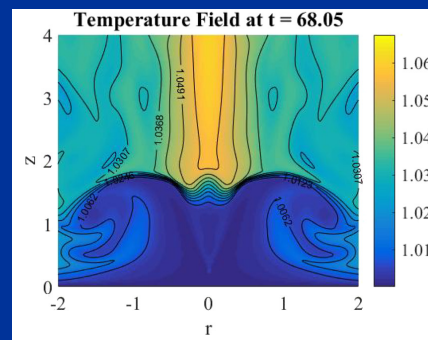
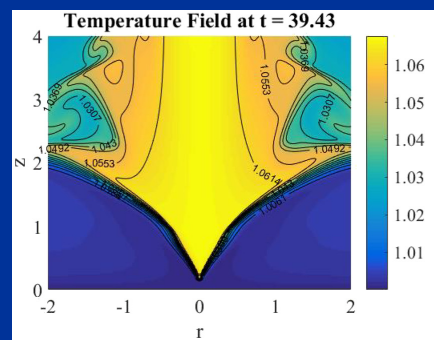
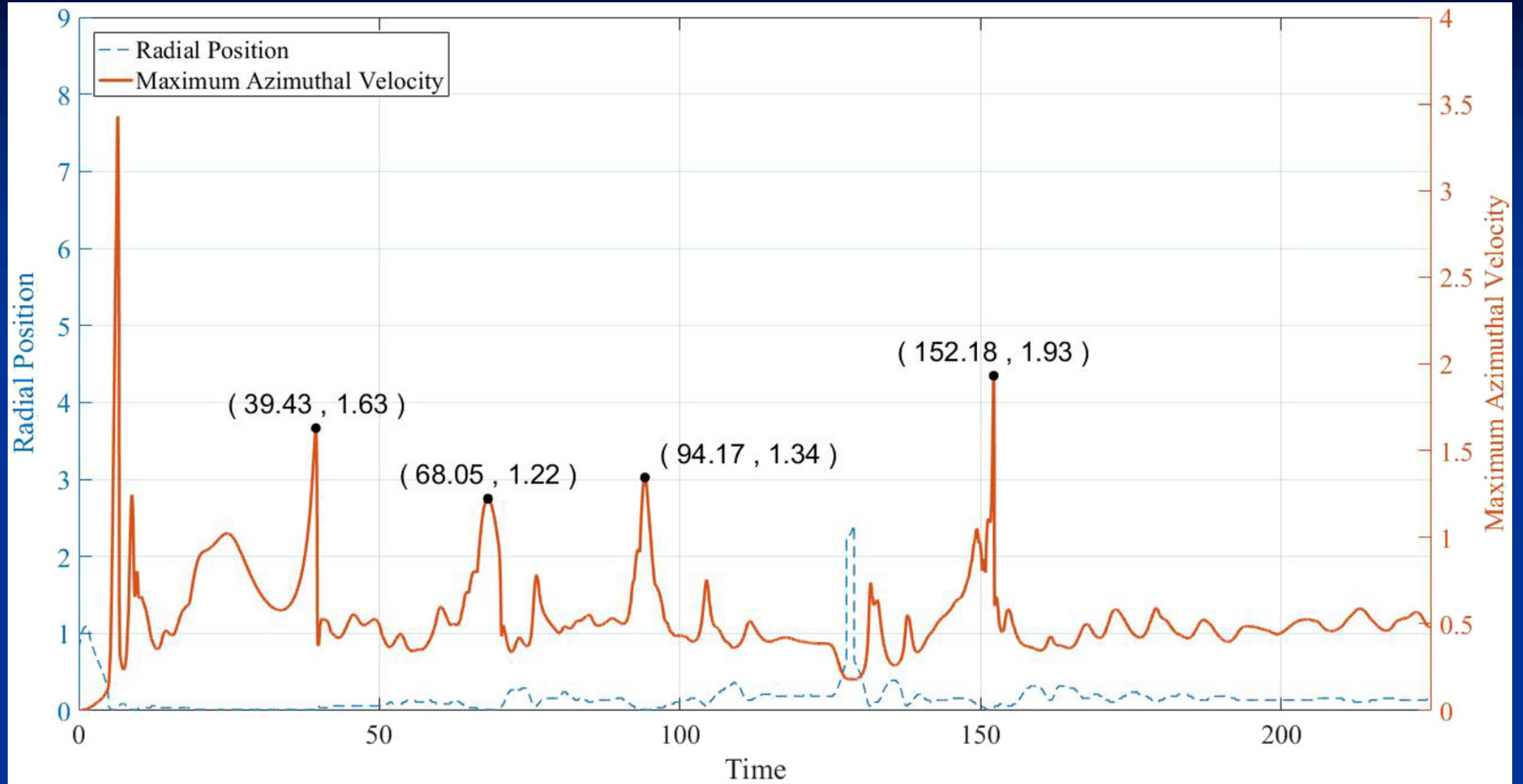


# Эволюция исходной завихренности ( $\delta = 0.007$ )





# Эволюция исходной завихренности ( $\delta = -0.007$ )



# Заключение

- В процессе эволюции исходного вихря образуются два вихря, расположенных друг над другом. Нижний вихрь может опускаться по высоте и достигать поверхности.
- Эволюция поля динамического давления приводит к сжатию вихря с сохранением углового момента.
- Если начальная высота исходного вихря больше  $(0.7 - 0.8)R$ , то завихренность на поверхности отсутствует.
- В присутствии внешних сил, формирование сильной завихренности вблизи поверхности на малых временах определяется ее дрейфом вниз к поверхности. При этом, наличие сил не играет заметной роли.
- Влияние внешней силы, становится заметным на относительно больших временах.
- Влияние поля температуры на завихренность зависит от значения градиента температуры окружающей среды. Наибольшее влияние на интенсивность завихренности вблизи поверхности происходит в условиях устойчивой стратификации.
- Рассмотренный подход может удовлетворительно воспроизводить некоторые наблюдаемые характеристики торнадо-подобных вихрей в реальных условиях.