

# Гидродинамика Черного моря: бассейновая циркуляция, мезомасштабные и субмезомасштабные вихри

Зацепин А.Г.<sup>1</sup>

При участии: Баранова В.И.<sup>2</sup>, Елкина Д.Н.<sup>1</sup>, Кондрашова А.А.<sup>2</sup>, Коржа А.О.<sup>2</sup>, Кременецкого В.В.<sup>1</sup>, Кубрякова А.А.<sup>4</sup>, Куклева С.Б.<sup>3</sup>, Мысленкова С.А.<sup>5</sup>, Островского А.Г.<sup>1</sup>, Паки В.Т.<sup>2</sup>, Пиотуха В.Б.<sup>1</sup>, Подымова О.И.<sup>3</sup>, Подуфалова А.П.<sup>2</sup>, Сильвестровой К.П.<sup>1</sup>, Станичного С.В.<sup>4</sup>, Соловьева Д.М.<sup>4</sup> и других...

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва*

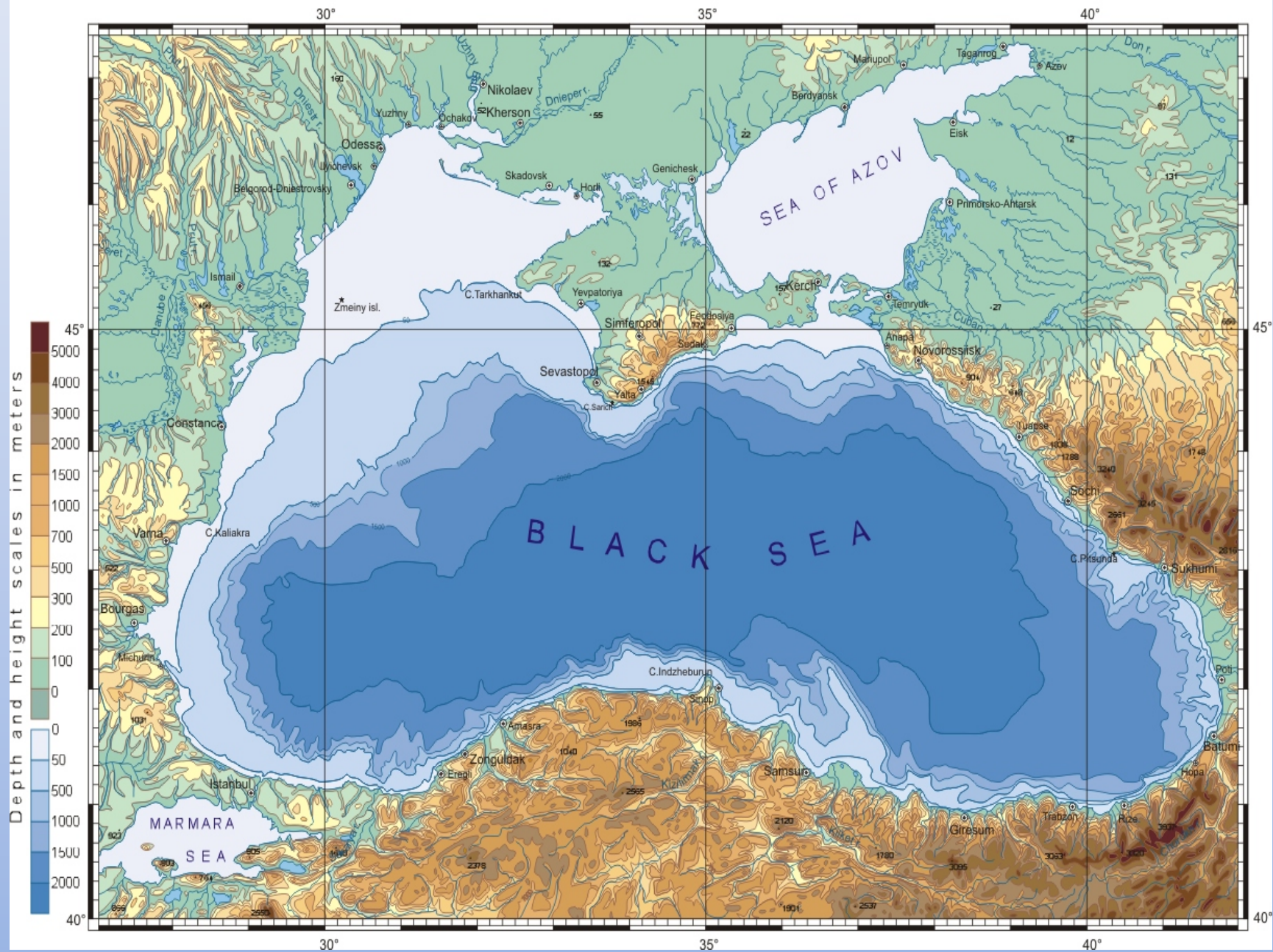
<sup>2</sup> *Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Калининград*

<sup>3</sup> *Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик*

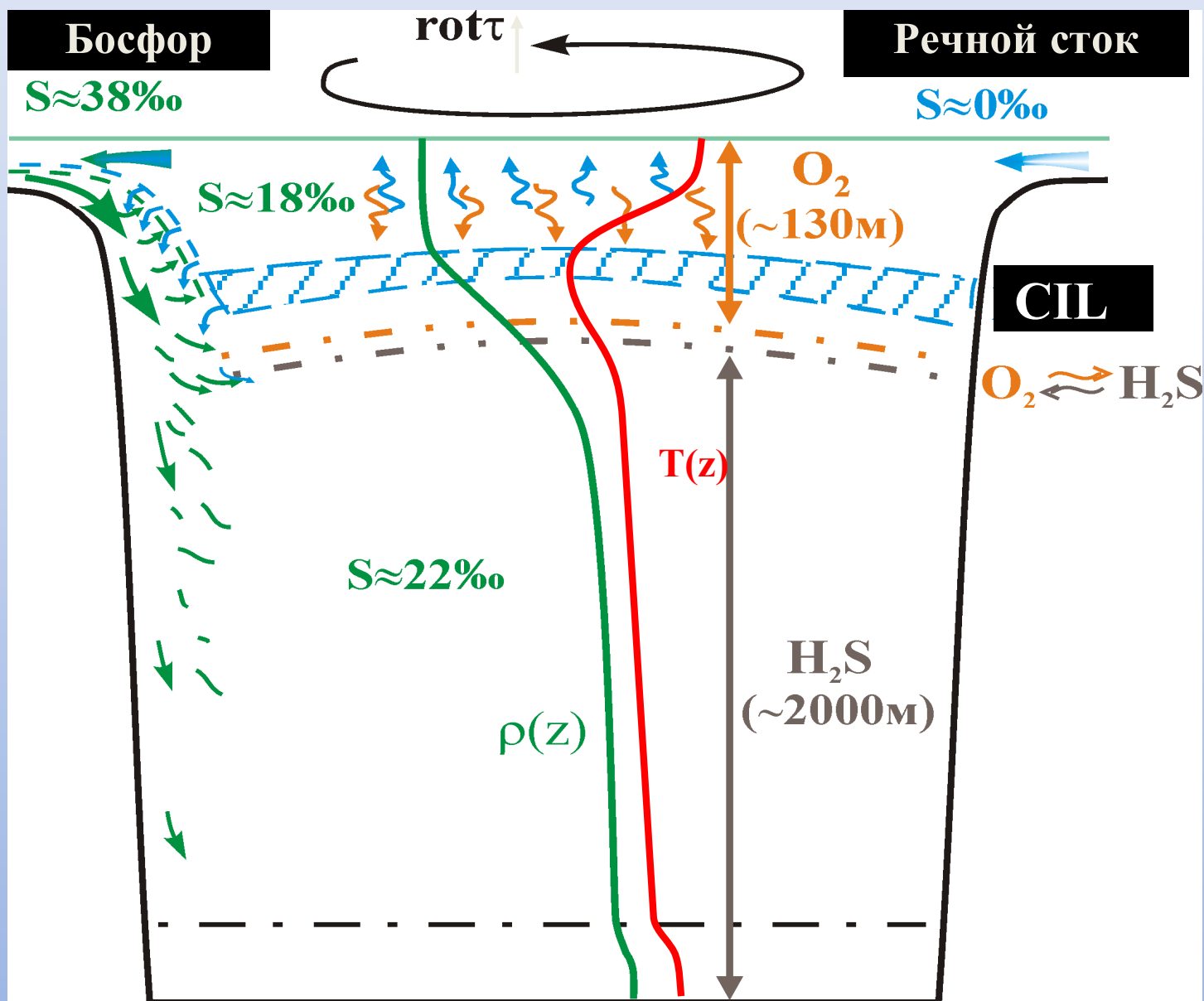
<sup>4</sup> *Морской гидрофизический институт НАН, Севастополь, Украина*

<sup>5</sup> *Московский государственный университет, Россия*

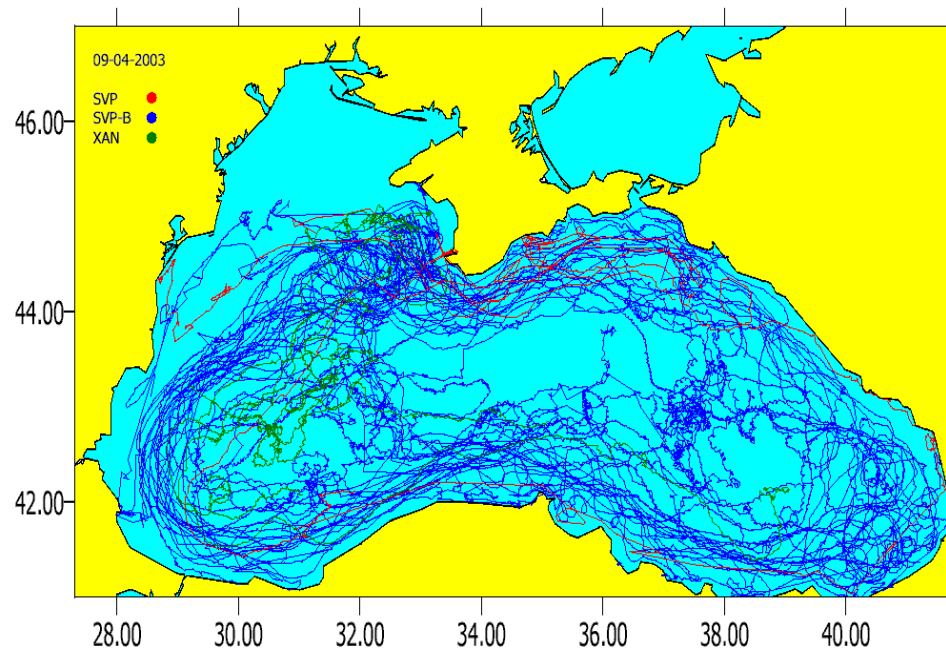
# BLACK AND AZOV SEAS



# Гидрологическая структура Черного моря

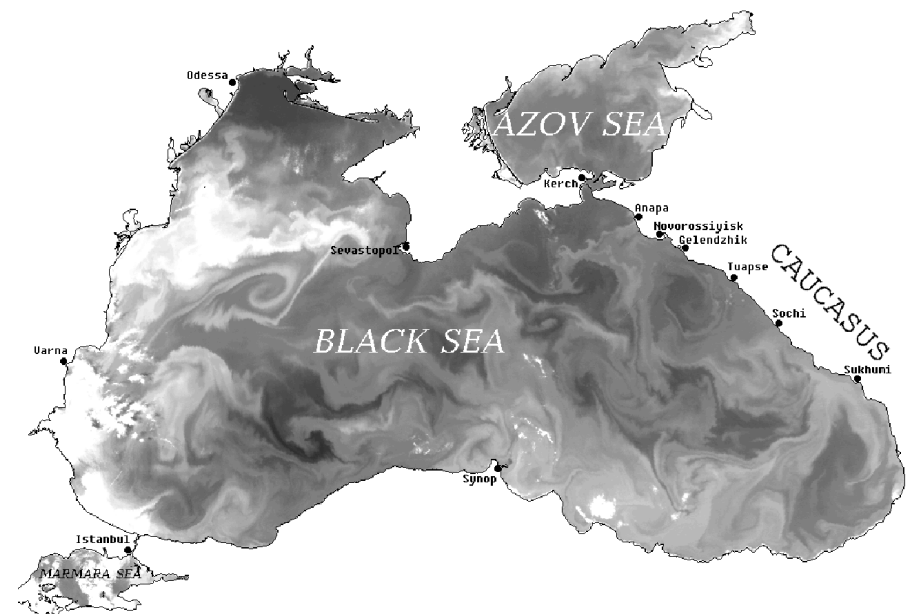


# Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика вод Черного моря



Международный дрейфтерный эксперимент в Черном море (1999-2003, запущено более 50 дрейфтеров)

*Журбас, Зацепин и др., 2004; Poulain, Barbatini, Motyzhev, Zatsepin, 2005*

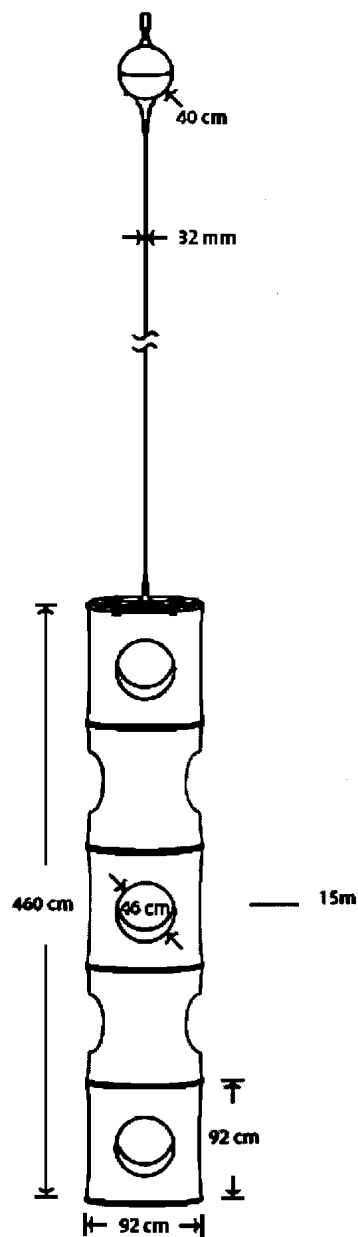


Мезомасштабная вихревая динамика вод в Черном море.

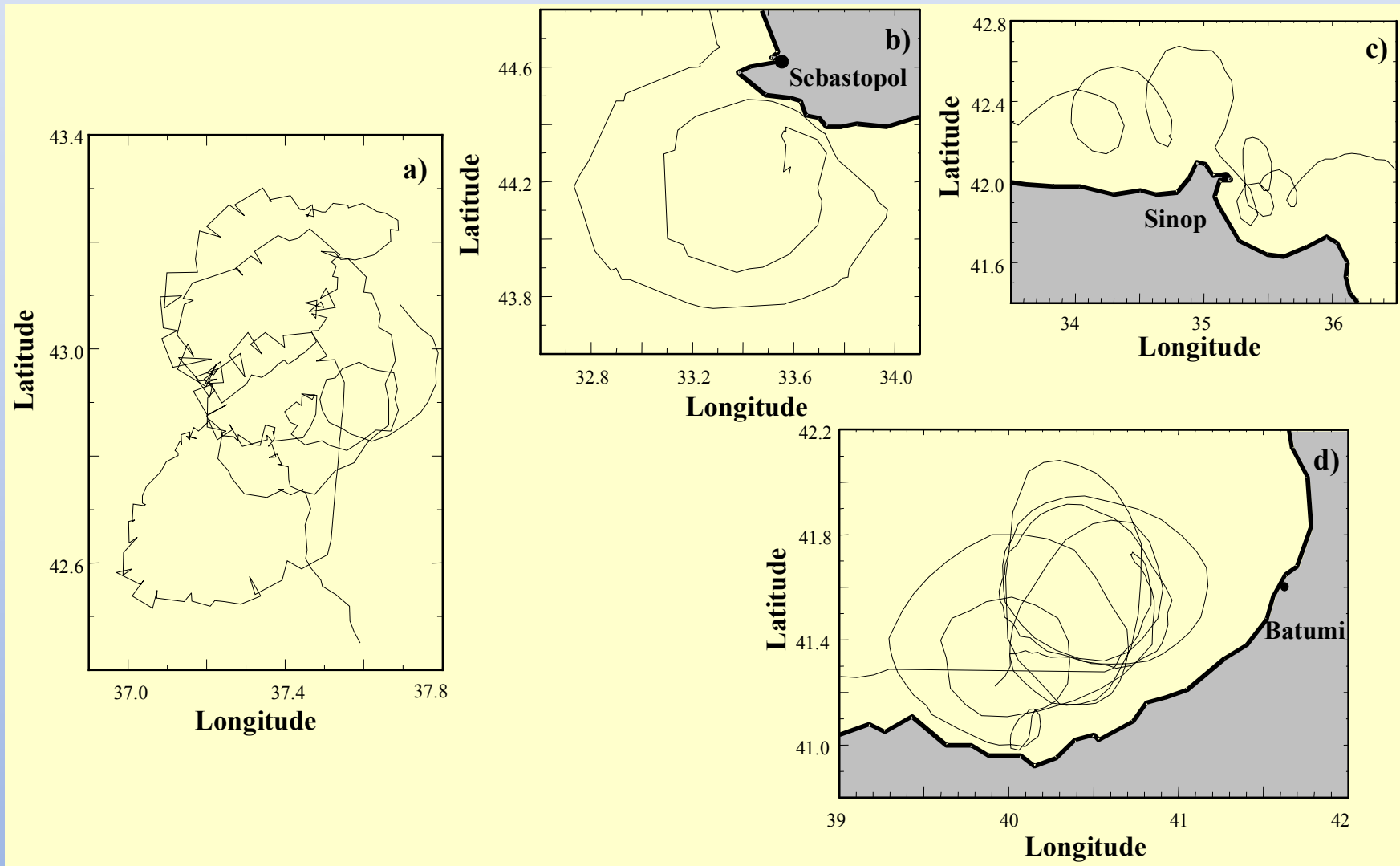
*Гинзбург, Зацепин, Кременецкий, Пиотух, 2008*

# Дрифтерный сегмент буйковой сети (1979 – н.в.)

Современная дрифтерная сеть в МО – 1000-1200 шт.



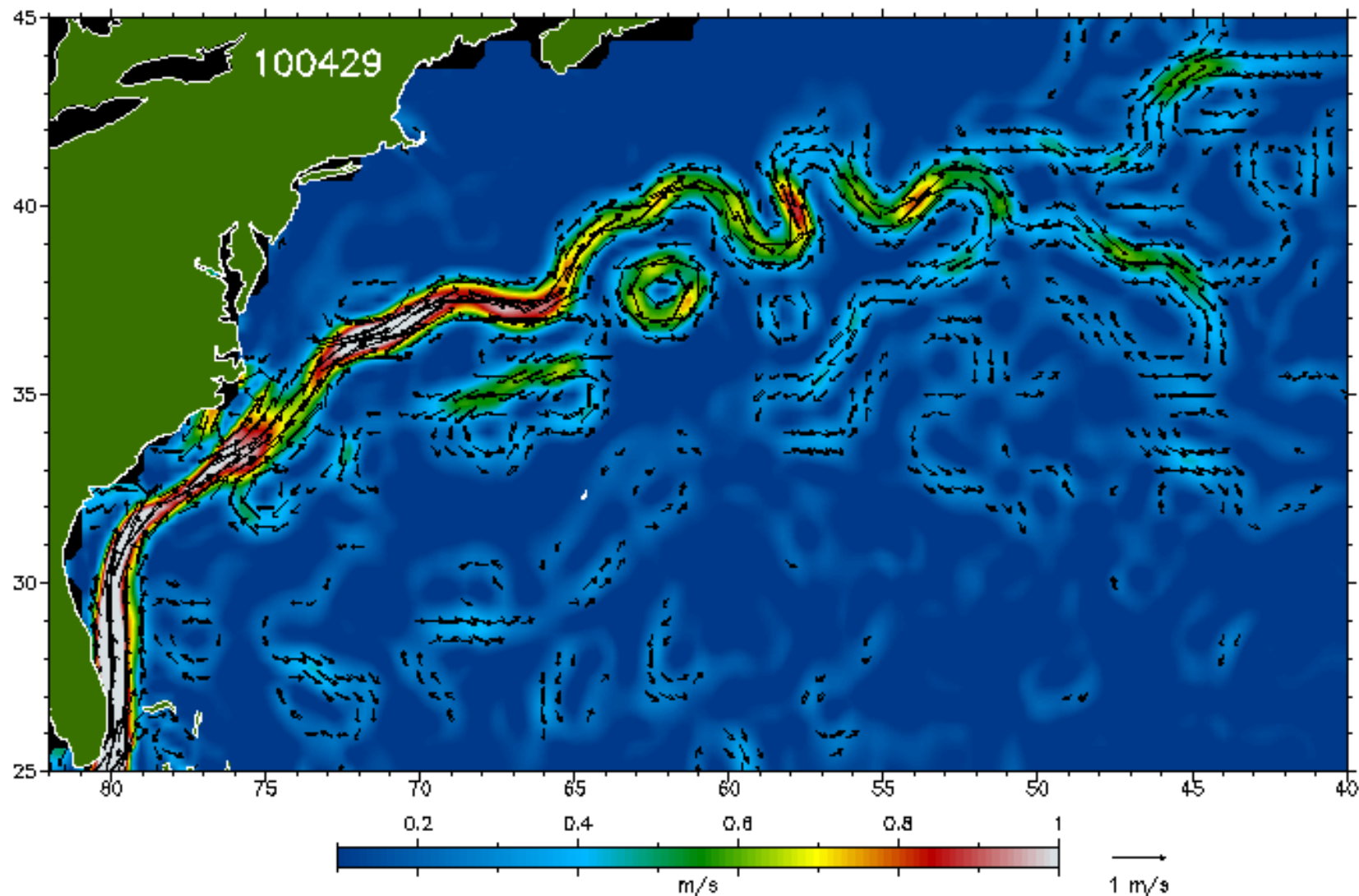
# Фрагменты траекторий дрейфтеров, захваченных вихрями



## Основные результаты дрейферного эксперимента в Черном море(1999-2003 г.)

1. Кинетическая энергия флуктуационной составляющей поля течений меньше кинетической энергии среднего течения (примерно в 1.5 раза).
2. Крутой континентальный склон не является строгим барьером для водообмена между прибрежной (шельфово-склоновой) зоной и глубоководной частью моря. Дрейферы участвующие в вихревом движении перемещаются с шельфа в центральную часть моря и наоборот.
3. Горизонтальное перемешивание вод в Черном море, осуществляемое мезомасштабными вихрями, имеет примерно тот же временной масштаб, что и адвекция вод ОЧТ по периметру моря (3-6 месяцев).

# Бароклинная неустойчивость струйных течений - фактор образования мезомасштабных вихрей и рингов





# Обсуждаемые вопросы

- Крупномасштабное ветровое воздействие как фактор формирования бассейновой циркуляции вод в Черном море – Основного черноморского течения (ОЧТ).
- Мезомасштабные (синоптические) вихри в Черном море как результат бароклинной неустойчивости ОЧТ.
- Субмезомасштабные вихри, механизмы их порождения, влияние на горизонтальный и вертикальный обмен на узком российском шельфе Черного моря.

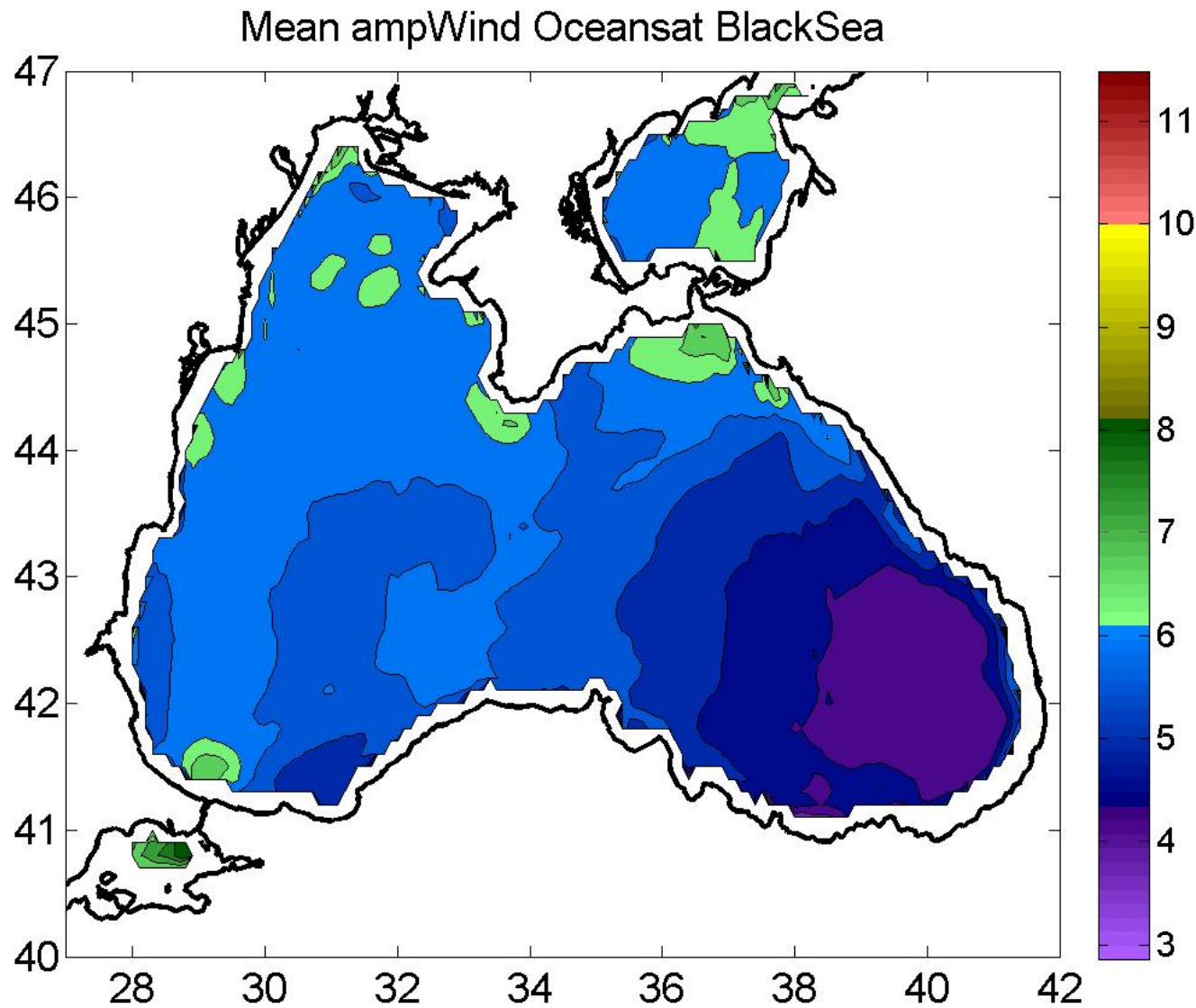
# Завихренность напряжения трения ветра на поверхности моря как движущая сила бассейновой циркуляции вод (1)



“Горизонтальная неоднородность напряжения трения ветра является основной причиной крупномасштабной циркуляции в окраинных морях”  
(Штокман 1941, 1945)

В. Б. Штокман (1909-1968)

# Среднегодовая амплитуда скорости ветра (м/с) над Черным морем (доминируют ветра северных румбов)



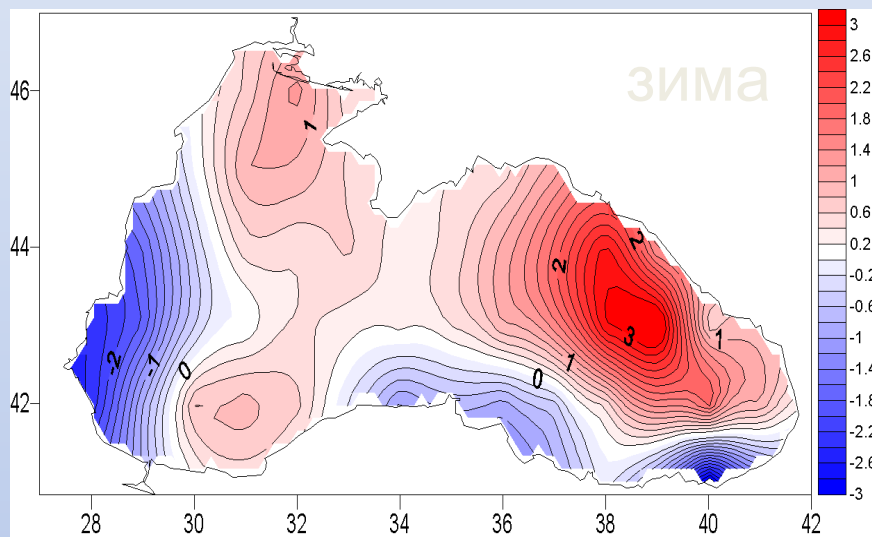
## Завихренность напряжения трения ветра на поверхности моря как движущая сила бассейновой циркуляции вод (2)

$$w_E = \frac{\text{curl } \tau}{f\rho}$$

- скорость экмановской накачки

Преимущественно положительная (отрицательная) завихренность ветра на поверхности моря создает дивергенцию (конвергенцию) интегрального экмановского переноса и связанный с ней апвеллинг (даунвеллинг) в центральной части моря. В результате возникает горизонтальный градиент давления, обусловленный наклоном уровня моря и изопикнических поверхностей, который уравнивается силой Кориолиса и поддерживает бассейновую геострофическую циркуляцию вод.

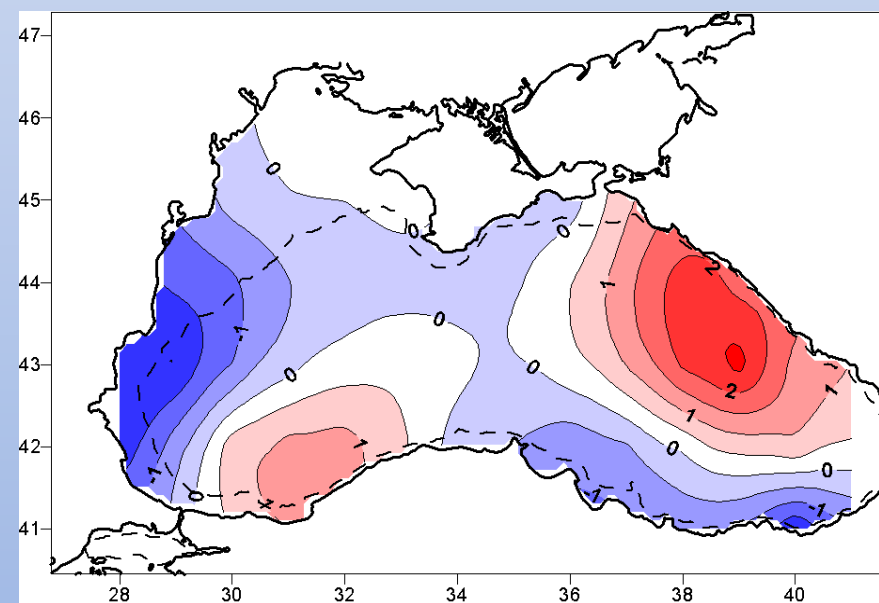
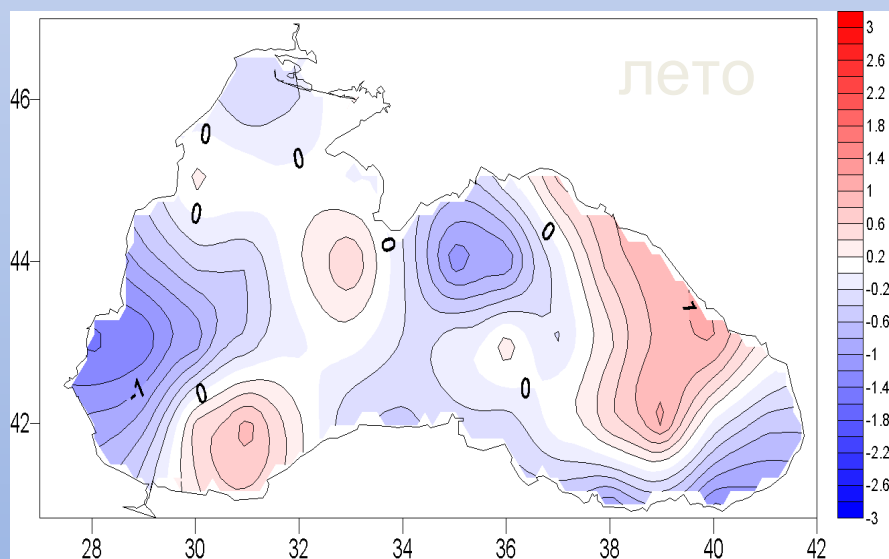
# Скорость экмановской накачки ( $W_E * 10^6$ м/с) на поверхности Черного моря по данным NSCP



$$W_E = \text{curl}\tau / (\rho f) = -\nabla_H M_E / \rho_w$$

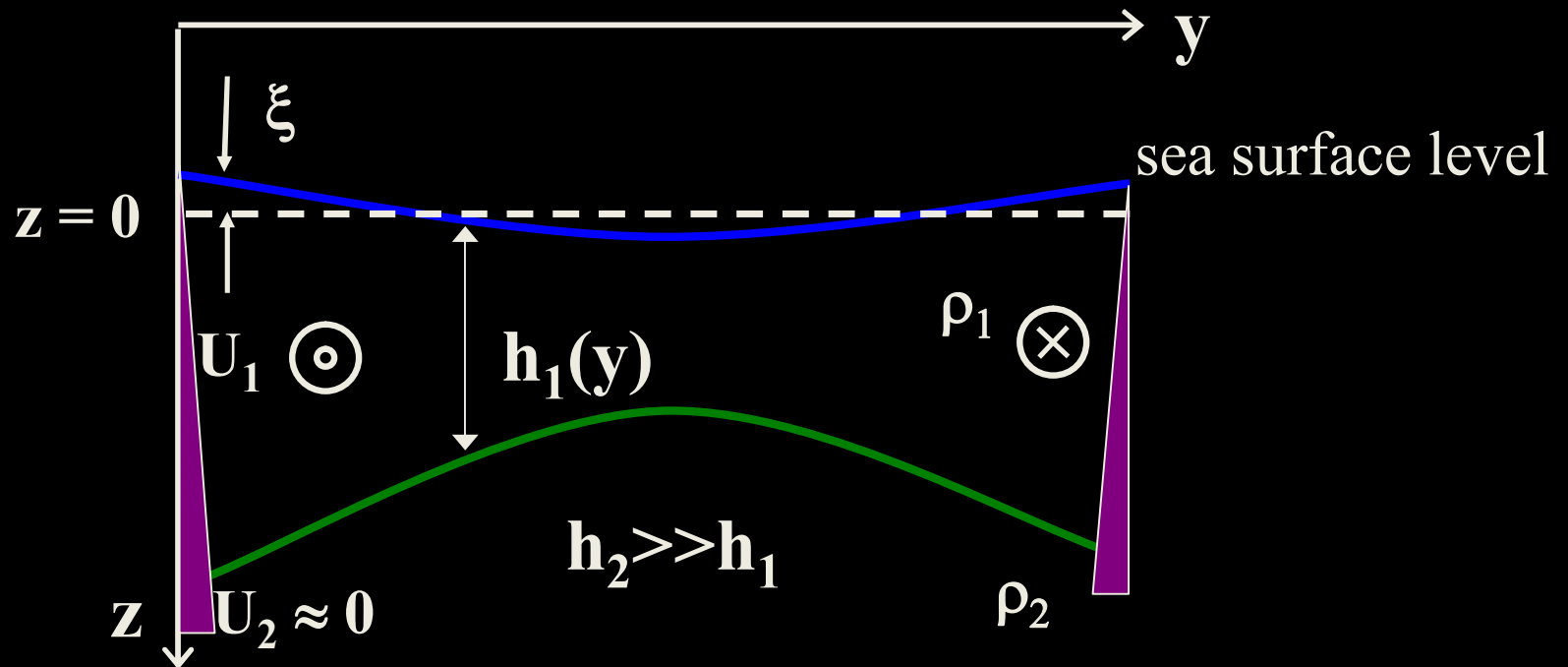
Положительные величины  $W_E$  (красный) – циклоническая завихренность ветра

Отрицательные величины  $W_E$  (синий) – антициклоническая завихренность ветра



Средняя  $W_E$  за 1998-2007

# Геострофические течения, возбуждаемые положительной экмановской накачкой в двуслойной жидкости



$fU = 1/\rho \partial P / \partial y$  - геострофический баланс

$$U_1 = g/f \partial \xi / \partial y \cong - (\Delta \rho g / f \rho_1) \partial h_1 / \partial y$$

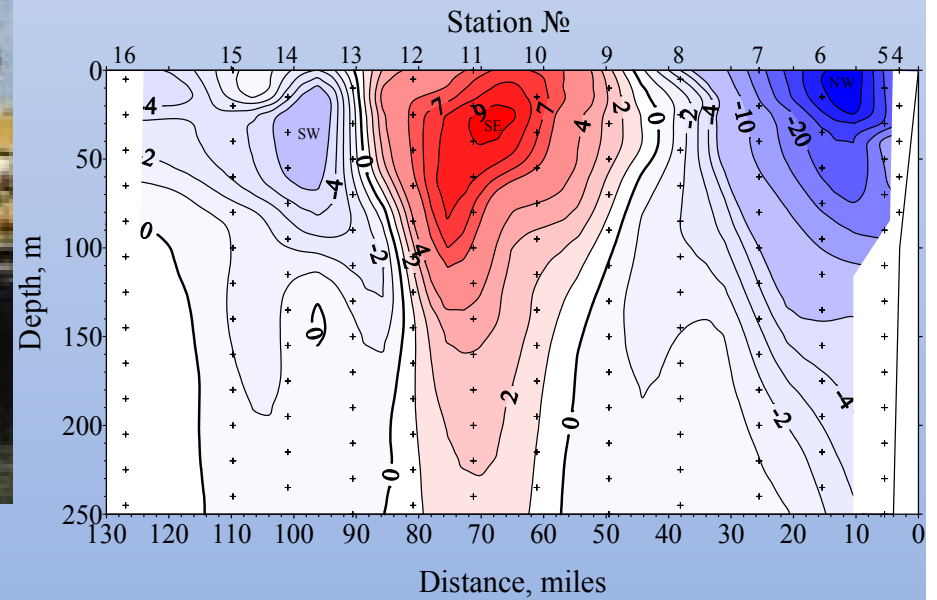
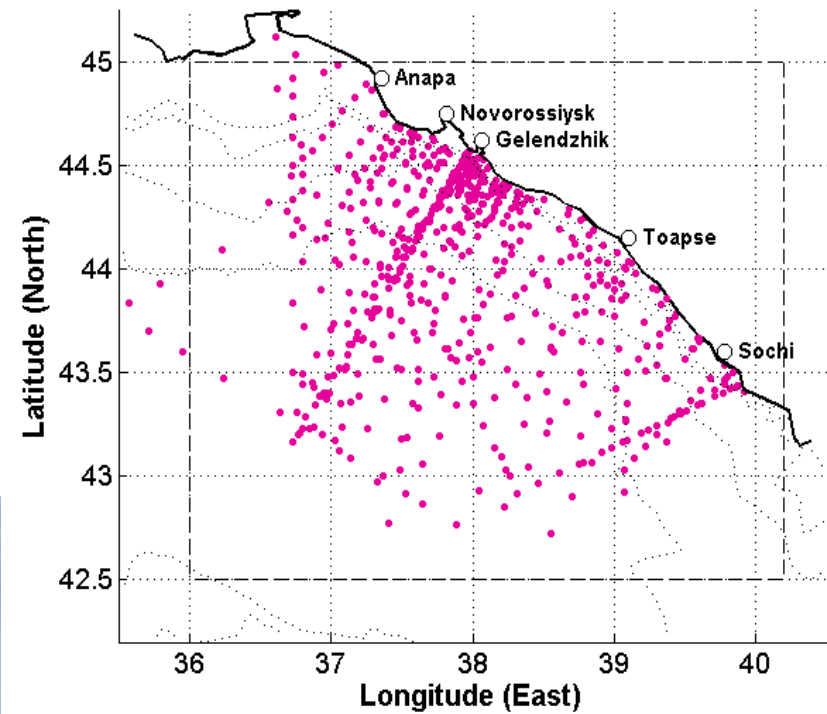
$$U_2 = (g/f\rho) (\Delta \rho \partial h_1 / \partial y + \rho_1 \partial \xi / \partial y) \cong 0$$

# Район исследования и судовые станции

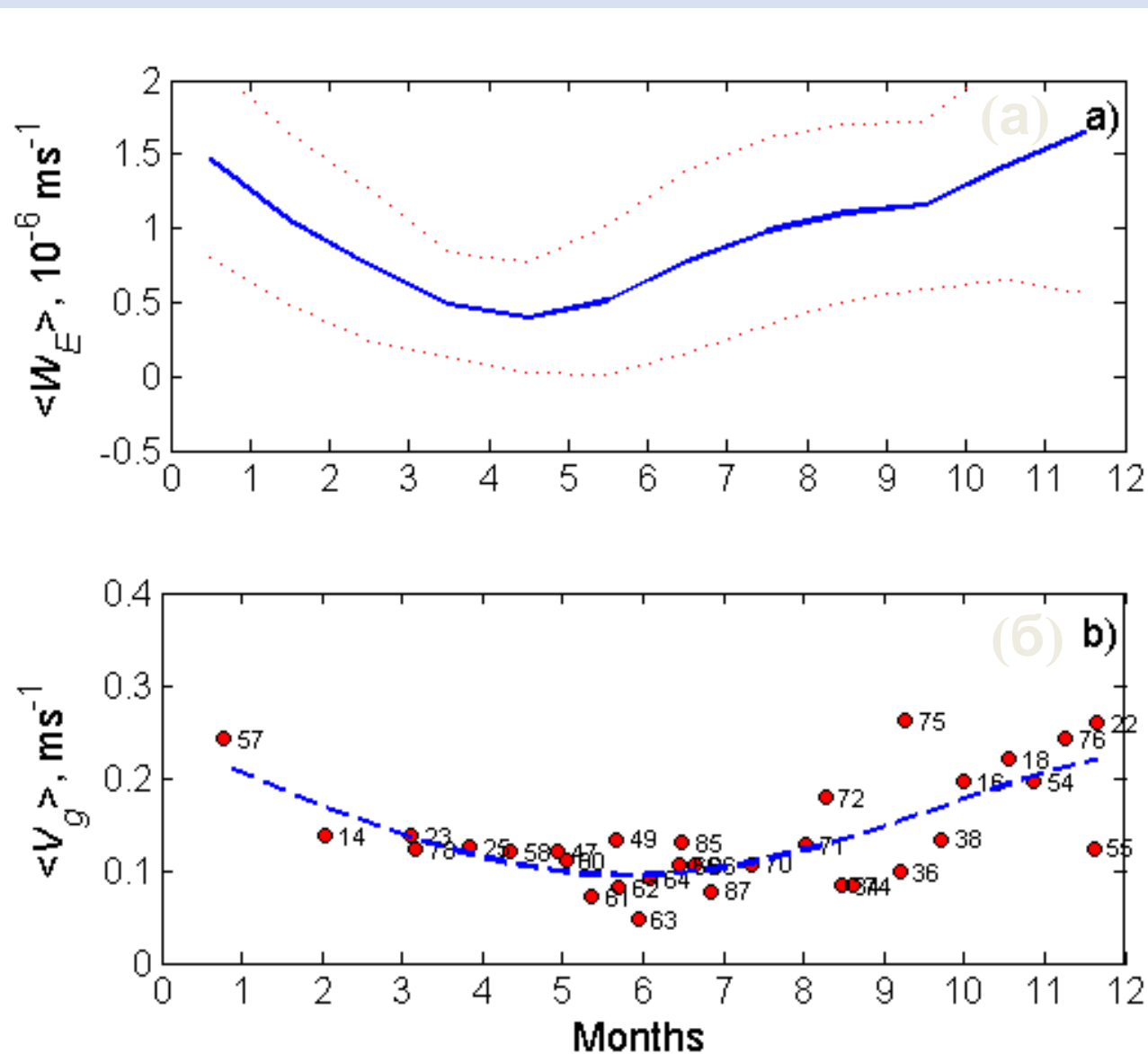


НИС «АКВАНАФТ»

P.P. Shirshov IO RAS data (1997-2007, Nst = 727)



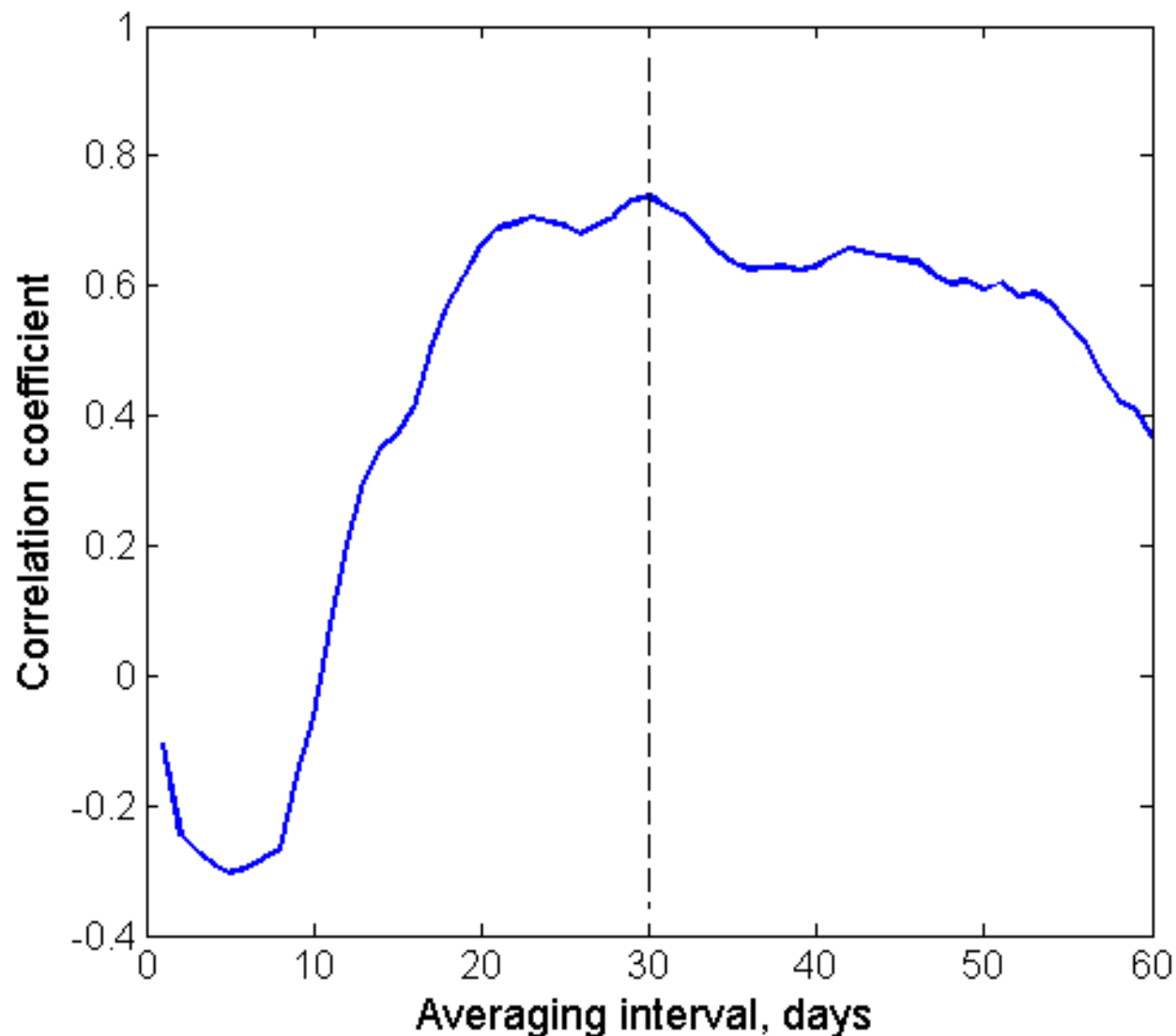
Внутригодовая изменчивость скорости экмановской накачки  $\langle W_E \rangle \cdot 10^6$  м/с (а) и вдольбереговой компоненты геострофической скорости  $\langle V_g \rangle$  м/с на поверхности (б)



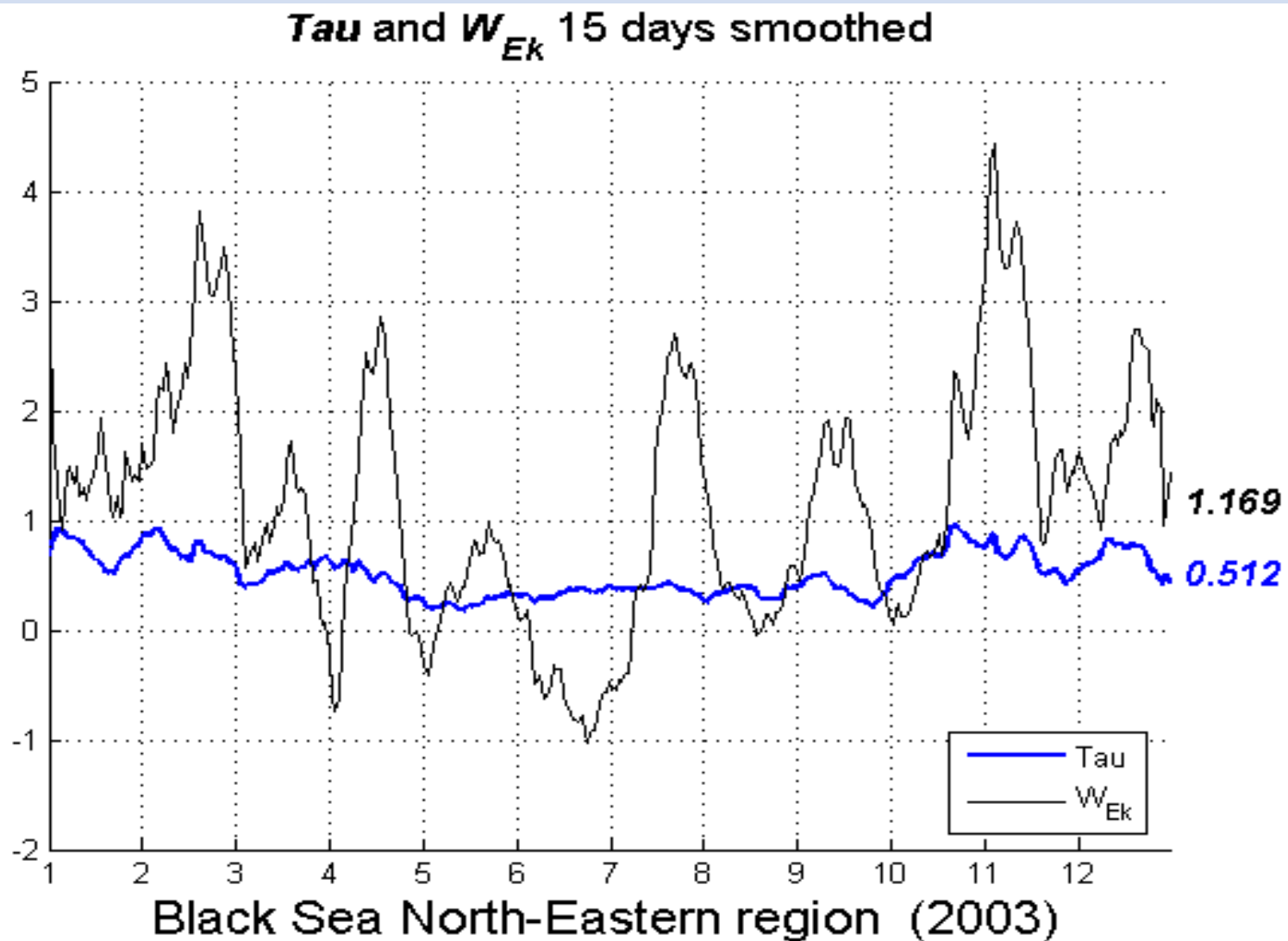


# Коэффициент корреляции между $\langle W_E \rangle$ и $\langle V_g \rangle$ как функция временного интервала осреднения $W_E$ перед выполнением судового разреза

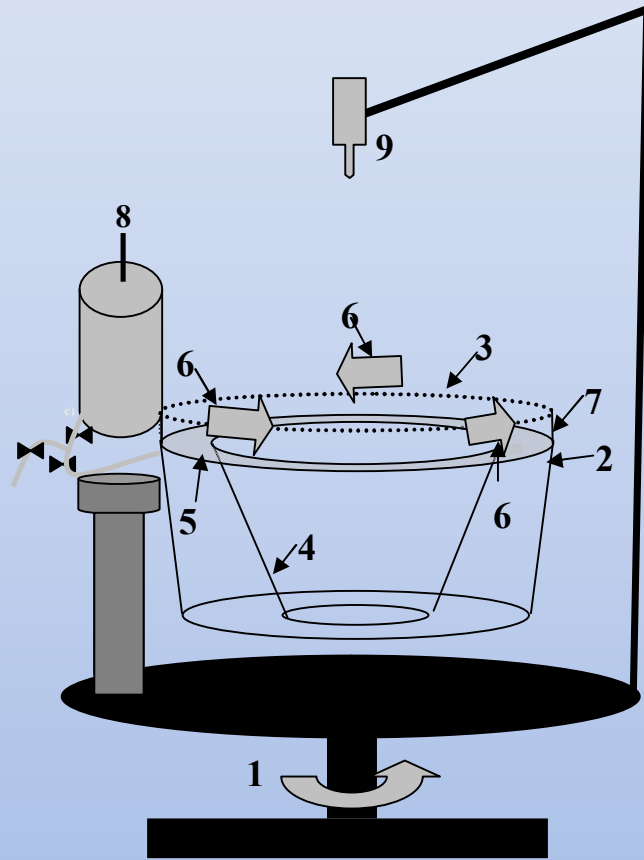
Коэффициент корреляции достигает максимума при временном интервале осреднения близком к одному месяцу. Этот временной период можно рассматривать как характерное время приспособления ОЧТ к изменяющемуся уровню экмановской накачки



Пример внутригодовой изменчивости напряжения трения ветра  $\langle \tau \rangle$  н/м<sup>2</sup> (синяя кривая) и скорости экмановской накачки  $\langle W_E \rangle \cdot 10^6$  м/с (черная кривая)

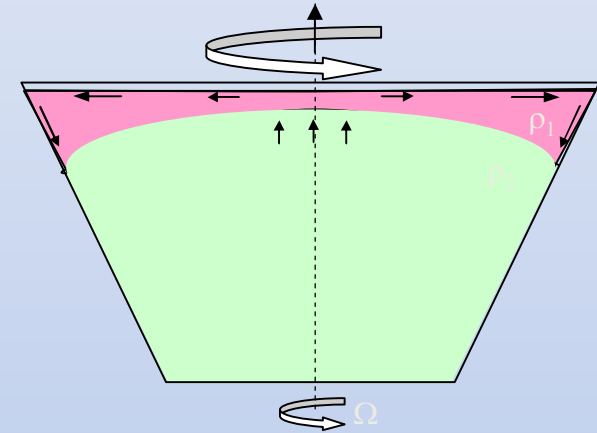


# Лабораторное моделирование влияния периодически изменяющегося ветра на режим вдольберегового течения в двуслойной вращающейся жидкости



1-вращающаяся платформа; 2 – цилиндрический бассейн; 3 – откидная крышка; 4 –наклонное дно; 5 –бортик; 6 – воздуходувки; 7 –боковая стенка; 8 – система заполнения; 9 – видеокамера.

(а)



(б)

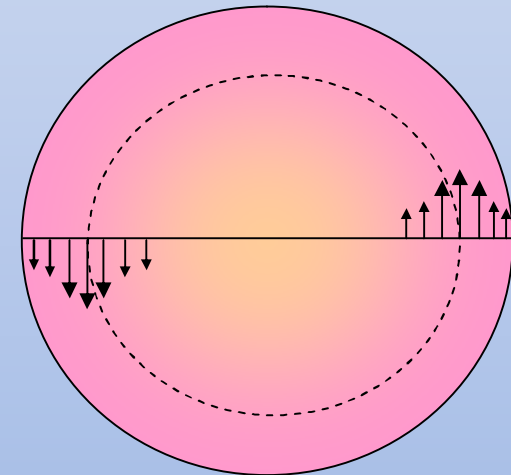
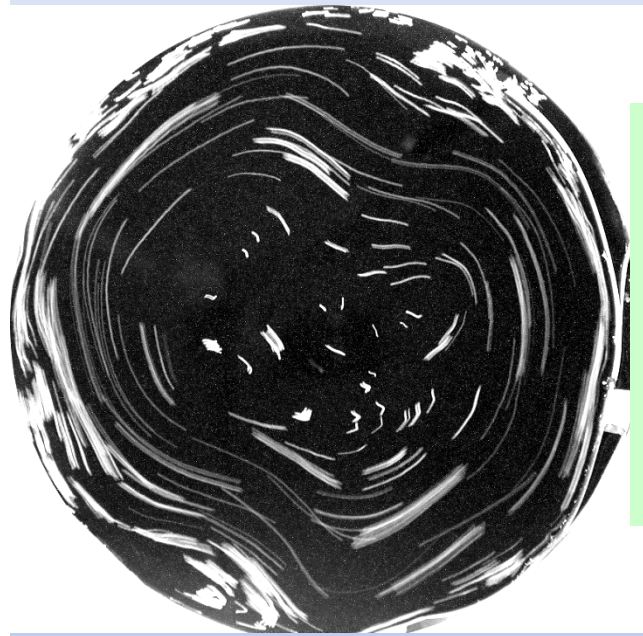


Схема бароклинной циркуляции возбуждаемой положительной экмановской накачкой: (а) – вид сбоку; (б) – вид сверху.

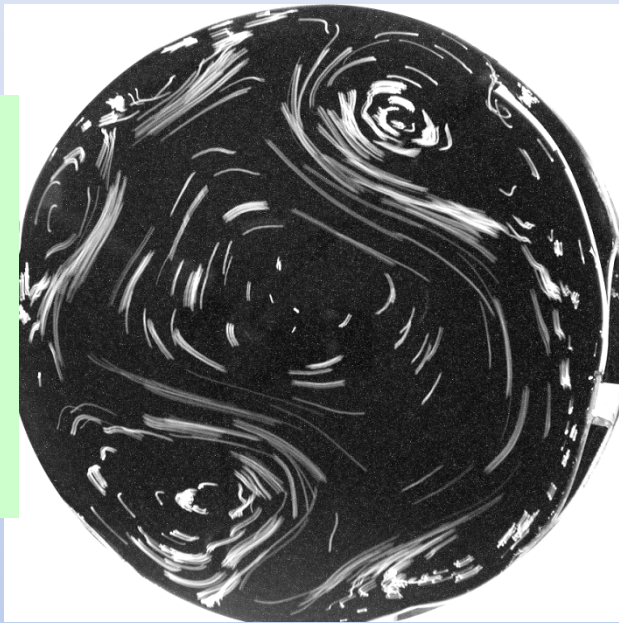
# Значения определяющих безразмерных параметров для Черного моря и лабораторной модели

Безразмерные параметры	Черное море	Лабораторная модель
$\theta = h_0/H$	$(0.5-1)*10^{-1}$	$(0.7-1.4)*10^{-1}$
$Bu_0 = (R_d/L_o)^2$	$(0.6-2)*10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$
$L_S / R_d$	0.5-5	1-8
$E = \nu/(f h_0^2)$	$(0.01-1)*10^{-4}$	$\sim 10^{-3}$
$Fr_{Rim} = U_{Rim}/(g' h_0)^{0.5}$	$(0.4-2.0)*10^{-1}$	$(0.3-3.0)*10^{-1}$

# Неустойчивость прибрежного течения, возбуждаемого экмановской накачкой, на стадии его релаксации



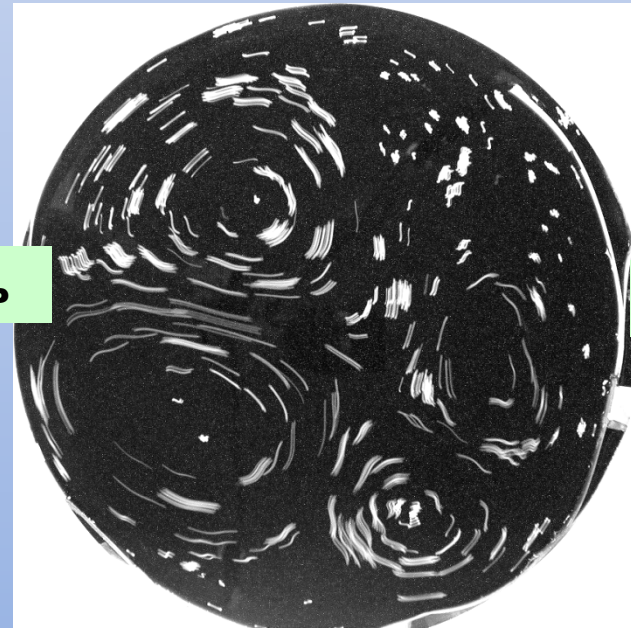
Развитое прибрежное течение перед окончанием ветрового воздействия



на 4-й день релаксации



на 17-й день



на 45-й день

# Влияние изменчивости экмановской накачки на ОЧТ и мезомасштабную вихревую динамику

## Экмановская накачка

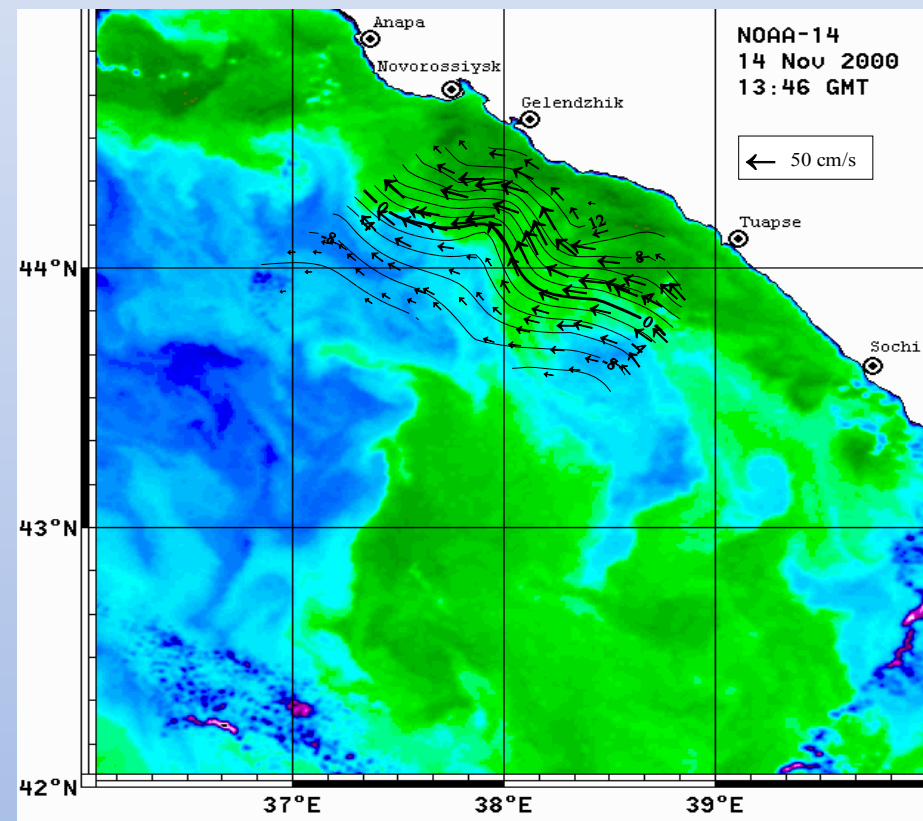
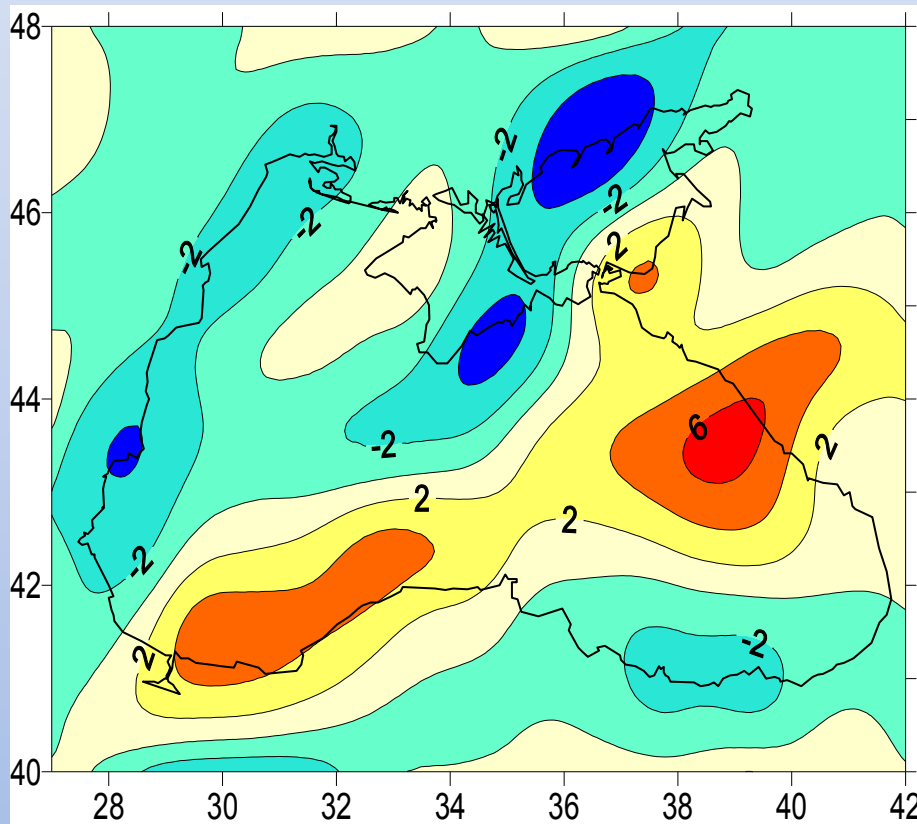
сильная

слабая

Интенсификация прижатой к берегу струи ОЧТ, подавление ее неустойчивости и, как следствие, ослабление мезомасштабной вихревой динамики и поперечного берегу обмена

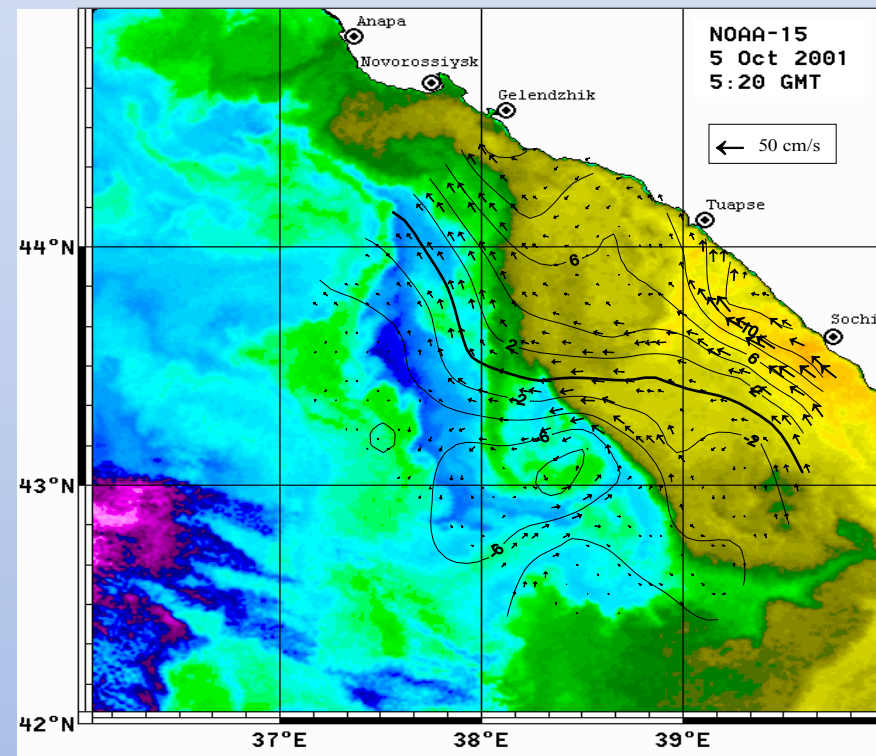
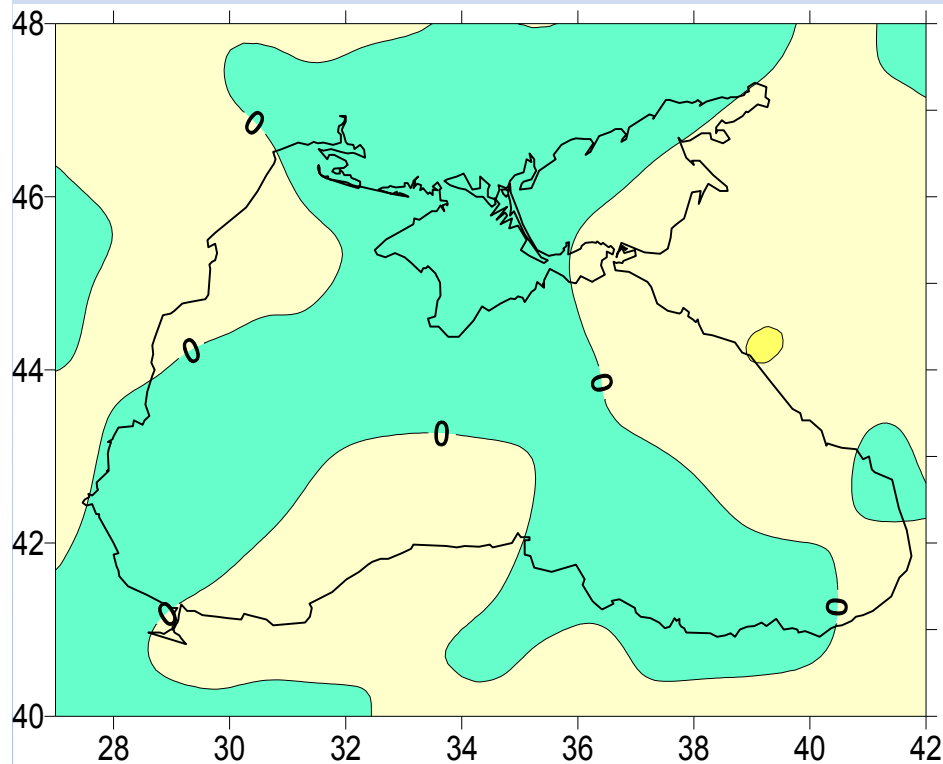
Ослабление и меандрирование ОЧТ, удаление струи от берега, формирование мезомасштабных вихрей вследствие развития неустойчивости, усиление поперечного берегу обмена

# Сильная экмановская накачка и обусловленная ей интенсификация ОЧТ (ноябрь 2000)



*Zatsepin et al., 2002*

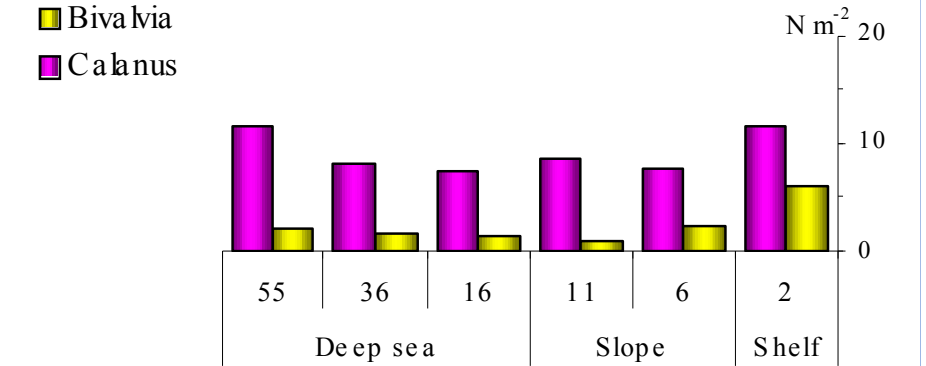
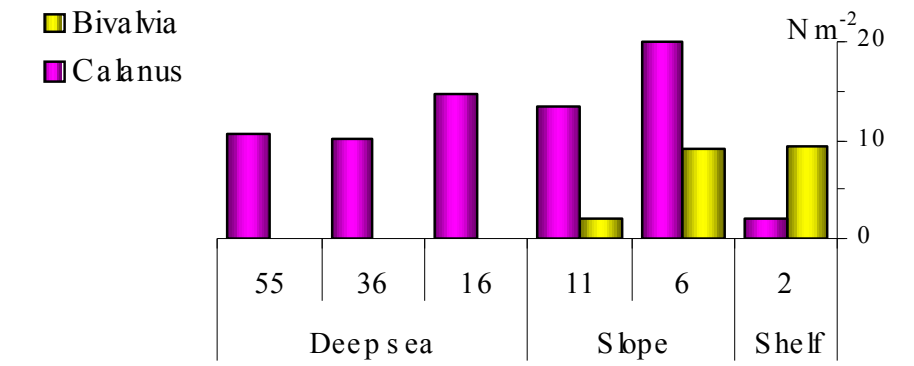
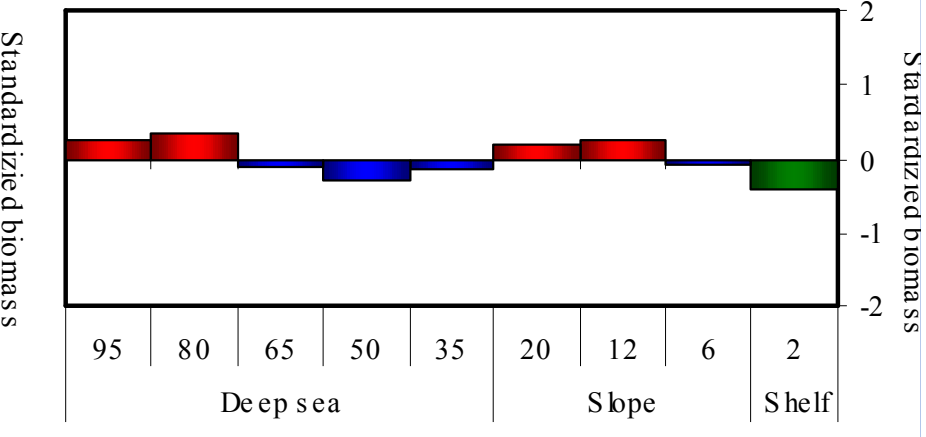
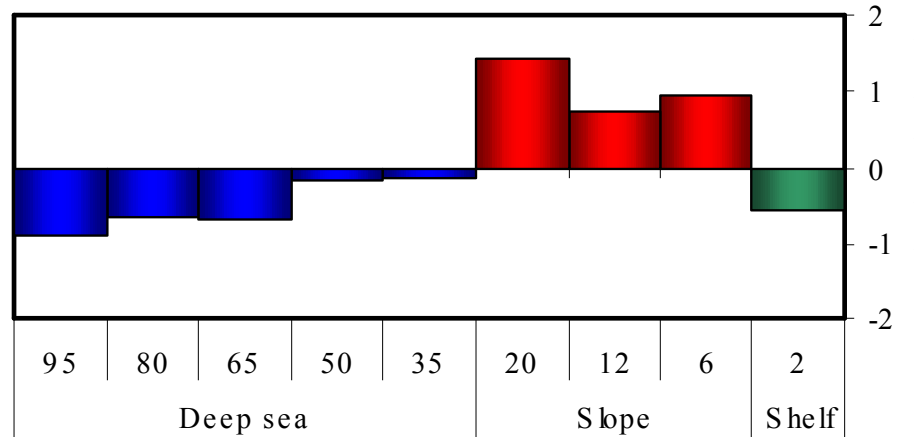
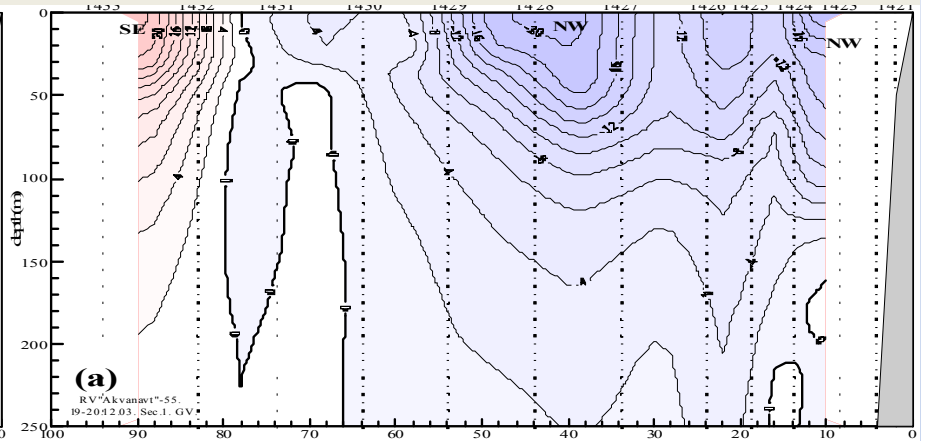
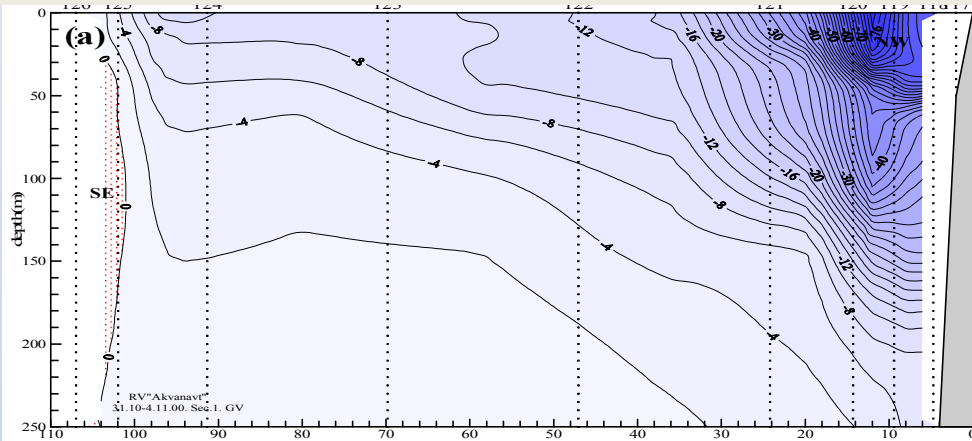
# Слабая экмановская накачка, деградация ОЧТ и образование мезомасштабных вихрей (октябрь 2001)



*Zatsepin et al., 2002*



# Влияние режима течения на распределение зоопланктона



Использование спутниковой альтиметрии для изучения крупно- и мезомасштабной динамики Черного моря (*Кубряков, Станичный, 2011-2013*)

**Спутниковая альтиметрия** - единственный инструмент, позволяющий регулярно, независимо от погодных условий восстанавливать циркуляцию всей акватории Черного моря

С 1992 года точность альтиметров достигает  $\sim 2$  см.

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

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

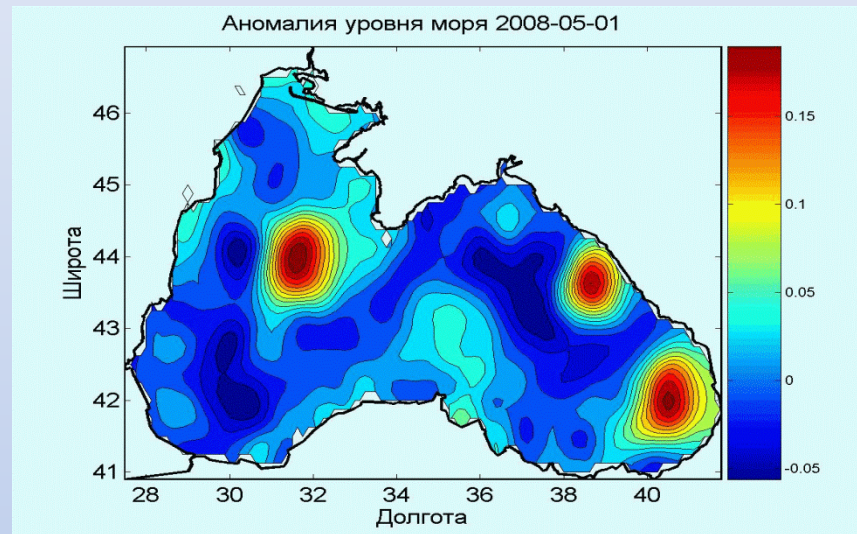
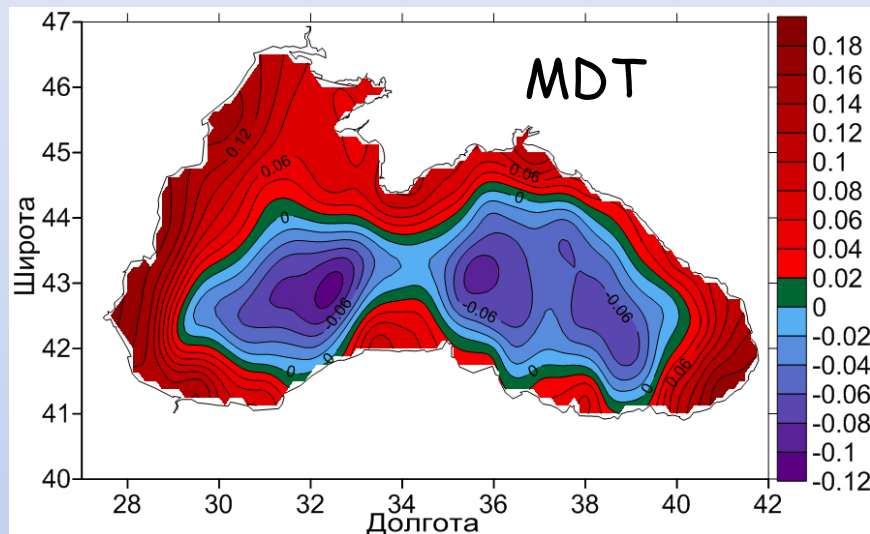
$$v_g = \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial x}$$

# Средняя динамическая топография

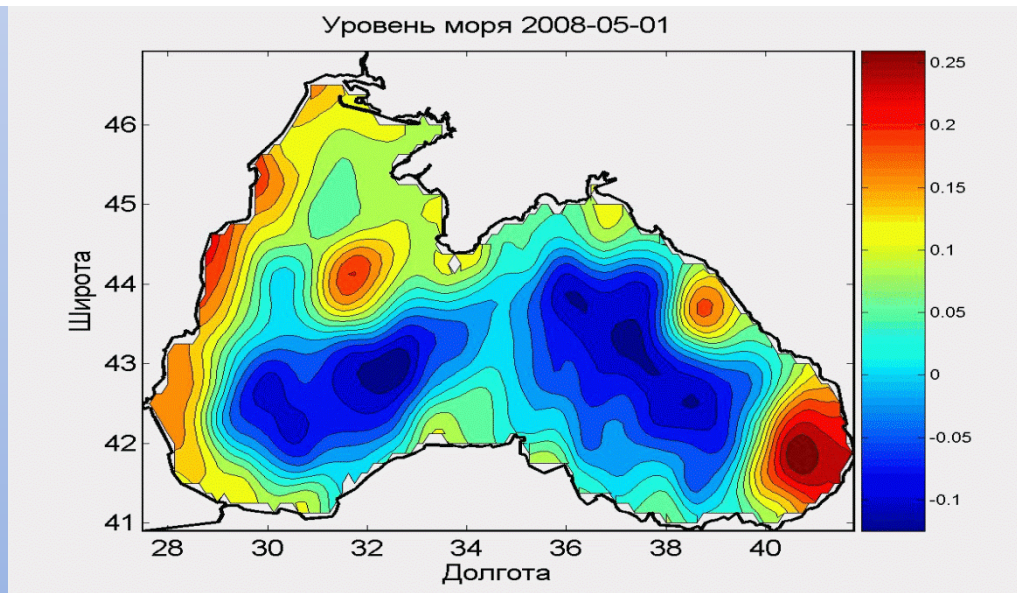
[Кубряков А.А, Станичный С.В., 2011]

# Mapped Sea Level Anomaly

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



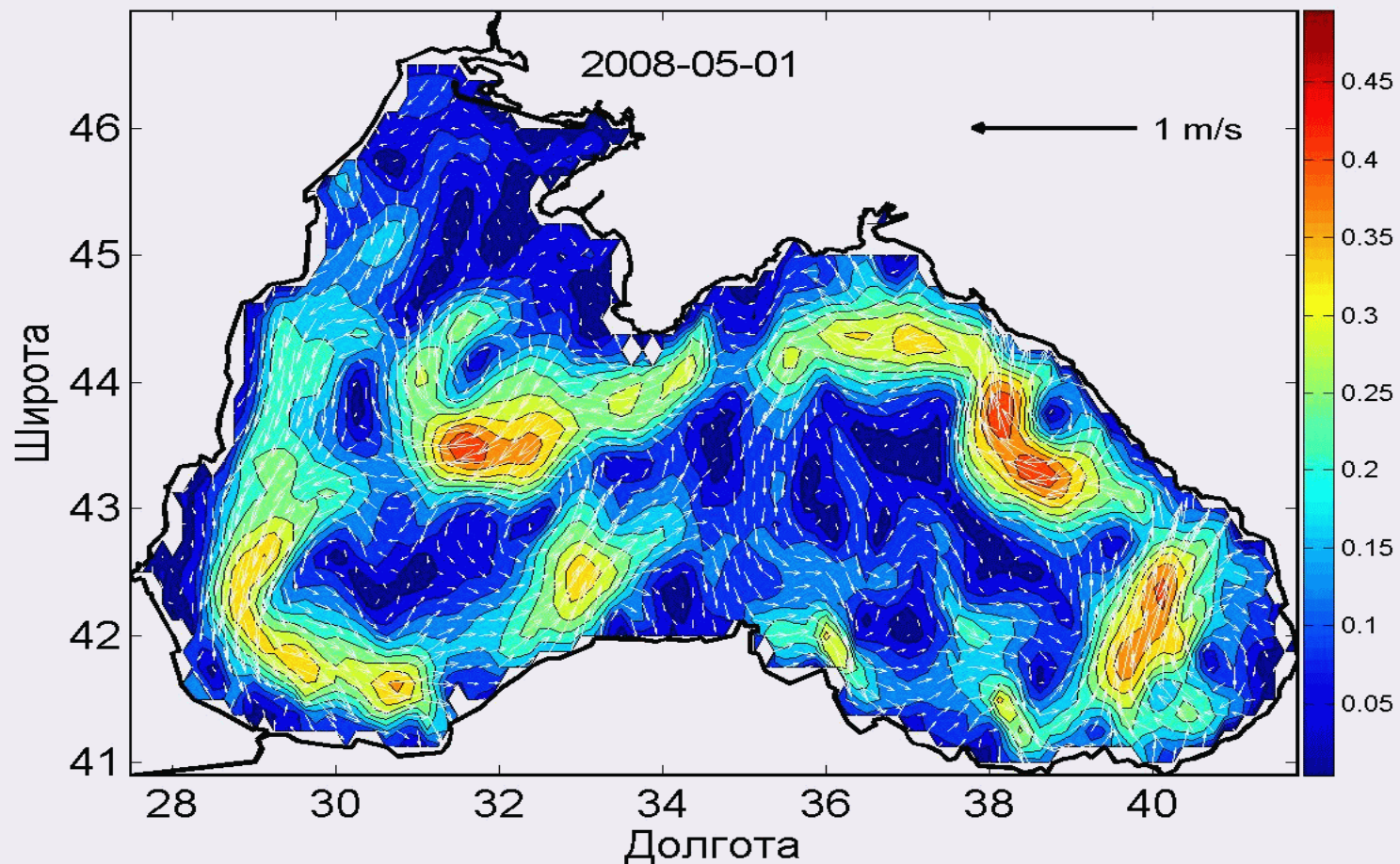
# Абсолютная динамическая топография



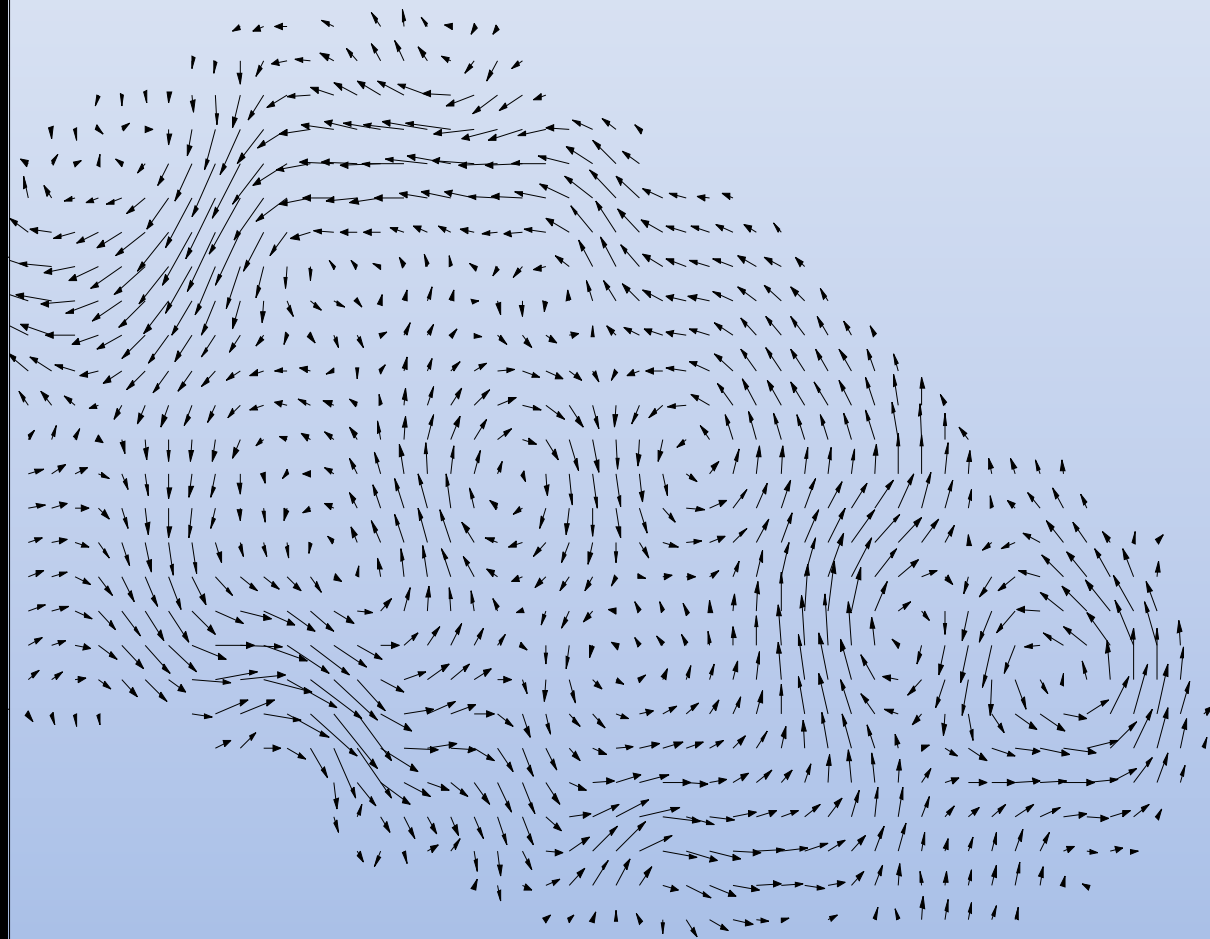
По градиентам абсолютной динамической топографии рассчитываются геострофические скорости течений на поверхности

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

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



Пример  
наложения  
скорости  
поверхностных  
течений  
рассчитанных  
по альтиметрии  
на спутниковое  
изображение  
ТПО в С-В части  
Черного моря



# Межгодовая изменчивость интегральной завихренности скорости ветра и средней кинетической энергии течений

Средняя кинетическая энергия течений (МКЕ):

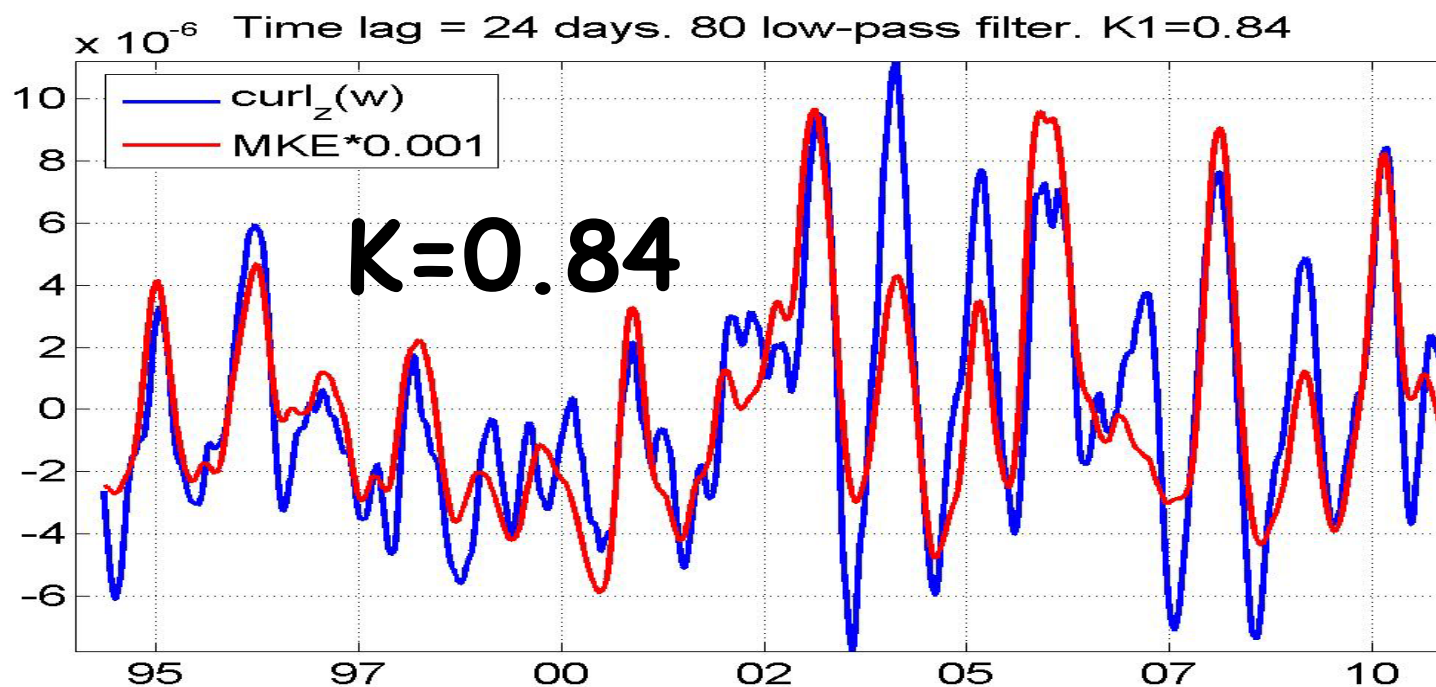
$$MKE = \frac{1}{2} (\langle u \rangle^2 + \langle v \rangle^2)$$

VS

Завихренность скорости ветра

[Шокуров М.В., МГИ]

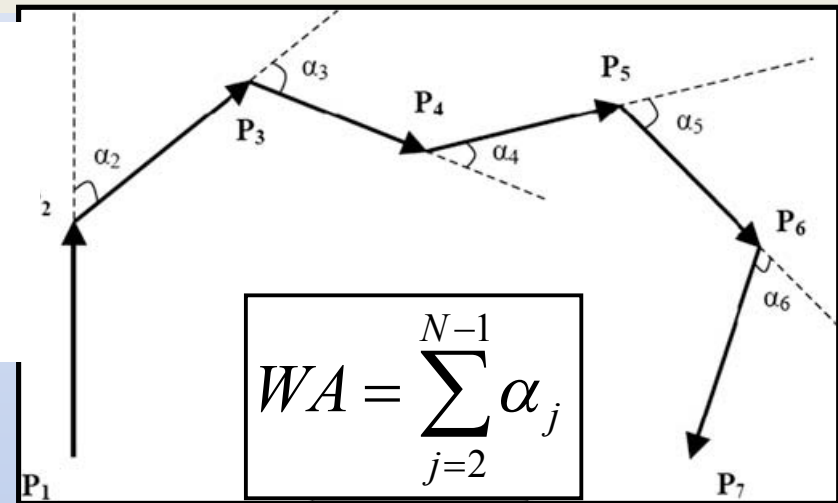
$$\text{curl}_z w = \frac{\partial v_w}{\partial x} - \frac{\partial u_w}{\partial y}$$



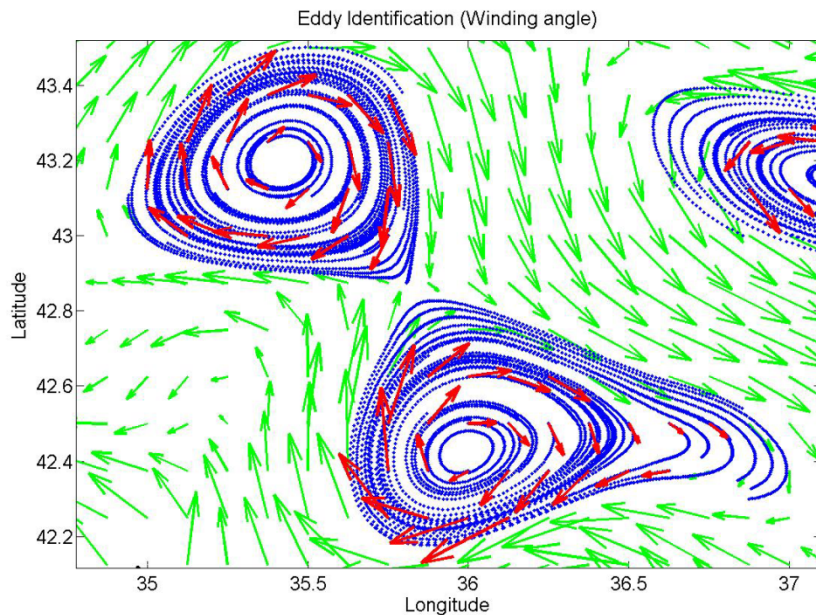
# Автоматическая идентификация мезомасштабных вихревых образований

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]

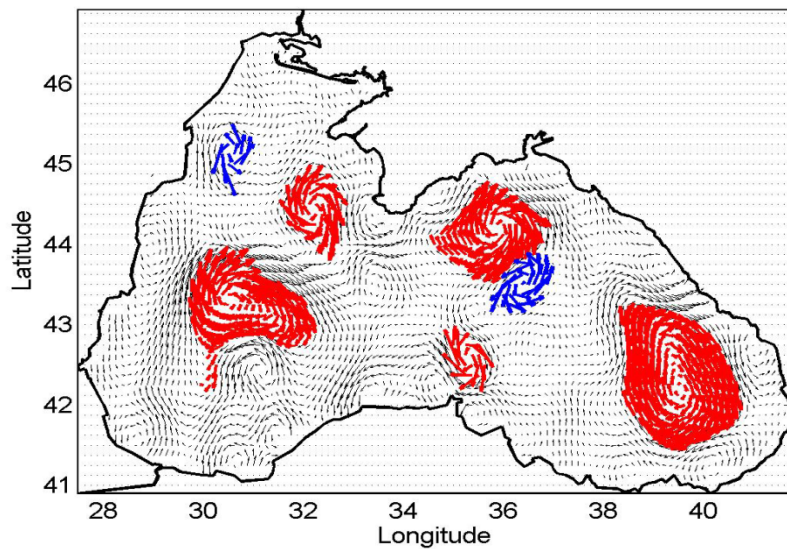


Частицы с  $WA > 360^\circ$  описывают замкнутый контур уровня

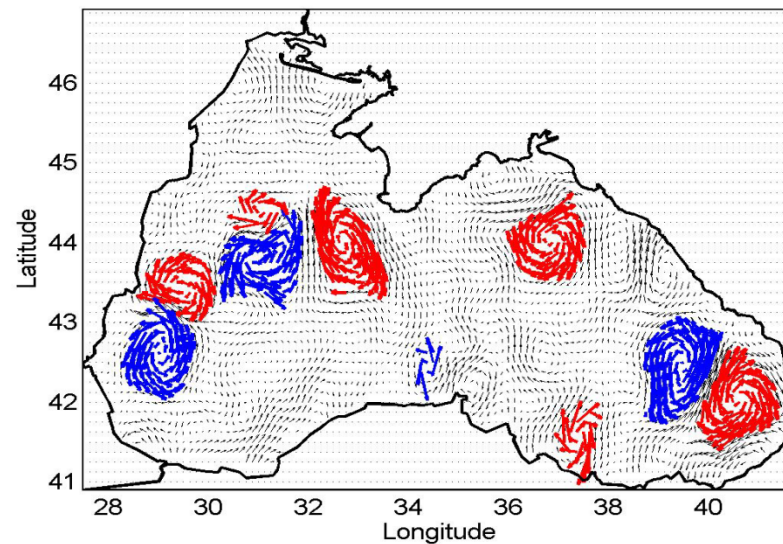
находятся в вихре

# Примеры полей с идентифицированными вихревыми образованиями

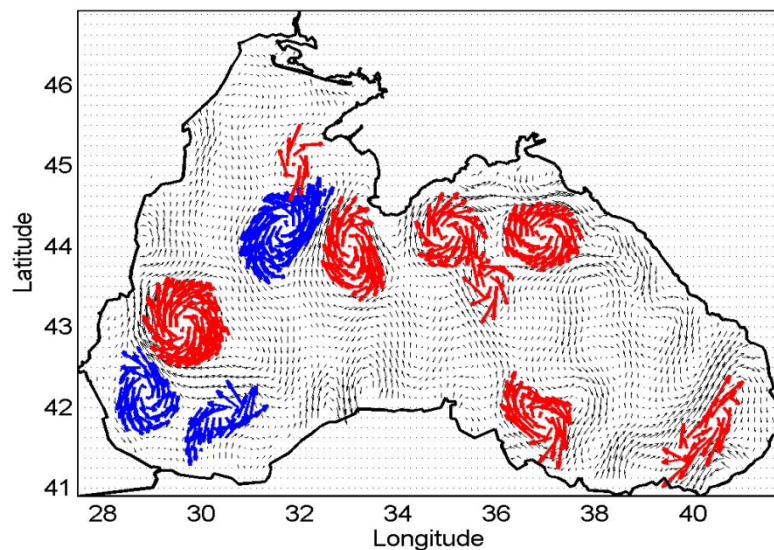
2008-09-17



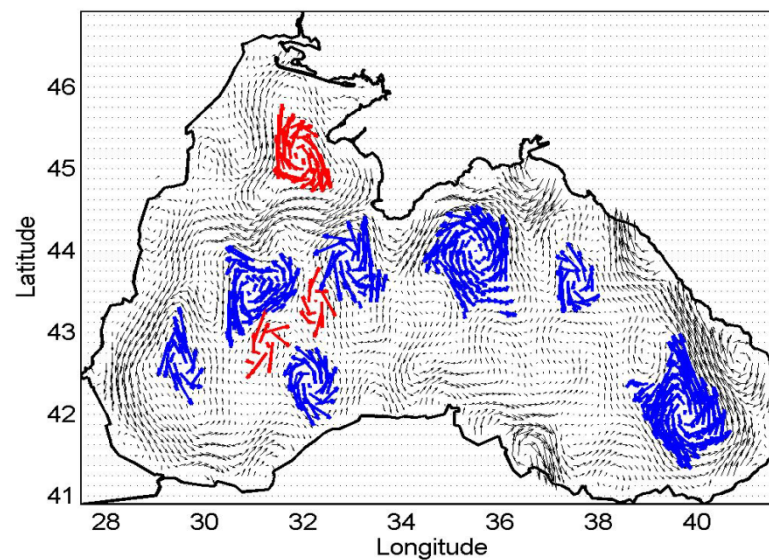
2004-06-09



2003-06-18

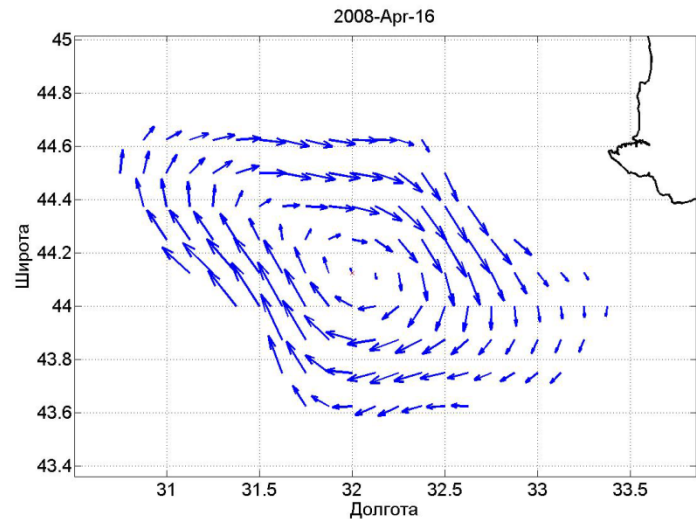


2010-02-03



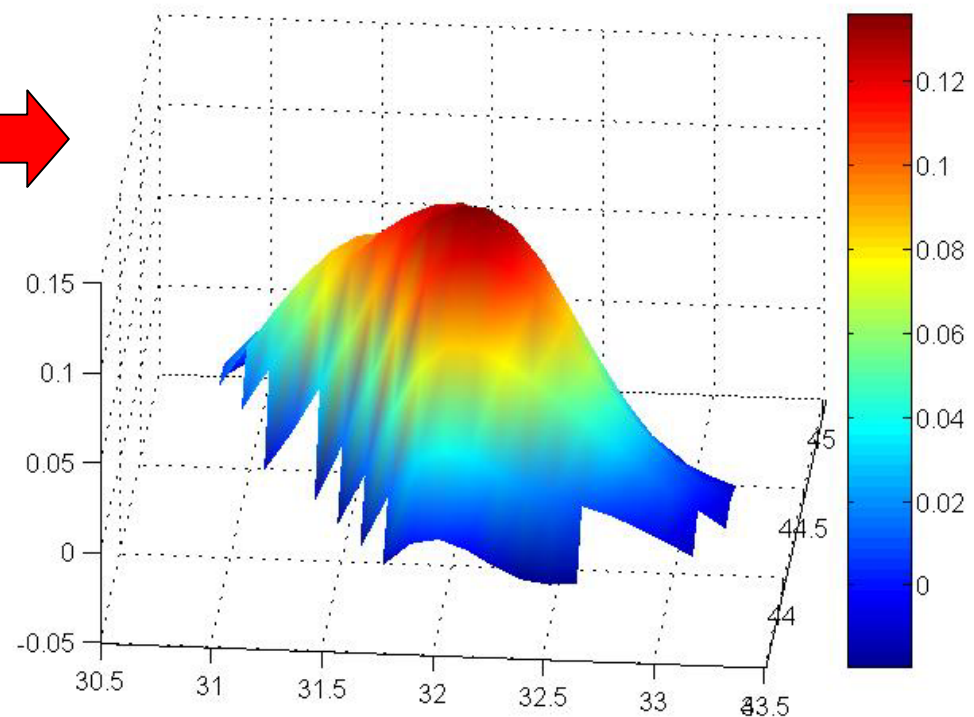


# Структура мезомасштабного вихря



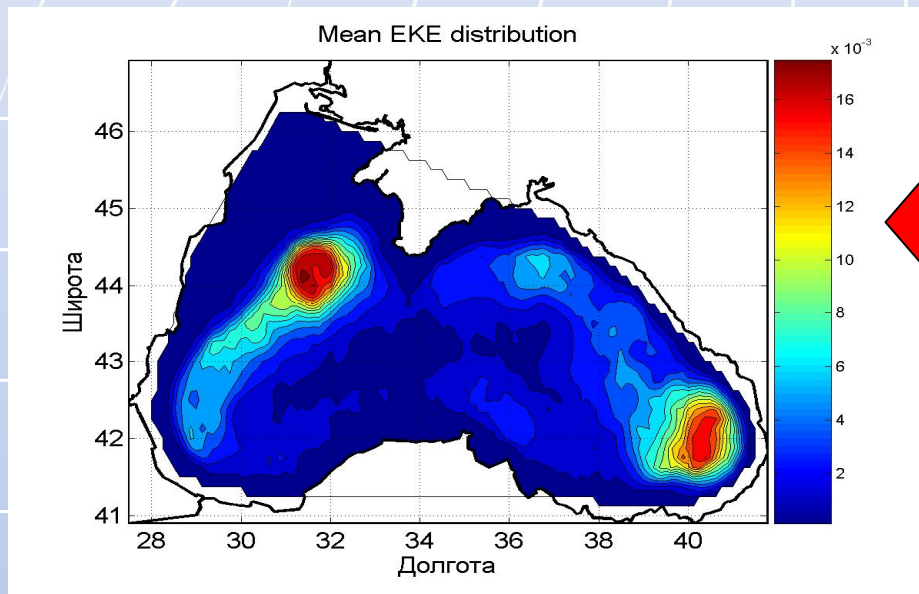
**Антициклонический вихрь  
в поле скорости в районе  
г. Севастополь**

**Тот же вихрь в поле  
уровня**



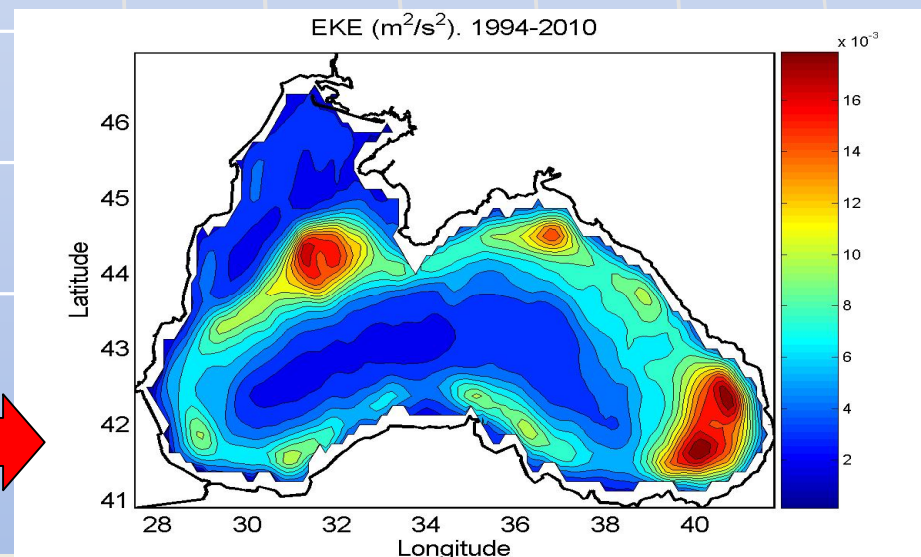
# Вихревая кинетическая энергия

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



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

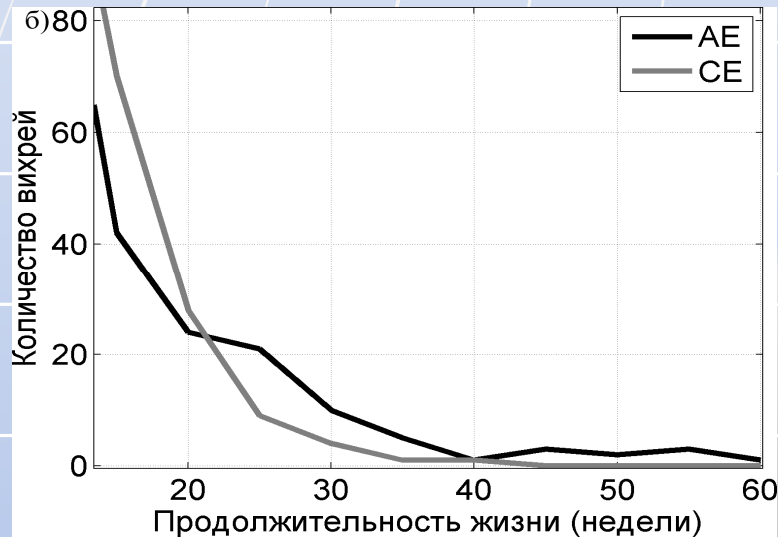
$$EKE = \frac{1}{2} (\langle u' \cdot u' \rangle + \langle v' \cdot v' \rangle)$$



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

# Статистика вихрей

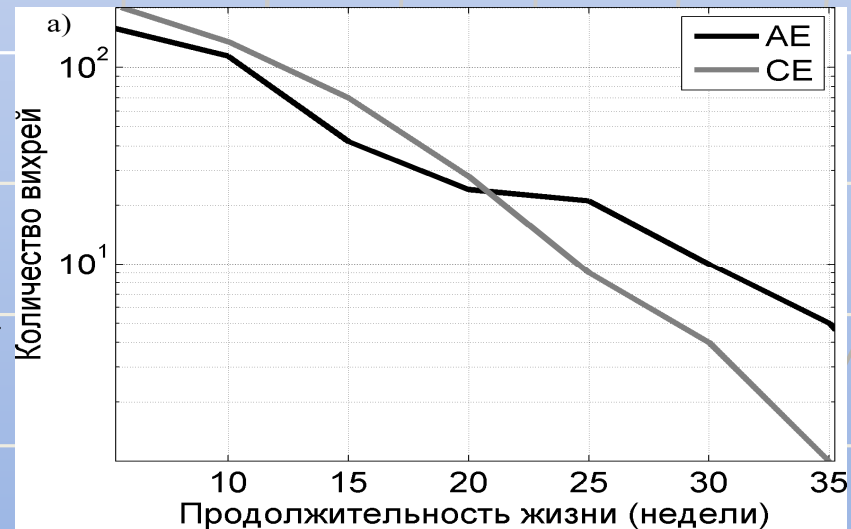
За период 1992-2011 года с временем жизни  $>4$  недель, радиусом  $\geq 20$  км идентифицировано **847** вихрей (460 циклонов и 387 антициклонов)



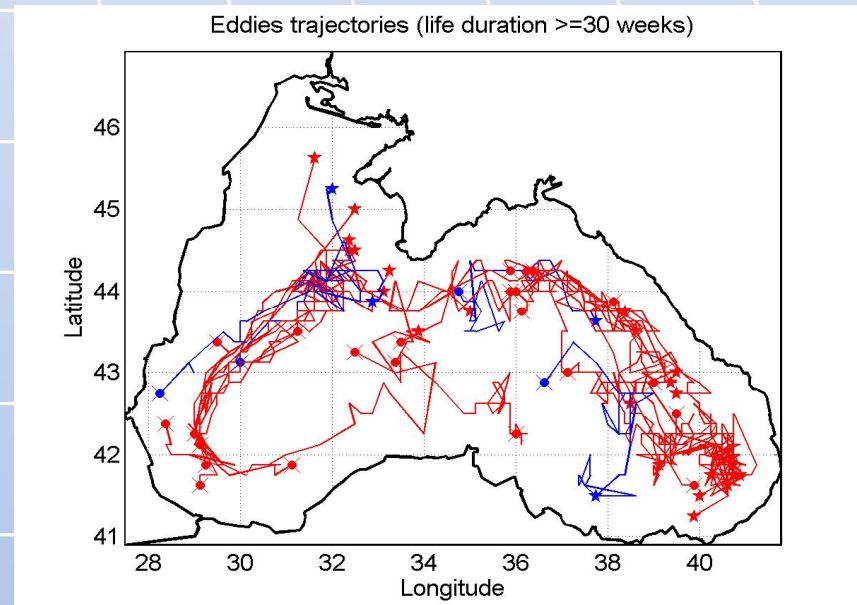
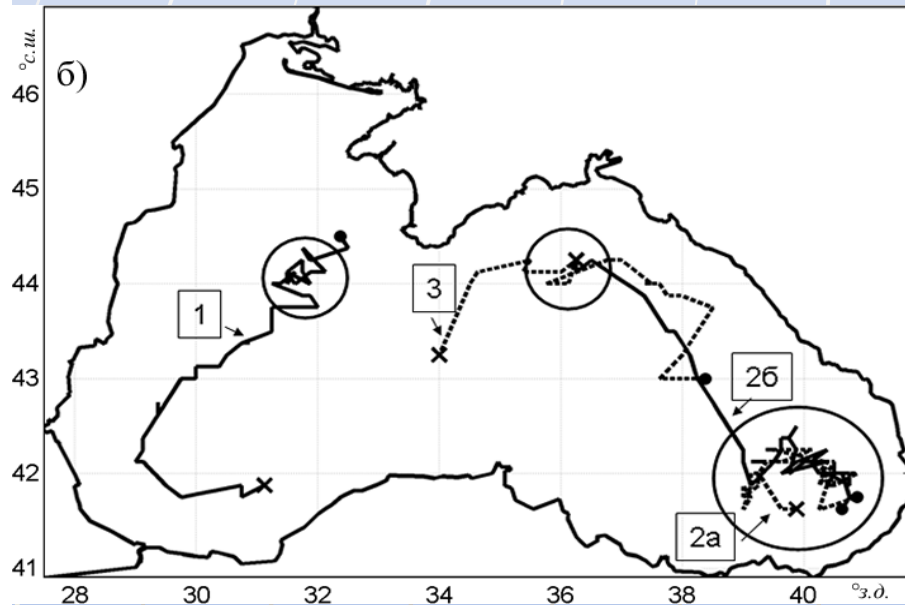
Циклонических образований в Черном море больше, но антициклоны живут дольше

50 обнаруженных вихрей просуществовали более полугода, 14 - более 9 месяцев, 4 - более чем 1 год

Логарифмическая зависимость количества идентифицированных вихрей от времени жизни

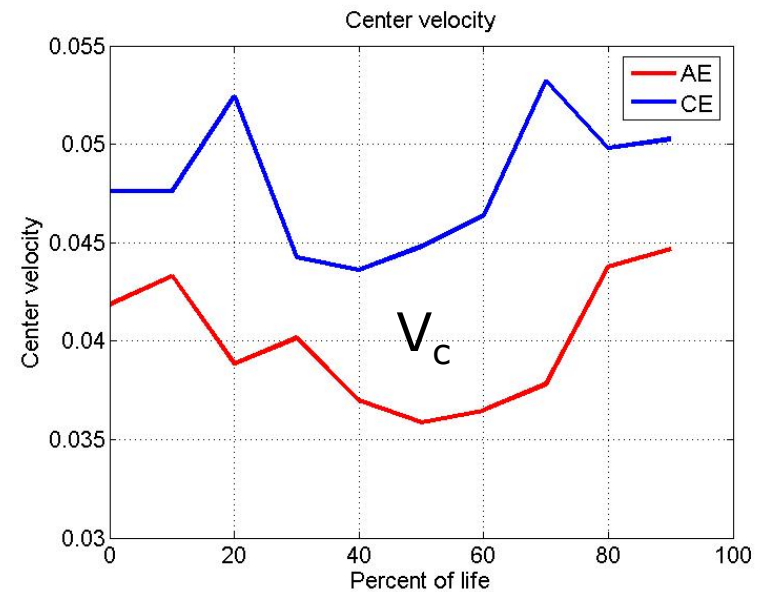
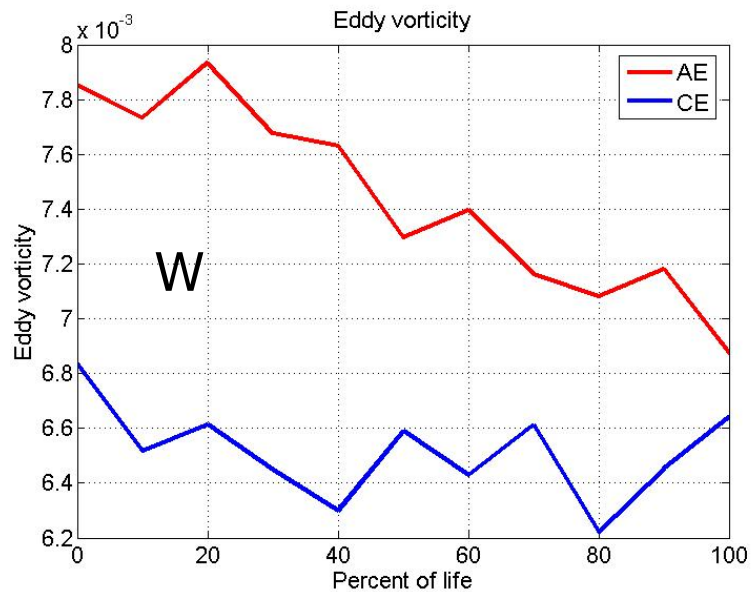
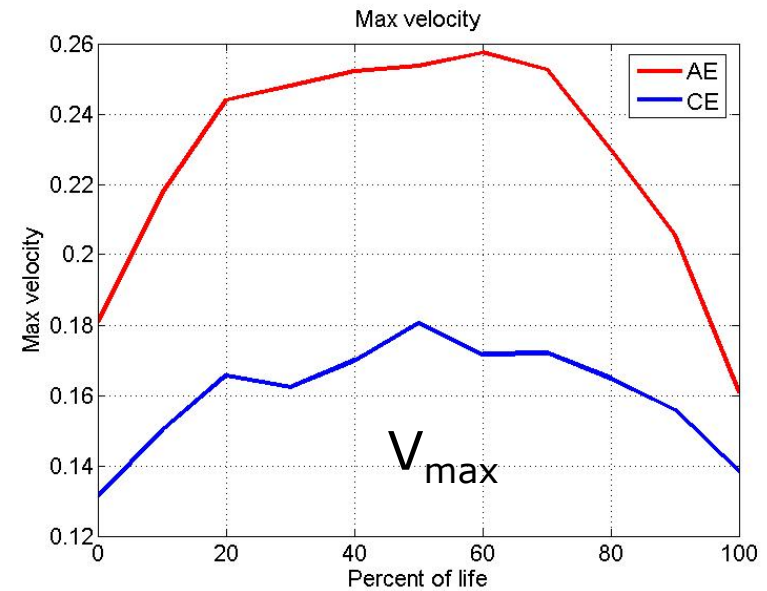
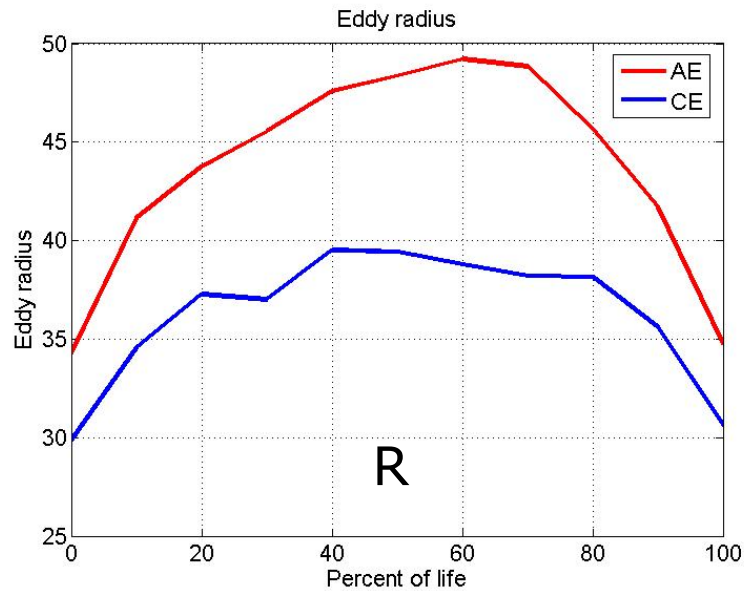


# Траектории перемещения мезомасштабных вихрей

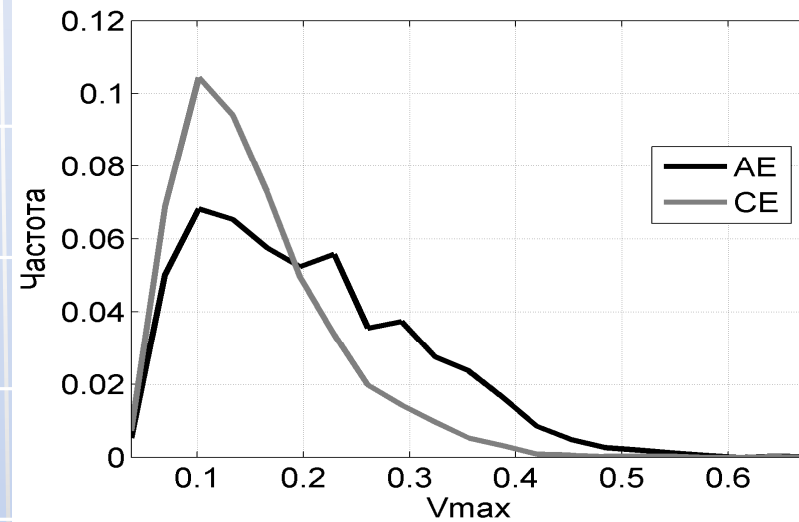
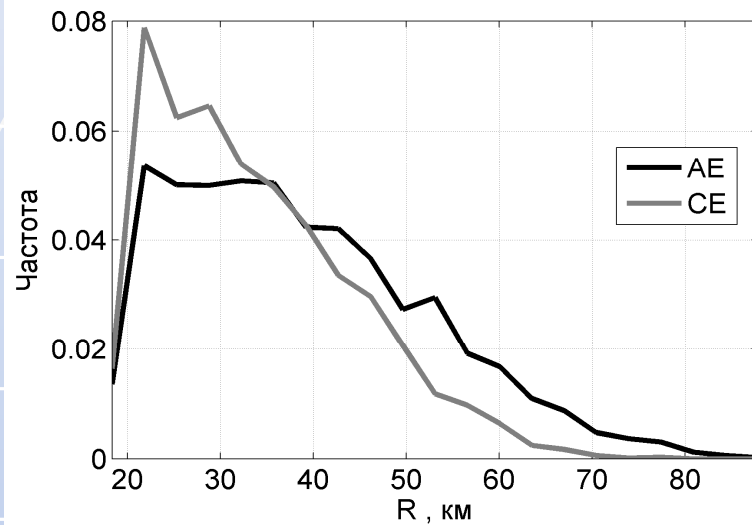


Траектории перемещения вихрей: справа - характерные, слева - для всех вихрей с временем жизни более 30 недель

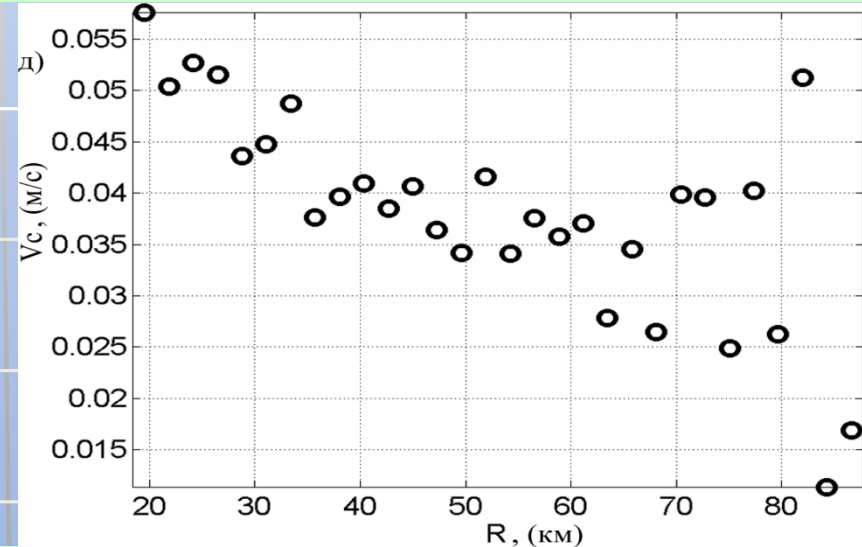
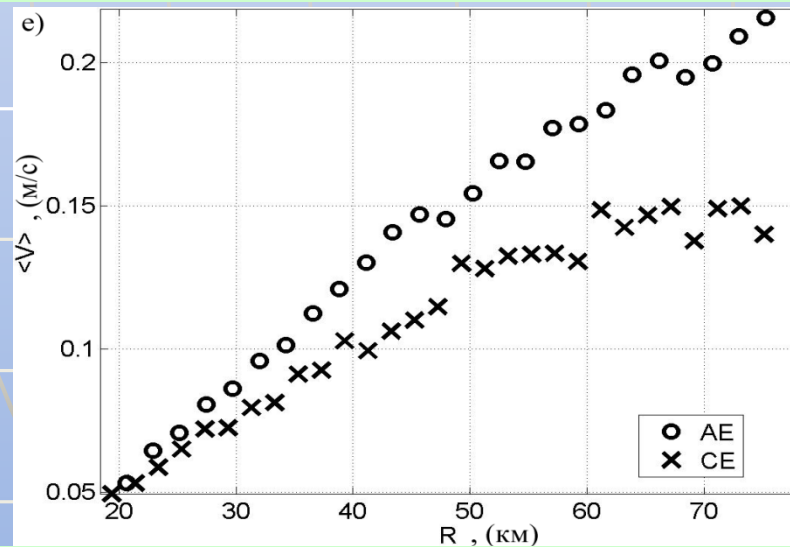
# Временная эволюция параметров вихрей



# Статистические характеристики параметров вихрей

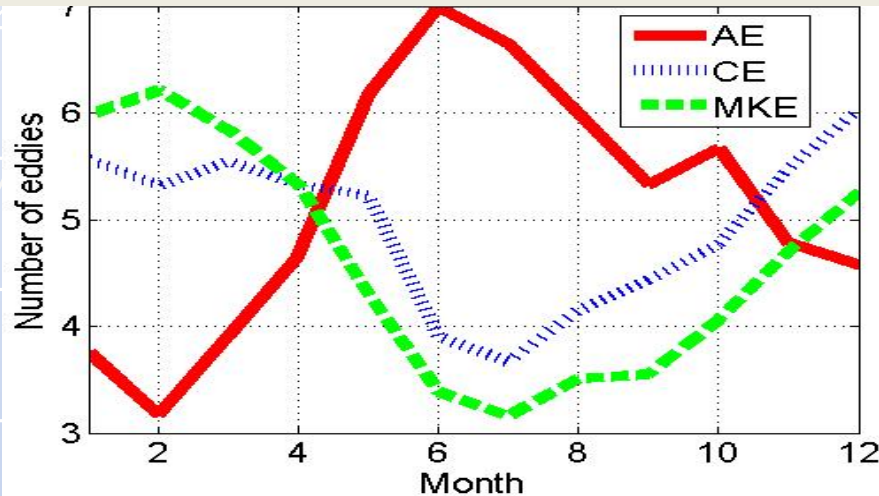


Плотность вероятности для радиуса вихря (км) (слева), и для максимальной орбитальной скорости частиц (м/с) в вихре (справа),

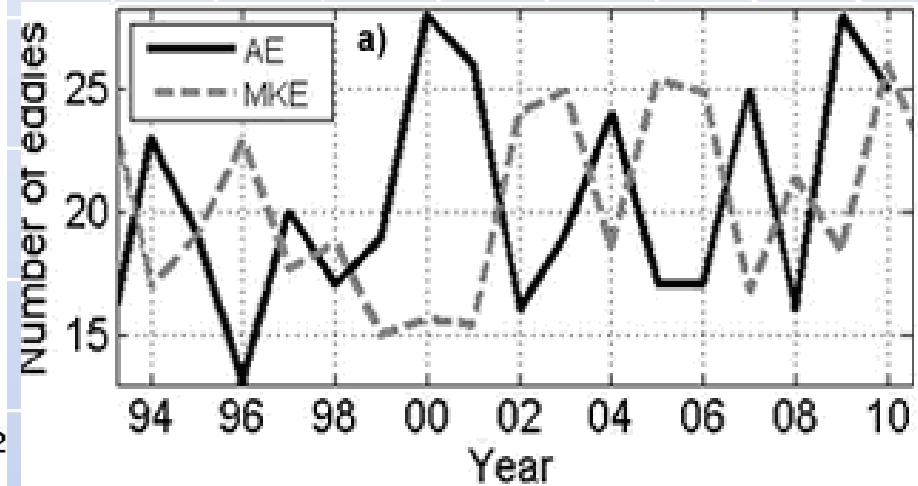


Зависимость между R и  $\langle V \rangle$  (слева), между R и  $V_c$  в вихре (справа)

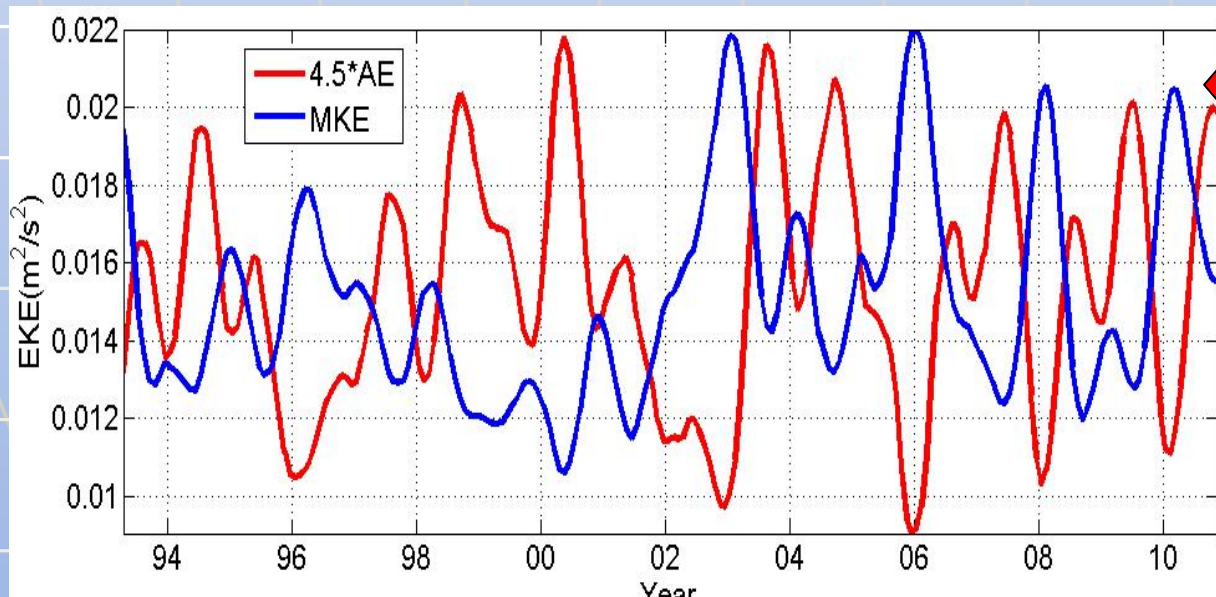
# Сезонная и межгодовая изменчивость



Сезонная изменчивость количества вихревых структур



Межгодовая изменчивость количества антициклонов



При ослаблении МКЕ начинается развитие интенсивных антициклонических вихрей

Энергия антициклонических вихрей *versus* МКЕ

## Выводы (1)

Вариации экмановской накачки с периодом более одного месяца могут приводить к изменению режима течения от доминирования вдольбереговой струи ОЧТ при сильной накачке к доминированию мезомасштабных вихрей при слабой накачке. Вследствие внутригодовой изменчивости экмановской накачки (ее усиления зимой и ослабления летом) для зимы более типично доминирование вдольбереговой струи ОЧТ, а для лета - доминирование мезомасштабных вихрей. Тем не менее, смена режимов течения может происходить многократно в годовом цикле.



## Выводы (2)

С помощью спутниковой альтиметрии исследованы статистические характеристики мезомасштабных вихрей с радиусом более 20 км и временем жизни более 4 недель в период с 1992 по 2011 гг. Установлено, что число циклонических вихрей превышает число антициклонических, однако характерные размеры и кинетическая энергия у циклонов меньше, чем у антициклонов. Радиус вихрей изменяется в диапазоне Показано, что в сезонном цикле антициклоны в основном образуются в период ослабления ветровой накачки и ОЧТ (летом), тогда как циклоны – в период усиления ветровой накачки и ОЧТ (зимой). Существует заметная межгодовая изменчивость средней и вихревой кинетической энергии течений, положительно коррелирующая с ветровой накачкой циркуляции.

## Выводы (3)

Режим течения влияет на пространственное распределение зоопланктона. При интенсивном ОЧТ и подавленном поперечном обмене возникает неравномерное распределение зоопланктона с обилием прибрежных видов в шельфовой зоне и открытоморских видов в глубоководной части моря. При слабом и меандрирующем ОЧТ, в условиях интенсивного поперечного обмена распределение зоопланктона является более равномерным: прибрежные виды наблюдаются не только в шельфовой, но и в глубоководной части моря и наоборот, открытоморские – не только в глубоководной, но и в шельфовой зоне.

**Субмезомасштабные вихри на кавказском  
шельфе Черного моря и механизмы их  
генерации**

# Субмезомасштабные вихри на шельфе Черного моря



Фотографический снимок суб-мезомасштабного циклонического вихря в шельфовой зоне Черного моря, проявляющегося на поверхности воды в виде спиральной сликовой структуры (фотография А.В. Григорьева).

# Субмезомасштабные вихри на шельфе Черного моря



**Фронтальная зона субмезомасштабного циклонического вихря: центр вихря находится слева вне рисунка, разворот кораблей на якоре показывает направление вращения воды в вихре**

# Определения

## 1. **Синоптические/мезомасштабные вихри: $R > R_d = NH/f$**

Квазигеострофические –  $F_p \approx F_{cor} \gg F_{cent}$ ,  $Ro = \omega/f = 0.1 - 0.2$

Характерный горизонтальный масштаб -  $D = 2R \sim 100$  км

Время жизни – месяцы, годы

Один из основных механизмов образования – бароклинная неустойчивость струйных течений (рост и отрыв меандров)

## 2. **Субмезомасштабные вихри: $R < R_d$**

Агеострофические, нестационарные: -  $F_{cor} \sim F_{cent}$ ,  $Ro \sim 1$

Характерный горизонтальный масштаб:  $D \sim 10$  км

Время жизни – не вполне известно (несколько суток?)

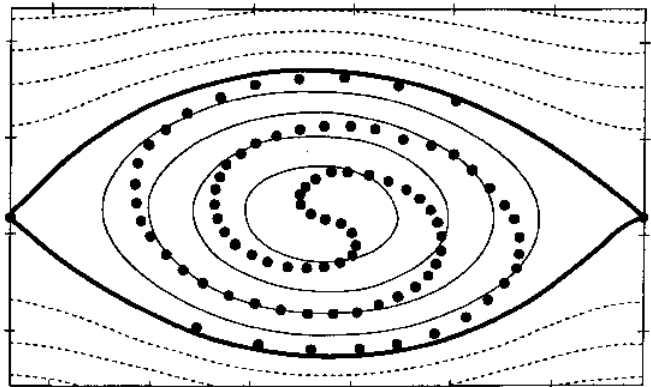
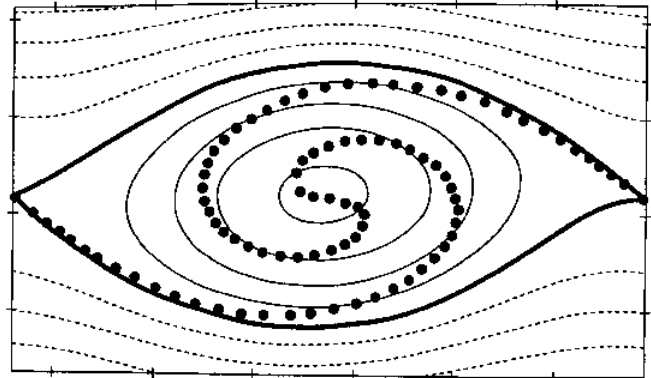
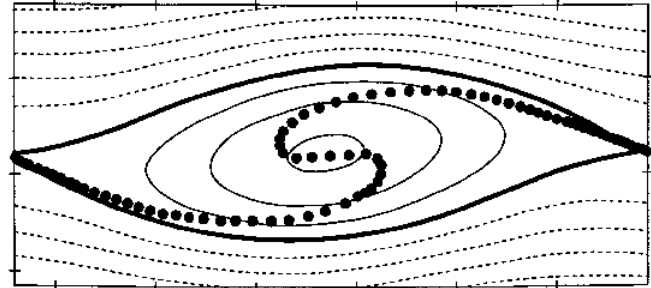
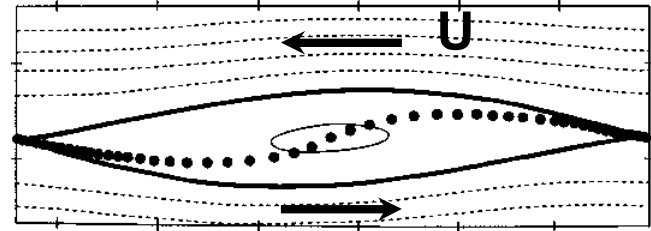
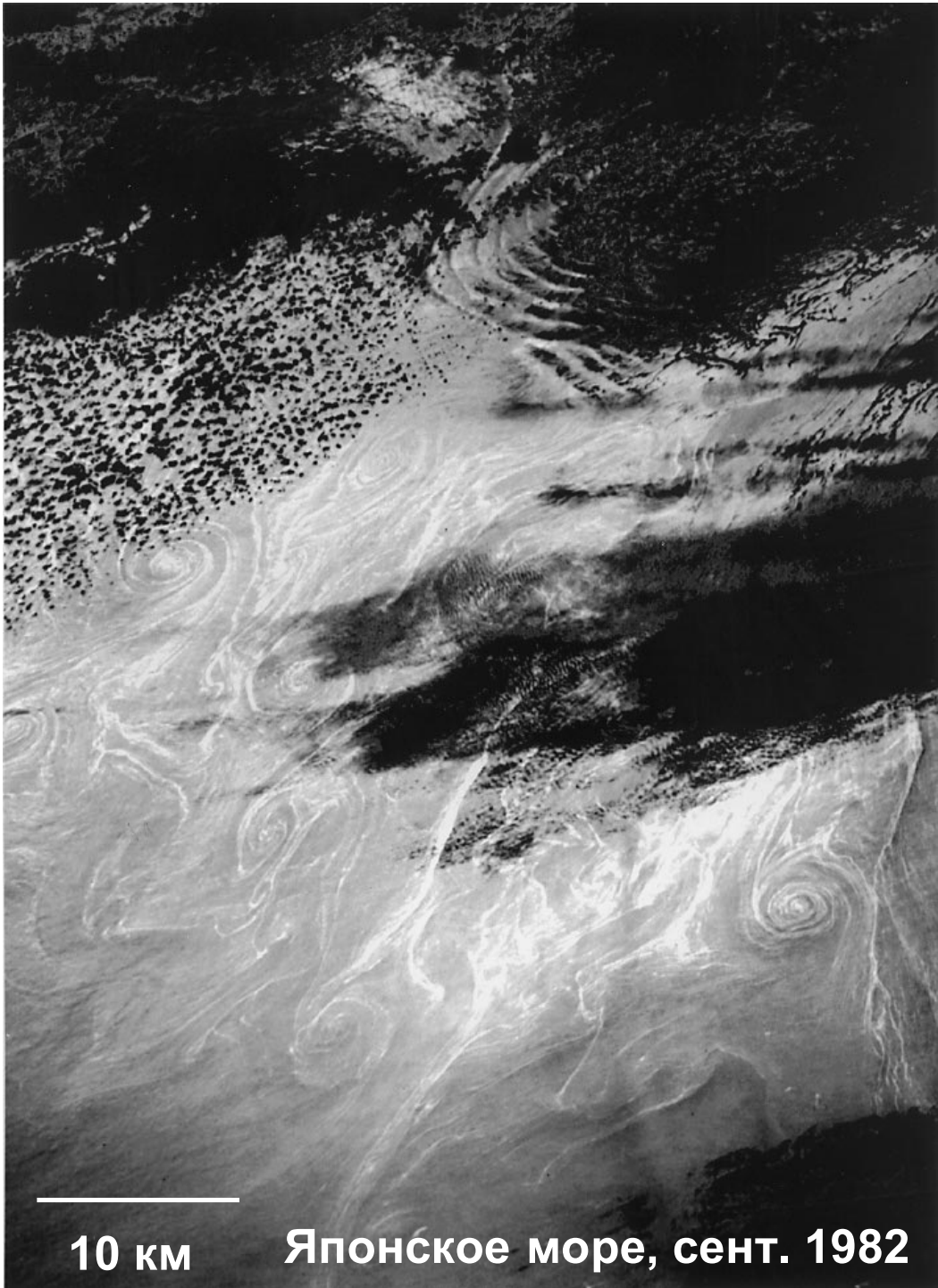
Механизмы образования – не вполне известны

## Краткая история исследований субмезомасштабных вихрей

С 1970-х годов «маленькие» вихри размером 10-30 км часто обнаруживались на спутниковых изображениях в, частности, на периферии струйных течений и синоптических вихрей («сдвиговые вихри» - Федоров, Гинзбург, 1988 «Поверхностный слой океана»).

В 1980-х годов, с появлением радиолокационных спутниковых изображений, стало очевидным, что верхний слой океана изобилует спиральными структурами (Stevenson, 1989 «Oceanography from Space Shuttle»).

В 2000 г. в Proc. R. Soc. London опубликована статья Munk et al. «Spirals on the sea» в которой введено понятие новой области исследований – субмезомасштабной океанографии. **«Spiral eddies are a manifestation of a sub-mesoscale oceanography which may constitute an important link in the balance of generating and dissipating ocean processes».**





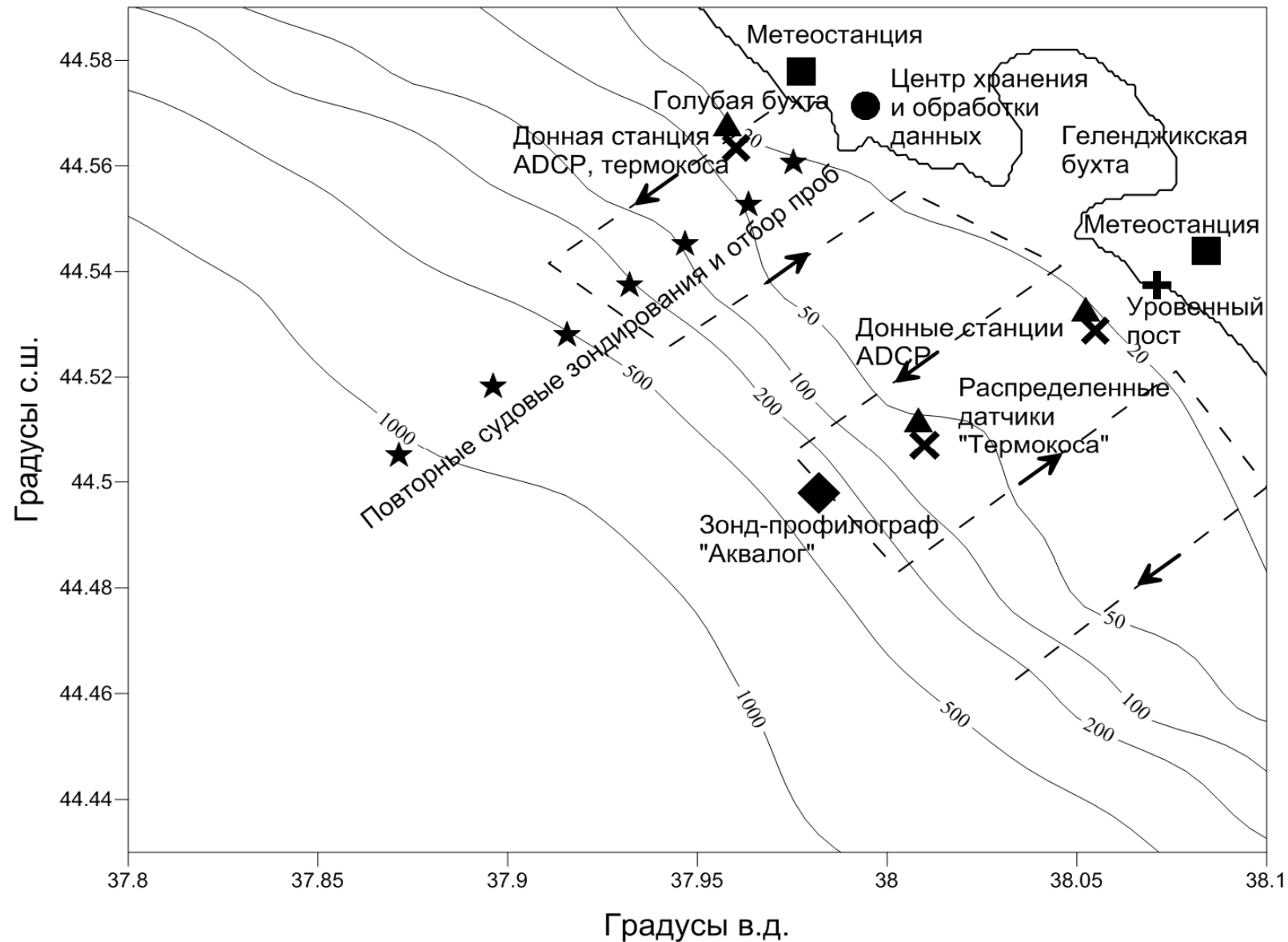
**Лаврова, Костяной, и др., 2011.** Комплексный спутниковый мониторинг морей России; **Каримова, 2012.** Канд. дис. Исслед. субмезомасштаб. вихрей Балтийского, Черного и Каспийского морей по данным спутниковой радиолокации.

Спиральные структуры являются самым массовым элементом циркуляции поверхностных вод, преобладающий знак вращения – циклонический. По-видимому, они охватывают весь ВКС. Характерный размер: 2.5 км в Балтике, 5.5 км в Черном и Балтийском морях. Макс. продолжит. существования наиболее крупных структур: 7-8 суток. Имеется сезонная изменчивость численности (в теплый сезон их

Одна из основных проблем в интерпретации наблюдаемых спиральных вихревых структур – малое число «подспутниковых» наблюдений.

Данный пробел отчасти заполнен измерениями *in situ* на гидрофизическом полигоне ИОРАН в шельфово-склоновой зоне Черного моря в районе г. Геленджик

# Схема действующего черноморского подспутникового полигона (июль, 2013 г.)

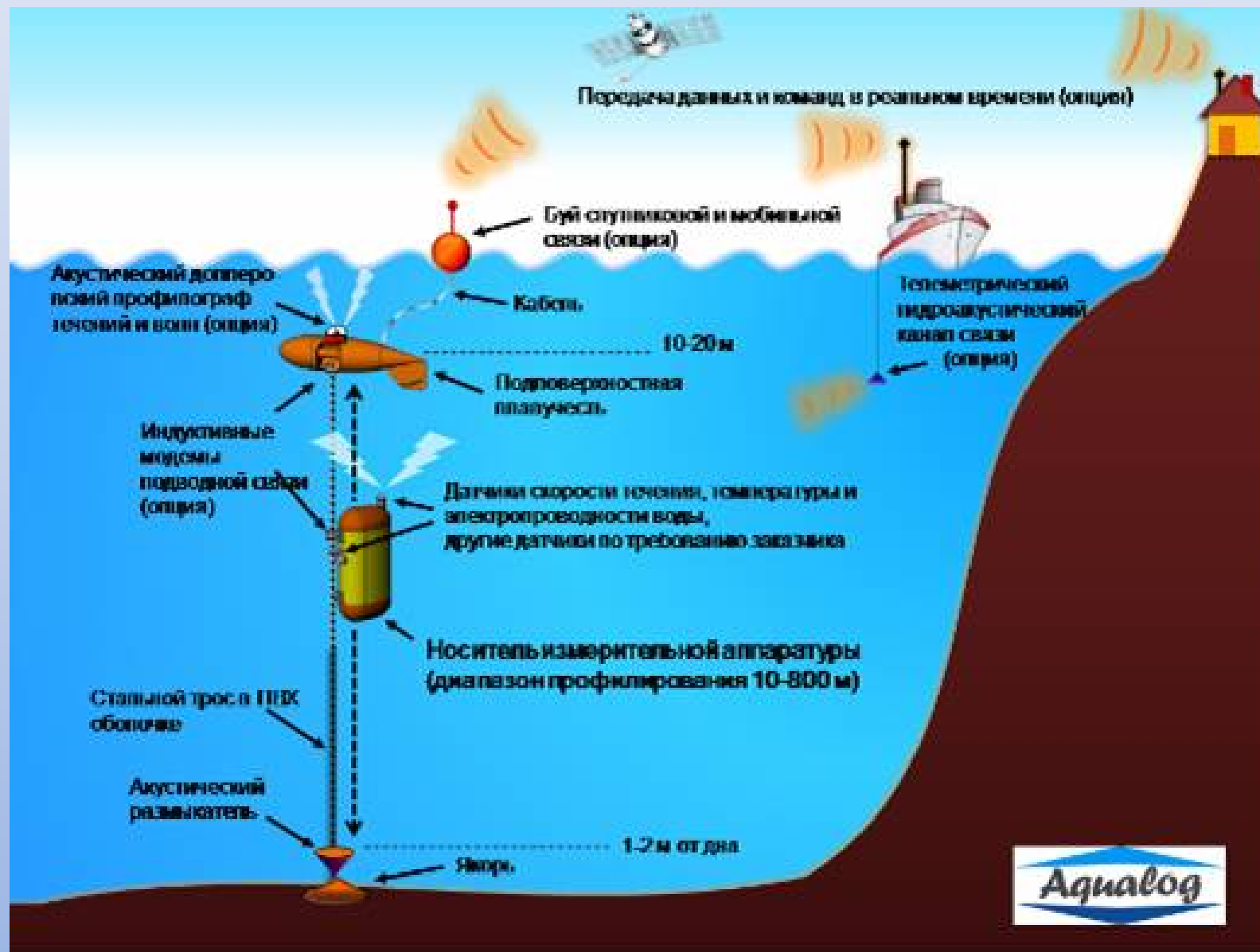


# Методы исследования

- 1) анализ текущей спутниковой информации в инфракрасном и видимом диапазонах спектра (температура и цвет морской воды, спутники серии NOAA, также MODIS-AQUA и MODIS-TERRA);
- 2) квази-мгновенные пространственные съемки поля течений с помощью буксируемого за судном акустического доплеровского профилографа RDI «WorkHorse Mariner ADCP» (300 кГц);
- 3) судовые разрезы в области шельфа - континентального склона с регулярным выполнением СТД - станций зондирования (зонд SBE-19Plus фирмы “Sea Bird Electronics”);
- 4) долговременные измерения профиля течений в точке с помощью донного ADCP и заякоренного профилографа Аквалог.

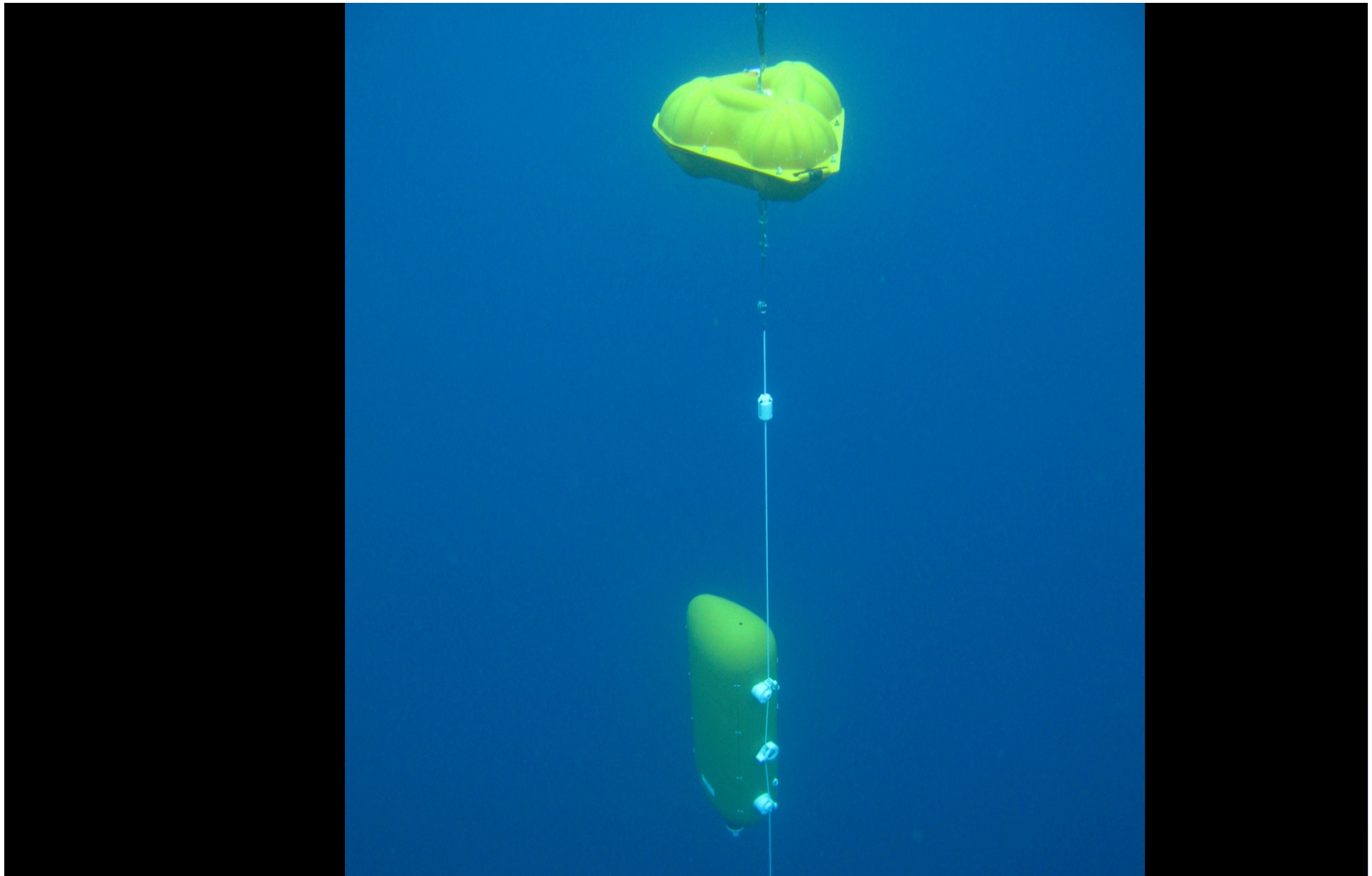
Полученные в 2007-2013 данные использованы для выявления субмезомасштабных вихрей и изучения механизма их генерации.

# Новый автономный зонд-профилограф «Аквалог» на заякоренной буйковой станции



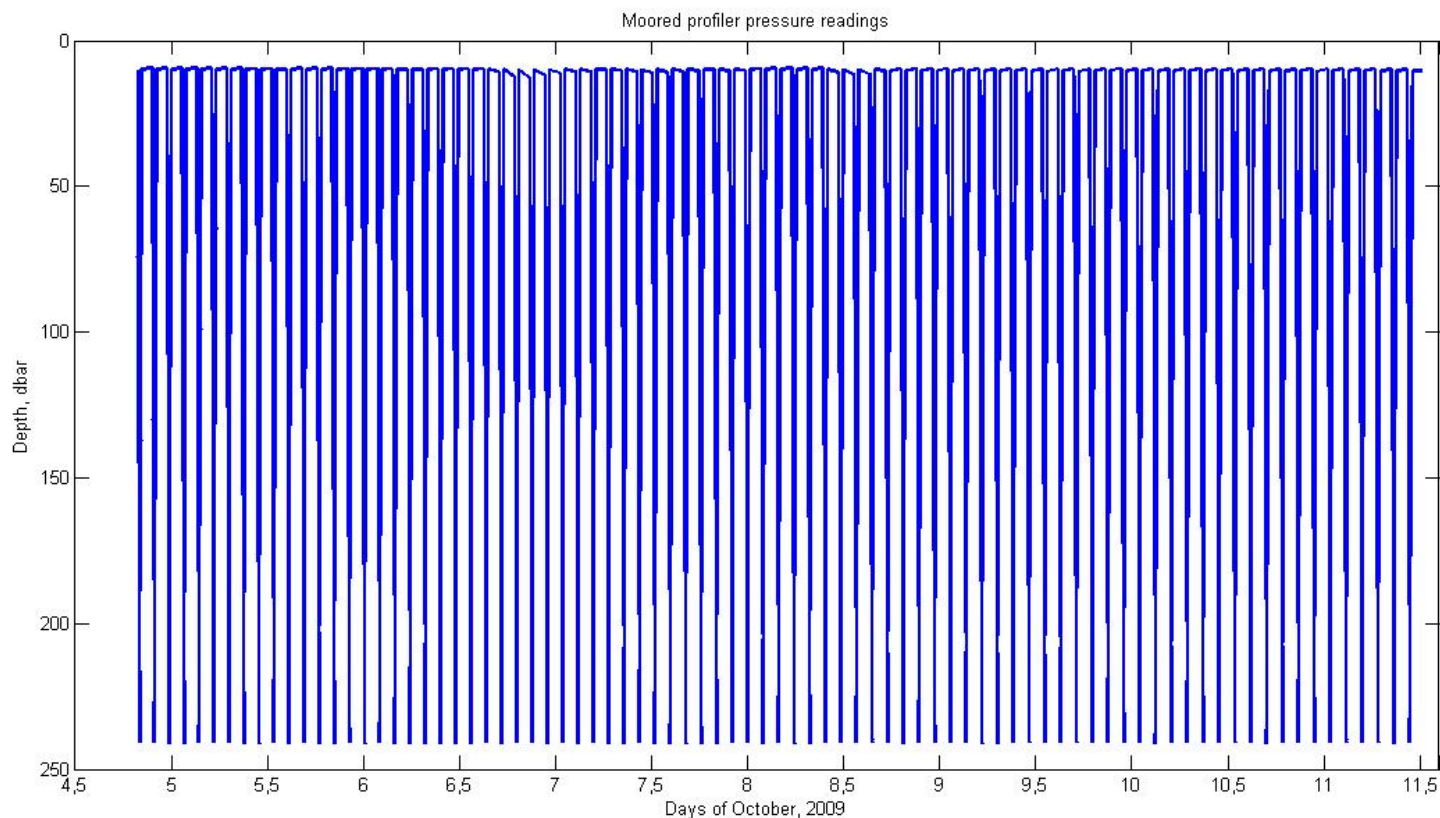
# Профилограф «Аквалог – 4» (2009 г.)



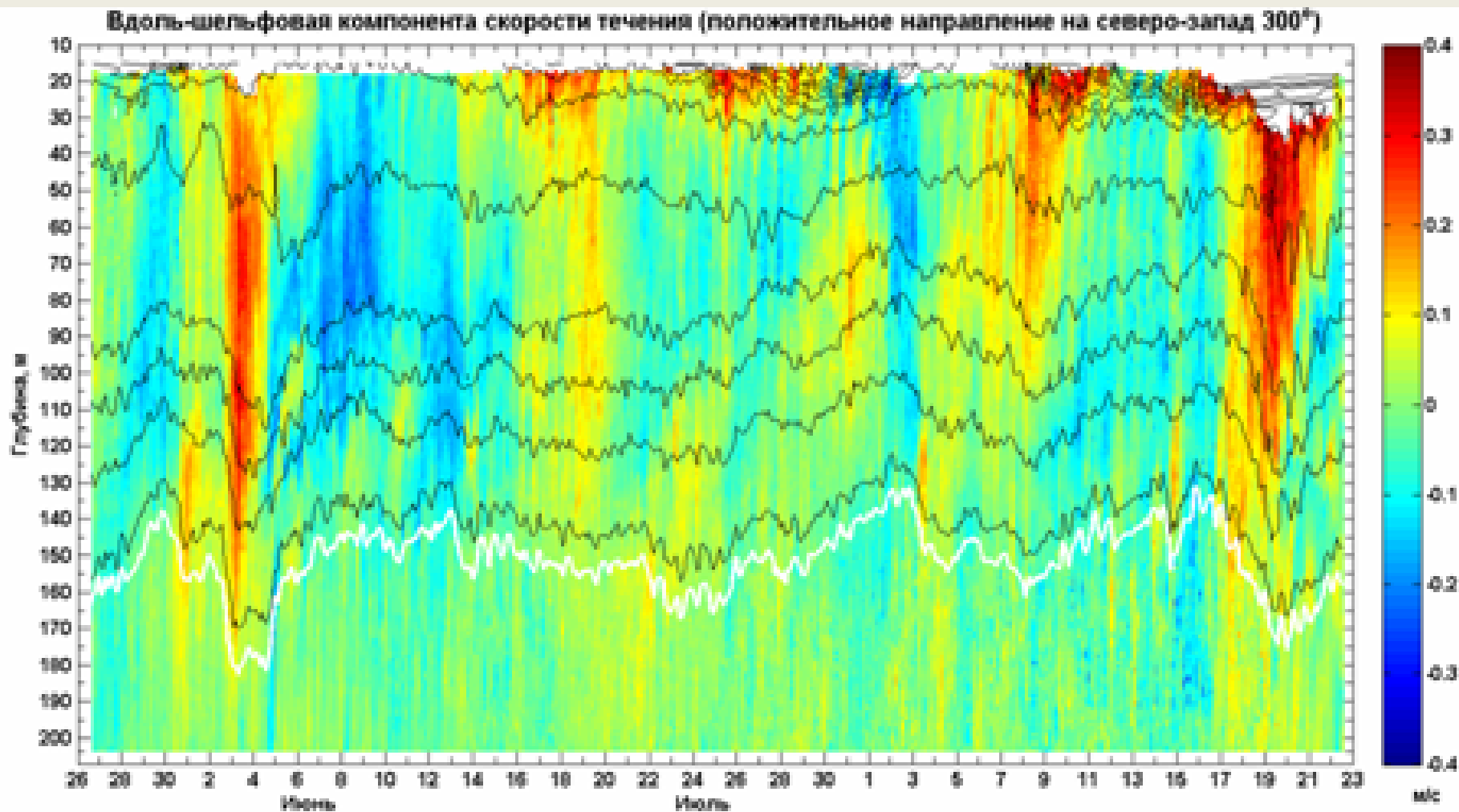


Аквалог в рабочем положении на тросовой линии вблизи подповерхностной плавучести

Показания датчика давления профилографа «Аквалог»  
(Черное море, октябрь 2009). Диапазон глубин 10-240 м,  
частота зондирований – 12 раз в сутки.

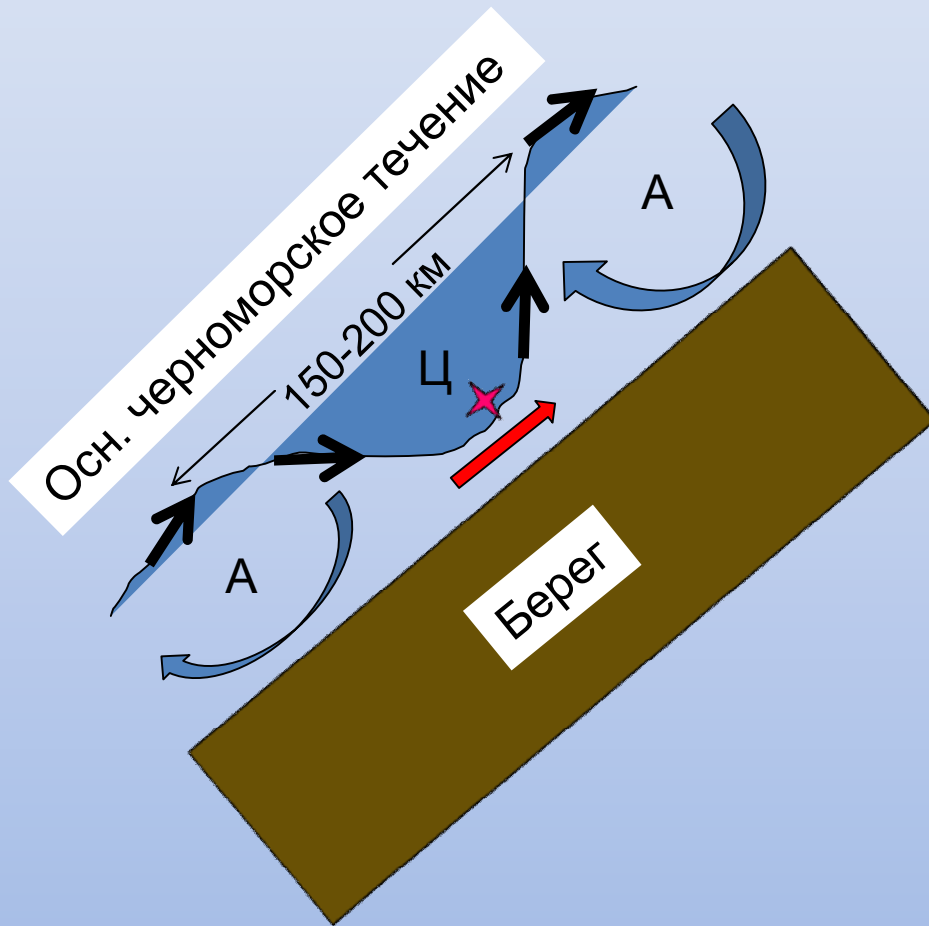


Вдольбереговая скорость течения, данные профилографа «Аквалог» в Черном море 26 июня – 22 августа 2011 г., глубина места – 250 м, частота зондирования – 8 раз в сутки. Черные кривые – изолинии условной плотности. Белая кривая – верхняя граница  $H_2S$  зоны - условная плотность 16.2 единицы



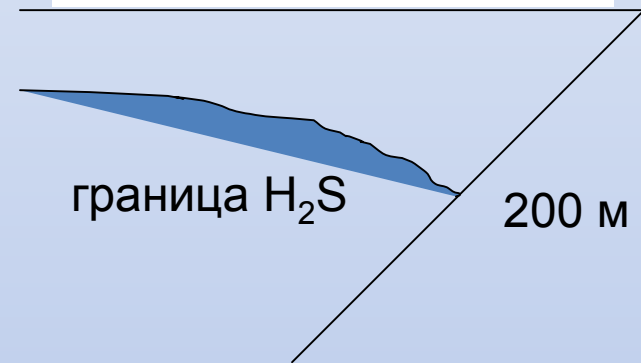


# Схема формирования 5-10 суточных колебаний

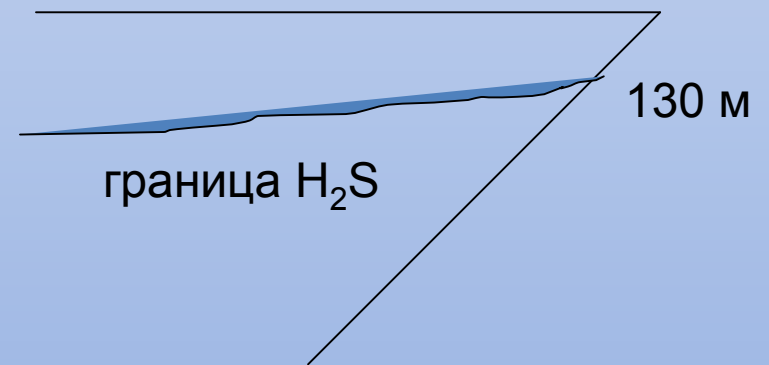


✖ - заякоренная станция «Аквалог»

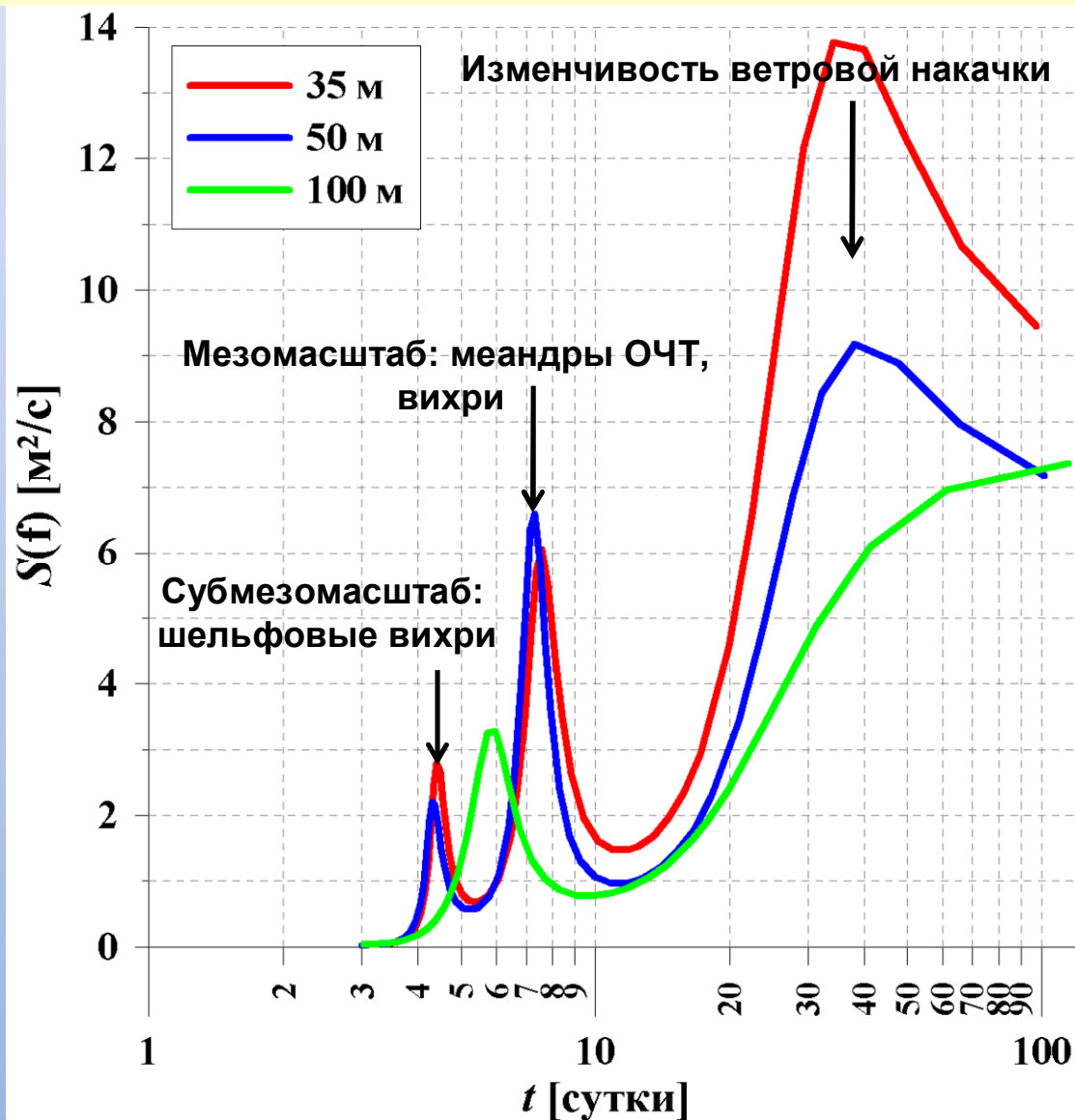
Циклонический меандр



Антициклонический меандр



# Спектры колебаний энергии течений в верхней части континентального склона (250 м) по данным зонда-профилографа «Аквалог» (годовой ряд)

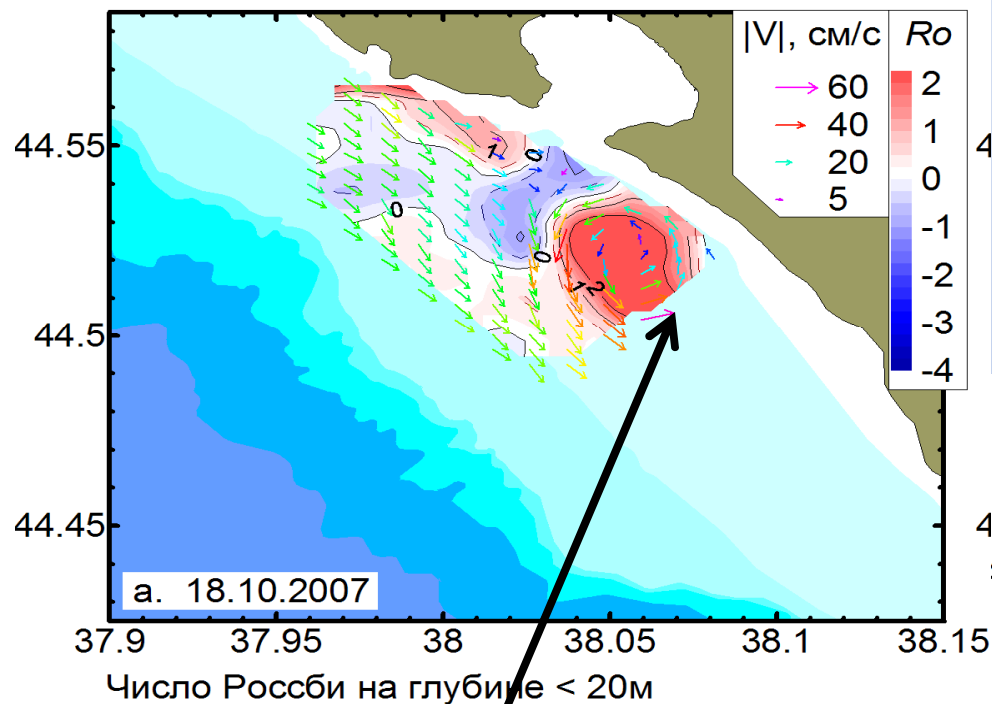


# Пространственная съемка поля скорости течения буксируемым за судном ADCP



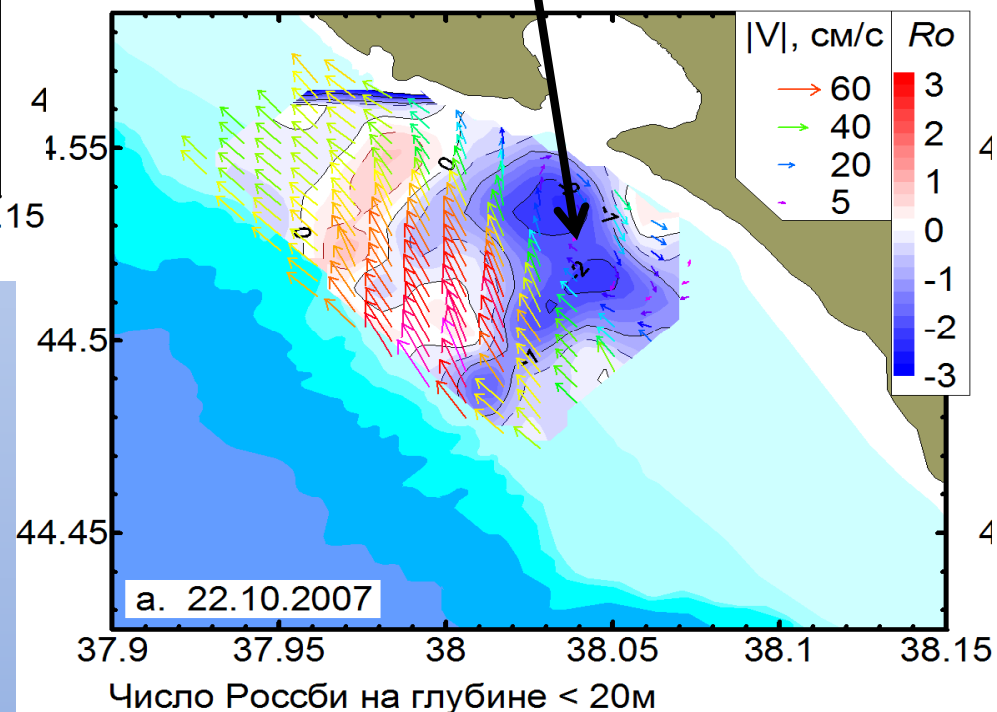
Акустический доплеровский профилограф в гондоле перед началом буксировки на корме «Ашамбы» (слева) и в момент буксировки (справа).

# Квази-мгновенные распределения числа Россби $Ro = \omega/f$ в верхнем перемешанном слое $H = 20$ м по данным буксировок ADCP в октябре 2007 г.



18 октября 2007 г.  
 Юго-восточное течение за бровкой шельфа, циклонический сдвиг скорости, **циклонический шельфовый вихрь с  $Ro > 3$**

22 октября 2007 г.  
 Северо-западное течение за бровкой шельфа, антициклонический сдвиг скорости, **антициклонический шельфовый вихрь с  $Ro \approx 2$**



# Статистика

В период 2007-2013 гг. в летне-осенний сезон была сделана 21 съемка поля скорости на акватории полигона с помощью буксируемого за судном ADCP в обтекаемой гондоле. В 16 съемках были обнаружены субмезомасштабные вихри (15 циклонов и 16 антициклонов) в 5 съемках – нет. Вихри, как правило, наблюдались только в верхнем квазиоднородном слое (ВКС), а в термоклине затухали.

Характерный диаметр вихря, эксцентриситет и число Россби:

циклоны –  $D = 2-4$  км;  $\varepsilon = 0.75$ ;  $Ro = 1.4$

антициклоны –  $D = 3-6$  км;  $\varepsilon = 0.80$ ;  $Ro = 0.8$

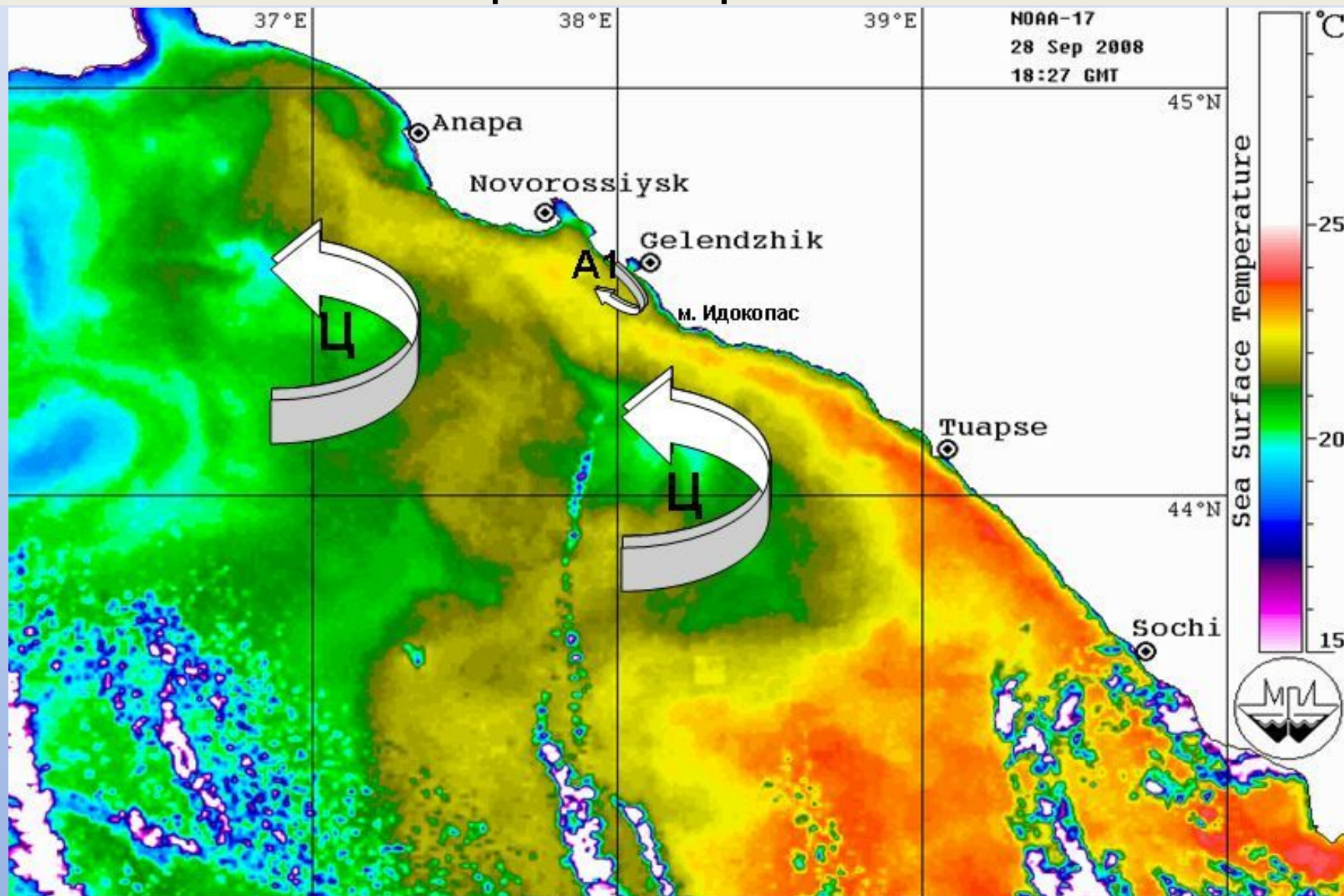
Характерная орбитальная скорость – 20-50 см/с

Максимальная зарегистрированная продолжительность существования вихря – 4 суток (антициклон)

**МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ  
ШЕЛЬФОВЫХ ВИХРЕЙ ПО ДАННЫМ  
НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ЛАБОРАТОРНОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

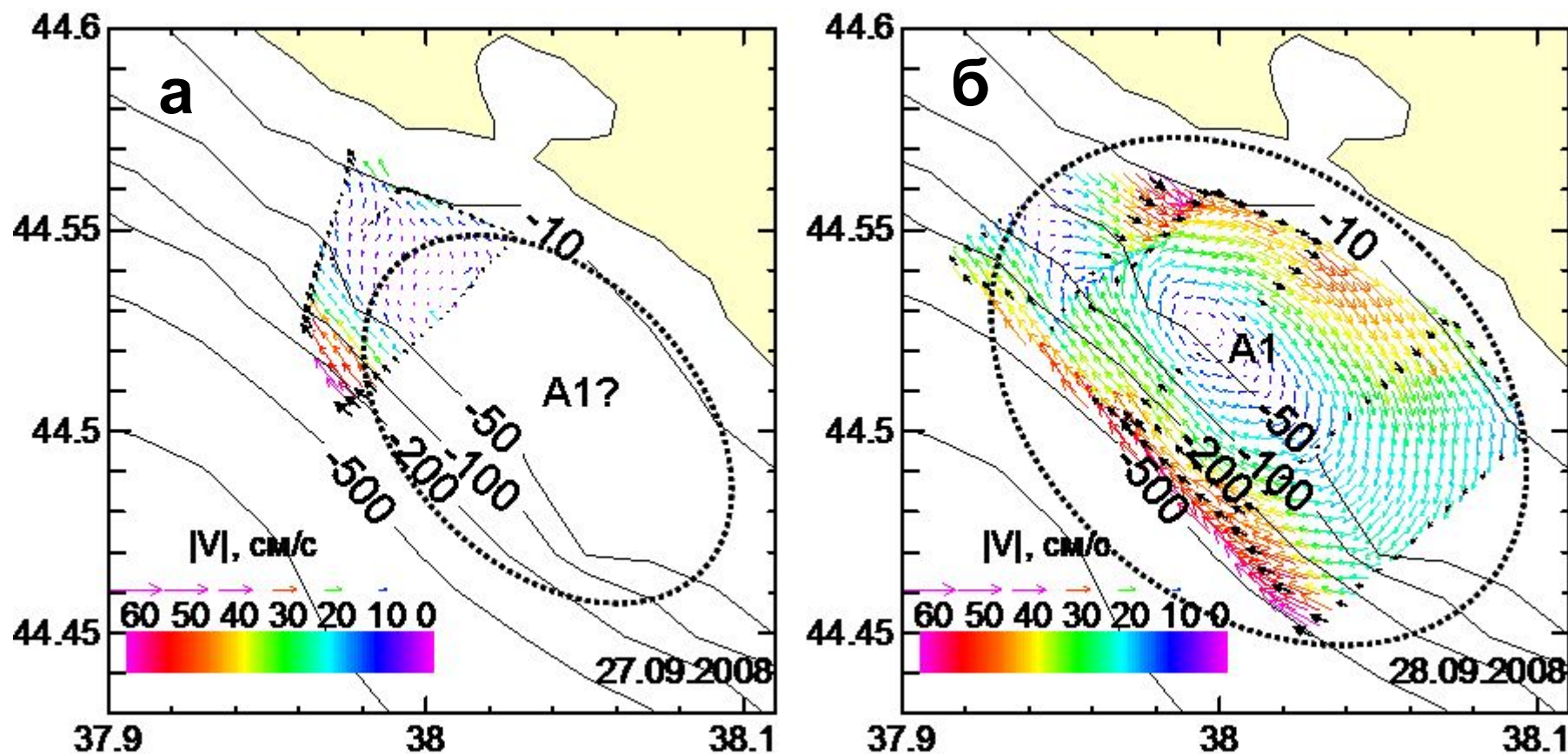
**1. ВИХРИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ**

# Усиление ОЧТ и его поджатие к берегу крупными циклоническими вихрями в открытой части моря в сентябре-октябре 2008 г.



Поле скорости в прибрежно-шельфовой зоне Геленджика  
по данным ADCP-съемок от 27.09 (а) и 28.09 (б).

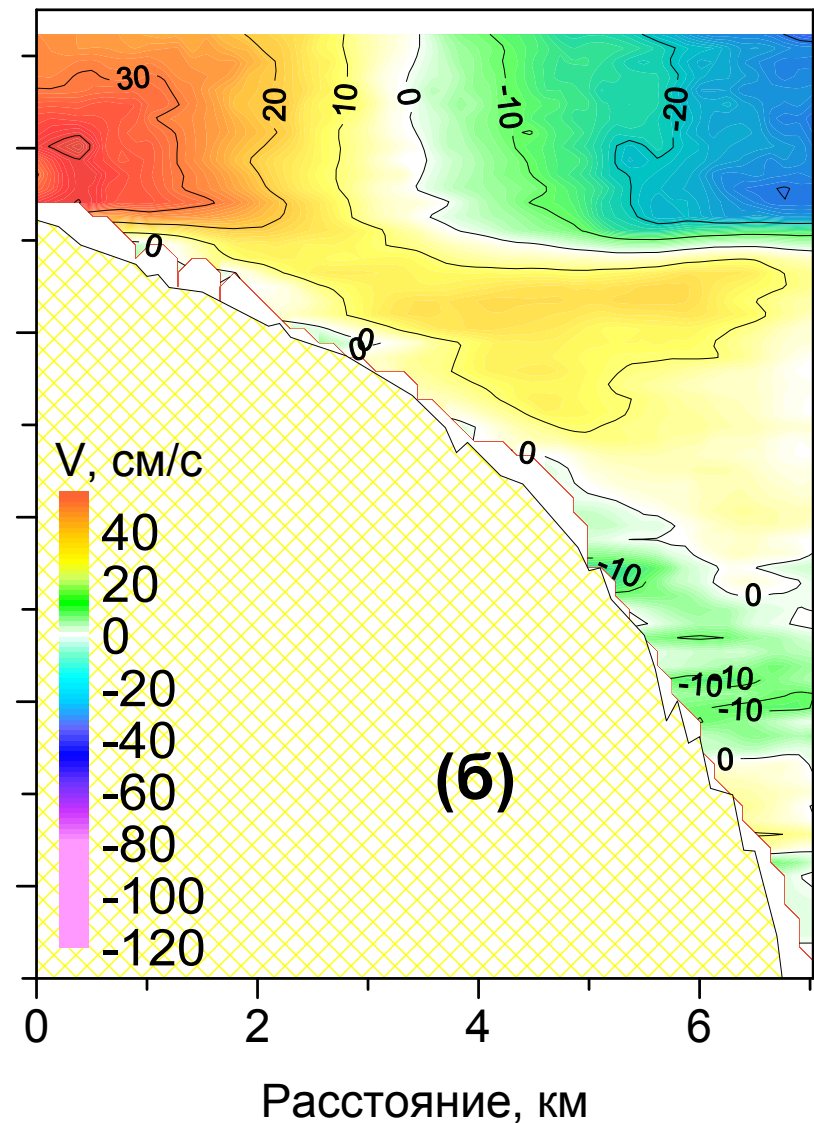
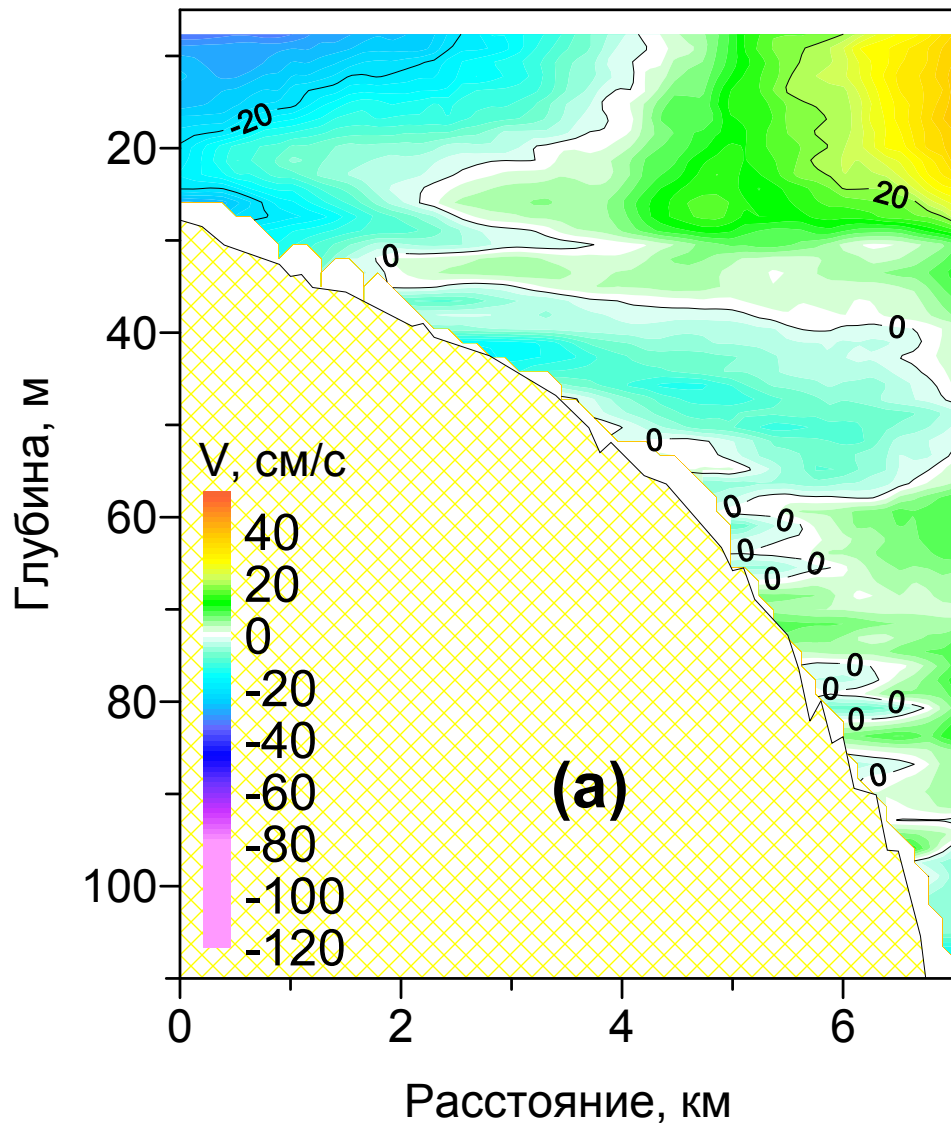
Верхний слой,  $H=30$  м



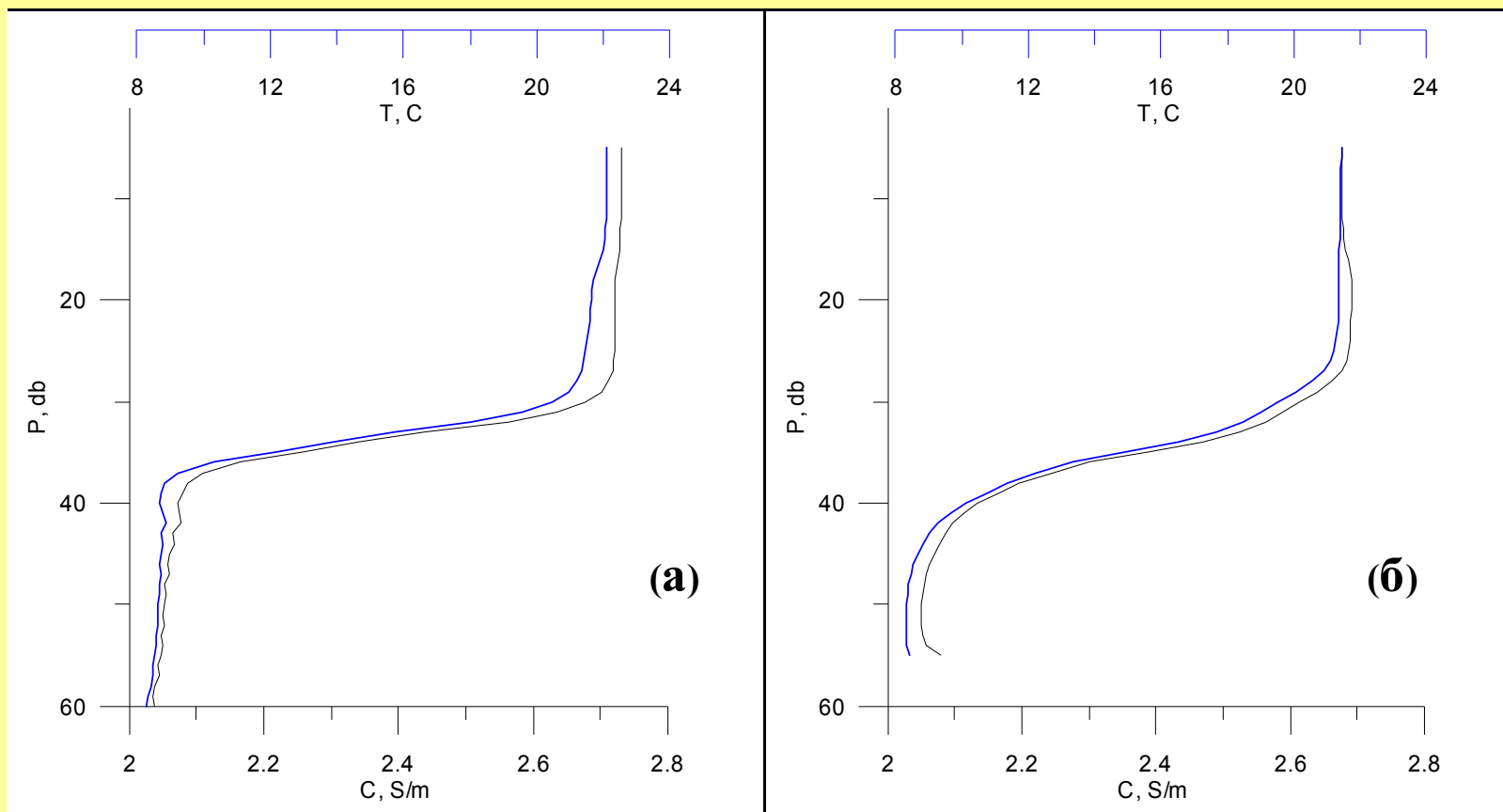
Пунктиром обозначено приблизительное положение  
субмезомасштабного антициклонического вихря A1



Северная (а) и восточная (б) составляющие скорости течения на разрезе от 28.09.2008 г. через центр субмезомасштабного антициклонического вихря «А1»



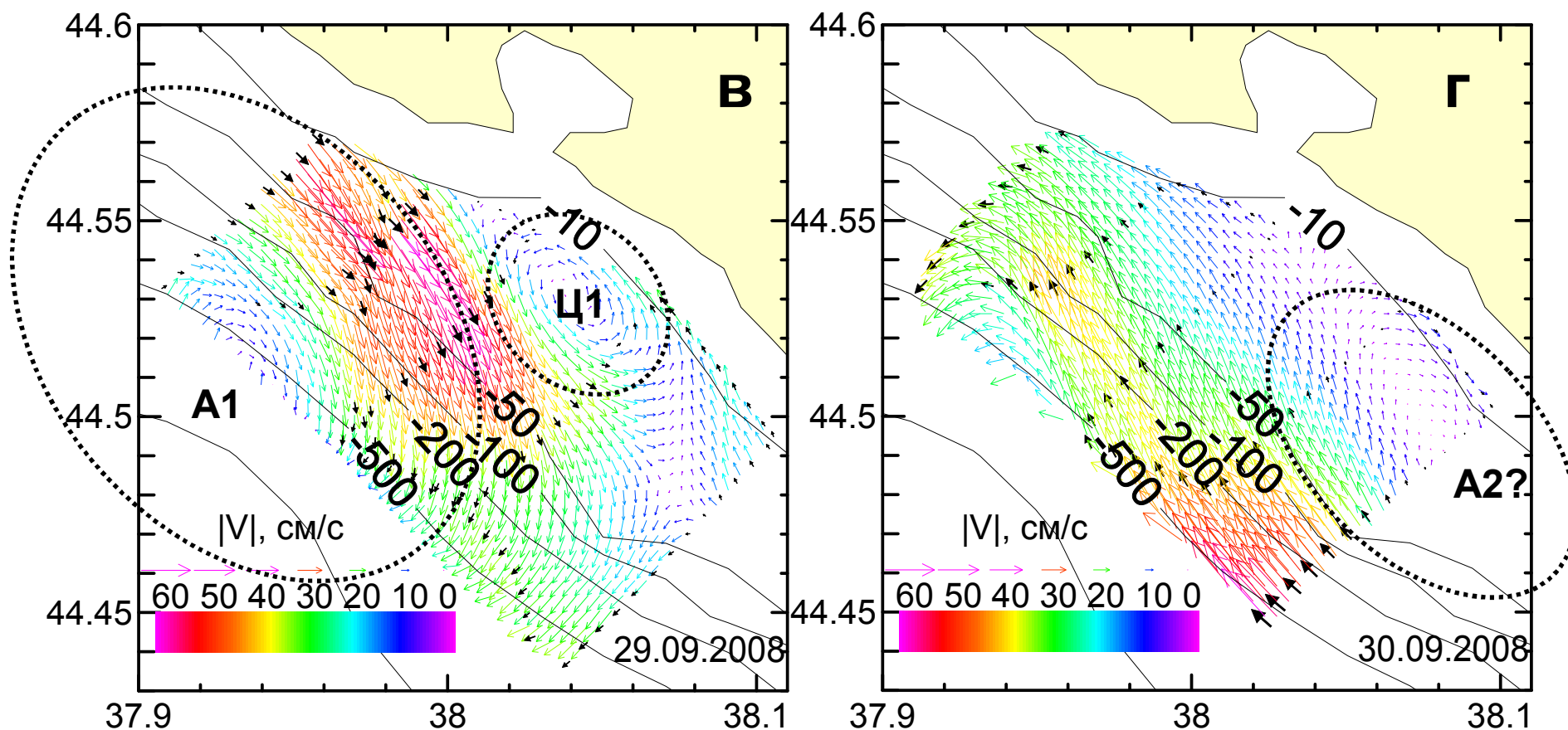
# Квазидвуслойная стратификация вод на шельфе



Профили температуры (синим) и электропроводности (черным), измеренные 27.09.08 (а) и 30.09.08 (б) на внешнем шельфе в районе г. Геленджика.

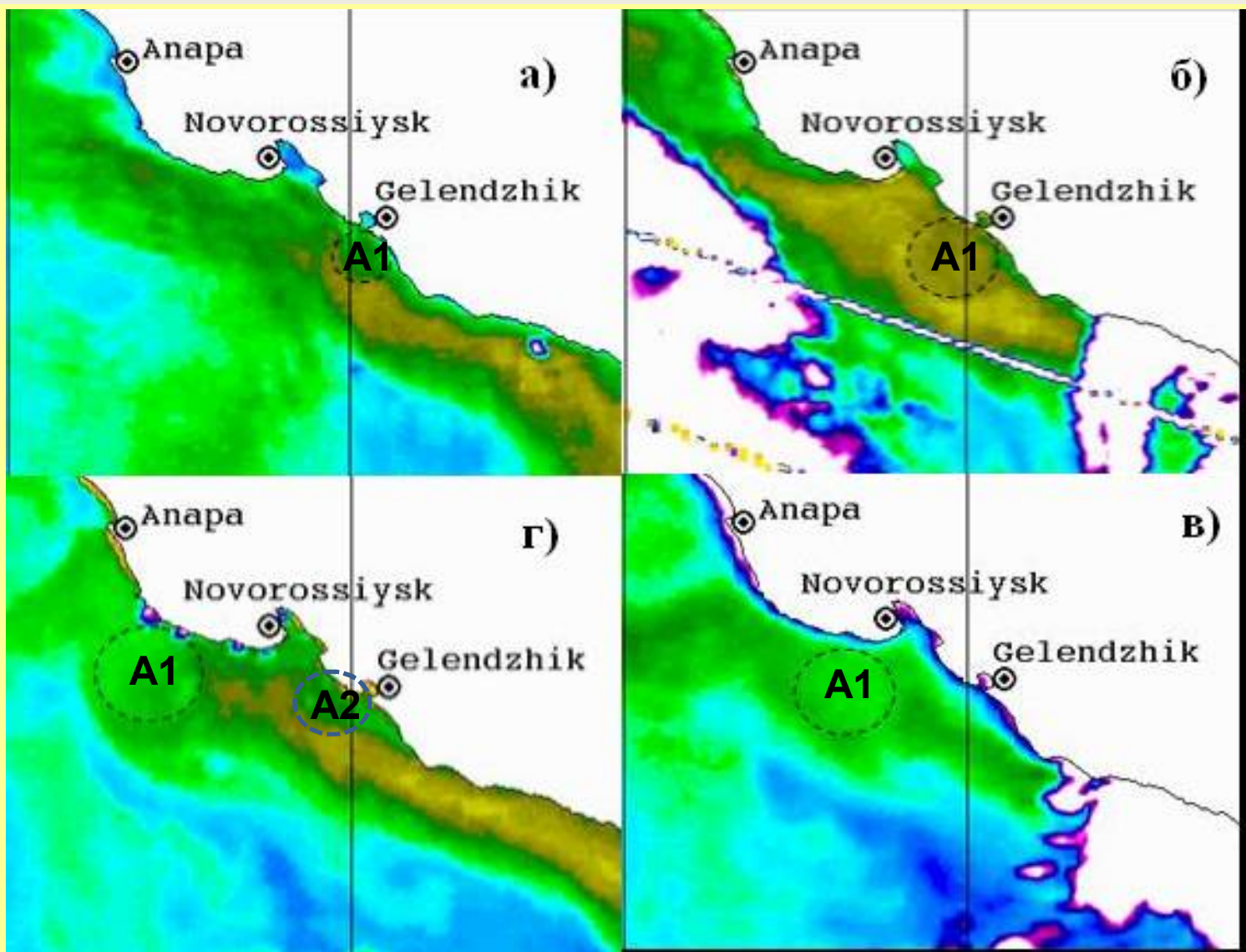
Радиус деформации Россби:  $R_d = [g(\Delta\rho/\rho)H]^{0.5}f^{-1} = 8$  км, где  $\Delta\rho = 2 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup> - перепад плотности между слоями,  $\rho = 1.0$  г/см<sup>3</sup> - плотность воды,  $g = 10^3$  см/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения,  $H = 30$  м - толщина верхнего слоя,  $f = 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> - параметр Кориолиса.

ПОЛЕ СКОРОСТИ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ В РАЙОНЕ  
ГЕЛЕНДЖИКА ПО ДАННЫМ ADCP-СЪЕМОК ОТ 29.09 (в) И  
30.09 (г). ВЕРХНИЙ СЛОЙ, H=30 М



Пунктиром обозначено приблизительное положение субмезомасштабных антициклонических вихрей A1 и A2, а также циклонического вихря Ц1.

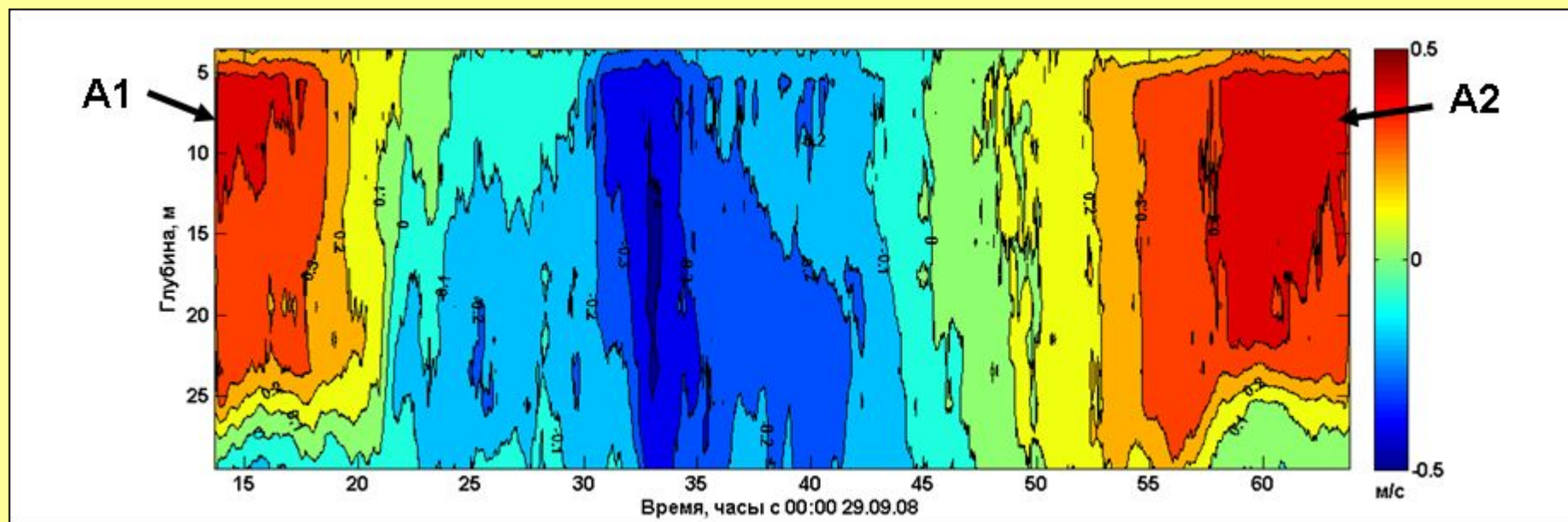
Развитие и перемещение прибрежного антициклона «А1»:  
28.09.08, 06:59 GMT (а), 29.09.08, 08:25 GMT (б), 30.09.08, 19.22 GMT (в) и 01.10.08,  
09:53 GMT (г). Пунктир – положение и размер вихря.



# Донная станции с ADCP в немагнитной пирамиде и ее расположение на карте геленджикского района Черного моря



# Квазипериодическое образование субмезомасштабных антициклонических вихрей за м. Идокопас на геленджикском шельфе при прижатом к континентальному склону ОЧТ

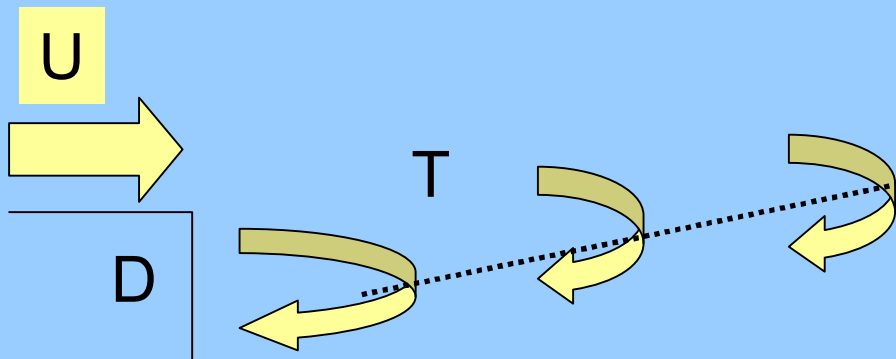


Восточная составляющая скорости течения измеренная донным ADP на шельфе, на глубине 32 м в районе Голубой бухты с 14 час. 29 сент. до 16 час. 01 окт.

# Периодическое образование субмезомасштабных вихрей на шельфе в области отрыва течения и срыв вихрей набегающим потоком

Условия квазипериодического образования вихрей за препятствием и их срыва:

- 1) Плохо обтекаемое тело ( $L/D < 2$ , где  $L$  – длина, а  $D$  - поперечный размер препятствия);
- 2)  $Re = UD/\nu \geq 10^2$  где  $U$  – скорость в ядре набегающего потока,  $\nu$  - кинематическая (эффективная) вязкость;
- 3)  $St = D/UT \approx 0.1 - 0.3$  - число Струхала (безразмерная частота срыва,  $T$  – период срыва) для  $Re = 200-200000$ .

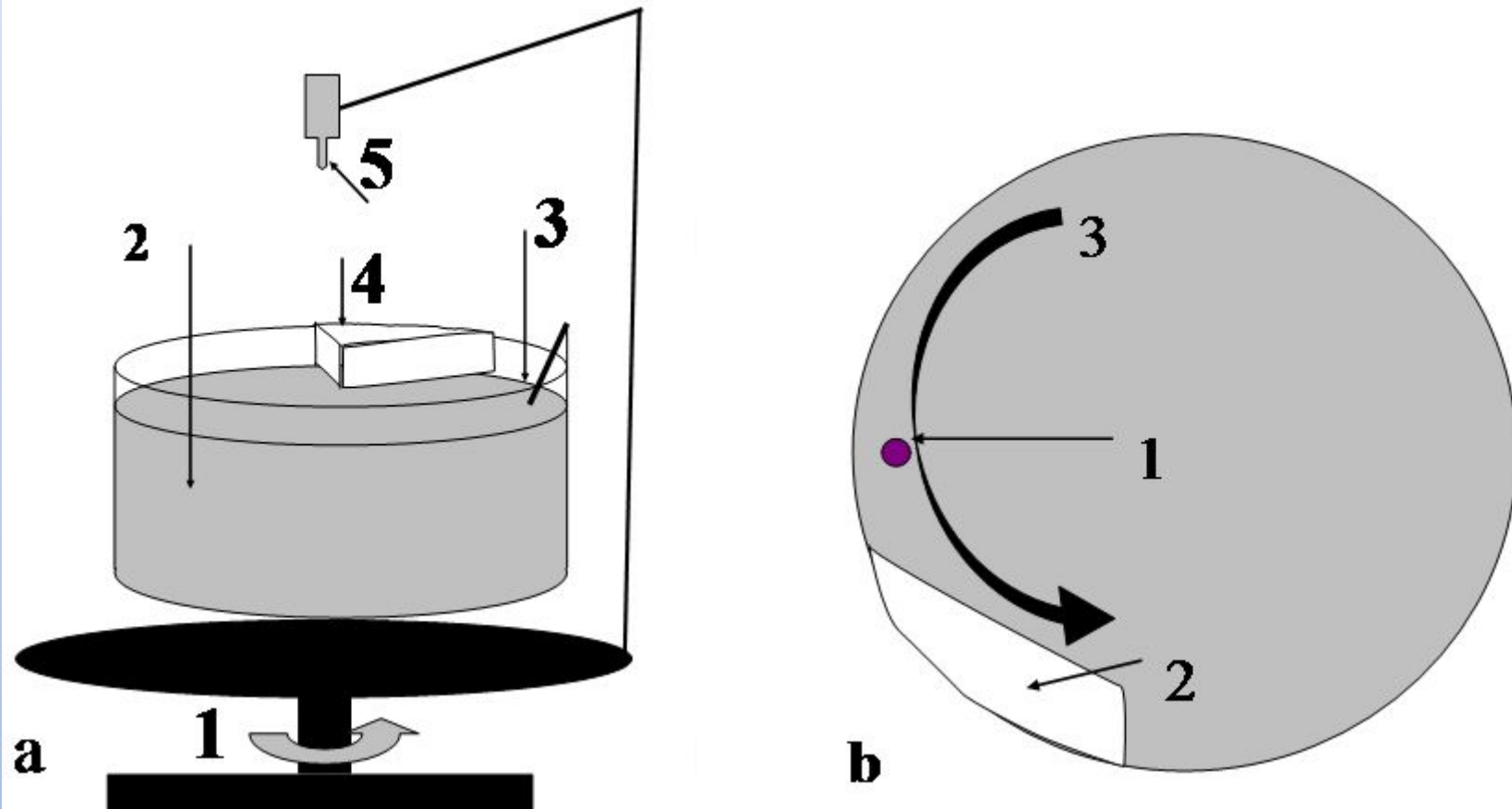


Для природного процесса:

$$U \approx 40 \text{ см/с}; D \approx 8 \text{ км}; T \approx 2 \text{ сут.}$$

$$St = D/UT \approx 0.1 !$$

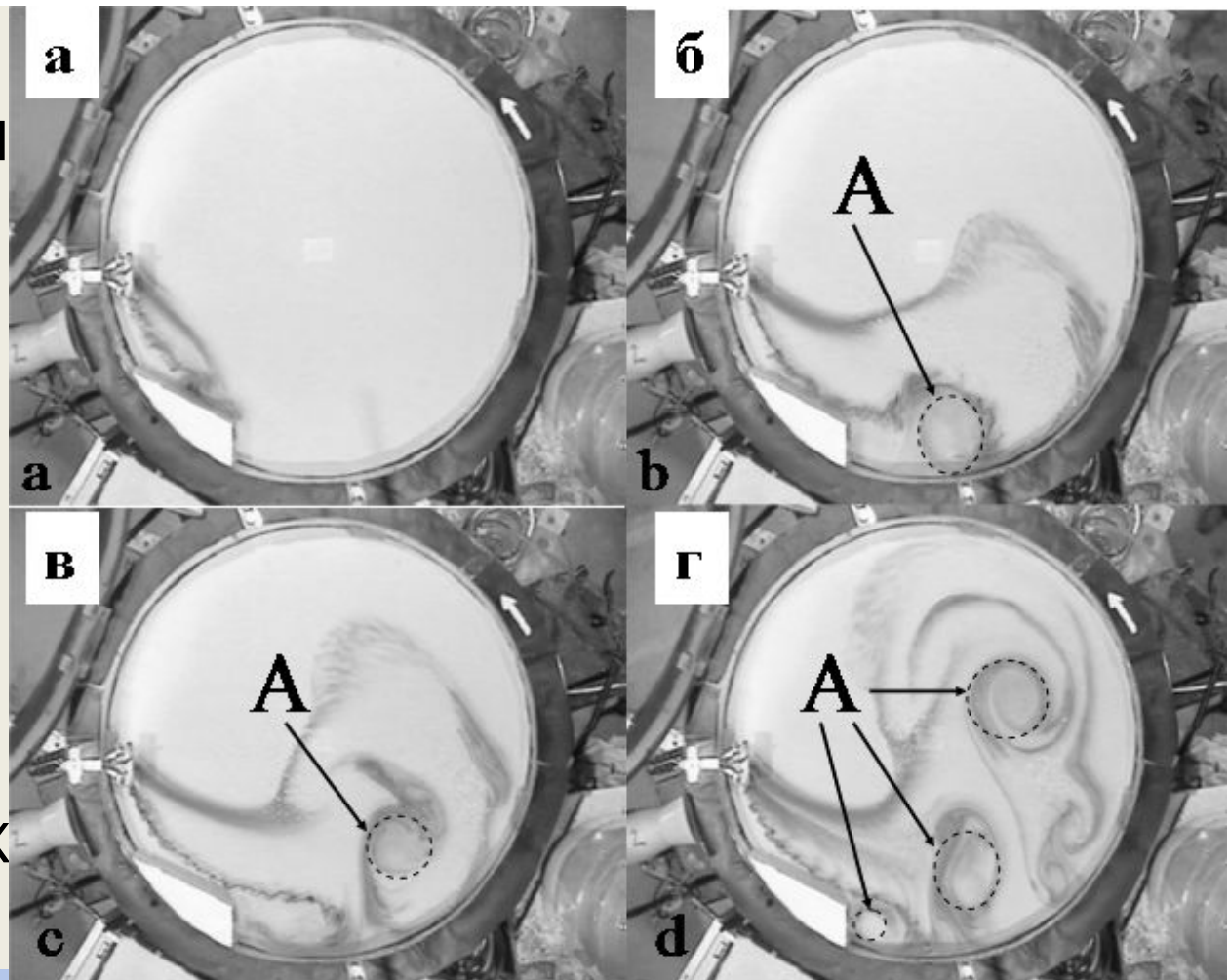
# Схема лабораторного эксперимента: создание вдольберегового течения путем резкого уменьшения (увеличения) скорости вращения платформы



Цилиндрический бассейн из оргстекла на вращающейся платформе - а) вид сбоку: 1 - вращающаяся платформа; 2 – бассейн; 3 – палочка с марганцовкой; 4 – полуостров; 5 – видеокамера; б) вид сверху: 1 - палочка с марганцовкой; 2 - полуостров; 3 – контурное циклоническое течение.



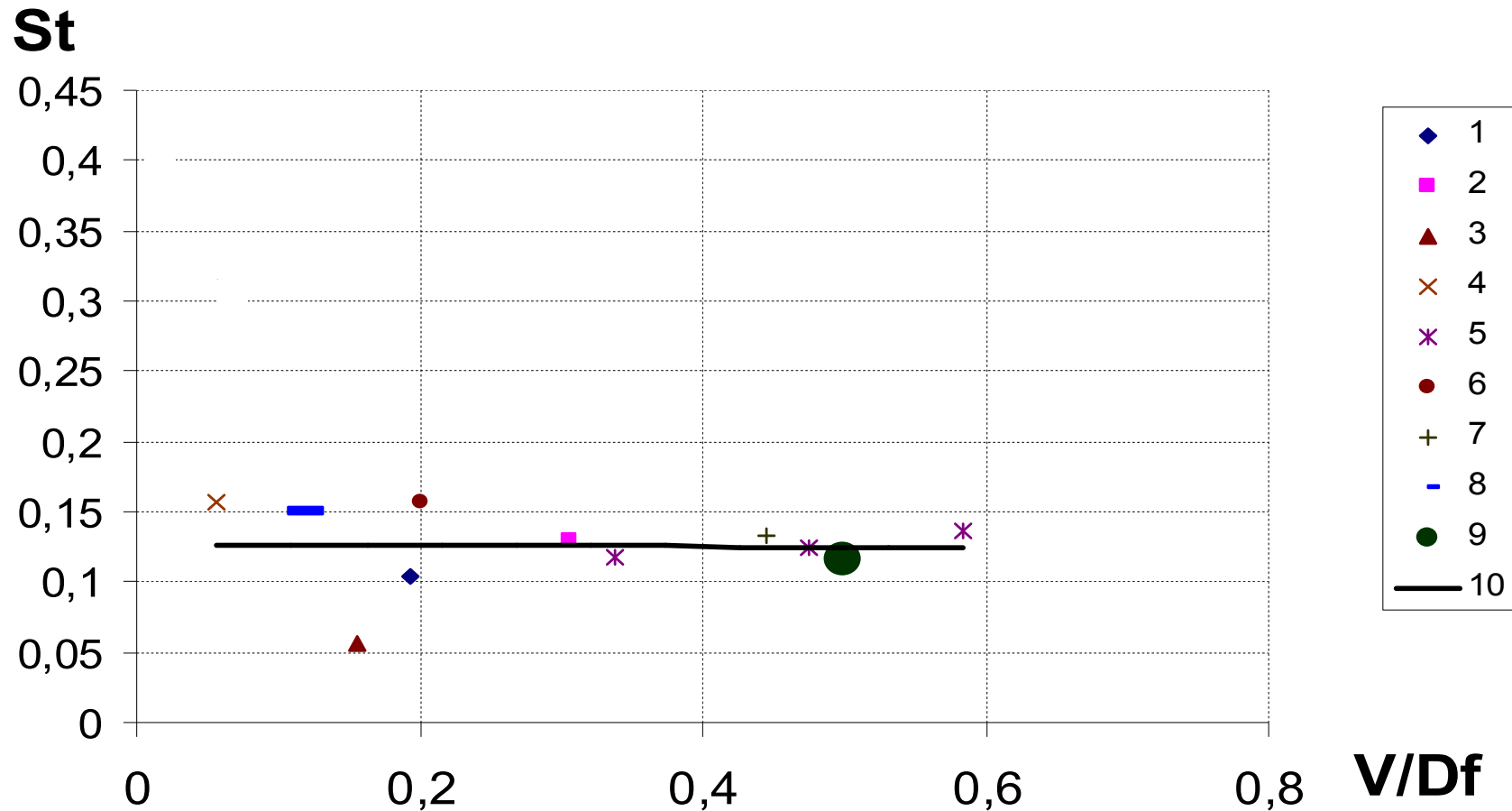
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ  
КАДРЫ ВИДЕОСЪЕМКИ  
ОПЫТА С  
ОБТЕКАНИЕМ  
ПОЛУОСТРОВА  
ЦИКЛОНИЧЕСКИМ  
ТЕЧЕНИЕМ,  
ОБРАЗОВАНИЕМ И  
ОТРЫВОМ  
ЗАПРЕПЯТСТВЕННЫХ  
АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИХ  
ВИХРЕЙ



- а)  $t/T_2 = 1$ , где  $t$  – время от момента возникновения течения (торможения платформы), а  $T_2$  – период вращения платформы после торможения;  
б)  $t/T_2 = 5$  – первый вихрь перед отрывом от полуострова;  
в)  $t/T_2 = 6$  – отрыв первого вихря и появление второго;  
г)  $t/T_2 = 9$  – отрыв второго и появление третьего вихря.  
Антициклонические вихри (А) маркированы пунктиром.

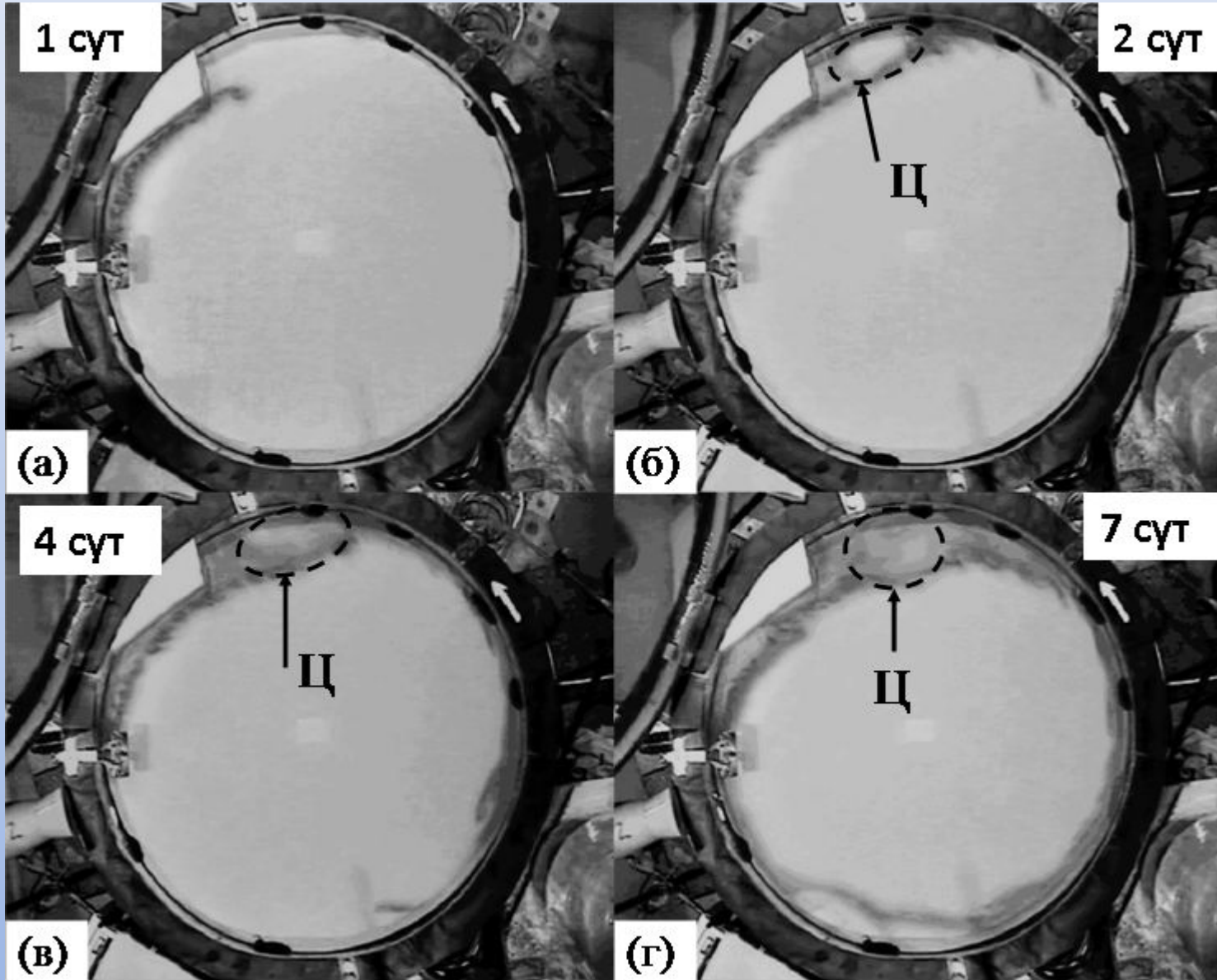
ФИЛЬМ №1

Зависимость числа Струхала (безразмерная частота вихреобразования,  $St=D/VT$ ) от числа Россби для потока, набегающего на полуостров



\* Жирная точка – черноморские данные

# ОБТЕКАНИЕ МЫСА АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИМ ТЕЧЕНИЕМ: ОТСУТСТВИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ



**ФИЛЬМ  
№2**

## Другие серии опытов

### **Создание вдольберегового течения с помощью ветровой накачки однородной по плотности жидкости**

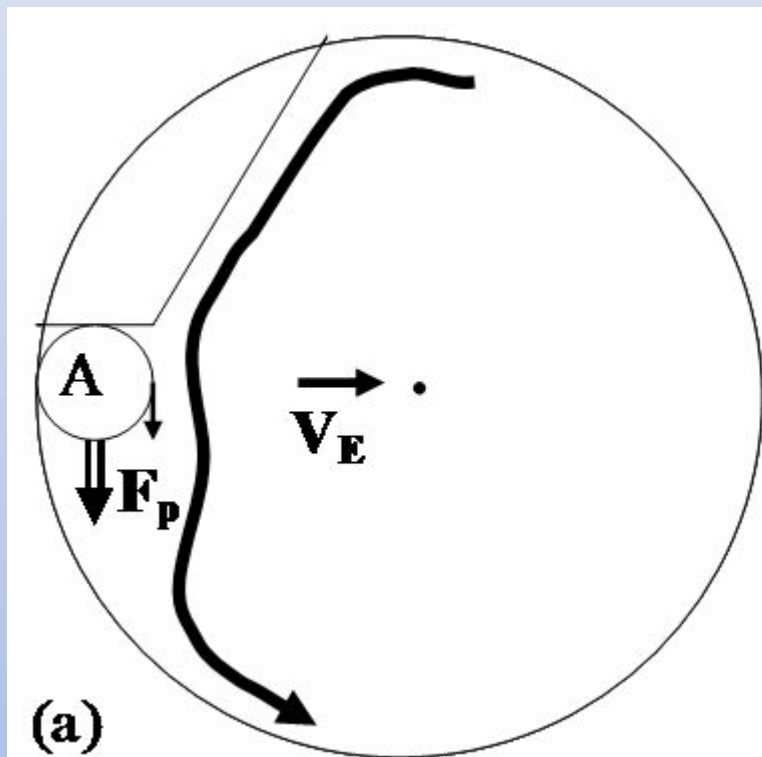
– отсутствие отрыва вихрей в период ветрового воздействия, периодическое вихреобразование за препятствием после выключения ветра в период релаксации циклонического течения и отсутствие периодического вихреобразования при антициклоническом течении.

### **Опыты с двуслойной жидкостью: генерация вдольберегового течения как изменением скорости вращения платформы, так и ветровой накачкой -**

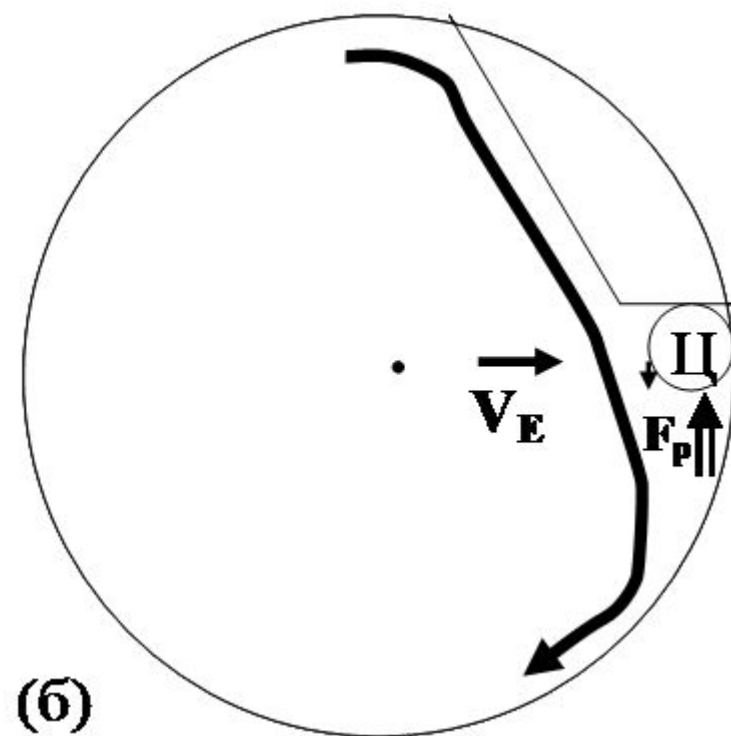
периодическое вихреобразование за препятствием только в период релаксации циклонического течения.

**Опыты в невращающейся жидкости** – нет отрыва вихря от препятствия (периодического вихреобразования).

# Роль экмановского придонного трения в отрыве запрпятственного вихря



Тормозящееся  
циклоническое течение



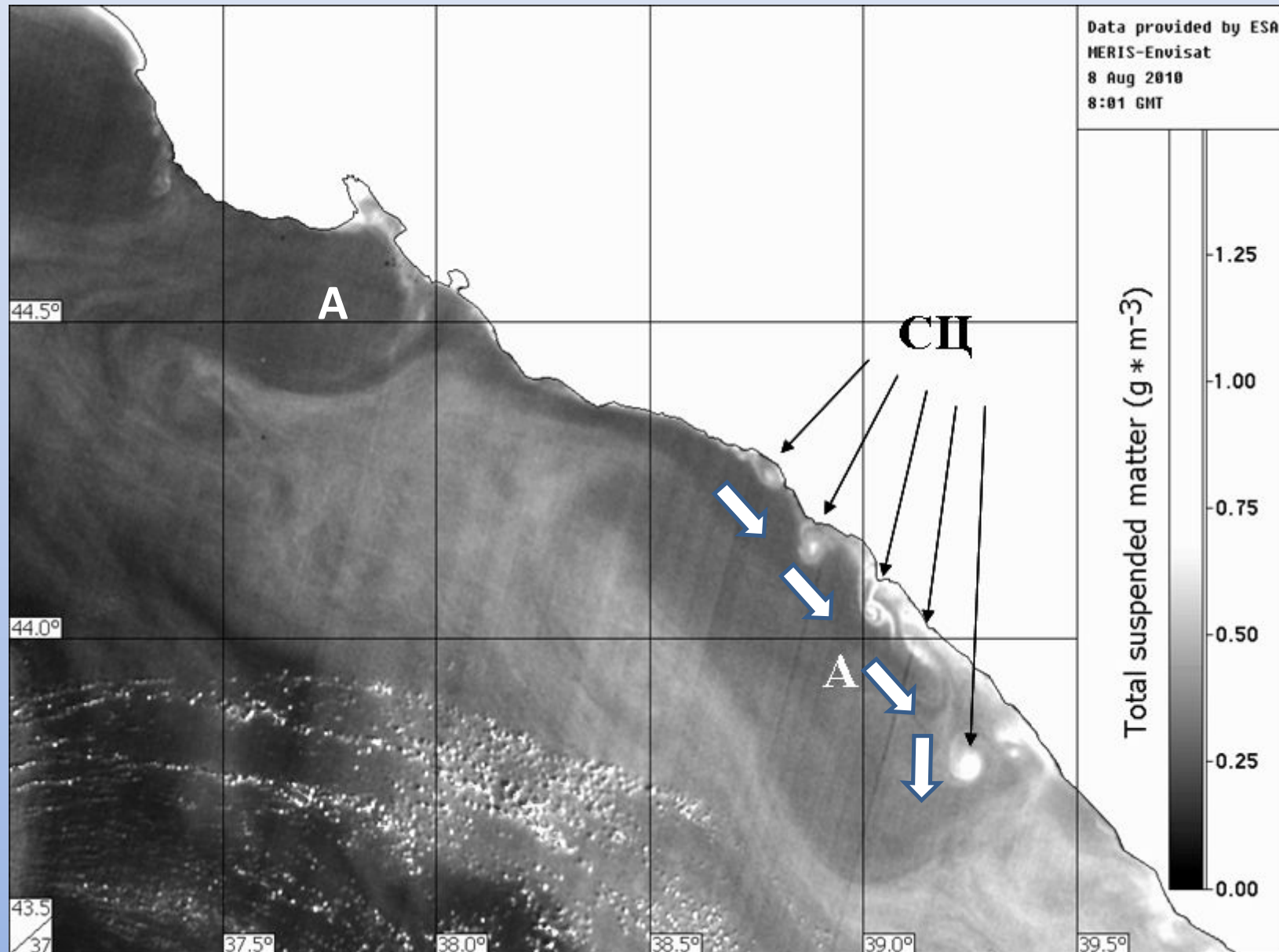
Тормозящееся  
антициклоническое  
течение

# Промежуточные выводы

Явление периодического вихреобразования за мысами и полуостровами наблюдается лишь во вращающейся жидкости в случае затухающей струи циклонического вдольберегового течения, обтекающего препятствие.

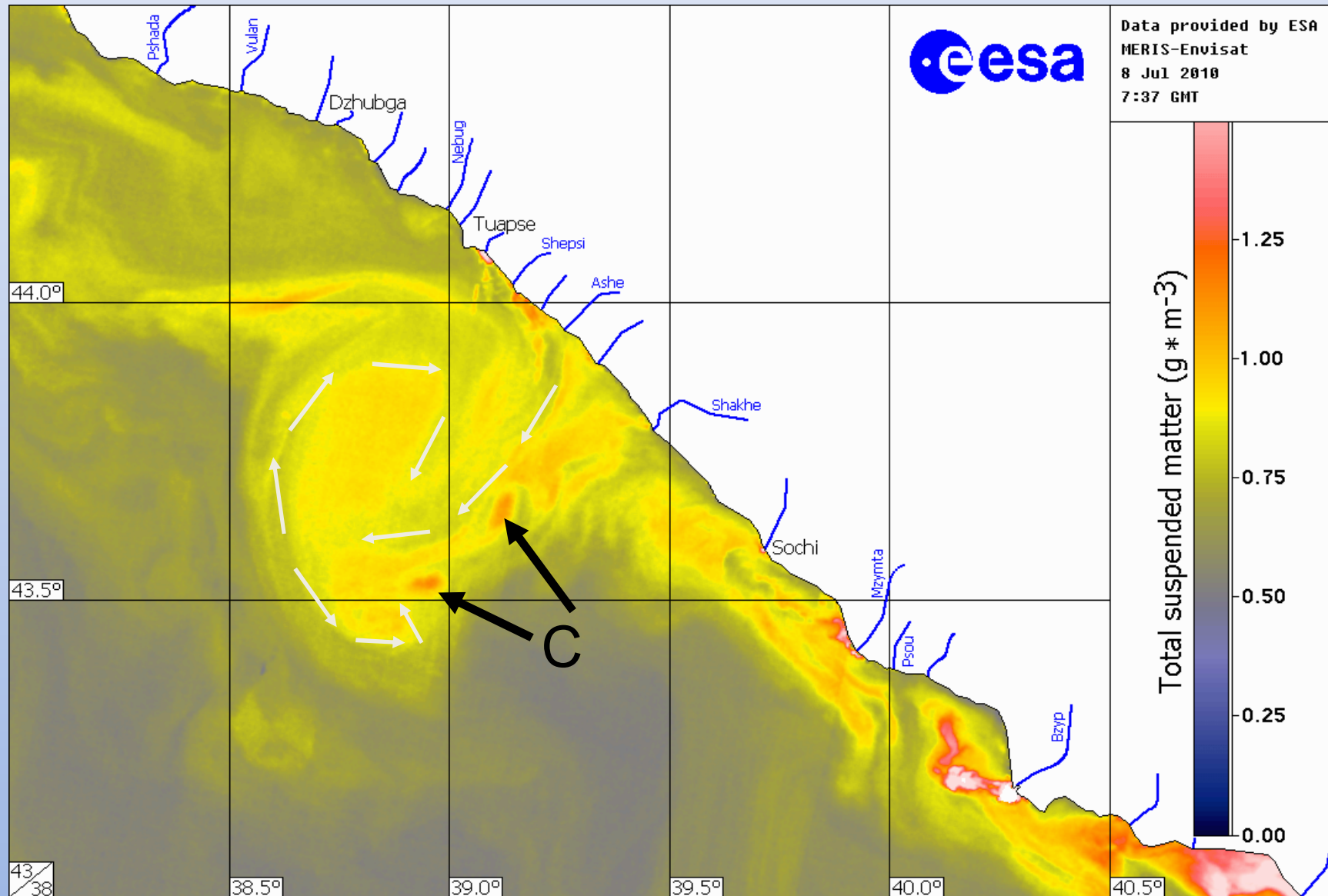
## 2. Формирование цепочек вихрей в сдвиговом течении

# Субмезомасштабные циклоны (СЦ) на периферии мезомасштабного антициклона (А) 08.08.2010

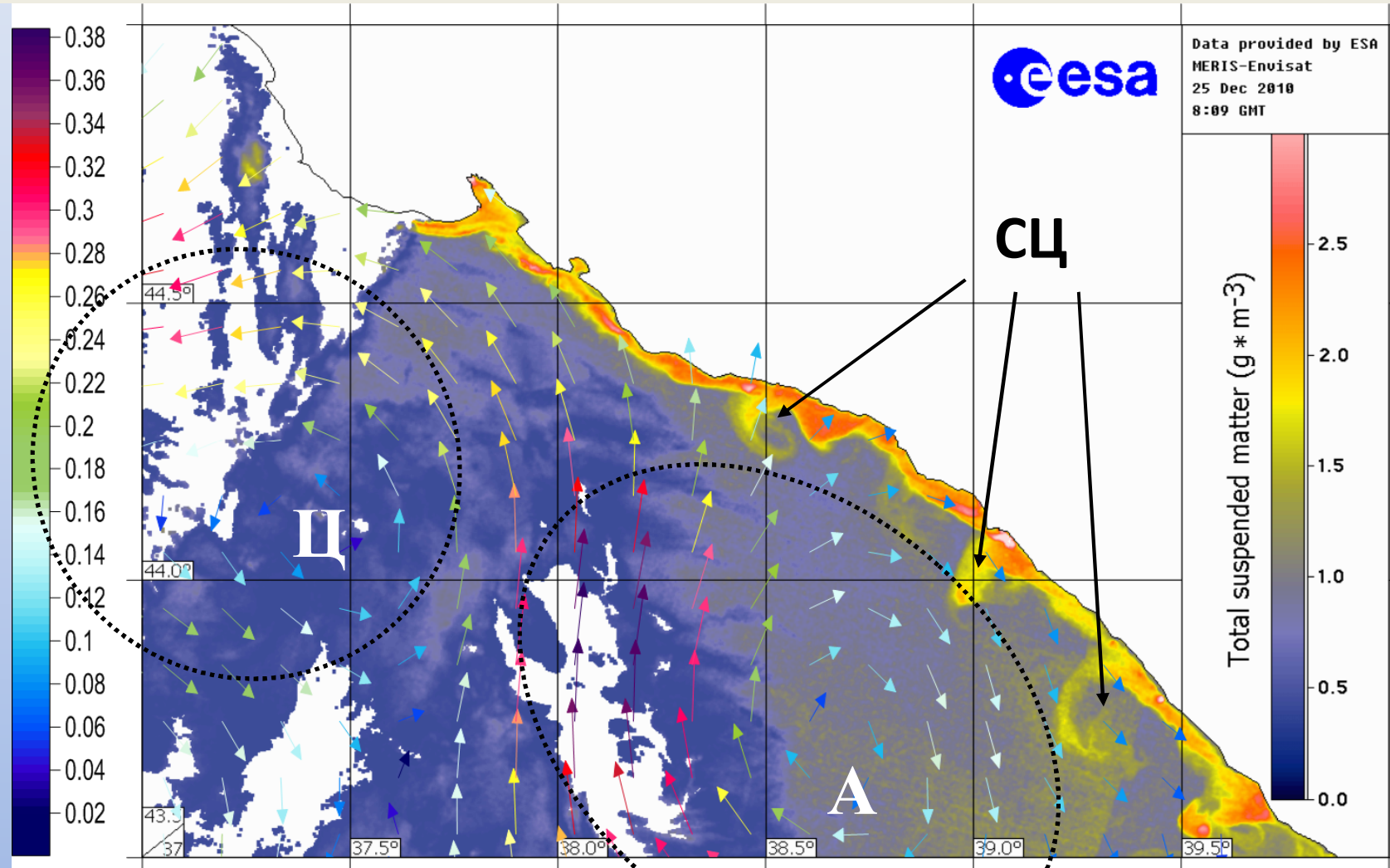




# Субмезомасштабные циклонические вихри на спутниковом изображении (08.07.10)



# Субмезомасштабные циклоны на периферии мезомасштабного антициклона «А» 25.12.2010.



Вектора скорости поверхностного гестрофического течения (рассчитанные по данным спутниковой альтиметрии) наложенные на спутниковое изображение поверхности С-В части Черного моря в поле концентрации взвешенного вещества

# Лаб. эксперимент по исследованию сдвиговой неустойчивости во вращающейся жидкости

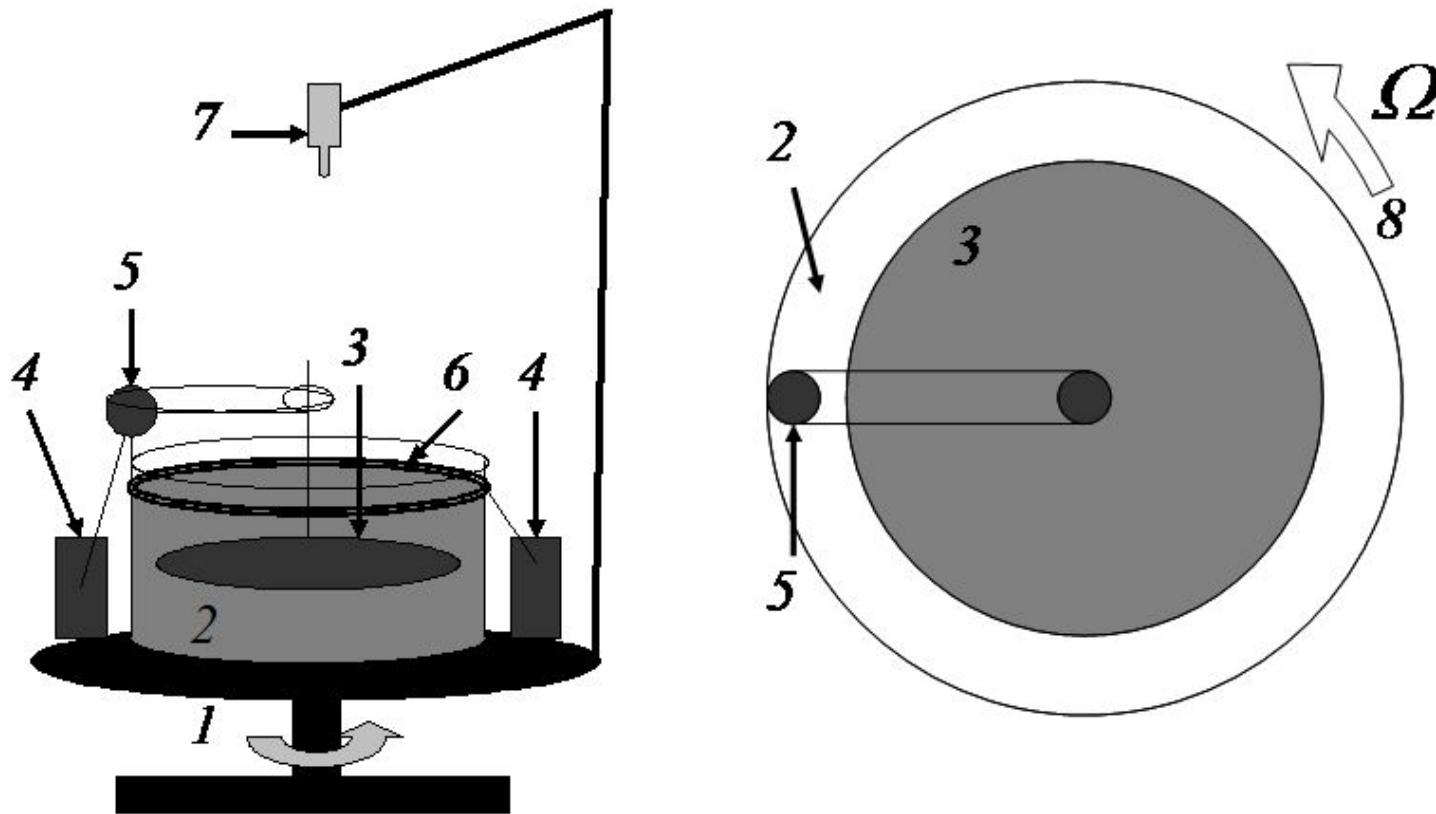
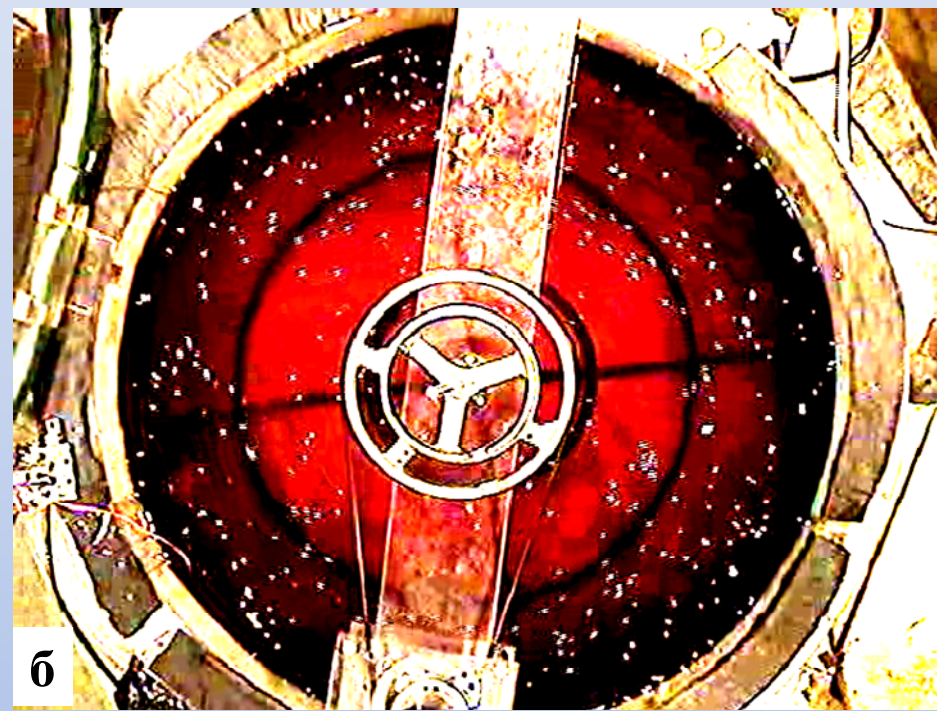


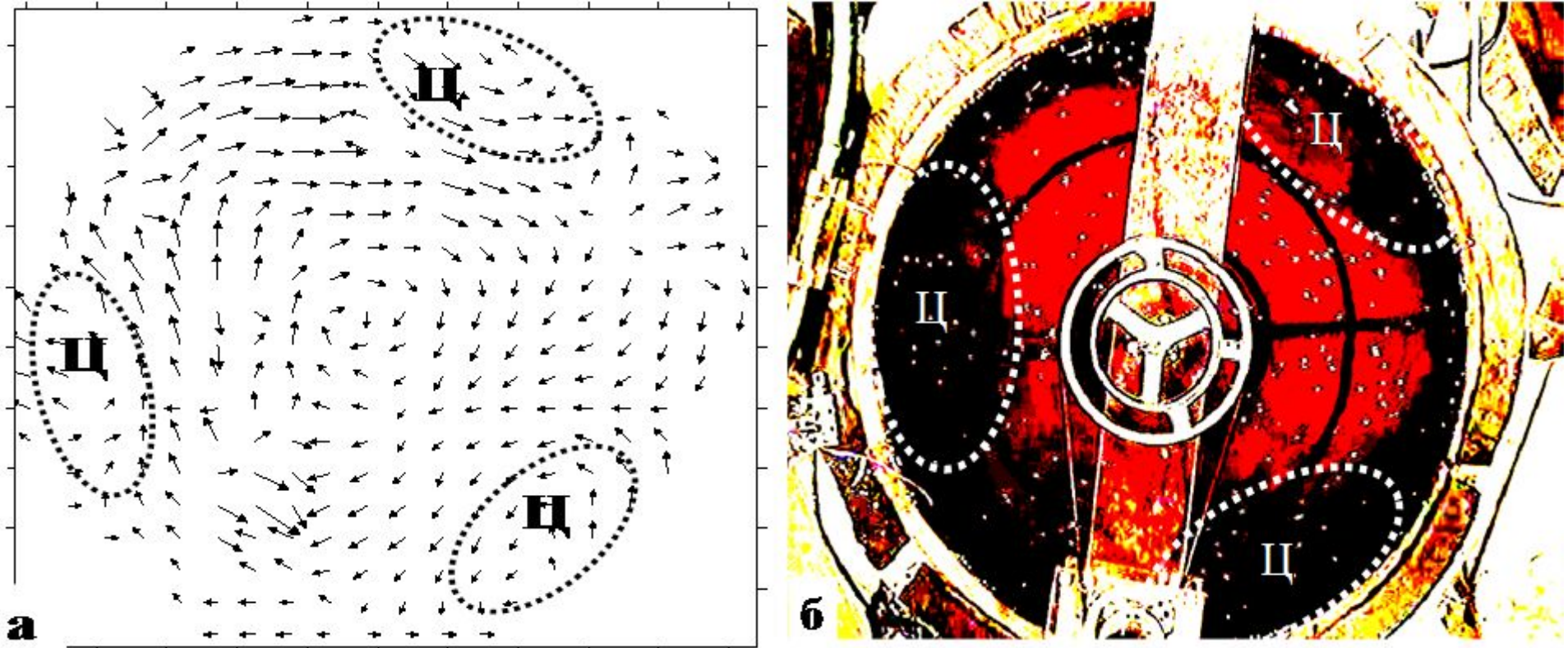
Схема лабораторной установки. Вид сбоку: 1 - вращающаяся платформа; 2 – бассейн, заполненный жидкостью; 3 – дифференциально вращающийся диск; 4 – блок питания с регулятором напряжения; 5 – электромотор; 6 – видеокамера. Вид сверху: 3 – диф. вращ. диск; 5 – шкив; 2 - зазор между диском и стенкой бассейна.

## Антициклонический сдвиг скорости



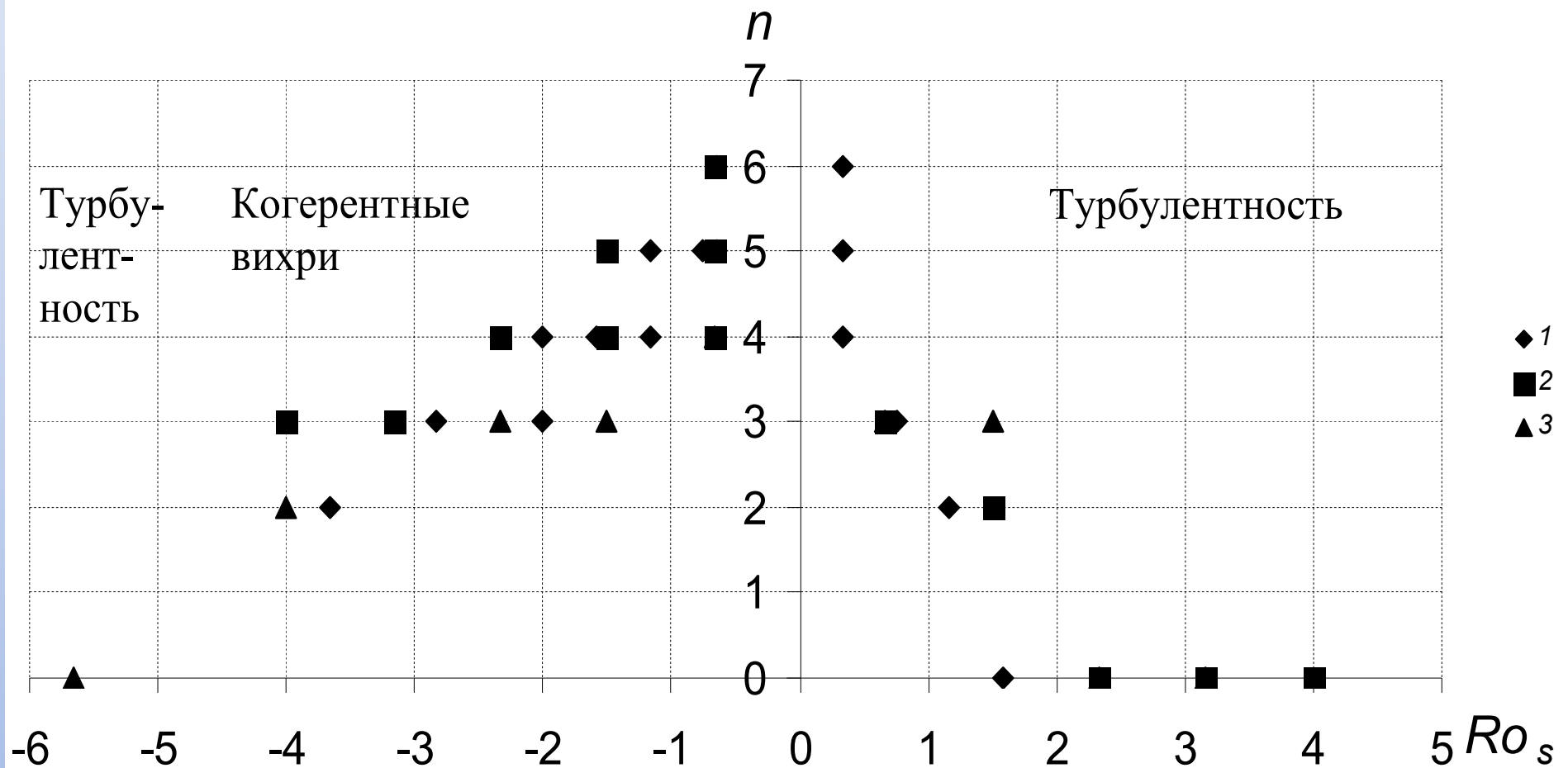
Течение на поверхности слоя жидкости, в тех опытах, где вдольбереговое течение было циклоническим, а сдвиг скорости в зазоре - антициклоническим: (а)  $Ro_s = 0.6$ ; (б)  $Ro_s = 2.3$ . Буквой «А» отмечены антициклоны, которые оконтурены пунктиром.

# Циклонический сдвиг скорости



Течения на поверхности слоя жидкости, где сдвиг скорости в зазоре - циклонический ( $Ro_s = -4$ ): (а) - рассчитанные по трассерам (пелеткам) (пунктиром и буквой «Ц» обозначены циклонические вихри, стрелки показывают скорость течения); (б) – визуализированные с помощью тимолового синего индикатора. Вихри оконтурены пунктиром. **ФИЛЬМЫ №№3-4.**

# Диаграмма режимов вдольберегового течения



Число вихрей  $n$  в зависимости от значения  $Ro_s$ , как для циклонического, так и для антициклонического сдвига скорости.

## Условие устойчивости сдвигового течения во вращающейся жидкости

Из простых физических соображений (Tritton, Devis 1981) следует, что плоскопараллельное сдвиговое течение во вращающейся жидкости обладает повышенной устойчивостью по сравнению с невращающейся жидкостью, если:

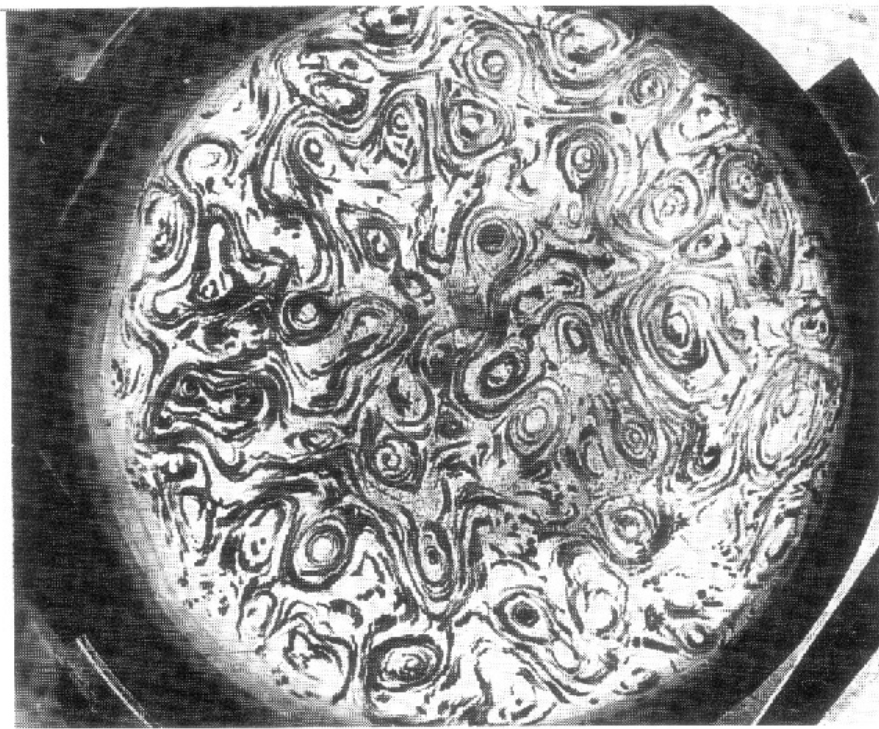
$$f > \partial u / \partial y \quad (1)$$

Введем безразмерный параметр:

$$\mathbf{Ro}_s = (\partial u / \partial y) / f - \text{число Россби}$$

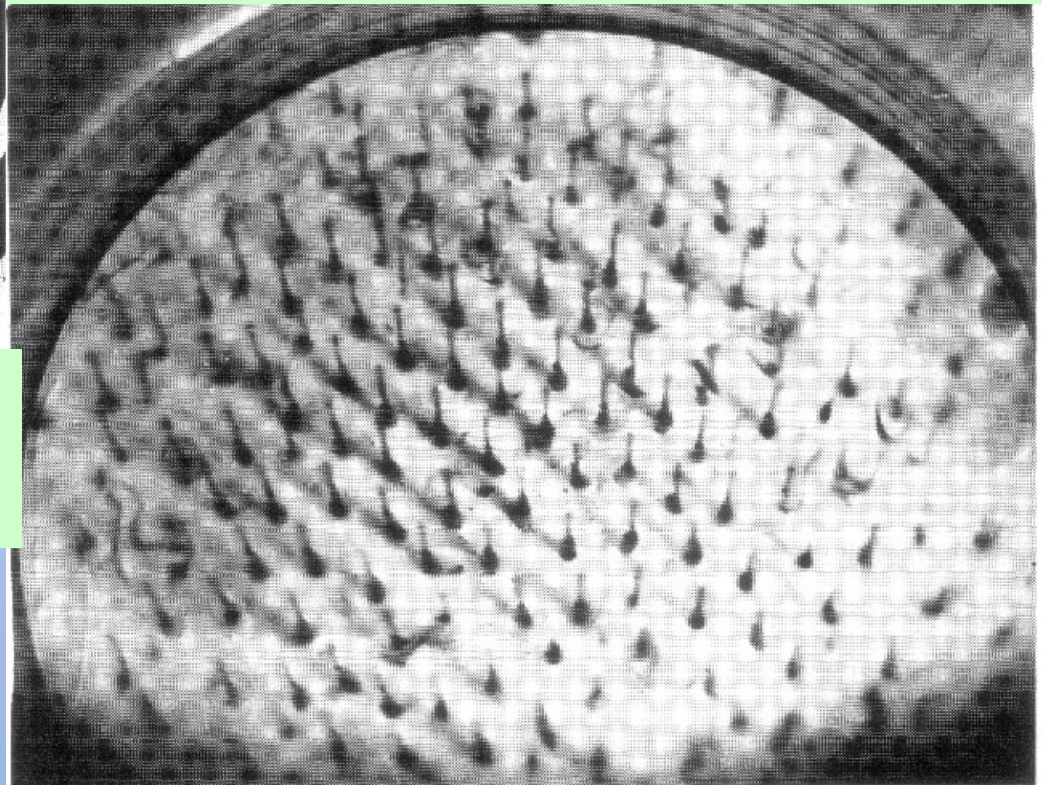
Из (1) следует, что течение более устойчивое при  $\mathbf{Ro}_s < 1$ . При  $\mathbf{Ro}_s > 1$  устойчивость течения понижена и облегчен переход к турбулентности.

Упорядочивание вихревой турбулентной конвекции под влиянием вращения системы (Дикарев, 1983).



Свободная конвекция при  
 $Ra = 2 \cdot 10^8$ ,  $Ta = 7 \cdot 10^7$ .

Свободная конвекция при  
 $Ra = 7 \cdot 10^7$ ,  $Ta = 6 \cdot 10^8$ .



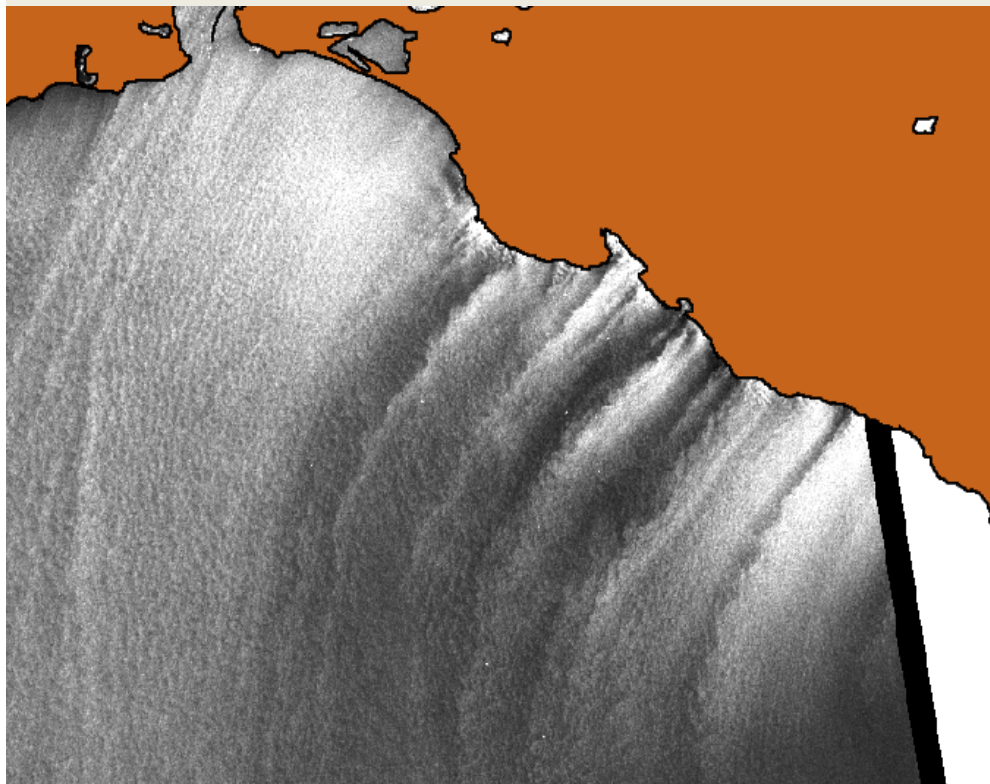


# ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ВЫВОДЫ

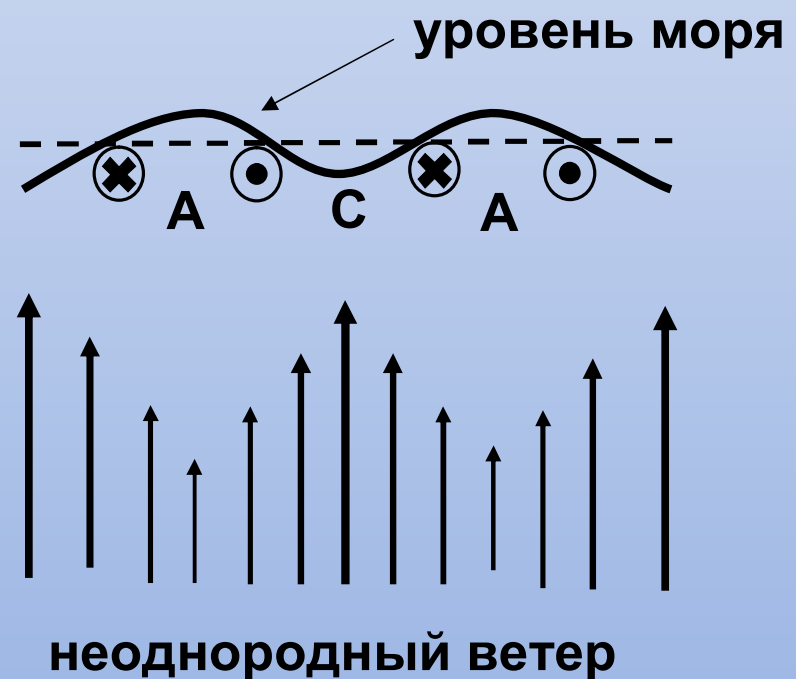
Во вращающейся жидкости в горизонтальном сдвиговом течении генерация вихревых структур происходит преимущественно в условиях циклонического сдвига скорости. Соответственно, формируются циклонические вихри. Наличие точки перегиба на профиле скорости не является обязательным. При этом в невращающейся жидкости ярко выраженных когерентных вихрей не наблюдается и течение имеет турбулентный характер (В лаб. эксперименте  $3000 < Re = \omega R_1 d / \nu < 30000$ ).

**ГЕНЕРАЦИЯ ВИХРЕЙ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-  
НЕОДНОРОДНЫМ ВЕТРОМ**

ПРИМЕР НЕОДНОРОДНОГО  
ВЕТРА НАПРАВЛЕННОГО С  
БЕРЕГА НА МОРЕ (ВЛИЯНИЕ  
ОРОГРАФИИ). С-В ЧАСТЬ  
ЧЕРНОГО МОРЯ,  
РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ  
СНИМОК (САР)



РЕАКЦИЯ УРОВНЯ МОРЯ НА  
ПРОСТРАНСТВЕННО-  
НЕОДНОРОДНЫЙ ВЕТЕР,  
ГЕНЕРАЦИЯ  
РАЗНОНАПРАВЛЕННЫХ  
ГЕОСТРОФИЧЕСКИХ  
ТЕЧЕНИЙ



# ГЕНЕРАЦИЯ ВИХРЕЙ ЗА СЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОГО ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

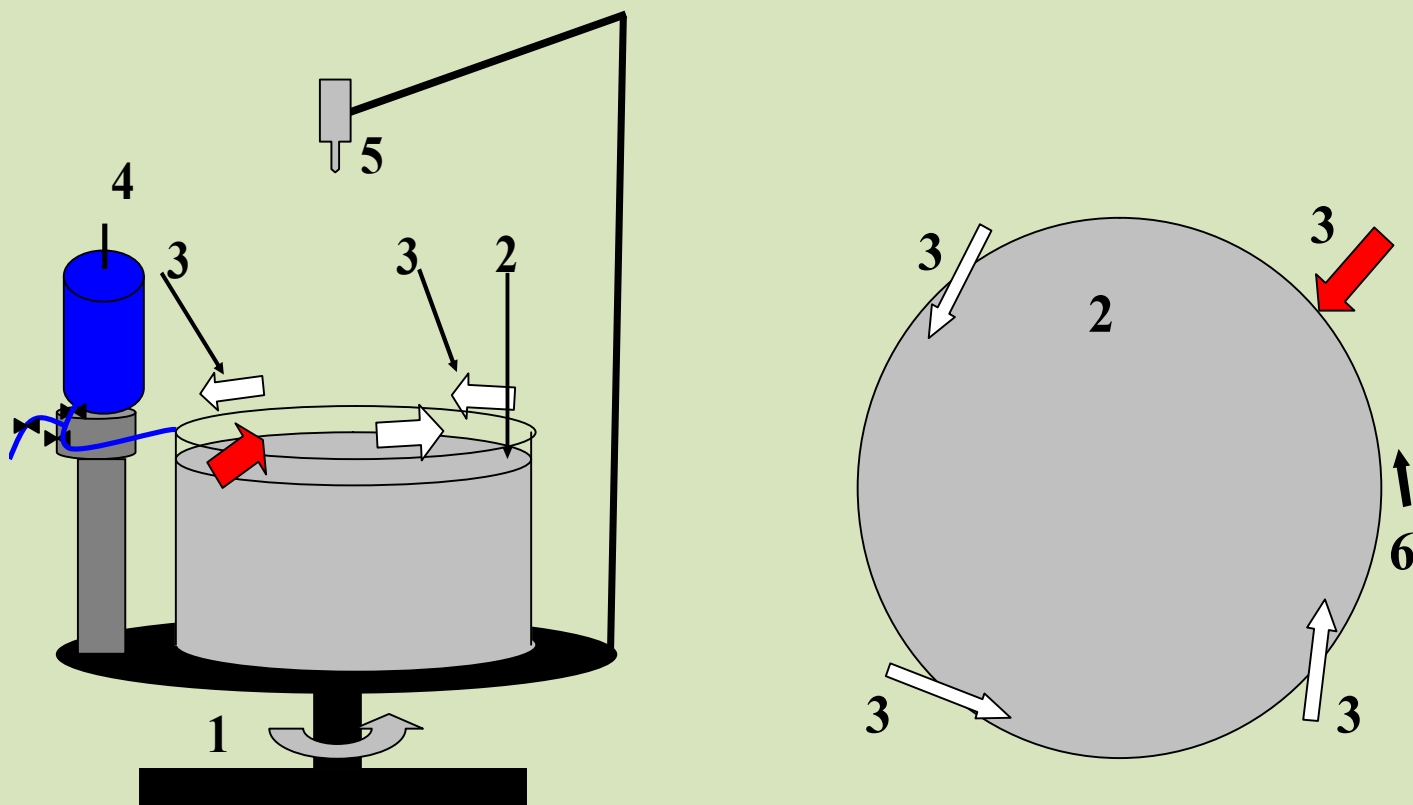
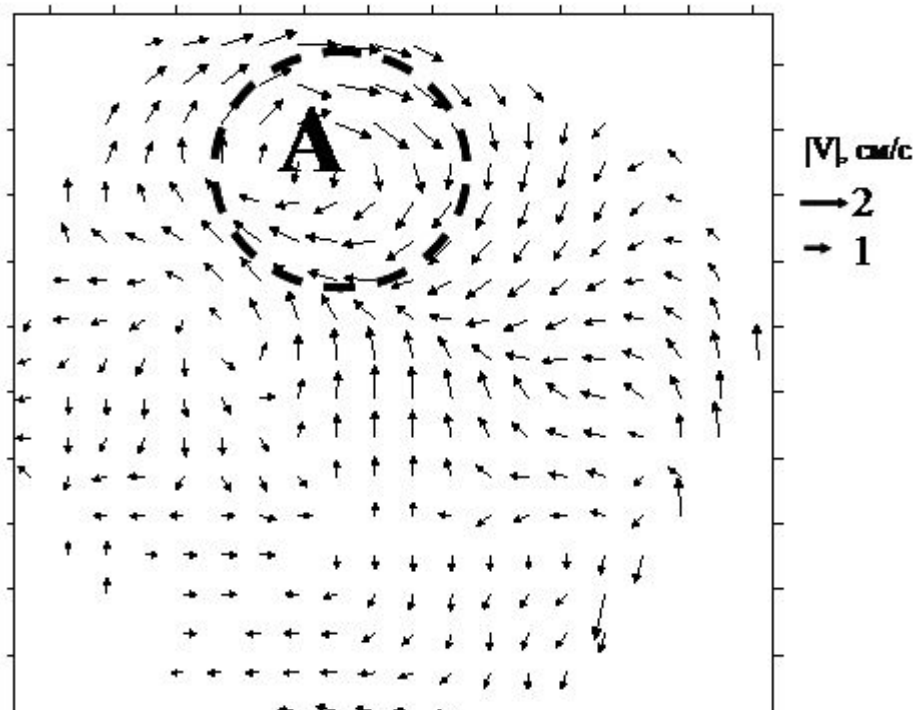


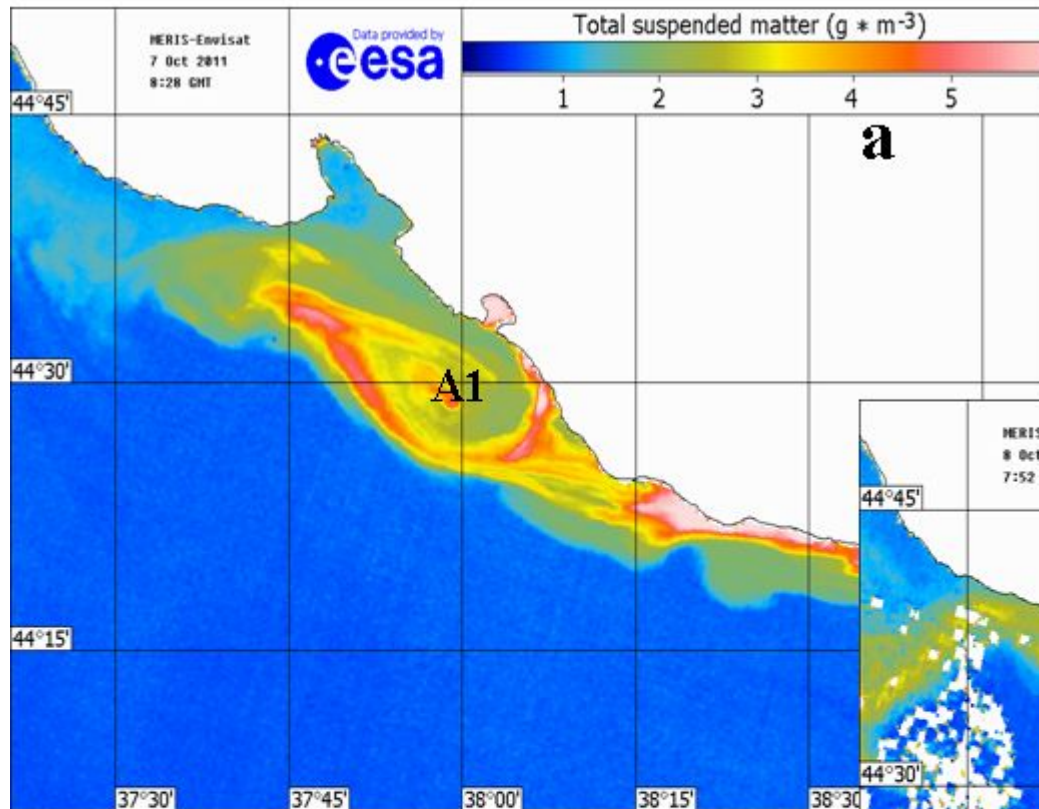
Схема лабораторной установки: а) – вид сбоку: 1 - вращающаяся платформа; 2 – бассейн из органического стекла с однородной или двухслойной жидкостью; 3 – четыре воздуходувки (красным выделена воздуходувка, направленная по радиусу к центру бассейна); 4 – источник постоянного расхода; 5 – видеокамера; 6 - направление вращения платформы. б) вид сверху: расположение

# АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИЙ БАРОКЛИННЫЙ ВИХРЬ В ЛАБОРАТОРНОМ БАССЕЙНЕ (СПРАВА) И ПОЛЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ - ОБРАБОТКА ТРЕКОВ ПЕЛЕТОК (СЛЕВА)

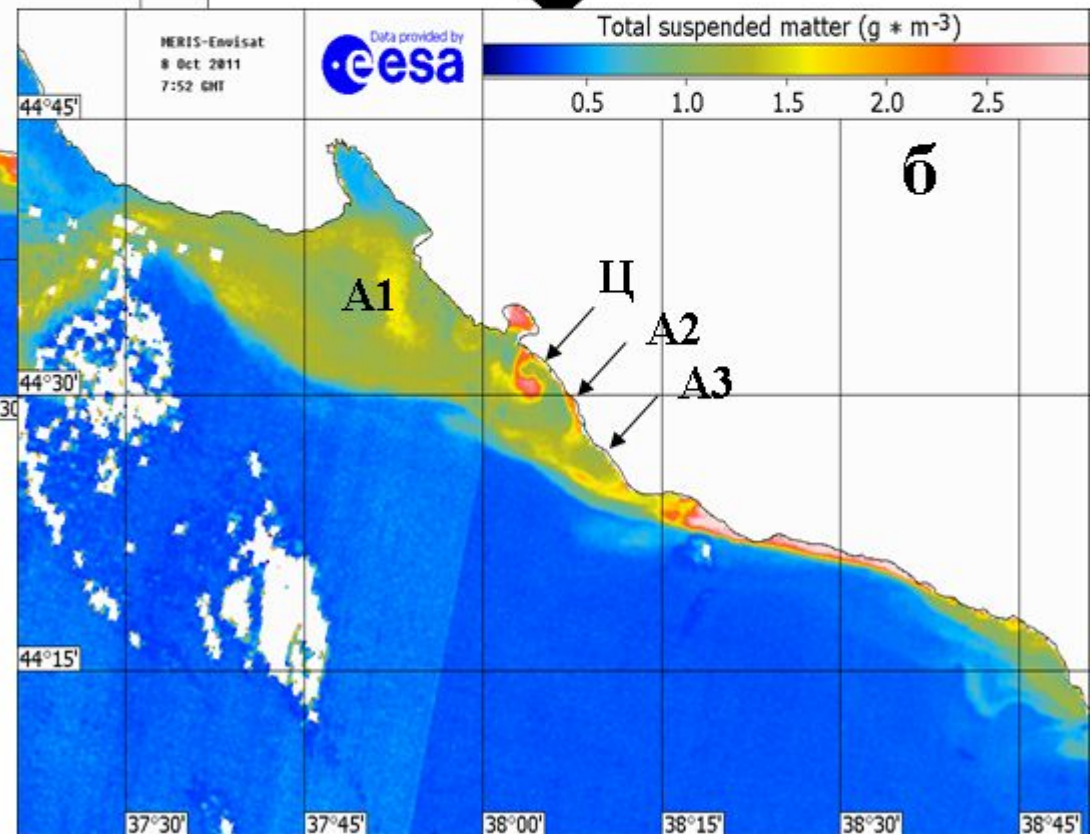


Период вращения платформы - 5 с, толщина слоя соленой воды 5 см, соленость - 10 psu, толщина слоя пресной воды - 2 см, бароклиный радиус деформации - 2.8 см. Радиальный ветер действовал 80 с (16 лаб. сут). Скорость воздушного потока на расстоянии 5 см от сопла воздуходувки - от 3 до 4 м/с. На расстоянии 30 см от сопла скорость воздуха - 1-1,5 м/с. Это соответствует изменению динамической скорости трения в воде от 2 до 0,6 см/с в области под воздушной струей. Данный кадр сделан через 1 лаб. сут. после выключения воздуходувки. **ФИЛЬМ №5.**

# Роль вихрей в формировании неоднородностей распределения пассивной примеси, в ее переносе

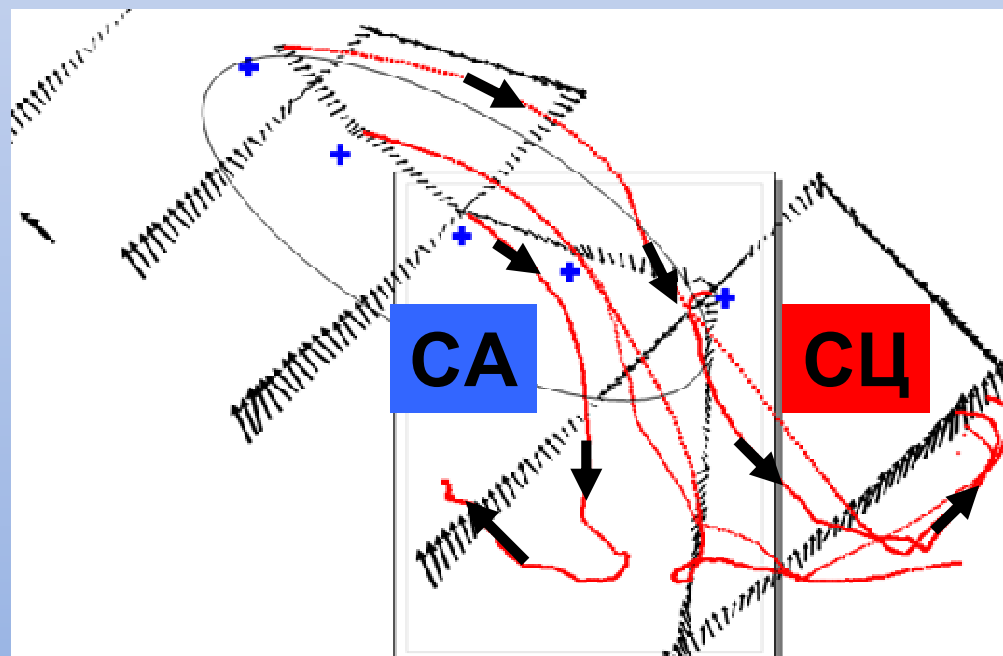
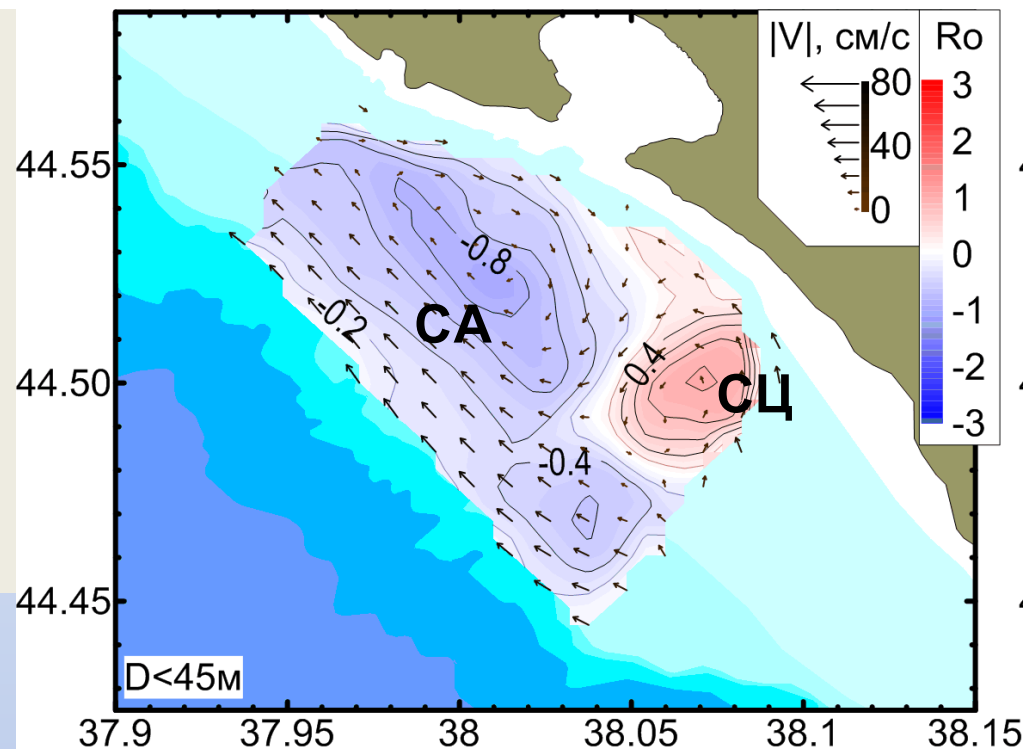


б) субмезомасштабные антициклоны А1 и А2 за Идокопасом и циклон Ц (MERIS-Envisat, взвесь, 08:28 08.10.11)



а) субмезомасштабный антициклон А1 за Идокопасом (MERIS-Envisat, взвесь, 07:52 07.10.11)

Сопоставление данных  
дрифтерного  
эксперимента 29-  
30.09.2013 г. с данными  
ADCP-съемки поля  
течения 29.09.2013 г.



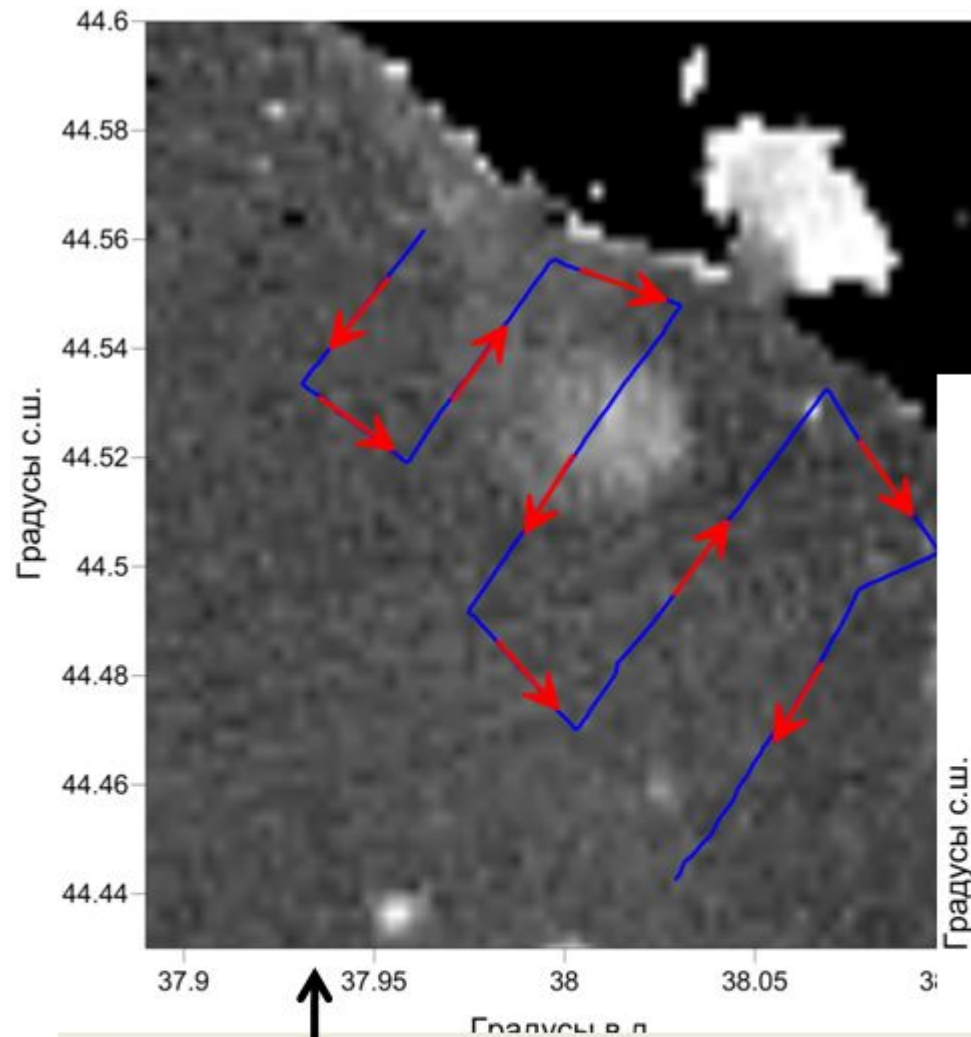
**Субмезомасштабные  
циклонические вихри как  
источники локального  
апвеллинга**



Схема циркуляции вод в прибрежной зоне Черного моря  
(Геленджик – Джубга) на спутниковом снимке МОДИС-  
Терра от 25.09.2012.

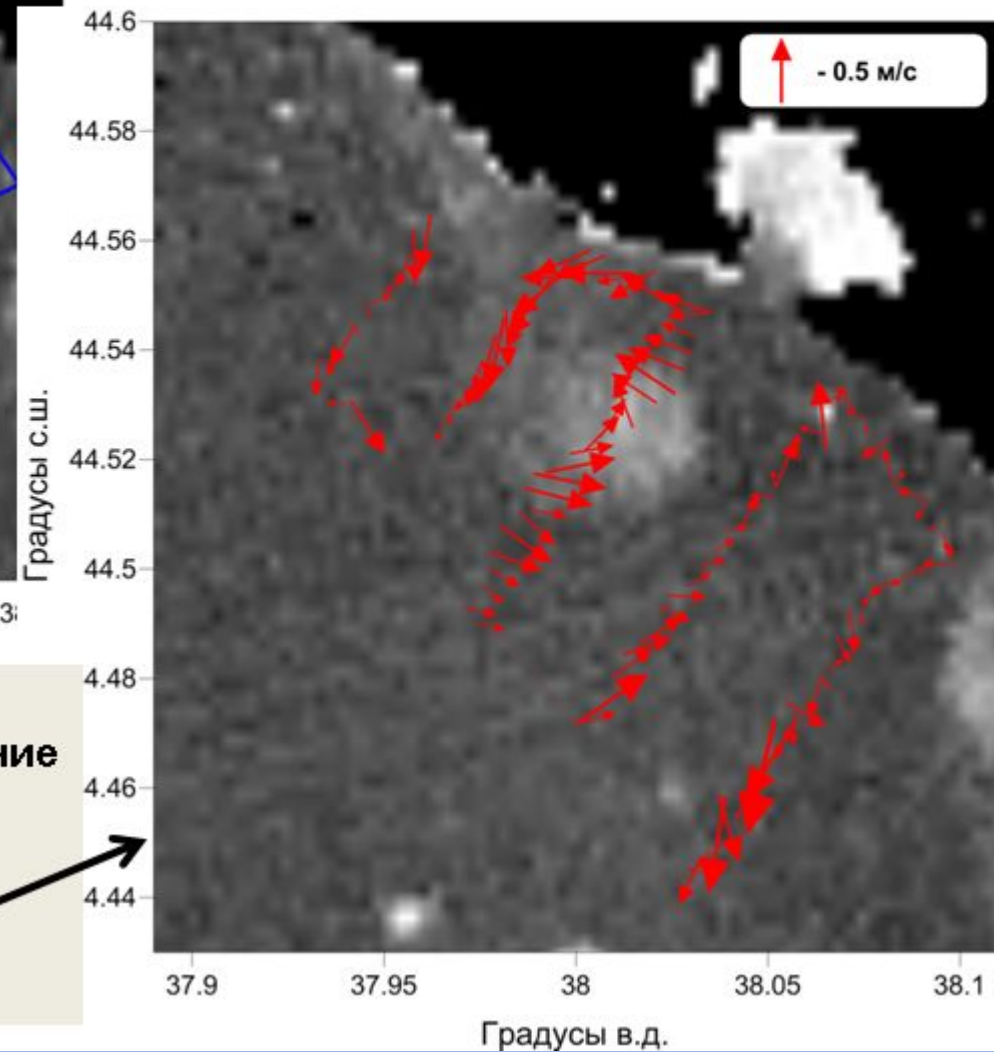


# Исследование циклонического вихря на геленджикском шельфе Черного моря с помощью буксируемого ADCP

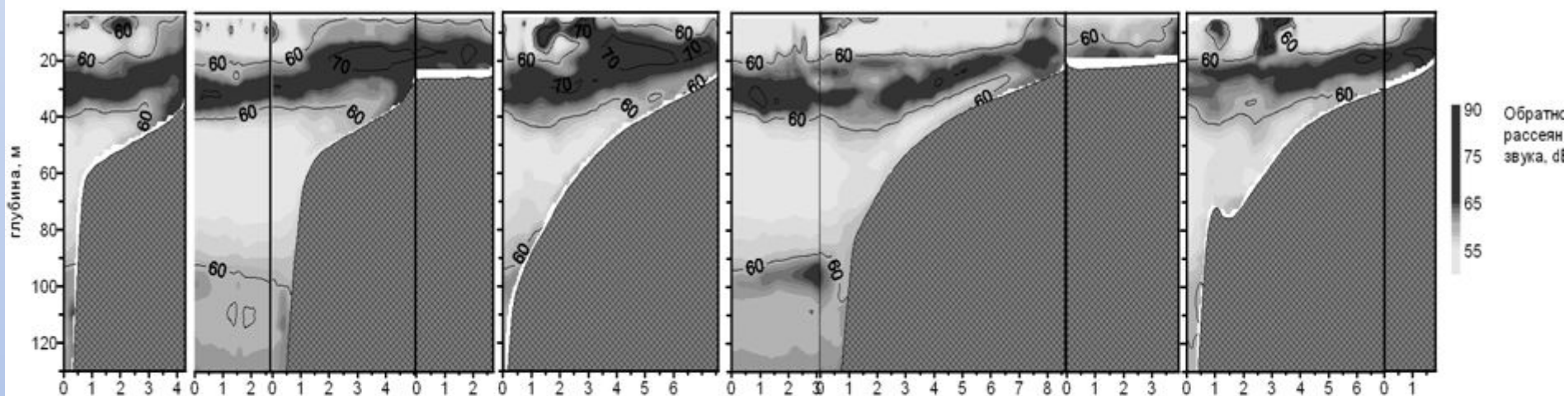


↑  
Галсы судна при буксировке, наложенные на спутниковое изображение от 25.09.2012 в поле хлорофилла.

Вектора горизонтальной скорости осредненные по верхнему слою, наложенные на тоже изображение

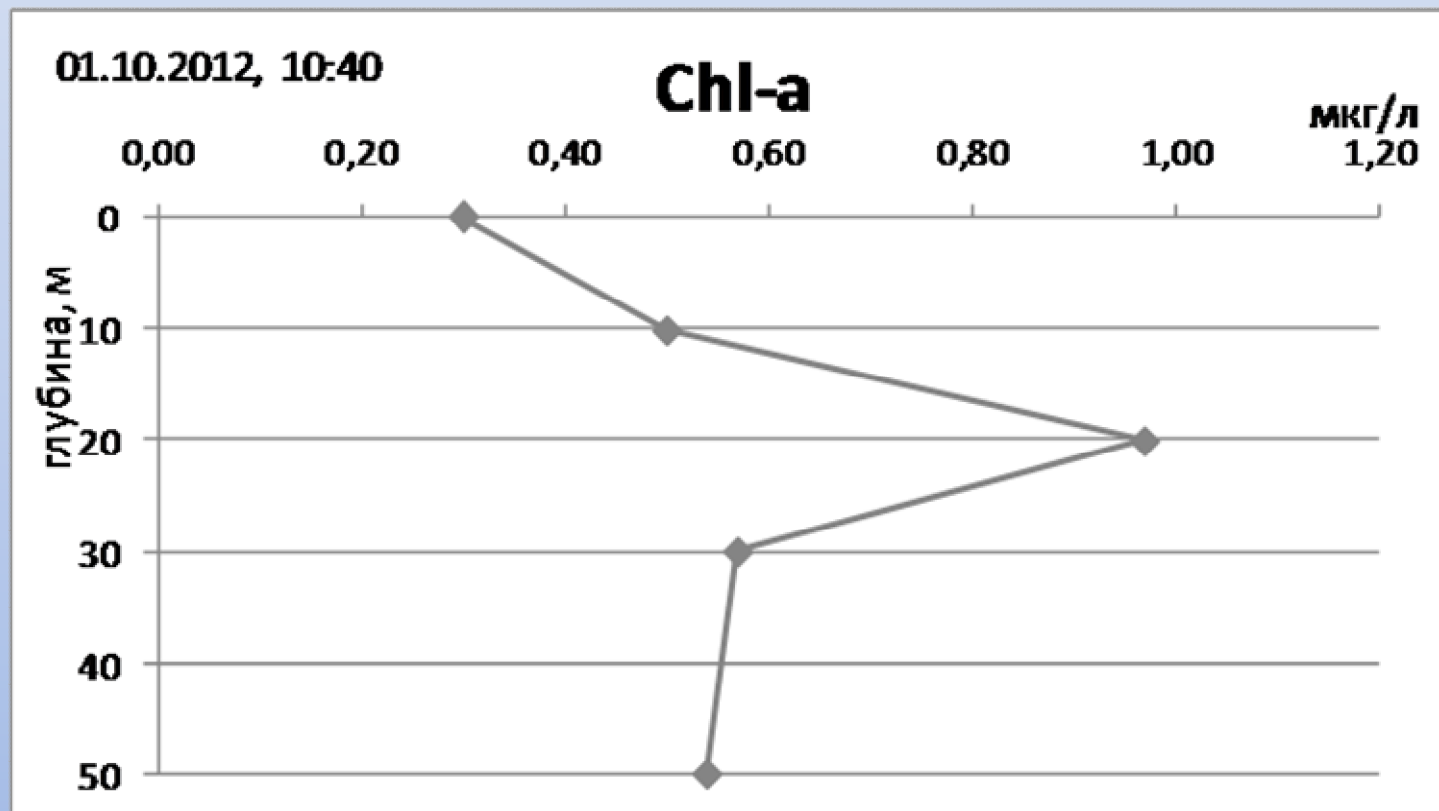


# Сигнал обратного акустического рассеяния на буксировочных галсах



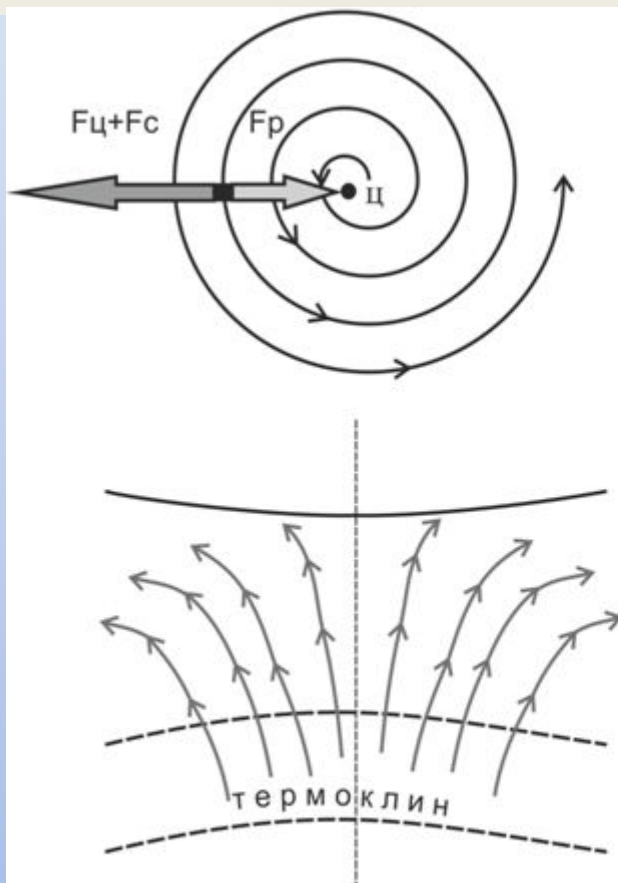
Галсы через ядро вихря

Профиль концентрации хлорофилла\_a, построенный по результатам обработки и анализа проб воды, отобранных батометрами в прибрежной части Черного моря в районе г. Геленджик 01.10.2012.

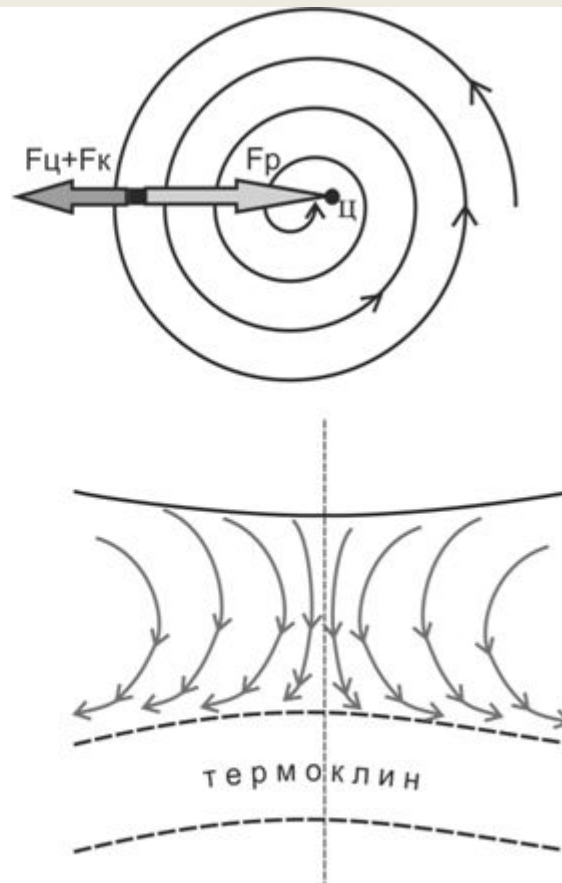


Виден максимум концентрации на глубине 20 м, соответствующий положению слоя скачка температуры и максимума звукорассеяния.

# Горизонтальная (вверху) и вертикальная (внизу) циркуляция вод и баланс действующих сил в субмезомасштабном циклоническом вихре



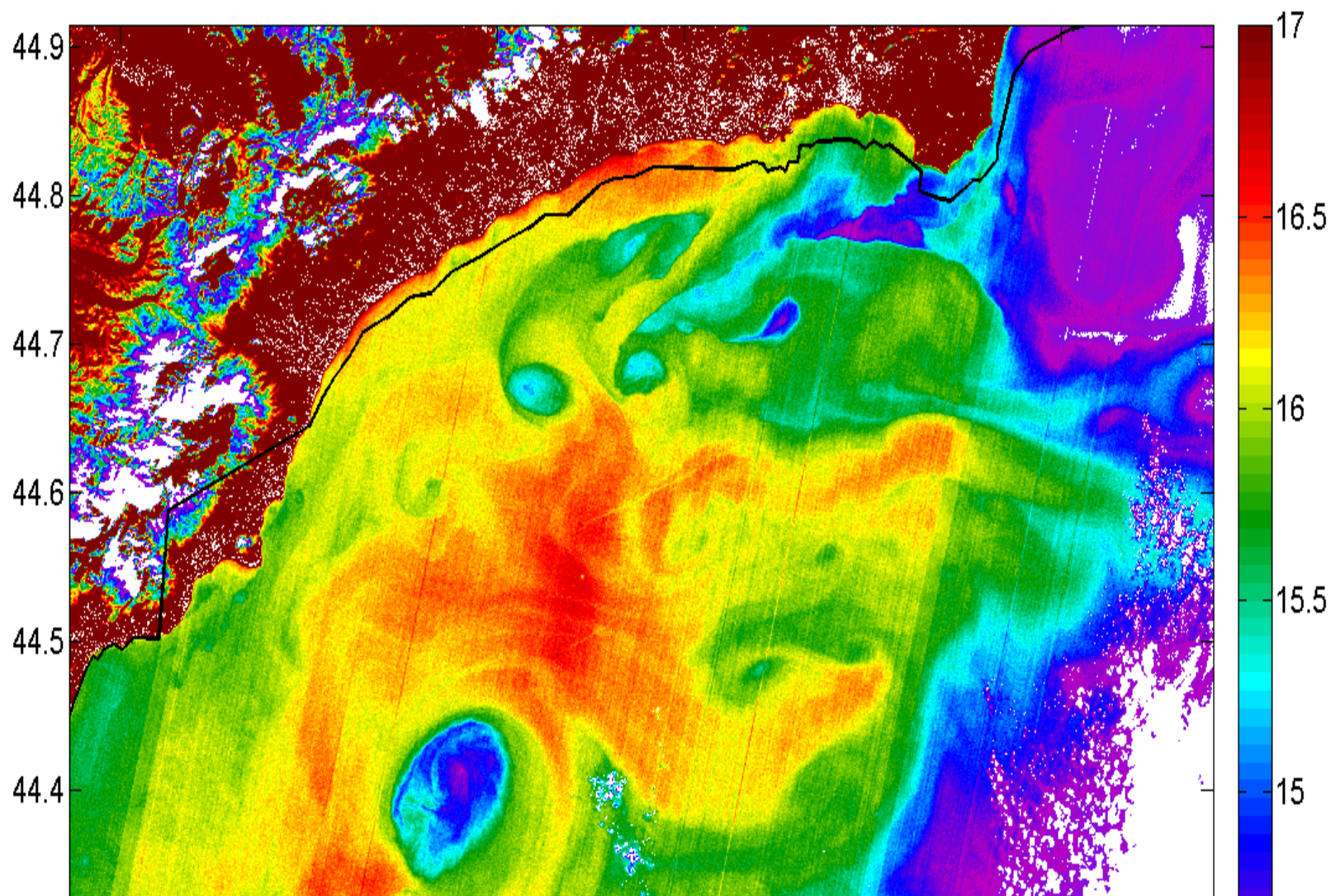
**Развивающийся вихрь** - сумма центробежной ( $F_{ц}$ ) и Кориолисовой ( $F_{к}$ ) сил превышает силу давления ( $F_{д}$ )



**Затухающий вихрь** - сила давления ( $F_{д}$ ) превышает сумму центробежной ( $F_{ц}$ ) и Кориолисовой ( $F_{к}$ ) сил.

# Пример субмезомасштабного циклона в поле температуры у южного берега Крыма (Landsat-8)

2013-10-13



# Оценка скорости апвеллинга в ядре циклонического субмезомасштабного вихря

$$w = (2H/R)dR/dt$$

Если  $R = 2 \text{ км} = 2 \cdot 10^5 \text{ см}$ ,  $dR/dt = 1 \text{ км/сут} \approx 1 \text{ см/с}$ ,  $H = 20 \text{ м} = 2 \cdot 10^3 \text{ см}$ , то  $w = 0.02 \text{ см/с}$ .

Это большая величина, если учесть, что при интенсивном прибрежном ветровом апвеллинге в Черном море вертикальная скорость имеет тот же порядок величины!

# ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что субмезомасштабные вихри, как правило, присутствуют на черноморском шельфе, причем встречаемость вихрей циклонического или антициклонического знака приблизительно одинакова. Циклоны имеют диаметр 2-4 км и они приблизительно в 1.5 раза меньше антициклонов, характерный диаметр которых составляет 3-6 км. Шельфовые вихри являются агеострофическими, изначально характеризуются высокими значениями числа Россби ( $Ro=0.4-3$ ), большими орбитальными скоростями вращения (20-50 см/с) и короткой продолжительностью существования (не более нескольких суток).

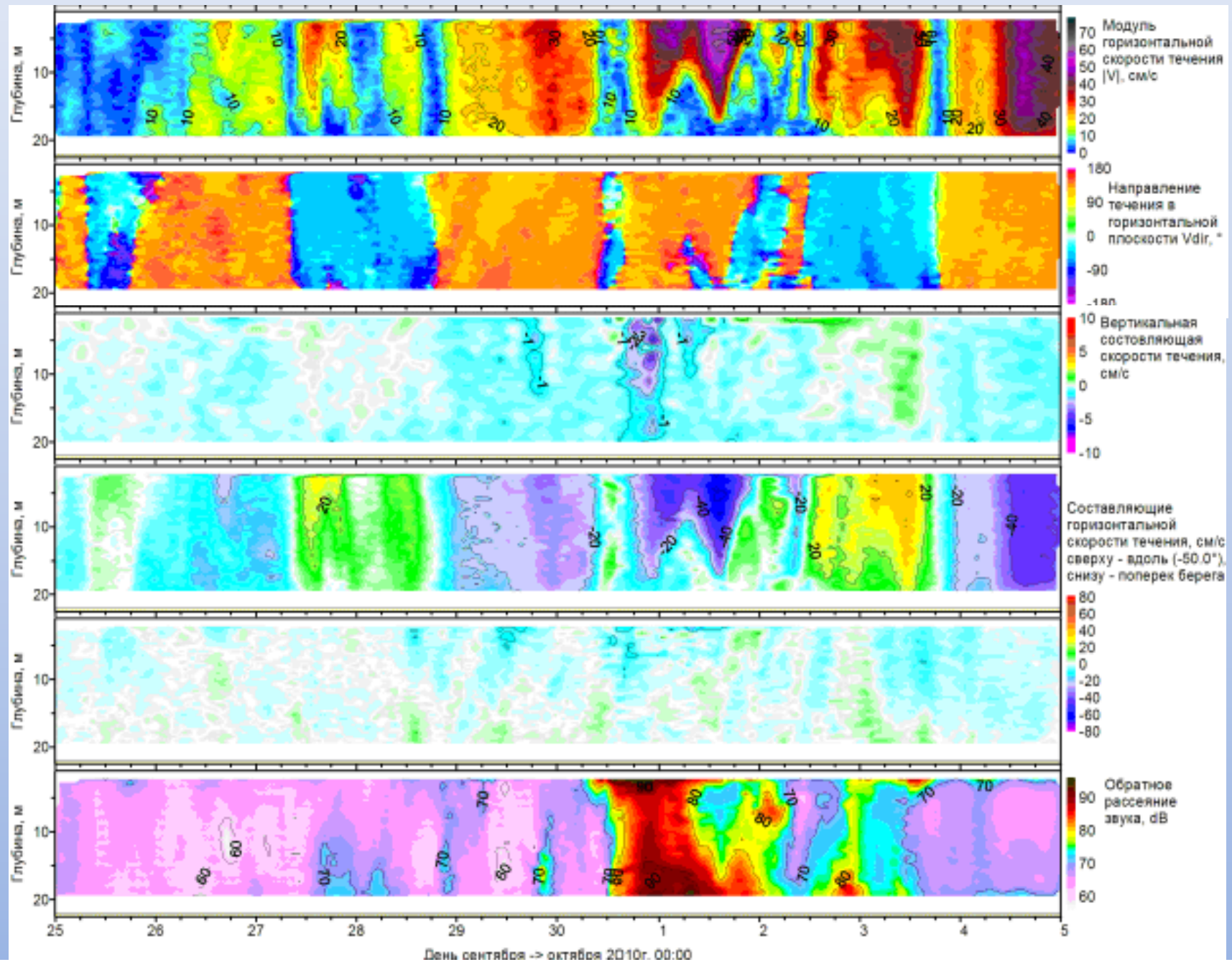


2. Методом лабораторного моделирования установлено, что во вращающейся жидкости существенно расширяются возможности формирования упорядоченных вихревых структур по сравнению с невращающейся жидкостью. При этом вращение системы делает различными условия образования вихрей циклонического и антициклонического знака. Так, благодаря сдвиговой неустойчивости вдольберегового течения, в основном происходит образование циклонов, и, наоборот, при обтекании мысов и полуостровов, а также вследствие пространственно-неоднородного ветрового воздействия, образуются преимущественно антициклоны.

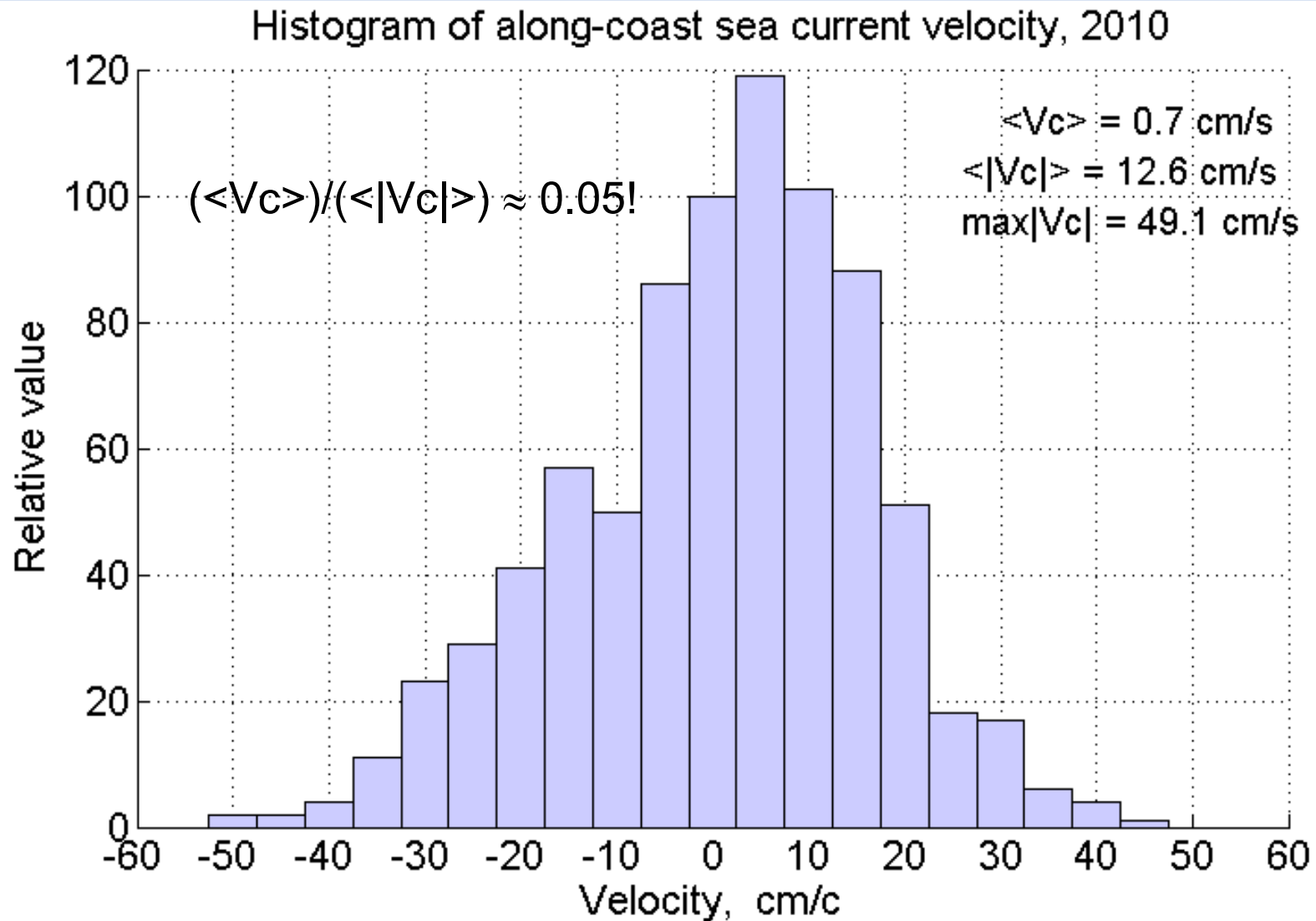
3. Вращение Земли и способствует образованию когерентных динамических структур - интенсивных циклонических и антициклонических субмезомасштабных вихрей «ламинаризирует» горизонтальный пограничный слой на шельфе. Это усложняет кросс-шельфовый обмен, делает его мало предсказуемым и способствует собиранию взвеси (загрязнений) в локализованных областях, а также ее быстрому направленному переносу на расстояния, соизмеримые с диаметром вихрей (2-6 км).

***Спасибо за внимание!***

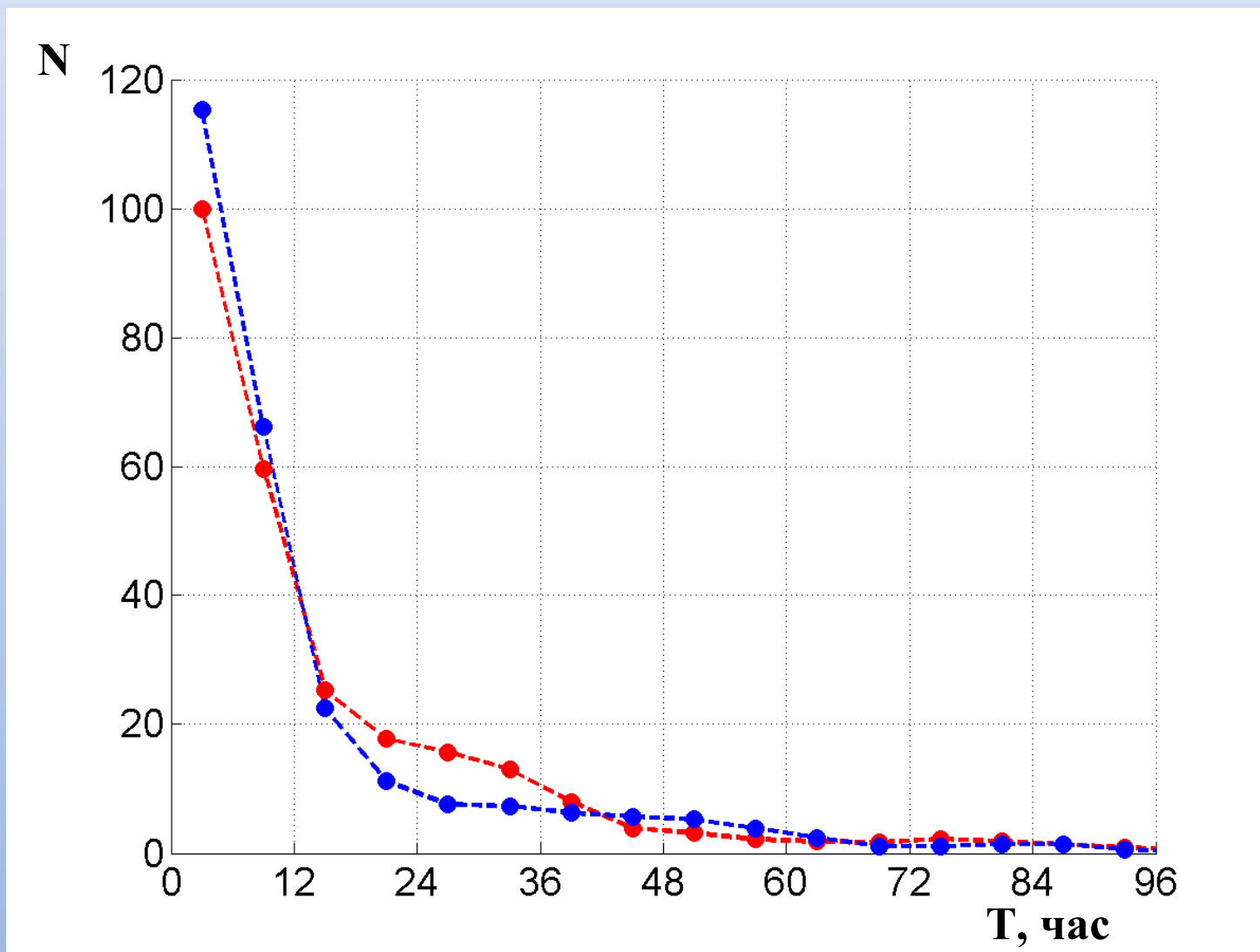
# Пример обработки записи ADCP за декаду с 25.09 по 05.10.10



# Гистограмма амплитуды вдольбереговой скорости

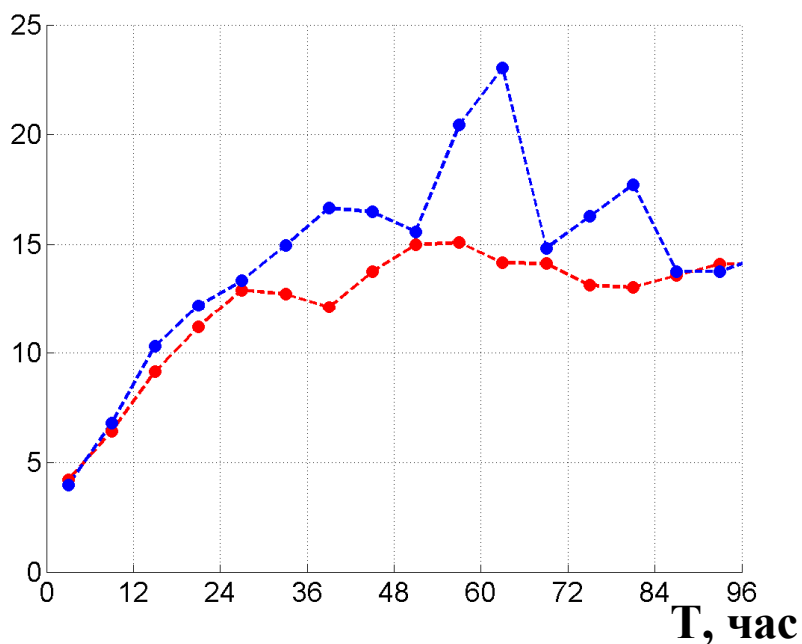


**Число  $N$  периодов знакопостоянства вдольбереговой скорости в зависимости от продолжительности периода  $T$**

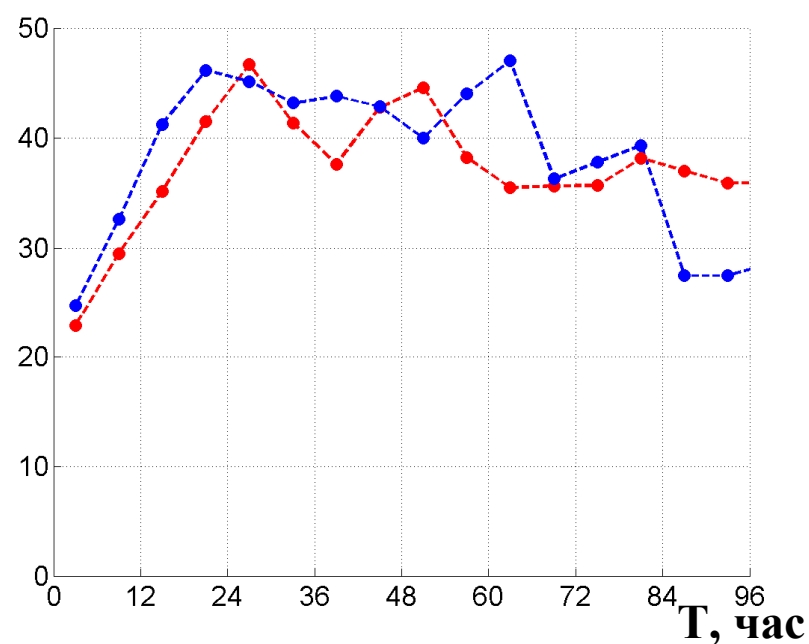


## Вдольбереговая скорость в периоды знакопостоянства скорости в зависимости от продолжительности периода

$\langle V \rangle$ , см/с



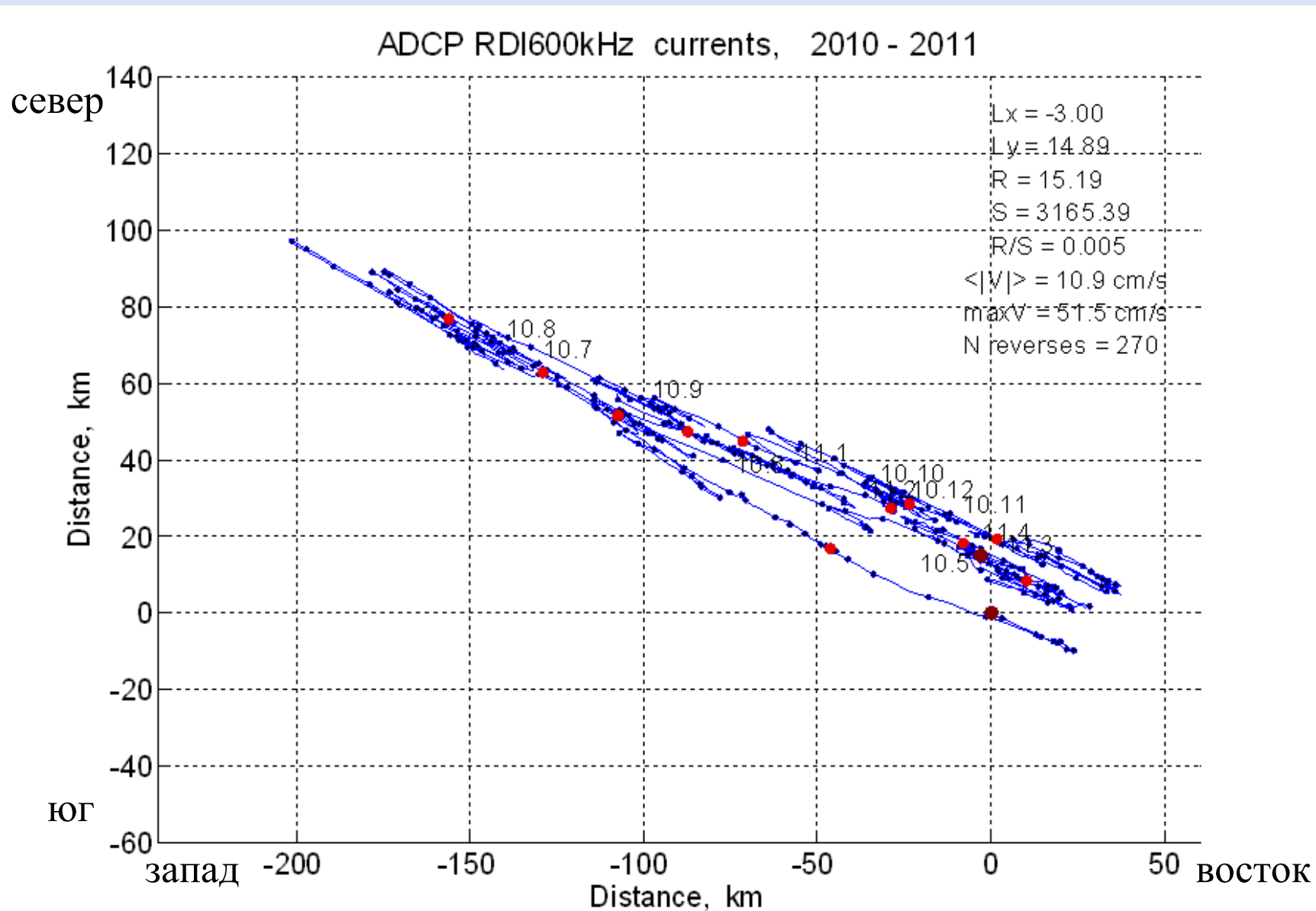
$V_{\max}$ , см/с



- а) средние значения вдольбереговой скорости;
- б) максимальные значения вдольбереговой скорости.

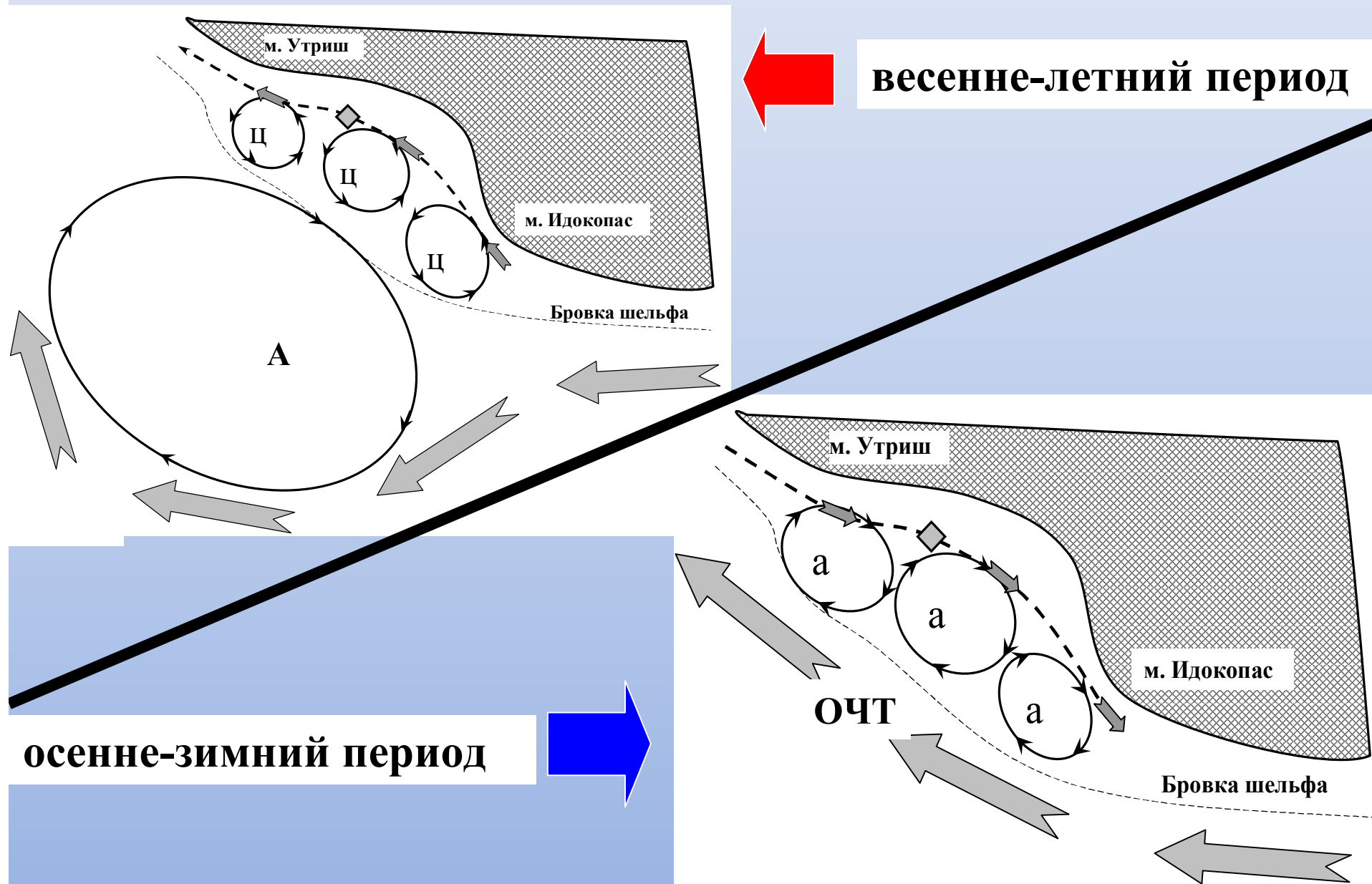
Красная –северо-западное, синяя – юго-восточное направление.

# Прогрессивные векторные диаграммы за период 05.2010 –04.2011

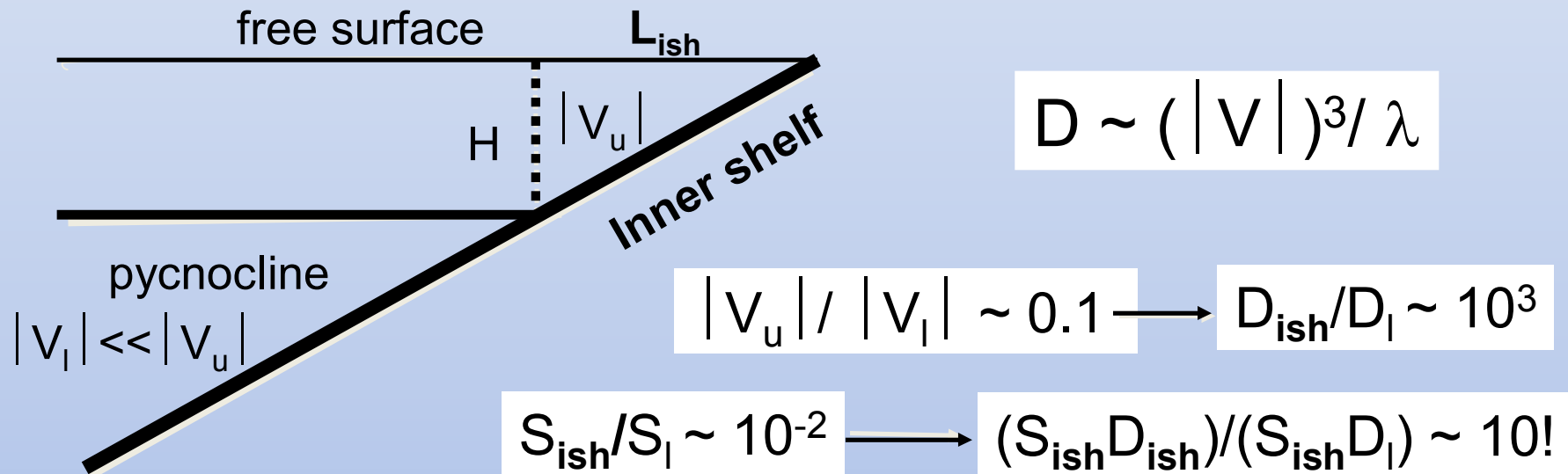




# Схема формирования вихревого пограничного слоя на узком черноморском шельфе



# Роль внутреннего шельфа в диссипации энергии ОЧТ и мезомасштабных вихрей



**Результат:** диссипация кинетической энергии на узком внутреннем шельфе может быть на порядок больше, чем на глубоководной части Черного моря

## **Заключение**

**Суб-мезомасштабная (1-10 км) и короткопериодная (1-100 часов) изменчивость динамики вод на узком шельфе Черного моря в районе г. Геленджика является предметом исследований, проводимых ИО РАН на протяжении последних 5 лет. Путем инструментальных измерений, а также с помощью спутниковой информации высокого разрешения, установлено, что в значительной степени она связана с формированием и перемещением вдоль берега шельфовых субмезомасштабных вихрей, диаметр которых обычно не превышает 6-8 км. Эти вихри не являются квази-геострофическими, а время их жизни не превышает нескольких суток, поэтому их можно считать высоко диссипативными динамическими структурами. Они производят водообмен поперек шельфа, способствуя очистке прибрежной зоны от естественного и антропогенного загрязнения.**

**Формирование шельфовых вихрей происходит, главным образом, под влиянием внешней циркуляции, т.е. течений над континентальным склоном и в глубоководной зоне. Наиболее распространенными физическими механизмами формирования вихрей на шельфе являются, как минимум, два. Один из них обусловлен сдвиговой неустойчивостью вдольберегового течения. Это подтверждается тем фактом, что при юго-восточном вдольбереговом течении на шельфе доминируют циклонические вихри, а при северо-западном - антициклонические. Другой механизм связан с обтеканием орографических и топографических неоднородностей. При этом "ложбинах" береговой черты, в зоне отрыва струи вдольберегового течения от мысов, периодически формируются интенсивные шельфовые вихри. Существуют и другие механизмы генерации шельфовых вихрей.**

**В прибрежно-шельфовой зоне существует осциллирующий динамический пограничный слой. При этом, благодаря трению о дно в области малых глубин (10-30 м), осуществляется эффективная диссипация кинетической энергии течений. В более глубоководной зоне из-за наличия сильной плотностной стратификации - сезонного термоклина (в теплый период года) и основного пикно-халоклина (круглогодично) скорость течения в придонном слое невелика и диссипация кинетической энергии резко уменьшается. По предварительным оценкам интегральная диссипация кинетической энергии течений в прибрежно-шельфовой зоне значительно превышает интегральную диссипацию в глубоководной части Черного моря. Поэтому роль этой узкой, зоны в диссипации кинетической энергии общей и мезомасштабной циркуляции вод может быть определяющей**

## **Заключение**

**Суб-мезомасштабная (1-10 км) и короткопериодная (1-100 часов) изменчивость динамики вод на узком шельфе Черного моря в районе г. Геленджика является предметом исследований, проводимых ИО РАН на протяжении последних 5 лет. Путем инструментальных измерений, а также с помощью спутниковой информации высокого разрешения, установлено, что в значительной степени она связана с формированием и перемещением вдоль берега шельфовых субмезомасштабных вихрей, диаметр которых обычно не превышает 6-8 км. Эти вихри не являются квази-геострофическими, а время их жизни не превышает нескольких суток, поэтому их можно считать высоко диссипативными динамическими структурами. Они производят водообмен поперек шельфа, способствуя очистке прибрежной зоны от естественного и антропогенного загрязнения.**

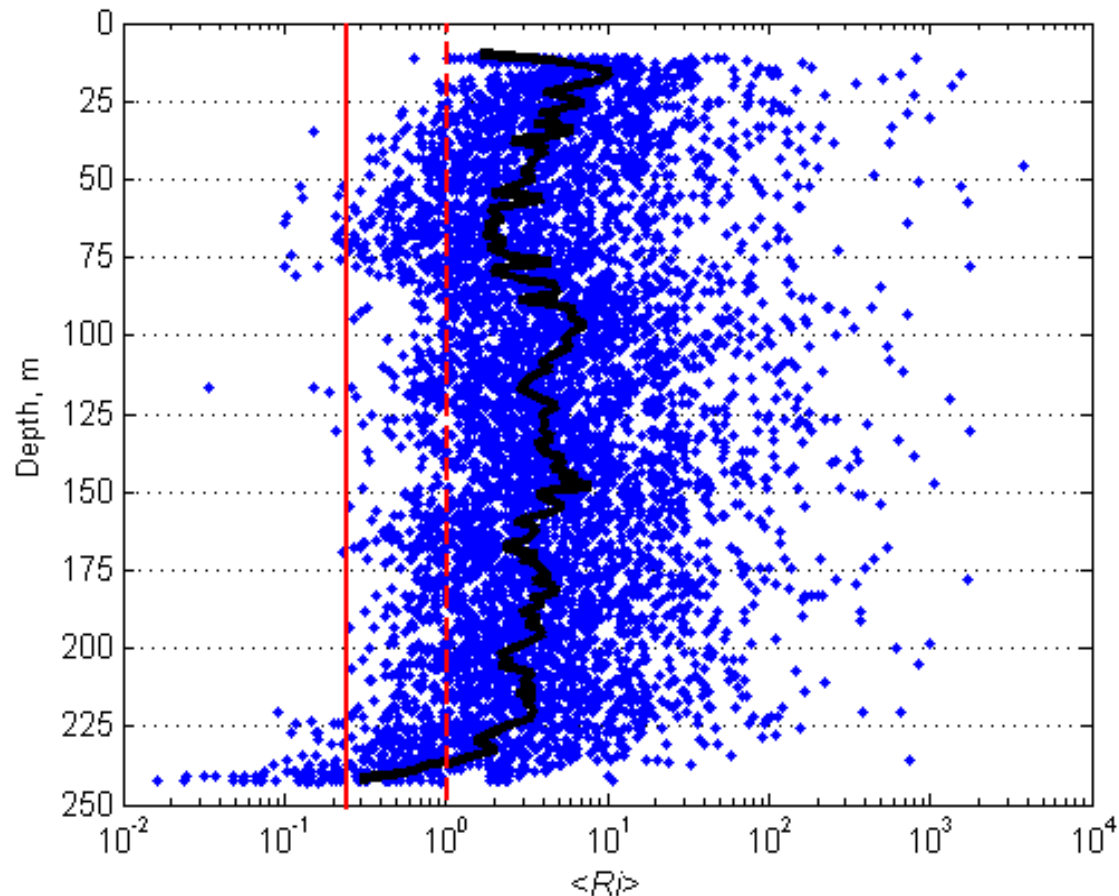
**Формирование шельфовых вихрей происходит, главным образом, под влиянием внешней циркуляции, т.е. течений над континентальным склоном и в глубоководной зоне. Наиболее распространенными физическими механизмами формирования вихрей на шельфе являются, как минимум, два. Один из них обусловлен сдвиговой неустойчивостью вдольберегового течения. Это подтверждается тем фактом, что при юго-восточном вдольбереговом течении на шельфе доминируют циклонические вихри, а при северо-западном - антициклонические. Другой механизм связан с обтеканием орографических и топографических неоднородностей. При этом "ложбинах" береговой черты, в зоне отрыва струи вдольберегового течения от мысов, периодически формируются интенсивные шельфовые вихри. Существуют и другие механизмы генерации шельфовых вихрей.**

**В прибрежно-шельфовой зоне существует осциллирующий динамический пограничный слой. При этом, благодаря трению о дно в области малых глубин (10-30 м), осуществляется эффективная диссипация кинетической энергии течений. В более глубоководной зоне из-за наличия сильной плотностной стратификации - сезонного термоклина (в теплый период года) и основного пикно-халоклина (круглогодично) скорость течения в придонном слое невелика и диссипация кинетической энергии резко уменьшается. По предварительным оценкам интегральная диссипация кинетической энергии течений в прибрежно-шельфовой зоне значительно превышает интегральную диссипацию в глубоководной части Черного моря. Поэтому роль этой узкой, зоны в диссипации кинетической энергии общей и мезомасштабной циркуляции вод может быть определяющей**



# Расчет числа Ричардсона и коэффициентов вертикального обмена по профилям $\rho(z)$ и $U(z)$ «Аквалога»

$Q_c = k(\partial C/\partial z)$  – поток субстанции  $C$  по вертикали. Для его расчета нужно иметь профиль субстанции  $C(z)$  и коэффициента обмена  $k$ .

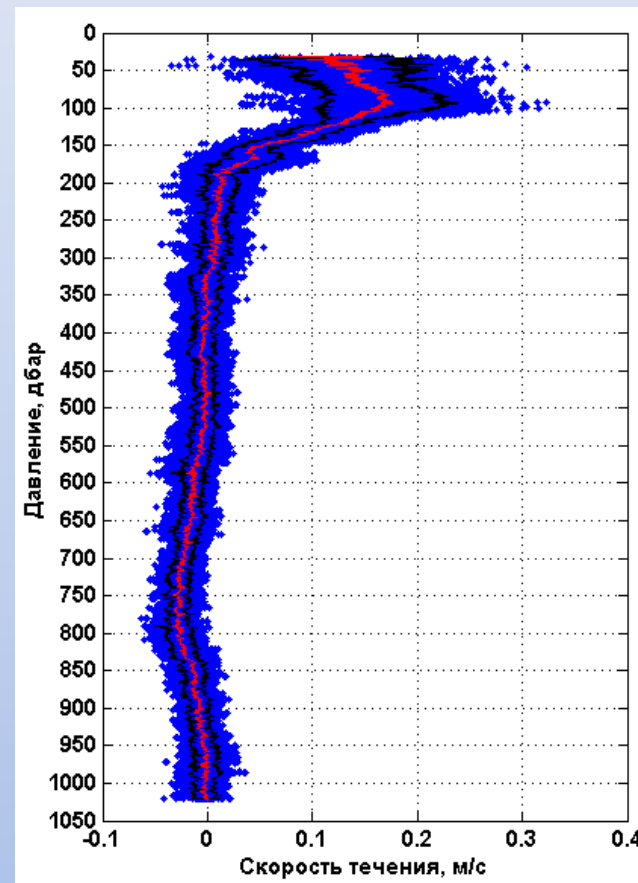
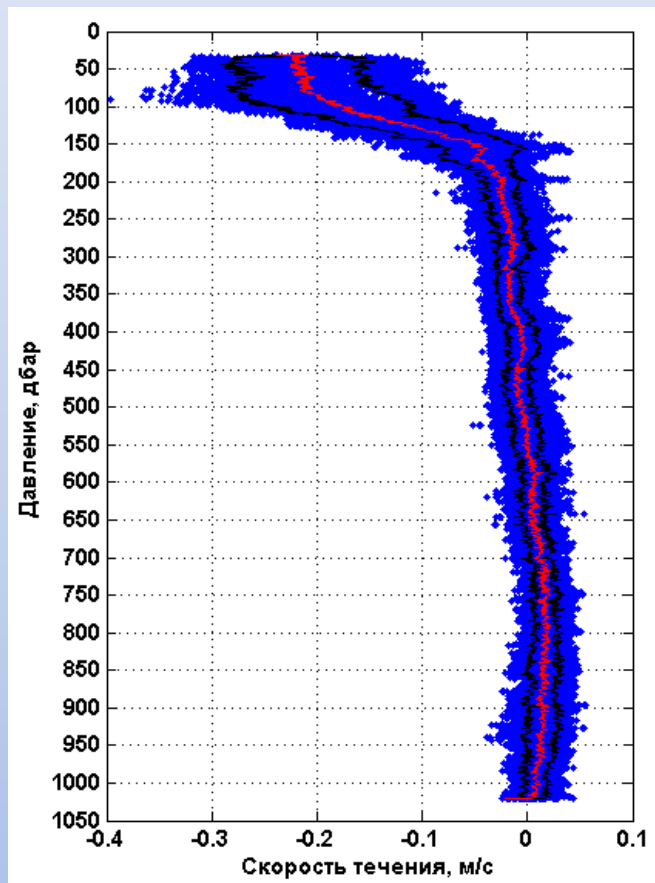


Градиентное число Ричардсона  $\langle Ri \rangle = \langle N^2 \rangle / \langle U_z^2 \rangle$  рассчитанное по данным Аквалога (Черное море, 11-13 июля, 2007). Толстая черная линия – ср. медианное значение, красная -  $\langle Ri \rangle = 0.25$ , красный пунктир -  $\langle Ri \rangle = 1$ . Коэффициенты вертикальной турбулентной вязкости  $\nu$  и диффузии  $\kappa$ :

$$\nu = A_0 / (1 + aRi)^2 + A_1, \quad \kappa = \nu / (1 + aRi) + A_2$$

(Pacanowski and Philander 1981)

# Пример уникальной регистрации вертикального профиля скорости течения комплексом «Аквалог»

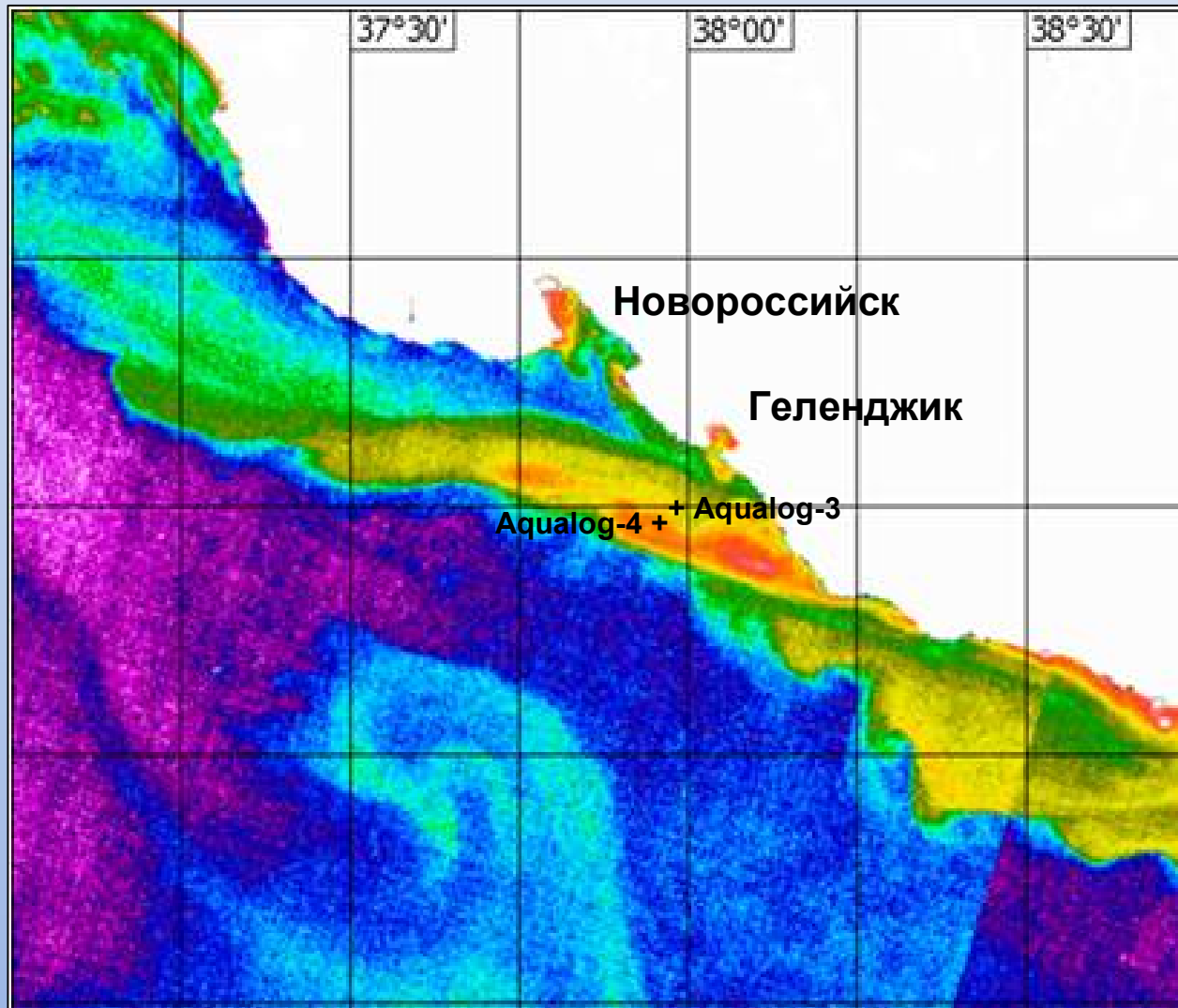


Вертикальные профили зональной (слева) и меридиональной (справа) компонент скорости течений в 1000 м слое по данным измерений зонда-профилографа Аквалог (Черное море, 17-19 июня 2011 г). Синие точки – индивидуальные измерения, красные линии – профили средних значений скорости течения, черные линии – стандартное отклонение. Частота зондирования – раз в 3 часа.

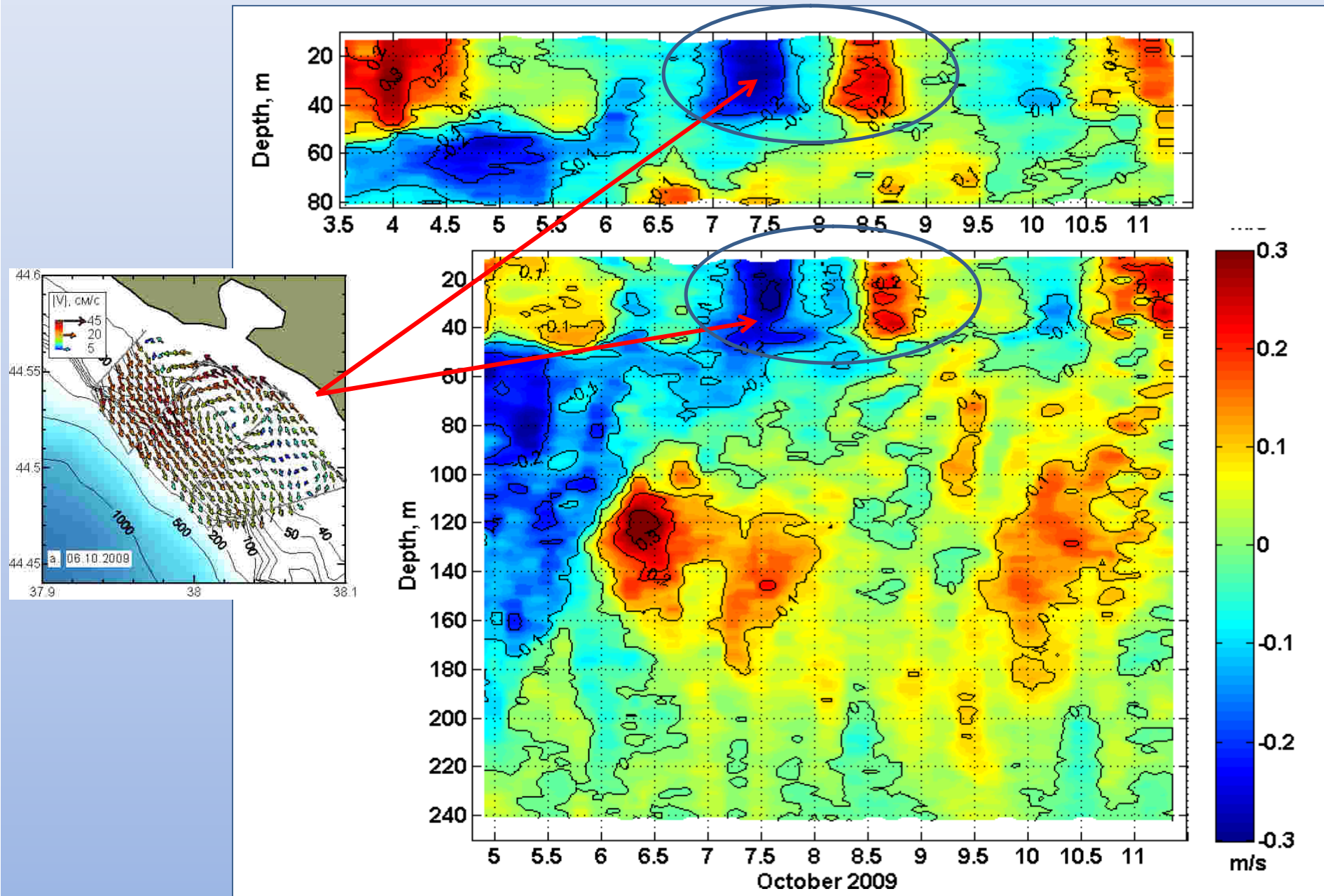
# Постановка «Аквалога» на заякоренную линию в Черном море с катера «Ашамба»



Спутниковое изображение концентрации хлорофилла<sub>a</sub> в новороссийско-геленджикском районе Черного моря (MERIS-Envisat, 3 окт. 2009 г.) и точки постановки двух заякоренных станций: Аквалог-3 (90 м), и Аквалог-4 (270 м).



# Вдольберег. составл. скор. течения: Аквалог-3 (верх) Аквалог-4 (низ)



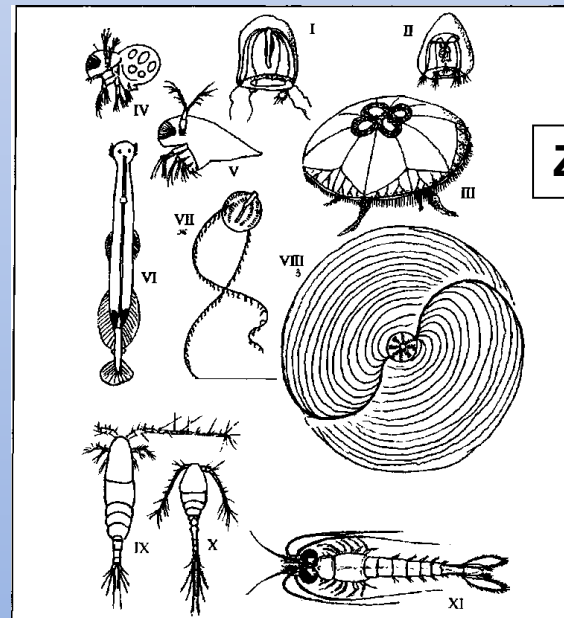
## Анализ сигнала акустического рассеяния измерителя скорости Nortek Aquadop – 2 мГц

Амплитуда сигнала обратного рассеяния звука на различных частотах зависит от размера частиц, на которых происходит рассеяние. При этом пиковые амплитуды рассеяния наблюдаются для частиц радиус которых “а” удовлетворяет условию:  $k \cdot a = 1$ , где “к” =  $2\pi/\lambda = 2\pi f/c$  – волновое число. Данные Aquadop отображают сигнал рассеяния на частицах, для которых  $10 > k \cdot a > 0.1$ , что соответствует частицам с радиусом от 10 микрон до 1 мм.

Frequency (MHz)	Particle diameter for $k \cdot a = 1$
10	50 $\mu\text{m}$
3.0	160 $\mu\text{m}$
1.5	320 $\mu\text{m}$
0.50	960 $\mu\text{m}$

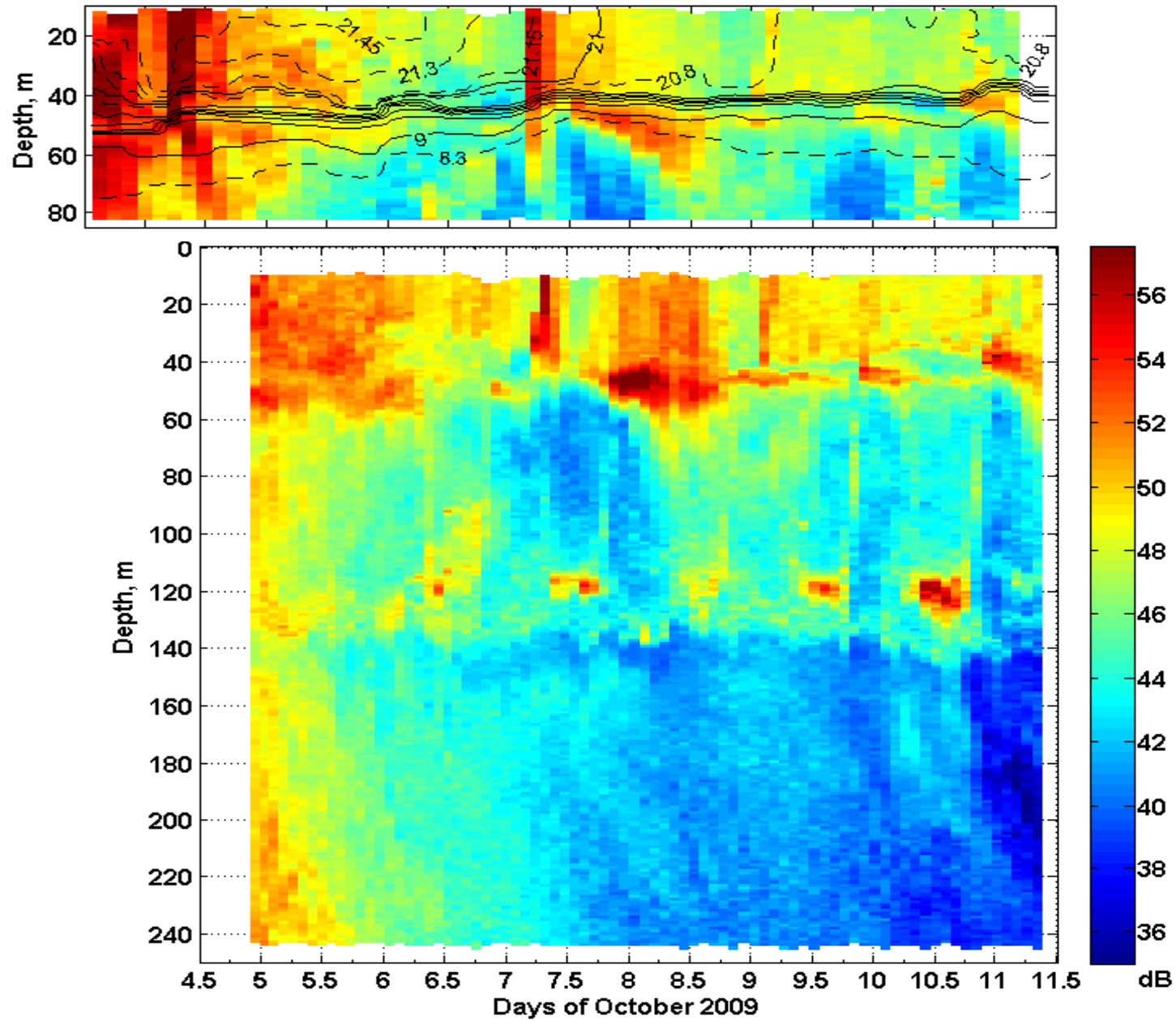
### Zooplankton scatterers:

- swim-bladdered fish,
- Pteropods,
- Copepods.

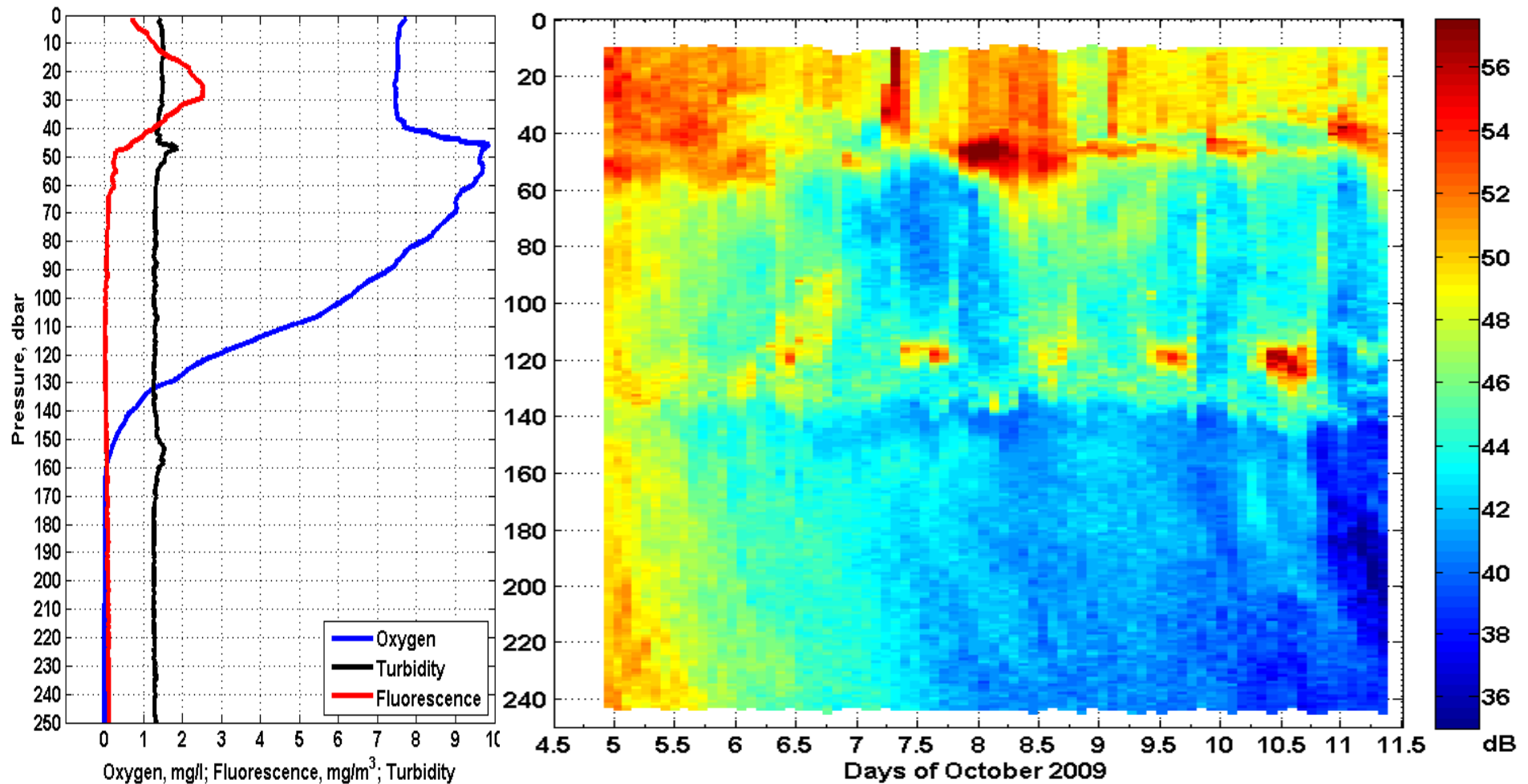


Zaitsev, 1998

# Изменчивость сигнала акустического рассеяния Nortek Aquadop

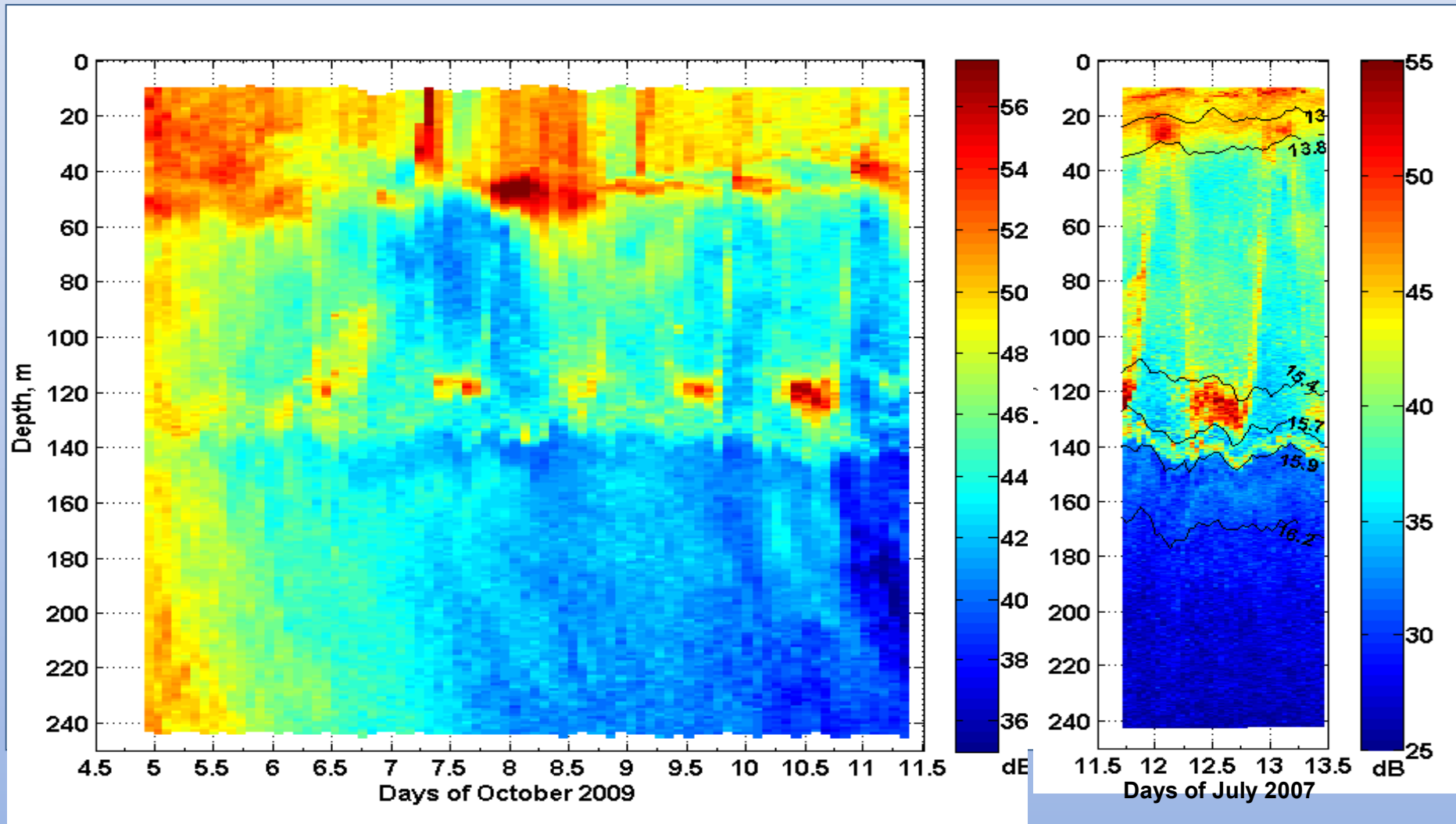


**Изменчивость сигнала акустического рассеяния Nortek Aquador (справа) и сопутствующие профили концентрации растворенного кислорода (синяя кривая), флуоресценции хлорофилла (красная кривая), мутности (черная кривая)**

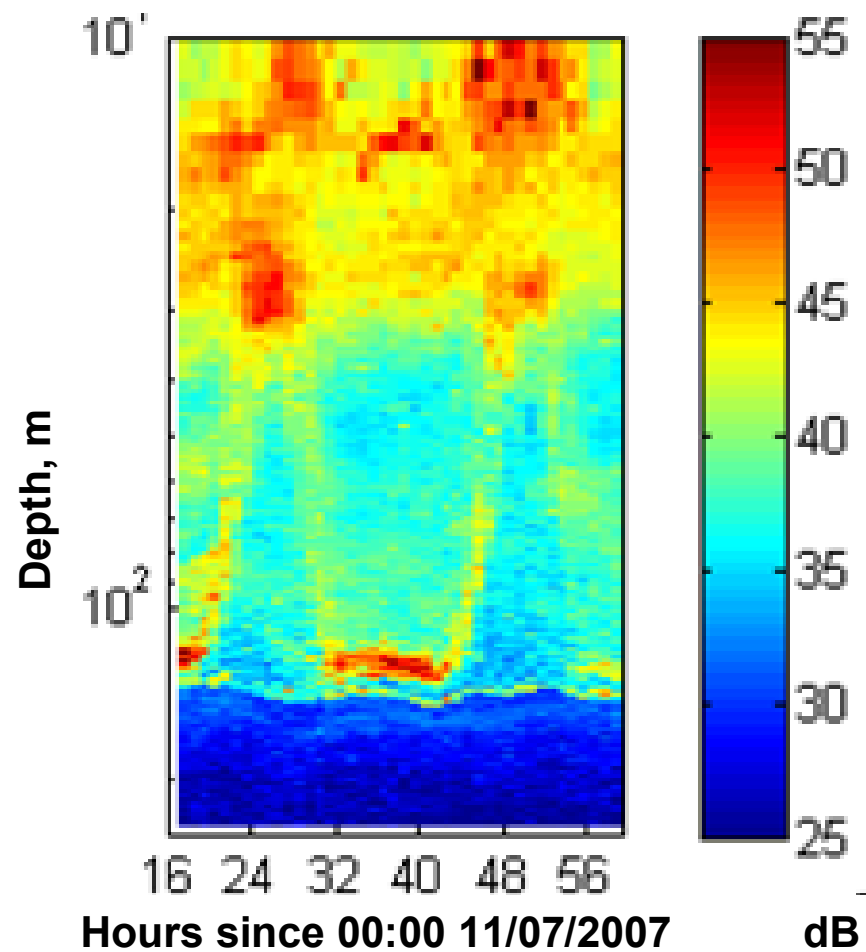




Изменчивость сигнала акустического рассеяния Nortek Aquadop в октябре 2009 г. (слева) и в июле 2007 г. (справа). Частота зондирования в окт. 2009 г. – раз в 2 часа, в 2007 г. – раз в час.



# Сигнал акустического рассеяния как индикатор суточных миграций зоопланктона



«Портрет» зоопланктонного вида *Calanus euxinus*, совершающего суточные миграции в Черном море



## Выводы (3)

Сигнал обратного акустического рассеяния измерителя скорости течения Nortek Aquadop (2 мГц), установленного на заякоренном автономном зонде-профилографе «Аквалог», является хорошим индикатором частиц фито- и зоопланктона размером от десятков микрон до нескольких миллиметров. Анализ этого сигнала, полученного при многократных зондированиях водной среды Черного моря позволил выделить суточные вертикальные миграции зоопланктона от нижней границы кислородной зоны (120-150 м) до верхнего перемешанного слоя. Характерная скорость вертикального перемещения зоопланктона во время миграции имеет порядок 1 см/с. Сопутствующие измерения сетные ловы зоопланктона позволили установить, что мигрирующим видом является *Calanus euxinus*.