

Влияние завихренности поля ветра на формирование структуры поверхностных течений на различных временных масштабах

Кубряков А.А. (1), Станичный С.В.(1), Зацепин А.Г.(2)

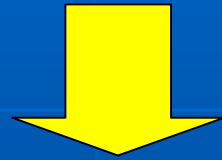
(1) МГИ НАН Украины

(2) Институт океанологии им. П.П. Ширшова

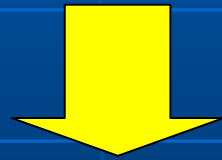
Современные проблемы дистанционного зондирования
Земли из космоса
2011

Завихренность поля ветра над Черным морем является одним из важнейших факторов, определяющих циркуляцию бассейна.

Ветровая циркуляция



Крупномасштабная циркуляция вод



Мезомасштабная бассейновая циркуляция

Спутниковая альтиметрия – единственный инструмент, позволяющий **регулярно, не зависимо от погодных условий** восстанавливать циркуляцию **всей акватории** Черного моря

С 1992 года точность альтиметров достигает **~ 2 см.**

Альтиметр измеряет высоту прибора над морской поверхностью, связанную с динамической топографией **h**, градиенты которой определяют поверхностную геострофическую циркуляцию бассейна:

$$u_g = - \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$v_g = \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial x}$$

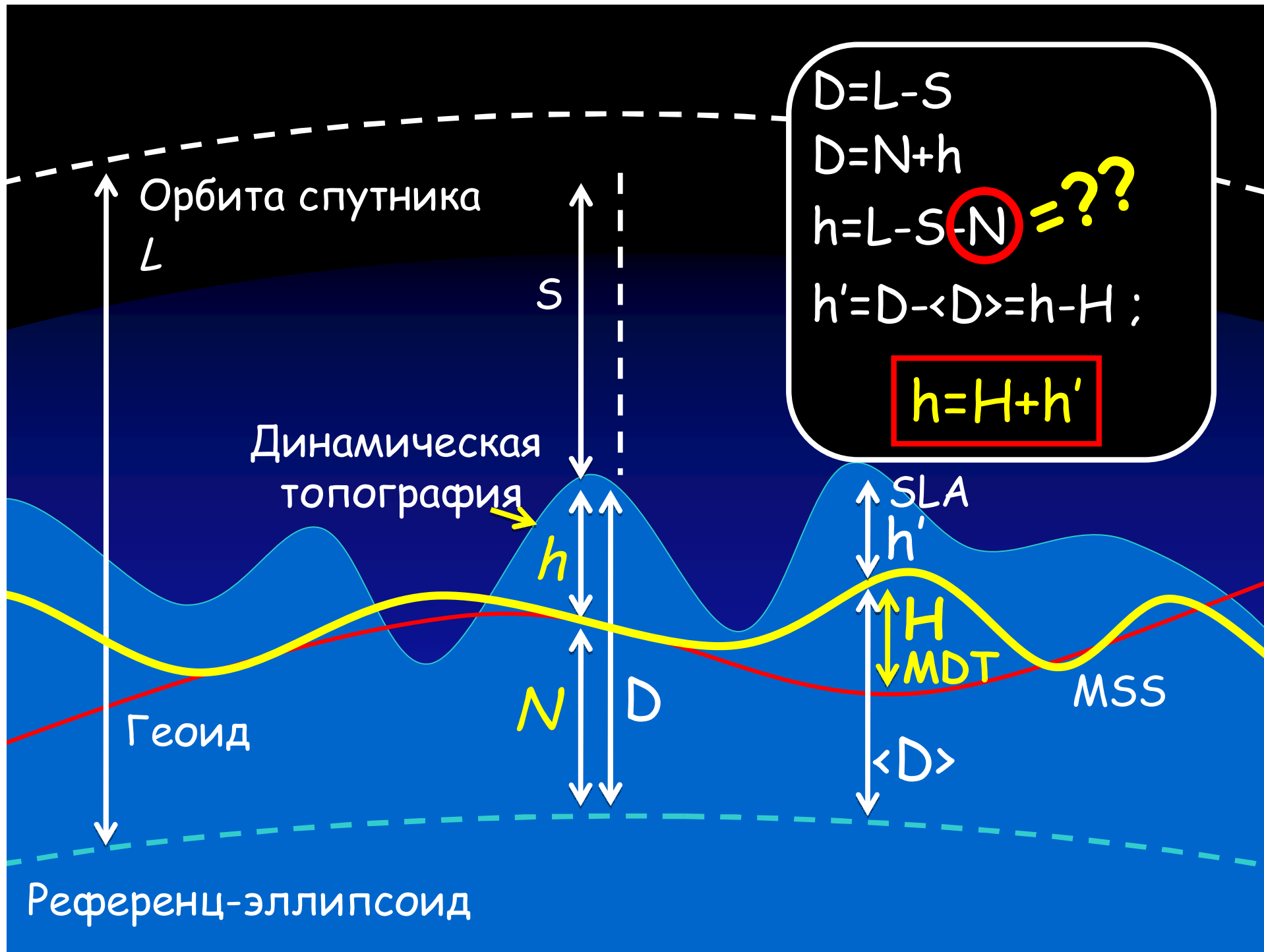
$$D=L-S$$

$$D=N+h$$

$$h=L-S-N=???$$

$$h'=D-\langle D \rangle = h-H;$$

$$h=H+h'$$

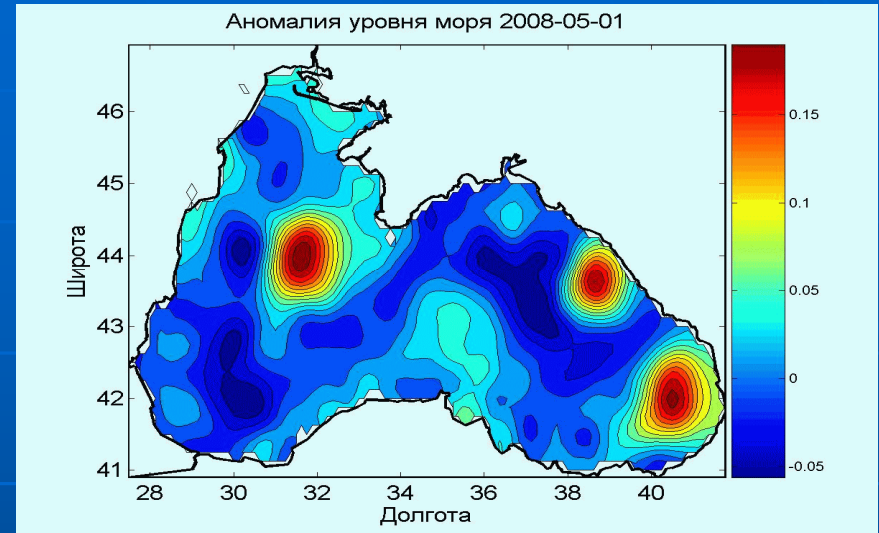
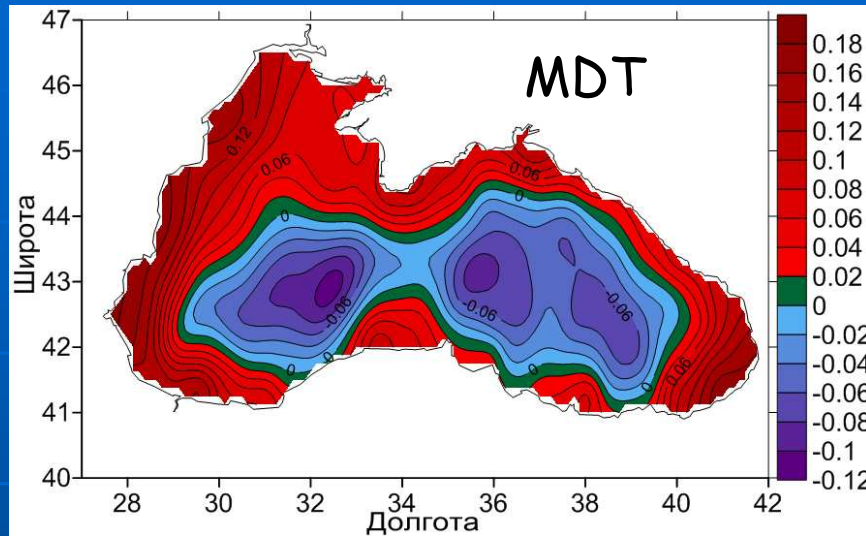


Средняя динамическая топография

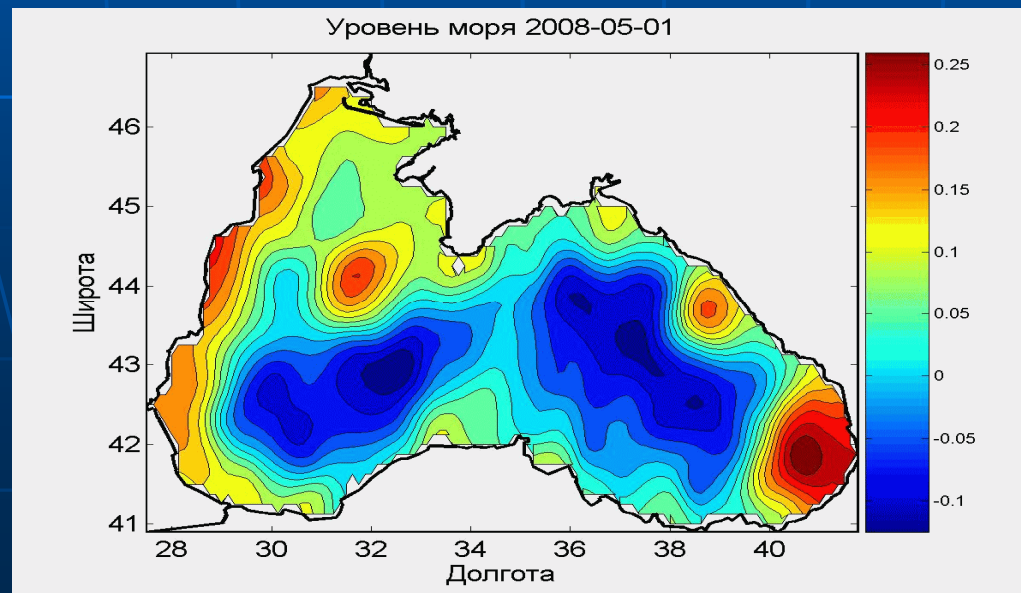
[Кубряков А.А, Станичный С.В., 2011]

Mapped Sea Level Anomaly

[<http://www.aviso.oceanobs.com>]



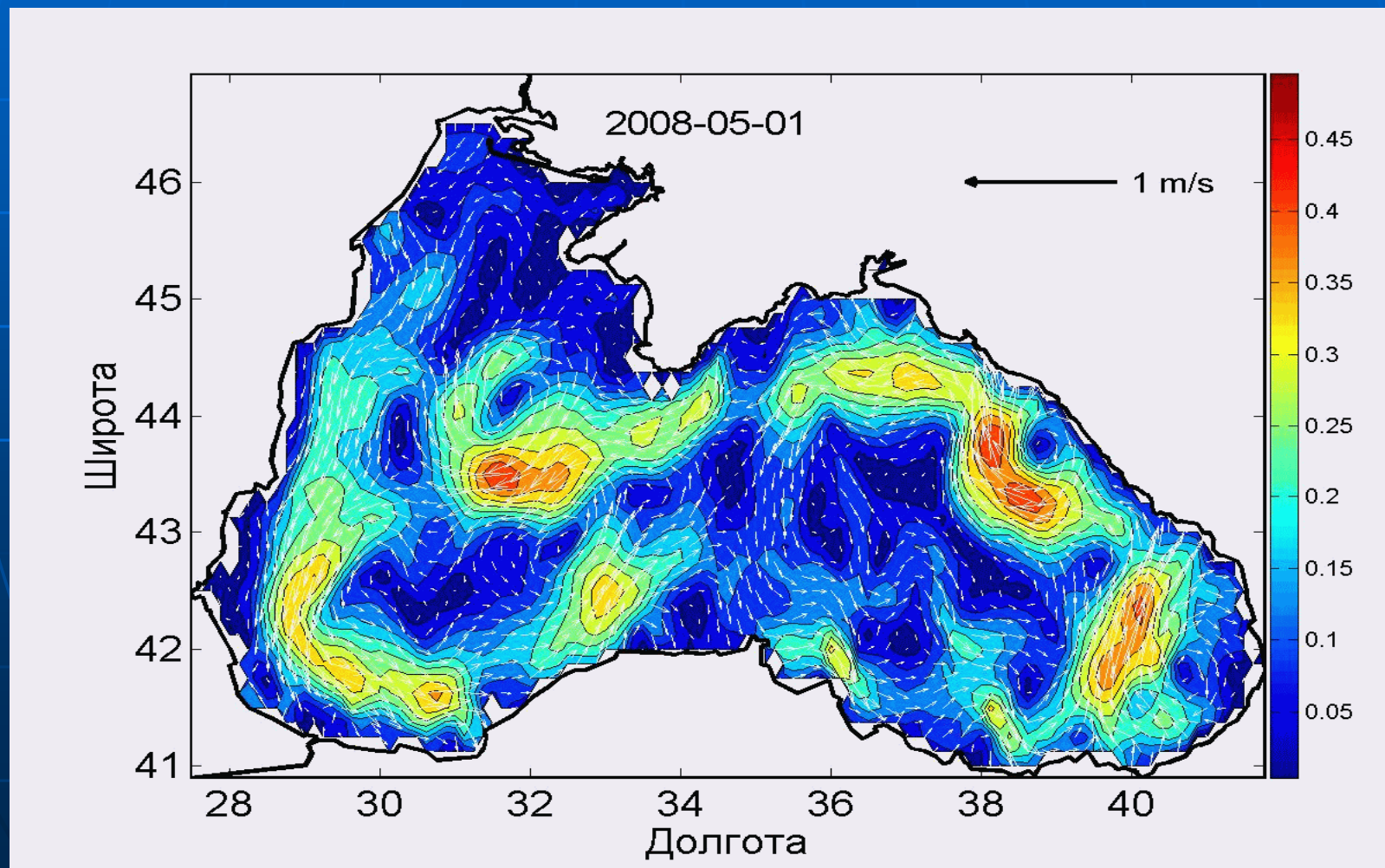
Абсолютная динамическая топография



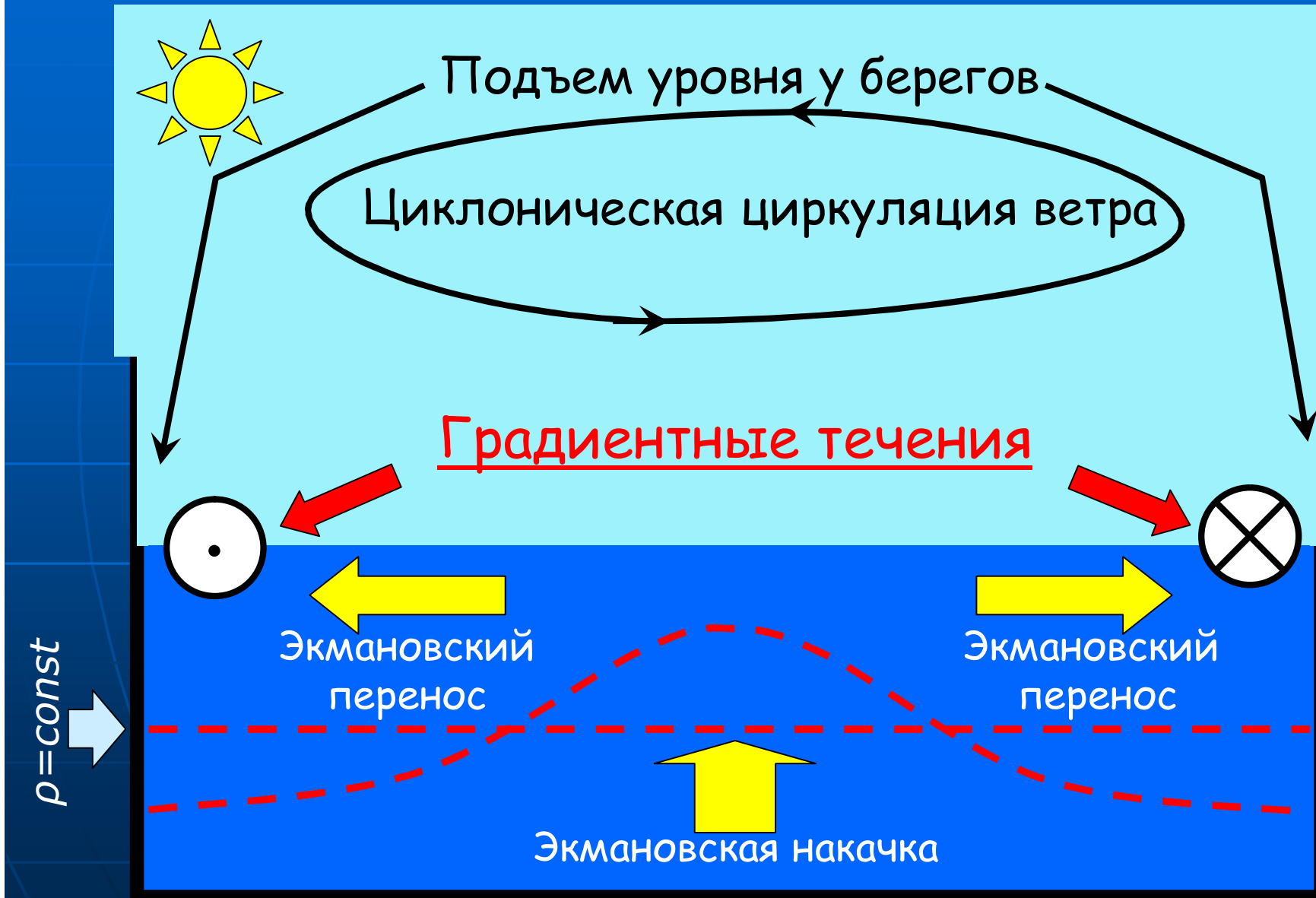
По градиенты абсолютной динамической топографии
рассчитываются геострофические скорости течений на
поверхности

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$v_g = \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial x}$$



«Ветровой» механизм генерации геострофических течений в Черном море



[Зацепин А.Г. и др. 2010]

Межгодовая изменчивость интегральной завихренности скорости ветра и средней кинетической энергии течений

Средняя кинетическая энергия течений (МКЕ):

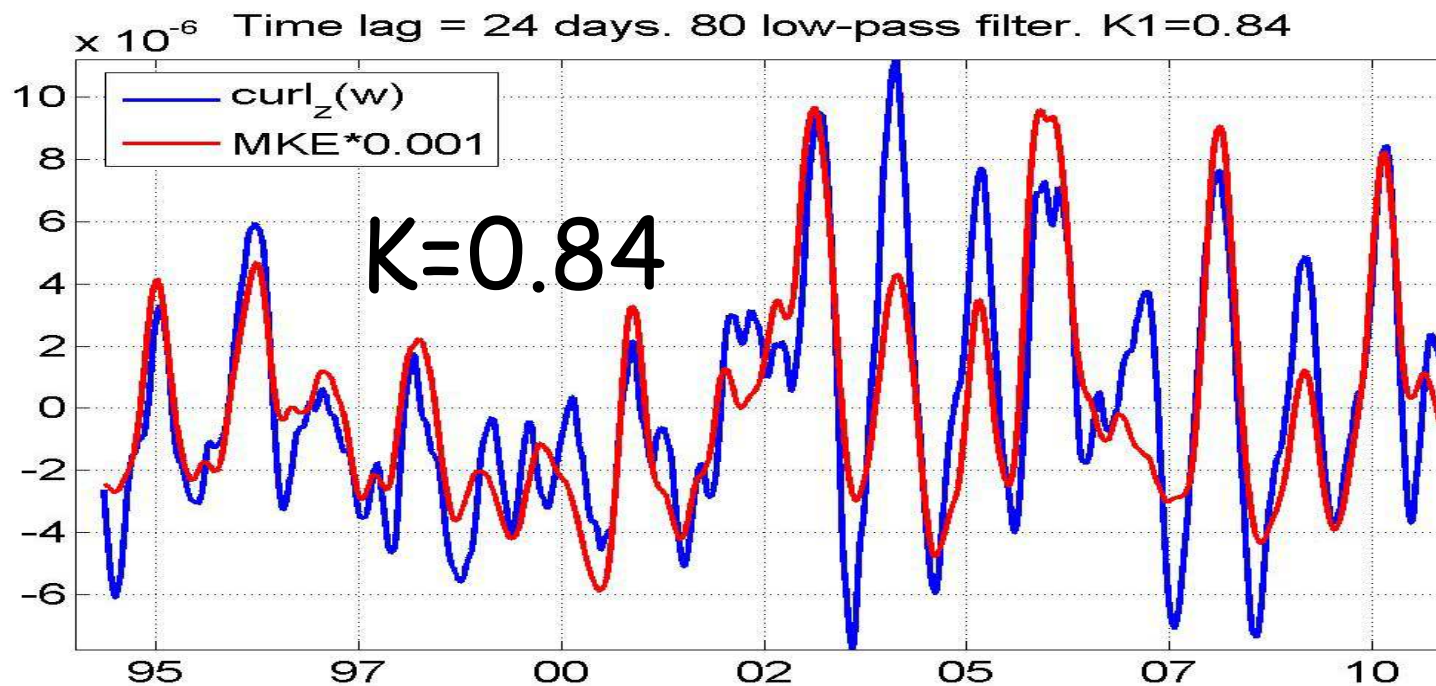
$$MKE = \frac{1}{2} (\langle u \rangle^2 + \langle v \rangle^2)$$

VS

Завихренность скорости ветра

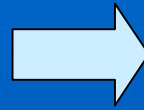
[Шокуров М.В., МГИ]

$$\text{curl}_z w = \frac{\partial v_w}{\partial x} - \frac{\partial u_w}{\partial y}$$



Время реакции циркуляции на изменение завихренности скорости ветра (сдвиг фаз между сигналами)

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\rho W_{ek} = \frac{1}{f} \text{rot}(\text{Tau})$$



Если

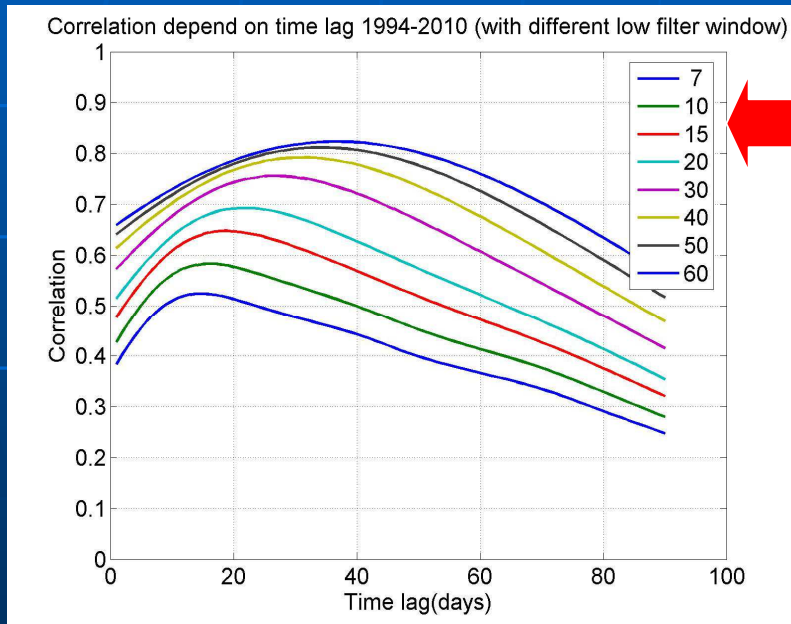
$$W_{ek} \sim \sin \varphi$$

, то

$$h \sim \cos \varphi$$

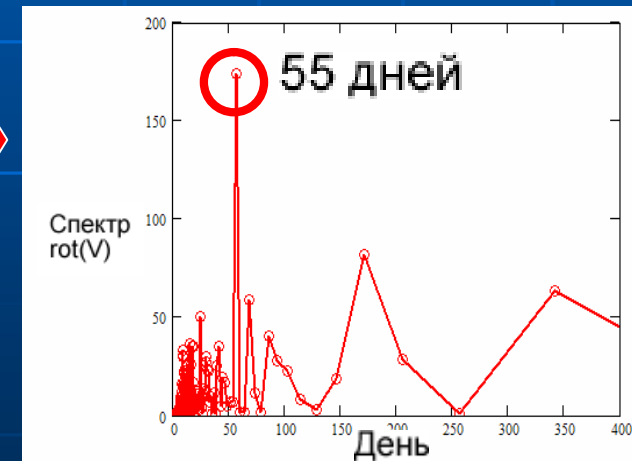
Сдвиг фаз равен четверти периода -

$$\Delta \varphi \sim \frac{\pi}{2}$$



Оптимальный сдвиг по времени при минимальной фильтрации составляет 14 дней

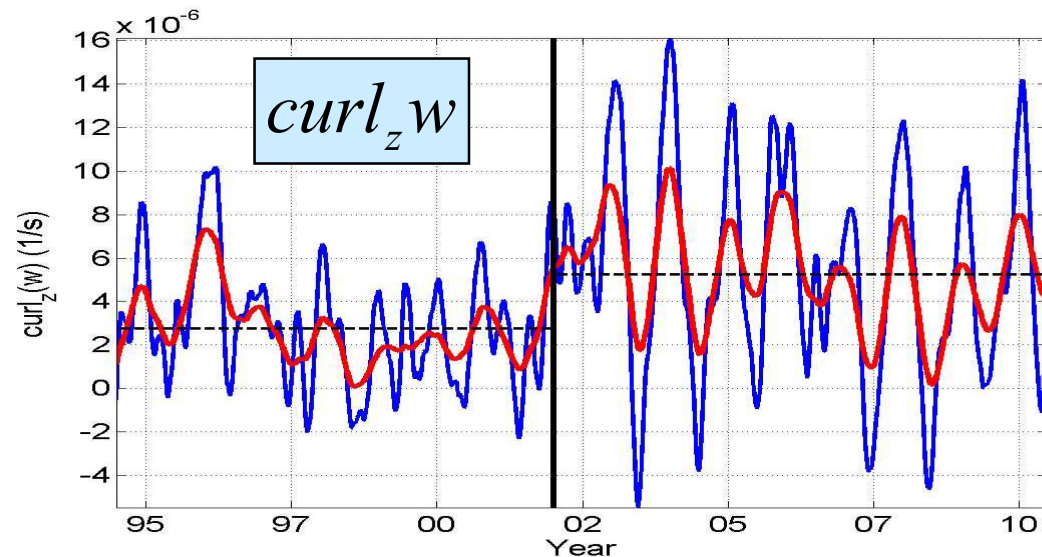
Максимум спектра завихренности скорости ветра приходится на T=55 дней



Зависимость коэффициента корреляции от временного сдвига и окна фильтра

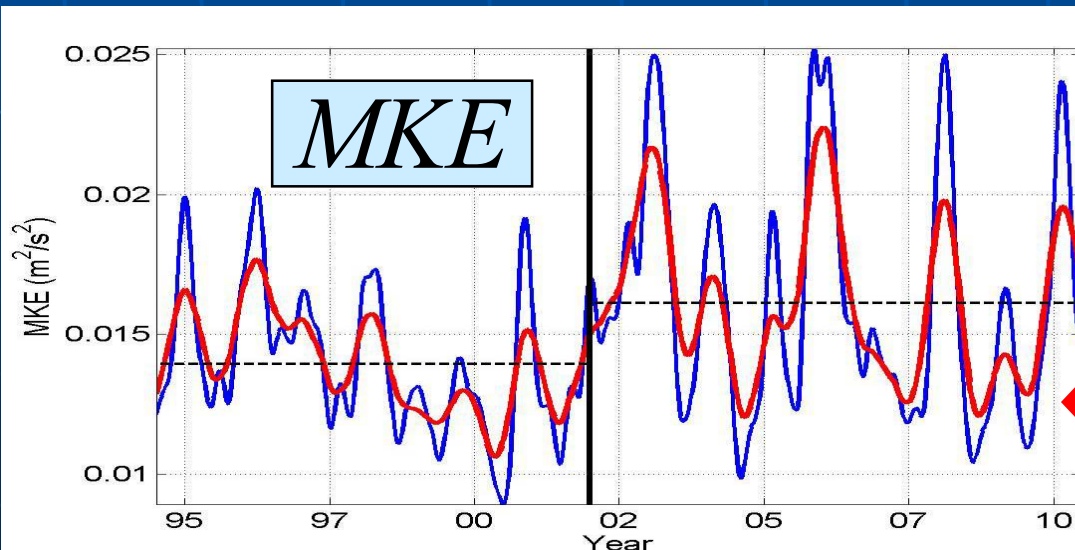
Сдвиг фаз равен T/4=55/4=14 дней

Влияние смены ветрового режима в 2002-2003 годах на динамику верхнего слоя Черного моря



Завихренность скорости ветра

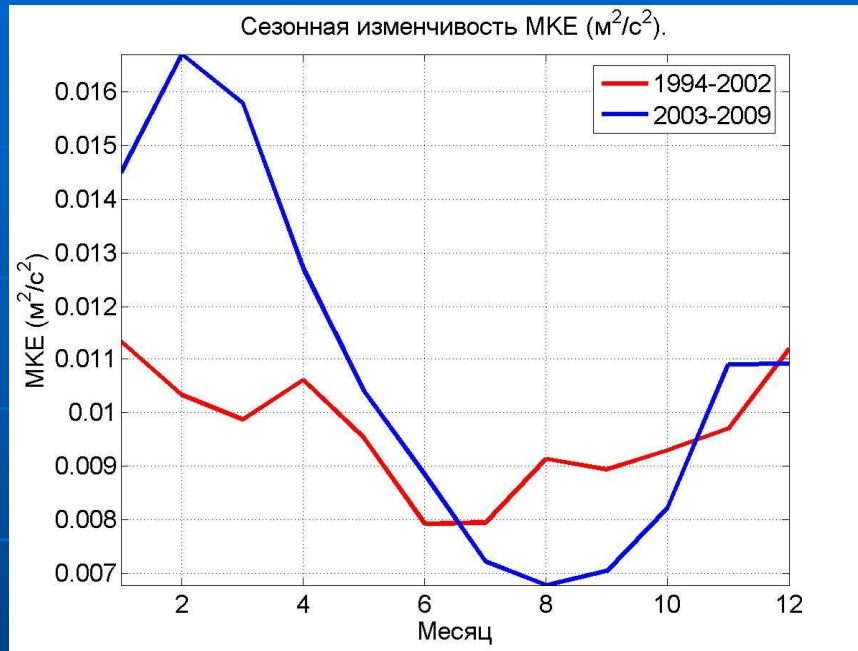
$$\text{curl}_z w = \frac{\partial v_w}{\partial x} - \frac{\partial u_w}{\partial y}$$



Средняя кинетическая энергия течений:

$$MKE = \frac{1}{2} (\langle u \rangle^2 + \langle v \rangle^2)$$

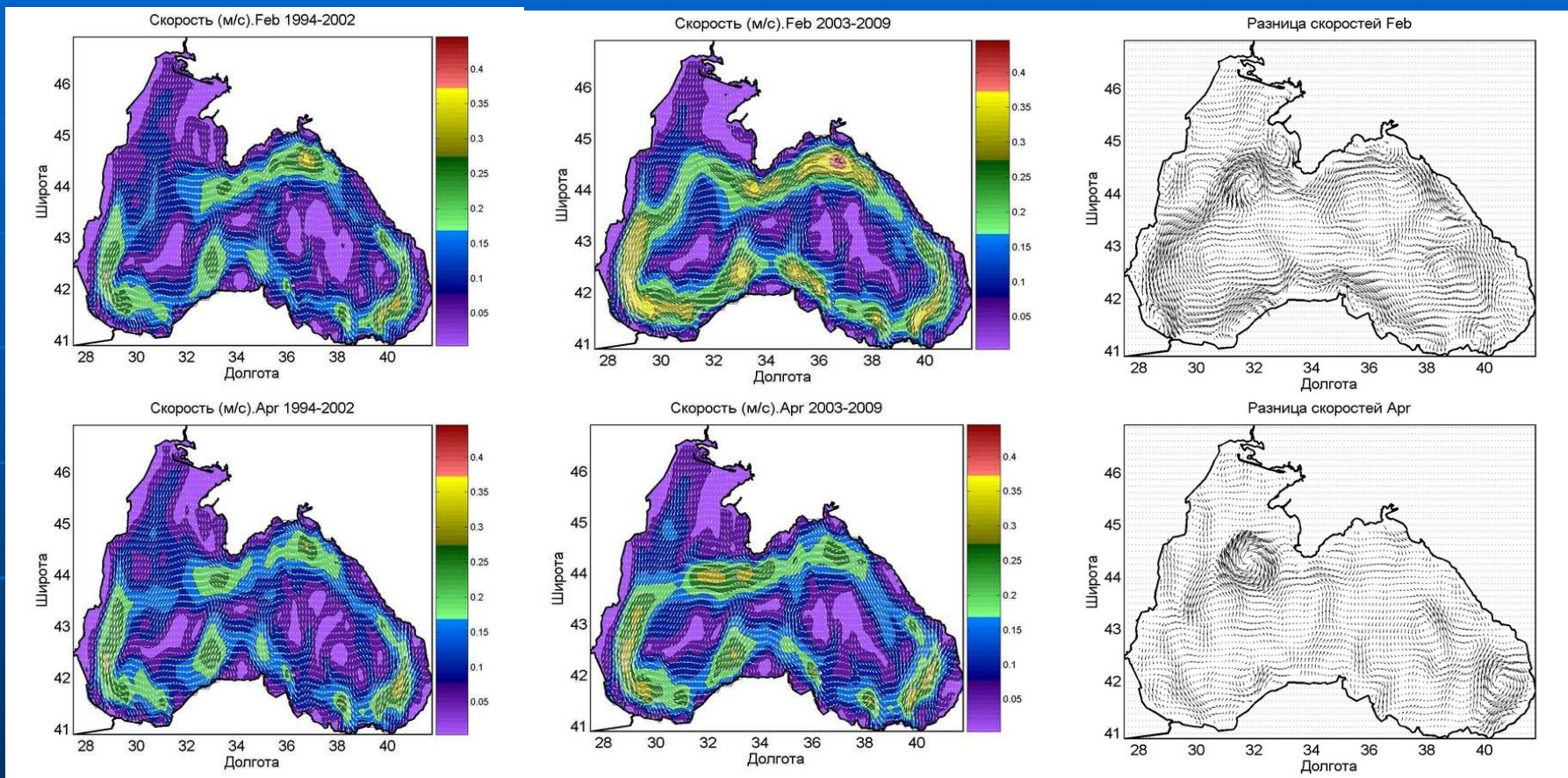
Сезонная изменчивость интегральной завихренности скорости ветра и средней кинетической энергии течений



Сезонный ход осредненных по бассейну МКЕ(слева) и завихренности скорости ветра(справа) за периоды 1994-2002 и 2003-2009 гг.

Амплитуды сезонного хода для обеих величин после 2002 года выросли в 3-4 раза

Пространственные изменения поверхностной циркуляции Черного моря как следствие изменения ветрового режима в 2002–2003 годах



Среднемесячные карты геострофических скоростей, осредненные за периоды 1994-2002 годы и 2003-2009 годы, и их разности за февраль (вверху) и апрель (внизу)

Мезомасштабная изменчивость

Метод 1 Вихревая кинетическая энергия (ЕКЕ), рассчитанная как дисперсия отклонений скорости в каждой точке поля

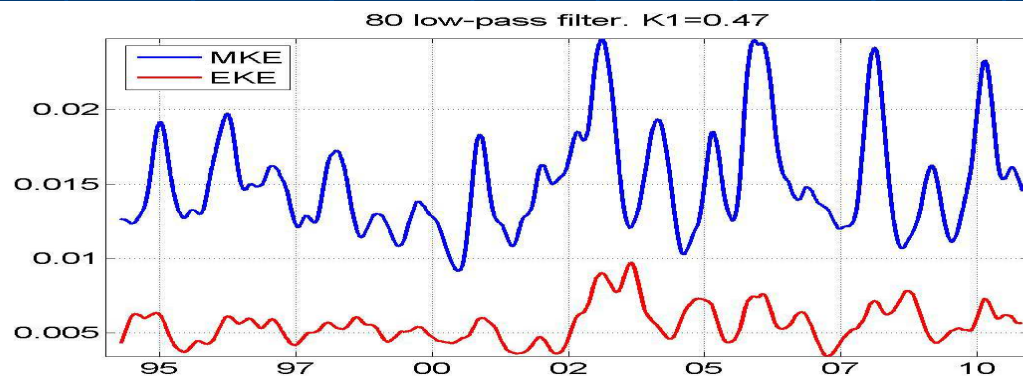
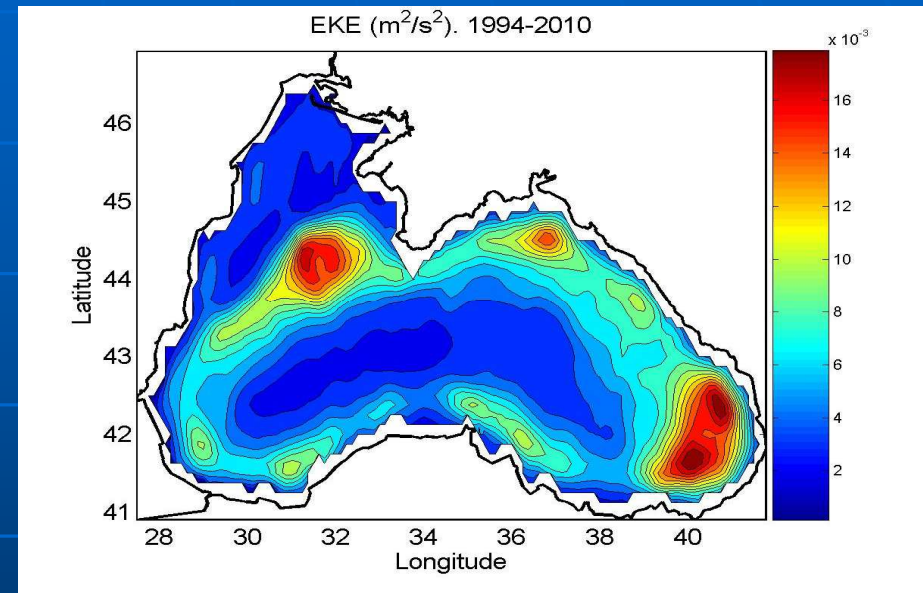
$$EKE = \frac{1}{2} (\langle u' \cdot u' \rangle + \langle v' \cdot v' \rangle)$$

, где

$$u' = u - \langle u \rangle$$
$$v' = v - \langle v \rangle$$

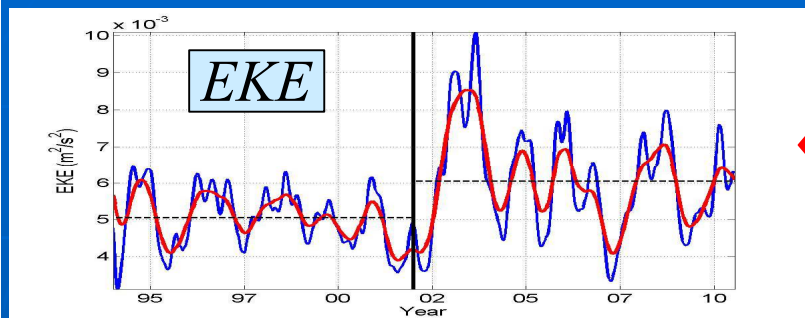
Зоны с максимальной ЕКЕ характеризуют зоны мезомасштабной активности.

На количественные оценки значительное влияние оказывают пульсации среднего потока, отклонение положения струи ОЧТ, замедление/ускорение среднего потока и т.п

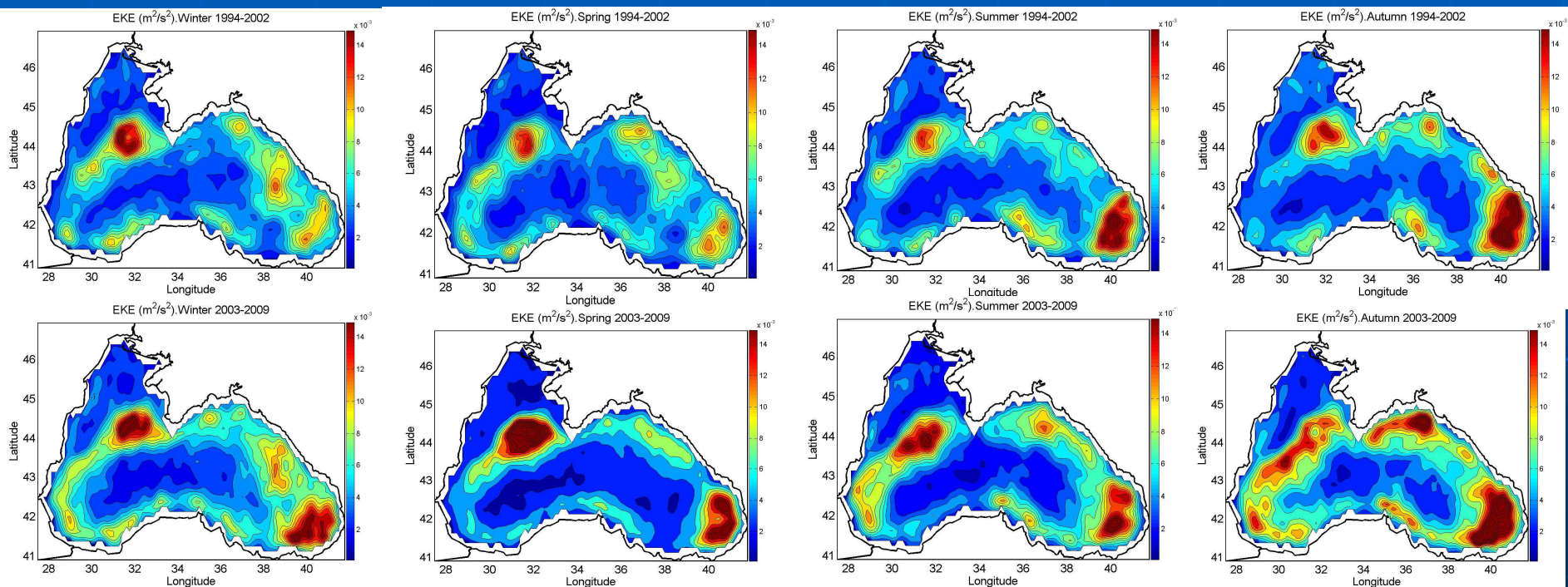


Вихревая кинетическая энергия составляет ~30% от средней энергии течений

Влияние смены ветрового режима в 2002-2003 на поля вихревой кинетической энергии



Изменение режима ЕКЕ в 2002-2003 годах

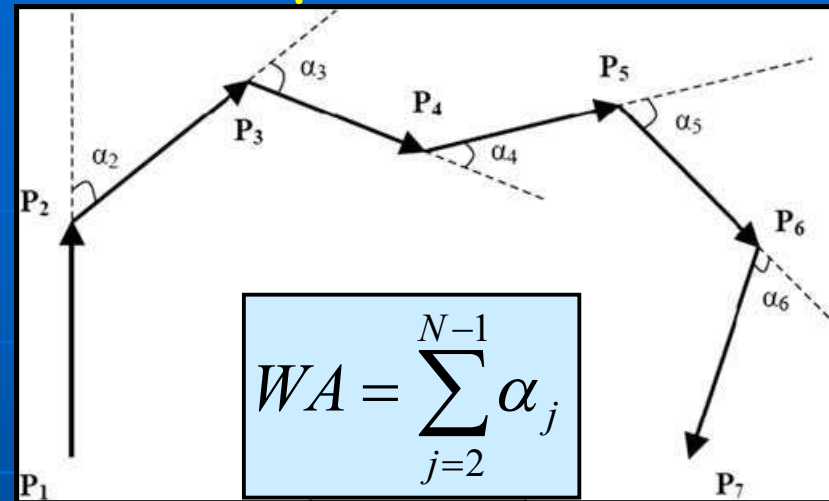


Среднеквартальные карты вихревой кинетической энергии, осредненные за периоды 1994-2002 годы (вверху) и 2003-2009 (внизу) за зиму, весну, лето и осень (слева-направо)

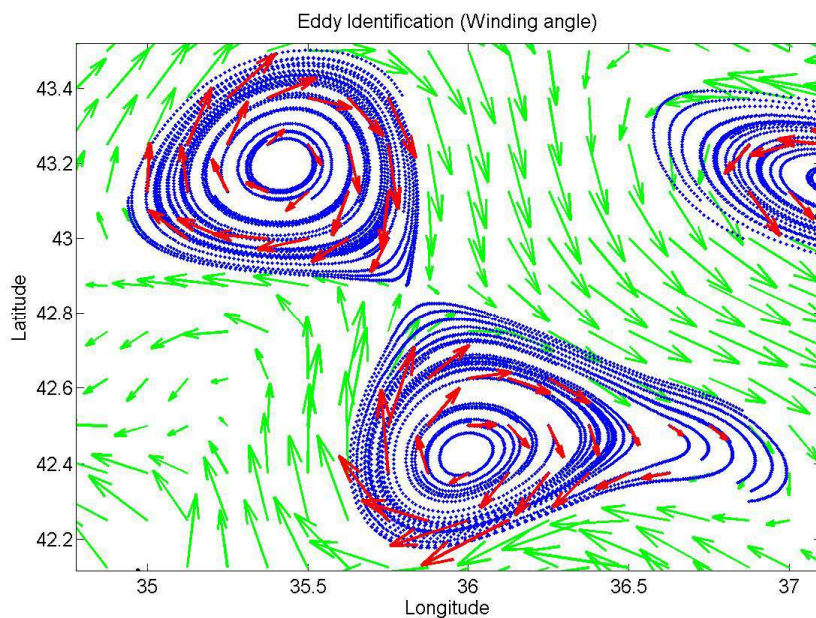
Метод 2 Автоматическая идентификация мезомасштабных вихревых образований

В каждой точке стационарного поля аномалий скорости запускается виртуальная частица и рассчитывается её суммарный угол отклонения (WA), "winding angle" - "угол намотки":

$$WA = \sum_{j=2}^{N-1} \alpha_j$$



Метод "winding angle" идентификации вихря [Chagneux et al., 2008]

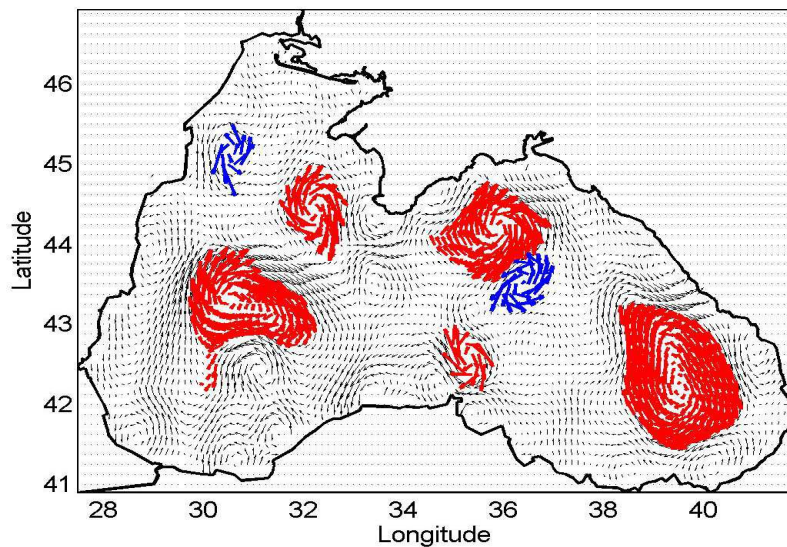


Частицы с $WA > 360^\circ$ описывают замкнутый контур уровня

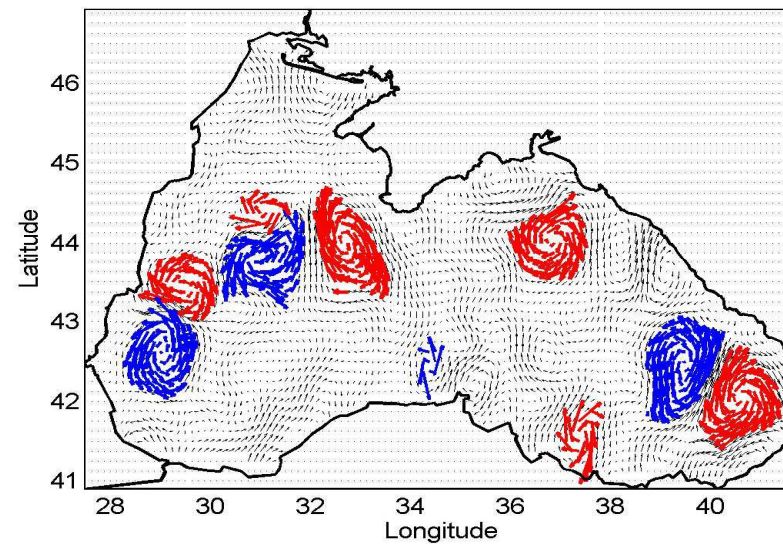
находятся в вихре

Примеры полей с идентифицированными вихревыми образованиями

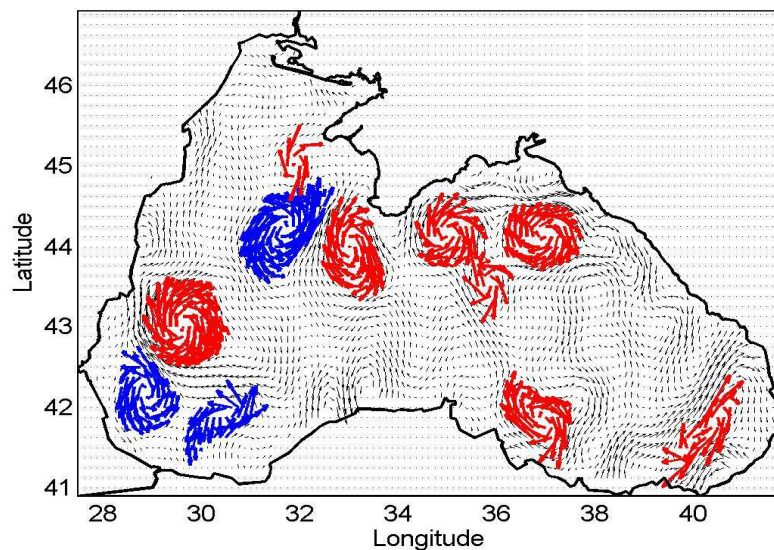
2008-09-17



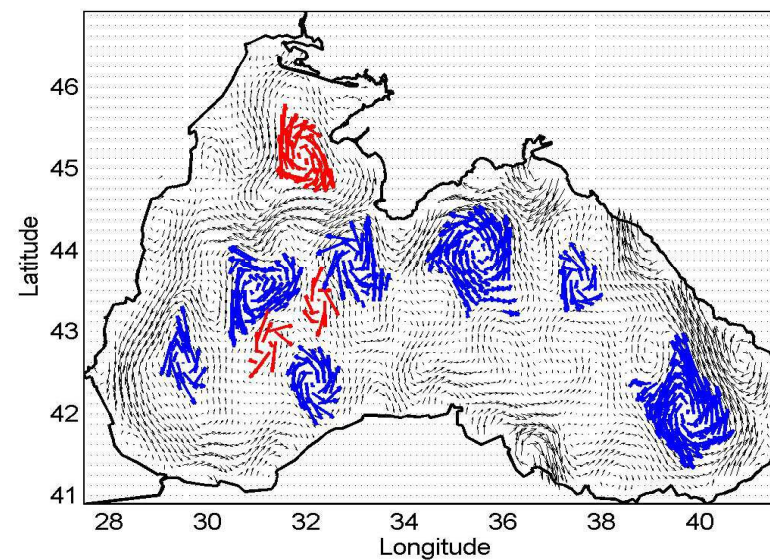
2004-06-09



2003-06-18

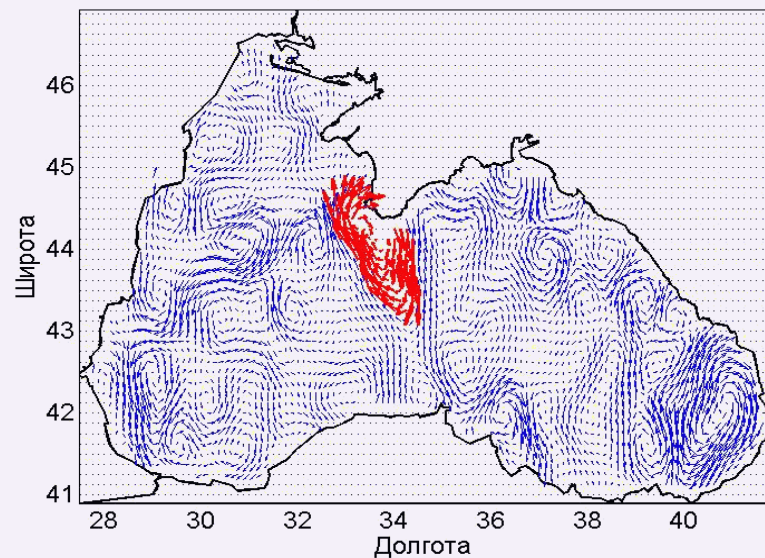


2010-02-03

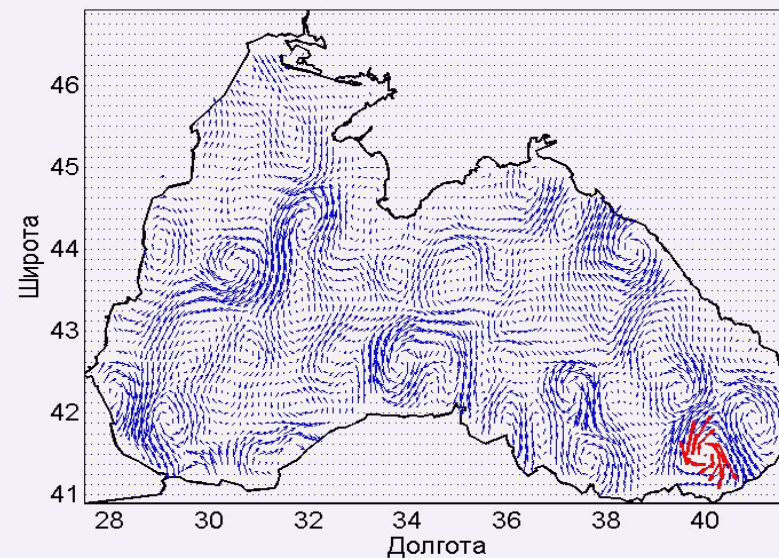


Примеры идентифицированных вихревых образований

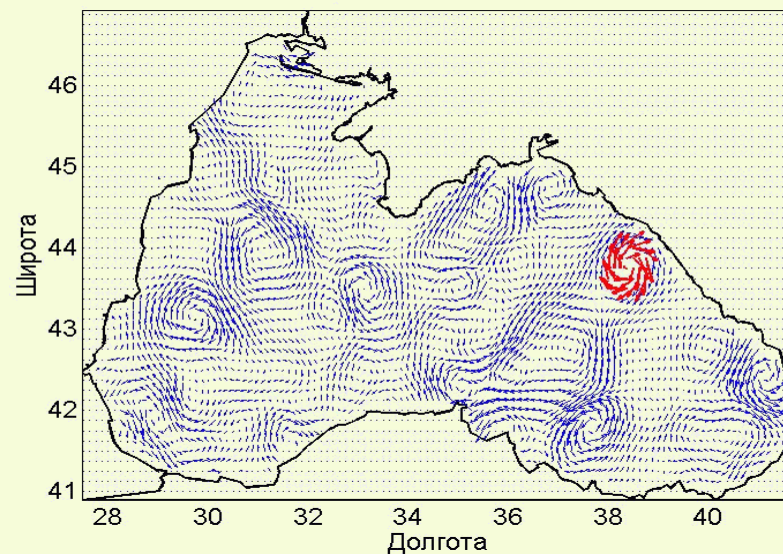
Вихрь №1612.2004-05-19



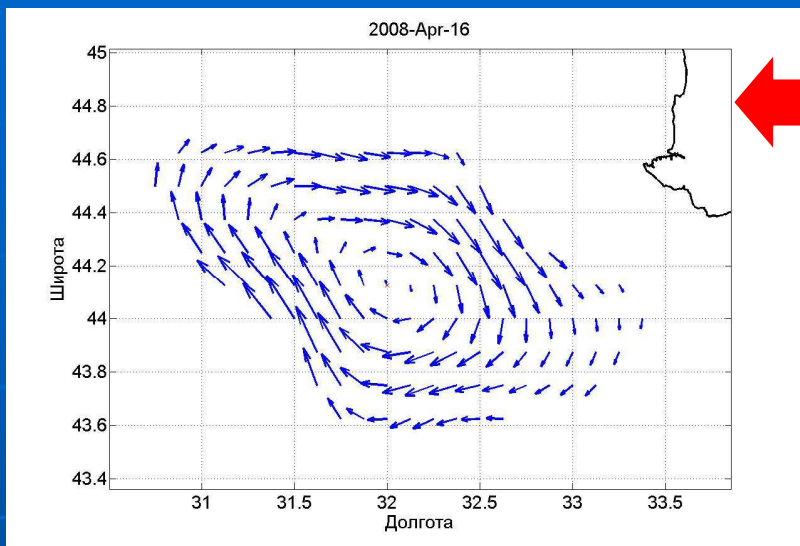
Вихрь №1342.2002-05-01



Вихрь №641.1997-06-11



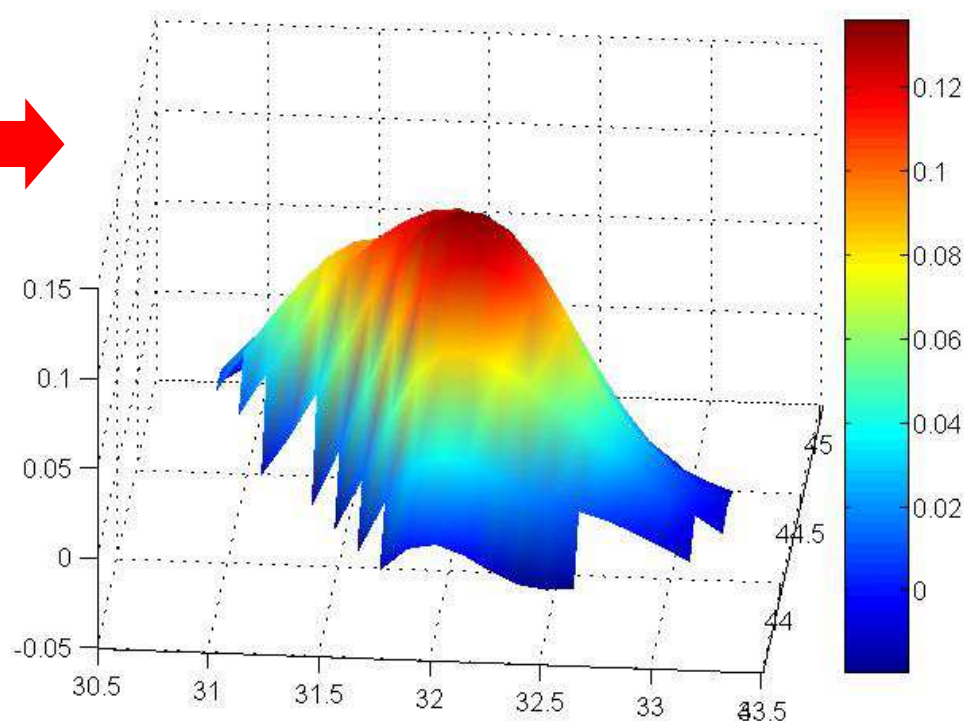
Структуры мезомасштабных вихрей



Вихрь в поле скорости в районе г. Севастополь

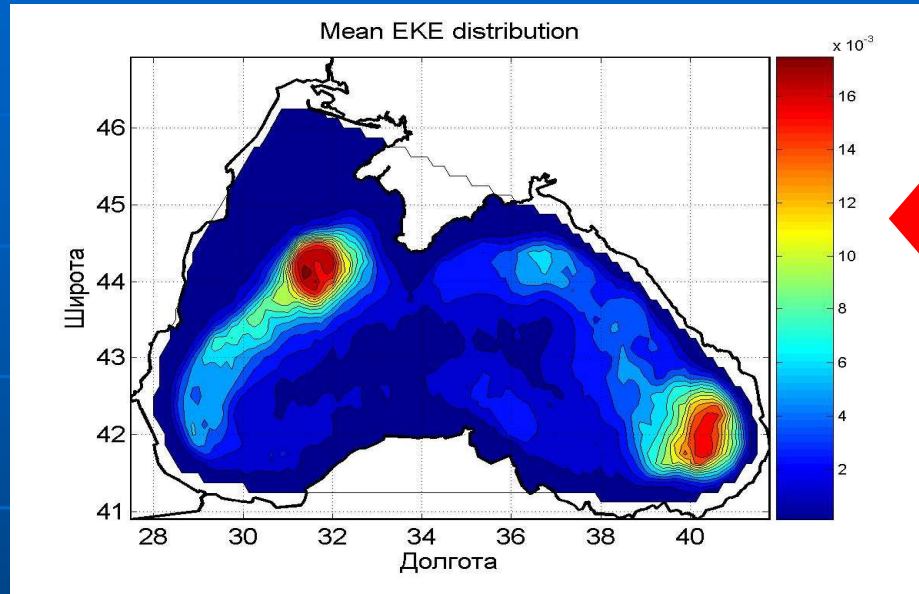
Вихрь в поле уровня в районе г. Севастополь

Заметна **сильная асимметрия вихря** с более высокими значениями скоростей на границах



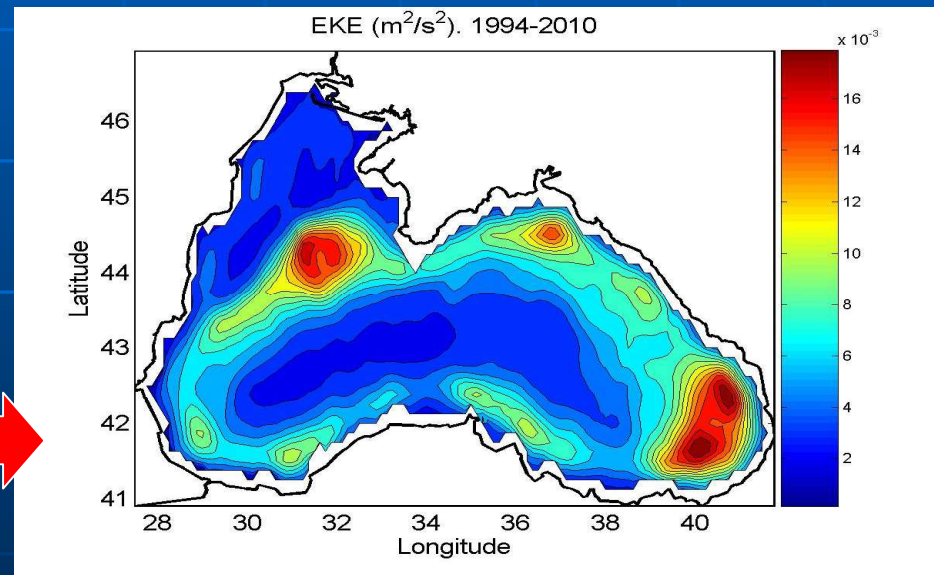
Вихревая кинетическая энергия

Вихревая кинетическая энергия рассчитывалась как сумма энергии отдельных вихрей, деленная на площадь Черного моря



$$EKE = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^N V_j^2$$

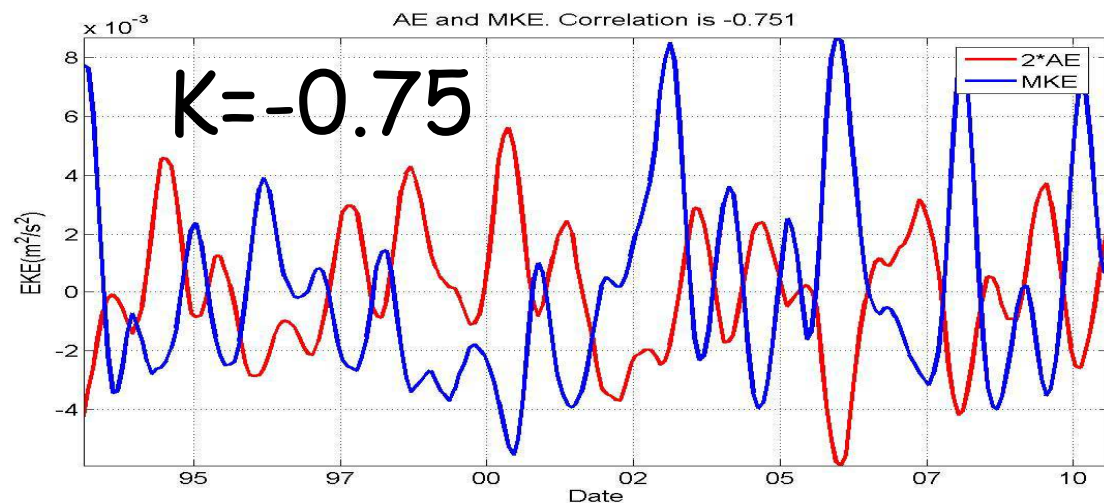
$$EKE = \frac{1}{2} (\langle u' \cdot u' \rangle + \langle v' \cdot v' \rangle)$$



Средние за 1992-2010 года поля вихревой энергии, рассчитанные разными методами: суммированием энергии отдельных вихрей (слева) и как дисперсия средней кинетической энергии (справа)

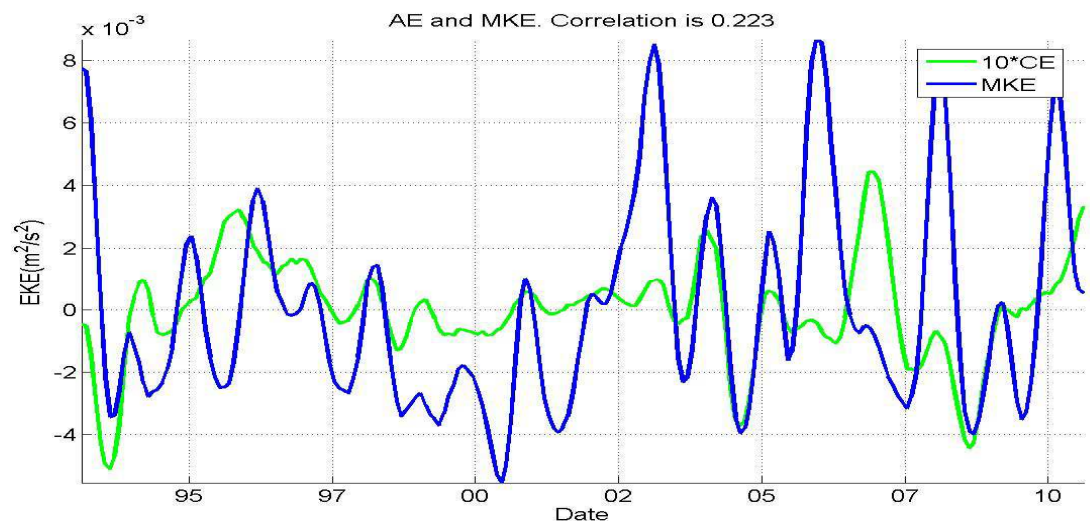
Взаимосвязь средней и вихревой кинетической энергии

1) Энергия антициклонических вихрей*2 VS МКЕ



При ослаблении МКЕ начинается развитие ИНТЕНСИВНЫХ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИХ вихрей

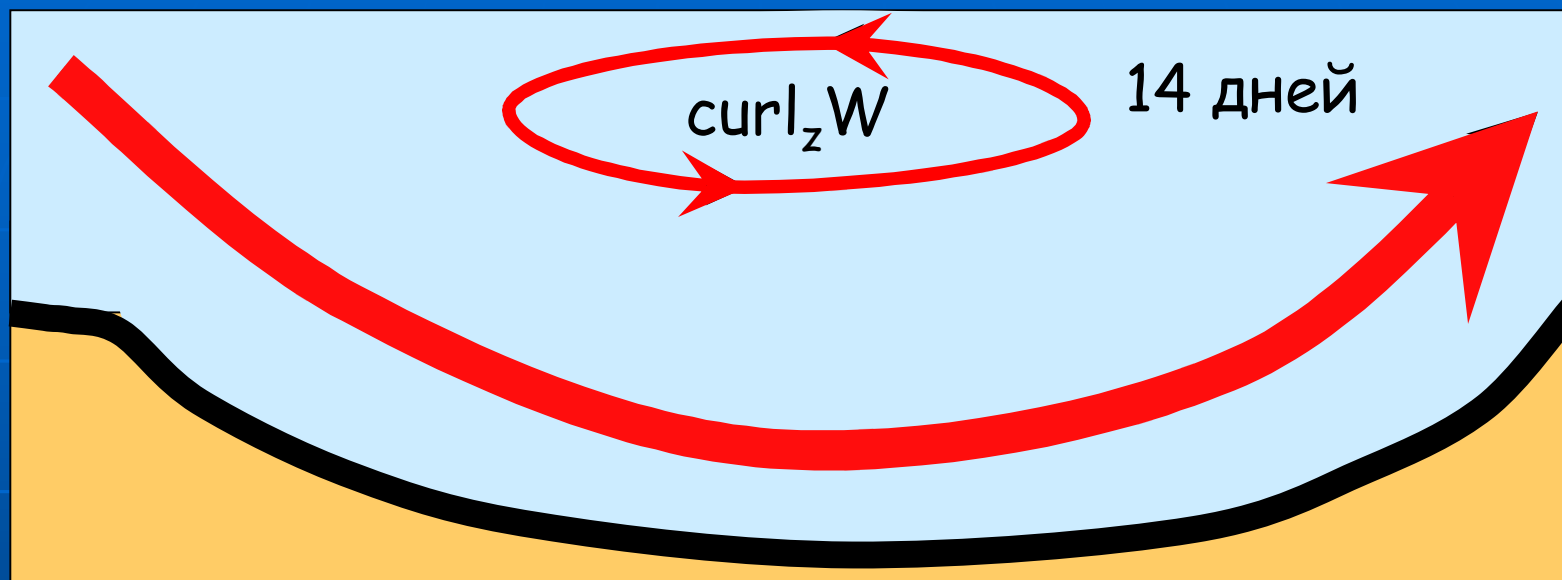
2) Энергия циклонических вихрей*10 VS МКЕ



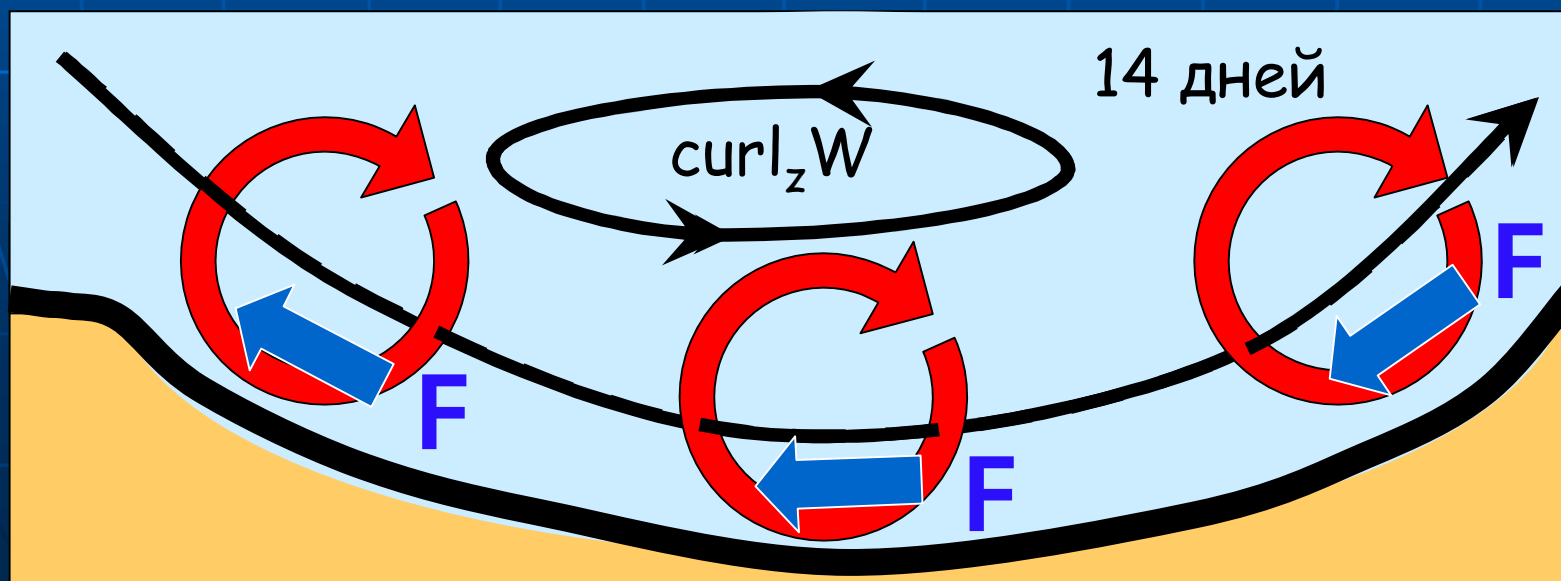
При усилении МКЕ начинается незначительное развитие ЦИКЛОНИЧЕСКИХ вихрей

Схема циркуляции Черного моря

1) Усиление циклонической завихренности ветра



2) Ослабление циклонической завихренности ветра

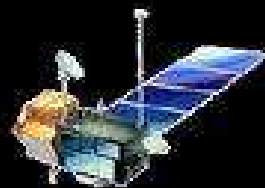


Выводы:

Завихренность ветра является одним из определяющих факторов, влияющих на динамику поверхностного слоя.

При усилении циклонической завихренности скорости ветра через 14 дней происходит интенсификация Основного Черноморского Течения

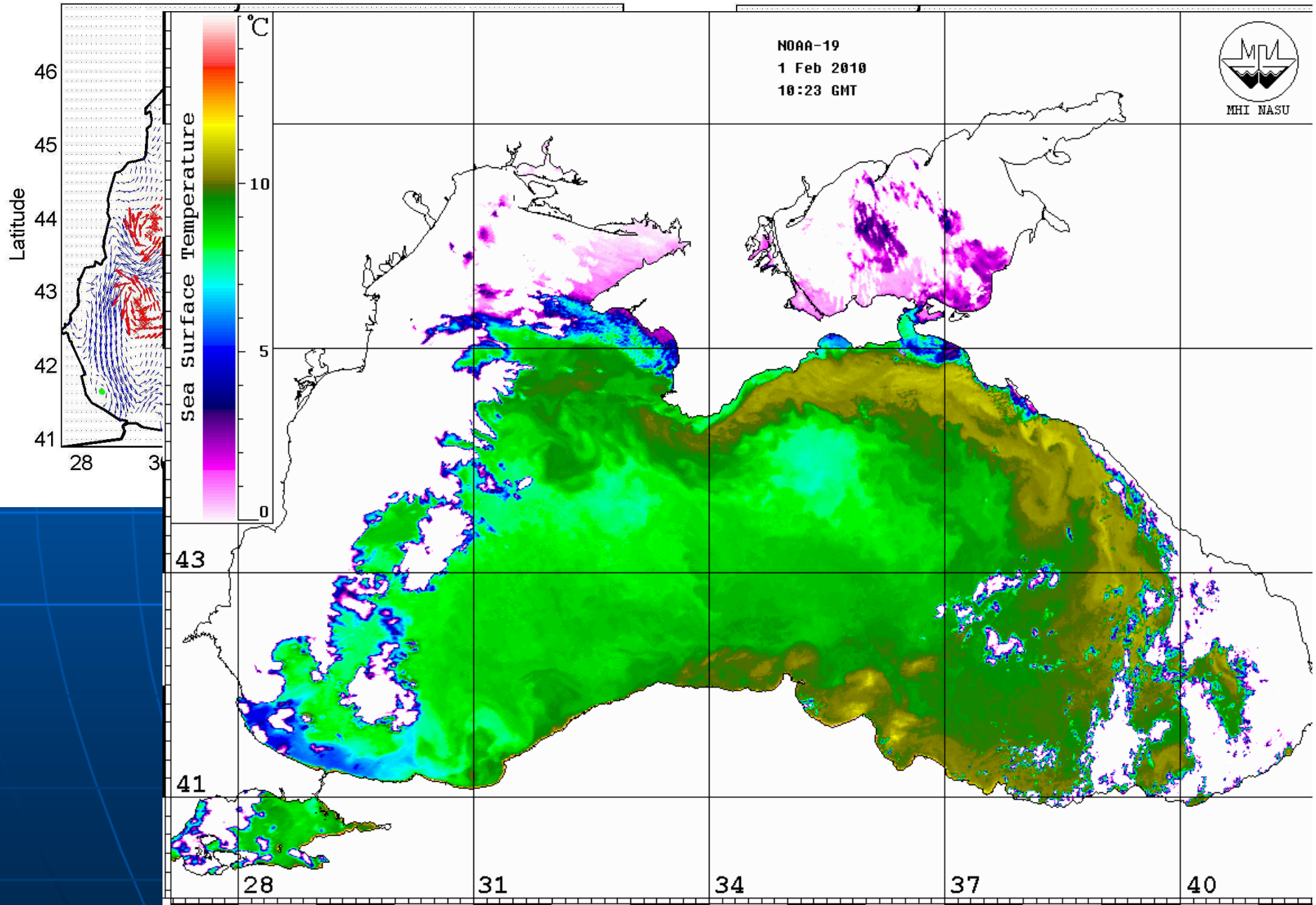
При ослаблении циклонической завихренности скорости ветра происходит ослабление ОЧТ и развитие интенсивных антициклонических мезомасштабных структур.



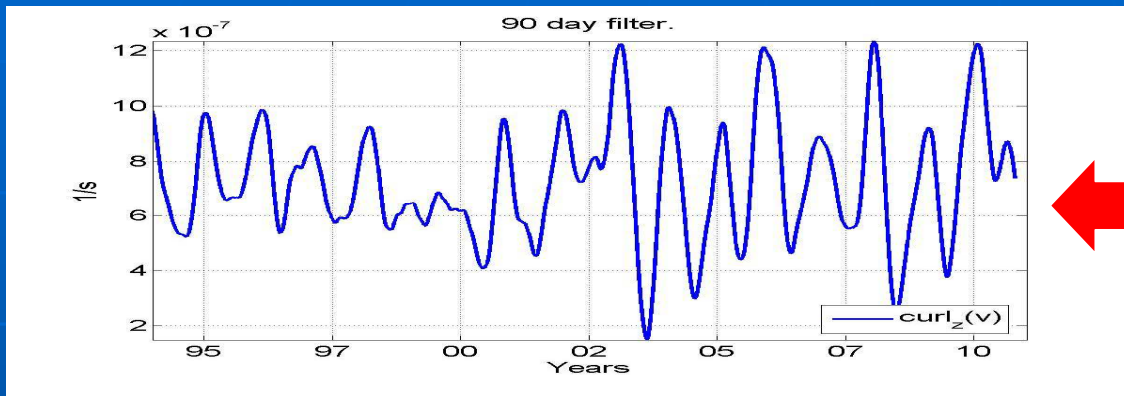
Благодарю за внимание!!!

2010-02-17

2003-01-08

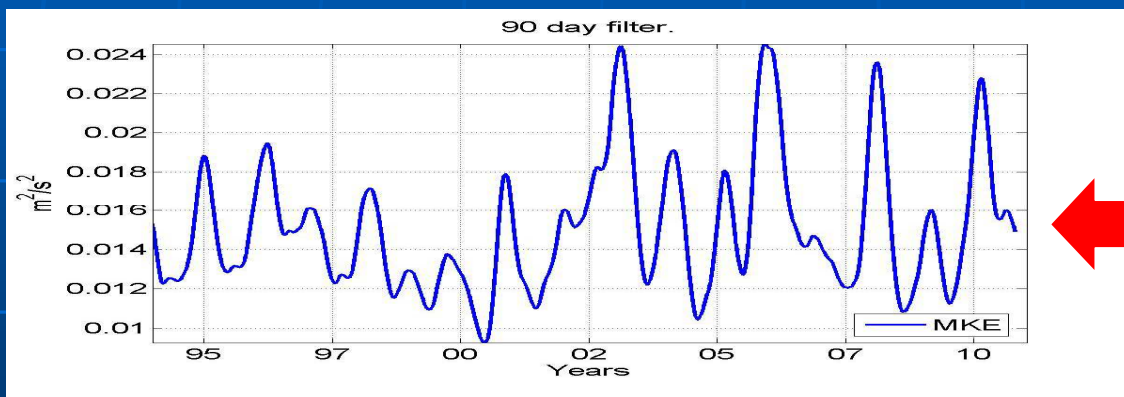


Межгодовая изменчивость интегральных характеристик динамики Черного моря



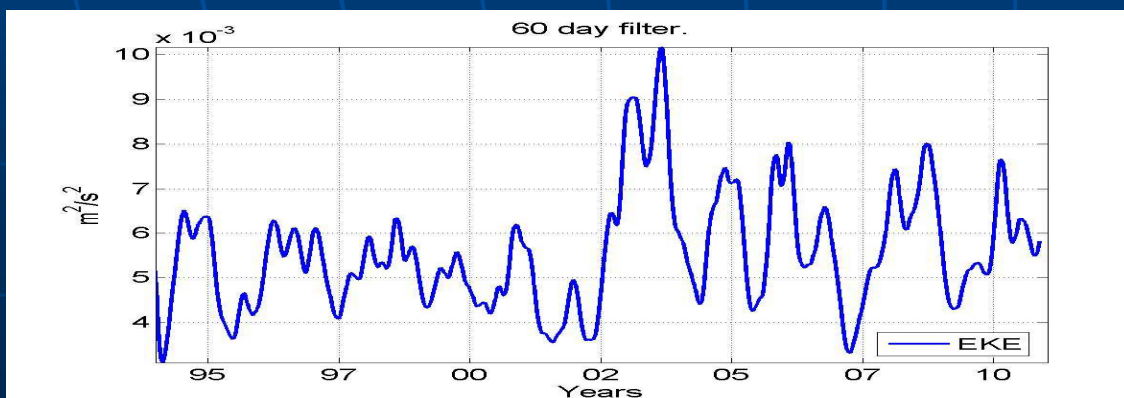
Завихренность течений:

$$\text{rot}V = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial x}$$



Средняя кинетическая энергия (МКЕ):

$$MKE = \frac{1}{2} (\langle u \rangle^2 + \langle v \rangle^2)$$



Вихревая кинетическая энергия (ЕКЕ)

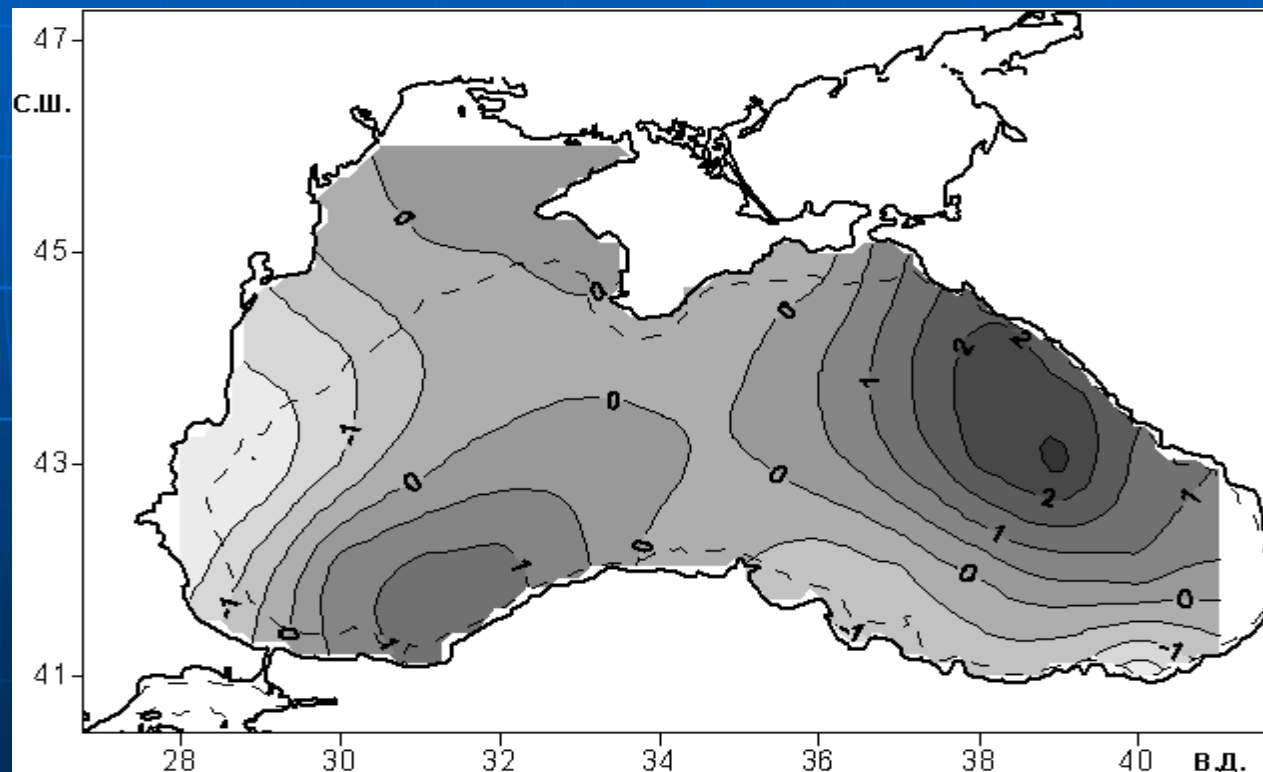
$$EKE = \frac{1}{2} (\langle u' \cdot u' \rangle + \langle v' \cdot v' \rangle)$$

Завихренность ветра над Черным морем

В работе использовались данные реанализа NCEP
[<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>].

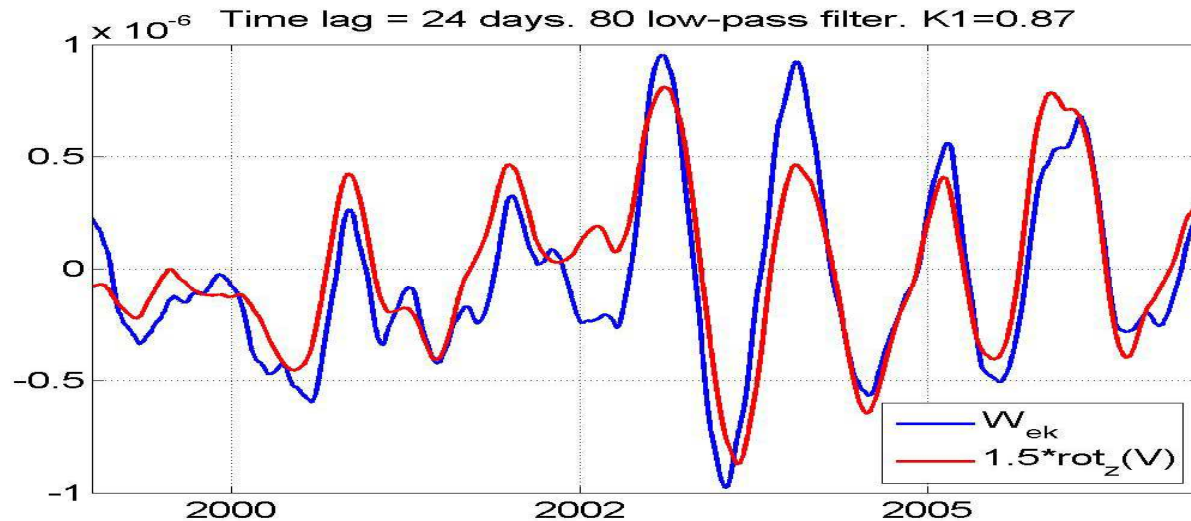
Экмановская накачка:

$$W_{ek} = \frac{1}{\rho_w f} rot_z \tau$$



Распределение средней $W_{ek} * 10^6$ ($m * s^{-1}$)
за 1998-2006 гг.

Межгодовая изменчивость интегральной завихренности ветра и течений



$$W_{ek} = \frac{1}{\rho_w f} rot_z \tau$$

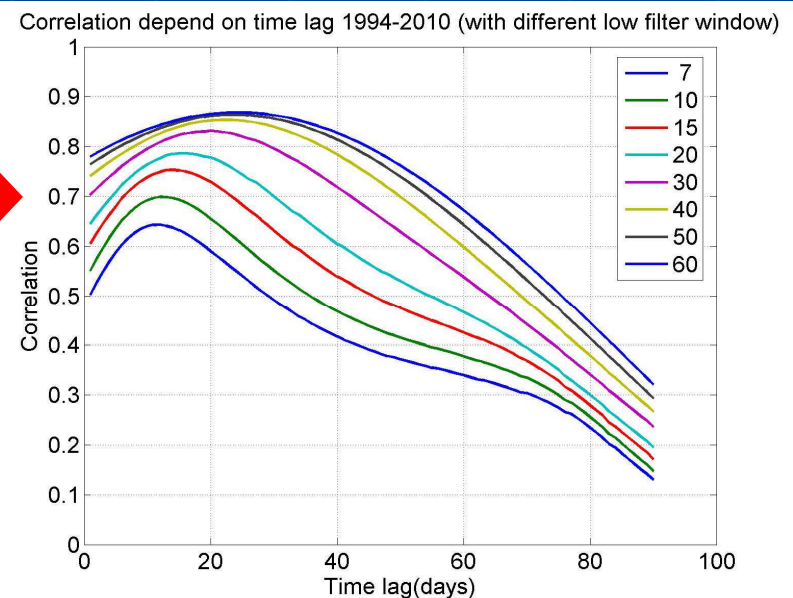
VS

$$rot V = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial x}$$

K=0.87 !!!

Зависимость коэффициента корреляции от временного сдвига и окна фильтра

Оптимальный сдвиг растёт от 12 до 24 дней в зависимости от окна фильтра



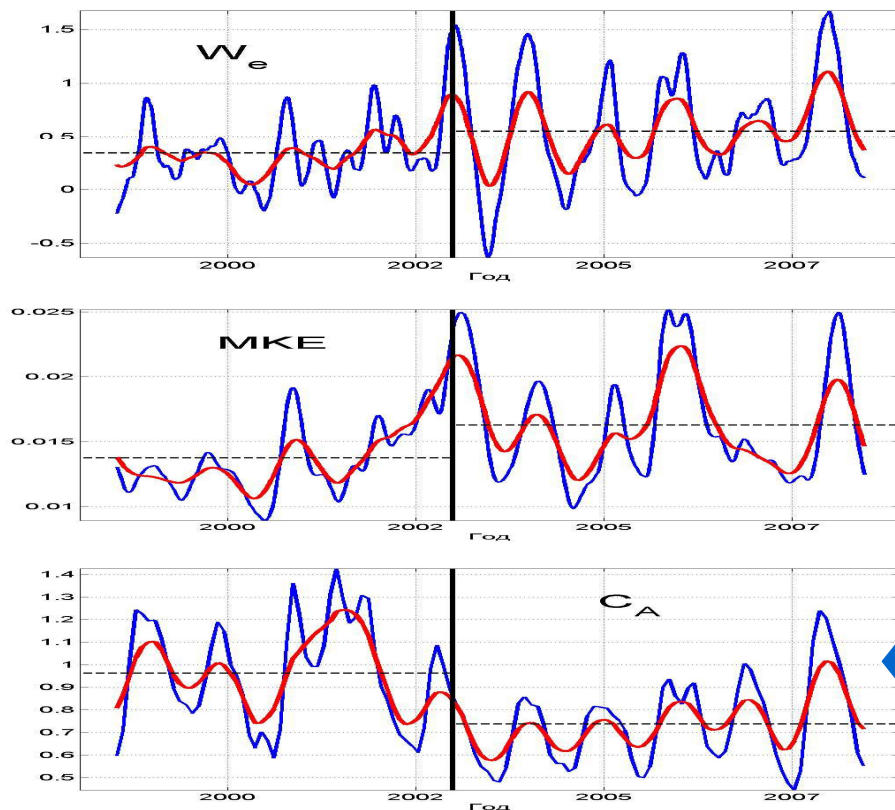
5.1. Связь межгодовой изменчивости интегральных динамических характеристик верхнего слоя с ветровым режимом и параметрами экосистемы Черного моря.

Для анализа использовались геострофические скорости u, v , средняя (МКЕ) и вихревая кинетическая энергия (ЕКЕ), завихренность напряжения трения ветра W_{ek} , концентрация хлорофилла C_a

$$MKE = \frac{1}{2}(\langle u \rangle^2 + \langle v \rangle^2)$$

$$EKE = \frac{1}{2}(\langle u' \cdot u' \rangle^2 + \langle v' \cdot v' \rangle^2)$$

$$W_{ek} = \frac{1}{f} rot(\tau)$$



После 2003 появление ярко выраженного годового хода W_e и существенное увеличение амплитуд

Смена ветрового режима в 2002-2003, привела к смене режима динамики верхнего слоя и биотического режима

Межгодовая изменчивость W_e, MKE, C_a

5.2. Анализ сезонной изменчивости средней кинетической энергии течений (МКЕ) и вихревой кинетической энергии (ЕКЕ) в Черном море.

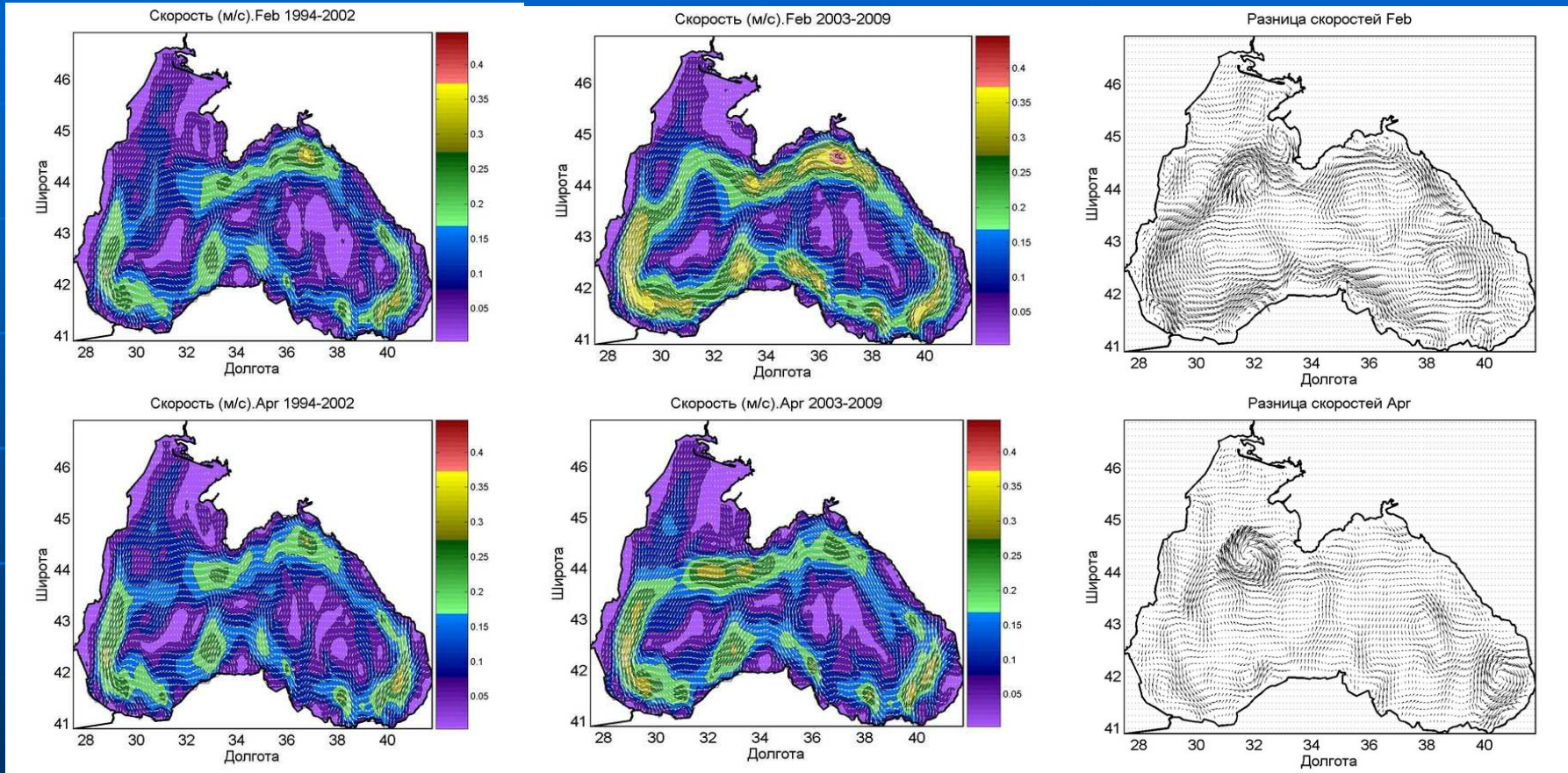


Сезонный ход осредненных по бассейну МКЕ(слева) и вертикальной Экмановской скорости $W_{\text{ек}} \cdot 10^6$ (справа), за периоды 1994-2002 и 2003-2009.



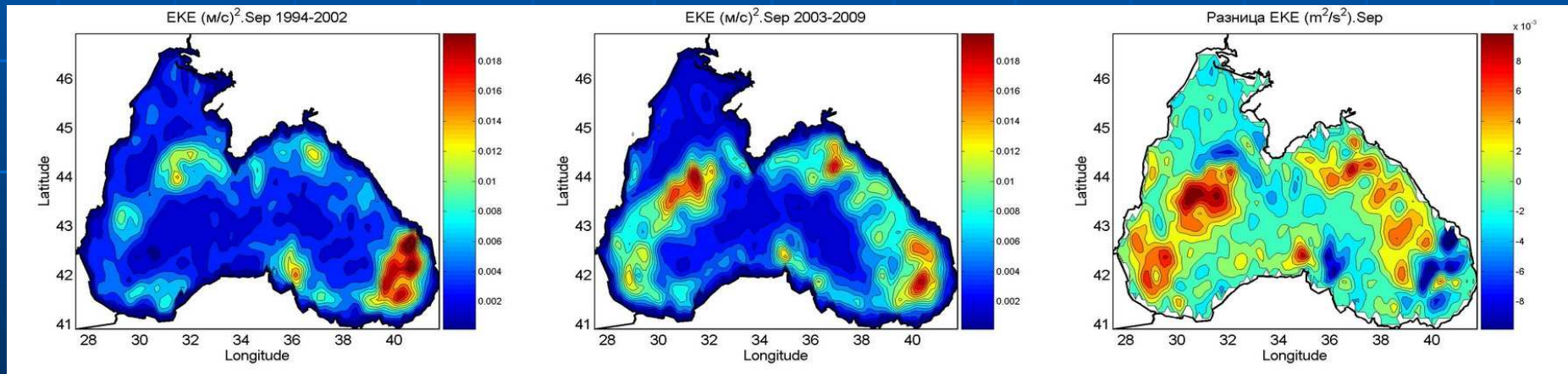
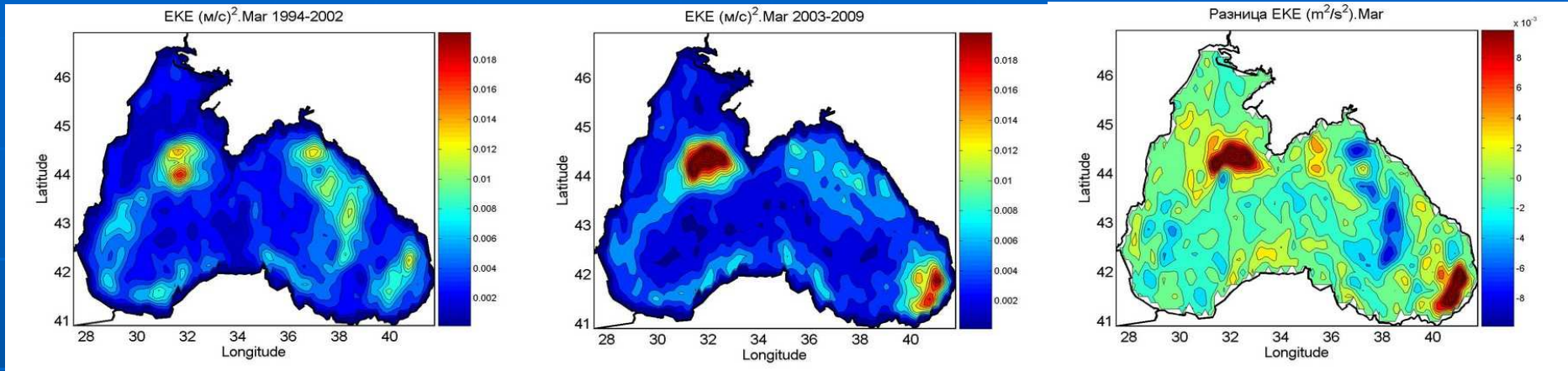
Сезонный ход осредненных по бассейну ЕКЕ за периоды 1994-2002 и 2003-2009.

5.3 Анализ пространственно-временной изменчивости полей геострофических скоростей, МКЕ и ЕКЕ в Черном море.



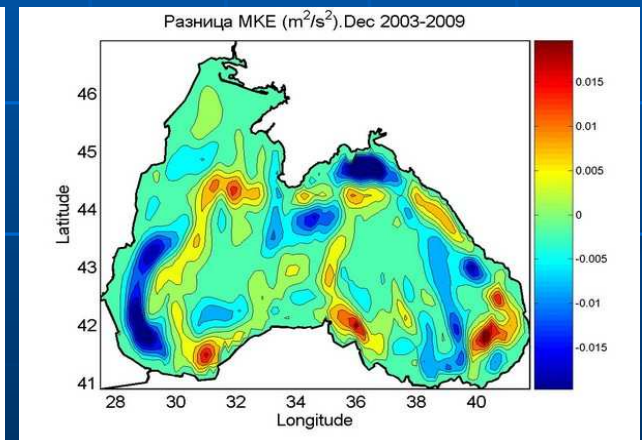
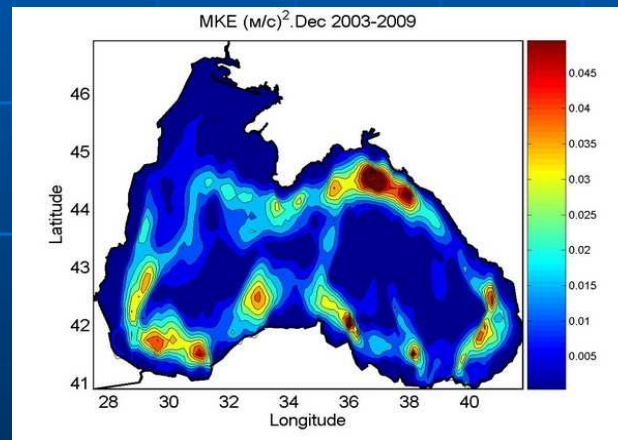
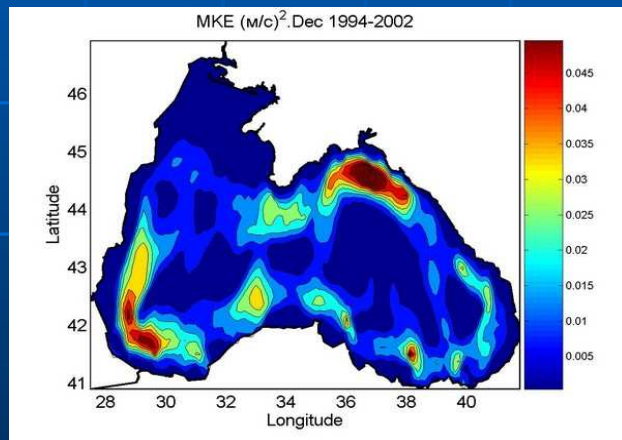
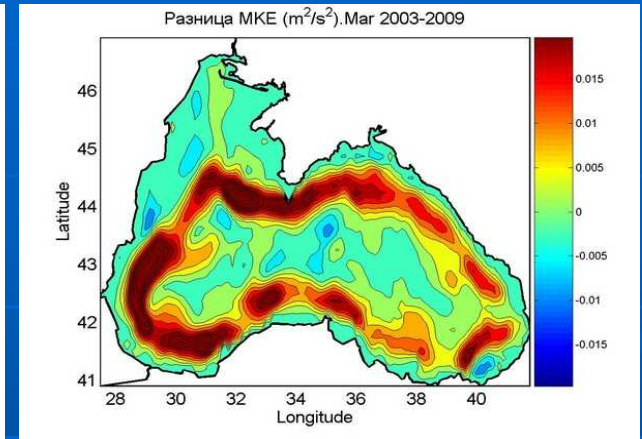
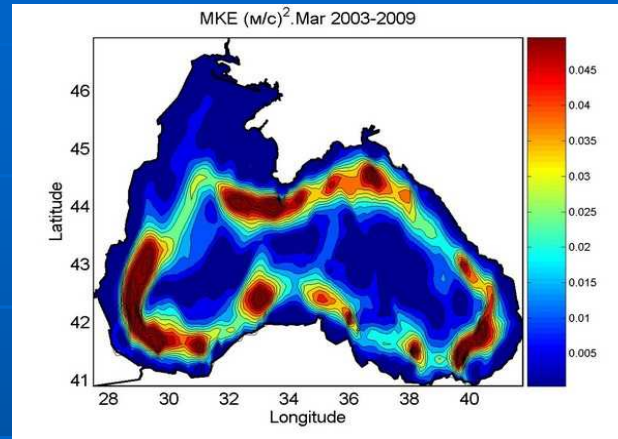
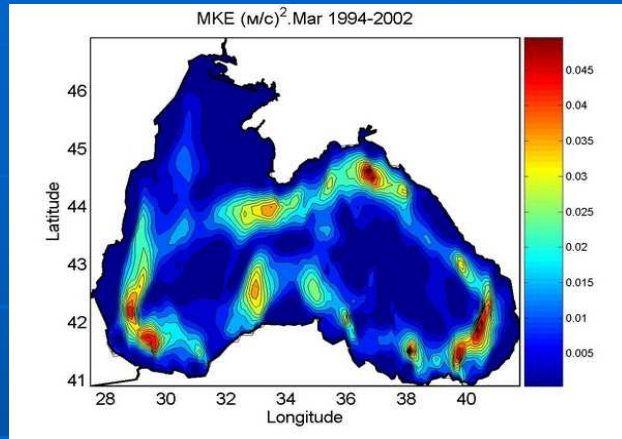
Средние ежемесячные карты геострофических скоростей, осредненные за периоды 1994-2002 годы и 2003-2009 годы, и их разности за февраль (вверху) и апрель (внизу)

Поля ЕКЕ



Средние ежемесячные карты ЕКЕ, осредненные за периоды 1994-2002 годы и 2003-2009 годы, и их разности за март (вверху) и сентябрь(внизу)

Поля МКЕ



Средние ежемесячные карты ЕКЕ, осредненные за периоды 1994-2002 годы и 2003-2009 годы, и их разности за март (вверху) и декабрь(внизу)

Основные результаты

- 1) На основе спутниковых и контактных измерений проанализированы основные временные и пространственные характеристики изменчивости уровня моря. Карты взаимных корреляций между измерениями уровня на береговых постах и в точках альтиметрического трека выявили существование квазисинхронных колебаний уровня во всей прибрежной части Черного моря, которые могут быть связаны с влиянием интегральной завихренности напряжения трения ветра.
- 2) Разработана и реализована методика восстановления средней динамической топографии на основе совместного анализа контактных и альтиметрических данных. Восстановленное поле характеризуется более высокими градиентами уровня, свидетельствующими о более высоких скоростях течений, и отражает большее количество мезомасштабных процессов, по сравнению с климатическими полями, полученными в предыдущих работах

- 3) Получен массив полей геострофических скоростей и уровня Черного моря с пространственным разрешением $1/8^\circ$ и временным разрешением 7 дней для периода 1992-2011 года. Проведена валидация полученного массива с различными контактными и спутниковыми измерениями.
- 4) Проведен анализ пространственной и временной изменчивости геострофической циркуляции, средней кинетической и вихревой энергии течений. Выделены и исследованы зоны с максимальной изменчивостью. Показано, что изменение завихренности поля ветра в 2003 году существенным образом повлияло на процессы в морской экосистеме - вызвало уменьшение концентрации хлорофилла в центральной части моря, увеличило МКЕ и ЕКЕ, изменило характер годового хода указанных параметров.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Kubryakov, A. A, S.V. Stanichny. Mean dynamic topography of the black sea, computed from altimetry, drifters measurements and hydrology data // *Ocean Science Discussion* - 2011. - № 8 - pp.701-722.
2. Кубряков А.А., С.В. Станичный. Восстановление средней динамической топографии Черного моря для альтиметрических измерений// *Исследование Земли из космоса*. - 2007. - №5 - с.24-30.
3. А.А Кубряков, С.В. Станичный. Анализ пространственной и временной изменчивости уровня Черного моря на основе альтиметрических и натурных наблюдений // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*.- 2009.- № 2. - С. 101-113.//
4. А.А. Кубряков, Плотников Е.В., С.В. Станичный. Определения полей скоростей поверхностных течений дистанционными методами // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*.- 2011.- № 6. - С. 101-113.
5. Kubryakov, A., Stanichny, S., Kremenetskiy, V., Piotoukh, V., Zatsepin, A. Long-term variations of the Black Sea dynamics and its probable impact on the marine ecosystem, SESAME Final Scientific Conference, Athens, Greece 4-8 April 2011
6. Kubryakov A.A., Lebedev N.E., Stanichny S.V. Intercomparison of the Altimetry and in situ data for the BlackSea The 6-th Conference in Remote sensing, Moscow, November 2008.
7. Sergey Stanichny, Yu. Ratner, D. Soloviev, V Burdyugov, R. Stanichnaya, A. Kubryakov. Remote sensing segment of the Black Sea GOOS. Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges. 5th EuroGOOS Conference/ 20-22 May 2008, Exeter, UK, p.48

