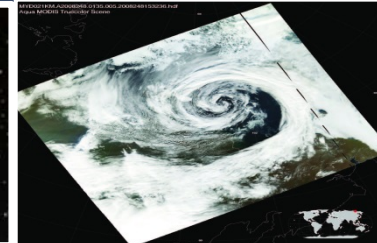




РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Институт космических исследований Российской академии наук



Двадцатая вторая международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
Москва, 11–15 ноября 2024

ДИАГНОСТИКА ПОЛЯРНЫХ МЕЗОЦИКЛОНОВ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ СПИРАЛЬНОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА

Галина Левина

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

levina@cosmos.ru

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

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.

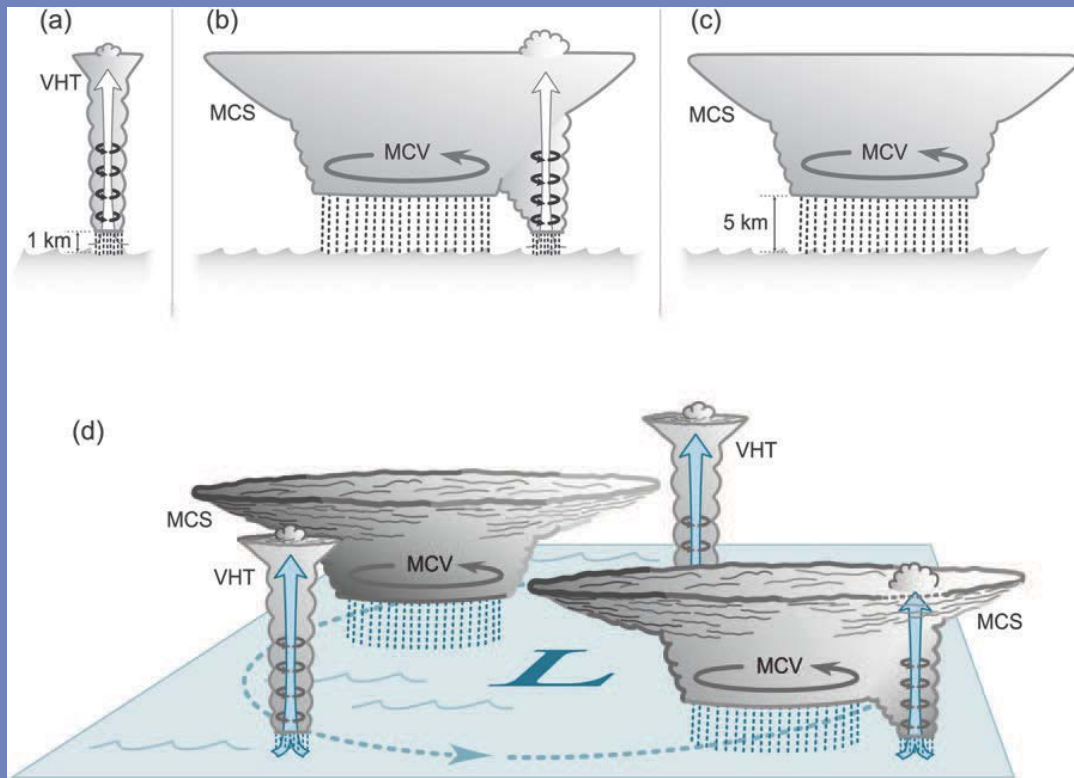


Механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере – турбулентное вихревое динамо. С.С. Моисеев и соавторы, ИКИ РАН, 1983.

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.

Вихревая облачная конвекция, обеспечивающая турбулентное вихревое динамо



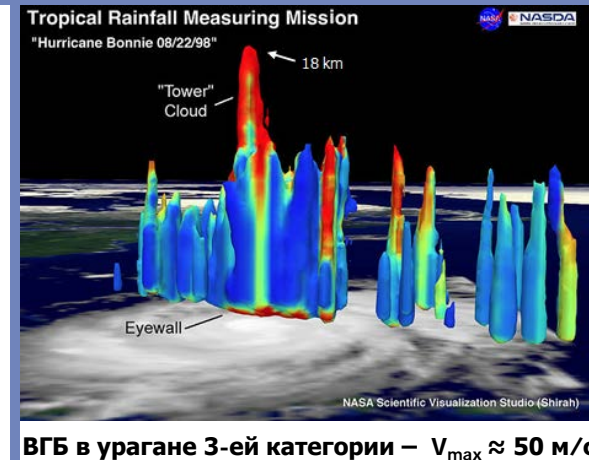
Жизненный цикл мезомасштабной конвективной системы (MCS) внутри развивающегося тропического циклона.

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

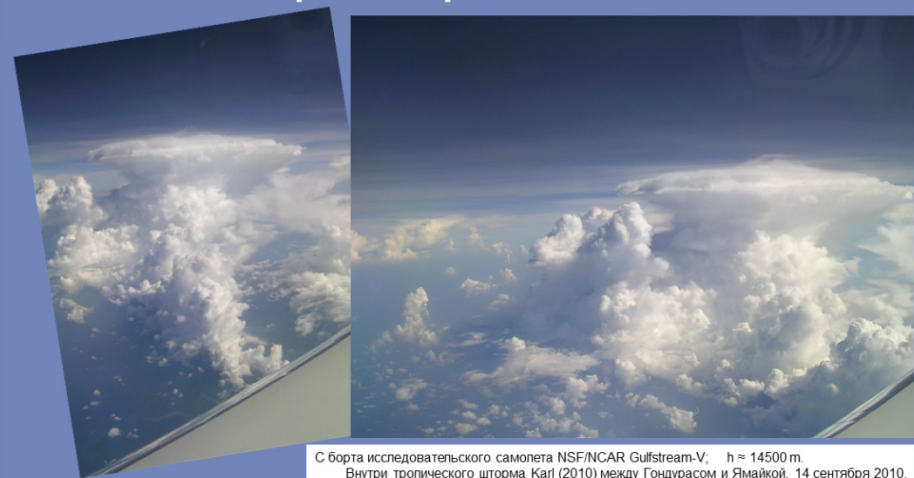
**Вихревые Горячие Башни (ВГБ)
 Vortical Hot Towers (VHTs)
 вращающиеся кучевые облака**

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).



Вихревая горячая башня



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)

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 ...

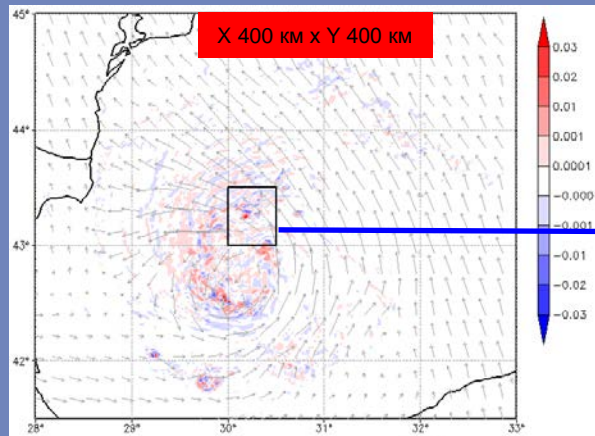
Вихревая облачная конвекция, обеспечивающая турбулентное вихревое динамо



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; м/с²) и поле скорости ветра (стрелки; м/с)

12 UTC 27 сентября

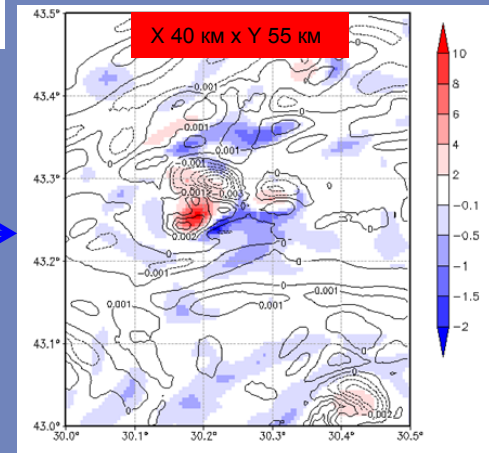
Сечение
 $Z = 7,4 \text{ км}$

Укрупненный вид

$w \approx 12 \text{ м/с}$

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

$h_z \approx 0,04 \text{ м/с}^2$



Вертикальная скорость (цвет; м/с) и Верт. завихренность (изолинии; 1/с).

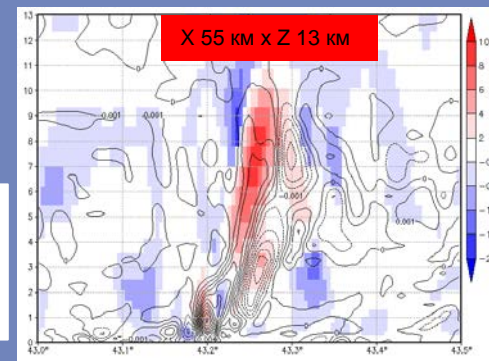
$$h = \mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\omega} = u \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + w \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

Плотность спиральности

ВГБ локализованы в поле вертикальной спиральности (впервые предложено автором)

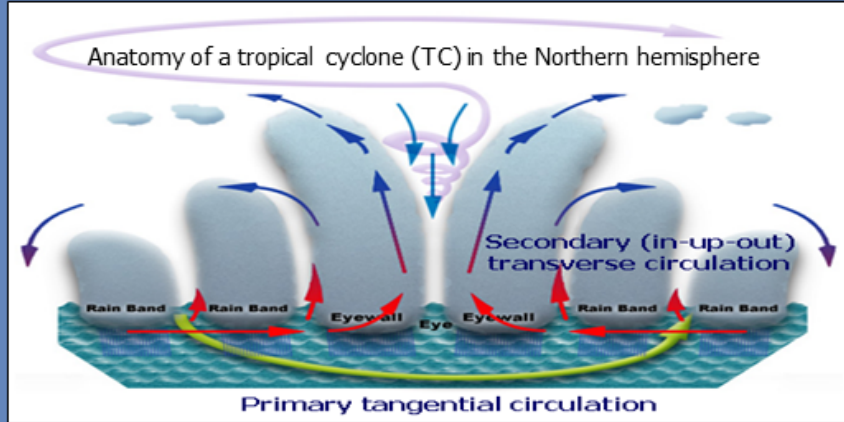
ω_z башни в 30 раз превышала фоновую завихренность !

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



Меридиональный разрез по 30.2° в.д.

Турбулентное вихревое динамо в тропической атмосфере Земли

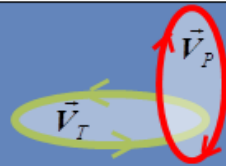


Во вращающейся неоднородной атмосфере влажно-конвективная турбулентность становится спиральной, подавляется поток энергии к масштабам диссипации → **возможность крупномасштабной (КМ) вихревой неустойчивости.**

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 !

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

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



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

Convective

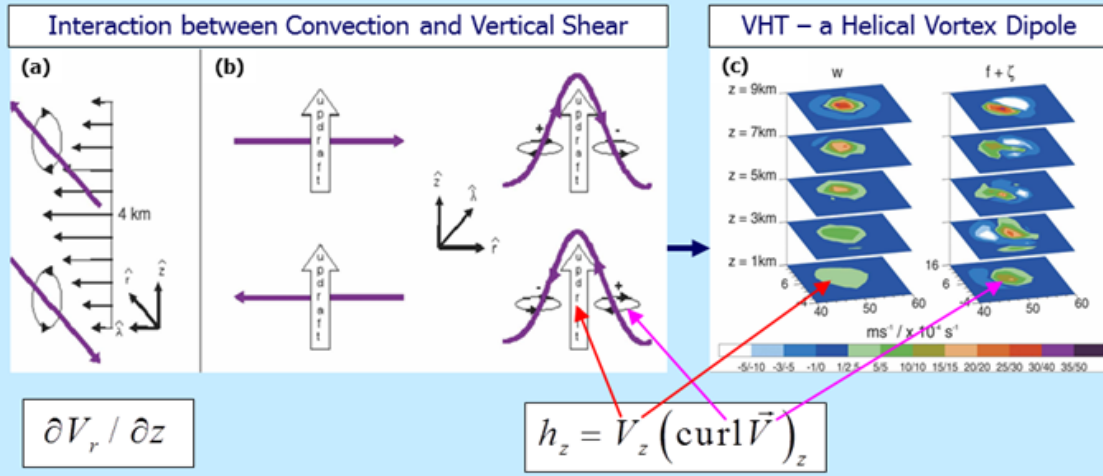
$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \Delta \right) \Delta \phi = Ra T + C \left[(\vec{e}\nabla)^2 - \Delta_{\perp} \right] \psi - Ta^{1/2} \frac{\partial \psi}{\partial z},$$

Helical

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

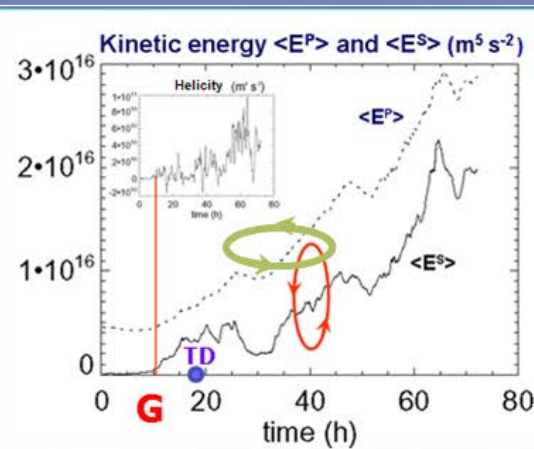
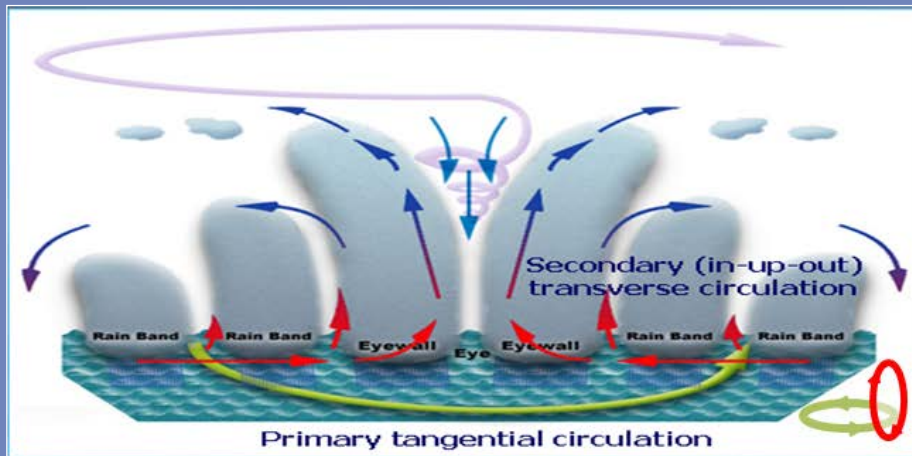
$$Pr = \frac{\nu}{\chi}, \quad Ra = \frac{g\beta Ah^4}{\nu\chi}, \quad C \propto \Omega A, \quad Ta = \frac{4\Omega^2 h^4}{\nu^2}$$

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.

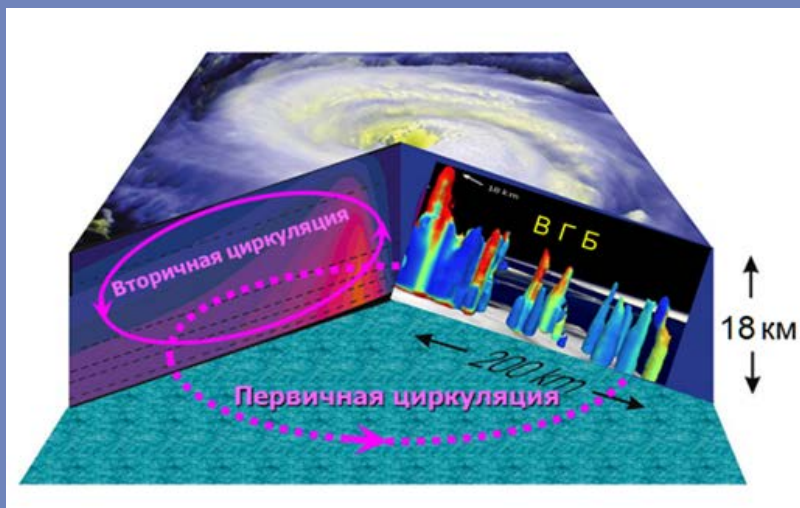
Диагностика зарождения тропических циклонов в атмосфере Земли



Диагностика циклогенеза – определение момента «G»

Облачно-разрешающий численный анализ эволюции кинетической энергии первичной циркуляции $E^P(t)$ и вторичной циркуляции $E^S(t)$ 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 циркуляций, реализуемое вихревыми горячими башнями – vortical hot towers (**ВГБ**). Дальнейшее развитие вихря приводит к **образованию тропической депрессии (ТД)** в течение нескольких часов – предлагаемая интерпретация: **завершение стадии зарождения ТЦ.**



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 циркуляций на мезомасштабах, создающее положительную «спиральную» обратную связь.

Зарождение ТЦ диагностируется по кинетической энергии

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

Диагностика зарождения тропических циклонов в атмосфере Земли

Негидростатическая версия численной модели атмосферы.
Горизонтальное разрешение 1–3 км.

1. Необходимо рассчитать по отдельности интегральную по всей расчетной области кинетическую энергию первичной (тангенциальной) и вторичной (трансверсальной) циркуляции в цилиндрических координатах:
 - $EP(t) = V^2/2$, где V – тангенциальная скорость,
 - $ES(t) = (U^2 + W^2)/2$, где U, W – радиальная и вертикальная скорость.
2. Затем построить график эволюции обеих энергий на одном рисунке, чтобы определить, когда начинается их взаимное усиление – как это показано на предыдущем слайде.

Спиральные характеристики: начальное формирование ТЦ прослеживается по эволюции интегральной вертикальной спиральности, характеризующей вихревую конвекцию.

Конфигурации вихревой конвекции в поле плотности вертикальной спиральности хорошо соответствуют аналогичным картинам ВГБ на инфракрасных снимках облачности.

Спиральные характеристики

helicity H of the vortex system was defined as the volume integral of the scalar product of velocity $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$ and vorticity $\text{curl} \mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$ vectors (Moffatt, 1969):

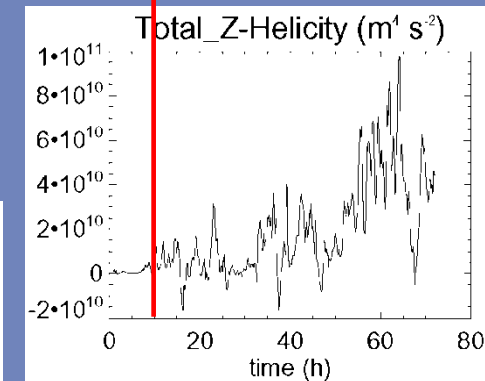
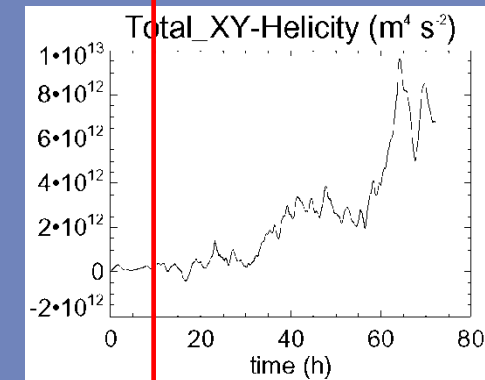
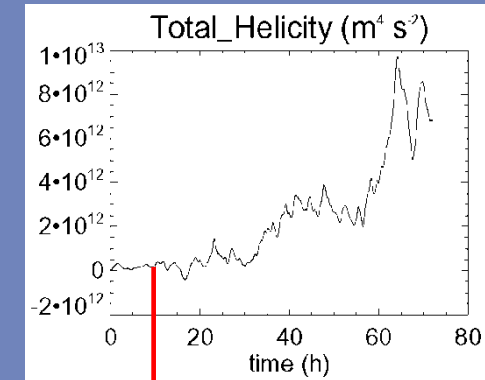
$$H = \int \mathbf{V} \cdot \text{curl} \mathbf{V} d\mathbf{r}. \quad (1)$$

The helicity density of the flow h (i.e., helicity values in each point of the finite-difference grid) was also important in our analysis

$$h = u \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + w \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right). \quad (2)$$

$$\langle H \rangle, \quad \langle H_{hor} \rangle, \quad \langle H_{ver} \rangle.$$

Красная линия отмечает время появления неустойчивости.
Интенсивная вихревая конвекция – ПРЕДВЕСТНИК неустойчивости!
Изменения горизонтальной спиральности – **результат** неустойчивости!



Применение к ПМЦ и общие замечания

Представленный в презентации анализ применим к среднеширотным квази-ТЦ и ПМЦ. На его основе могут быть интерпретированы результаты недавних работ:

- *Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Дурнева Е.А.* О критериях идентификации полярных мезоциклонов // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 20–33. doi: 10.52002/0130-2906-2022-4-20-33
- *Петриченко С.А., Калмыкова О.В., Козлов С.В., Кулижникова Л.К.* Использование композиции индексов конвективной неустойчивости для прогноза зарождения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России // Российская Арктика. 2023. Т. 5. № 2. С. 54–64. doi: 10.24412/2658-4255-2023-2-54-64

Вызывает глубокое удивление, что через 20 лет после открытия вихревой конвекции её по неизвестным причинам упорно игнорируют российские метеорологи.

Казалось бы само название «облачно-разрешающие» численные модели призывает явным образом учитывать поведение конвективных структур.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Мониторинг», № государственной регистрации 122042500031-8.

Публикации, презентации, данные:

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