



Институт космических исследований Российской академии наук



Двадцатая первая международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
Москва, 13–17 ноября 2023

КАК РОЖДАЕТСЯ УРАГАН: ДВУХМАСШТАБНОЕ ВИХРЕВОЕ ДИНАМО

Галина Левина

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

levina@cosmos.ru

Спиральность и турбулентное динамо

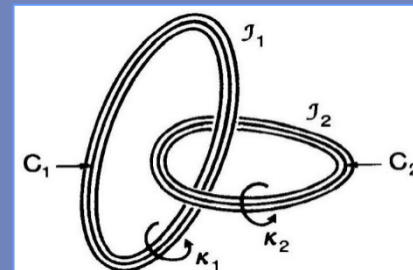
- H.-K. Moffatt and A. Tsinober (1992), *Annu. Rev. Fluid Mech.*, v. 24, 281-312;
- H. Keith Moffatt (2014), *PNAS*, v. 111, no. 10, 3663-3670

(i) Спиральность играет центральную роль в теории МГД-динамо

эта теория объясняет усиление магнитных полей в электропроводящих средах.

Открытие Альфа-эффекта (1966) показало, **как порядок** (в виде крупномасштабного магнитного поля) **может возникнуть из хаоса** (мелкомасштабной турбулентности).

Важное условие – в турбулентности должна быть нарушена отражательная симметрия, простейший случай – **ненулевая средняя спиральность**.



Moffatt (1969), *JFM*

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

$$\langle H \rangle \neq 0$$

(ii) Спиральность играет роль

в создании условий, способствующих возникновению когерентных структур и обратного каскада энергии в турбулентности

Подобие уравнений для магнитного поля \vec{B} и завихренности $\vec{\omega} = \text{curl} \vec{V}$

$$\partial \vec{B} / \partial t = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B})$$

$$\partial \vec{\omega} / \partial t = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{\omega})$$

инициировало поиск аналогов динамо-эффекта в непроводящих средах.

Турбулентное вихревое динамо

1983, Институт космических исследований (ИКИ РАН), Москва

ТЕОРИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ВИХРЕВОГО ДИНАМО

Крупномасштабная вихревая неустойчивость в спиральной турбулентности

1. Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Хоменко Г.А., Яновский В.В.

Теория возникновения крупномасштабных структур в гидродинамической турбулентности. ЖЭТФ, 1983.

2. Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Хоменко Г.А., Шукуров А.М.

Физический механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере. Докл. АН СССР, 1983.

Приведены теоретические оценки для тропических циклонов в атмосфере Земли

1996, Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН), Москва

ПЕРВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ

1. Фортов В.Е., Гнедин Ю.Н., Иванов М.Ф., Ивлев А.В., Клумов Б.А.

Столкновение кометы Шумейкер-Леви 9 с Юпитером: что мы увидели. УФН, 1996.

2. Иванов М.Ф., Гальбурт В.А., Фортов В.Е.

О возможном механизме образования крупномасштабных возмущений в атмосфере Юпитера, вызванных падением фрагментов кометы Шумейкер-Леви 9. ЖЭТФ, 1996.

Турбулентное вихревое динамо

Несмотря на впечатляющие результаты для вихрей в атмосфере Юпитера, механизм турбулентного динамо продолжал оставаться лишь красивой теоретической гипотезой, поскольку, прежде всего, **необходимо было доказать само существование спиральной атмосферной турбулентности.**

Переломными событиями стали появление облачно-разрешающих численных моделей атмосферы и открытие с их помощью вихревой облачной конвекции в тропических циклонах – Hendricks et al. (2004), *J. Atmos. Sci.*

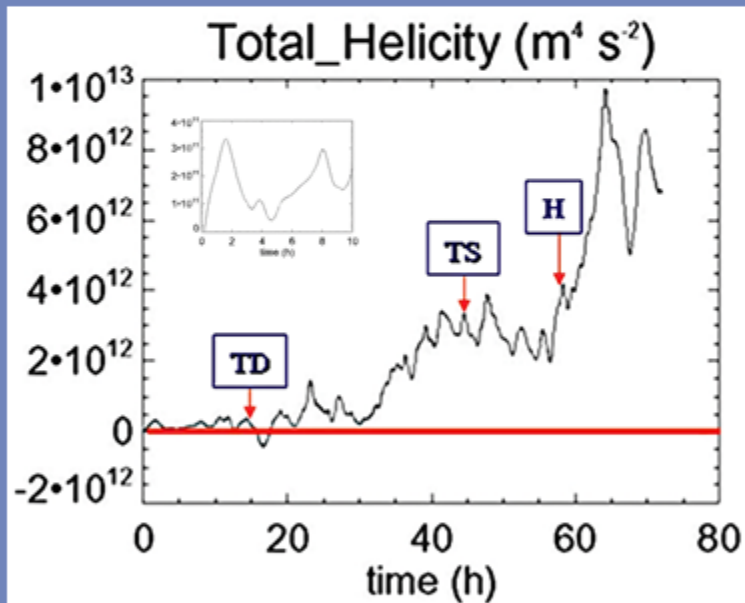
В 2006 г. применительно к тропической атмосфере Земли были начаты российско-американские исследования с участием специалистов–модельеров лучшего мирового уровня и использованием американских вычислительных ресурсов – см. обзор Levina (2018), *Open Journal of Fluid Dynamics*.

Исследования стартовали с проверки гипотезы о существовании атмосферной турбулентности, характеризующейся ненулевой средней спиральностью.

Проверка гипотезы о существовании спиральной турбулентности в тропической атмосфере Земли

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

Спиральность поля скорости. Н.-К. Moffatt (1969), *JFM*



Интенсивность формирующегося тропического циклона (ТЦ):

TD – тропическая депрессия;
TS – тропический шторм;
H – ураган

Mean near-surface tangential wind

t = 16 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

Спиральность рассчитывалась в зоне развития ТЦ, **276 x 276 x 20 км.**

Пространственное разрешение **Δx = Δy = 3 км, Δz = 500 м ;**
шаг по времени **10 мин, T = 72 ч.**

Показана эволюция интегральной спиральности, нормированной на число узлов расчетной сетки.

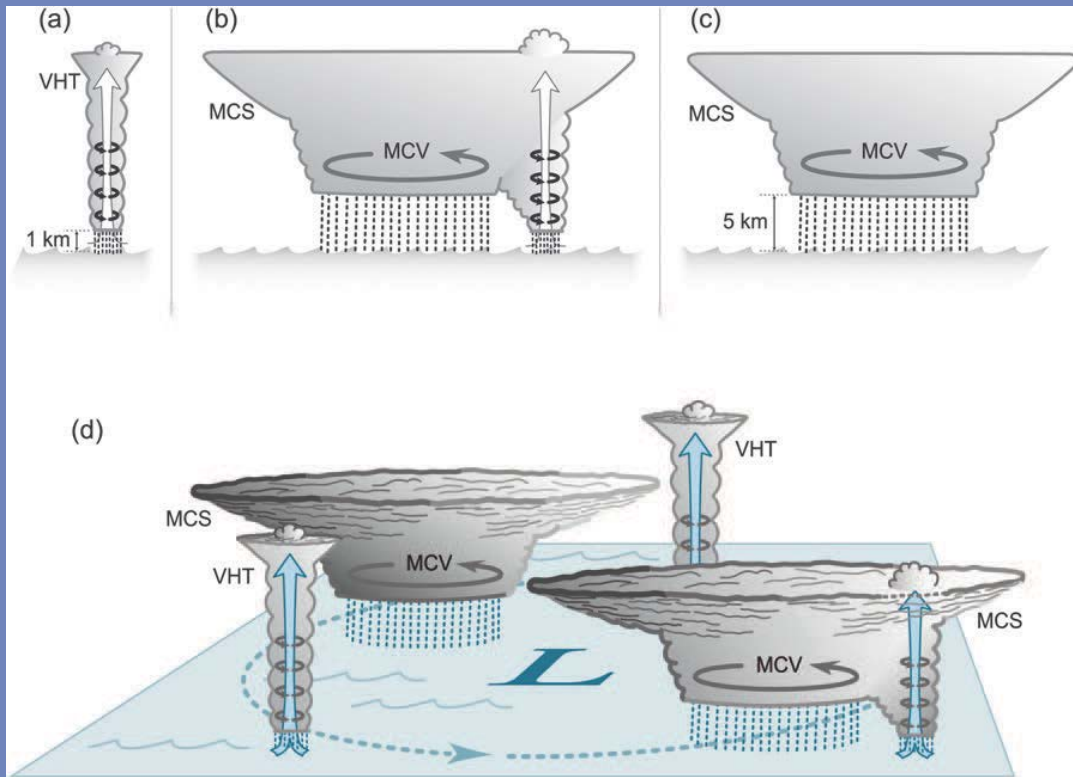
На внутренней панели приведен укрупненный график для генерации спиральности в начальные 10 часов.

Впервые обнаружена ненулевая и нарастающая со временем средняя спиральность в атмосфере. Атмосферная турбулентность в зоне образования ТЦ является спиральной!

$\langle H \rangle \neq 0$

Левина Г.В., Монтгомери М.Т. (2010) О первом исследовании спиральной природы тропического циклогенеза. *Докл. АН, Геофизика*, **434**, 401–406. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1009031X>.

Вихревая облачная конвекция, обеспечивающая генерацию спиральности



Жизненный цикл мезомасштабной конвективной системы (MCS) внутри развивающегося тропического циклона.

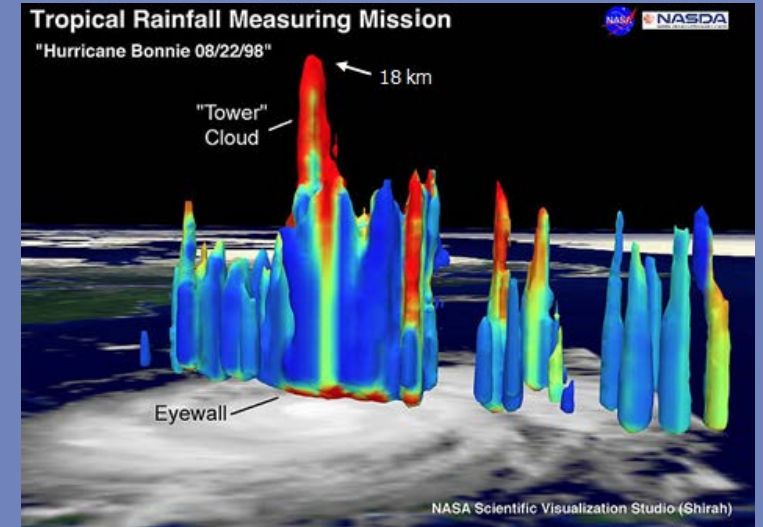
VHT – вихревая горячая башня,
MCV – мезомасштабный конвективный вихрь в средней тропосфере.

Houze, R.A. Jr. (2010), *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 293–344.

**Вихревые Горячие Башни (ВГБ)
 Vortical Hot Towers (VHTs)
 вращающиеся кучевые облака**

Термин «ГОРЯЧИЕ» связан не с температурой, а с **ВЫДЕЛЕНИЕМ СКРЫТОГО ТЕПЛА** за счет фазовых переходов влаги по высоте башни (водяной пар – вода – лед)

Время жизни ~ **1 час**, горизонтальный размер **10-30 км**
 самые интенсивные достигают в высоту до **14-18 км**
 вертикальная скорость от **2-4 м·с⁻¹** до **25-30 м·с⁻¹**
 относительная вертикальная завихренность до **10⁻³-10⁻² с⁻¹**
 (на 1-2 порядка превосходит планетарное вращение).



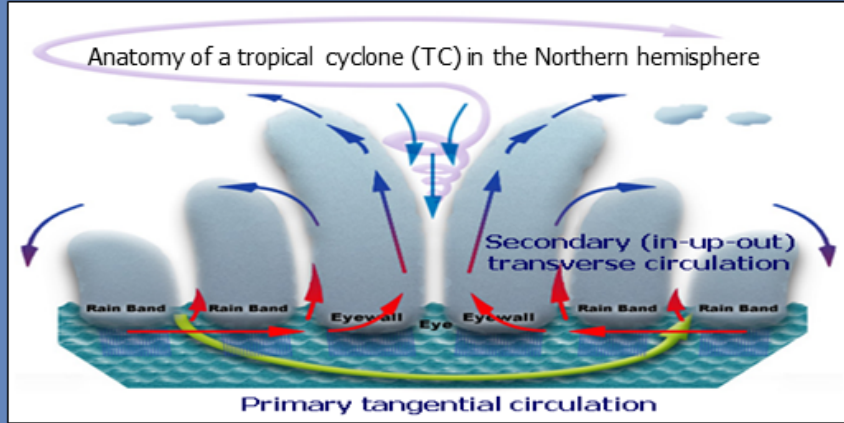
ВГБ в урагане 3-ей категории – $V_{max} \approx 50$ м/с

Вихревая горячая башня



С борта исследовательского самолета NSF/NCAR Gulfstream-V; $h \approx 14500$ м.
Внутри тропического шторма Karl (2010) между Гондурасом и Ямайкой, 14 сентября 2010.

Турбулентное вихревое динамо в тропической атмосфере Земли

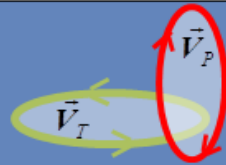


Во вращающейся неоднородной атмосфере влажно-конвективная турбулентность становится спиральной, подавляется поток энергии к масштабам диссипации → **возможность крупномасштабной (КМ) вихревой неустойчивости.**

Первый признак появления КМ неустойчивости – начало взаимного усиления первичной (Primary) и вторичной (Secondary) циркуляции на мезомасштабах вихревой системы, вызванного действием спиральной обратной связи. **В ЭТОТ МОМЕНТ ФОРМИРУЮЩИЙСЯ ВИХРЬ СТАНОВИТСЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩИМСЯ.**
 1-е звено обратной связи (трансверсальная-тангенциальная) → за счет силы Кориолиса.
 2-е звено (тангенциальная-трансверсальная) создают ВГБ и замыкают петлю обратной связи.
СПИРАЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ РЕАЛИЗУЕТСЯ ТОЛЬКО ОДНИМ ФИЗИЧЕСКИМ ПОЛЕМ СКОРОСТИ !

$$\vec{V} = \vec{V}_T + \vec{V}_P, \quad \vec{e} = \{0, 0, 1\}$$

$$\vec{V}_T = \text{curl}(\vec{e}\psi), \quad \vec{V}_P = \text{curl curl}(\vec{e}\phi)$$



$$\left(Pr \frac{\partial}{\partial t} - \Delta \right) T = -\Delta_{\perp} \phi,$$

Convective

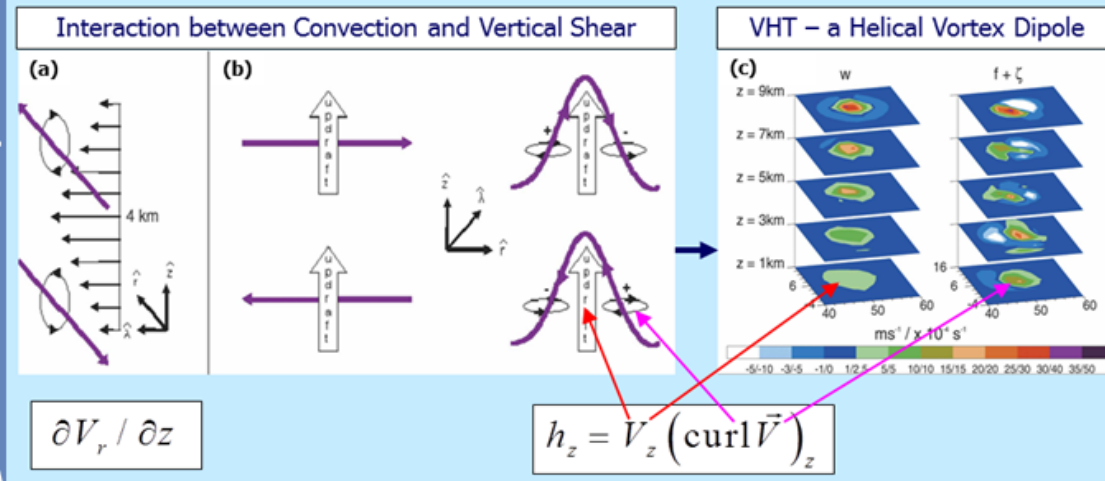
$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \Delta \right) \Delta \phi = Ra T + C \left[(\vec{e}\nabla)^2 - \Delta_{\perp} \right] \psi - Ta^{1/2} \frac{\partial \psi}{\partial z},$$

Helical

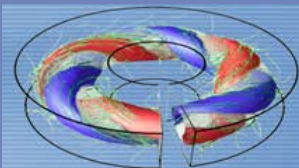
$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \Delta \right) \psi = -C (\vec{e}\nabla)^2 \phi + Ta^{1/2} \frac{\partial \phi}{\partial z},$$

$$Pr = \frac{\nu}{\chi}, \quad Ra = \frac{g\beta Ah^4}{\nu\chi}, \quad C \propto \Omega A, \quad Ta = \frac{4\Omega^2 h^4}{\nu^2}$$

A = internal volumetric heat release



The VHTs convert the horizontal vorticity to vertical by tilting and amplify the latter by stretching, thereby linking and intensifying the primary and secondary circulation.
THE VHTs POPULATION WORKS LIKE "DYNAMICAL STAPLES", LINKING THE CIRCULATIONS DURING THE ENTIRE TC EVOLUTION.



PERM DYNAMO DAYS

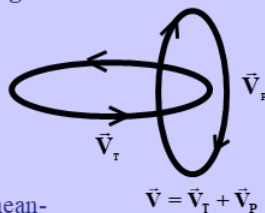
Workshop
7-11 February 2005

STAGE I. Forcing Simulation.

Forcing function simulates the influence of small-scale helical turbulence generated by joint effect of the Coriolis force and internal heat release:

$$\vec{f} \sim \vec{e} \cdot (\nabla \times \vec{V})_z - \frac{\partial(\vec{e} \times \vec{V})}{\partial z}, \quad \vec{e} = \{0, 0, 1\}$$

is applied to developed convective flows



- has the identical tensor structure with a generating alpha-term in the mean-field equation for vortex dynamo in a convective system (Moiseev et al. 1988);
- makes the flow helical;
- generates a positive feedback between the poloidal and toroidal components of the velocity field.

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{Pr} \vec{V} \nabla \vec{V} = -\nabla p + \Delta \vec{V} + Ra T \vec{e} + Re^\Omega \vec{f},$$

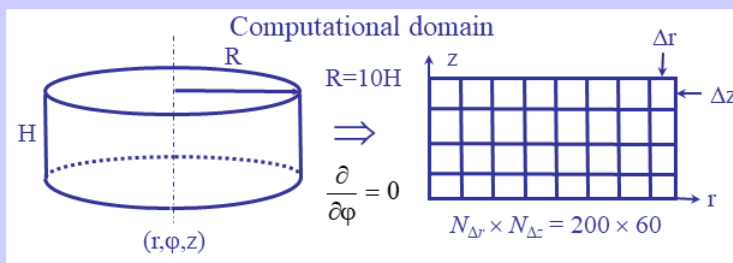
$$Pr \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \nabla T = \Delta T, \quad \text{div} \vec{V} = 0,$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_1 - T_2)h^3}{\nu\chi}, \quad Pr = \frac{\nu}{\chi}, \quad Re^\Omega = \frac{2\Omega h^2}{\nu}$$

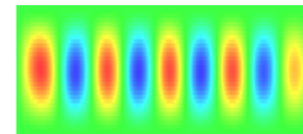
Helical-Vortex Effects in Laminar Convection

3D Laminar Rayleigh-Benard convection, AR = 10

- Boussinesq equations with our forcing \vec{f}
- Finite differences. Explicit scheme.



Initial distribution



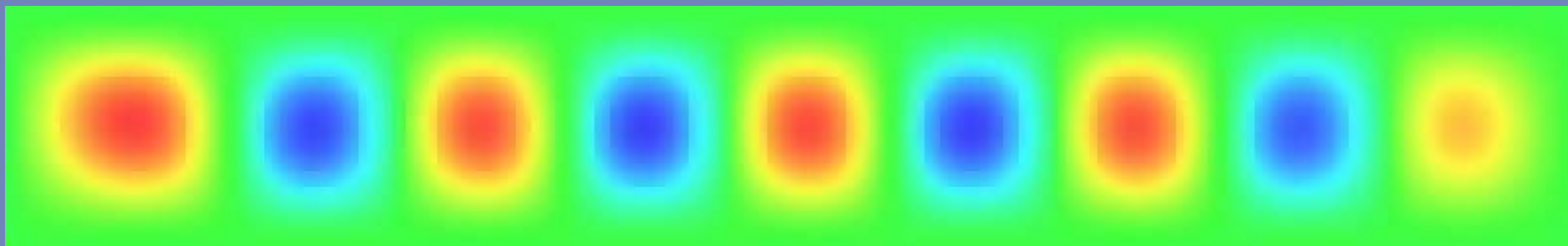
Stationary convection

BOUNDARY CONDITIONS

\vec{V}	T
Impenetrable, rigid, no-slip	Heating from below, lateral surface is adiabatic

PHYSICAL FIELDS

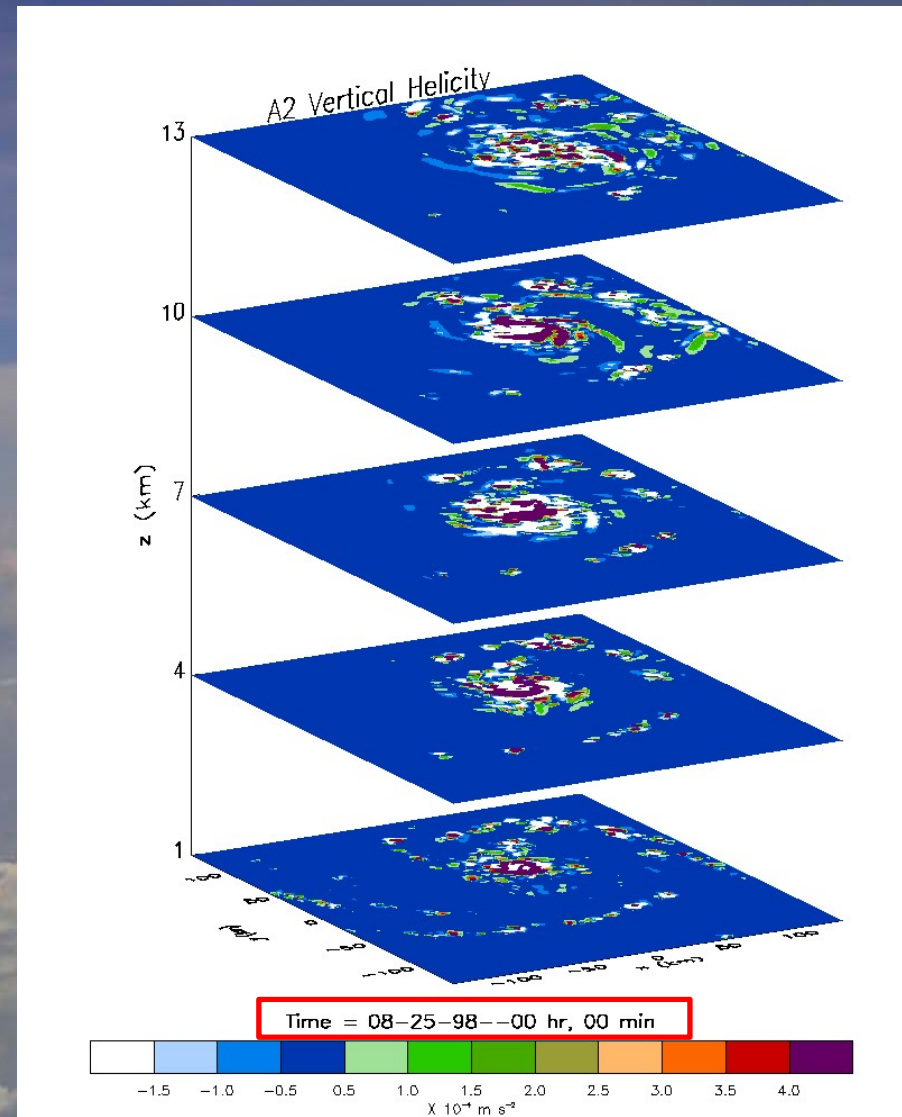
Temperature, azimuthal velocity, vorticity, stream function
 $T(r, z), \quad v(r, z), \quad \omega(r, z) = (\nabla \times \vec{V})_\phi, \quad \Psi(r, z)$



ROTATING CLOUD CONVECTION

The first updraft is generated by the initial 300 s local heating at low levels

08-22-98	12 h	Start
08-23-98	00 h	Genesis
08-23-98	04 h	TD ≈ 9 m/s
08-24-98	09 h	TS > 17 m/s
08-24-98	20 h	H > 32 m/s
08-25-98	03 h	MaxWind 43 m/s
08-25-98	12 h	Finish
date	time	72 h evolution



The vertical helicity field can serve as a kind of filter for recognizing rotating convective cells.

$$h = \mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\omega} = u \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + w \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

POSITIVE HELICITY:

cyclonic updrafts & anticyclonic downdrafts,

NEGATIVE HELICITY:

cyclonic downdrafts & anticyclonic updrafts

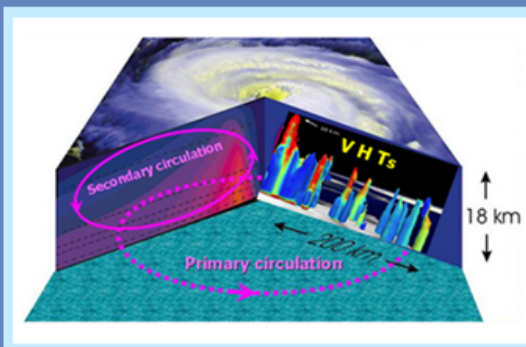
Expt. A2 [M06]. VORTICAL CONVECTION IN THE VERTICAL HELICITY FIELD

Спиральный тропический циклогенез: диагностика крупномасштабной вихревой неустойчивости



Galina Levina

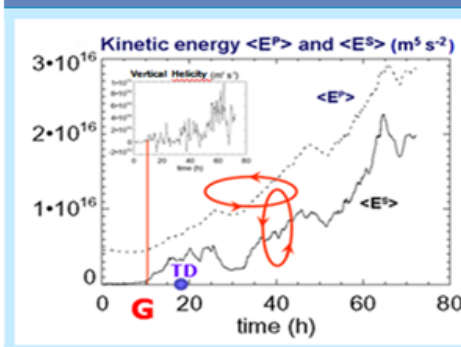
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia



Диагностика циклогенеза – определение момента «G»

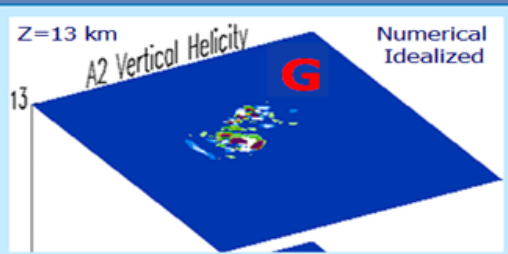
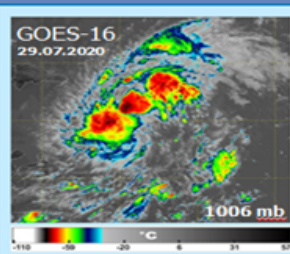
Облачно-разрешающий численный анализ эволюции кинетической энергии первичной циркуляции $EP(t)$ и вторичной циркуляции $ES(t)$ в формирующемся тропическом циклоне (ТЦ) позволяет определить момент времени **G**, когда начинается взаимное усиление циркуляций, и зарождающийся ТЦ становится энергетически самоподдерживающимся и усиливающимся – **появление неустойчивости/начало зарождения ТЦ**.

Необходимое условие для усиления вихря: мезомасштабная вихревая система должна стать спиральной – зацепление первичной и вторичной циркуляции, реализуемое вихревыми горячими башнями – vortical hot towers (**VHTs**). Дальнейшее развитие вихря приводит к **образованию тропической депрессии (TD)** в течение нескольких часов – предлагаемая интерпретация: **завершение стадии зарождения ТЦ**.



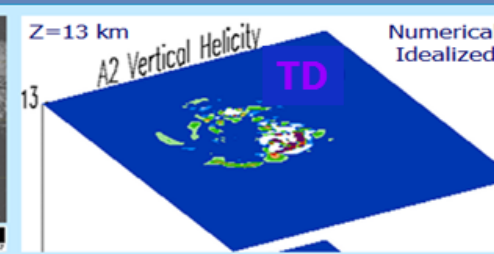
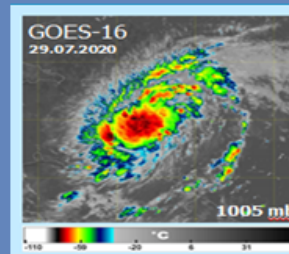
Практическая значимость: зарождение ТЦ будет определено **ТОЧНО И ЗНАЧИТЕЛЬНО РАНЬШЕ**, чем происходит в настоящее время.

Оперативная диагностика TC genesis и TD formation предлагается с помощью анализа GOES Imagery и при поддержке облачно-разрешающим численным моделированием. Подход основан на подобии конфигураций **VHTs** в поле температуры (спутниковые данные) и вертикальной спиральности (численное моделирование), типичных для начала вихревой неустойчивости (**время G**) и образования вихря депрессии (**время TD**).



Satellite Data
29 July 2020

Potential TC Nine,
Future Atlantic
Hurricane Isaias

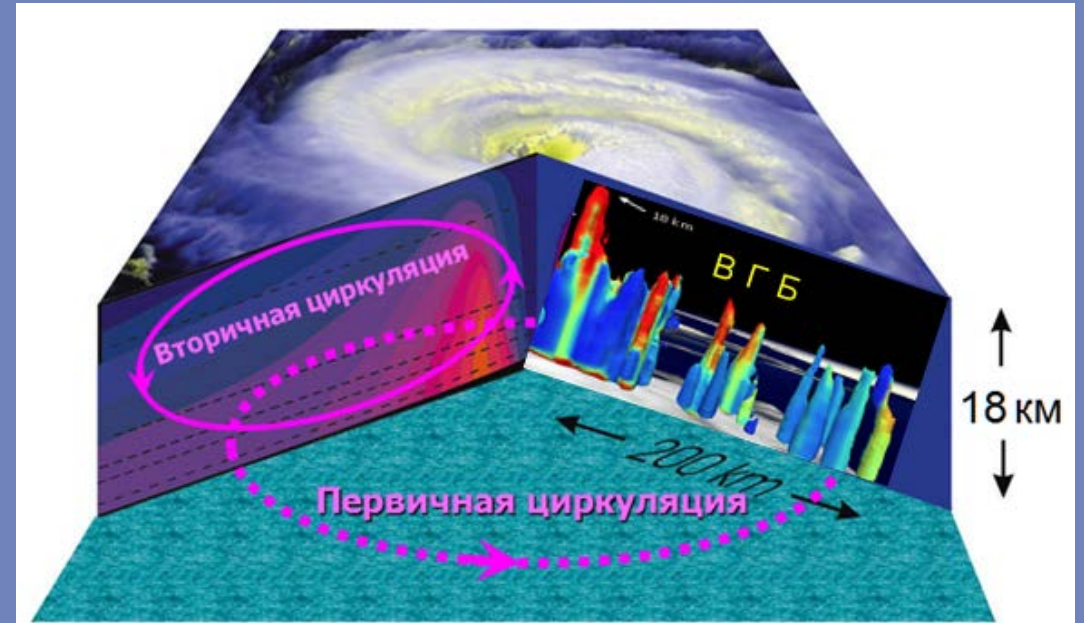


Турбулентное вихревое динамо в тропической атмосфере Земли

ВГБ играют ключевую роль в реализации турбулентного вихревого динамо в атмосфере. Они обеспечивают выполнение необходимых условий существования динамо-эффекта:

- генерацию спиральной турбулентности,
- объемное выделение тепла вдоль всей высоты тропосферы,
- формирование и поддержание вторичной трансверсальной циркуляции,
- зацепление первичной и вторичной циркуляции на мезомасштабах, создающее положительную «спиральную» обратную связь.

СХЕМА ВИХРЕВОГО ДИНАМО



ПОДДЕРЖАНИЕ И УСИЛЕНИЕ ВИХРЕВОЙ МЕЗОСИСТЕМЫ

Проведенные исследования позволяют выдвинуть гипотезу о двухмасштабном динамо: обратный переброс энергии реализуется от масштабов ВГБ, 10–30 км, непосредственно на мезомасштабы порядка сотен километров общей циркуляционной системы формирующегося ураганного вихря.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Мониторинг», № государственной регистрации 122042500031-8. Пост-обработка американских данных облачно-разрешающего численного моделирования осуществлялась автором при частичной поддержке Национального научного фонда США по гранту ATM-0733380.

Публикации, презентации, данные:

https://www.researchgate.net/profile/Galina_Levina ; <https://iki-rssi.academia.edu/GalinaLevina>

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ !**



Buck Island

N. Coast St. Croix

Green Cay