



Москва, 13 ноября 2018

РОЛЬ ВИХРЕВОЙ ВЛАЖНОЙ КОНВЕКЦИИ В СОЗДАНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ВИХРЕВОГО ДИНАМО В АТМОСФЕРЕ

Г.В. Левина^{1,2}

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

² Межведомственный центр аналитических исследований РАН, Москва, Россия

levina@iki.rssi.ru



МАТЕРИАЛЫ ПО ТЕМЕ ДОКЛАДА

Доклад посвящен принципиально важным результатам, применимым в метеорологической практике для более ранней и точной диагностики зарождения тропических циклонов (ТЦ).

Достижение этого стало возможным только в ходе многолетнего российско–американского сотрудничества 2006-2018 гг.

СССР/Россия – теория турбулентного вихревого динамо, стратегия поиска новой неустойчивости и соответствующего анализа атмосферных данных;

США – открытие вихревой облачной конвекции в тропиках, лучший мировой уровень атмосферного численного моделирования высокого разрешения.

Опубликовано:

Levina, G. (2018) On the Path from the Turbulent Vortex Dynamo Theory to Diagnosis of Tropical Cyclogenesis. *Open Journal of Fluid Dynamics*, **8**, 86-114.

<https://doi.org/10.4236/ojfd.2018.81008>

Статьи, тезисы, презентации:

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

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



СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА

1. Крупномасштабные неустойчивости в турбулентности

- **Спиральность поля скорости**
- **Спиральность в атмосферных исследованиях**
- **Спиральность и турбулентное динамо**

2. Турбулентное вихревое динамо в тропической атмосфере

- **гипотетическая «вихредвижущая» сила**
- **и ее реализация на основе вихревой облачной конвекции**

3. Диагностика зарождения ТЦ на основе представлений о турбулентном вихревом динамо: реализация с помощью облачно-разрешающего численного моделирования

ПЕРСПЕКТИВЫ



КРУПНОМАСШТАБНЫЕ (ALPHA-LIKE) НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Происхождение:

Нарушение симметрии мелкомасштабной турбулентности

Примеры:

Спиральная турбулентность, возникающая в полях псевдовекторных сил – магнитном поле, поле силы Кориолиса, или под действием специального форсинга

- **Альфа-эффект в магнитной гидродинамике**

Steenbeck, Krause, Rädler (1966)

- **Турбулентное вихревое динамо – гидродинамический альфа-эффект**
(электрически непроводящая среда)

Моисеев, Руткевич, Сагдеев, Тур, Хоменко, Яновский (1983-1988)

Анизотропная турбулентность с нарушением инвариантности четности – генерируемая специальным форсингом

- **Анизотропный Кинетический Альфа (АКА)-эффект**

иллюстрирован 3D численными расчетами

Frisch, She, Sulem (1987)



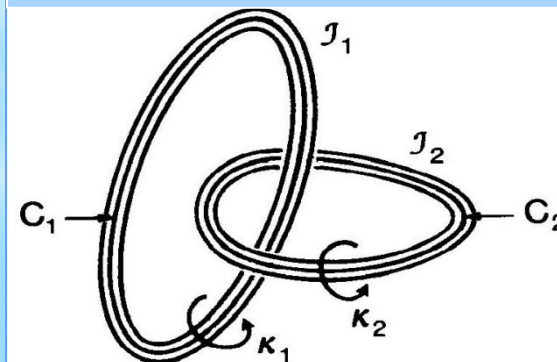
СПИРАЛЬНОСТЬ ПОЛЯ СКОРОСТИ

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

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,
- **$H \neq 0$ ослабляет поток энергии к масштабам диссипации и способствует переносу энергии из мелких масштабов в крупные – обратный каскад энергии.**

ПРИМЕРЫ [1,2]: $\langle \vec{V} \cdot \text{rot} \vec{V} \rangle$ - м/с² – 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.: Гидрометеонздат, 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.



СПИРАЛЬНОСТЬ И ТУРБУЛЕНТНОЕ ДИНАМО

Н.-К. Moffatt and A. Tsinober (1992), Annu. Rev. Fluid Mech., v. 24, 281-312;
Н. 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**.

(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 $\vec{\omega} = \text{curl } \vec{V}$,

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

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

инициировало поиск аналогов динамо-эффекта в непроводящих средах



СССР/Россия: ИКИ РАН Теория гидродинамического альфа-эффекта

**1983-1988 – в сжимаемой и несжимаемой жидкости,
в конвективной системе;**

**1983-1990е – адаптация теории к условиям тропического
циклогенеза**

Обзор исследований 1983-1999:

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.



ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АЛЬФА-ЭФФЕКТ В КОНВЕКТИВНОЙ СИСТЕМЕ: УРАВНЕНИЯ СРЕДНЕГО ПОЛЯ

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

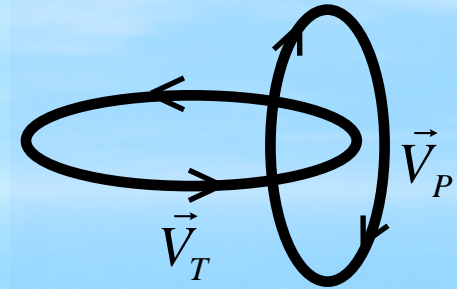
Convective

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

Helical

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

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



Крупномасштабный – (КМ) – спиральный вихрь

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

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

C – интенсивность спиральной обратной связи; зависит от фонового вращения Ω , интенсивности объемного тепловыделения Λ и свойств мелкомасштабной турбулентности.

Действие спиральной обратной связи ($C \neq 0$):

- C -слагаемые («вихредвижущая» сила) генерируют новую неустойчивость – спирально-вихревую,
- существует порог возбуждения новой неустойчивости,
- при увеличении интенсивности обратной связи порог понижается и
- увеличиваются горизонтальные масштабы конвективных структур.

$\Lambda \neq 0$ – внутреннее объемное тепловыделение является необходимым условием!
Постоянный градиент температуры недостаточен для КМ неустойчивости!



ИКИ

1. Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Тур А.В., Хоменко Г.А., Шукуров А.М. Физический механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере. Доклады АН СССР, **1983**, т.273, № 3, с. 549-553.
2. Лупян Е.А., Мазуров А.А., Руткевич П.Б., Тур А.В. Генерация крупномасштабных вихрей под действием спиральной турбулентности конвективной природы. ЖЭТФ, **1992**. Т.102. Вып.5(11). С.1540-1552.
3. Руткевич П.Б. Уравнение вихревой неустойчивости, обусловленной конвективной турбулентностью и силой Кориолиса. ЖЭТФ, **1993**. Т.104. С.4010-4020.
4. Лупян Е.А., Мазуров А.А., Руткевич П.Б., Тур А.В. Сценарий развития крупномасштабных вихревых структур в атмосфере. Доклады АН, **1993**. Т.329. С.720-722.

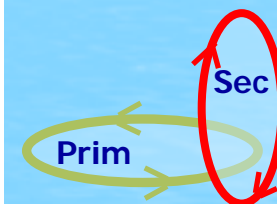
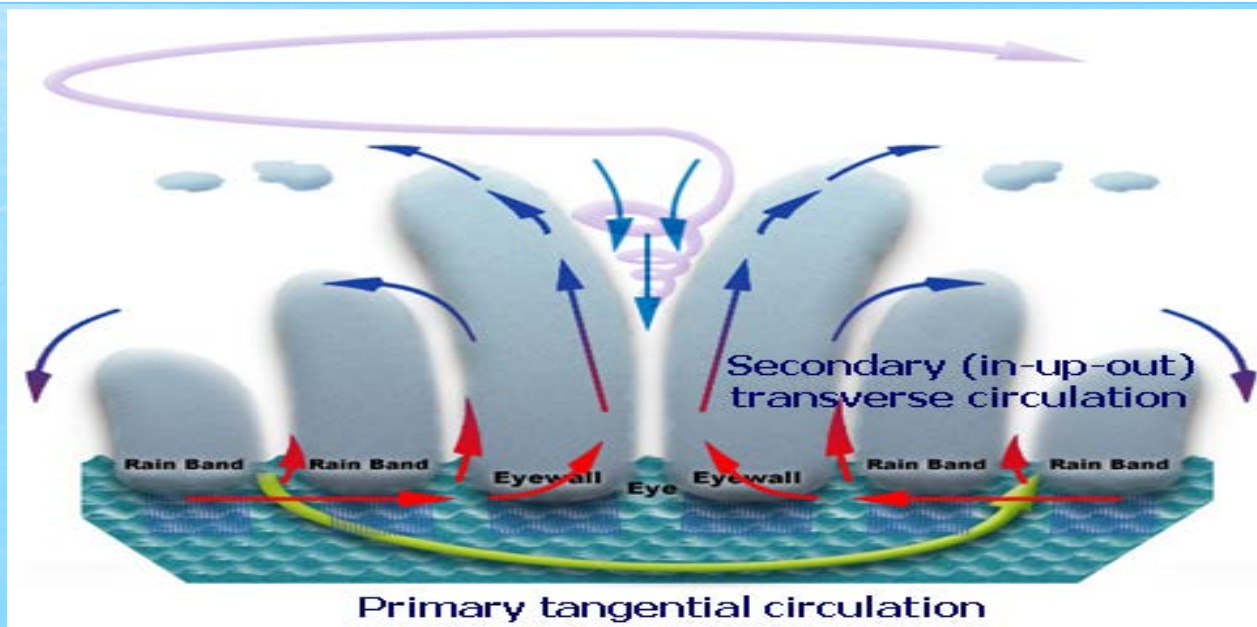
ГИПОТЕЗА О ТУРБУЛЕНТНОМ ВИХРЕВОМ ДИНАМО

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

Во вращающейся неоднородной атмосфере влажноконвективная турбулентность становится спиральной, подавляется поток энергии к масштабам диссипации → возможность КМ вихревой неустойчивости

Первый признак появления гипотетической крупномасштабной (КМ) неустойчивости – начало взаимного усиления первичной (тангенциальной) и вторичной (трансверсальной) циркуляции на мезомасштабах вихревой системы, вызванное действием спиральной обратной связи →
в этот момент времени формирующийся вихрь становится энергетически самоподдерживающимся.

1-е звено связи (трансверсальная-тангенциальная) формируется под действием силы Кориолиса. Как реализуется 2-е звено (тангенциальная-трансверсальная), чтобы замкнуть петлю обратной связи?
– **Ответ был получен в наших работах (2014-2018) о роли вихревой влажной конвекции!**





ВИХРЕДВИЖУЩАЯ СИЛА

По аналогии со средней электродвижущей силой в эффекте МГД-динамо – C - слагаемые в уравнениях вихревого динамо, ответственные за создание спиральной обратной связи,

могут быть интерпретированы как «вихредвижущая» сила $C \vec{f}$

$$C \propto \Omega \Lambda$$

 Ω

- вращение слоя

 Λ

- внутреннее тепловыделение

$$\vec{f} = \left\{ \frac{\partial v}{\partial z}, \quad -\frac{\partial u}{\partial z}, \quad \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right\}$$

Вертикальный сдвиг Вертикальная
горизонтальной скорости завихренность

- **накачивает энергию в систему,**
- **z -компонента (вертикальная завихренность!) необходима для замыкания петли обратной связи между горизонтальной и вертикальной циркуляцией в формирующемся вихре**

Вихредвижущая сила параметризует взаимодействие между вертикальным сдвигом горизонтального ветра и ВИХРЕВОЙ влажной конвекцией (открытой в 2004 г.)



ВИХРЕВЫЕ ГОРЯЧИЕ БАШНИ – ВГБ

Hendricks E. A., Montgomery M. T., and Davis C. A. 2004, *J. Atmos. Sci.*, 61, 1209-1232

The **VORTICAL** nature of atmospheric moist convection in the tropical zone was discovered by near-cloud-resolving **numerical simulation** – Vortical Hot Towers – VHTs

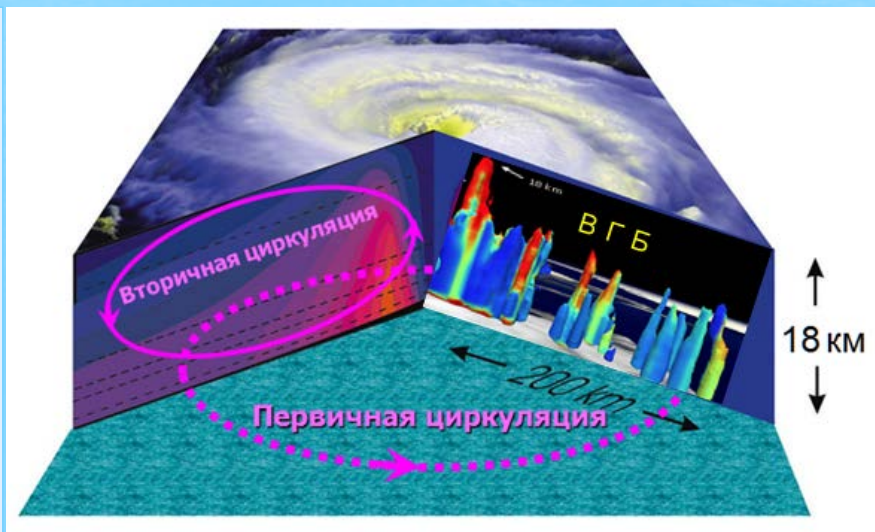
Reasor P. D., Montgomery M. T., and Bosart L. F. 2005, *J. Atmos. Sci.*, 62, 3151-3171

The first **observational evidence** that convective bursts have the vortical nature was obtained by aircraft measurements in the tropical atmosphere

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).





РОССИЙСКО-АМЕРИКАНСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

1. Левина Г.В., Монтгомери М.Т.
О первом исследовании спиральной природы тропического циклогенеза. *Доклады АН, Геофизика*, **2010**. Т. 434, № 3. С. 401-406.
2. Levina G.V., Montgomery M.T. Helical scenario of tropical cyclone genesis and intensification. *Journal of Physics: Conference Series*, **2011**. V. 318, 072012.
3. Левина Г.В., Монтгомери М.Т.
Численная диагностика тропического циклогенеза на основе гипотезы о спиральной самоорганизации влажно-конвективной атмосферной турбулентности. *Доклады АН, Геофизика*, **2014**. Т. 458, № 2. С. 214-219.
4. Levina G.V., Montgomery M.T. Tropical cyclogenesis: a numerical diagnosis based on helical flow organization. *Journal of Physics: Conference Series*, **2014**. V. 544, 012013.
5. Levina G.V., Montgomery M.T. When will cyclogenesis commence given a favorable tropical environment? To the 30th anniversary of the hypothesis on the turbulent vortex dynamo and dedicated to the memory of Soviet-Russian scientist Professor Semen Samoilovich Moiseev. *Procedia IUTAM*, **2015**. V. 17. P. 59-68.

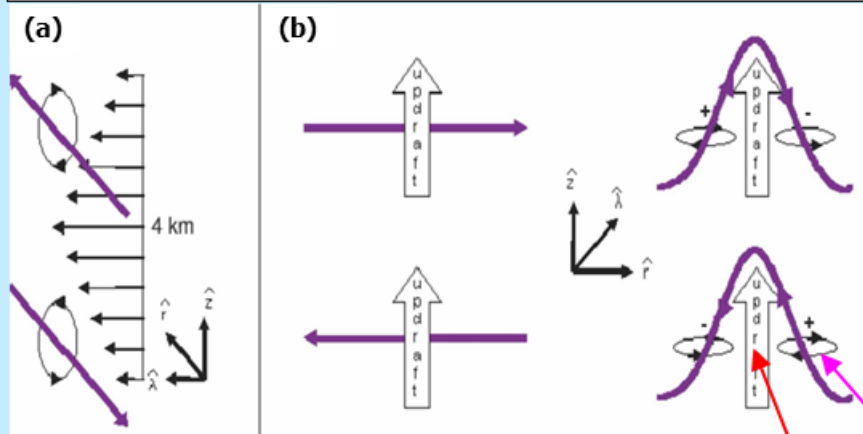


ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ ГОРЯЧЕЙ БАШНИ : ГЕНЕРАЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЗАВИХРЕННОСТИ И СПИРАЛЬНОСТИ

Montgomery M.T., Nicholls M.E., Cram T.A., Saunders A.B. 2006, *J. Atmos. Sci.*, 63, 355-386 – [M06]

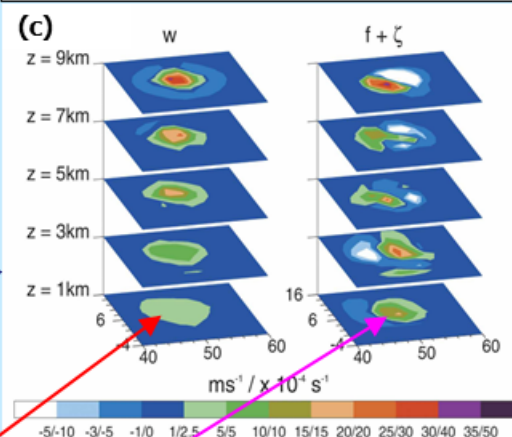
Levina G. 2018, *Open Journal of Fluid Dynamics*, 8, 86-114.

Взаимодействие конвекции и сдвига ветра



$$\partial V_r / \partial z$$

ВГБ – вихревой диполь



$$h_z = V_z (\text{curl} \vec{V})_z$$

ВГБ является спиральной
'по определению'

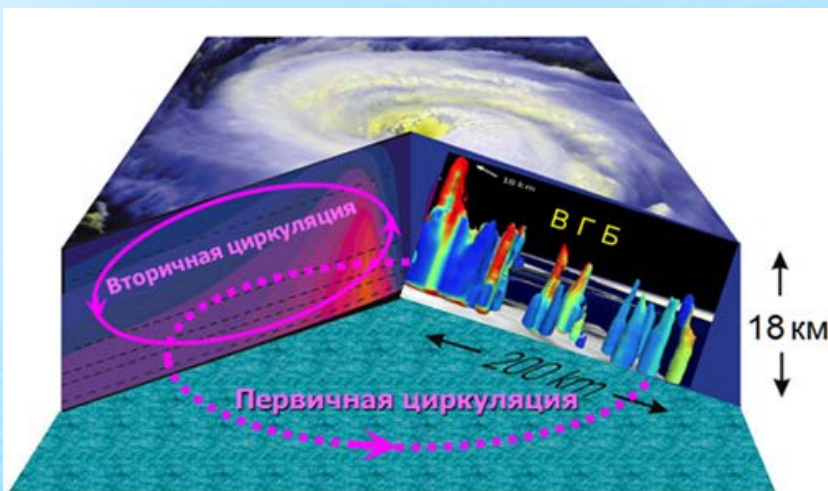
Комбинация рисунков из работ Montgomery et al., 2006 и Levina, 2018. Генерация вертикальной завихренности внутри мезомасштабного конвективного вихря (МКВ). Лиловыми линиями показаны вихревые нити. (a) Радиальная завихренность, генерируемая профилем вертикального сдвига скорости в начальном МКВ. (b) Восходящий поток деформирует радиальную вихревую нить, поднимая ее вверх и генерируя вихревой диполь с отрицательной и положительной относительной завихренностью. (c) Вертикальная скорость (m/s) и абсолютная вертикальная завихренность ($\times 10^{-4}$ 1/s) глубокой облачной конвекции.



ДИАГНОСТИКА ЗАРОЖДЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Когда формирующийся вихрь становится энергетически самоподдерживающимся?

Во вращающейся неоднородной атмосфере **влажноконвективная турбулентность становится спиральной**, происходит нарушение зеркальной симметрии, 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 (MBC) становится спиральной**: происходит зацепление тангенциальной и трансверсальной циркуляции, которое осуществляется конвективными структурами облачных масштабов – вихревыми горячими башнями (ВГБ);
- Спиральность **MBC**, которая является количественной мерой зацепления (верхняя панель), становится существенно отличной от нуля и нарастающей.



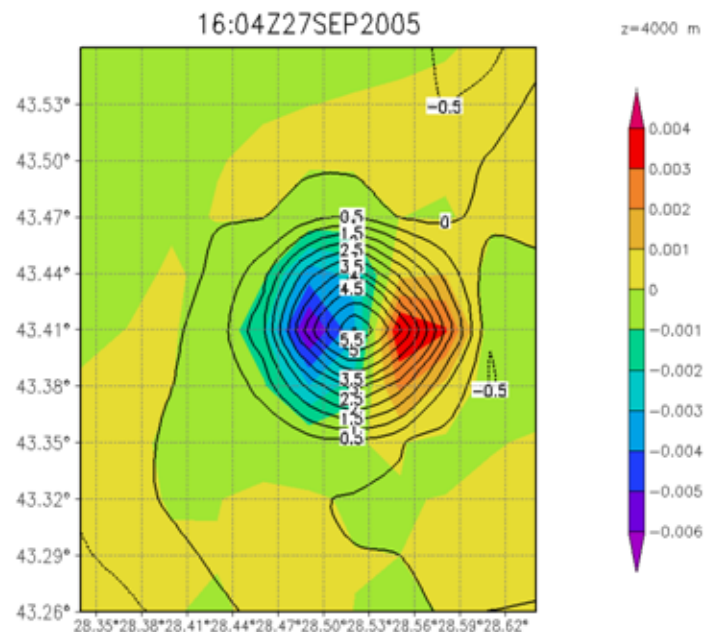
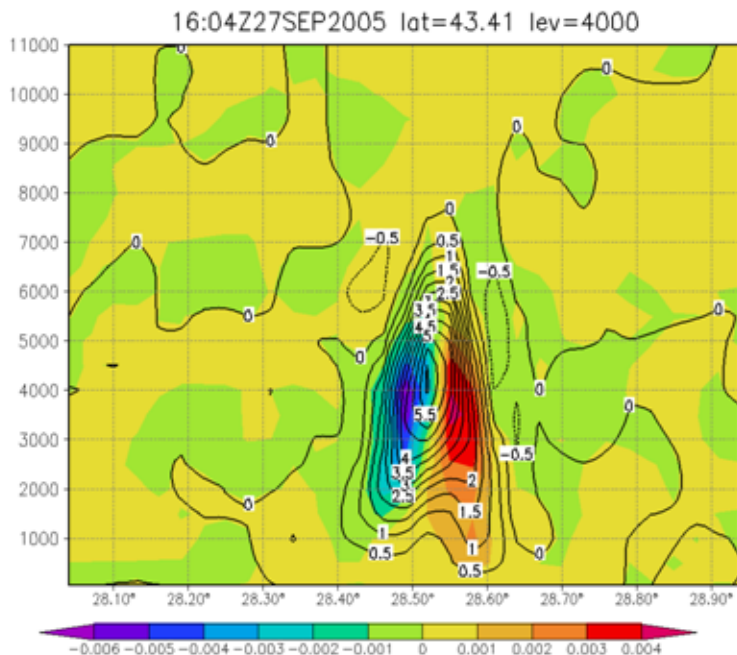
- В продолжающихся российско-американских исследованиях изучаются еще два сценария зарождения ТЦ (М.Е. Nicholls and M.T. Montgomery, 2013. An examination of two pathways to tropical cyclogenesis occurring in idealized simulations with a cloud-resolving numerical model. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5999–6022). В этой работе применена более новая версия модели атмосферы RAMS и более высокое горизонтальное (1-2 км) и вертикальное разрешение (200 м). М. Е. Nicholls входит в группу разработчиков модели RAMS с момента появления ее первой версии, что значительно расширяет возможности для анализа и тестирования.
- Начаты работы по реализации предложенной диагностики силами российских ученых и с использованием отечественных вычислительных ресурсов. В этих целях выбрана WRF-реализация для нескольких недавно наблюдавшихся тропических циклонов.

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

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !



ВИХРЕВАЯ ОБЛАЧНАЯ БАШНЯ В ЧЕРНОМОРСКОМ КВАЗИ-ТЦ (2005)



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.

Моделирование выполнено в декабре 2010 г.