



Москва, 17 ноября 2016

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ СПИРАЛЬНОСТИ В ТРОПИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Г.В. Левина, Н.Н. Зольникова, Л.А. Михайловская

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

levina@iki.rssi.ru



СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА

1. Мотивация исследований.

- Спиральность поля скорости
- Гипотеза о турбулентном вихревом динамо

2. Новый сценарий образования тропических циклонов (ТЦ) – – самоорганизация конвективных процессов.

- Вихревые горячие башни (Vortical Hot Towers - VHTs)

3. RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) почти-облачно-разрешающее моделирование ТЦ:

- генерация завихренности и спиральности на масштабах облачной конвекции,
- роль VHTs в формировании ТЦ.

ВЫВОДЫ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 16-05-00551-а.



Статьи, тезисы, презентации :

https://www.researchgate.net/profile/Galina_Levina

<https://iki-rssi.academia.edu/GalinaLevina>



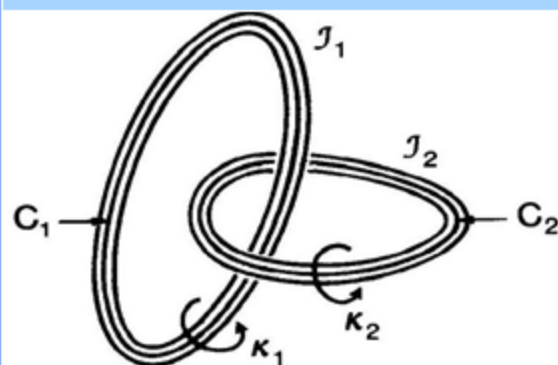
СПИРАЛЬНОСТЬ ПОЛЯ СКОРОСТИ

$$H = \int \vec{V} \cdot \text{curl} \vec{V} d\vec{r}$$

Moffatt, 1969, JFM

**$H \neq 0$ – нарушение зеркальной симметрии турбулентности
Возможность крупномасштабной неустойчивости**

From Moffatt and Tsinober, 1992



- характеризует структуру векторного поля скорости, топологический инвариант, **измеряющий степень зацепленности вихревых линий и отклонения от зеркальной симметрии;**
- **невязкий интеграл движения в баротропных жидкостях,** существование второго квадратичного интеграла движения (помимо энергии) придает спиральным структурам большую устойчивость относительно диссипации, они становятся более долгоживущими; Lilly, 1986, JAS
- **знак спиральности определяет преобладание левовинтовых или правовинтовых движений в рассматриваемом объеме,**
- **$H \neq 0$ способствует переносу энергии из мелких масштабов в крупные,**

Pouquet et al., 2010, PoF; Biferale et al., 2012, PhysRevLett

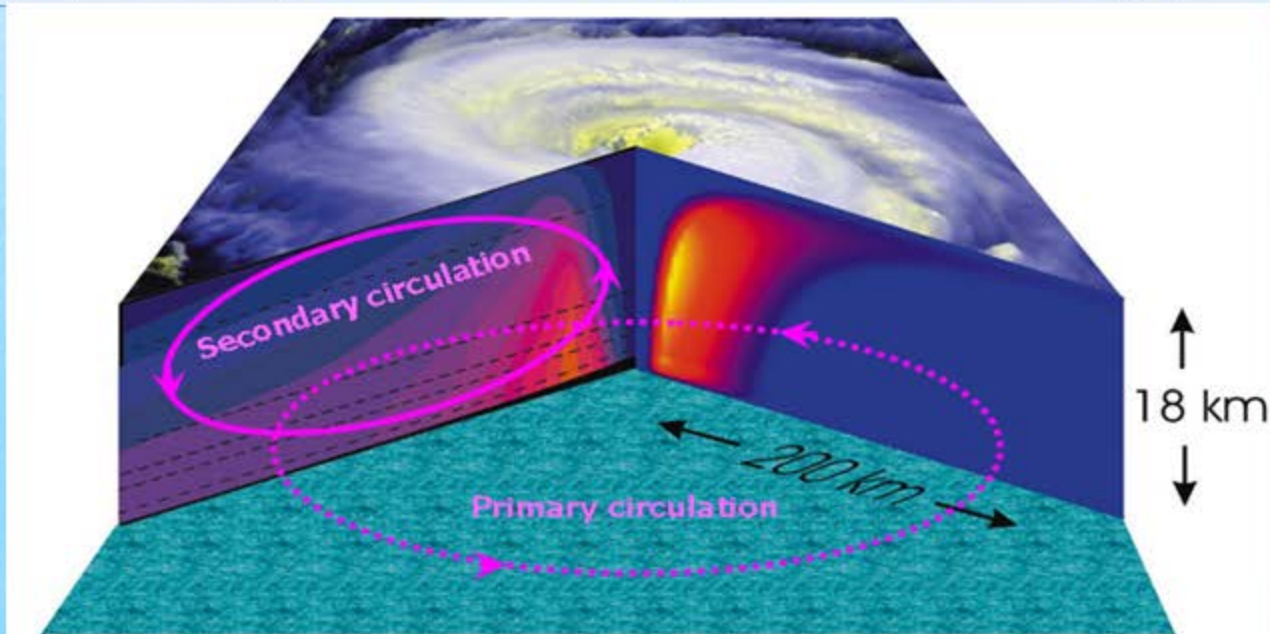


ГИПОТЕЗА О ТУРБУЛЕНТНОМ ВИХРЕВОМ ДИНАМО

Механизм усиления крупномасштабных вихревых возмущений в атмосфере –
Моисеев, Руткевич, Сагдеев, Тур, Хоменко, Шукуров, Яновский (1983-1988)

Во вращающейся неоднородной атмосфере влажноконвективная турбулентность становится спиральной, подавляется поток энергии к масштабам диссипации и возникает возможность крупномасштабной неустойчивости

Первый признак гипотетической неустойчивости – зацепление первичной (тангенциальной) и вторичной (конвективной) циркуляции на масштабах системы, и возникающая в результате положительная обратная связь – формирующийся вихрь становится энергетически самоподдерживающимся



A cutaway of composite tropical cyclone is borrowed from (Emanuel, 2003)



A VERTICAL HOT TOWER (VHT) ROUTE TO TROPICAL CYCLOGENESIS

Новый сценарий тропического циклогенеза, основанный на самоорганизации конвективных процессов

MO6: Montgomery et al., 2006, *J. Atmos. Sci.*, v. 63, pp. 355–386

Показано, как начальный мезомасштабный конвективный вихрь (MCV) в средней тропосфере может трансформироваться в сконцентрированный у поверхности вихрь тропической депрессии (TD).

Термомеханика тропического циклогенеза исследовалась на основе 3D негидростатической облачной модели с помощью RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) с разрешением 2-3 км по горизонтали:

Nested Grids	3
Number of horiz. grid pts. for grids 1/2/3	a) 40/62/92 b) 60/90/137
Vertical levels	26
Horiz. Coordinate	Cartesian
Horiz. grid incr. for grids 1/2/3	a) 36 km/9 km/3 km b) 24 km/6 km/2 km
Vertical grid increment	400 m at the surface
Vertical grid stretch ratio	1.065
Grid top	22.6 km
Grid time step for 1/2/3	30s/10s/5s
Center latitude	15 degrees
Center longitude	-40 degrees

Cape Verde Islands

Роль спиральности не исследовалась

Самоорганизация вихревой конвекции наблюдалась как:

укрупнение вихревых структур от размеров отдельных вращающихся кучевых облаков;

слияние структур и образованию более крупных вихрей, усиливающее циркуляцию на масштабах системы;

концентрация абсолютного углового момента на масштабах циркуляции всей вихревой системы.

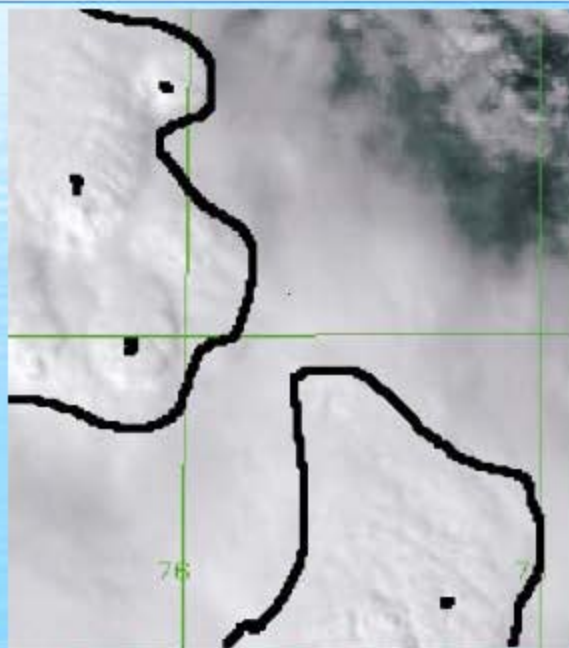


НОВЫЙ СЦЕНАРИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ: THE MAIN ACTORS - Vortical Hot Towers (VHTs)

Riehl and Malkus (1958): впервые указали на важную роль горячих башен (**HOT TOWERS**) – небольших по горизонтальным размерам, но интенсивных кучево-дождевых конвективных облаков, достигающих тропопаузы 15-16 км, в вертикальном переносе тепла и массы в тропической атмосфере Земли.

Термин «горячие» связан с интенсивным выделением скрытого тепла внутри этих структур при фазовых переходах влаги пар-вода-лед.

Позже были обнаружены **вращающиеся** горячие башни и названы «вихревыми горячими башнями» – VHTs (Hendricks et al., 2004).



VHTs in Tropical Storm Gustav (2002)
From Hendricks et al., 2004.

VHTs – вращающиеся конвективные облака

~ 1 час – время жизни,

10-30 км – горизонтальный размер,

14-16 км – вертикальный размер наиболее интенсивных башен, пронизывающих всю тропосферу;

до 25-30 м/с – скорость восходящих потоков,

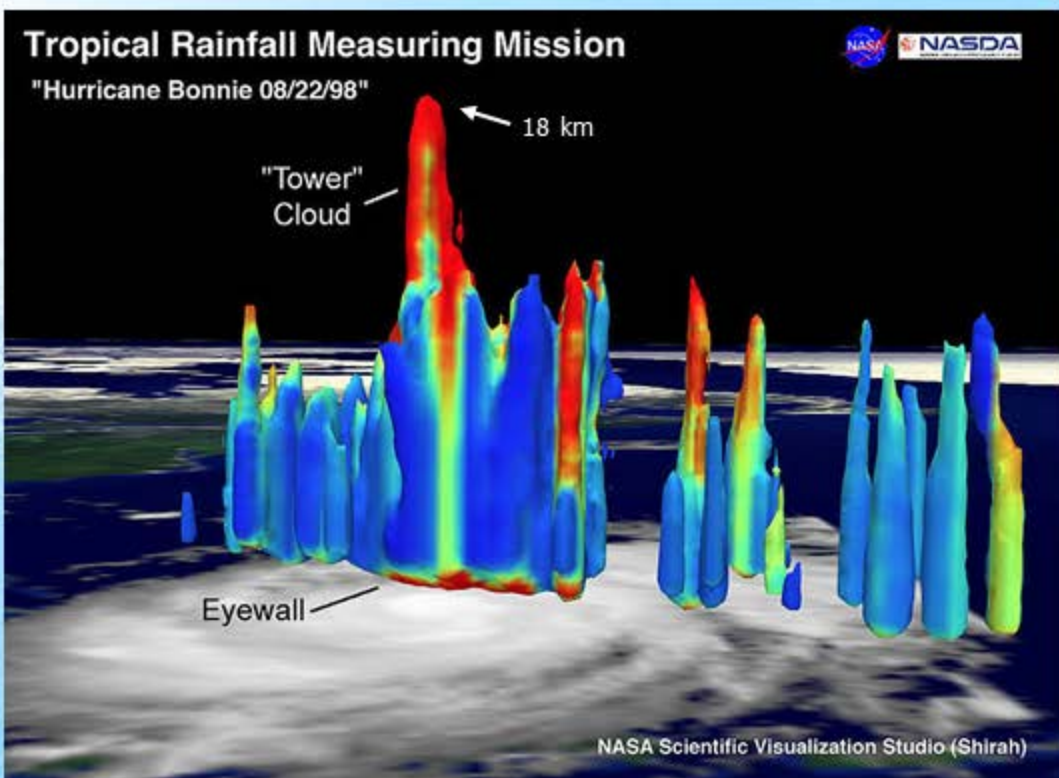
до 10^{-3} - 10^{-2} с⁻¹ – относительная вертикальная завихренность (на 1-2 порядка превышает планетарную завихренность)



НОВЫЙ СЦЕНАРИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ: THE MAIN ACTORS - Vortical Hot Towers (VHTs)

Dunkerton, Montgomery, Wang. *Atmos. Chem. Phys.* 2009, N 9, 5587-5646; Glossary, p.5640:

Vortical hot towers: Deep moist convective clouds that rotate as an entity and/or contain updrafts that rotate in helical fashion (as in rotating Rayleigh-Bénard convection) ...

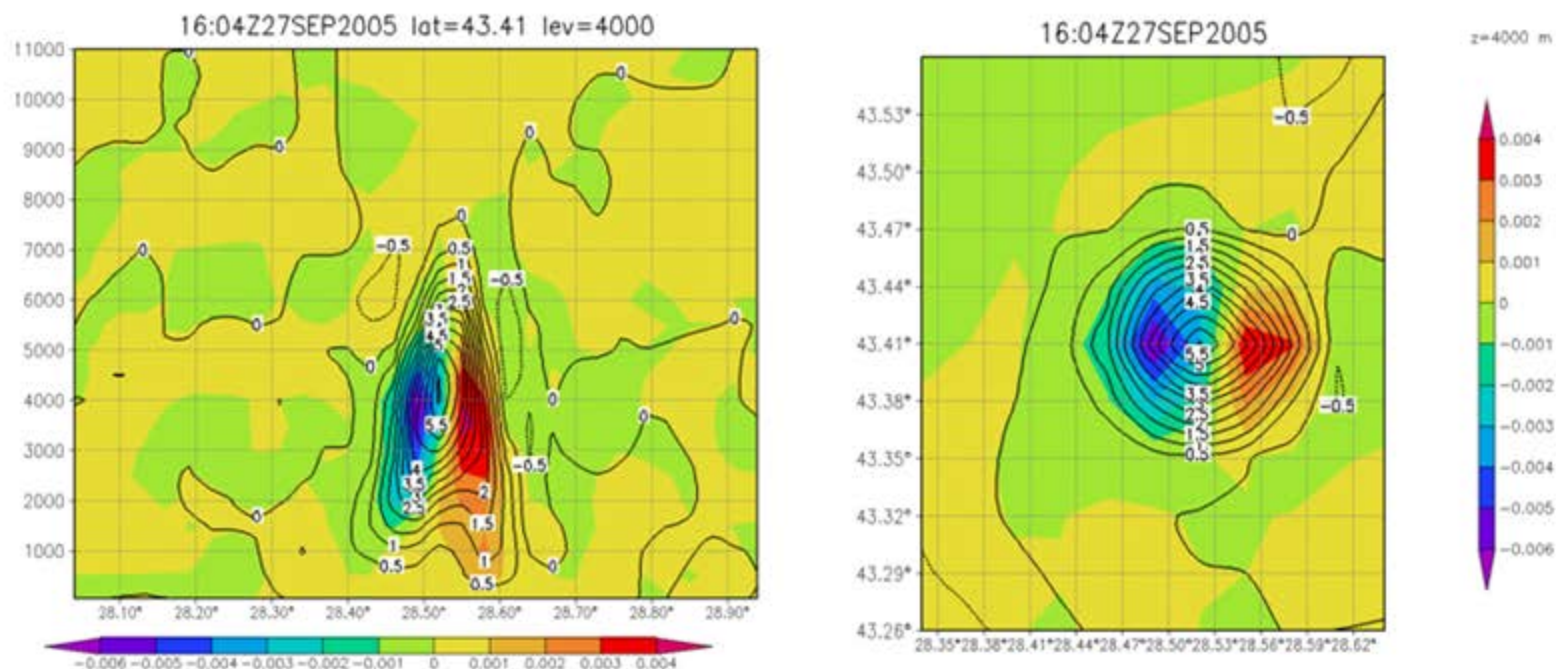


... it is becoming increasingly clear from cloud-representing numerical simulations that moist vortical updrafts are the essential building blocks of the tropical storm within the rotating proto-vortex.

These hot vortical plume structures amplify pre-existing cyclonic vorticity and equivalently induce concentrations of vorticity substance much larger than that of the aggregative vortex.



НОВЫЙ СЦЕНАРИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ: THE MAIN ACTORS - Vortical Hot Towers (VHTs)



Цветом показан вертикальный вклад спиральности, изолиниями — вертикальная скорость.
Горизонтальное разрешение 3 км.

Вихревая башня в квазитропическом циклоне над Черным морем, сентябрь, 2005г.
Моделирование — Д. Яровая. МГФИ, Севастополь.

В.В. Ефимов, М.В. Шокуров, Д.А. Яровая. ФАО, 2007, т. 43, № 6, стр. 667–686.



Эксперименты [M06], анализируемые в данной работе

(начальные условия по Табл. 1 [M06])

No.	Name	Notes
A1	Control	$\Delta x = \Delta y = 2 \text{ km}$, $SST = 29^\circ\text{C}$, $\max v = 6.6 \text{ m s}^{-1}$ at 4 km
* A2	3 km	$\Delta x = \Delta y = 3 \text{ km}$, $SST = 29^\circ\text{C}$, $\max v = 6.6 \text{ m s}^{-1}$ at 4 km
B3	Cape-less (3 km)	$\Delta x = \Delta y = 3 \text{ km}$, $SST = 29^\circ\text{C}$, $\max v = 6.6 \text{ m s}^{-1}$ at 4 km, low-level moisture decreased by 2 g kg^{-1}
C1	No vortex	$\Delta x = \Delta y = 3 \text{ km}$, $SST = 29^\circ\text{C}$
C3	Weak vortex	$\Delta x = \Delta y = 3 \text{ km}$, $SST = 29^\circ\text{C}$, $\max v = 5.0 \text{ m s}^{-1}$ at 4 km
E1	Zero Coriolis	$\Delta x = \Delta y = 3 \text{ km}$, $SST = 29^\circ\text{C}$, $\max v = 6.6 \text{ m s}^{-1}$ at 4 km

*Нет существенных различий между A1 и A2.
В экспериментах A1, A2, B3 и E1 образовались TD через ~ 24-48 час.
A1 и A2: усиление до ураганов в течение 72 час.
B3 и C3: развитие заметно медленнее, чем в A1,
E1: нет усиления (вихря TD) после 24 час.
C1: нет интенсивных VHTs и вращения у поверхности.*

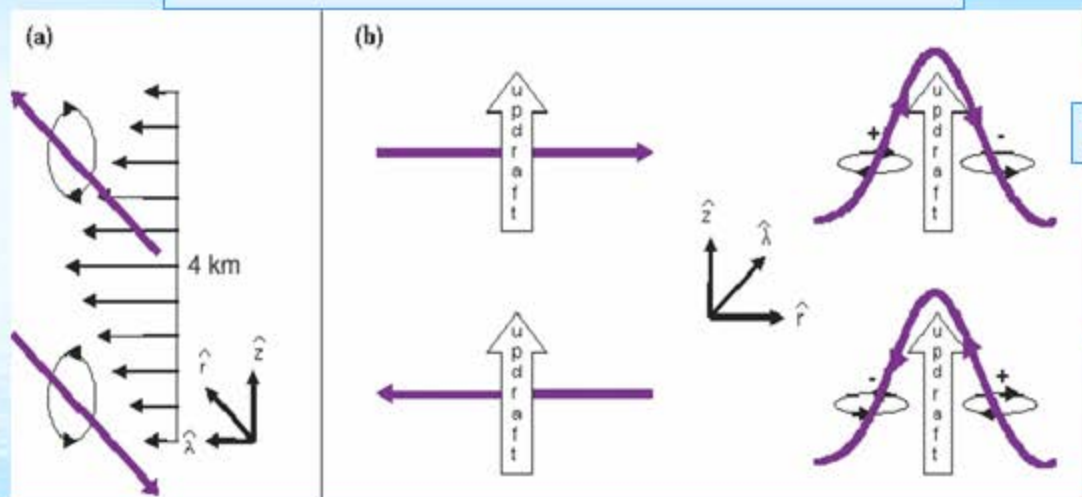
Тропическая Депрессия (TD)
 $V_{\max} \leq 17 \text{ м/с}$
Тропический Шторм (TS)
 $17 \text{ м/с} < V_{\max} \leq 33 \text{ м/с}$
Ураган/Тайфун (H)
 $V_{\max} > 33 \text{ м/с}$



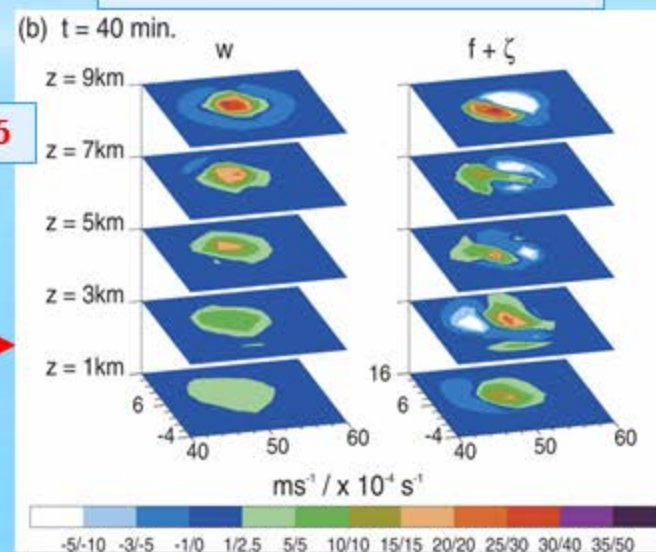
МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ И УСИЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЗАВИХРЕННОСТИ → ЗАЦЕПЛЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ЛИНИЙ

1. В присутствии начального MCVortex – Expt. A1 [M06]

Наклон и растяжение вихревых линий



VHT – вихревой диполь



2. БЕЗ начального MCVortex – Expt. C1 [M06]

Теплый всплывающий термик создает горизонтальную разность температуры и локальную адвективную циркуляцию, которая включает вертикальный сдвиг горизонтальной скорости; **вертикальная составляющая завихренности генерируется аналогично случаю 1.**

В обоих случаях происходит генерация спиральности на масштабах кучевой облачности



ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ СКОРОСТИ, РАССЧИТАННЫЕ ПО ДАННЫМ RAMS МОДЕЛИРОВАНИЯ

Post processing: Декартовы и цилиндрические координаты ;
i, j - 92x92 – по горизонтали, шаг = 3 км;
k - 40 уровней по вертикали, шаг = 0.5 км;
Полное время каждого эксперимента – 72 часа, шаг = 10 мин.

$$E_{i,j,k} = \frac{1}{2} (\vec{V})^2_{i,j,k} \quad , \quad \varepsilon_{i,j,k} = \frac{1}{2} (\text{curl} \vec{V})^2_{i,j,k} \quad , \quad H_{i,j,k} = (\vec{V} \cdot \text{curl} \vec{V})_{i,j,k}$$

3D kinetic energy, enstrophy and helicity densities

$\langle E \rangle$, $\langle \varepsilon \rangle$, $\langle H \rangle$ - integral kinetic energy, enstrophy and helicity
normalized by number of grid points

Integral kinetic energy $\langle E^P \rangle$ and $\langle E^S \rangle$ separately to identify the helical feedback

Vertical velocity, vorticity and helicity – convection/VHTs

Horizontal helicity $\langle H_{xy} \rangle = \langle H_x \rangle + \langle H_y \rangle$ – vertical wind shear

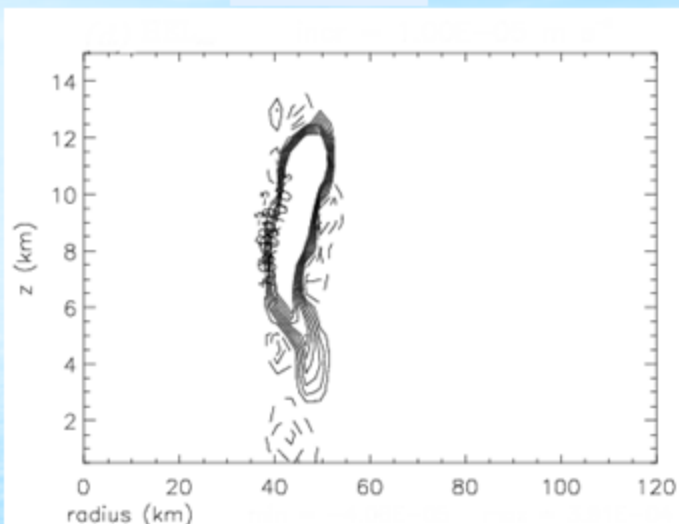
**Hydro- and thermodynamic fields in Cartesian and cylindrical coordinates,
azimuthal averages, and a number of other characteristics**



ОБРАЗОВАНИЕ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА : ГЕНЕРАЦИЯ СПИРАЛЬНОСТИ НА МАСШТАБАХ ОБЛАЧНОЙ КОНВЕКЦИИ

Expt. C1: теплый термик, без MCV

t = 140 мин



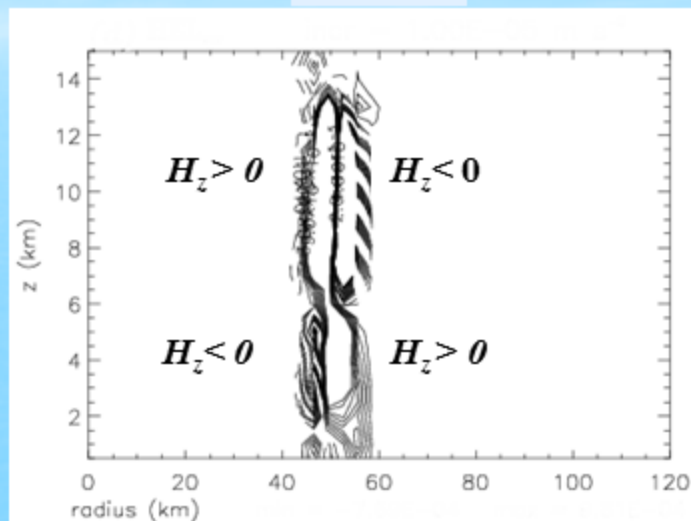
Циклоническая завихренность

Восходящий поток

$$H_z > 0$$

Expt. A2: теплый термик + MCV

t = 70 мин



Вихревой диполь

Восходящий поток

Спиральность меняет знак

Поле вертикальной спиральности в момент МАХ интенсивности термика
(осредненное по азимуту)

Обнаружены два вида вихревых спиральных конвективных структур

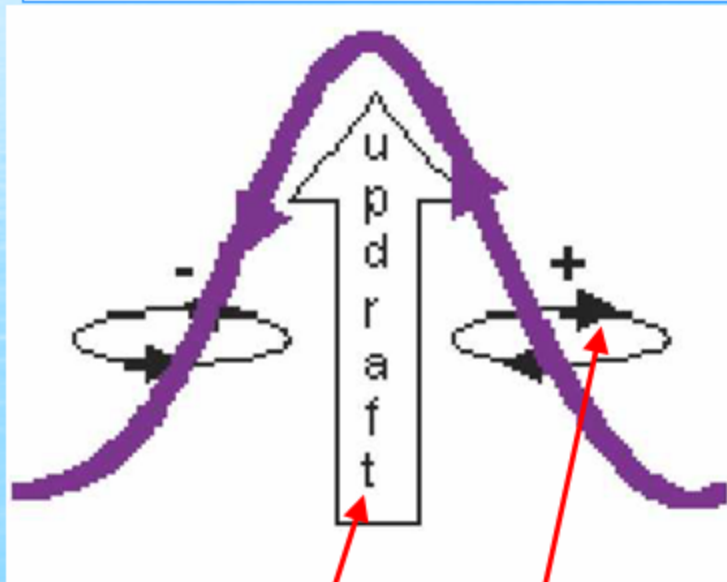


ОБРАЗОВАНИЕ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА : ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОНВЕКЦИИ И ВЕРТИКАЛЬНОГО СДВИГА ВЕТРА

Представленный механизм преобразования горизонтальной завихренности в вертикальную может быть интерпретирован как взаимодействие конвекции и вертикального сдвига ветра, которое

- генерирует зацепление вихревых линий – спиральность,
- плотно связывает тангенциальную и конвективную циркуляцию

VHTs – связующие звенья между циркуляциями



$$H_z = V_z \left(\text{curl } \vec{V} \right)_z$$

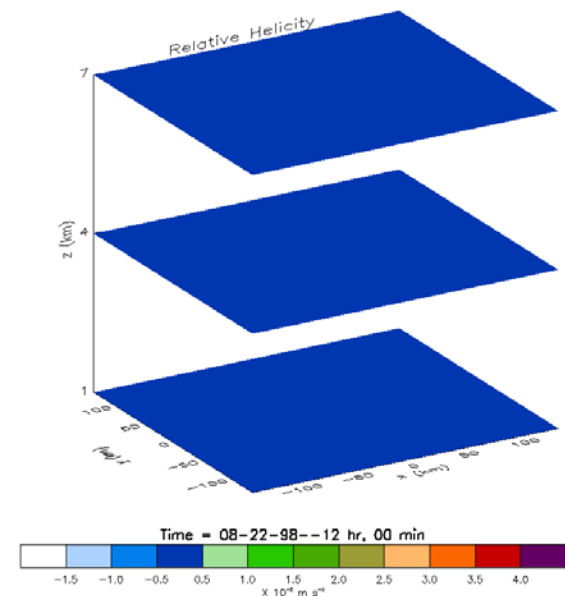
Каждая отдельная VHT:

- вносит вклад в тангенциальную и вертикальную циркуляцию,
- генерирует локальное зацепление вихревых линий,
- является спиральной «по определению», т.к. содержит восходящий поток и вертикальную завихренность

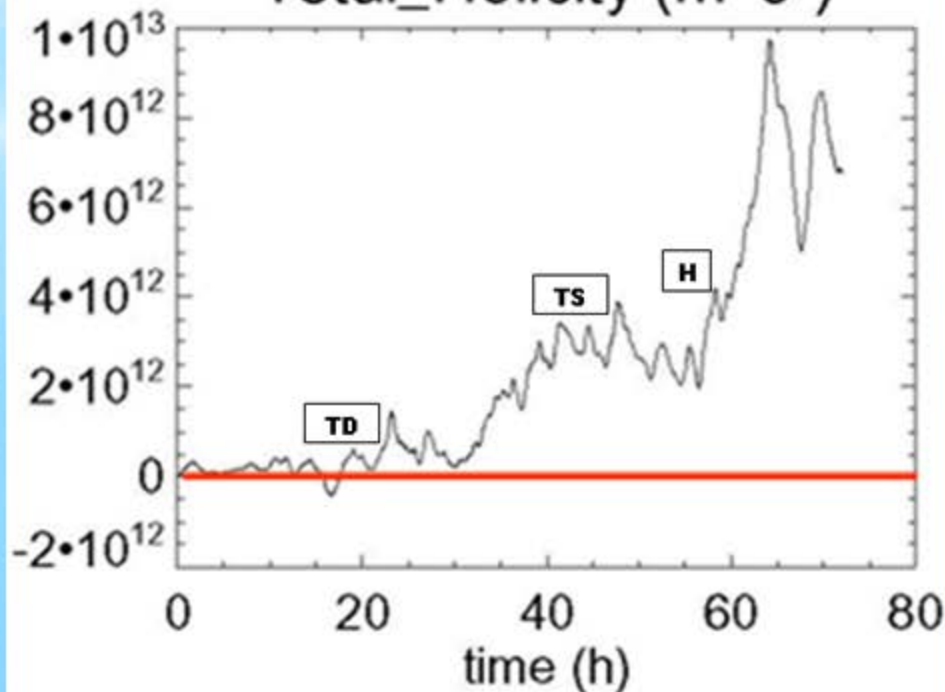


ЭВОЛЮЦИЯ СПИРАЛЬНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТЦ (шаг = 10 мин)

3D HELICITY DENSITY



Total_Helicity ($m^4 s^{-2}$)



Плотность спиральности

Time (hrs)	$H_{local} (m s^{-2})$
0 ÷ 10-12	0.002 – 0.004
12 ÷ 25-30	0.008 – 0.4
30 ÷ 72	0.5 – 1.0

Интенсивность формирующегося ТЦ

Max az-mean surface tangential wind

t = 16-18 h	9 $m s^{-1}$	TD formation,
t = 45 h	17.2 $m s^{-1}$	TS formation,
t = 56 h	33.4 $m s^{-1}$	H formation,
t = 60-63 h	42 $m s^{-1}$	H Maximal wind

LM10: Г.В. Левина, М.Т. Монтгомери. 2010, ДАН, т. 434, № 3, стр. 401-406.

Обнаружено устойчивое нарушение зеркальной симметрии турбулентности в процессе формирования ТЦ – ненулевая спиральность [LM10],

Это первый пример генерации ненулевой спиральности в природной системе – тропической атмосфере Земли.

Долгое время возможность генерации $\langle H \rangle \neq 0$ в естественных условиях была лишь гипотезой.

**В УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ТЦ
АТМОСФЕРНАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ЯВЛЯЕТСЯ СПИРАЛЬНОЙ !**

В спиральной турбулентности подавляется поток энергии к масштабам диссипации и возможен обратный каскад энергии в трехмерном случае:

альфа-эффект в магнитной гидродинамике (1966),

гидродинамический альфа-эффект (1983),

анизотропный кинетический альфа (АКА)-эффект (1987),

численные эксперименты в NCAR – Pouquet, Marino, Mininni et al. (2010-e).

В спиральной атмосферной турбулентности энергия, выделяемая при фазовых переходах влаги (пар-вода-лед) внутри вихревых горячих башен, накапливается на масштабах облачной конвекции.

В условиях подавления потока энергии к масштабам диссипации необходим новый канал сброса энергии – возможен обратный каскад энергии и возникновение крупномасштабной неустойчивости.

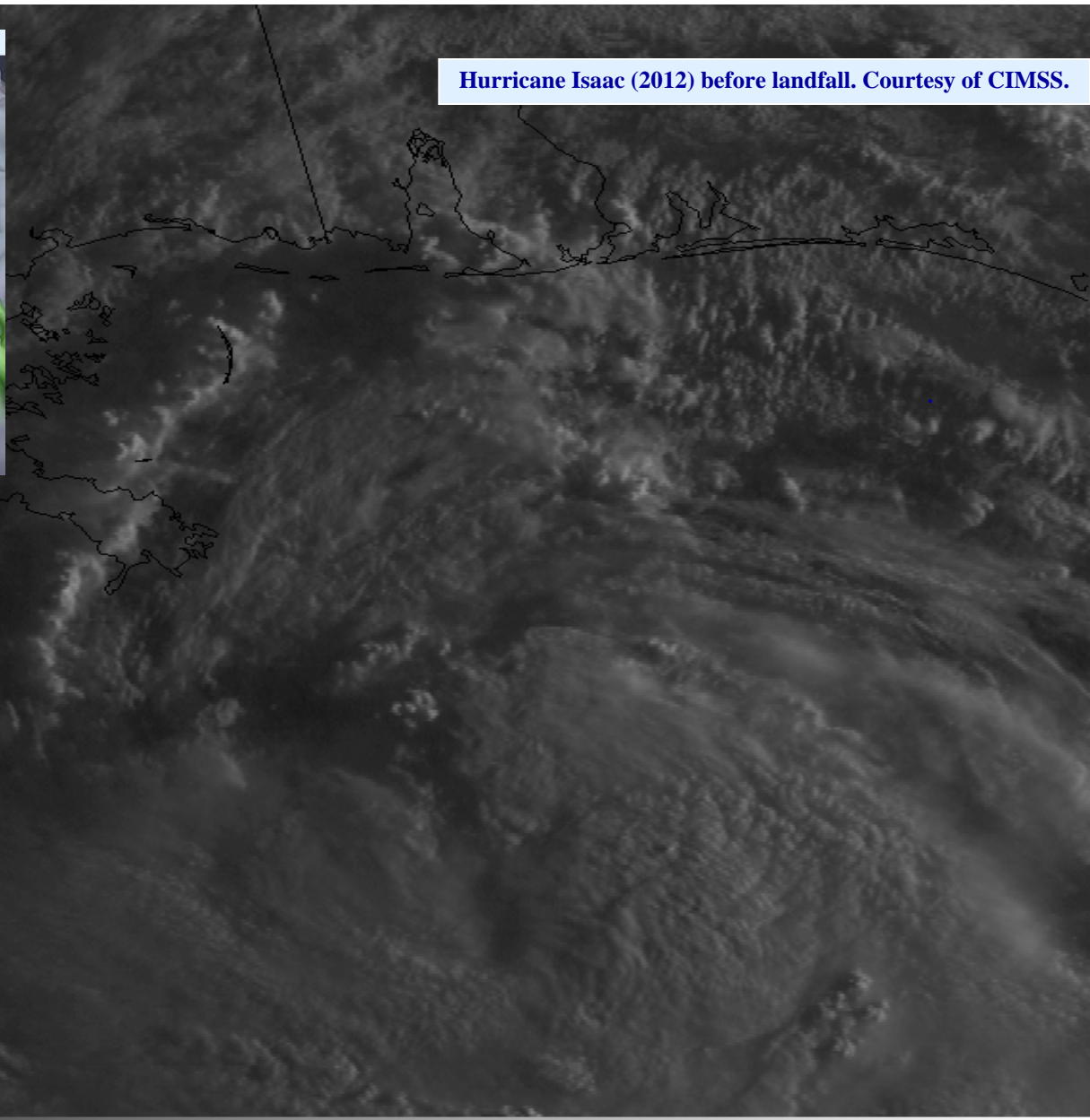


СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !

Tropical Rainfall Measuring Mission satellite data Hurricane Isaac 08/28/2012



Hurricane Isaac (2012) before landfall. Courtesy of CIMSS.



Computer facilities used for RAMS simulation and post-processing in Montgomery Research Group, NPS, Monterey, CA, USA

Dual processor Linux workstation has

- two AMD Opteron CPUs At 2.00GHz each
- 4 GB of RAM
- 1 TB of hard drive space

It runs CentOS 4.7 Linux

Saffir–Simpson hurricane wind scale	
Category	Wind speeds
Five	≥70 m/s, ≥137 knots ≥157 mph, ≥252 km/h
Four	58–70 m/s, 113–136 knots 130–156 mph, 209–251 km/h
Three	50–58 m/s, 96–112 knots 111–129 mph, 178–208 km/h
Two	43–49 m/s, 83–95 knots 96–110 mph, 154–177 km/h
One	33–42 m/s, 64–82 knots 74–95 mph, 119–153 km/h
Related classifications	
Tropical storm	18–32 m/s, 34–63 knots 39–73 mph, 63–118 km/h
Tropical depression	≤17 m/s, ≤33 knots ≤38 mph, ≤62 km/h