



Russian Academy of Sciences  
Shirshov Institute of Oceanology

# Мезомасштабные вихри в Черном море: численное моделирование и спутниковые наблюдения

К.А.Коротенко, А.А.Осадчиев (ИОРАН)

XVIII Всероссийская Конференция  
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из  
космоса»  
ИКИ РАН 16 - 20.11. 2020

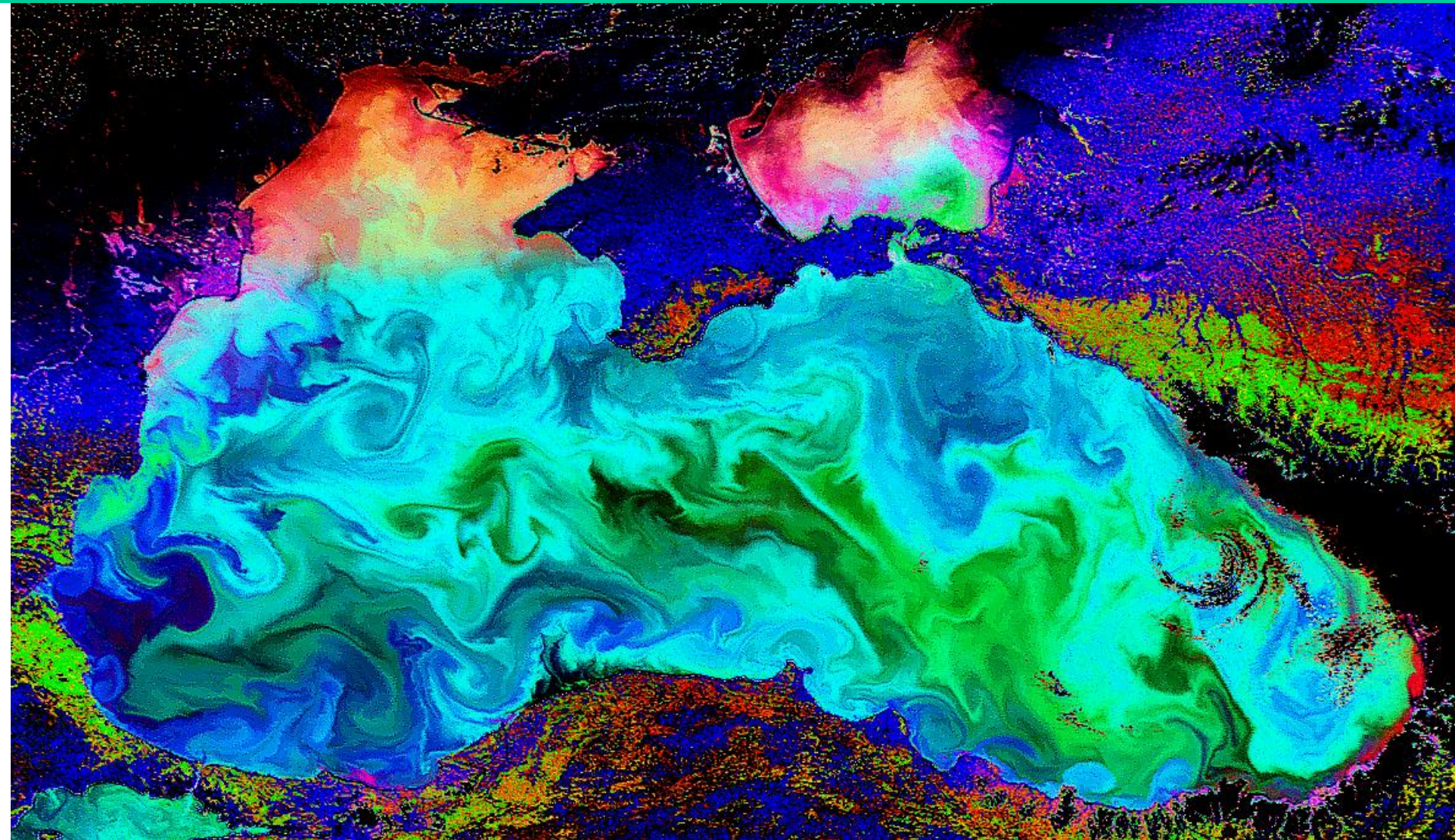
# Outlines:

- Черное море - идеальная гидрофизическая лаборатория, которая в реальных масштабах позволяет исследовать гидрофизические процессы, в том числе и процессы генерации и эволюции мезомасштабных вихрей.
- Классификация мезомасштабных структур Черного моря.

Схема С. Каримовой.

- Модель циркуляции Черного моря DieCAST: краткое описание и инициализация.
- Иллюстрация результатов. Моделирование мезомасштабных структур и их сравнения со спутниковыми наблюдениями.
- Относительная завихренность и метод Окубо - Вейсса: O-W и MOW - важные методы для обнаружения и сопровождения мезомасштабных вихрей в море.
- О генерации вихрей на топографических неоднородностях берега и дна

# Многообразии мезомасштабных структур в Черном море

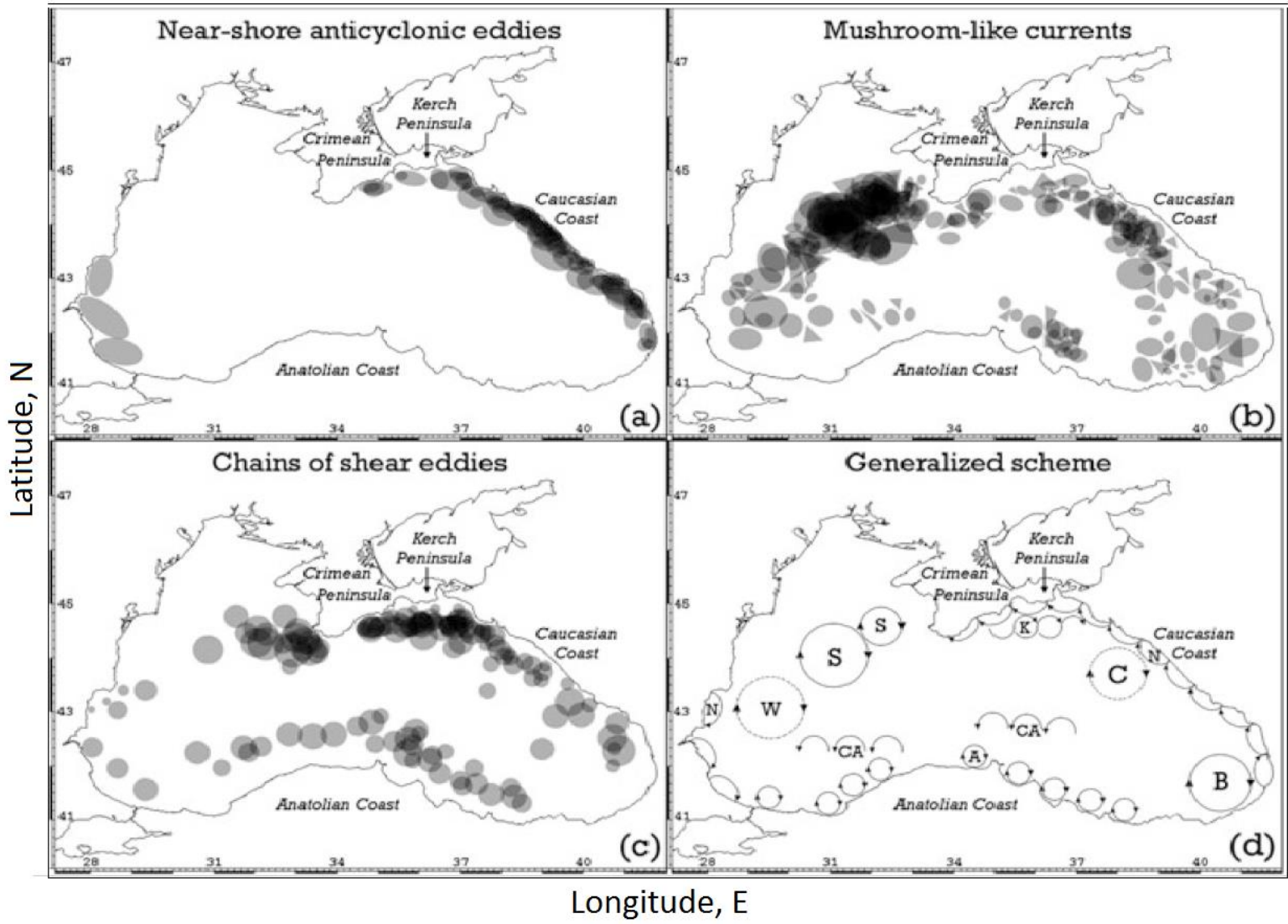


Enhanced SeaWiFS Sea surface color imagery, 11 June 2000

# Рельеф дна



# Классификация мезомасштабных структур в Черном море



**Quasy-Permanent Structures**

- W - western meander
- S - Sevastopol ACE
- K - Kerch ACE
- C - Caucasus ACE
- N - near-shore ACEs
- CA - cyclonic Anatolian Eddies
- A - Anatolian ACEs

S. Karimova in:  
 Remote Sensing of the Changing Oceans | SpringerLink, 2011

# Моделирование циркуляции Черного моря

- Спутниковые снимки неоценимы для анализа вихревых структур поверхности океана, однако для полной картины необходимо использовать методы, позволяющие описать также внутреннюю структуру вихревых образований.
- К таким методам относятся инструментальные измерения и численное моделирование.
- К настоящему времени есть попытки «сшить» результаты спутниковых наблюдений за вихрями с результатами численных экспериментов и/или измерений, чтобы получить целостную 3-х мерную картину каждого вихря .
- Спутниковые снимки также неоценимы для настройки и валидации численных моделей, а также верификации результатов моделирования.
- В настоящей работе для анализа пространственной структуры мезомасштабных вихрей используется вихреразрешающая слабо диссипативная гидродинамическая модель DieCAST( Dietrich et al., 1997; Korotenko et al., 2010).

# DieCAST Global Ocean Circulation Model

z-coordinate, rigid lid, low dissipative, the 4<sup>th</sup> order accuracy, with mixed (A and C) grids. (Dietrich, et al, 1997)

**(1/30)<sup>o</sup> Black Sea version:**

The model covers 27.2° - 42°E; 40.9° - 46.6°N;

ETOPO2 Bathymetry;

Resolution: (1/30)<sup>o</sup> Steps: Dlon=426; DLat=238;

2.6 - 2.8 km (baroclinic radius ~8-12 km);

30 unevenly spaced z-levels; 31 Rivers;

Open Boundaries at Bosphorus and Azov Straits;

(1/30)<sup>o</sup> version for the Black Sea was applied by:

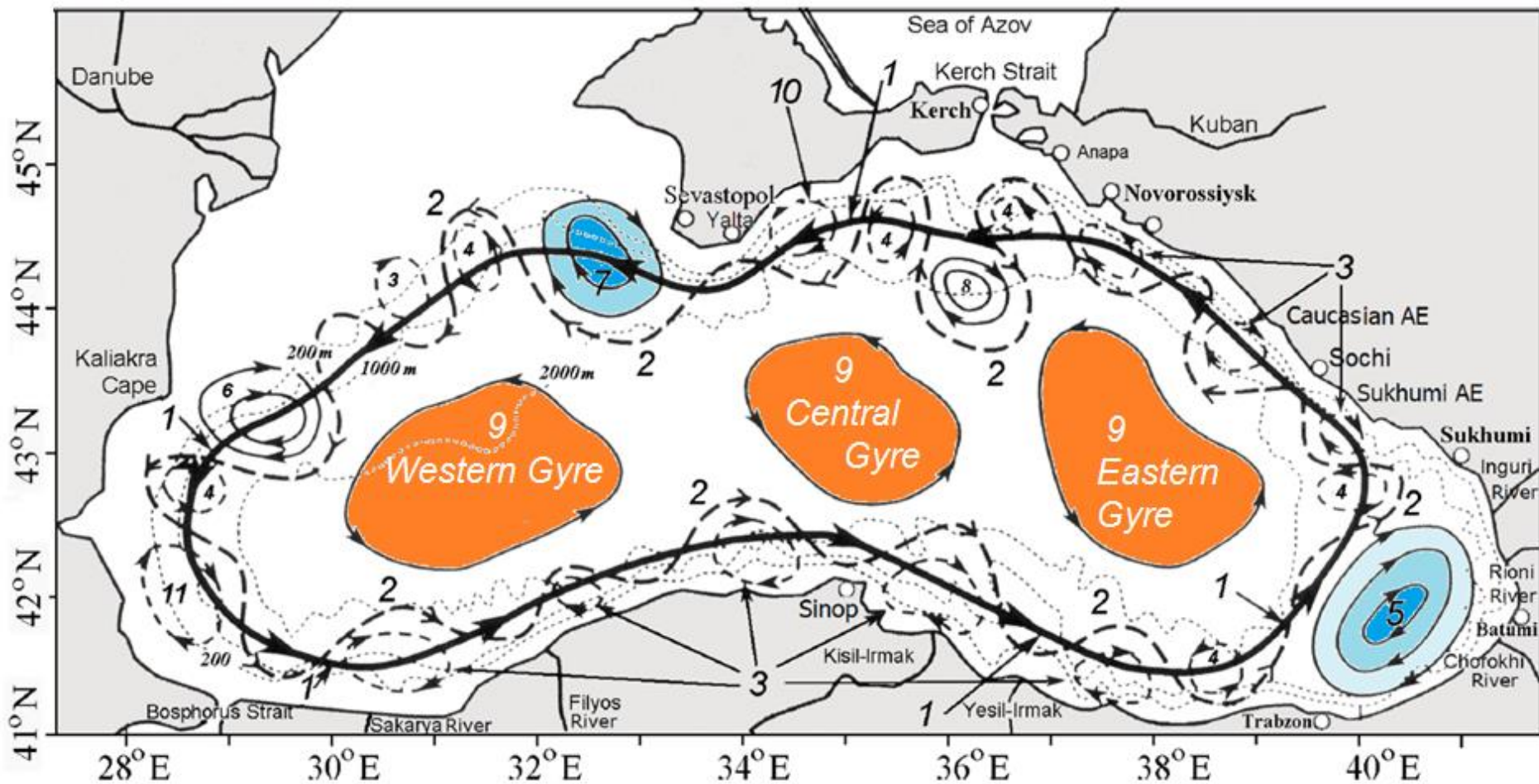
Korotenko, Bowman, Dietrich, (2010)

Korotenko (2015, 2016, 2017, 2018; Tseng, 2017)

- Initialization:

- January-averaged temperature and salinity data and forced with climatological winds and surface buoyancy (heat) fluxes, evaporation - precipitation (Staneva et al., 2001)
- and with 31 rivers runoff (Jaoshvily, 2003);

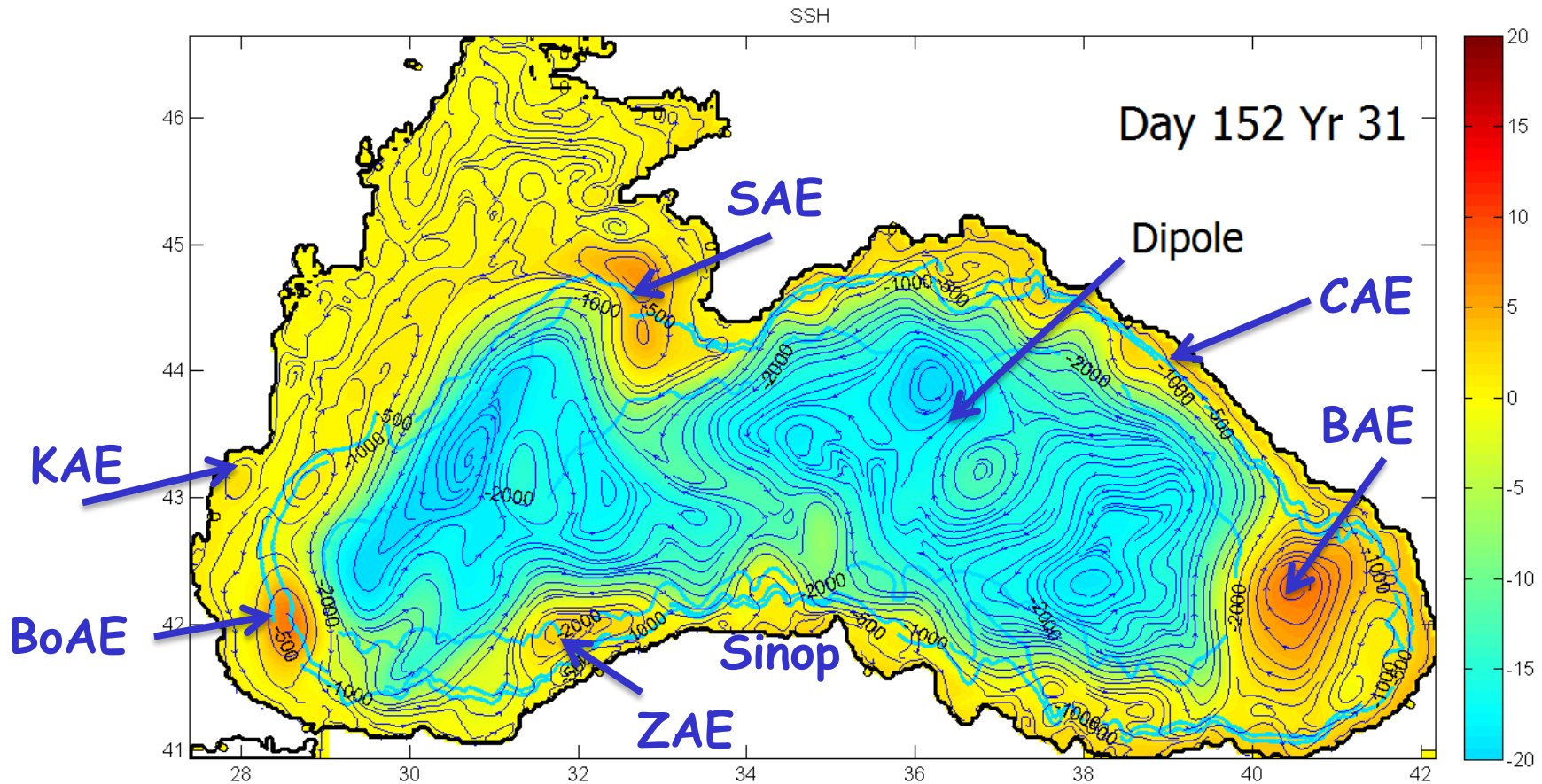
# ОЧТ и мезомасштабные структуры ЧМ



Кривошея и др. Океанология 2001



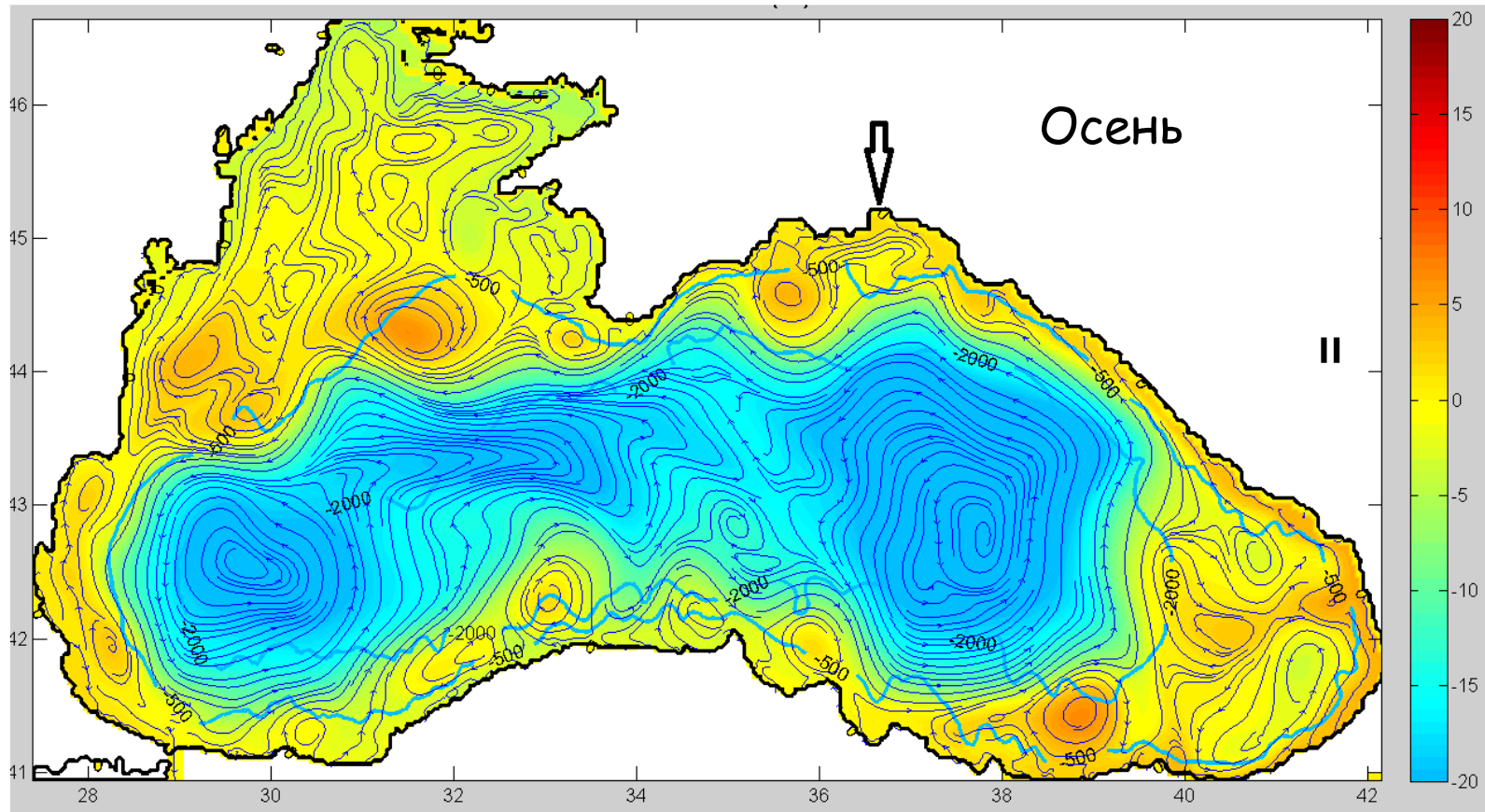
# DieCAST: Results of Modeling Basin-Scale and Mesoscale Structures



BoAE -Bosphorus AE; SAE- Sevastopol AE; CAE- Caucasian AE;

BAE- Batumi AE; ZAE- Sakarya AE; KAE- Kaliakra AE.

# DieCAST: Results of Modelling Basin-Scale and Mesoscale Dynamics

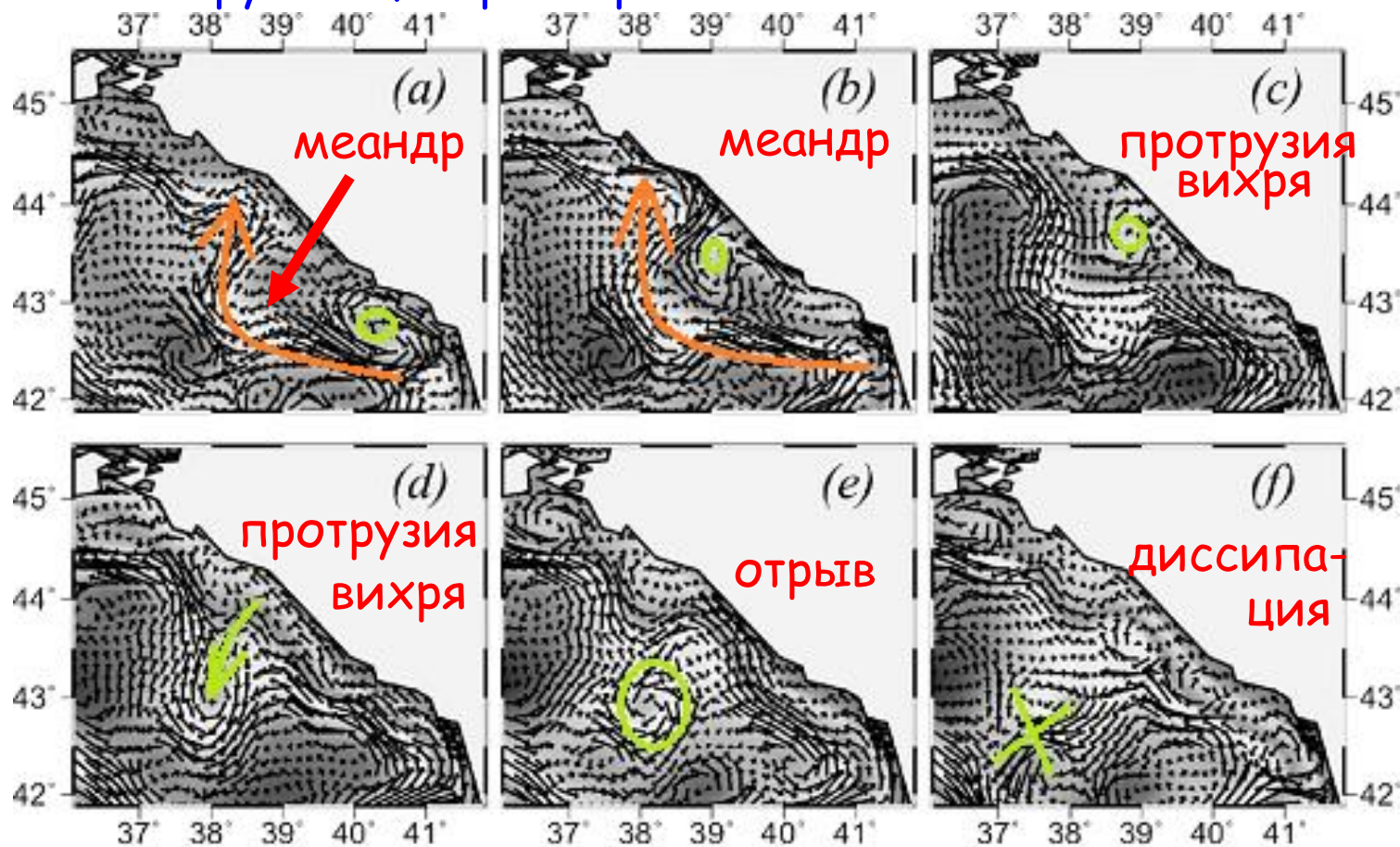


Bathymetry, Streamlines & SSH (cm)

# Прорыв прибрежного АЦ вихря через ОЧТ

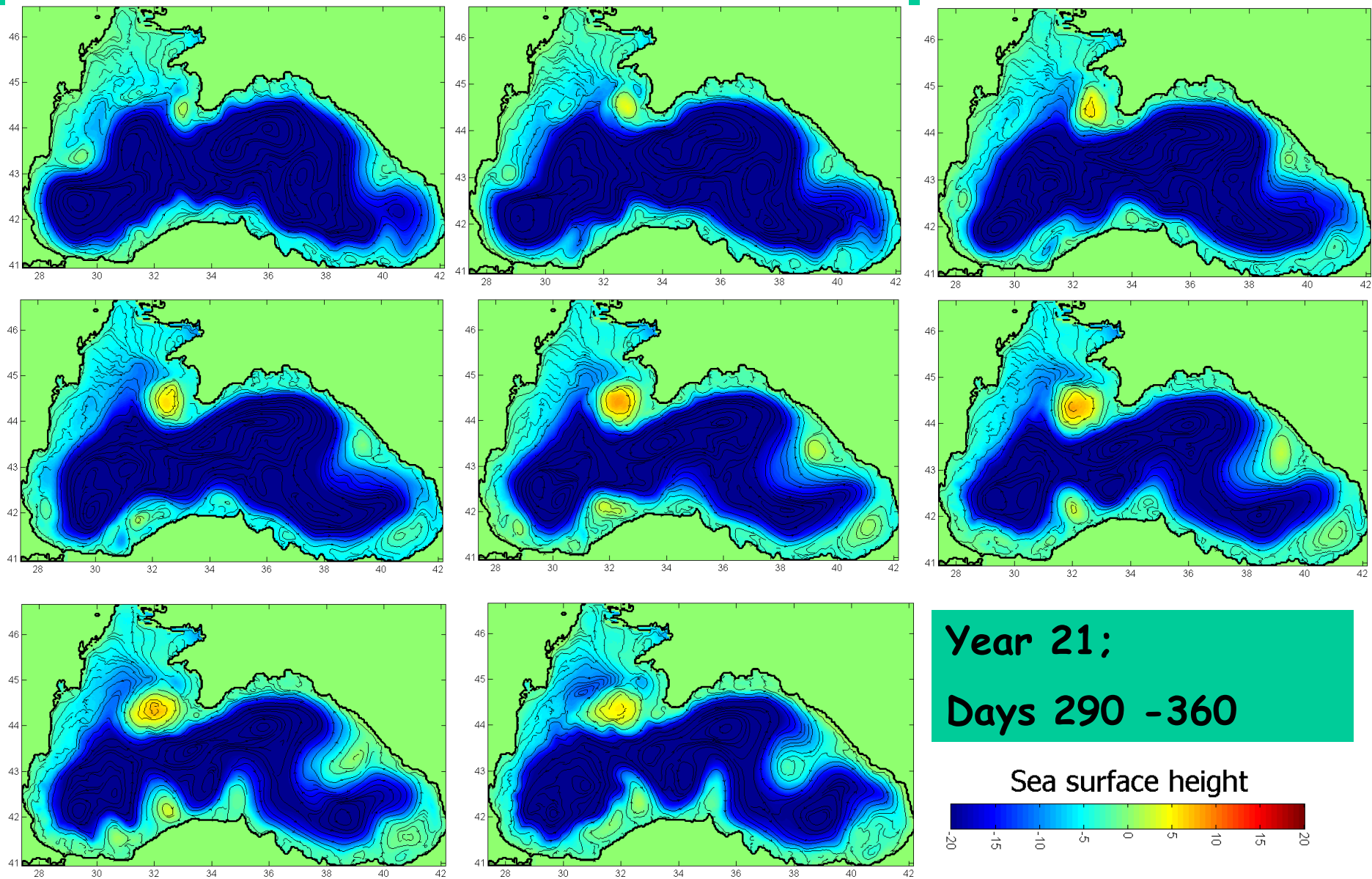
а - d - быстрая фаза формирования протрузии и отрыва

е - f - медленная фаза: оторванный вихрь медленно эволюционирует в центре моря



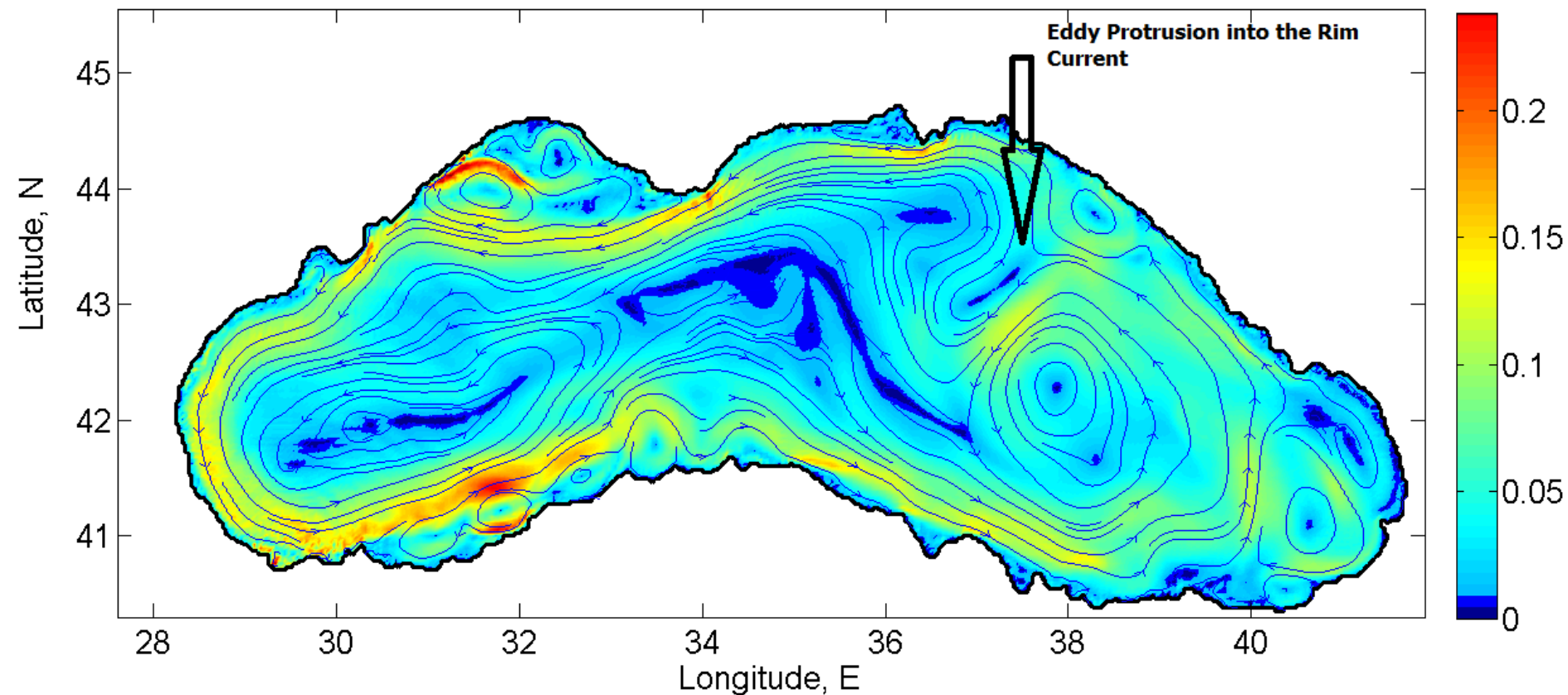
(a) 10.12.1996, (b) 30.12.1996, (c) 21.01.1997, (d) 20.01.1997, (e) 20.03.1997 и (f) 10.04.1997. (Korotaev et al., 2003)

# Modeling Detachment of the Caucasian Anticyclonic Eddy with DieCAST (1/30)<sup>o</sup>

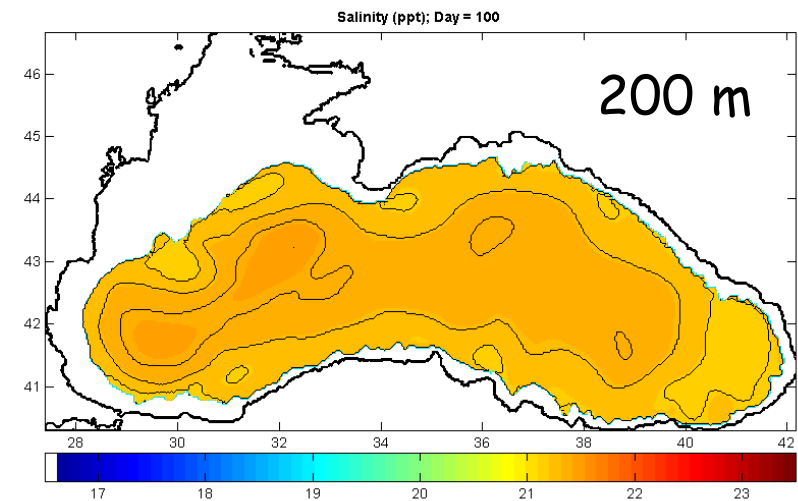
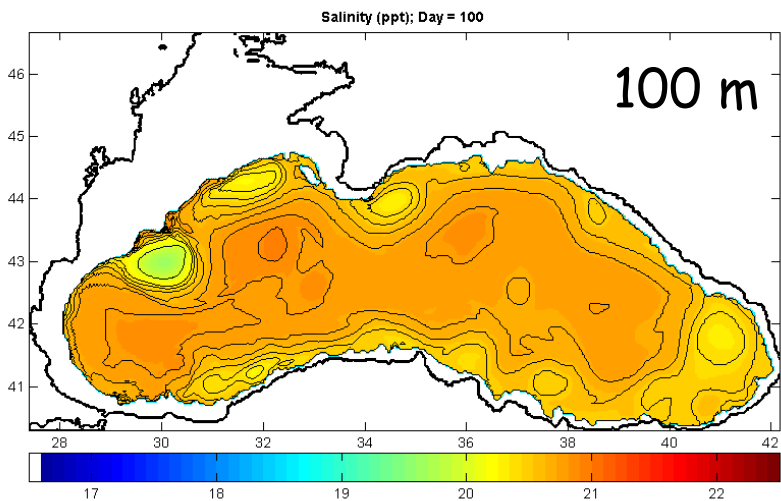
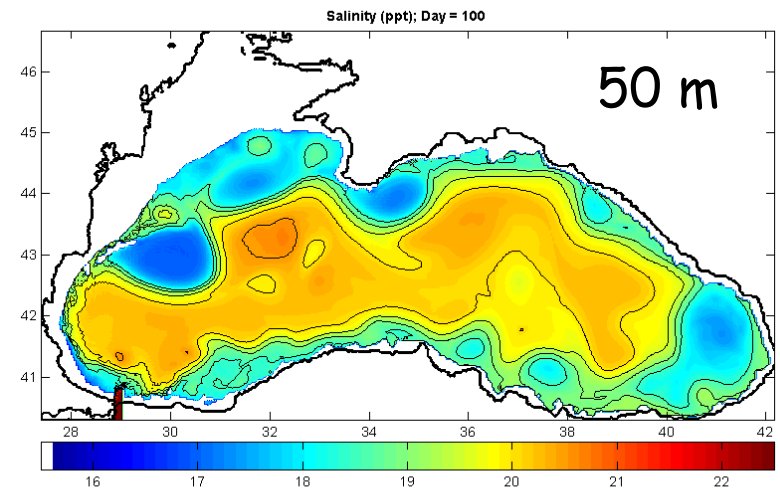
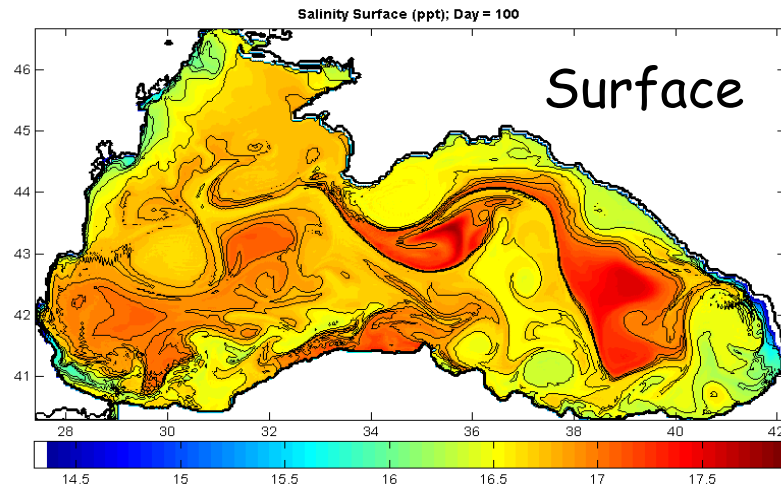


# ОЧТ на глубине 200 м во время протрузии прибрежного АЦ вихря

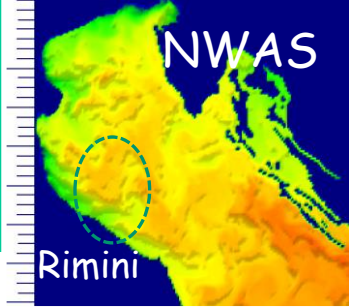
magnitude of velocity at 200 m (m/s)



# Структура поля солёности на разных горизонтах (анимации)







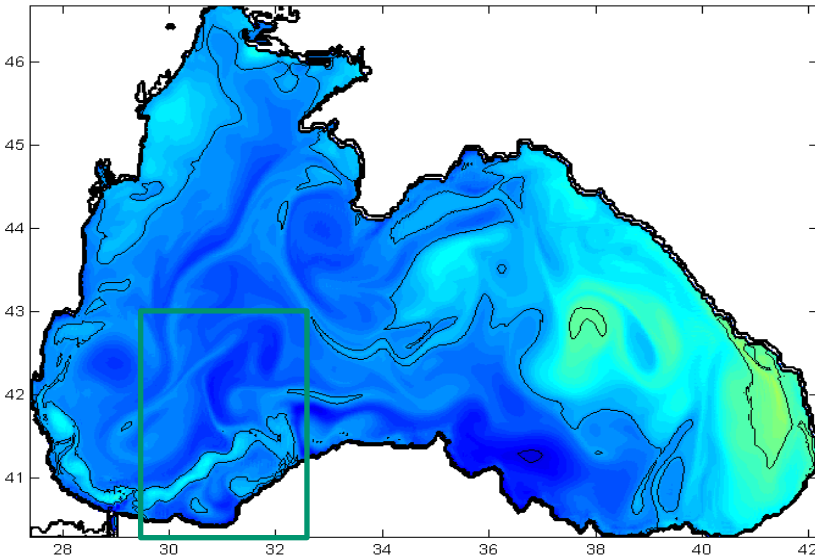
# Manifestation of Baroclinic Instability (animation)

Surface

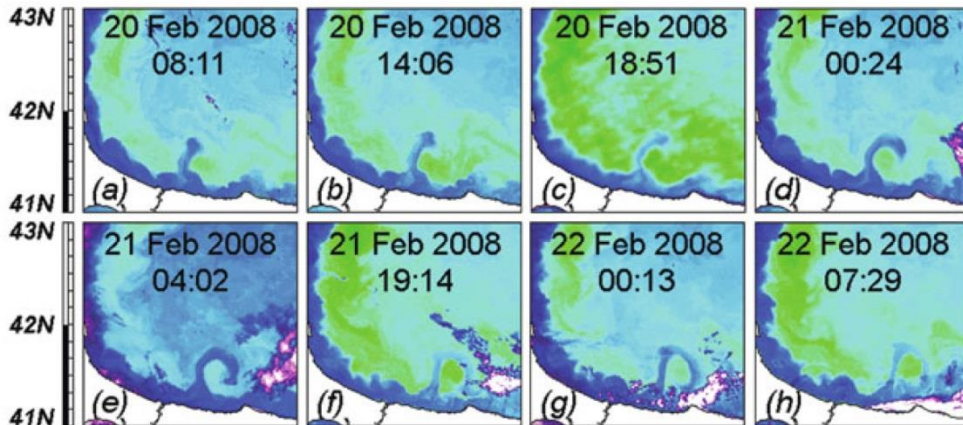
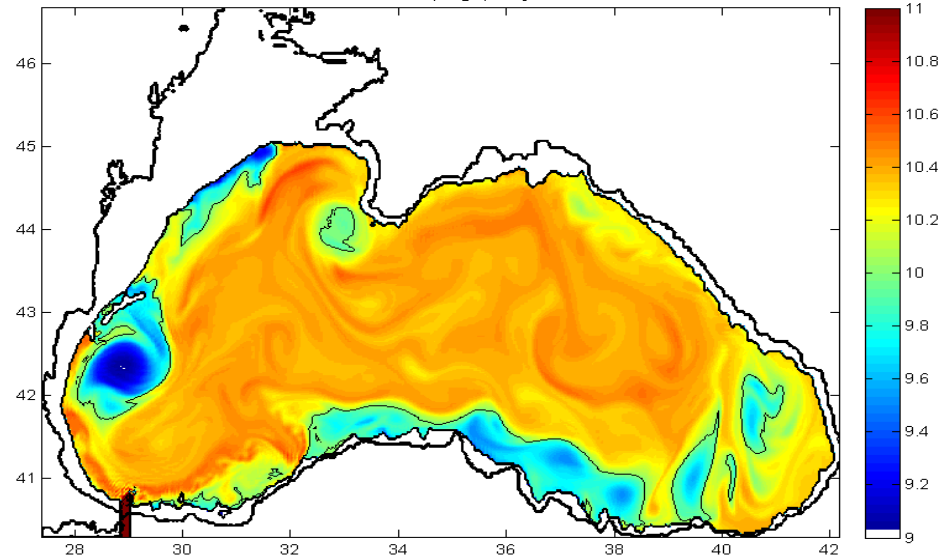
Temperature

50 m

TEMPERATURE (DegC); Day = 140



TEMPERATURE (DegC); Day = 140

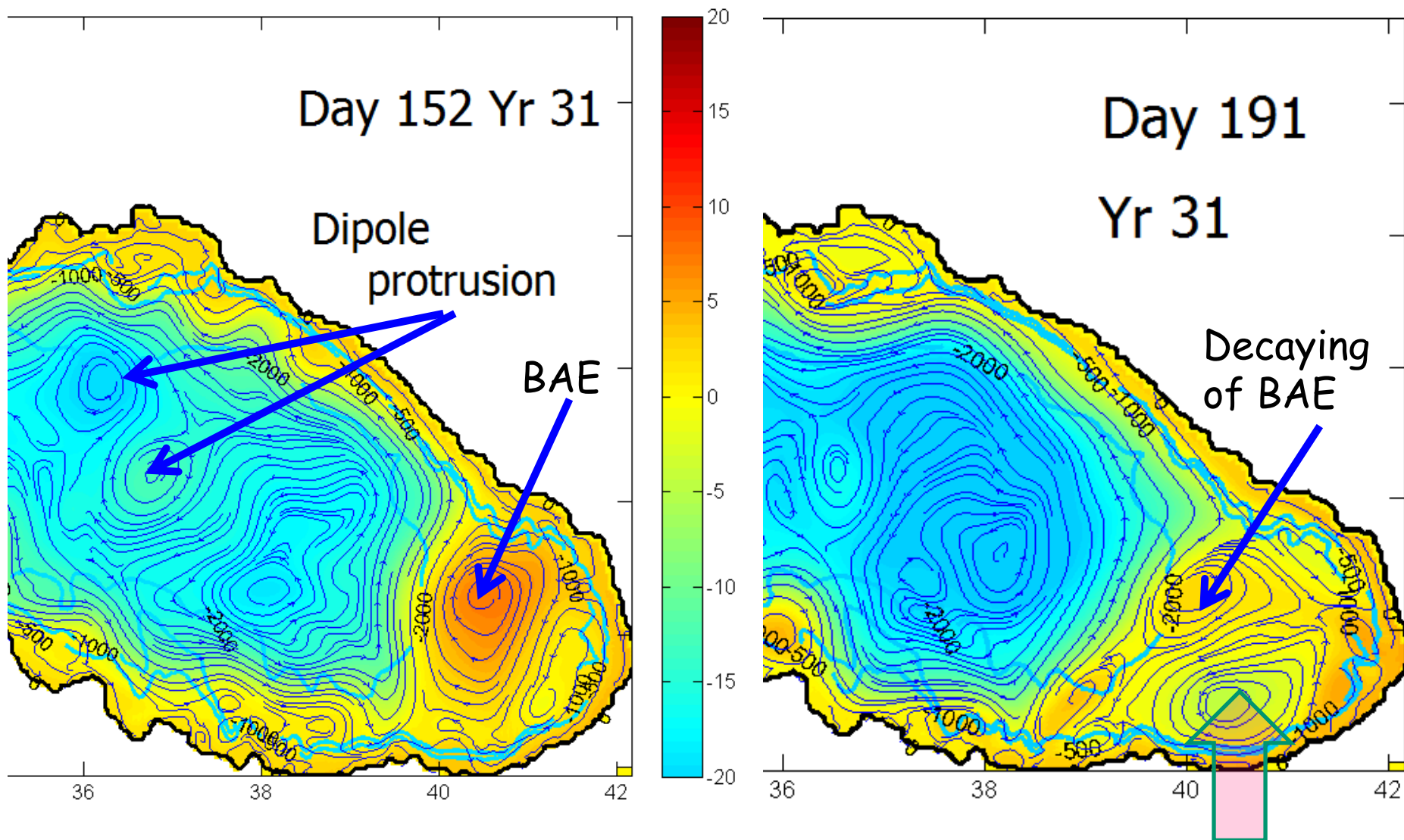


Evolution of an anticyclonic eddy retraced by the sequence of AVHRR images (Feb. 2008)  
Karimova, 2011

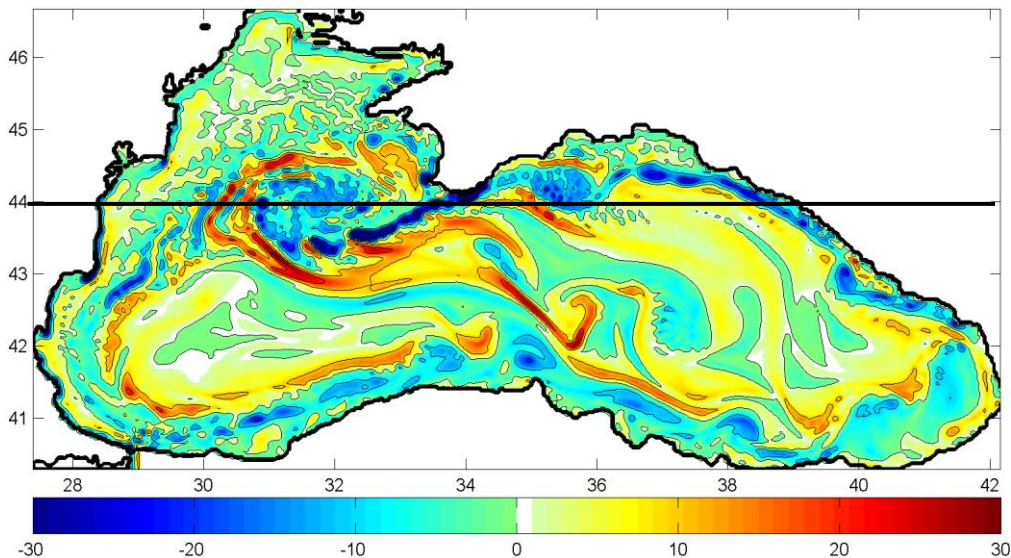
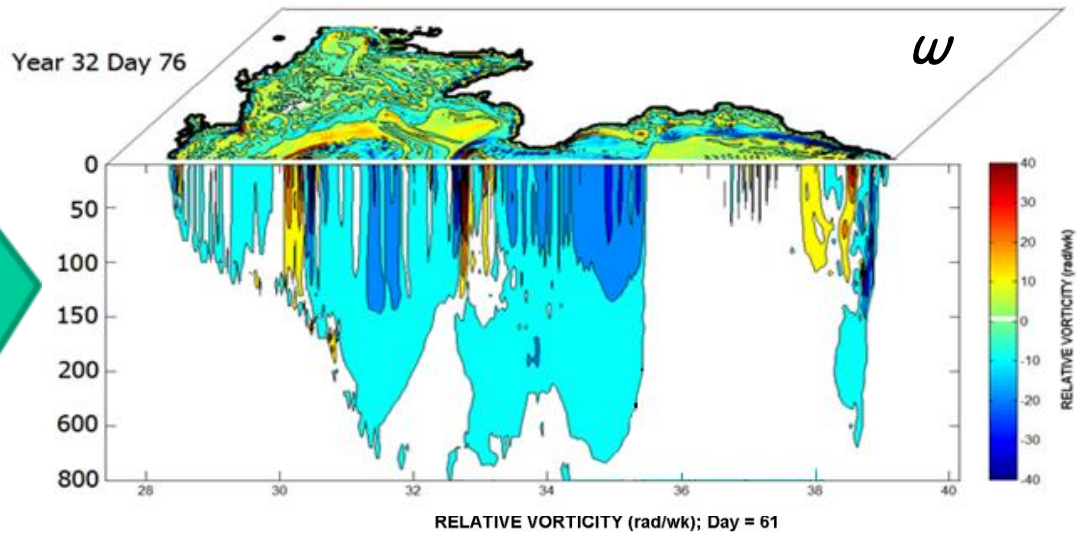
Evidence of Squirts in the Sakary (Turkey) region and N-W Adriatic Sea (Rimini)



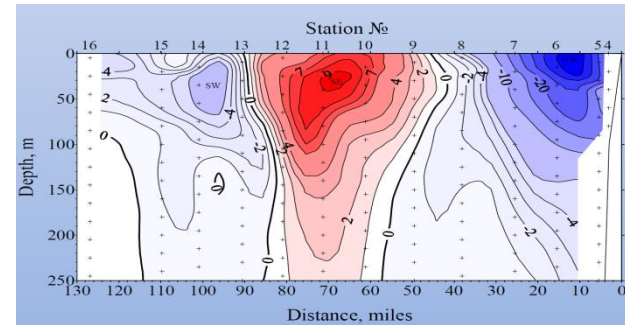
# Формирование и затухание Батумского АЦВ



# Относительная завихренность, $\omega$ (rad/week)



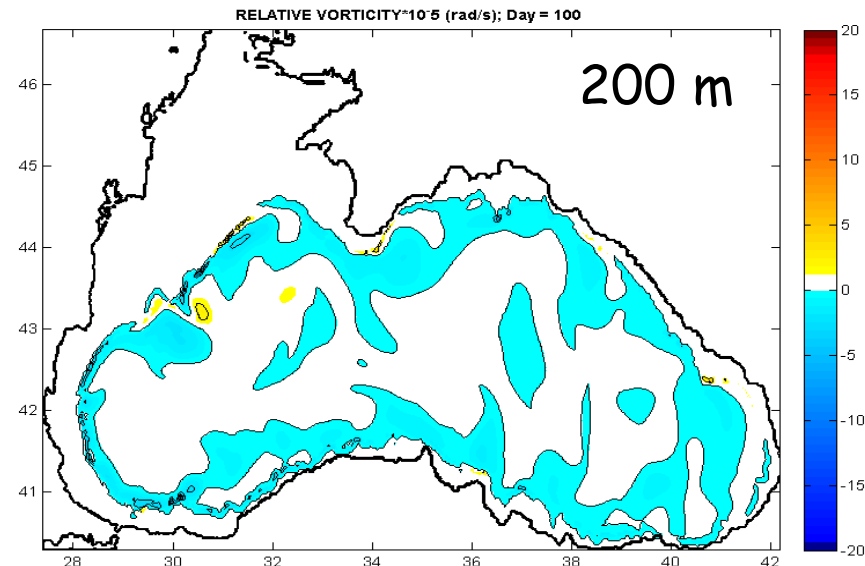
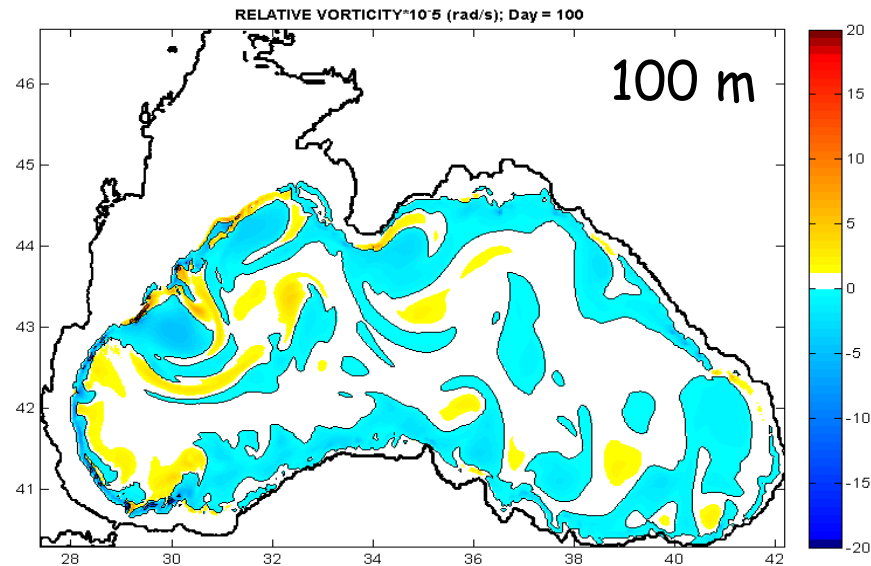
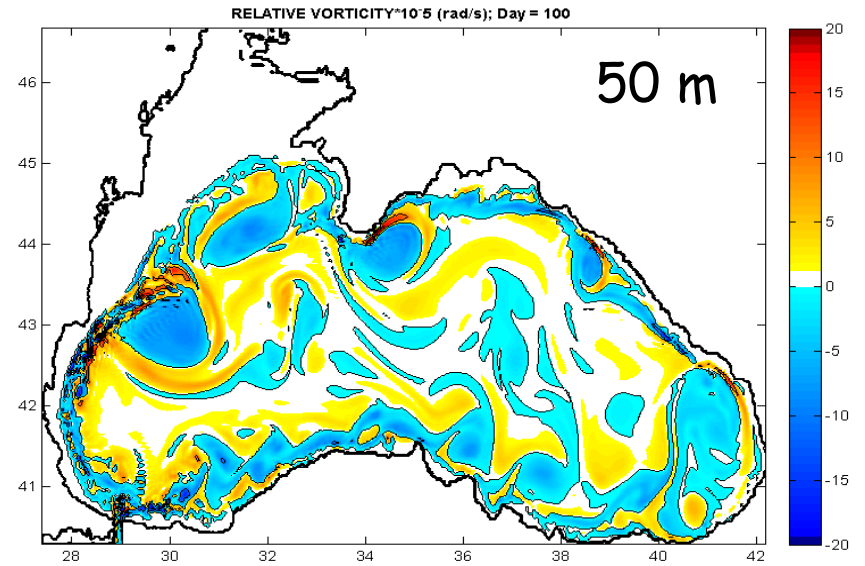
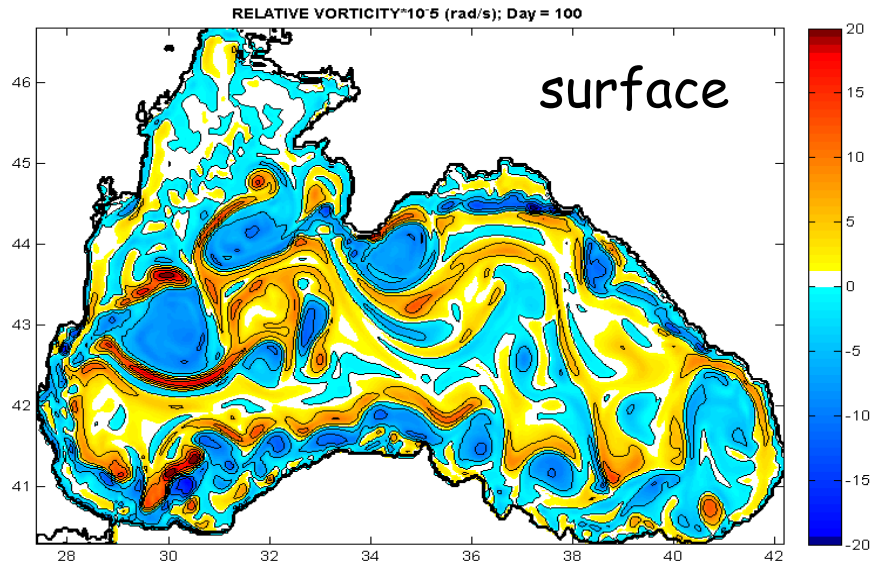
$\omega$  (rad/week)



Section Along an Anticyclonic Eddy near Novorossiysk (ADCP, Zatsepin et al., 2008)

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

# Структура поля относительной завихренности, $\omega$ (rad/week) на разных горизонтах (анимации)



# Метод Окубо-Вейсса

Параметр О-В (Okubo, 1970; Weiss, 1991) рассчитывается по полю средней скорости течения:

$$W = s_n^2 + s_s^2 - \omega^2,$$

Где  $s_n$ ,  $s_s$  - нормальная и касательная компоненты деформации,  $\omega$  - относительная завихренность потока.

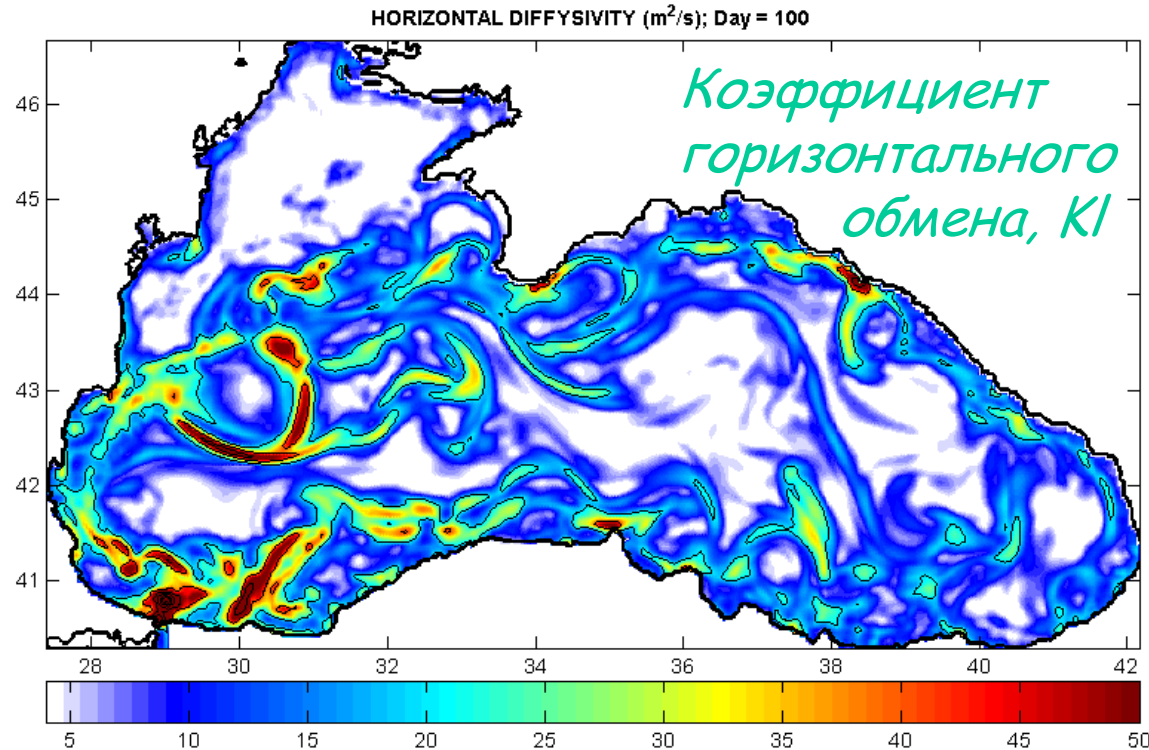
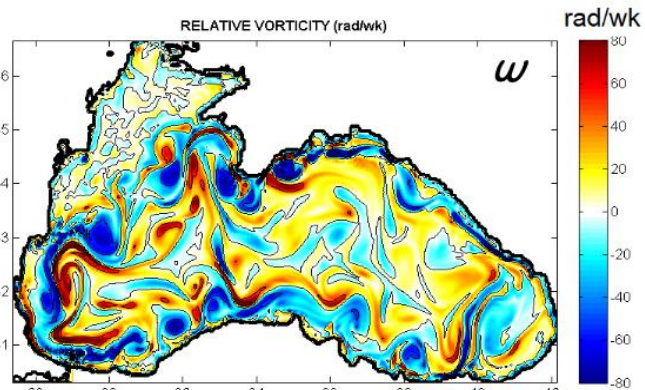
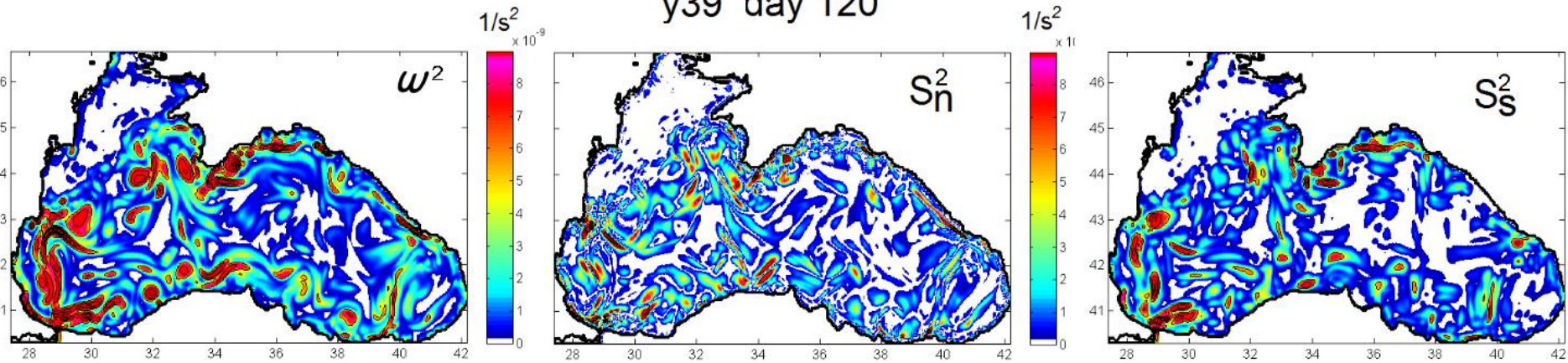
$$s_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}; \quad s_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y},$$

О-В делит океан на районы, где доминирует завихренность и на те, где доминирует сдвиг или деформация скорости.

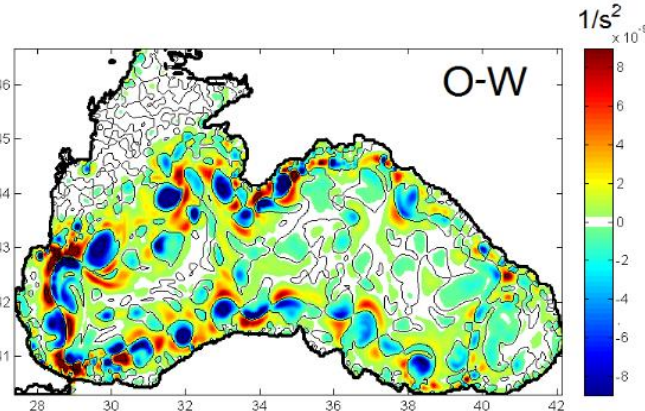
Области, где  $W < 0$  идентифицируются как вихри, поскольку в них доминирует компонента завихренности. Важным в данном методе является оптимальное выделение порогового значения  $W_0$  в районах с различной вихревой активностью. Слишком большие значения будут вести к значительной потере вихрей, в то время как выбор слишком малых значений будут приводить к резкому увеличению их количества и объему обработки (Izern-Fontanet et al, 2009).

# Примеры расчета составляющих $\omega$ , $S_n$ , $S_s$ , $W$

y39 day 120



Коэффициент  
горизонтального  
обмена,  $K_1$



# Модифицированный параметр Окубо-Вейсса

Параметр Окубо-Вейсса делит океан на районы, где доминирует завихренность и на те, где доминирует сдвиг или деформация скорости. При этом знак завихренности не различается. Часто при анализе вихревых структур необходимо знать их знак, поэтому был введен модифицированный параметр Окубо-Вейсса (Chen, Kamenkovich & Verloff, 2016):

из  $S^2 = s_n^2 + s_s^2$  и  $Q^2 = S^2 - \omega^2$ , получим  $E^2 = \frac{\omega}{2|\omega|} (|Q^2| - Q^2)$

→  $E^2 = \pm |Q^2|$ , когда  $Q^2 < 0$  и 0 когда  $Q^2 \neq 0$

**Позитивные/негативные** значения соответствуют **циклоническим/антициклоническим** вихрям

$E^2$  выделяет только ядра мощных, когерентных вихрей и исключает переходные структуры, такие как меандры и волнообразные структуры.

# Примеры расчета MOW

В Черном море анализ результатов численных расчетов мезомасштабной циркуляции (Bowman, Korotenko, 2019) с использованием параметра MOW выявил цепочку регулярных циклонических и антициклонических вихрей вдоль всего ОЧТ. При этом с усилением ОЧТ в осенне-зимний период наблюдается увеличение количества разномасштабных мезомасштабных вихрей, а в весенне-летний период с ослаблением ОЧТ и усилением его меандрирования количество вихрей снижается, а их ядра увеличиваются в размерах.

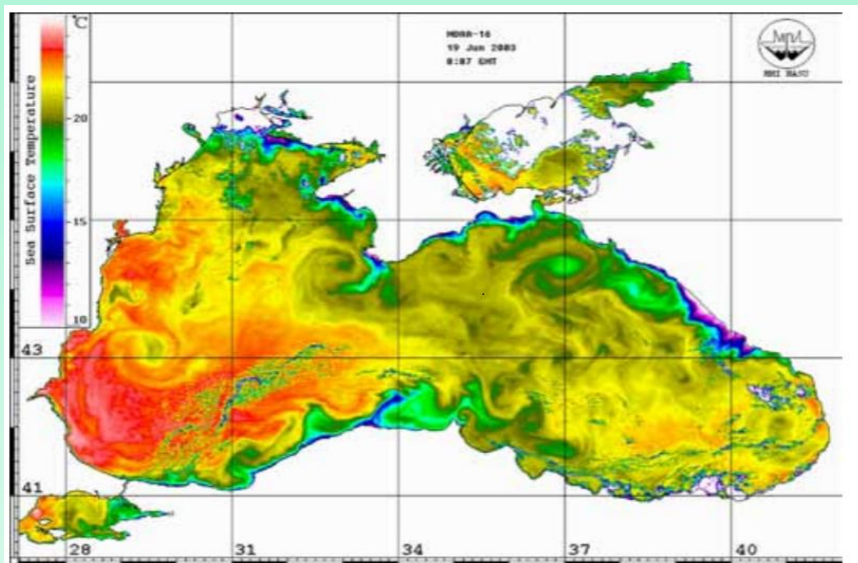
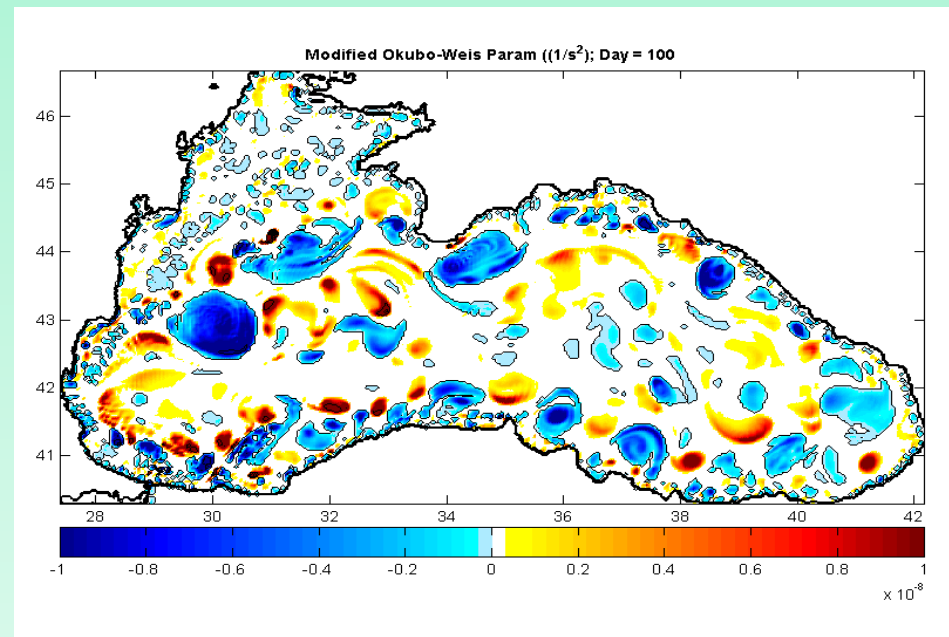


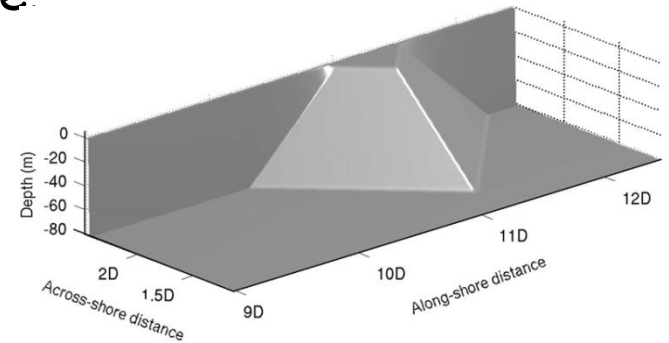
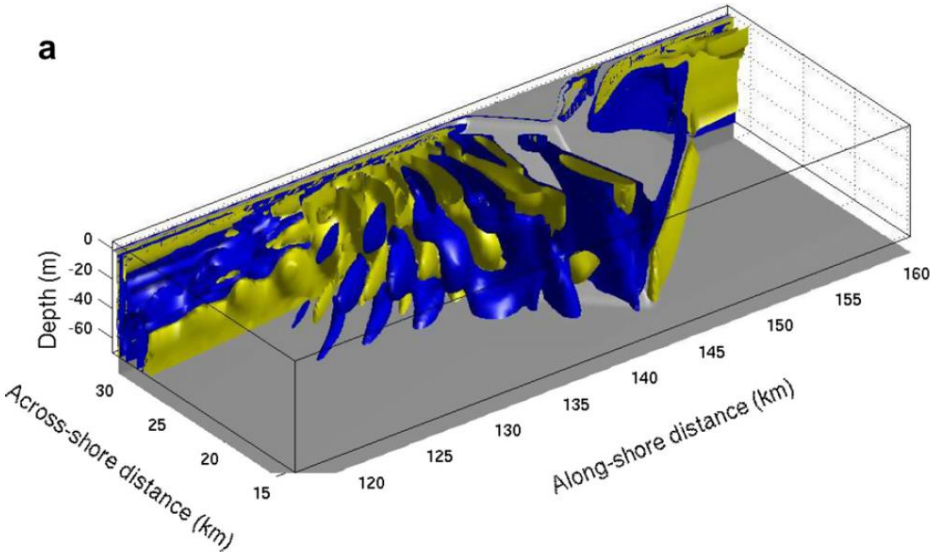
Рис. 6.1. ИК-изображение Черного моря, полученное со спутника NOAA-16 19 июня 2003 г.



$$\text{MOW} \cdot 10^{-8} (1/c)$$

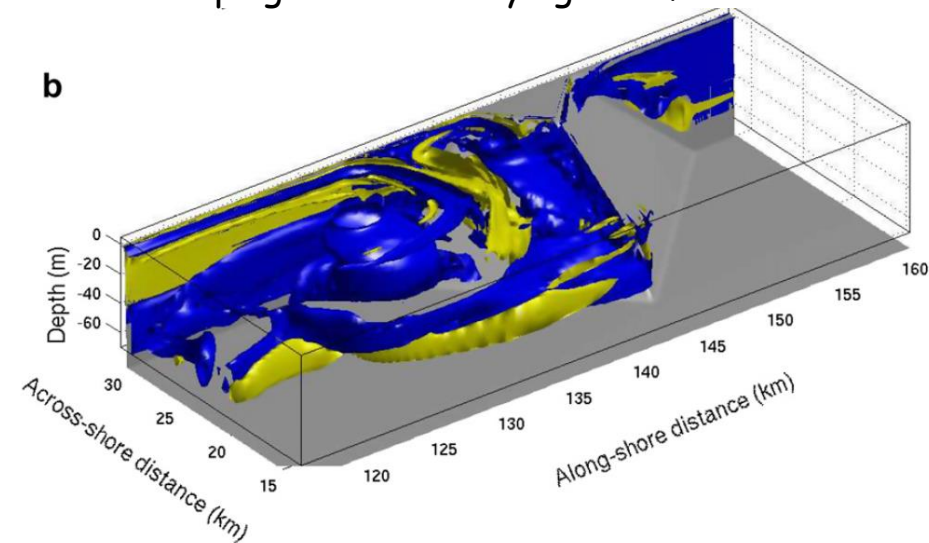
# Three-dimensional views of relative vorticity isosurfaces in the vicinity of the cape

An example of fully attached regime, when no separation occurs and lee waves are evident in the lee of the obstacle.



The obstacle is a triangular prism with sloping boundaries lying on a flat bottom

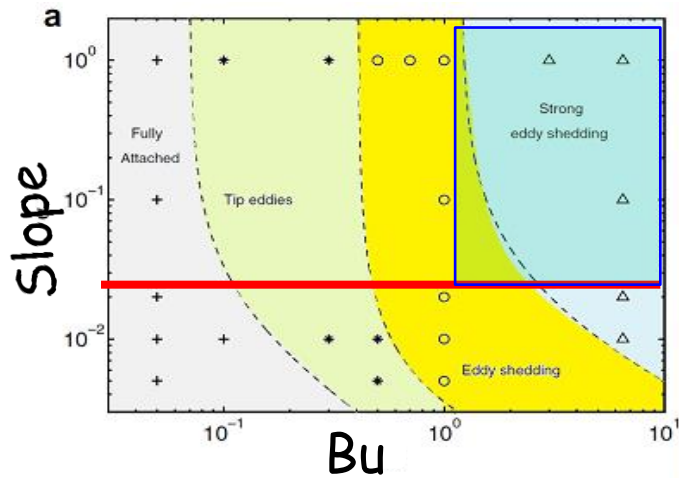
Negative values of RV are in blue,  
positive values are in yellow.



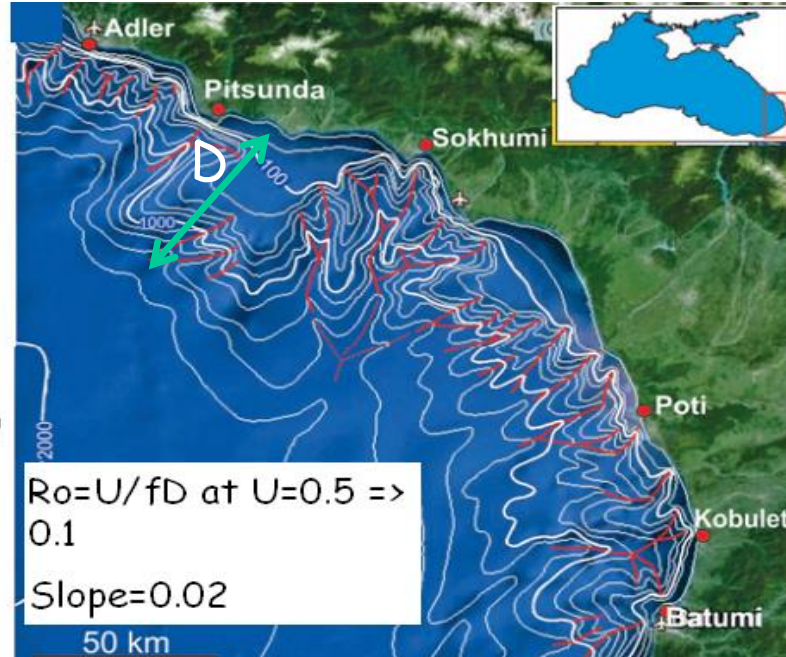
An example of eddy-shedding regime.



# Формирование и отрыв вихрей: Slope vs Bu



Magaldi et al. / *Ocean Modelling* (2008)

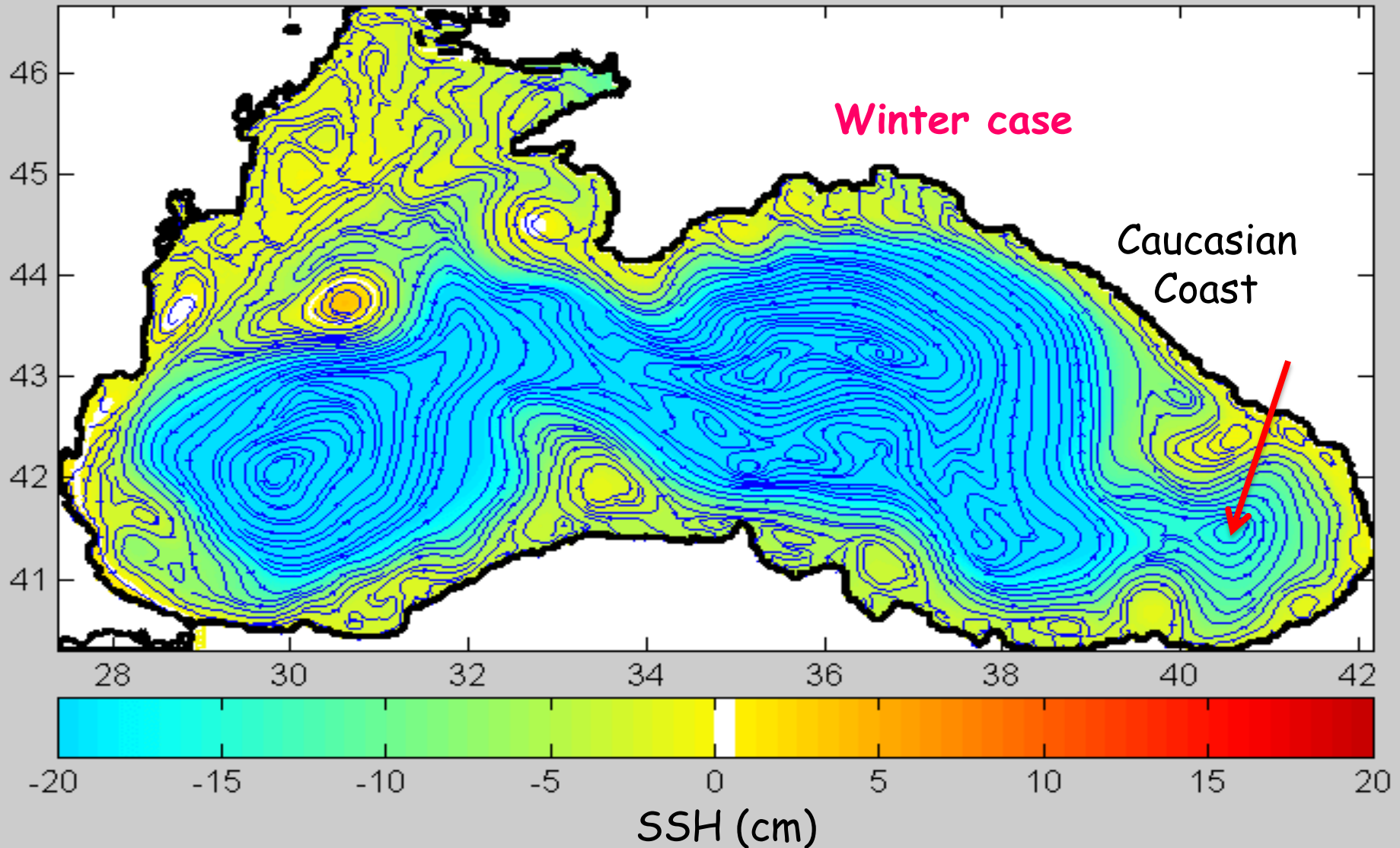


$Bu = Rd/D$  - Burger Number;  
 $Rd = NH/f$  - Baroclinic deformation radius;  
 $N$  = V-B Frequency

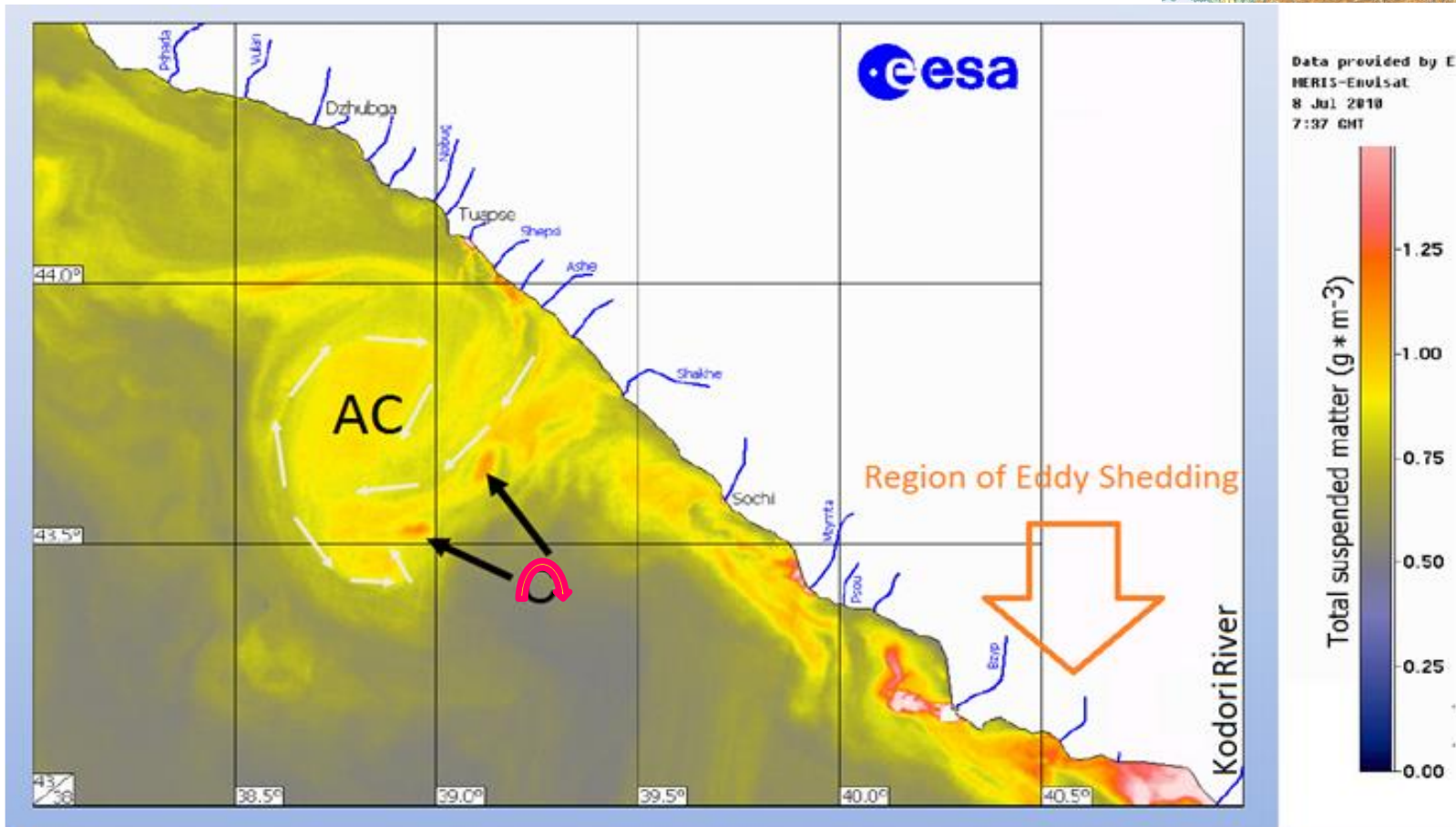
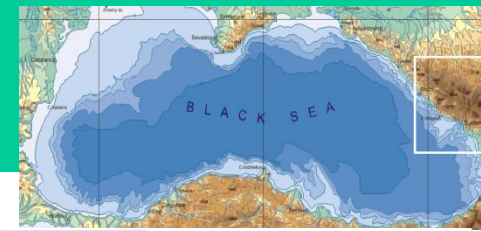
•  $Bu > 1$  - a well defined eddy-shedding regime

# Генерація и отрыв вихря (анимация)

SSH (cm); Day = 1



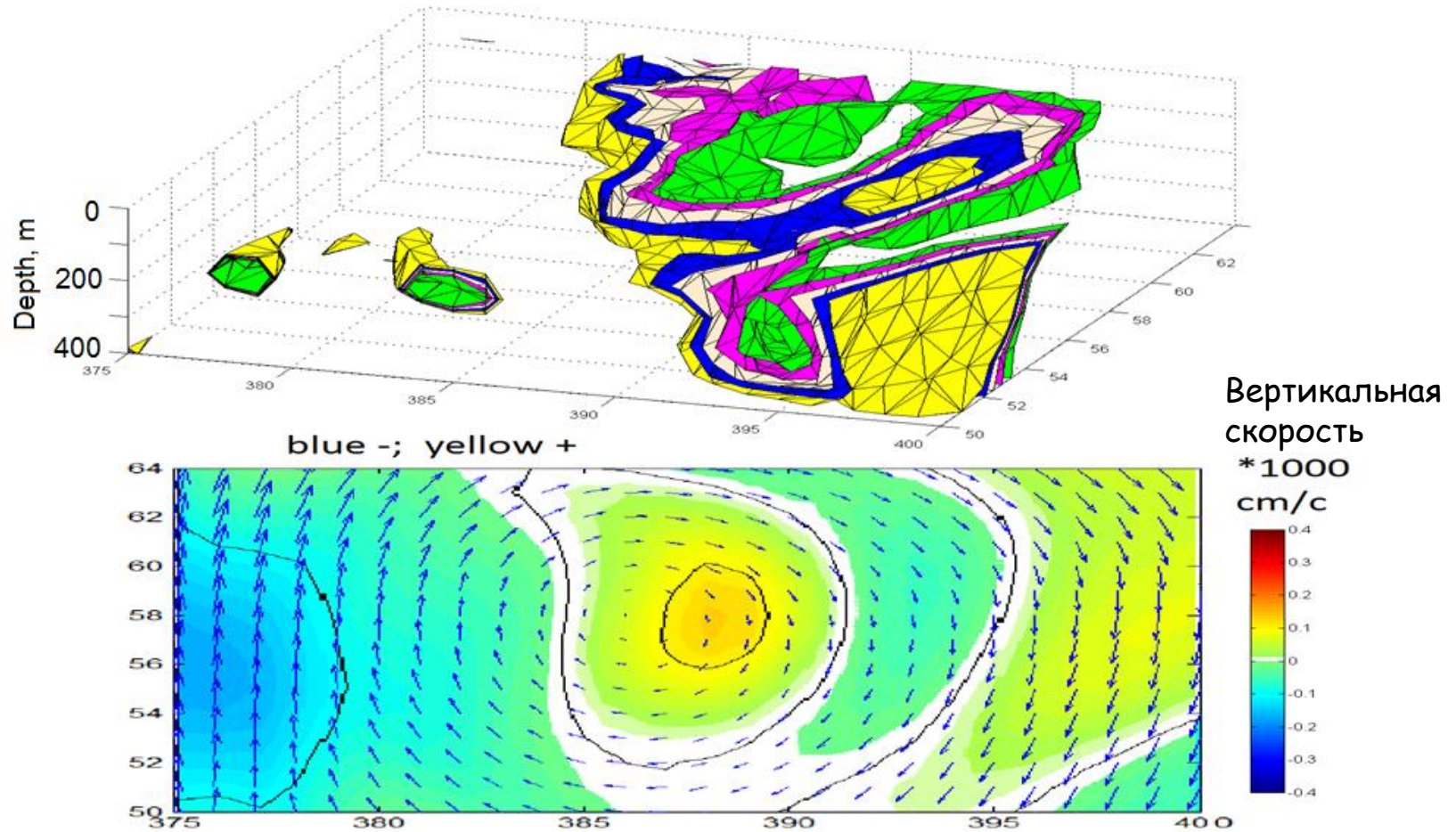
# The Caucasian Eddy



Caucasian Near-Shore Mesoscale AC Eddy (NAE) and Submesoscal Cyclonic Eddies at periphery of NAE

A. Zatsepin personal communication

# Батумский антициклон: трехмерная структура вихря



- 2-х мин гидродинамическая модель DieCAST позволяет выделить многообразие мезомасштабных структур: АС С вихрей, меандров, диполей, протрузий, бифуркаций, струй (squirts)....
- Многие интересные явления, которые удалось обнаружить в модельных экспериментах, связаны с генерацией мезомасштабных вихрей, напр., вихрей у м. Кодори (Абхазия), имеющие сезонный характер. При этом, они порождаются за мысом либо при обтекании ОЧТ осенью-зимой, либо проходящие у мыса после отрыва от Батумского АЦ. Интересно также явления впрыскивания (Squirting) речных вод в виде струй в прибрежную зону в результате бароклинной неустойчивости....
- Моделирование ставит/решает ряд важных вопросов: где и как формируются вихри и какова привязка генерации прибрежных вихрей к особенностям рельефа дна и берега и стоку рек.
- Относительная завихренность и методы Окубо - Вейсса:  $O-W$  и  $MOW$  - важные инструменты для обнаружения и сопровождения мезомасштабных вихрей в море. С их помощью можно оценивать размеры, скорость перемещения, время жизни и другие важные параметры.
- Спутниковые снимки, наряду с получением знаний о мезомасштабных структурах и их эволюции в Черном море, неопределимы для настройки и валидации численных моделей, а также верификации результатов.

Спасибо за внимание

