



Москва, 15 ноября 2017

**О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗЛИЧИТЬ ДВЕ СТАДИИ ЭВОЛЮЦИИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ – ЗАРОЖДЕНИЕ И УСИЛЕНИЕ – С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА СПИРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ СКОРОСТИ**

**Г.В. Левина**

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*levina@iki.rssi.ru*



# **СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА**

## **1. Мотивация исследований.**

- **Спиральность поля скорости**
- **Спиральность в атмосферных исследованиях**

## **2. Применение анализа спиральности для изучения тропических циклонов (ТЦ)**

- **сценарий тропического циклогенеза: самоорганизация конвективных процессов – Montgomery et al., 2006**

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

- **генерация спиральности конвекцией и сдвиговыми течениями,**
- **диагностика стадий зарождения и усиления ТЦ.**

**ПЕРСПЕКТИВЫ**



**Статьи, тезисы, презентации :**

[https://www.researchgate.net/profile/Galina\\_Levina](https://www.researchgate.net/profile/Galina_Levina)

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



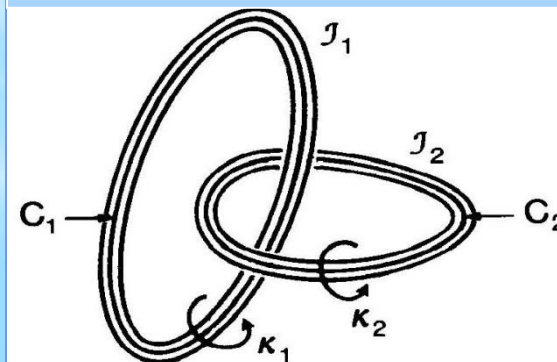
# СПИРАЛЬНОСТЬ ПОЛЯ СКОРОСТИ

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

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



ПРИМЕРЫ [1,2]:  $\langle \vec{V} \cdot \text{rot} \vec{V} \rangle$  - м/с<sup>2</sup> – плотность спиральности

валики в погранслое	$10^{-3} - 10^{-2}$
вращающийся термик	$10^{-2}$
тропический шторм	$10^{-1}$
ураган	$10^0$
торнадо	$10^1$
пыльный дьявол	$10^1$ - Земля; $10^2$ - Марс

1. М.В. Курганский. Введение в крупномасштабную динамику атмосферы. С-Пб.: Гидрометеониздат, 1993. 168 с.
2. Р. Чижевски. 1999, ФАО, т. 35, № 2, с. 174-188.

В целях диагностики опасных метеоявлений разнообразные спиральные характеристики уже многие годы применяются в США, Европе, Китае. ВСЕ современные численные модели атмосферы содержат наборы стандартных процедур для их расчета.

**SRH / SREH –**

**Storm Relative Helicity / Storm Relative Environmental Helicity**  
введена Lilly (1986), Davies-Jones et al. (1990) и другими

$$SRH = (V - V_{mean}) \frac{\partial U}{\partial z} - (U - U_{mean}) \frac{\partial V}{\partial z}$$

$U, V$  - зональный и меридиональный компоненты скорости ветра,  
 $U_{mean}, V_{mean}$  - компоненты скорости перемещения центра вихря.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrodynamical\\_helicity](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrodynamical_helicity)

Meteorology [[edit](#)]

This page was last edited on 5 September 2017

In [meteorology](#),<sup>[1]</sup> helicity corresponds to the transfer of [vorticity](#) from the environment to an air parcel in [convective](#) motion. Here the definition of helicity is simplified to only use the horizontal component of [wind](#) and [vorticity](#):

$$H = \int \vec{V}_h \cdot \vec{\zeta}_h dZ = \int \vec{V}_h \cdot \nabla \times \vec{V}_h dZ \quad \begin{cases} Z = \textit{Altitude} \\ \vec{V}_h = \textit{Horizontal velocity} \\ \vec{\zeta}_h = \textit{Horizontal vorticity} \end{cases}$$

According to this formula, if the horizontal wind does not change direction with [altitude](#), H will be zero as  $\vec{V}_h$  and  $\nabla \times \vec{V}_h$  are [perpendicular](#) one to the other making their [scalar product](#) nil. H is then positive if the wind veers (turns [clockwise](#)) with altitude and negative if it backs (turns [counterclockwise](#)). This helicity used in meteorology has energy units per units of mass ( $m^2/s^2$ ) and thus is interpreted as a measure of energy transfer by the wind shear with altitude, including directional.

This notion is used to predict the possibility of [tornadoic](#) development in a [thundercloud](#). In this case, the vertical integration will be limited below [cloud tops](#) (generally 3 km or 10,000 feet) and the horizontal wind will be calculated to wind relative to the [storm](#) in subtracting its motion:

$$SRH = \int (\vec{V}_h - \vec{C}) \cdot \nabla \times \vec{V}_h dZ \quad \{ \vec{C} = \textit{Cloud motion to the ground} \}$$

Critical values of SRH (Storm Relative Helicity) for tornadoic development, as researched in [North America](#),<sup>[2]</sup> are:

- SRH = 150-299 ... [supercells](#) possible with weak [tornadoes](#) according to [Fujita scale](#)
- SRH = 300-499 ... very favourable to supercells development and strong tornadoes
- SRH > 450 ... violent tornadoes
- When calculated only below 1 km (4,000 feet), the cut-off value is 100.

Helicity in itself is not the only component of severe [thunderstorms](#), and these values are to be taken with caution.<sup>[3]</sup> That is why the Energy Helicity Index (EHI) has been created. It is the result of SRH multiplied by the CAPE ([Convective Available Potential Energy](#)) and then divided by a threshold CAPE:  $EHI = (CAPE \times SRH) / 160,000$ . This incorporates not only the helicity but the energy of the air parcel and thus tries to eliminate weak potential for thunderstorms even in strong SRH regions. The critical values of EHI:

- EHI = 1 ... possible tornadoes
- EHI = 1-2 ... moderate to strong tornadoes
- EHI > 2 ... strong tornadoes

References [[edit](#)]

- [Batchelor, G.K.](#), (1967, reprinted 2000) *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge Univ. Press
- [Ohkitani, K.](#), "Elementary Account Of Vorticity And Related Equations". Cambridge University Press. January 30, 2005. ISBN 0-521-81984-9
- [Chorin, A.J.](#), "Vorticity and Turbulence". Applied Mathematical Sciences, Vol 103, Springer-Verlag. March 1, 1994. ISBN 0-387-94197-5
- [Majda, A.J.](#) & [Bertozi, A.L.](#), "Vorticity and Incompressible Flow". Cambridge University Press; 1st edition. December 15, 2001. ISBN 0-521-63948-4
- [Tritton, D.J.](#), "Physical Fluid Dynamics". Van Nostrand Reinhold, New York. 1977. ISBN 0-19-854493-6
- [Arfken, G.](#), "Mathematical Methods for Physicists", 3rd ed. Academic Press, Orlando, FL. 1985. ISBN 0-12-059820-5
- [Moffatt, H.K.](#) (1969) The degree of knottedness of tangled vortex lines. *J. Fluid Mech.* **35**, pp. 117–129.
- [Moffatt, H.K.](#) & [Ricca, R.L.](#) (1992) Helicity and the Čalugăreanu Invariant. *Proc. R. Soc. Lond. A* **439**, pp. 411–429.
- [Thomson, W.](#) (Lord Kelvin) (1868) On vortex motion. *Trans. Roy. Soc. Edin.* **25**, pp. 217–260.



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

– спиральность течения

$$\vec{V} \cdot \text{curl} \vec{V} = u \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + w \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

– плотность спиральности

**Спиральность течения, осредненная по числу узлов расчетной сетки**

$$\langle H \rangle = \langle H_{hor} \rangle = \langle H_x \rangle + \langle H_y \rangle + \langle H_{ver} \rangle = \langle H_z \rangle$$

**Анализ пространственных вкладов спиральности [1-3]:**

- горизонтальная спиральность характеризует вклад вертикального сдвига горизонтального ветра и горизонтальных сдвигов вертикальной скорости,
- вертикальная спиральность является индикатором вращающихся вертикальных движений (смерчи, торнадо, суперячейки, вихревая конвекция в ТЦ - VHTs)

## Литература

1. Hide R., 1976. A note on helicity. *Geophys. (& Astrophysical- after 1977). Fluid Dyn.* Vol. 7, pp. 157–161.
2. Kain J. S., and Coauthors, 2008. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP. *Wea. Forecasting.* Vol. 23, pp. 931–952.
3. Levina G.V., 2013. Helical organization of tropical cyclones. Preprint NII3001-TOD. Cambridge, UK: Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences. 47p.



# **ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА СПИРАЛЬНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ**

**Новый сценарий тропического циклогенеза, основанный на самоорганизации конвективных процессов**

**М06** : 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).

В экспериментах A1 и A2 прослежена полная эволюция ТЦ, включающая образование тропического шторма (TS) и урагана (H) 2 категории интенсивности.

## **Самоорганизация**

**вихревой конвекции наблюдалась как:**

- укрупнение вихревых структур от размеров отдельных вращающихся кучевых облаков;
- слияние структур и образование более крупных вихрей, усиливающее циркуляцию на масштабах системы;
- концентрация абсолютного углового момента на масштабах циркуляции всей вихревой системы.

**Данные М06 используются для расчета спиральных характеристик с целью анализа стадий зарождения и усиления тропического циклона**





# **ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА СПИРАЛЬНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ**

**В работе M06 термомеханика тропического циклогенеза исследовалась на основе 3D негидростатической облачной модели с помощью RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) с разрешением 2-3 км по горизонтали.**

## **ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ:**

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

**Cape Verde Islands**





# 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

### 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 $2 \text{ g kg}^{-1}$
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 exper-x 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.*

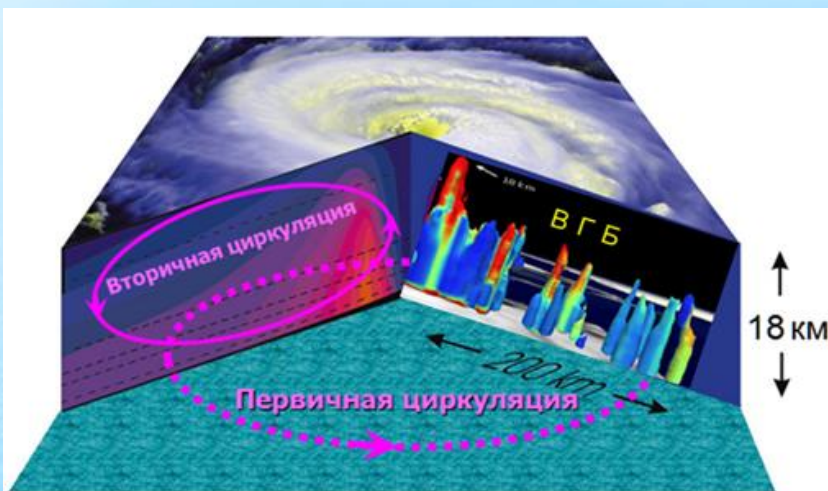
**Тропическая Депрессия (TD)**  
 $V_{\max} \leq 17 \text{ м/с}$   
**Тропический Шторм (TS)**  
 $17 \text{ м/с} < V_{\max} \leq 33 \text{ м/с}$   
**Ураган/Тайфун (H)**  
 $V_{\max} > 33 \text{ м/с}$



# ДИАГНОСТИКА ЗАРОЖДЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Когда формирующийся вихрь становится энергетически самоподдерживающимся?

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



Диагностика зарождения ТЦ – «Genesis (G)». Эксперимент A2 [M06]

- Анализ эволюции кинетической энергии первичной тангенциальной циркуляции  $E1$  и вторичной трансверсальной циркуляции  $E2$  позволяет определить момент времени  $G$ , когда начинается их взаимное усиление и формирующийся вихрь становится энергетически самоподдерживающимся.
- В момент времени  $G$  мезомасштабная вихревая система становится спиральной: происходит зацепление тангенциальной и трансверсальной циркуляции, которое осуществляется конвективными структурами облачных масштабов – вихревыми горячими башнями (ВГБ);
- спиральность поля скорости, которая является количественной мерой зацепления (верхняя панель), становится существенно отличной от нуля и нарастающей.

В численных экспериментах за 72 часа сформировались ТЦ разной интенсивности: А2 – ураган 2-й категории интенсивности, макс. тангенциальная скорость – 43 м/с ; В3, С3 и Е1 – тропические депрессии, скорости тангенциального ветра < 17 м/с.

## Интегральные характеристики сформировавшихся ТЦ

№.	Вертикальная спиральность $\langle N_{\text{ver}} \rangle$ $\text{м}^4/\text{с}^2$	Горизонтальная спиральность $\langle N_{\text{hor}} \rangle$ $\text{м}^4/\text{с}^2$	Кинетическая энергия $\langle E^P \rangle$ $\text{м}^5/\text{с}^2$	Кинетическая энергия $\langle E^S \rangle$ $\text{м}^5/\text{с}^2$
А2	$9.0 \cdot 10^{10}$	$9.5 \cdot 10^{12}$	$0.45 \cdot 10^{16}$	$0.15 \cdot 10^{16}$
В3	$4.0 \cdot 10^{10}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$0.4 \cdot 10^{16}$	$0.05 \cdot 10^{16}$
С3	$1.4 \cdot 10^{10}$	$3.0 \cdot 10^{12}$	$0.3 \cdot 10^{16}$	$0.08 \cdot 10^{16}$
Е1	$3.5 \cdot 10^{10}$	$3.5 \cdot 10^{12}$	$0.6 \cdot 10^{16}$	$0.05 \cdot 10^{16}$

1. Кинетическая энергия  $\langle E^P \rangle$  рассчитывается по скорости тангенциального ветра. Для урагана в А2 и тропической депрессии в В3 ее значения оказываются достаточно близкими.
2. Значения горизонтальной спиральности различаются в несколько раз.

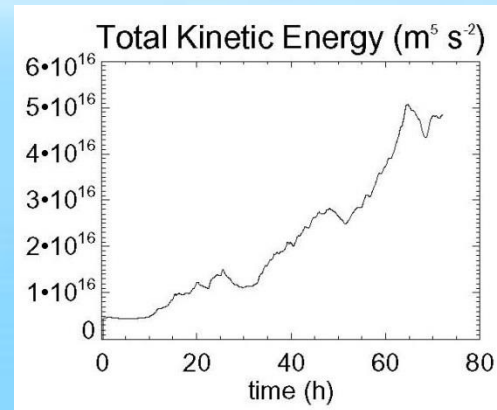
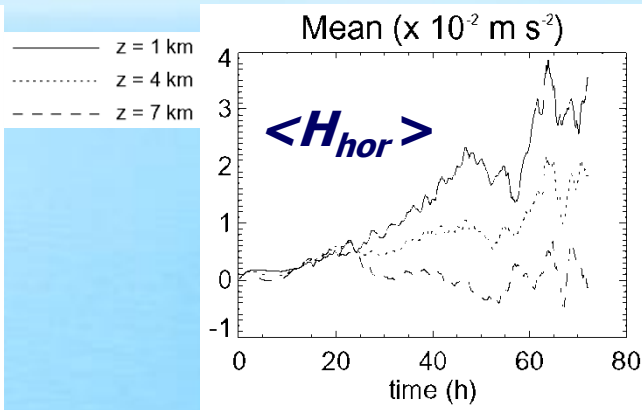
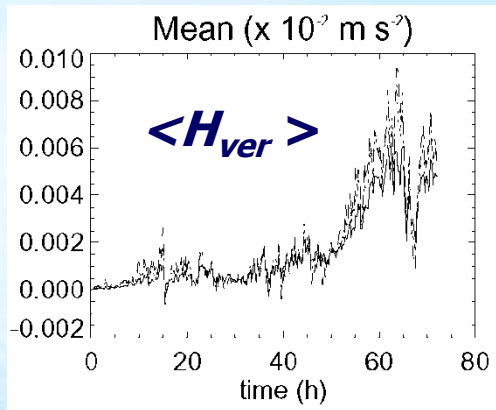
**Необходим анализ горизонтальной спиральности!**



# ГЕНЕРАЦИЯ СПИРАЛЬНОСТИ НА СТАДИЯХ ЗАРОЖДЕНИЯ И УСИЛЕНИЯ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА

## Расчеты спиральности на разных высотах

### Эксперимент А2



1. Вертикальная спиральность равномерно генерируется в слое 1-7 км
2. Для  $t > 25$  ч – более интенсивная генерация горизонтальной спиральности вблизи поверхности
3. Для  $t > 30$  ч – начинается резкий рост кинетической энергии

**ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ СПИРАЛЬНОСТЬ – ИНДИКАТОР СТАДИИ УСИЛЕНИЯ ТЦ?**



# **ДИАГНОСТИКА СТАДИЙ ЗАРОЖДЕНИЯ И УСИЛЕНИЯ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА**

## **1. Зарождение ТЦ – «Genesis (G)».**

**Анализ эволюции кинетической энергии** позволяет определить момент времени  $G$ , когда формирующийся вихрь становится энергетически самоподдерживаемым.

На этой стадии оба вклада спиральности генерируются по высоте РАВНОМЕРНО. Вертикальная спиральность вихревой системы на 2 порядка меньше горизонтальной.

Развивающаяся крупномасштабная спирально-вихревая неустойчивость приводит к образованию поверхностно-концентрированного вихря тропической депрессии – ТД.

**Образованием ТД заканчивается стадия зарождения.**

## **2. Стадия усиления ТЦ (интенсификация образовавшейся ТД).**

**Анализ вкладов спиральности.** Начинается неравномерная по высоте, более интенсивная вблизи поверхности генерация горизонтальной спиральности.

Это вызвано усиливающимся вертикальным сдвигом ветра в ТД.

**Вскоре начинается устойчивый рост интегральной кинетической энергии системы.**



**В совместных исследованиях с американскими учеными применение предложенного анализа начато для диагностики еще двух сценариев формирования ТЦ, рассмотренных в статье М. Е. Nicholls and M. T. Montgomery, 2013. An examination of two pathways to tropical cyclogenesis occurring in idealized simulations with a cloud-resolving numerical model. Atmos. Chem. Phys., 13, 5999–6022.**

**В этой работе применена современная модификация модели атмосферы RAMS и более высокое горизонтальное (1-2 км) и вертикальное разрешение (200 м).**

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту № 16-05-00551а

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !**



## 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