



РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Институт космических исследований Российской академии наук



КОНФЕРЕНЦИЯ ПАМЯТИ С.С. МОИСЕЕВА К 95-ЛЕТИЮ СО ДНЯ ЕГО РОЖДЕНИЯ MSS-2024
«ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОЛН, КОГЕРЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ»

ИКИ РАН, Москва, 26 ноября 2024 г.

HELICAL CYCLOGENESIS AS AN EXTREME THRESHOLD PHENOMENON IN A ROTATING STRATIFIED MOIST ATMOSPHERE

Галина Левина

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

levina@cosmos.ru

Спиральность и турбулентное динамо

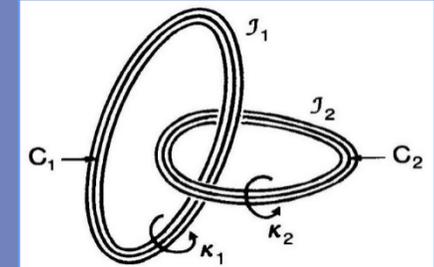
- H.-K. Moffatt and A. Tsinober (1992), *Annu. Rev. Fluid Mech.*, v. 24, 281-312;
- H. Keith Moffatt (2014), *PNAS*, v. 111, no. 10, 3663-3670

(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.

Концепция спирального циклогенеза

Galina Levina

Helical cyclogenesis as an extreme threshold phenomenon in a rotating stratified moist atmosphere

Frontiers in Earth Sciences. 2023. V. 11. 1296067 doi: 10.3389/feart.2023.1296067
<https://www.frontiersin.org/journals/earthscience/articles/10.3389/feart.2023.1296067/full>

An amazing story, 40 years long, is presented about how a “cool” physical theory (USSR-Russia, 1983) through joint Russian-American efforts (2006–2015) was brought to a stage that allowed Indian scientists to apply it (2023) to diagnose actually observed hurricane vortices.

The developed diagnostic approach allows operational meteorological forecasting hurricane danger dozens of hours earlier than it is done by other methods.

Концепция спирального циклогенеза основана на возможности обратного переноса энергии в трехмерной спиральной атмосферной турбулентности, который возбуждается интенсивной тепловой конвекцией облачного масштаба. Объясняет появление интенсивных крупномасштабных долгоживущих вихрей.



Механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере – турбулентное вихревое динамо. С.С. Моисеев и соавторы, ИКИ РАН, 1983.

Первое применение: теоретические оценки использованы для объяснения наблюдаемых вихревых явлений в атмосфере Юпитера после столкновения с кометой Шумейкер-Леви 9. В.Е. Фортов и соавторы, ИВТ РАН, 1996.

Обратный перенос энергии, возбуждаемый влажной конвекцией и поддерживающий крупные вихри, найден в высоких широтах Юпитера – данные миссии «Юнона». L. Siegelman et al., *Nature Physics*, 2022.

ВИХРЕВОЕ ДИНАМО: СССР–РОССИЯ, XX ВЕК

С 1984-1985 в нескольких научных центрах СССР была развернута исследовательская программа под руководством ИКИ с целью проверки гипотезы вихревого динамо:

- дальнейшее развитие теории вихревого динамо в термоконвективной турбулентности во вращающихся слоях жидкости – **Москва, Харьков** ;
- разработка и применение численных методов для анализа созданных теоретических моделей вихревого динамо – **Новосибирск, Пермь** ;
- теоретическое, экспериментальное и численное изучение условий и возможностей генерации интенсивных крупномасштабных долгоживущих вихревых структур при развитой турбулентной конвекции во вращающихся слоях неоднородно нагретой жидкости – **Пермь** ;
- **поиск возможностей управления крупномасштабной вихревой неустойчивостью** – **Пермь** ;
- экспедиции в тропическую зону Тихого океана – **несколько организаций по всей стране:**
 - «Тайфун–89» – 100 дней; 1 исследовательский корабль;
 - «Тайфун–90» – 100 дней; 4 исследовательских корабля.

Обнаружен поток энергии от мелких масштабов к крупным в предтайфунных состояниях тропической атмосферы – Препринт ИКИ № 1604, 1989.

К настоящему времени обратный каскад энергии найден только в атмосфере Юпитера (*Nature Phys.*, 2022).

Обзор: Levina G.V., Moiseev S.S., Rutkevich P.B. **Hydrodynamic alpha-effect in a convective system.** In: "*Advances in Fluid Mechanics, Nonlinear Instability, Chaos and Turbulence*". Vol. 2. P. 111–162. WITPress, Southampton. **2000.**

Турбулентное вихревое динамо

Несмотря на впечатляющие результаты для вихрей в атмосфере Юпитера (1996), 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.*

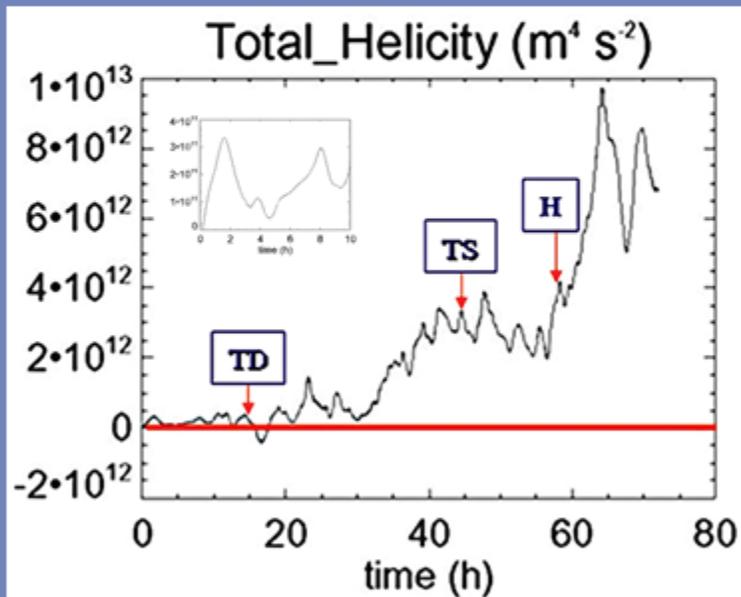
В 2006 г. применительно к тропической атмосфере Земли были начаты российско-американские исследования с участием специалистов–модельеров лучшего мирового уровня и использованием американских вычислительных ресурсов – см. обзор Levina (2018), *Open Journal of Fluid Dynamics*.

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 **$\Delta x = \Delta y = 3$ км, $\Delta z = 500$ м ;**
шаг по времени **10 мин, T = 72 ч.**

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

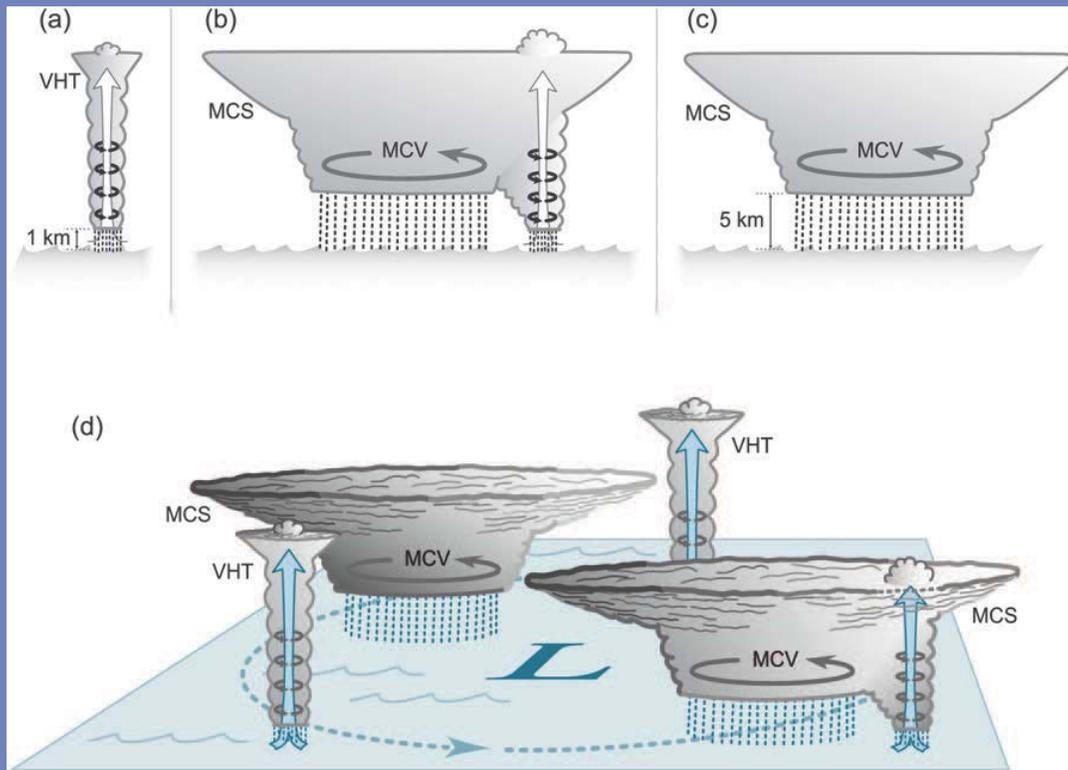
На внутренней панели приведен укрупненный график для генерации спиральности в начальные 10 часов.

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 (тропики), обеспечивающая турбулентное вихревое динамо



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

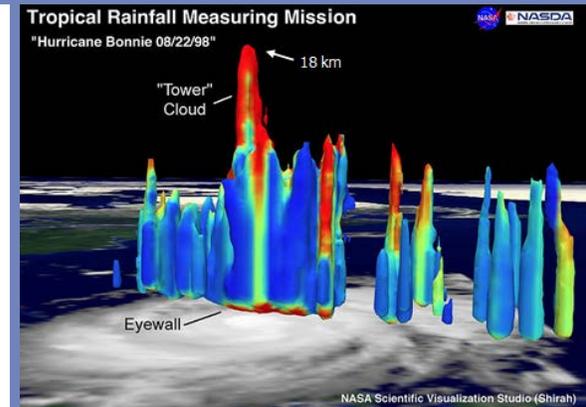
VHT – вихревая горячая башня,
MCS – мезомасштабный конвективный вихрь в средней тропосфере.
 Houze, R.A. Jr. (2010), *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 293–344.

**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 ≈ 14500 м.
 Внутри тропического шторма Карл (2010) между Гондурасом и Ямайкой, 14 сентября 2010.

Вихревая облачная конвекция, обеспечивающая турбулентное вихревое динамо

Впервые обнаружена в тропической атмосфере Земли:

2004 – E. Hendricks et al., *Journal of Atmospheric Sciences*

- За прошедшие 20 лет многократно подтверждена натурными наблюдениями и измерениями, спутниковыми данными и численным моделированием в разных странах (см. Refs. – Levina, 2023)

E. Hendricks (NCAR) был главным рецензентом статьи автора во *FrontiersEarthSci*, 2023

Найдена в квазитропических циклонах средних широт:

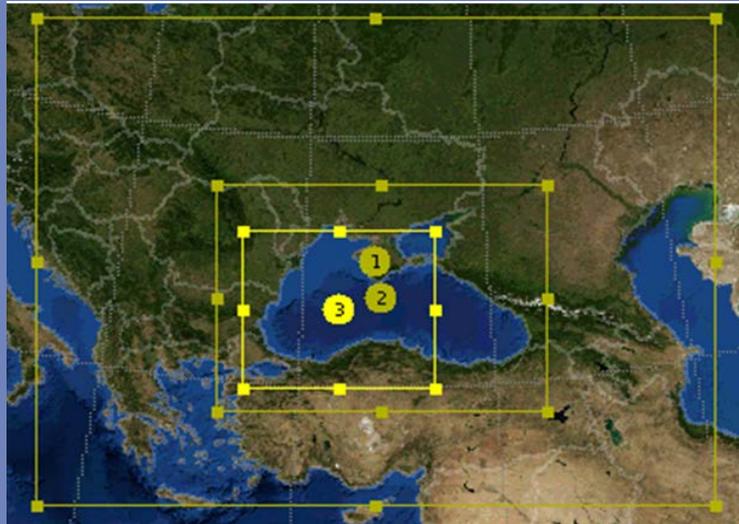
2019 – Г.В. Левина, Д.А. Яровая (**впервые**) – серия презентаций;

2022 – G. Kilroy et al., *Tropical Cyclone Research and Review*

В полярных мезоциклонах (ПМЦ):

Ждем ...

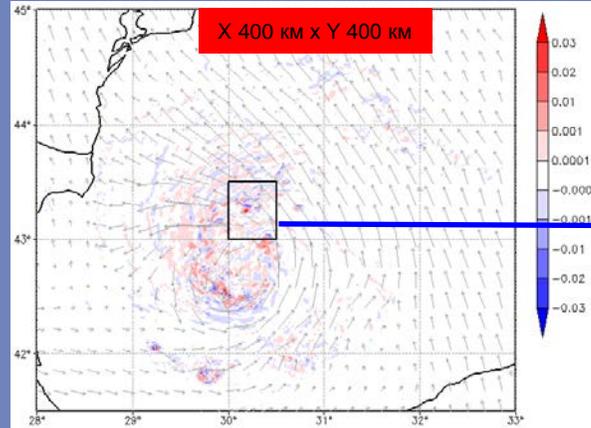
Вихревая облачная конвекция (средние широты), обеспечивающая турбулентное вихревое динамо



Черноморский квази-ТЦ, 25–29 сентября 2005 г.
 Численное моделирование WRF-ARW
 Центры расчетных сеток: 1 – 9 км, 2 – 3 км, 3 – 1 км.
 52 уровня по вертикали.
Явное разрешение конвекции.

Для верификации результатов
 проведены расчеты с увеличенным
 в 2 раза пространственным разрешением.

Левина Г.В., Яровая Д.А. Презентации и тезисы в РФ. 2019.



Вертикальная спиральность (цвет; m/s^2)
 и поле скорости ветра (стрелки; m/s)

12 UTC 27 сентября

Сечение
 $Z = 7,4 \text{ км}$

Укрупненный вид

$w \approx 12 \text{ м/с}$

$\omega_z \approx 0,003 \text{ с}^{-1}$

$h_z \approx 0,04 \text{ м/с}^2$

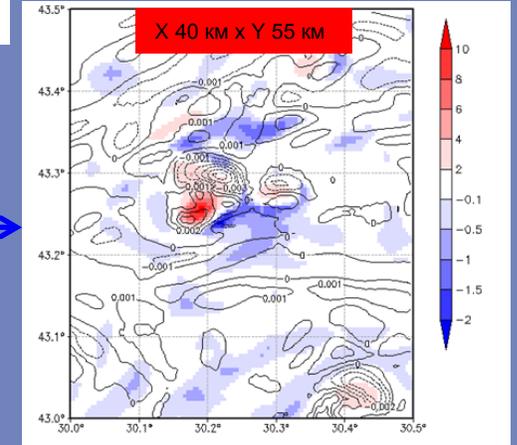
$$h = \mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\omega} = u \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + w \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

Плотность
 спиральности

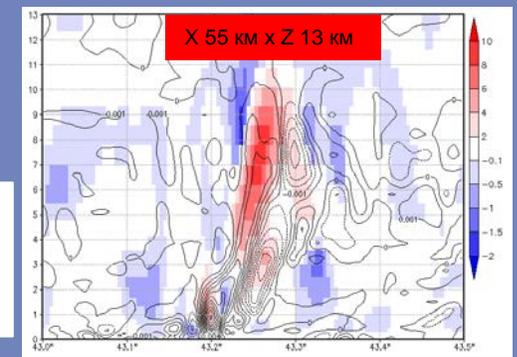
ВГБ локализованы в поле
 вертикальной спиральности
 (впервые предложено автором)

ω_z башни в 30 раз превышала
 фоновую завихренность !

ВГБ:
 $H \approx 10 \text{ км}$
 $L \approx 10 \text{ км}$



Вертикальная скорость (цвет; m/s) и
 Верт. завихренность (изолинии; $1/\text{с}$).



Меридиональный разрез по $30,2^\circ$ в.д.

Черноморские квазитропические циклоны 2021 г.

(квази-ТЦ не идентифицируются в реальном времени российскими метеослужбами)



Квази-ТЦ, наблюдавшийся 11–16 августа 2021 г.

Обсуждение на проф. форуме tstorms.org 12–15 августа 2021 г.:

J. Heming (Met Office, UK), **M. Lander** (UOG, Guam, USA), **D. Herndon** (CIMSS UW-Madison, USA), **S. Kusselson** (CIRA/CSU, USA), **K. Emanuel** (MIT, USA), **B. Trewin** (BoM, Australia), **P. Black** (NOAA-AOML, USA), **S. Dafis** (NOA/IERSD, Greece), **S. Hristova-Veleva** (JPL NASA, USA), **G. Levina** (IKI, Russia).

Farr, M.B. et al. An Analysis of the Synoptic Dynamic and Hydrologic Character of the **Black Sea Cyclone Falchion**. *Meteorology*, 2022, 1, 495–512.

Online: 2 December 2022. <https://doi.org/10.3390/meteorology1040031>

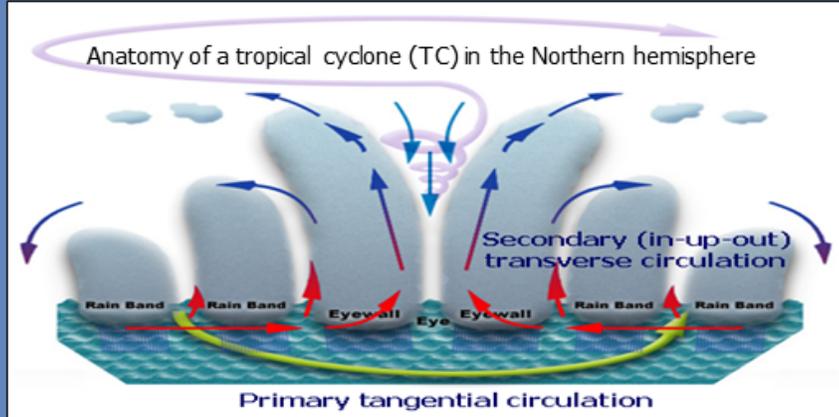


Квази-ТЦ, наблюдавшийся 03–05 октября 2021 г.

Обсуждение на проф. форуме tstorms.org 04–05 октября 2021 г.:

J. Heming (Met Office, UK), **C. Hebert** (StormGeo, Inc., USA), **S. Delgado** (NOAA-NHC, USA), **S. Bachmeier** (CIMSS UW-Madison, USA), **S. Dafis** (NOA/IERSD, Greece), **S. Hristova-Veleva** (JPL NASA, USA), **G. Levina** (IKI, Russia).

Турбулентное вихревое динамо в тропической атмосфере Земли

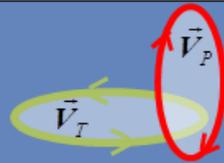


Во вращающейся неоднородной атмосфере влажно-конвективная турбулентность становится спиральной, подавляется поток энергии к масштабам диссипации → **возможность крупномасштабной (КМ) вихревой неустойчивости.**

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

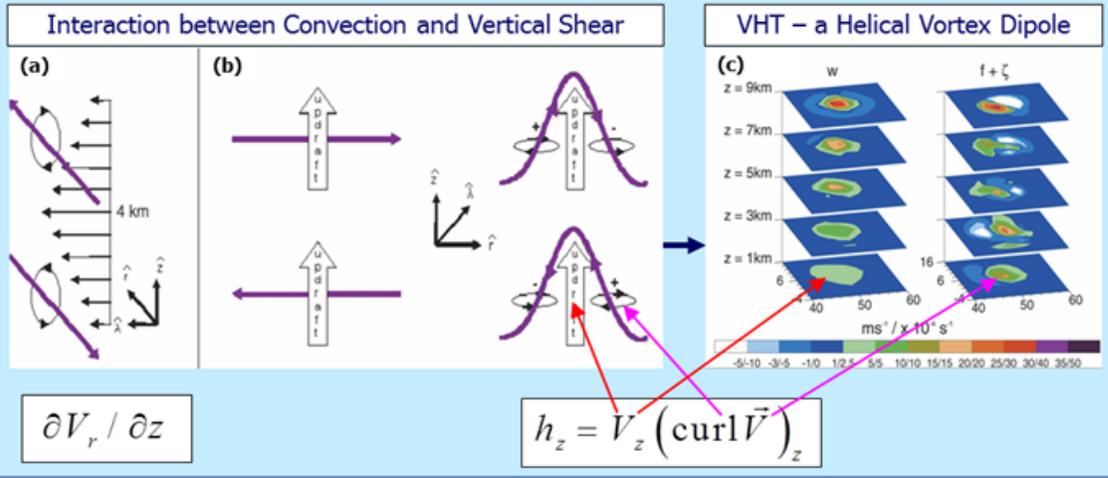
$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \Delta \right) \Delta \phi = Ra T + C \left[(\vec{e}\nabla)^2 - \Delta_{\perp} \right] \psi - Ta^{1/2} \frac{\partial \psi}{\partial z},$$

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.

Спиральный тропический циклогенез: диагностика крупномасштабной вихревой неустойчивости



Galina Levina

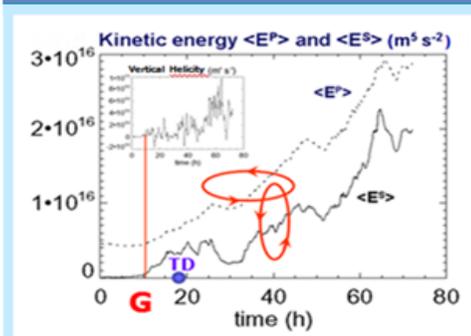
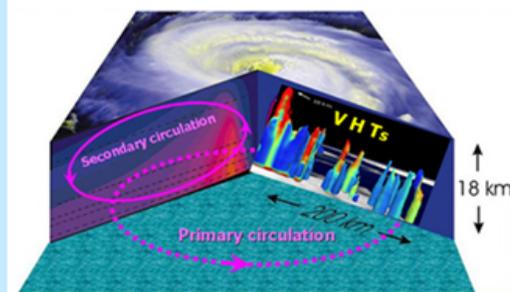
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia



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**.

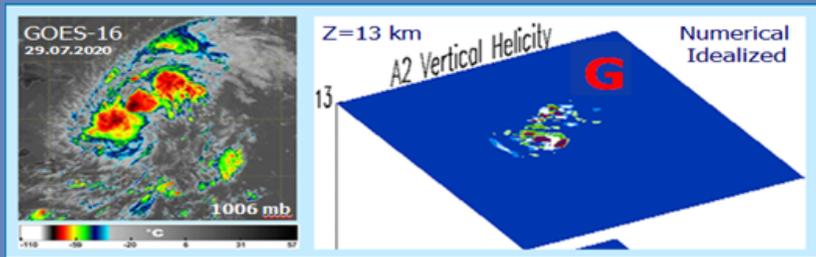


Зарождение ТЦ диагностируется по кинетической энергии

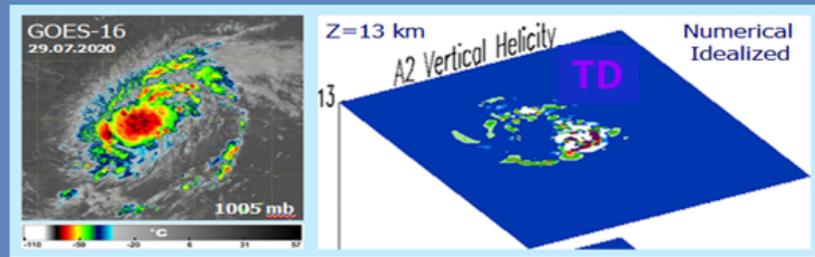
Применено для 3-х ТЦ в Индийском океане
Adv. Space Res., 2023

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



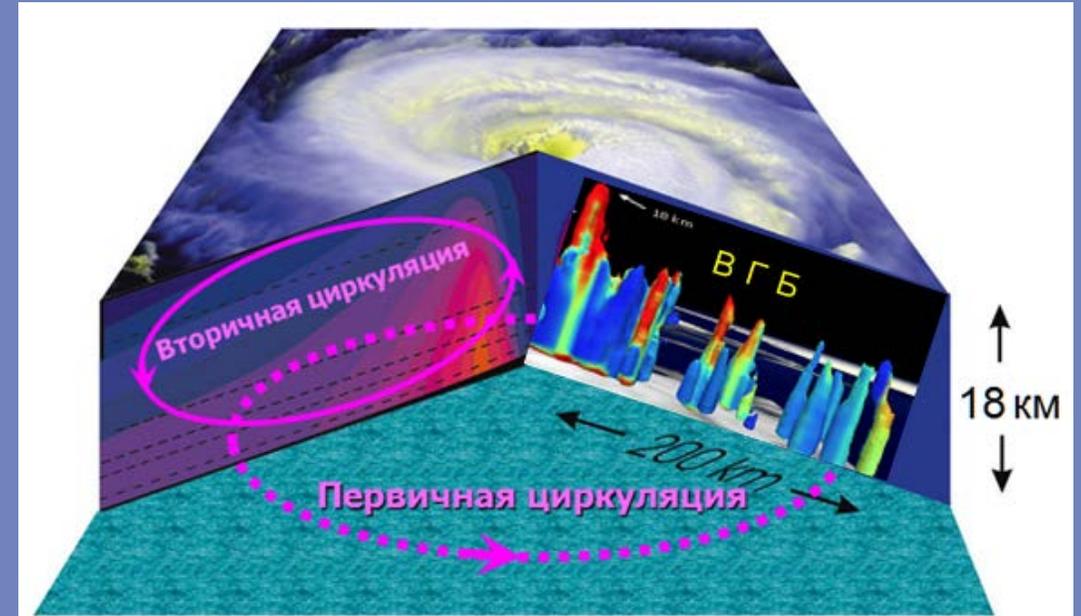
Турбулентное вихревое динамо в тропической атмосфере Земли

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.

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.

СХЕМА ВИХРЕВОГО ДИНАМО



ПОДДЕРЖАНИЕ И УСИЛЕНИЕ ВИХРЕВОЙ МЕЗОСИСТЕМЫ

Концепция спирального циклогенеза



Helical tropical cyclogenesis: a modern look based on cloud-resolving numerical analysis of self-organization of moist convective atmospheric turbulence

Galina Levina

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

This seminar will be webcast live at:
<http://www.fln.ucar.edu/it/mms/fl-live.htm>

Recorded seminar link can be viewed here:
<https://www.mmm.ucar.edu/events/seminars>

Thursday, 20 October 2016, 3:30 PM
Refreshments 3:15 PM
NCAR-Foothills Laboratory
3450 Mitchell Lane
Bldg 2 Main Auditorium, Room 1022



2016



LIVE: для атмосферных центров мира

ПРЕДЛОЖЕНИЕ О СОТРУДНИЧЕСТВЕ ОТ IMPERIAL COLLEGE

Submitted February 8, 2022

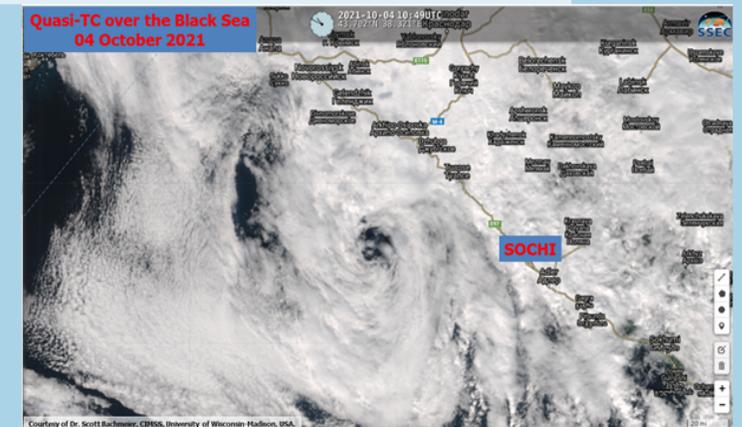
Imperial College London
Grantham Institute for Climate Change and the Environment

Climate Change and Hurricane-Like Extratropical Cyclones in the Black Sea

Galina Levina, Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The ongoing climate change is becoming more and more obvious. The situation changed dramatically in the summer of 2021, when several hurricane-like cyclones appeared near the densely populated areas of the coast of the Black and Azov Seas during August–October. The most impressive of them with an “eye” of the storm close to Sochi is shown in the Figure.

Thus, the above goal/title for my Fellowship has a strong motivation and can become a timely contribution to study of these dangerous atmospheric vortices.



ACADEMIC REFERENCES:

Keith Moffatt

Emeritus Professor of Mathematical Physics
University of Cambridge, UK
e-mail: hkm2@cam.ac.uk
personal webpage: www.keithmoffatt.com

Kerry A. Emanuel

Professor Emeritus of Atmospheric Science
Massachusetts Institute of Technology, USA
email: emanuel@mit.edu
web: <https://emanuel.mit.edu>

Оценка международного сообщества

Три интригующие загадки:

1. Почему удалось найти обратный перенос энергии в конвективной турбулентности на Юпитере, но до сих пор его не могут найти в атмосфере Земли?
2. Почему теория турбулентного вихревого динамо – это «гадкий утенок», никому не нужный и не интересный в ИКИ, – именно там, где она появилась?
3. Почему за прошедшие 20 лет с открытия вихревой облачной конвекции российские метеорологи упорно не хотят признать её существование?

Загадка 1. Обсуждается организация работ с участием автора в Азиатско-Тихоокеанском центре по изучению тайфунов в Шанхае, Китай.

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ !**



Buck Island

N. Coast St. Croix

Green Cay

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>