



РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Институт космических исследований Российской академии наук



Двадцатая международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
Москва, 14–18 ноября 2022

КВАЗИТРОПИЧЕСКИЕ ЦИКЛОНЫ В ЧЕРНОМ МОРЕ (2002–2021)

Галина Левина

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

levina@cosmos.ru

МОТИВАЦИЯ

**ТЕОРИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ВИХРЕВОГО ДИНАМО,
ПРЕДЛОЖЕННАЯ УЧЕНЫМИ ИКИ РАН**

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ
К ПРОЦЕССАМ ФОРМИРОВАНИЯ
КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ**

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

С 1983 ТЕОРИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ВИХРЕВОГО ДИНАМО, ИКИ РАН

Физический механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере

Моисеев С.С., Сагдеев Р.З., Руткевич П.Б., Тур А.В., Хоменко Г.А., Шукуров А.М., Яновский В.В., Лупян Е.А., Мазуров А.А.

1996 ПЕРВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОЦЕНОК (1983), ОИВТ РАН, Фортов В.Е., Гальбурт В.А., Гнедин Ю.Н., Иванов М.Ф., Ивлев А.В., Клумов Б.А.
Механизм образования крупномасштабных возмущений в атмосфере Юпитера, вызванных падением фрагментов кометы Шумейкер-Леви 9 (1994).

2022 ОБНАРУЖЕН ОБРАТНЫЙ КАСКАД ЭНЕРГИИ В АТМОСФЕРЕ ЮПИТЕРА (ВИХРЕВОЕ ДИНАМО – !?), USA–France–Italy, Lia Siegelman et al.
JUNO's MISSION: Moist convection drives an upscale energy transfer at Jovian high latitudes. *Nature Physics* <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01458-y>.

2004–2006 ОТКРЫТИЕ ВИХРЕВОЙ ОБЛАЧНОЙ КОНВЕКЦИИ В ТРОПИКАХ, США

Vortical Hot Towers – VHTs (2004); предложен новый сценарий тропического циклогенеза – **самоорганизация вихревой конвекции** (2006).
Montgomery M.T., Nicholls M.E., Cram T.A., Saunders A.B.

2006 ЧИСЛЕННАЯ ДИАГНОСТИКА СПИРАЛЬНО-ВИХРЕВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ, ИМСС УрО – ИКИ РАН, Левина Г.В., Бурылов И.А.

Численный анализ математической модели вихревого динамо; **предложена численная диагностика крупномасштабной спирально-вихревой неустойчивости.**

С 2006 ЧИСЛЕННАЯ ДИАГНОСТИКА ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА, РОССИЙСКО-АМЕРИКАНСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Предложена ранняя и точная диагностика зарождения тропических циклонов – атмосферное облачно-разрешающее идеализированное численное моделирование (2014–2015). Левина Г.В., Монтгомери М.Т.

2022 ДИАГНОСТИКА ВПЕРВЫЕ ПРИМЕНЕНА ДЛЯ НАБЛЮДАВШИХСЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ (ТЦ), ИНДИЯ

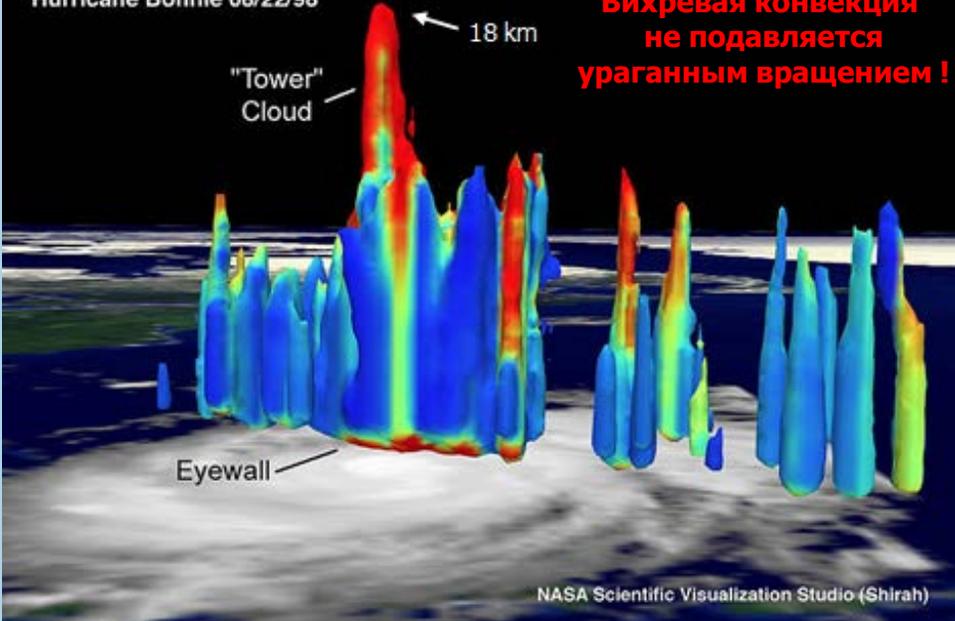
Выполнена диагностика зарождения 3-х тропических циклонов в Индийском океане с помощью атмосферного облачно-разрешающего численного моделирования. Munsri A., Kesarkar A.P., Bhate J.N., Rajasree V.P.M., Kutty G. *Advances in Space Research*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.10.004>

2020–2022 ОПЕРАТИВНАЯ ТОЧНАЯ ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА (ЧИСЛЕННАЯ + СПУТНИКОВАЯ), ИКИ РАН, Левина Г.В.

Предложена диагностика крупномасштабной спирально-вихревой неустойчивости по двум физическим полям из независимых источников: полю спиральности (численное моделирование) и температуры (инфракрасные снимки облачности). *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2022, <https://doi.org/10.48612/fpg/vaxg-xdmv-11pn>

Tropical Rainfall Measuring Mission

"Hurricane Bonnie 08/22/98"



Вихревая конвекция не подавляется ураганным вращением!

Вихревые Горячие Башни (ВГБ) Vortical Hot Towers (VHTs)

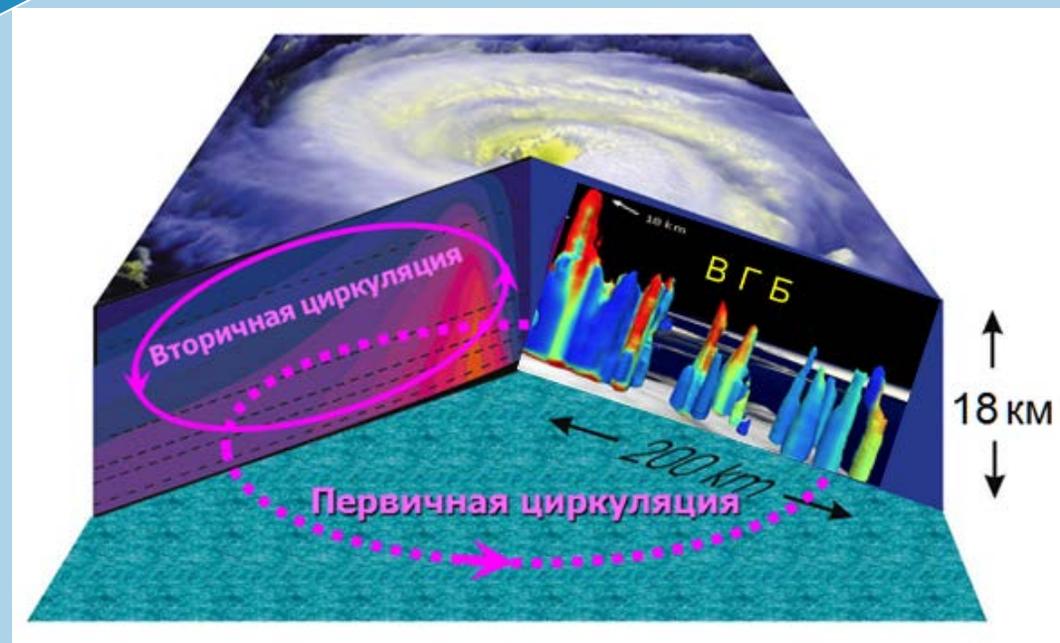
вращающиеся кучевые облака
Термин «ГОРЯЧИЕ» связан не с температурой, а с **ВЫДЕЛЕНИЕМ СКРЫТОГО ТЕПЛА** за счет фазовых переходов влаги по высоте башни (водяной пар – вода – лед)

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 – $V_{\max} \approx 50 \text{ м/с}$

ВИХРЕВАЯ ОБЛАЧНАЯ КОНВЕКЦИЯ → ДИНАМО-ЭФФЕКТ

СХЕМА ВИХРЕВОГО ДИНАМО



Семейство ВГБ – динамические «скрепки»:
зацепляют циркуляции на мезомасштабах, создавая положительную обратную связь на протяжении всего жизненного цикла ТЦ.

ПОДДЕРЖАНИЕ И УСИЛЕНИЕ ВИХРЕВОЙ МЕЗОСИСТЕМЫ

Только что диагностированный
Tropical Storm Karl
14.09.2010
Вид с высоты 14–15 км



Внутри TS Karl (2010)

Натурный эксперимент NSF/NCAR PREDICT–2010
PRE-Depression Investigation of Cloud systems in the Tropics
Saint Croix Island, U.S.V.I.; 15 августа – 30 сентября 2010
Фото автора

Уровень моря: Pre-Karl



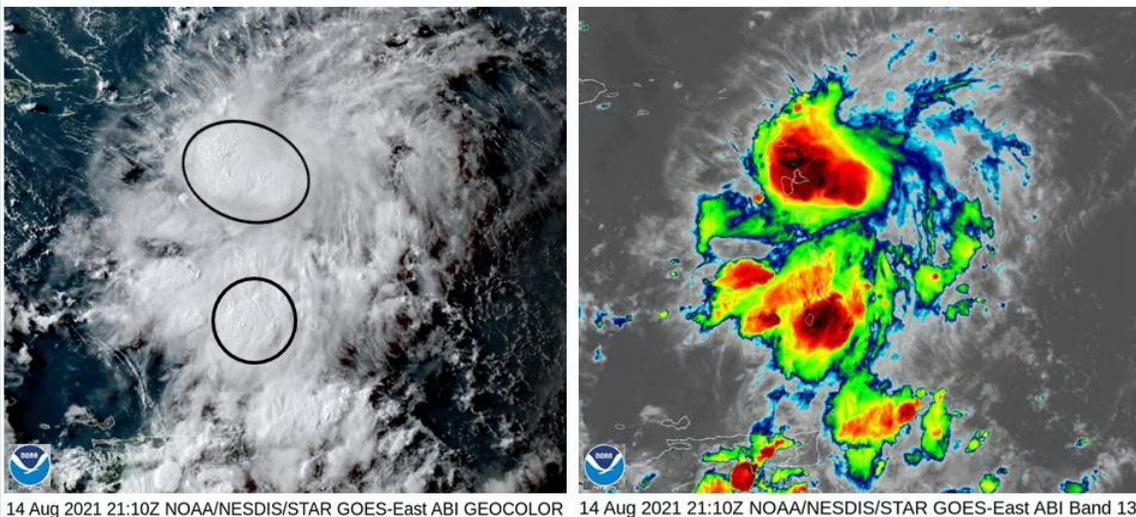
Будущий Ураган Karl 11.09.2010
За 3 дня до диагностированного TS



ВИХРЕВАЯ ОБЛАЧНАЯ КОНВЕКЦИЯ В КАРИБСКОМ МОРЕ

ПОЯВЛЕНИЕ БАШЕН – ALARM: ВОЗМОЖНО ВИХРЕВОЕ ДИНАМО!

Вихревые горячие башни в тропическом шторме Grace

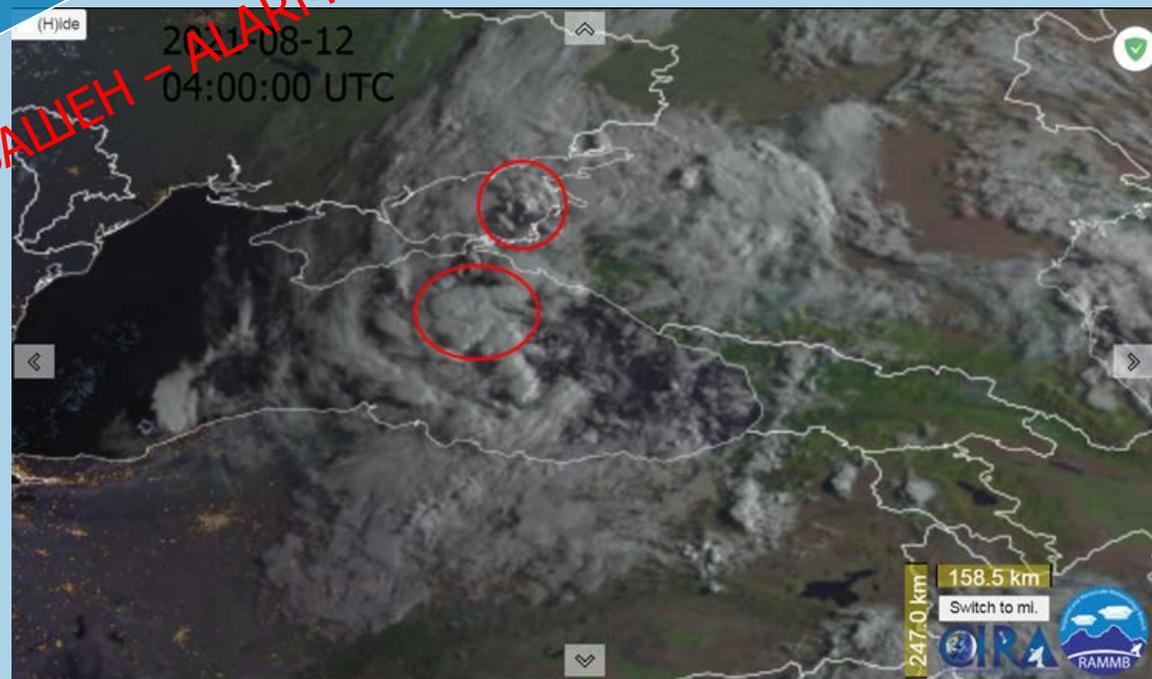


Северная Атлантика,
около Наветренных островов
14 августа 2021 г.

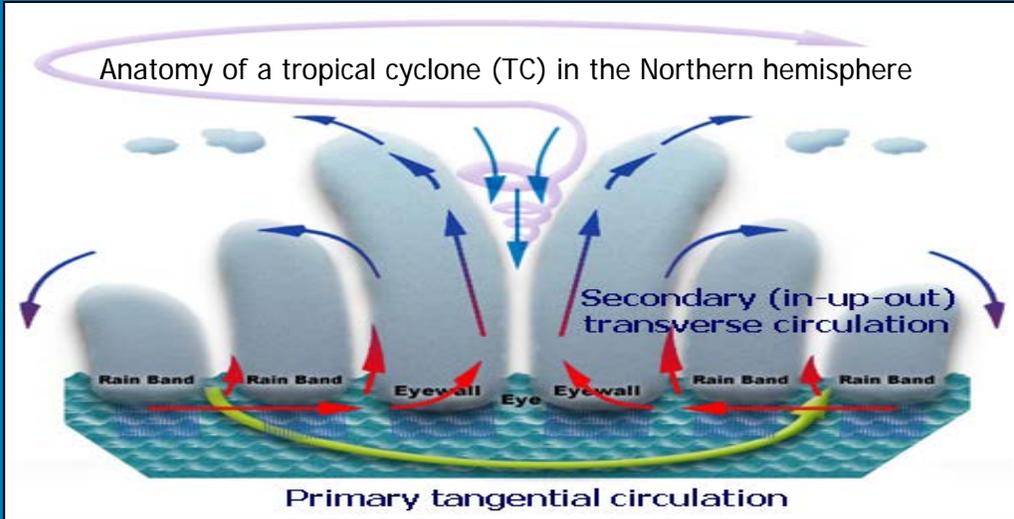
Черное и Азовское море,
12 августа 2021 г.

ВИХРЕВАЯ КОНВЕКЦИЯ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ

ПОЯВЛЕНИЕ БАШЕН – АЛАРМ: ВОЗМОЖНО ВИХРЕВОЕ ДИНАМО!



ТУРБУЛЕНТНОЕ ВИХРЕВОЕ ДИНАМО В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ



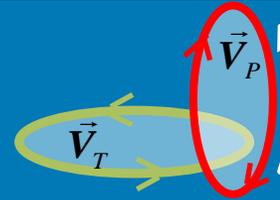
Во вращающейся неоднородной атмосфере влажно-конвективная турбулентность становится спиральной, подавляется поток энергии к масштабам диссипации → **возможность крупномасштабной (КМ) вихревой неустойчивости.**

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 !

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

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



Interaction between Convection and Vertical Shear

(a) Diagram showing wind shear (4 km) and its interaction with convection, leading to a tilted vortex structure.

(b) Diagram showing the interaction between vertical shear and convection, illustrating the formation of a Helical Vortex Dipole (VHT).

(c) Diagram showing the VHT as a Helical Vortex Dipole, with vertical velocity (w) and potential vorticity (f + ζ) profiles at different altitudes (z = 9km, 7km, 5km, 3km, 1km).

$\partial V_r / \partial z$

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

Convective

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

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

Helical

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

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

Λ – 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

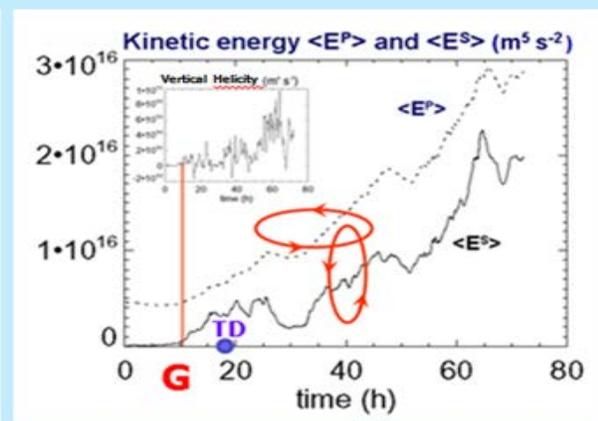
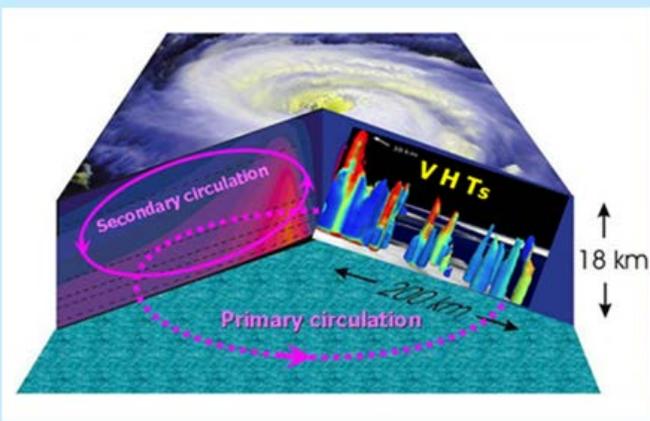
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia



Диагностика циклогенеза – определение момента «G»

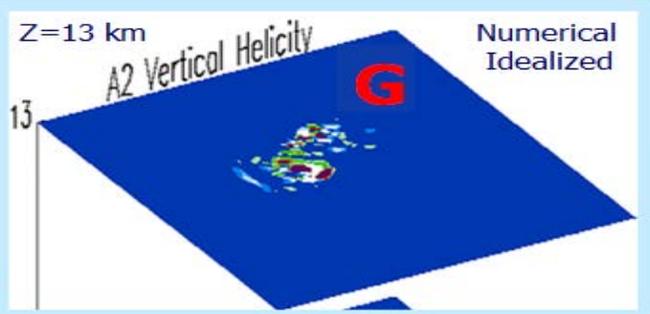
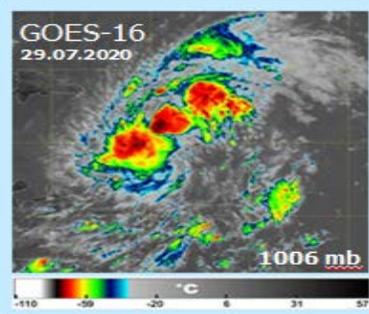
Облачно-разрешающий численный анализ эволюции кинетической энергии первичной циркуляции $EP(t)$ и вторичной циркуляции $ES(t)$ в формирующемся тропическом циклоне (ТЦ) позволяет определить момент времени **G**, когда начинается взаимное усиление циркуляций, и зарождающийся ТЦ становится энергетически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

Необходимое условие для усиления вихря: мезомасштабная вихревая система должна стать спиральной – зацепление первичной и вторичной циркуляций, 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**.

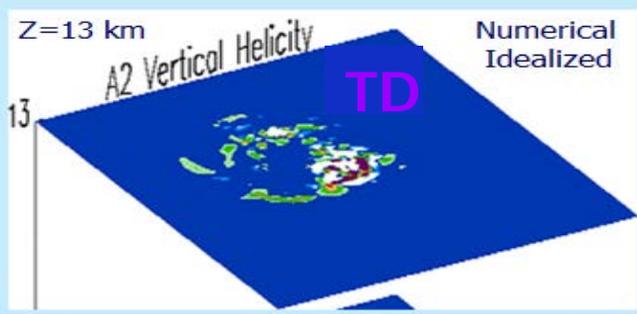
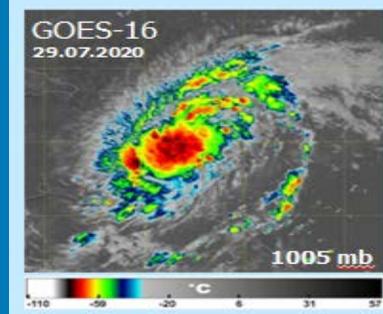


Практическая значимость: зарождение ТЦ будет определено **ТОЧНО И ЗНАЧИТЕЛЬНО РАНЬШЕ**, чем происходит в настоящее время.

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



РЕЗУЛЬТАТЫ

Munsi, A., Kesarkar, A.P., Bhate, J.N., Rajasree VPM, V.P.M, Kutty, G.
Helicity evolution during the life cycle of tropical cyclones formed over the North Indian Ocean,
Advances in Space Research (2022), doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.10.004>

Крупномасштабная вихревая неустойчивость появлялась (**время G**),
т.е. вихрь становился самоподдерживающимся и усиливающимся,
РАНЬШЕ формирования тропической депрессии (**время TD**) **НА**

30 час. ТЦ Fani (26 April – 4 May 2019),

42 час. ТЦ Luban (6 – 14 Oct 2018),

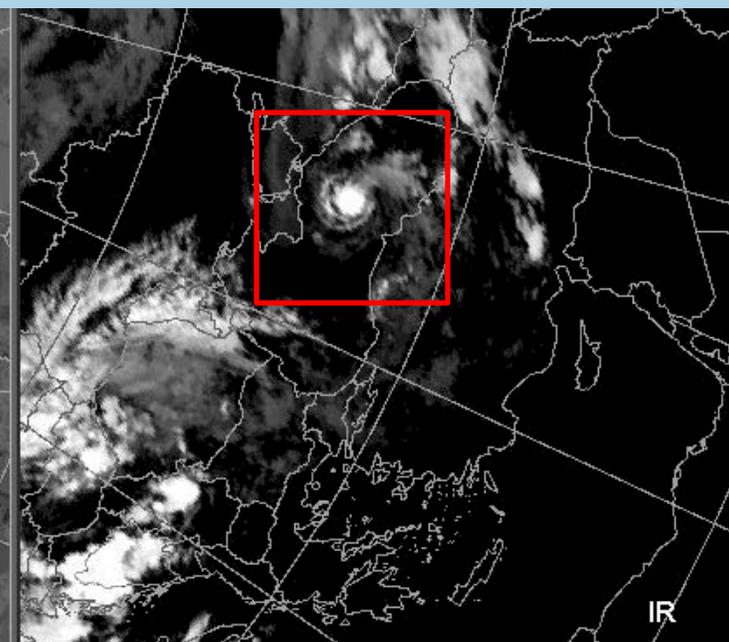
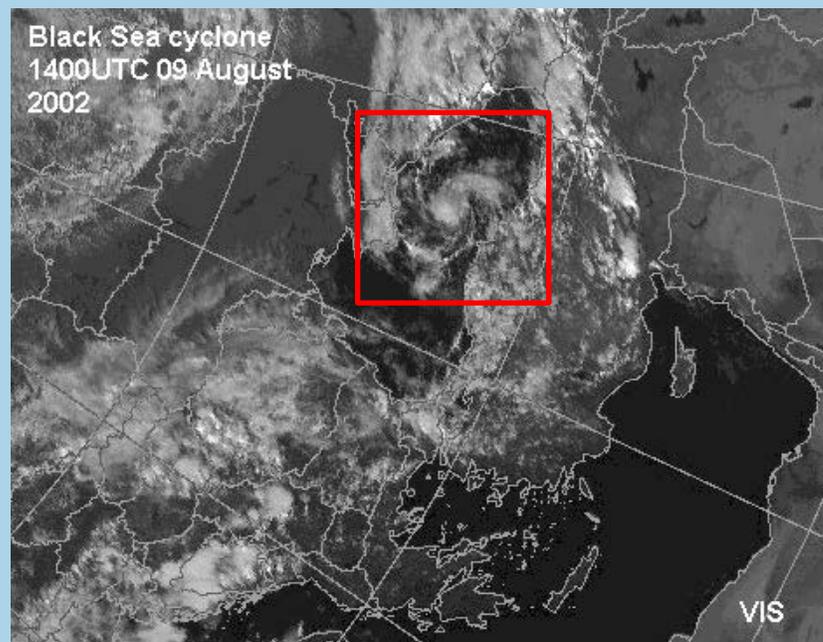
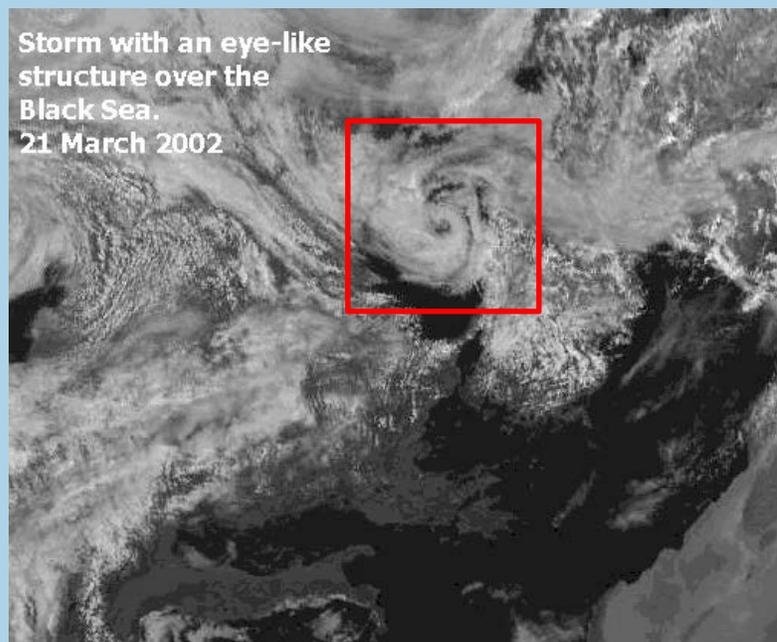
15 час. ТЦ Ockhi (29 Nov – 5 Dec 2017)

На сегодняшний день фактом формирования ТЦ считается образование TD.
Только с этого момента метеослужбы начинают предупреждать население.

Применение диагностики намного увеличит заблаговременность оповещения.

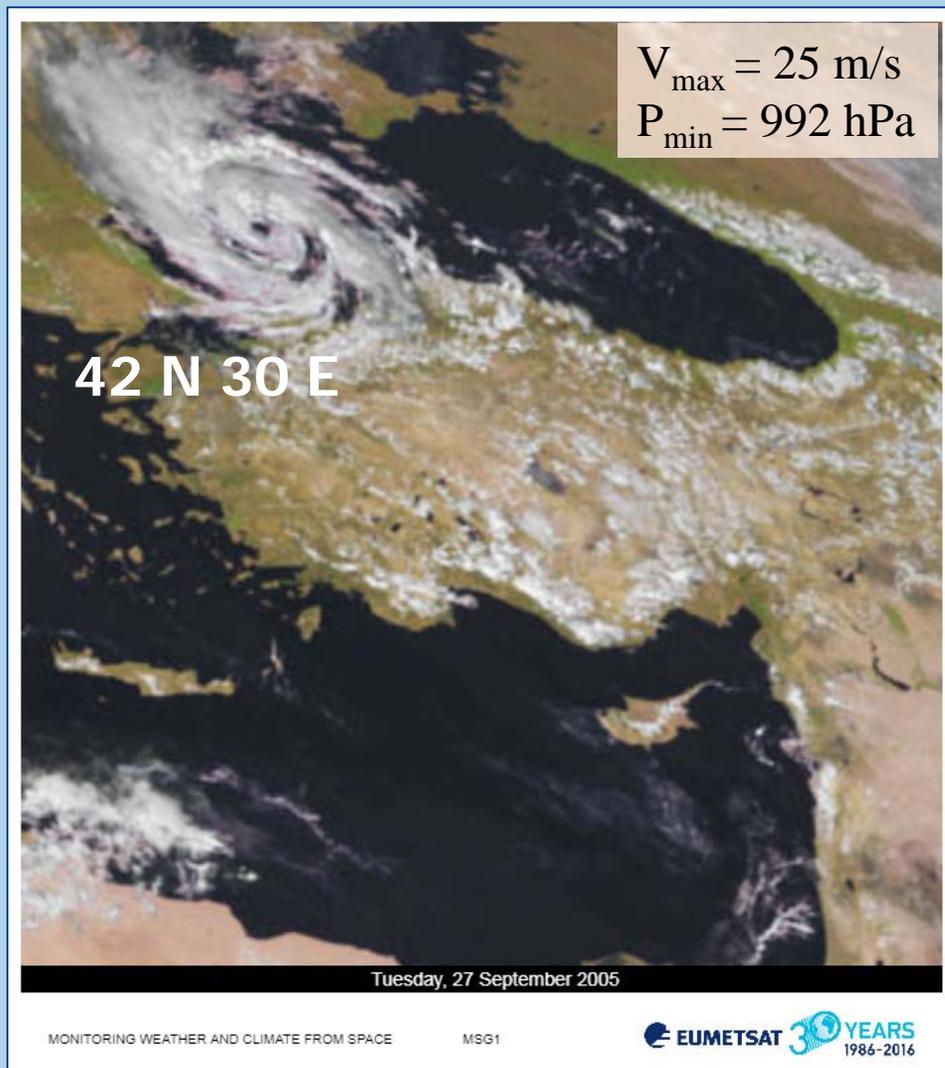
СРЕДНИЕ ШИРОТЫ: что происходит в Черном море?

Первые спутниковые снимки черноморских мезомасштабных циклонических вихрей с особенностью типа «глаза» урагана относятся к 2002 году (Met Office, UK). Однако эти вихри имели очень короткое время жизни и не были исследованы.



<http://www.metoffice.gov.uk/weather/tropicalcyclone/tcimages/Misc/>

СРЕДНИЕ ШИРОТЫ: что происходит в Черном море?



27 сентября 2005

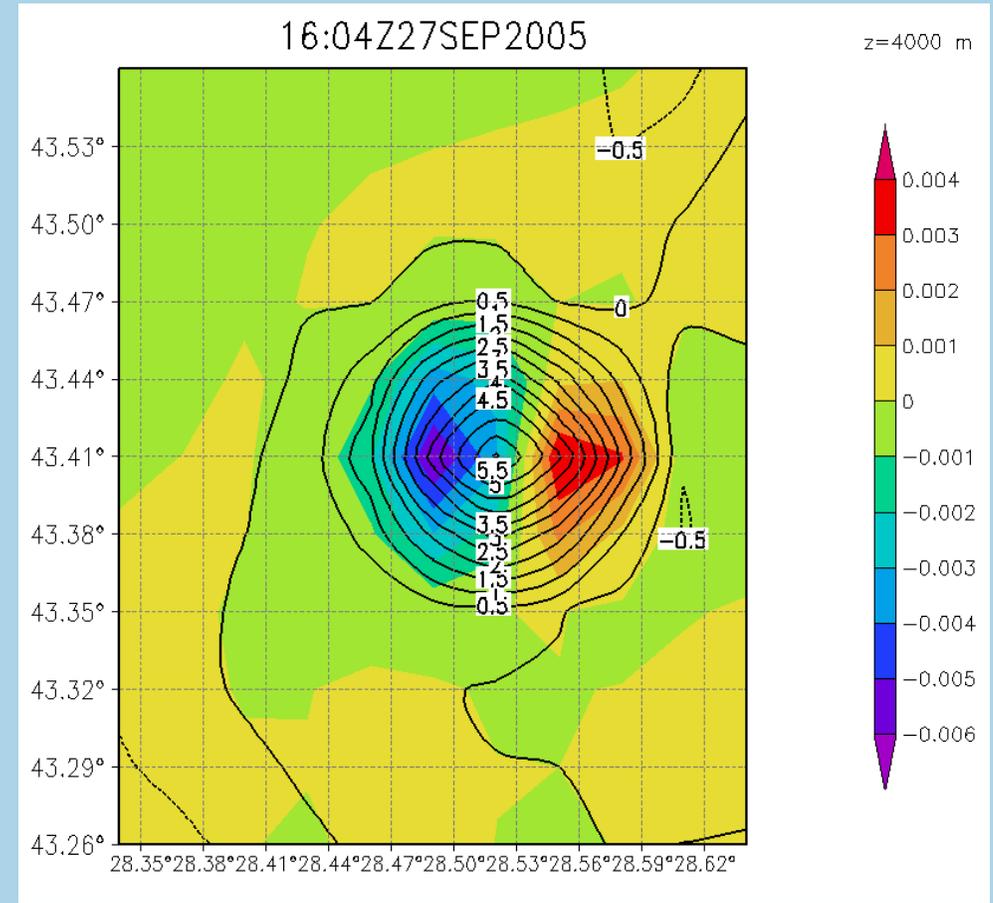
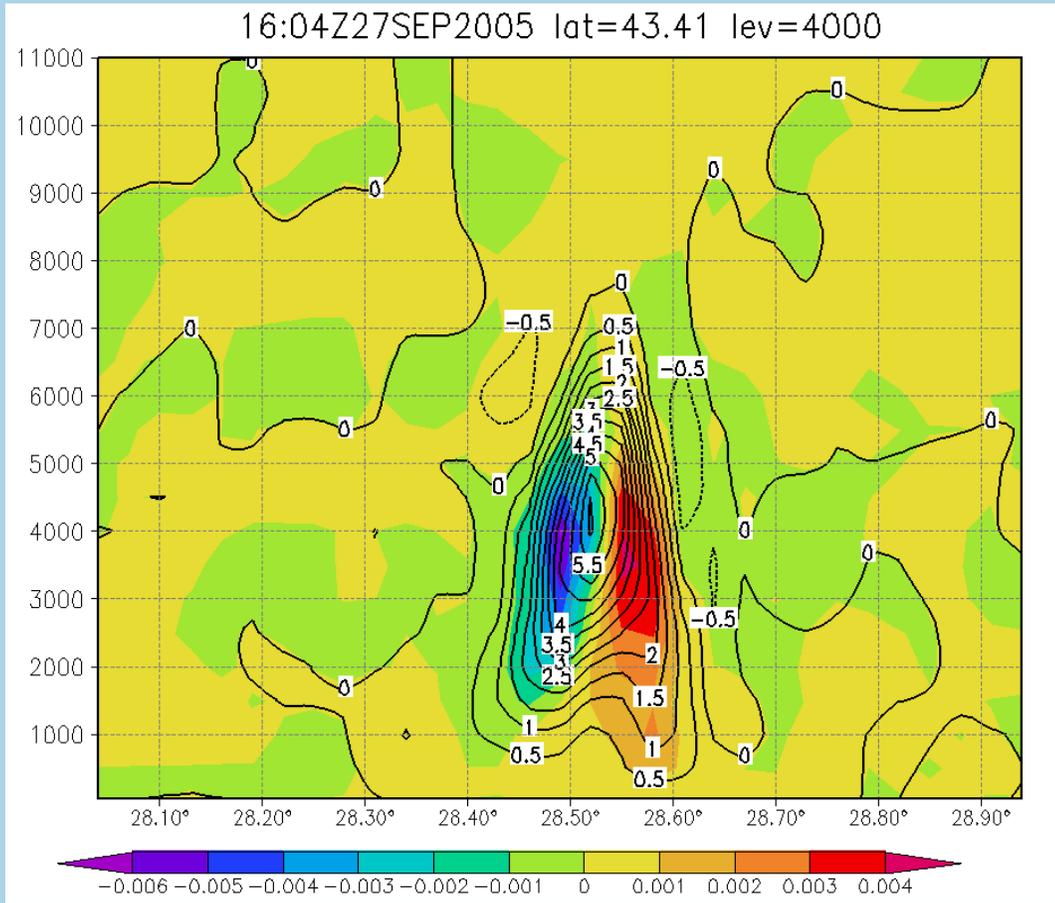
Первый подробно изученный квази-ТЦ [1–4] достиг максимальной скорости поверхностного ветра 25 м/с (интенсивность тропического шторма) при падении давления в центре до 992 гПа. Он наблюдался над акваторией Черного моря 25–29 сентября 2005 года.

В работах [3, 4] проводилось численное моделирование на 3-х вложенных пространственных сетках с минимальным горизонтальным разрешением на внутренней из них 10 км, модель MM5 [3] и 1 км, модель WRF [4].

Однако в недавнем (2021г.) и уже облачно-разрешающем моделировании [4] вихревые облачные структуры не были идентифицированы, а сама возможность их существования или появления вообще не упоминалась.

1. Ефимов В.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А. 2007. *Изв. АН. ФАО*.
2. Ефимов В.В., Станичный С.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А. 2008. *МиГ*.
3. Яровая Д.А., Ефимов В.В., Шокуров М.В., Станичный С.В., Барабанов В.С. 2008. *МГЖ*.
4. Зарипов Р.Б., Павлюков Ю.Б., Крупчатников В.Н. 2021. *МиГ*.

ВИХРЕВАЯ ОБЛАЧНАЯ КОНВЕКЦИЯ В ЧЕРНОМ МОРЕ



Vertical cross-section at latitude = 43.41 (left) and horizontal cross-section at z = 4000 m (right) ;
Vertical contribution of helicity – m/s^2 (color contour) and vertical velocity – m/s (solid isolines).

Vortical Hot Tower в квазитропическом циклоне в Черном море, 27 сентября 2005.

Моделирование Д. А. Яровая (3 км – горизонтальное разрешение) , Морской гидрофизический институт, Севастополь.

(по просьбе автора, декабрь 2010 г.)

ПОПЫТКИ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ЧЕРНОМОРСКОГО ВИХРЯ

2014 г. – после присоединения Крыма был подан совместный проект РФФИ (Рук. В.В. Ефимов, МГИ РАН, Севастополь). – ОТКАЗ
2018 г. – подан совместный с МГИ РАН проект РФФИ на 2019 –2021 гг. (Рук. Г.В. Левина, ИКИ РАН, Москва). – ОТКАЗ

Моделирование – Д.А. Яровая
МГИ РАН, Севастополь, 2018

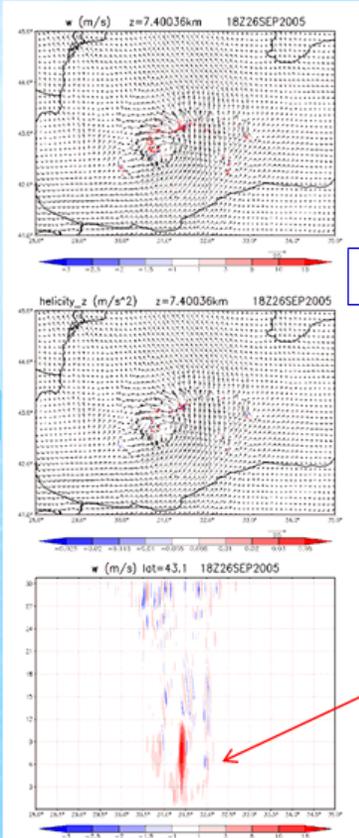
18.00 UTC 26.09.2005

WRF
1-2 км

$W \approx 15 \text{ m/s}$

$h_z = V_z (\text{curl } \vec{V})_z$
 $h_z \approx 0,05 \text{ m/s}^2$

$H \approx 10 \text{ km}$
 $L \approx 10 \text{ km}$



Уровень $z = 7.4 \text{ км}$

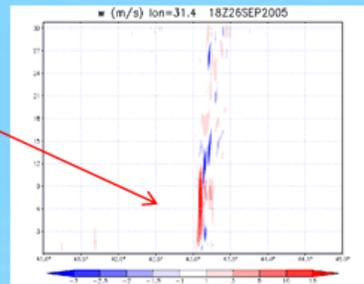
Цветом показаны:

вертикальная скорость

вертикальная спиральность
позволяет локализовать
вращающиеся
конвективные структуры

Вращающаяся
конвективная
башня

$\omega \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$
 \sim в 30 раз превышает
планетарное



Вращающаяся облачная конвекция в квазитропическом циклоне над Черным морем.

Из итогового отчета по проекту РФФИ № 16-05-00551а (2016–2018)
Рук. Г.В. Левина

В рамках идущего проекта РФФИ 2016–2018 гг. (рук. Г.В. Левина) было решено применить только что предложенную и ещё не опробованную для реальных ТЦ, но уже прошедшую международное обсуждение диагностику, для изучения квазитропического черноморского вихря.

Осенью 2018 года впервые в мире российскими учеными (Г.В. Левина, Д.А. Яровая, Р.Б. Зарипов) были начаты работы по практическому применению результатов данного проекта для ранней диагностики зарождения наблюдавшегося атмосферного вихря. Исследования выполнялись с помощью модели атмосферы WRF (Weather Research and Forecasting) на СК МГУ «Ломоносов». Выбранное разрешение 1–2 км по горизонтали позволяло явным образом воспроизвести облачную конвекцию. Полученные в декабре 2018 года и еще неопубликованные результаты моделирования квази-ТЦ (2005) над Черным морем были представлены в итоговом отчете по проекту РФФИ.

Таким образом, нами впервые была найдена вихревая облачная конвекция в средних широтах – см. данный и предыдущий слайд. Результаты были представлены на российских конференциях:

Яровая Д.А., Левина Г.В. Исследование вихревой конвекции квазитропического циклона над Черным морем на основе облачно-разрешающего численного моделирования. Тезисы Всероссийской конференции «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования», 26–28 ноября 2019 г. Москва. М: Физматкнига, 2019. С. 132.

Левина Г.В., Яровая Д.А. От теории к практике: ранняя диагностика тропического и квазитропического циклогенеза на основе концепции турбулентного вихревого динамо. Всероссийская конференция, посвященная 100-летию М.А. Петросянца «М.А. Петросянец и отечественная метеорология». Москва, МГУ – Гидрометцентр РФ. 21–22 ноября 2019 г. Сборник тезисов конференции, 2019.

СРЕДНИЕ ШИРОТЫ: что происходит в Черном море?

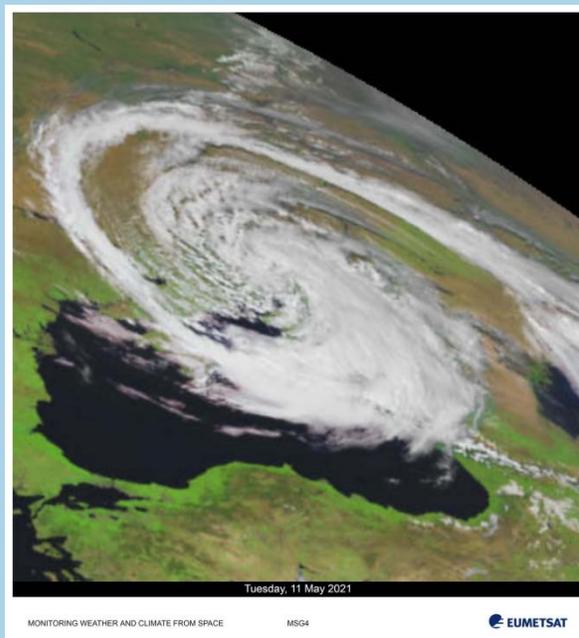
В 2017 г. Romero & Emanuel [1] предсказали, что в связи с изменением климата возможно более частое появление квази-ТЦ в западной части Средиземного моря и в Черном море.

1. Romero, R. & Emanuel, K. Climate change and hurricane-like extratropical cyclones: Projections for North Atlantic polar lows and medicanes based on CMIP5 models. *J. Climate*. 2017, **30**, 279–299. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0255.1

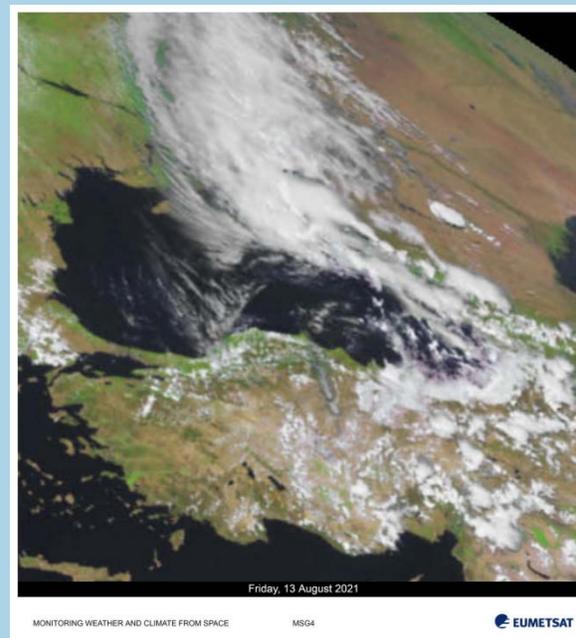
ЧЕРНОЕ МОРЕ



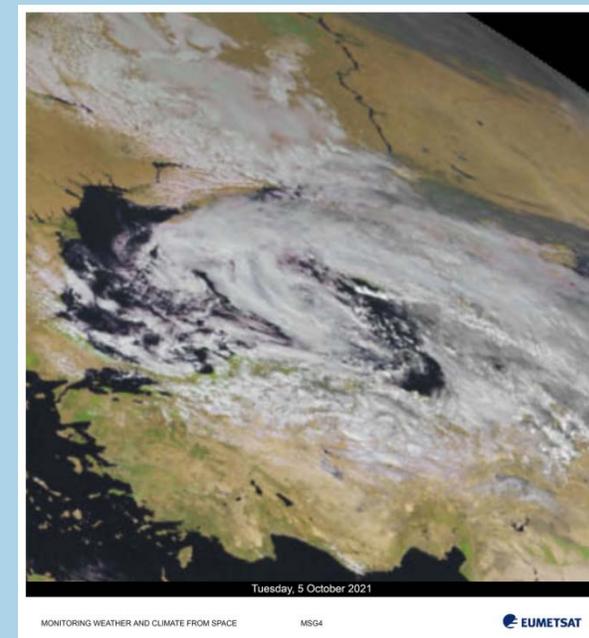
8 сентября 2018



11 мая 2021



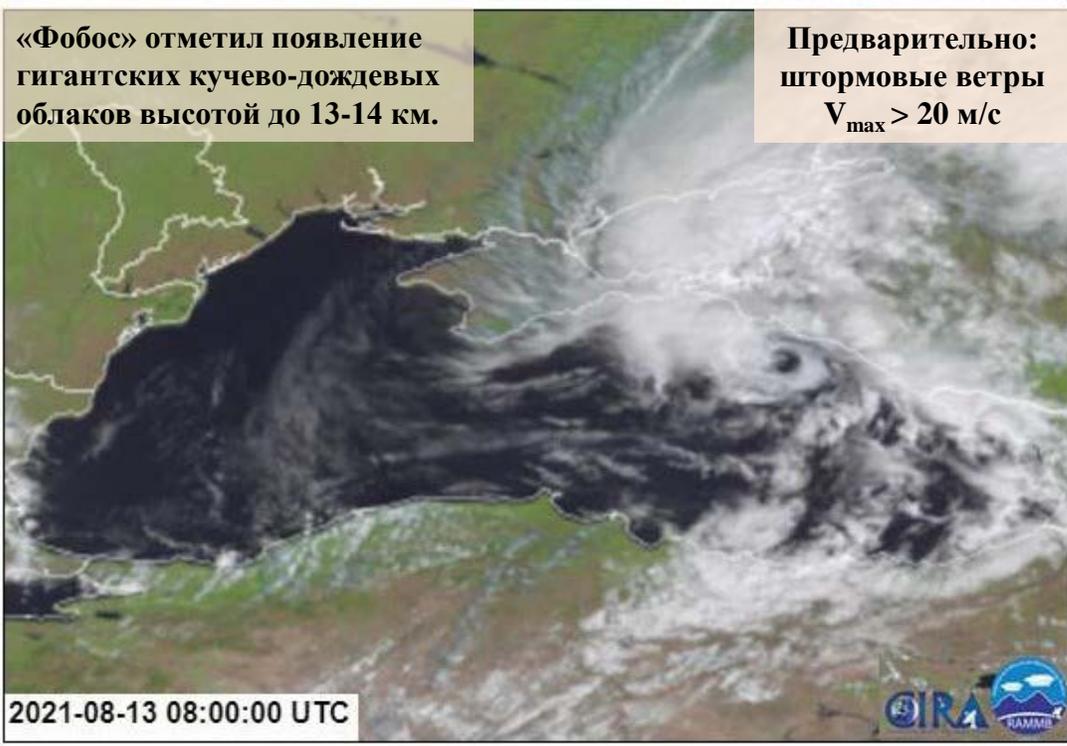
13 августа 2021



5 октября 2021

Диагностированы как квази-ТЦ зарубежными метеослужбами

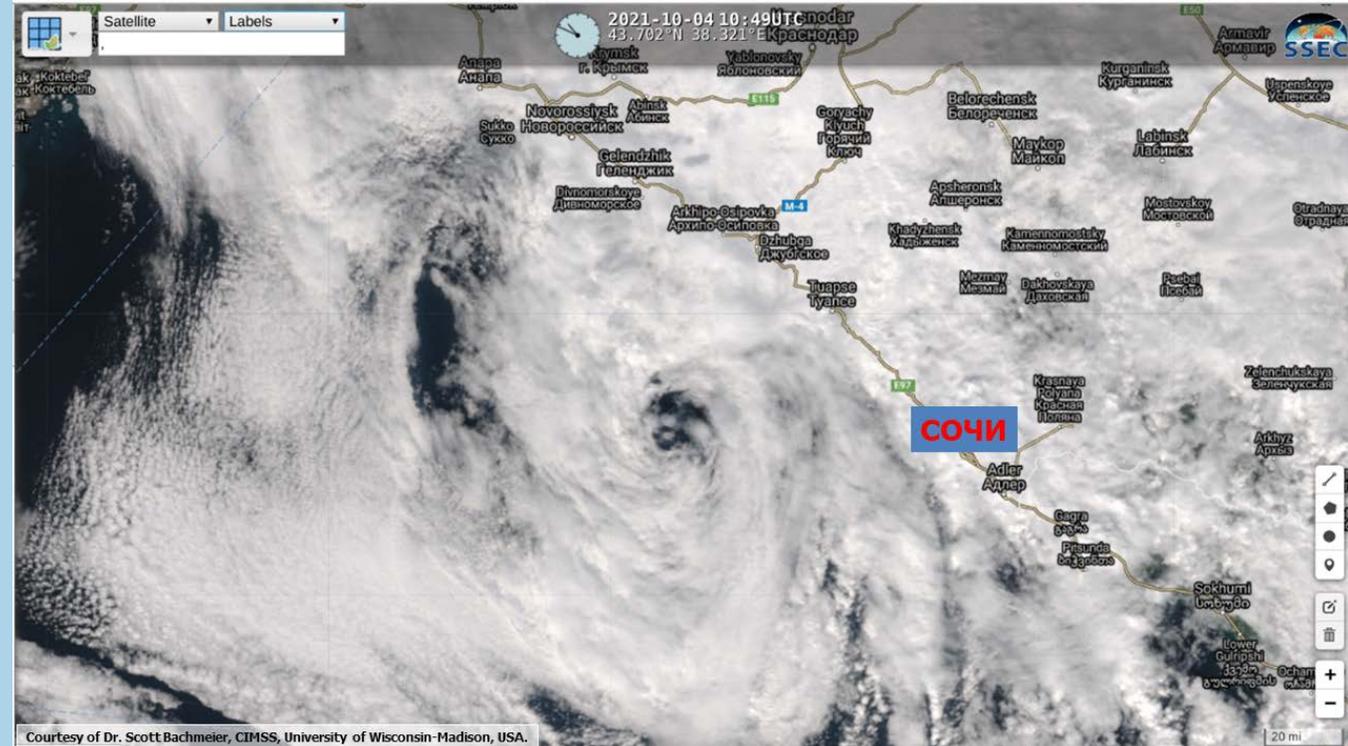
ЧЕРНОМОРСКИЕ КВАЗИТРОПИЧЕСКИЕ ЦИКЛОНЫ 2021



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).



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

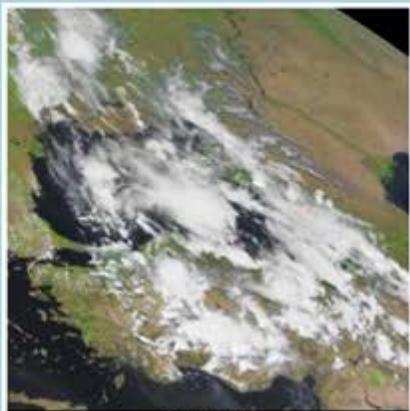
Обсуждение на проф. форуме tstorms.org 04–05 октября 2021 г.:

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).

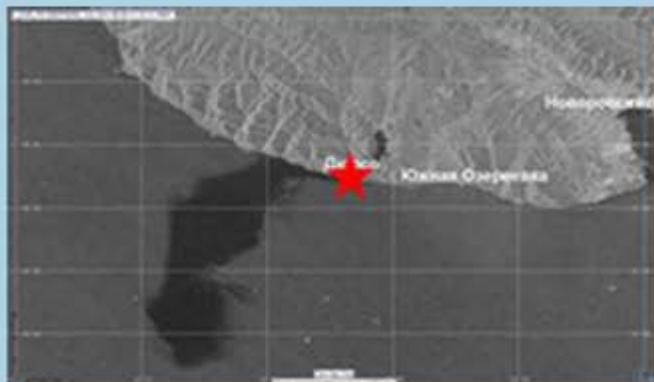
ЧЕРНОМОРСКИЕ КВАЗИТРОПИЧЕСКИЕ ЦИКЛОНЫ 2021

Нефтяной разлив в районе Новороссийска – 7 августа 2021 г.

Теперь в Черном море необходимо учитывать существование вихревых облачных башен!
Они хорошо видны 12 августа и могли появиться 7 августа перед образованием квази-ТЦ!



7 августа 2021



ПРЕСС-ЦЕНТР ИКИ РАН
10 АВГ 2021

8 августа 2021 г.,
15:20 UTC,
площадь пятна
превысила 85 кв. км.



8 августа 2021



12 августа 2021 г., 03:41 UTC

Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Луцян Е.А. (2021).
Современные проблемы ДЗЗ из космоса, т. 18, № 4, 304–310. Рис. 4.



12 августа 2021 04:00 UTC

ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Главный итог – применение индийскими метеорологами разработанной нами диагностики зарождения ТЦ для 3-х реально наблюдавшихся вихрей в Индийском океане. Подтверждены результаты идеализированного численного моделирования о том, что крупномасштабная вихревая неустойчивость появляется на десятки часов раньше формирования тропической депрессии.

**Это позволит гораздо раньше оповещать о приближающемся урагане.
Диагностика основана на теории турбулентного вихревого динамо!**

Главная перспектива – переход к оперативной дистанционной диагностике реального развивающегося вихревого возмущения с помощью анализа спутниковых снимков облачности и при поддержке численным моделированием высокого разрешения для контроля возникновения неустойчивости.

Остается надежда, что в перспективе на полученные результаты обратят внимание и в России, чтобы избежать катастрофических ситуаций в Черноморском регионе.

Работа выполнена в рамках госзадания № 01.20.0.2.00164 (тема «Мониторинг»). Диагностика тропического циклогенеза на основе данных облачно-разрешающего численного моделирования была разработана 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>

Черноморский квази-ТЦ
04 октября 2021



СОЧИ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!