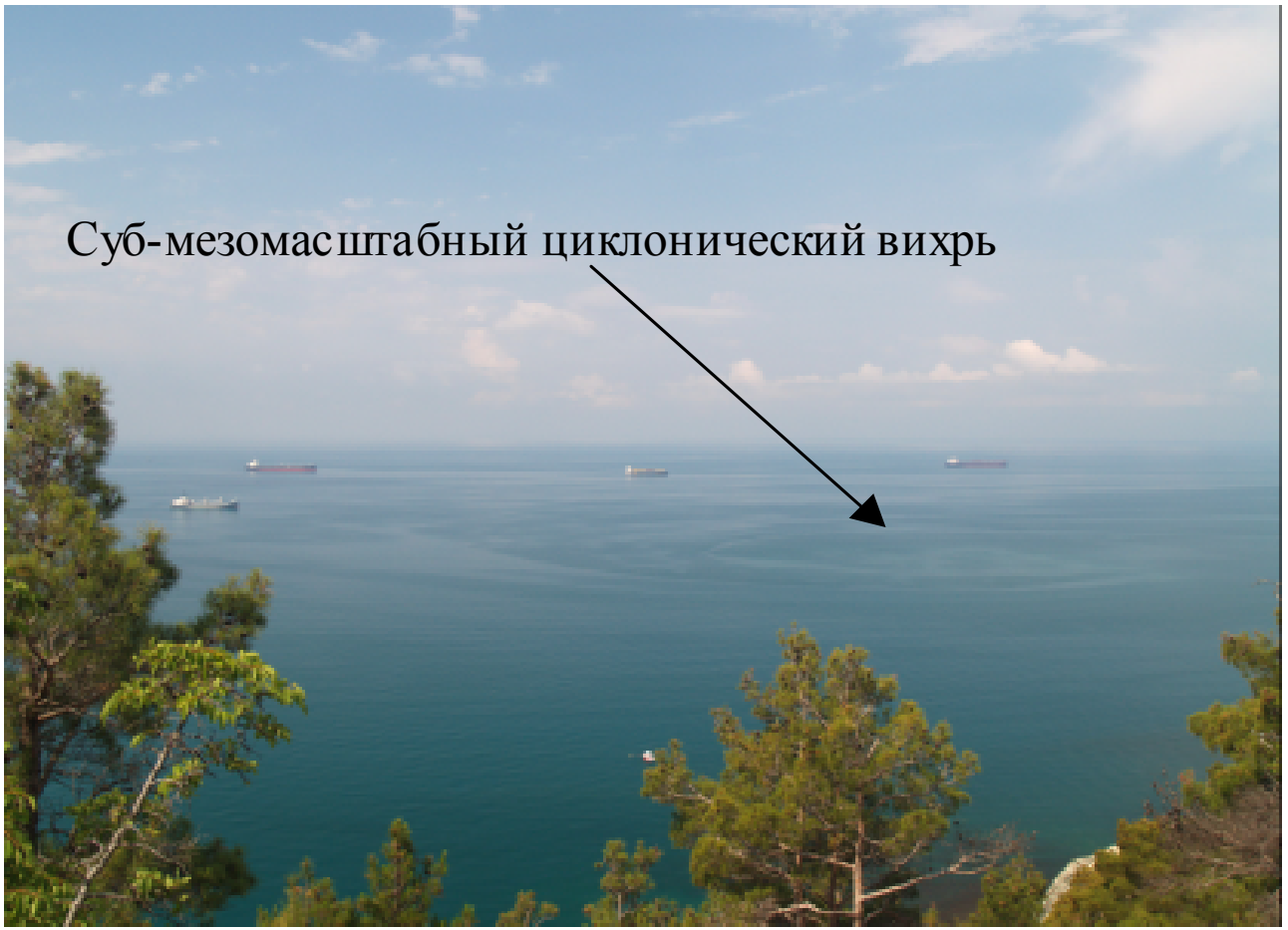
Зацепин А.Г.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

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

   Характерный горизонтальный масштаб - **$D = 2R$** ~ 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** ~ 10 км

   Время жизни – не вполне известно (несколько суток?)

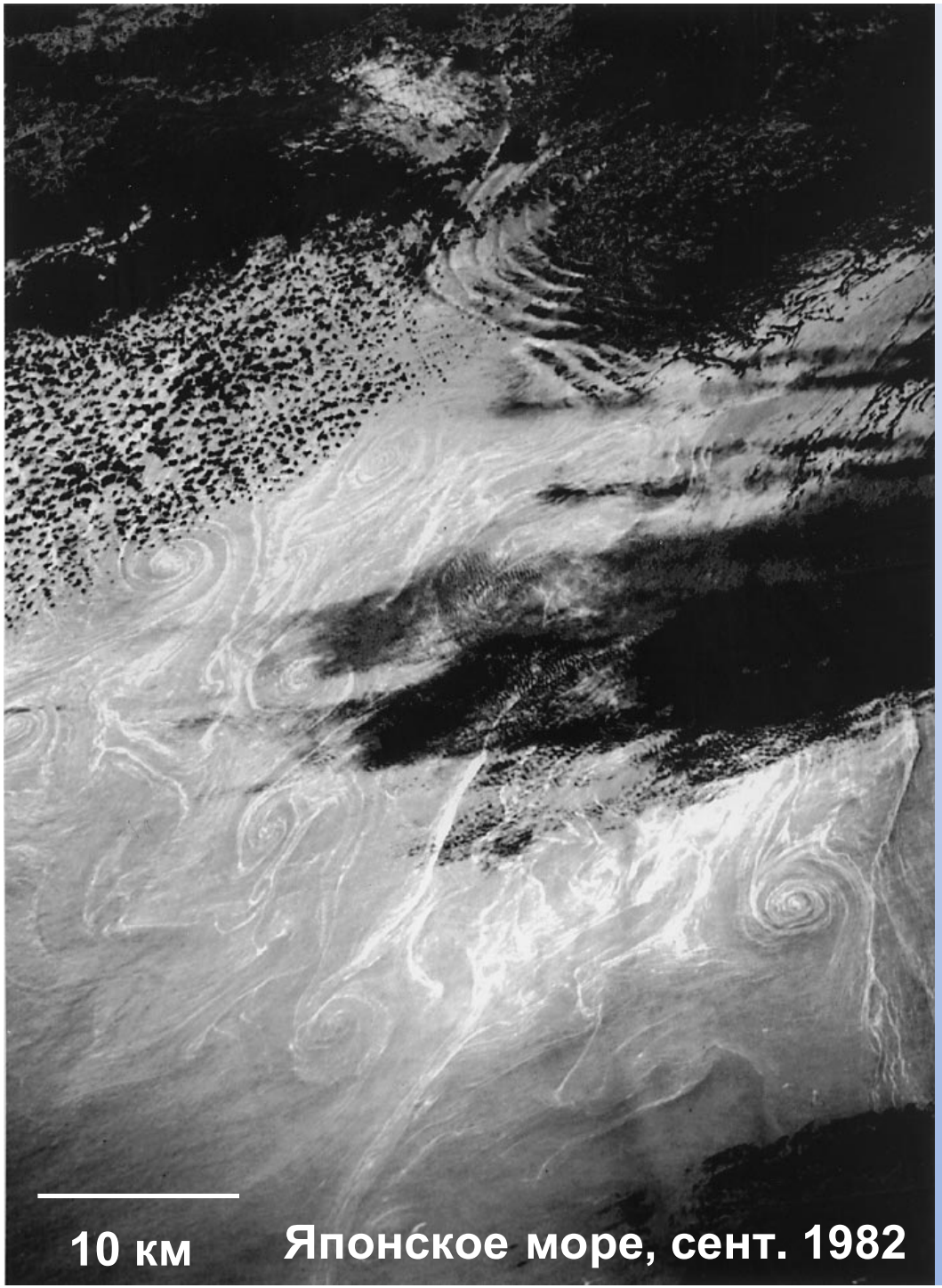
   Механизмы образования – не вполне известны

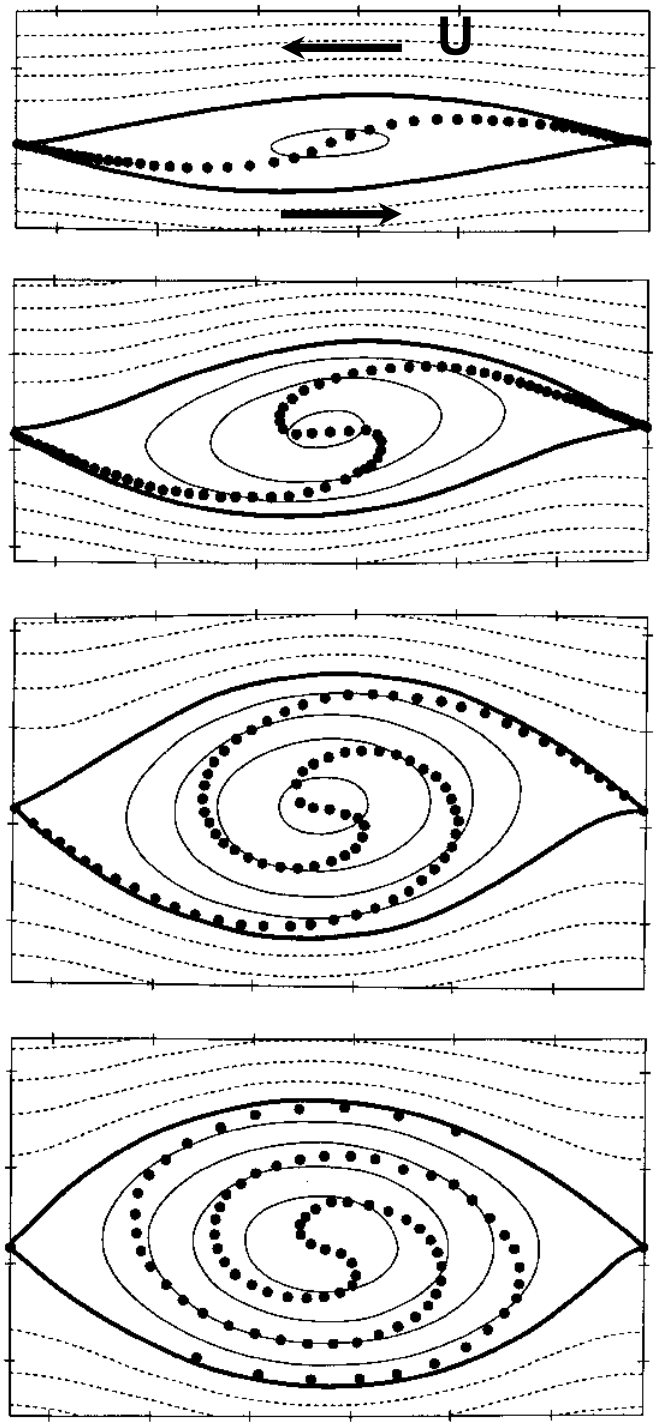
Краткая история исследований субмезомасштабных вихрей

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».**


10 км
Японское море, сент. 1982


U

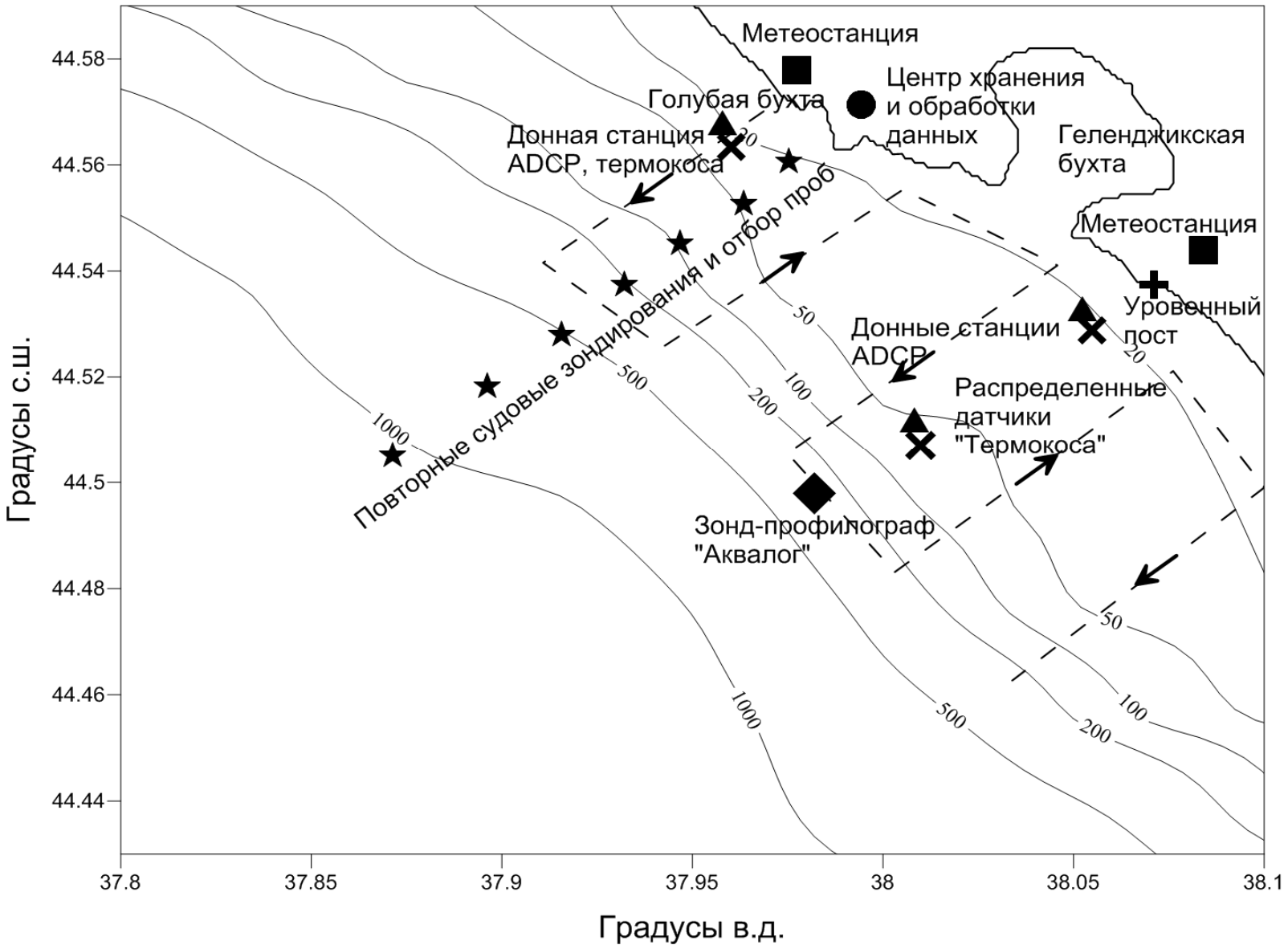
Лаврова, Костяной, и др., 2011. Комплексный спутниковый мониторинг морей России; **Каримова, 2012.** Канд. дис. Исслед. субмезомасштаб. вихрей Балтийского, Черного и Каспийского морей по данным спутниковой радиолокации.

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);

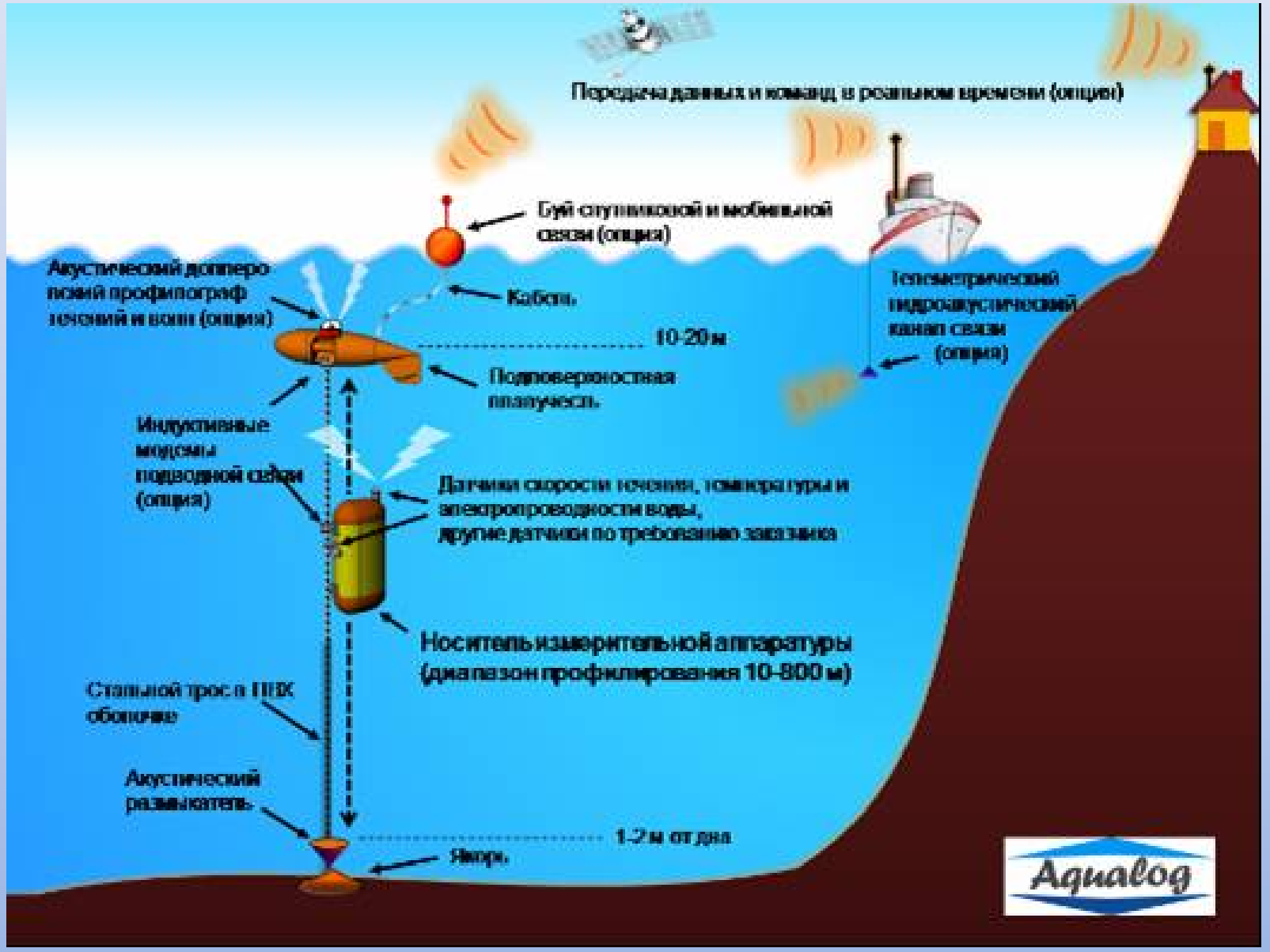
2) квази-мгновенные пространственные съемки поля течений с помощью буксируемого за судном акустического доплеровского профилографа RDI «WorkHorse Mariner ADCP» (300 кГц);

3) судовые резрезы 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 механизмаов их генерации.

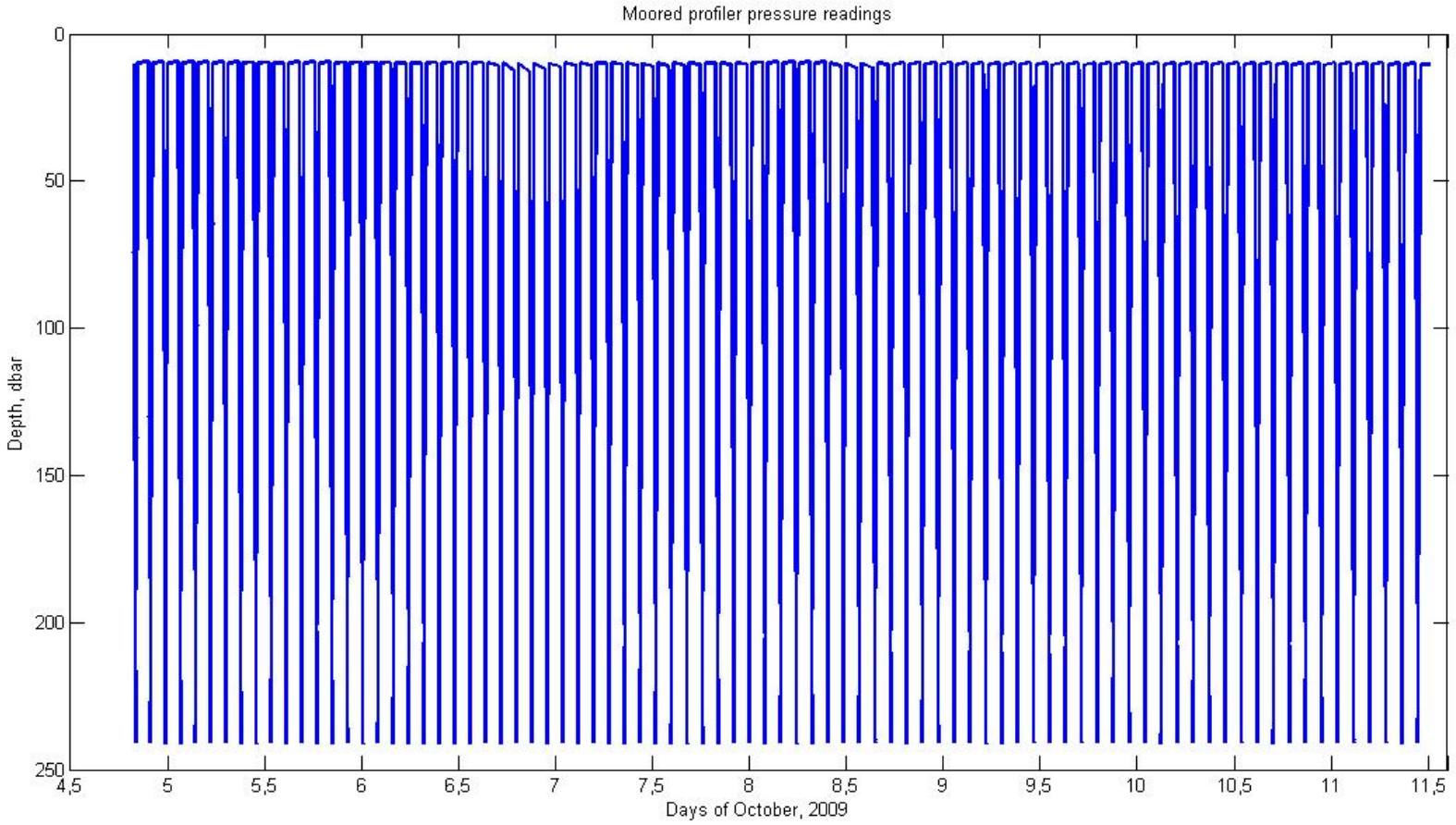
Новый автономный зонд-профилограф «Аквалог» на заякоренной буйковой станции



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

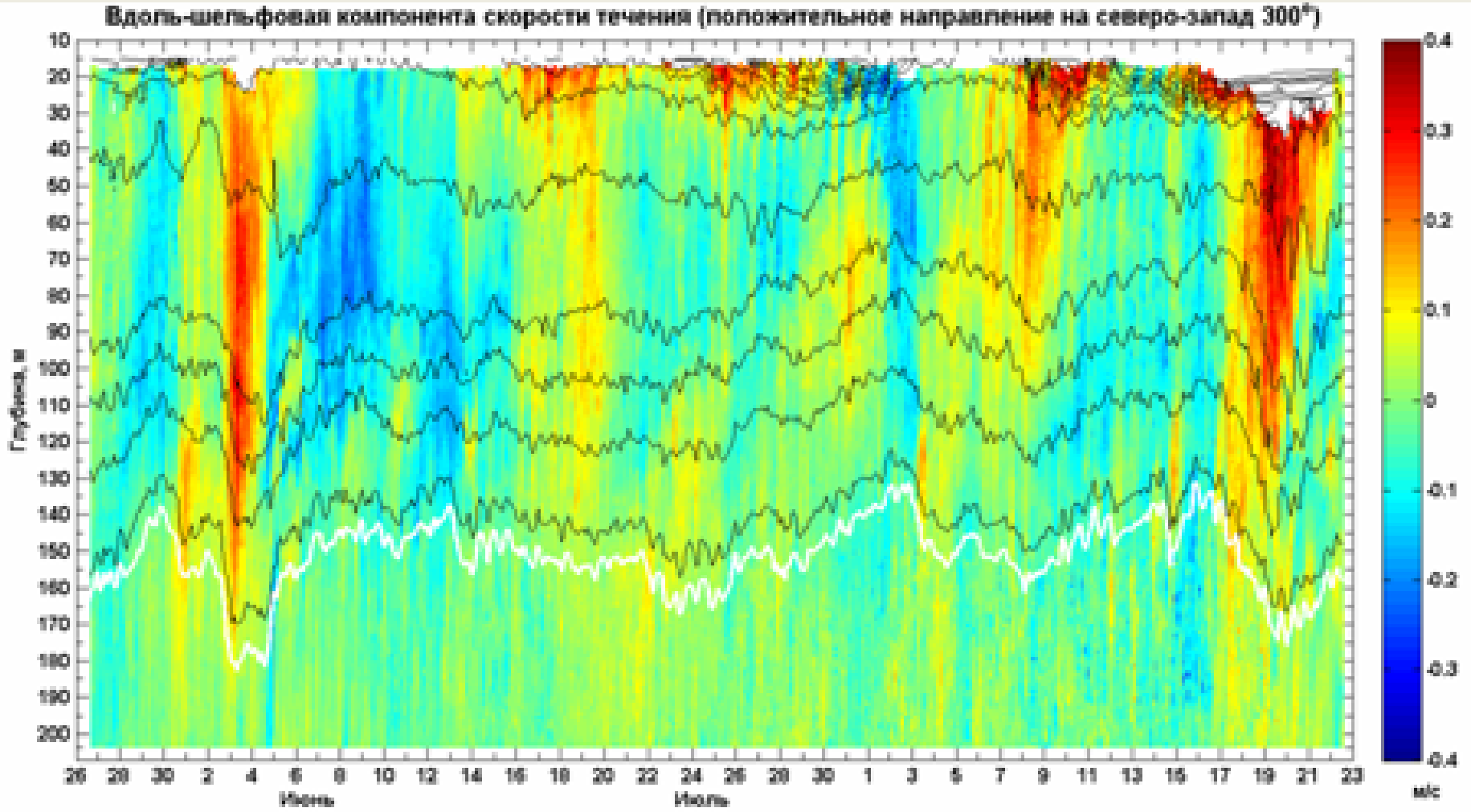
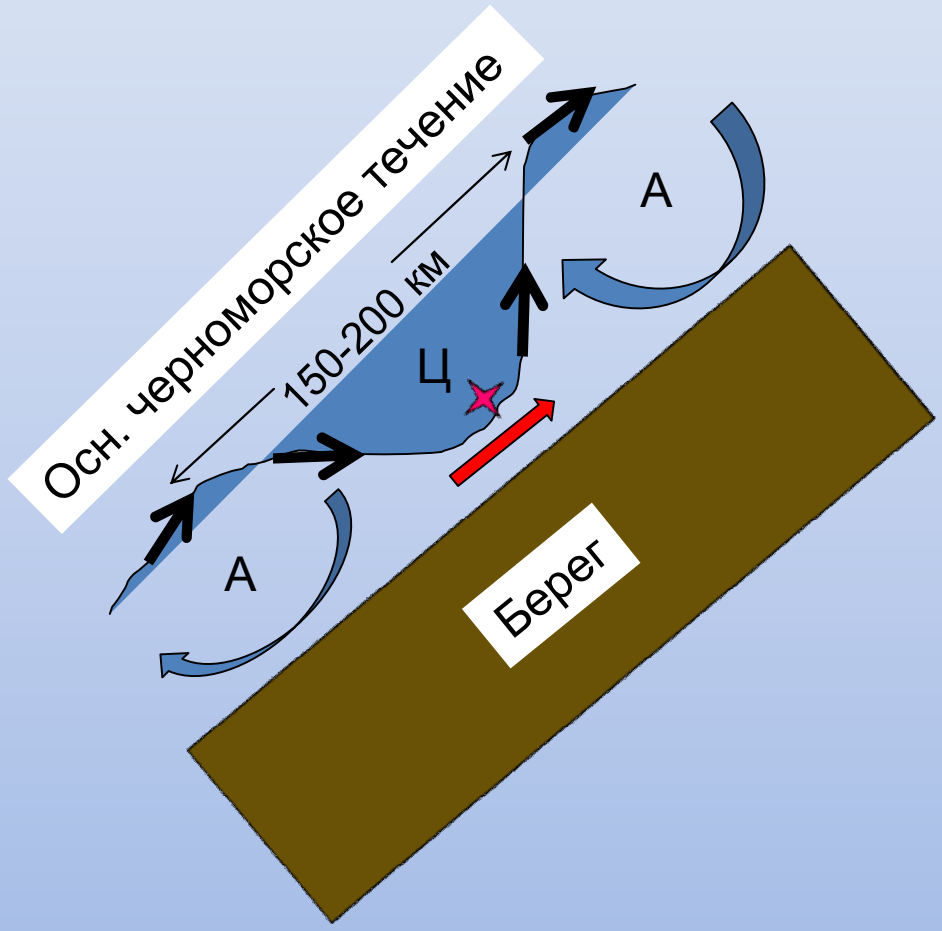
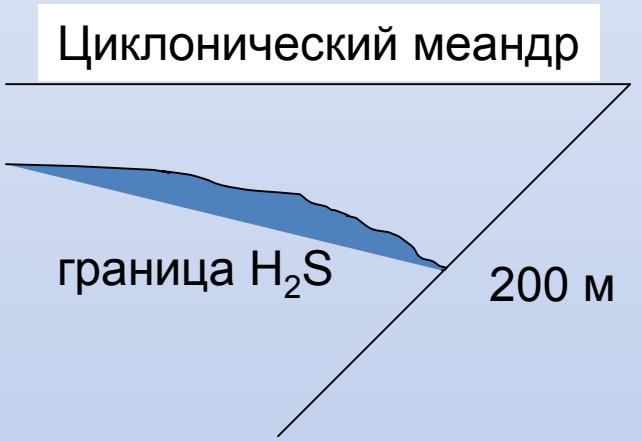
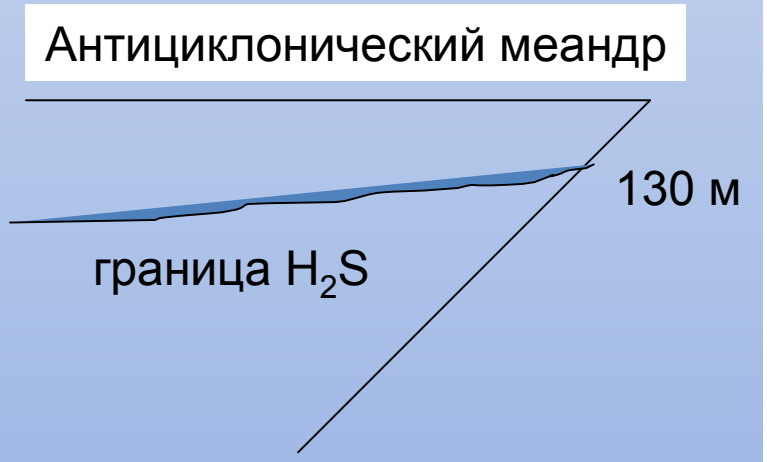


Схема формирования 5-10 суточных колебаний

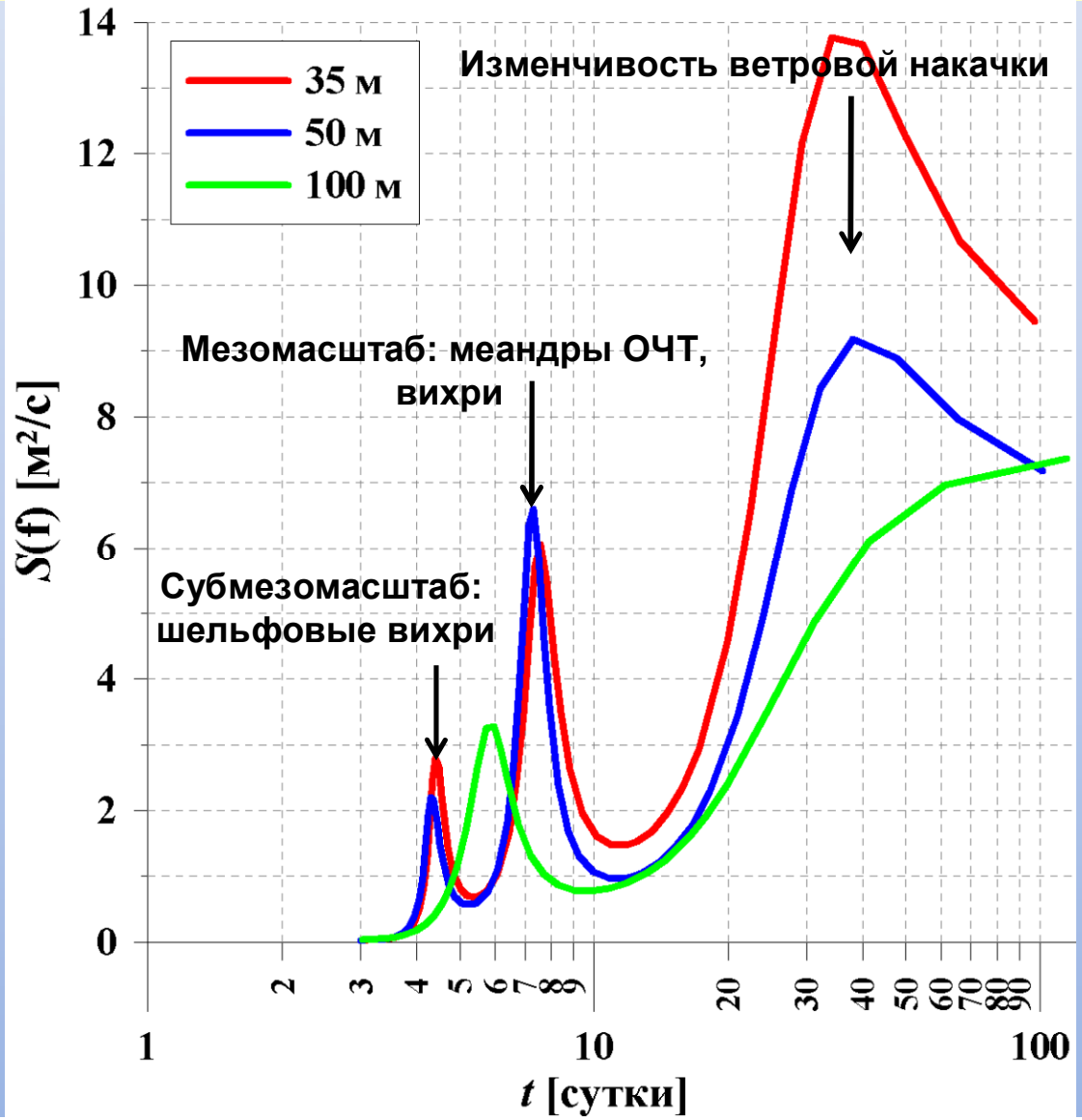


- заякоренная станция «Аквалог»





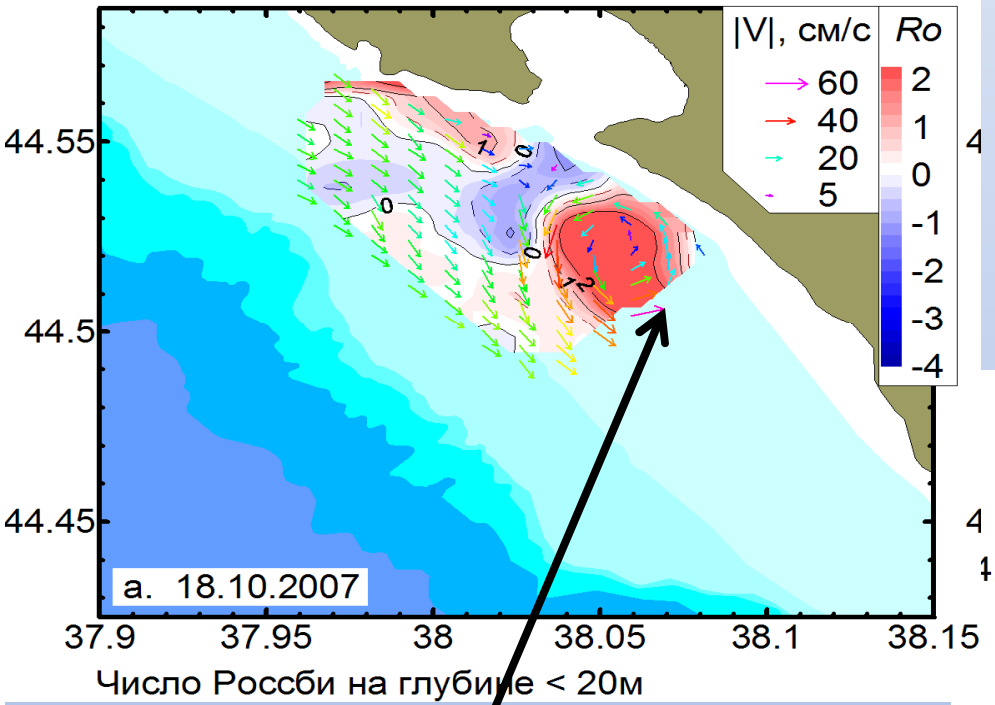
Спектры колебаний энергии течений в верхней части континентального склона (250 м) по данным зонда-профилографа «Аквалог» (годичный ряд)



Пространственная съемка поля скорости течения буксируемым за судном ADCP

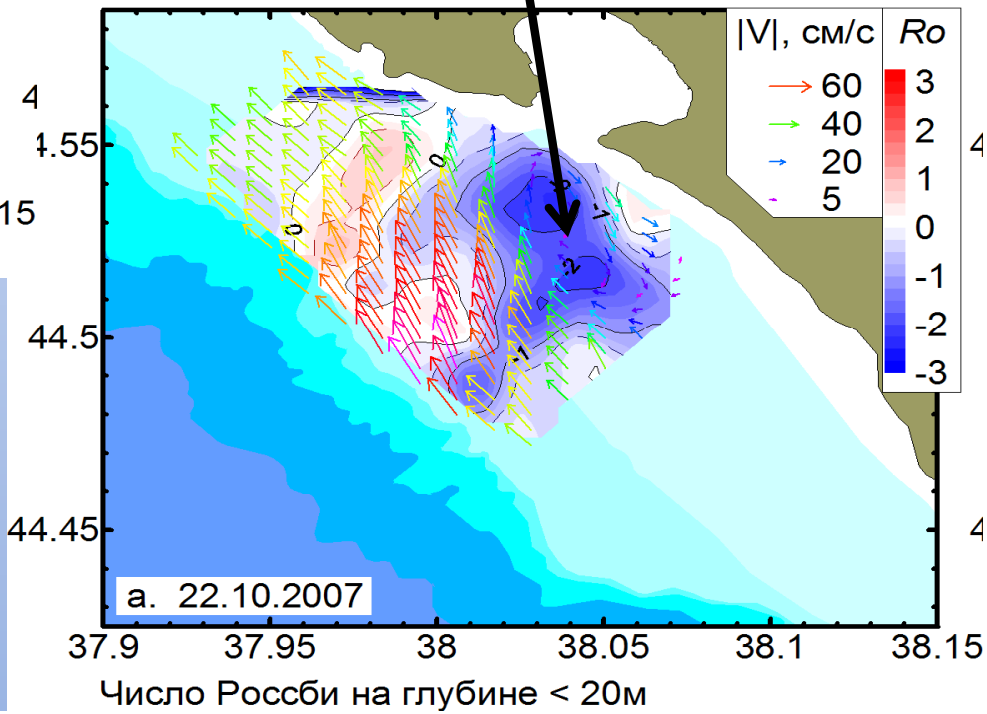
Акустический доплеровский профилограф в гондоле перед началом буксировки на корме «Ашамбы» (слева) и в момент буксировки (справа).

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



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

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



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; ε =0.75; Ro = 1.4

антициклоны – D = 3-6 км; ε =0.80; Ro = 0.8

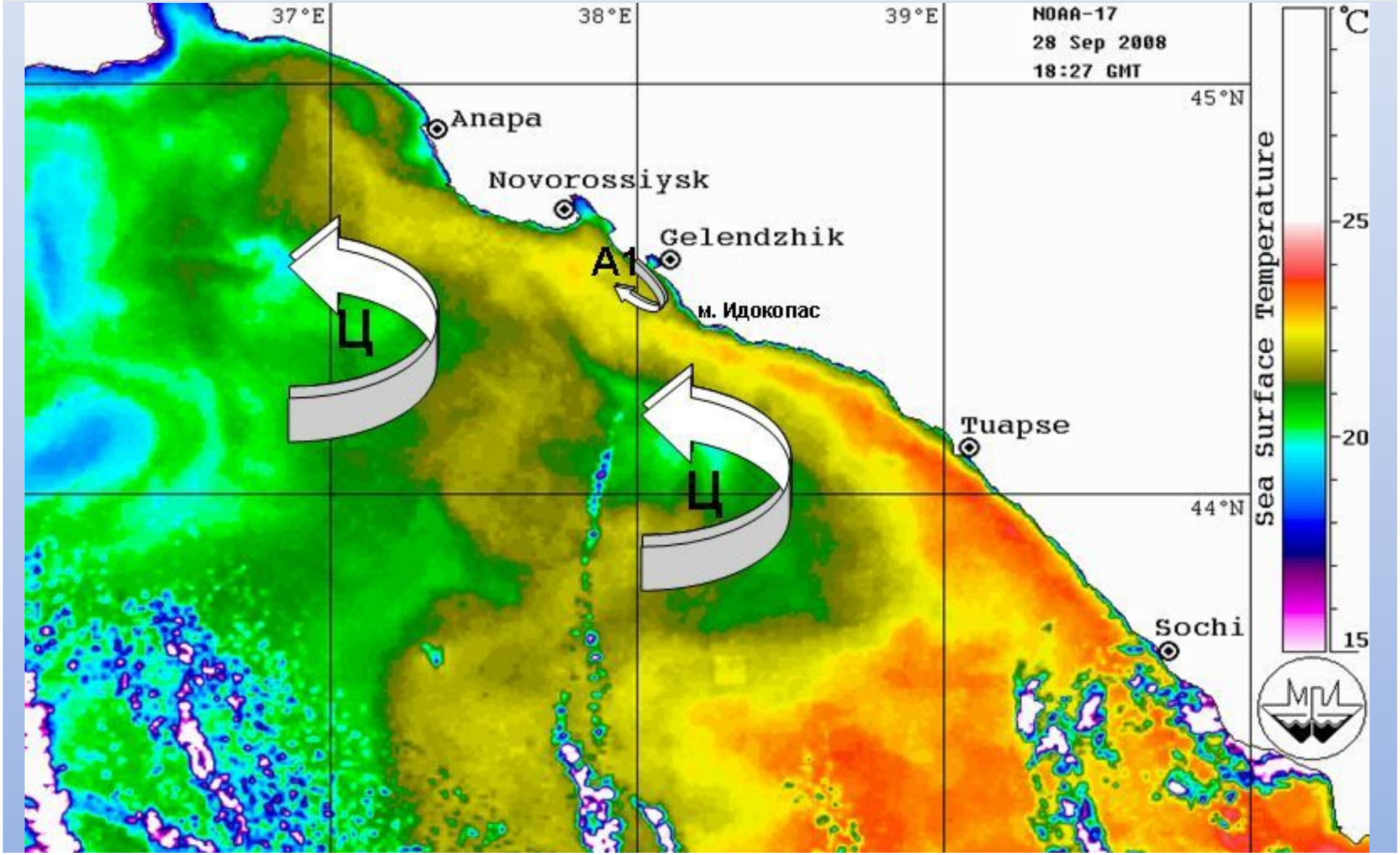
Характерная орбитальная скорость – 20-50 см/с

Максимальная зарегистрированная продолжительность существования вихря – 4 суток (антициклон)

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕЛЬФОВЫХ ВИХРЕЙ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

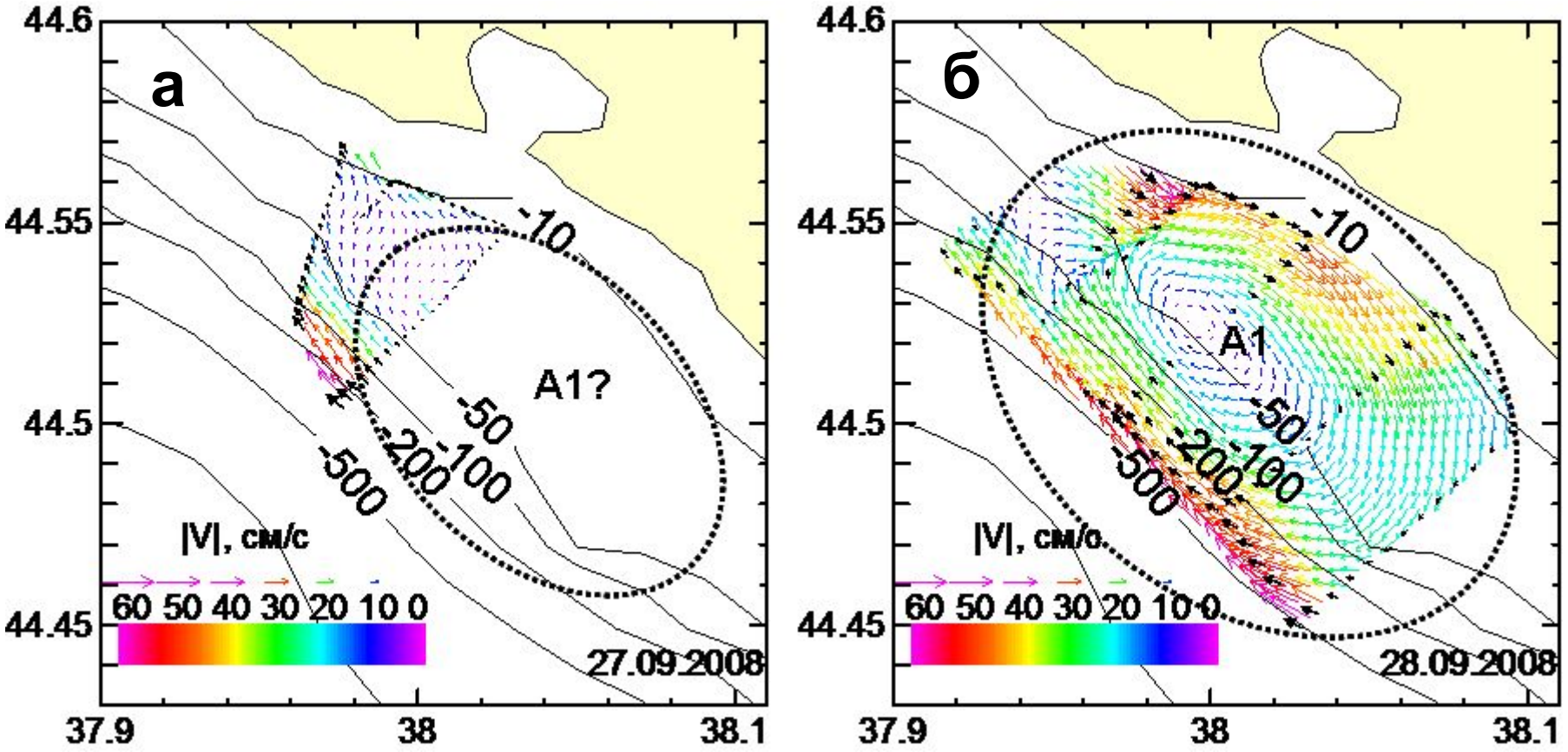
1. ВИХРИ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ

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



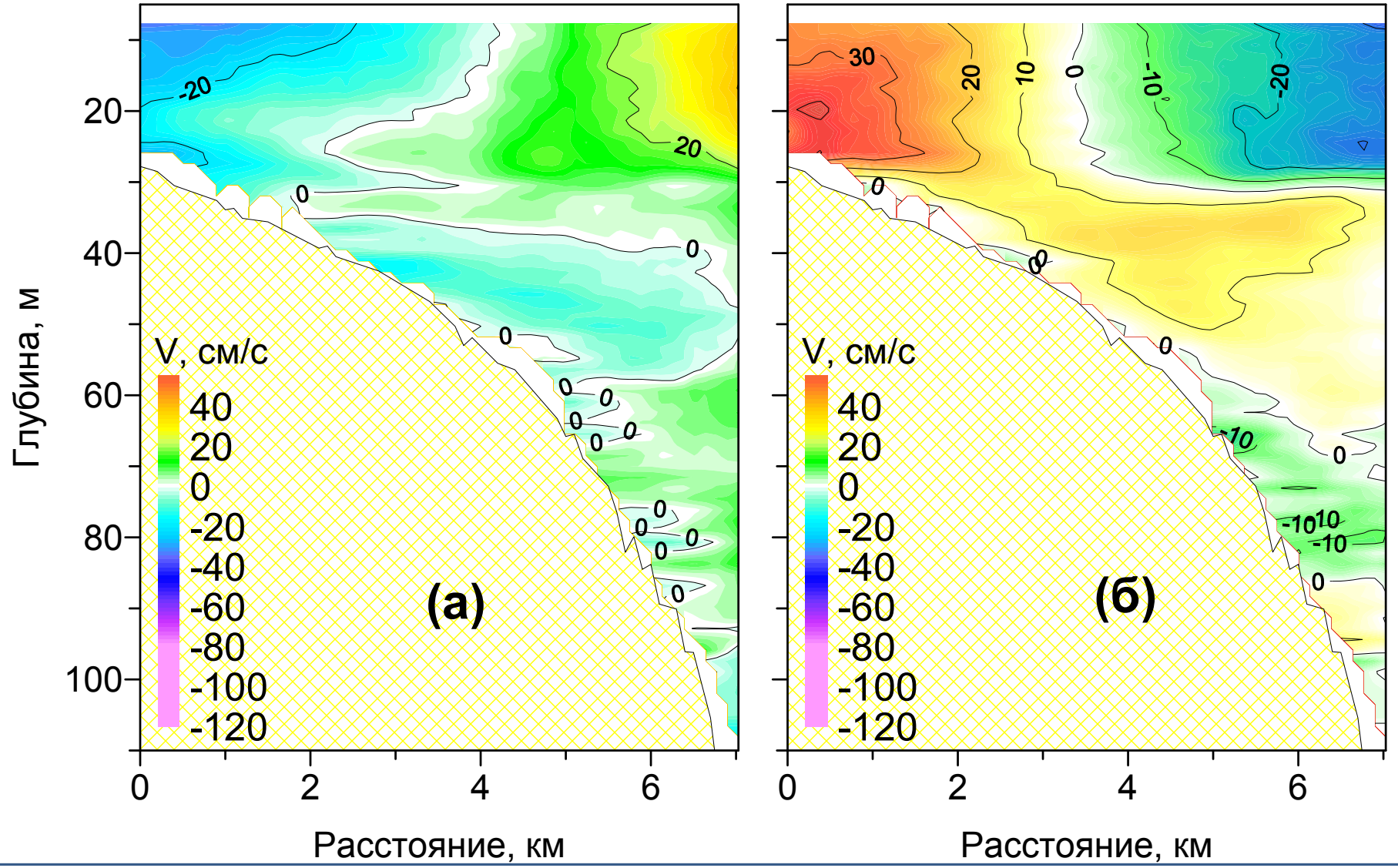
Поле скорости в прибрежно-шельфовой зоне Геленджика по данным ADCP-съемок от 27.09 (а) и 28.09 (б).

Верхний слой, H=30 м

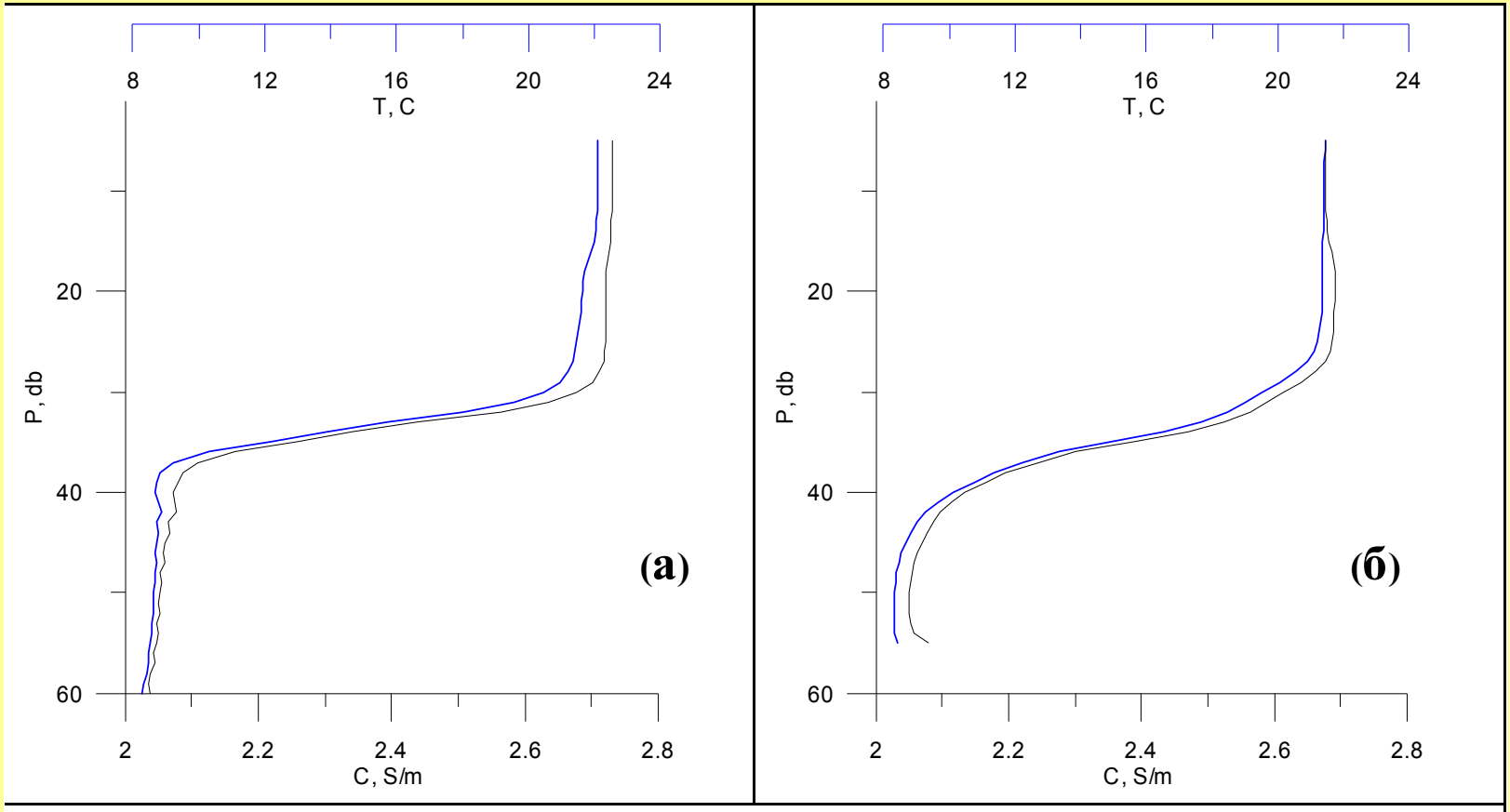


Пунктиром обозначено приблизительное положение субмезомасштабного антициклонического вихря A1

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



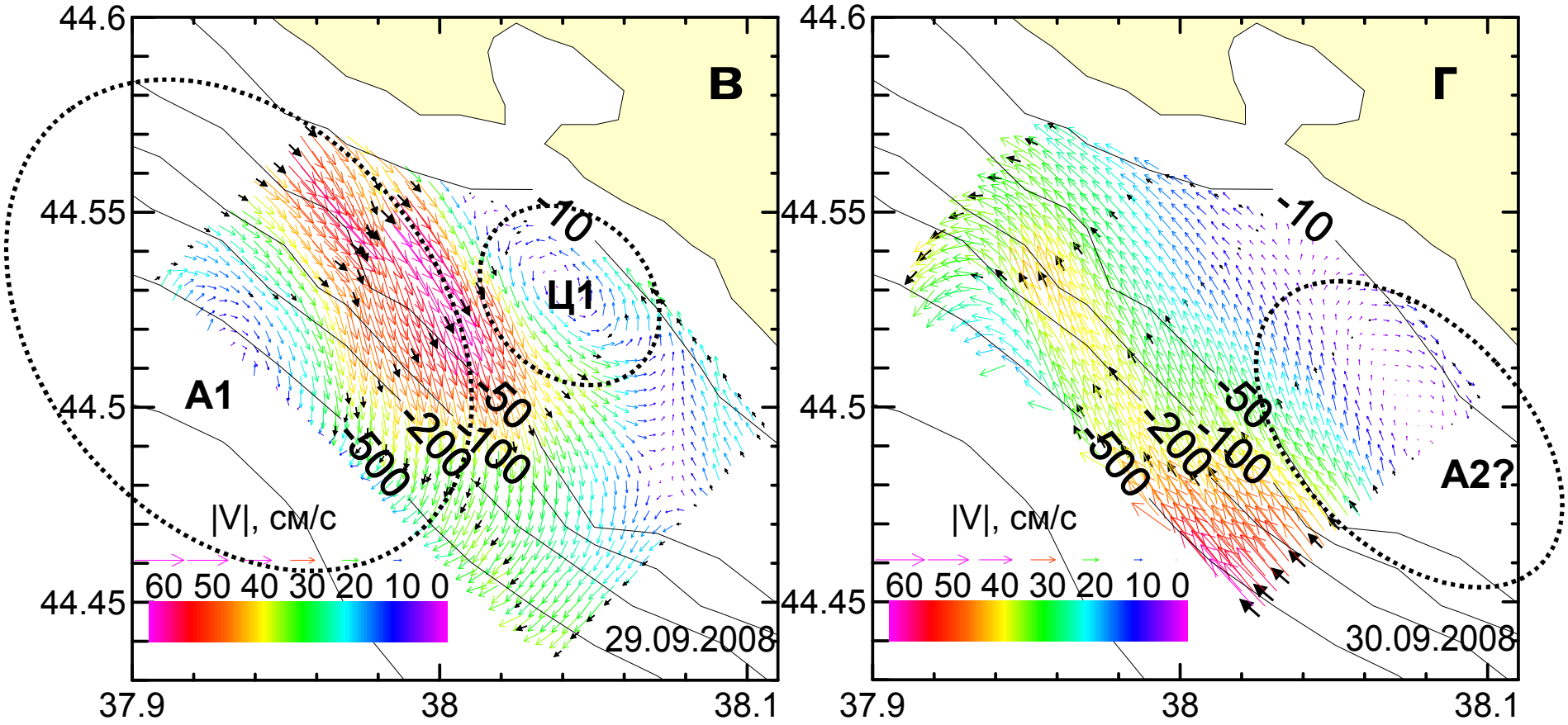
Квазидвуслойная стратификация вод на шельфе



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 $\Delta\rho = 2*10^{-3}$ г/см^3- перепад плотности между слоями, $\rho = 1.0$ г/см^3 - плотность воды, $g = 10^3$ см/с^2 – ускорение свободного падения, $H = 30$ м – толщина верхнего слоя, $f = 10^{-4}$ с$^{-1}$ – параметр Кориолиса.

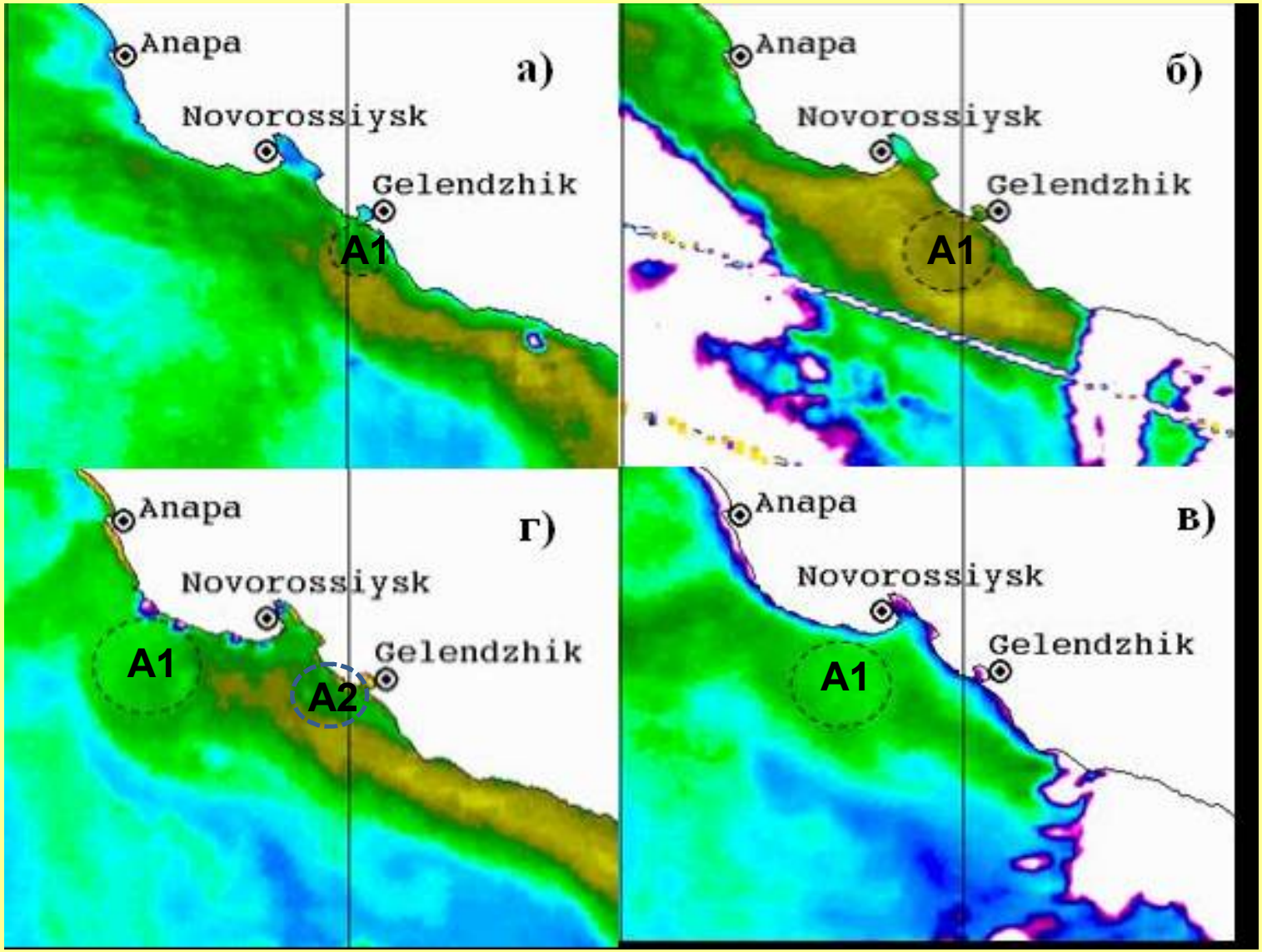
ПОЛЕ СКОРОСТИ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ В РАЙОНЕ ГЕЛЕНДЖИКА ПО ДАННЫМ ADCP-СЪЕМОК ОТ 29.09 (в) И 30.09 (г). ВЕРХНИЙ СЛОЙ, H=30 М



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

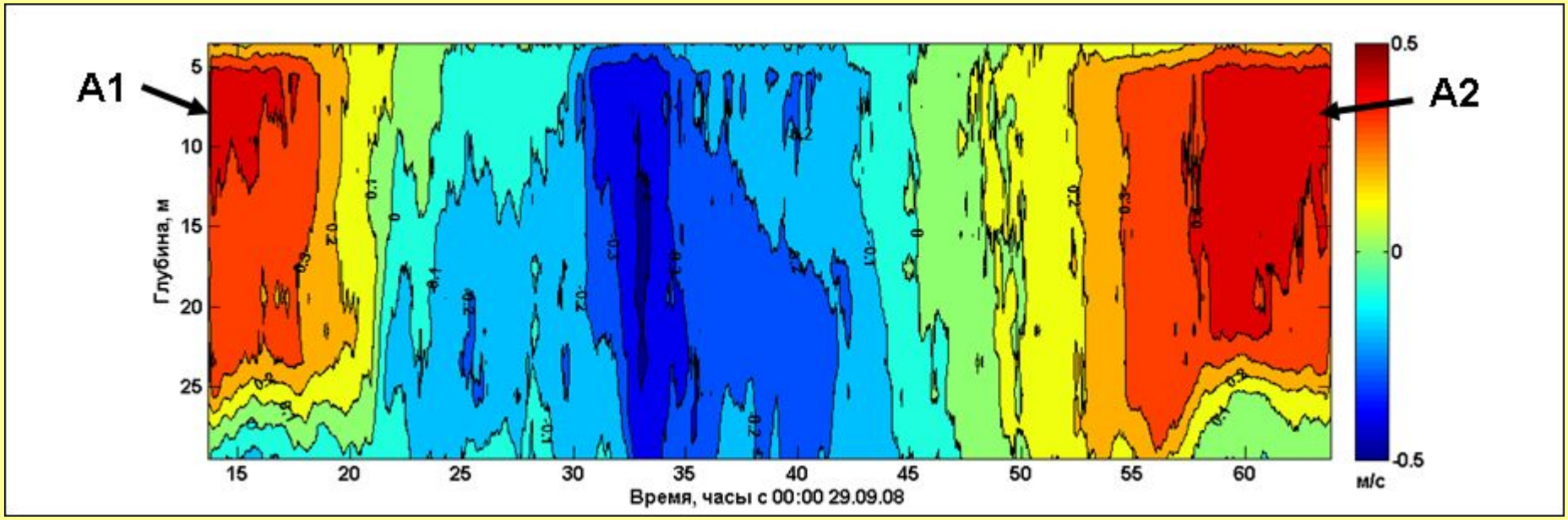
Развитие и перемещение прибрежного антициклона «А1»:

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

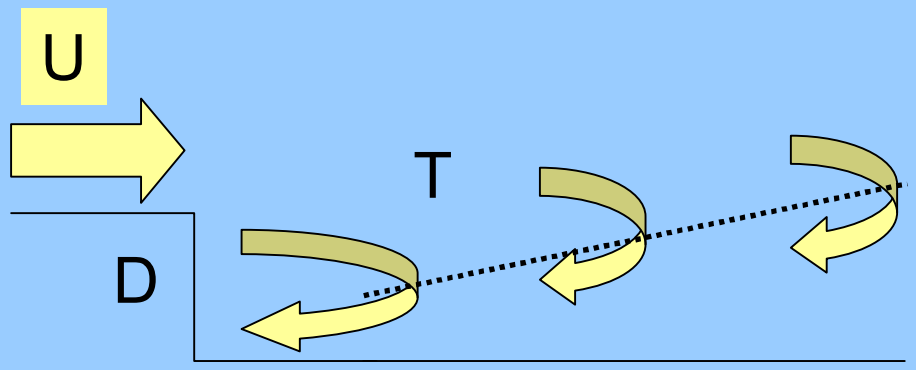


Восточная составляющая скорости течения измеренная донным ADP на шельфе, на глубине 32 м в районе Голубой бухты с 14 час. 29 сент. до 16 час. 01 окт.

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/ν*** $\geq 10^2$ где ***U*** – скорость в ядре набегающего потока, ***ν*** - кинематическая (эффективная) вязкость;
3) ***St = D/UT*** $\approx$ 0.1 - 0.3 - число Струхаля (безразмерная частота срыва, ***T*** – период срыва) для ***Re*** = 200-200000.

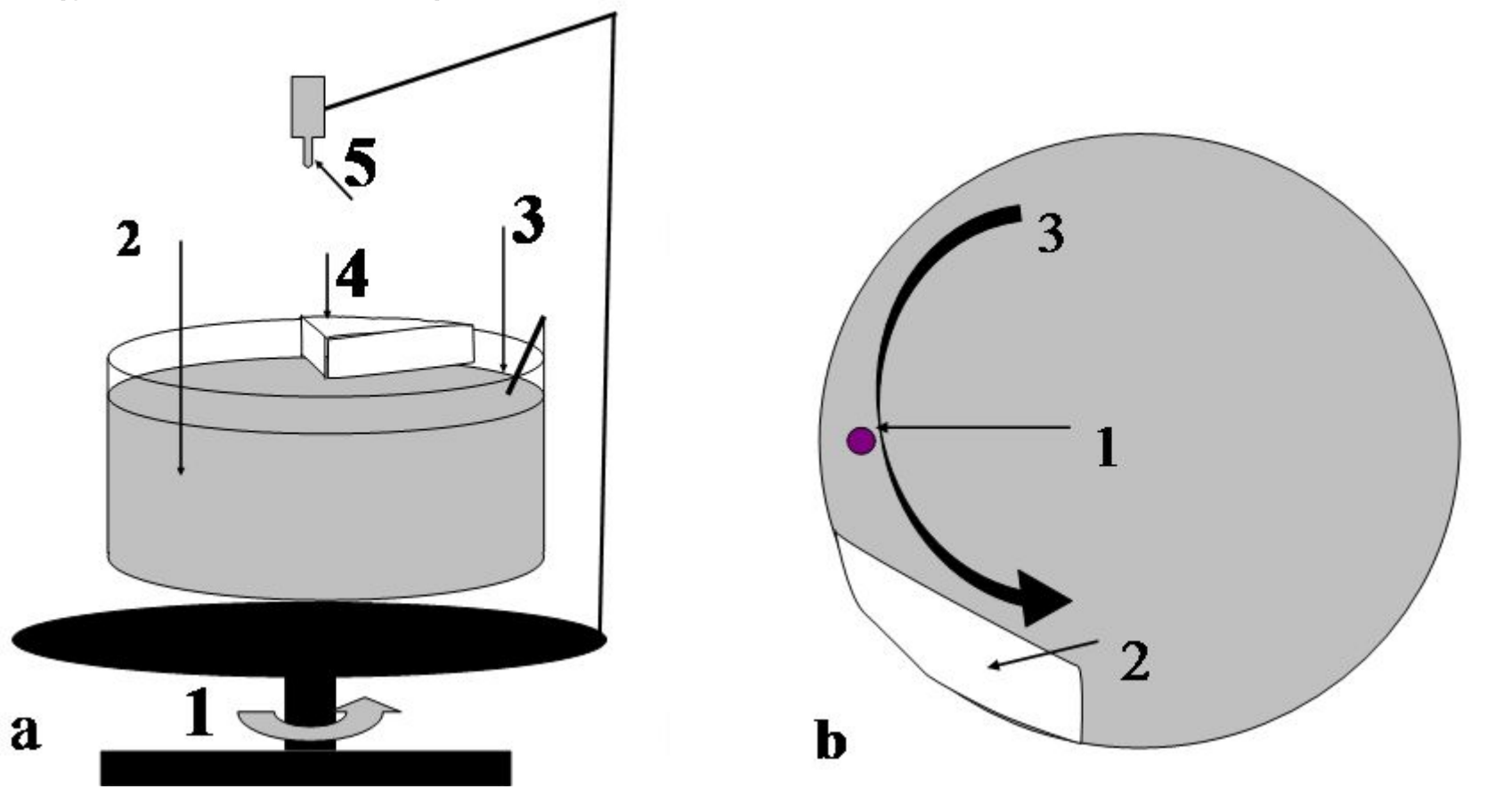


Для природного процесса:

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

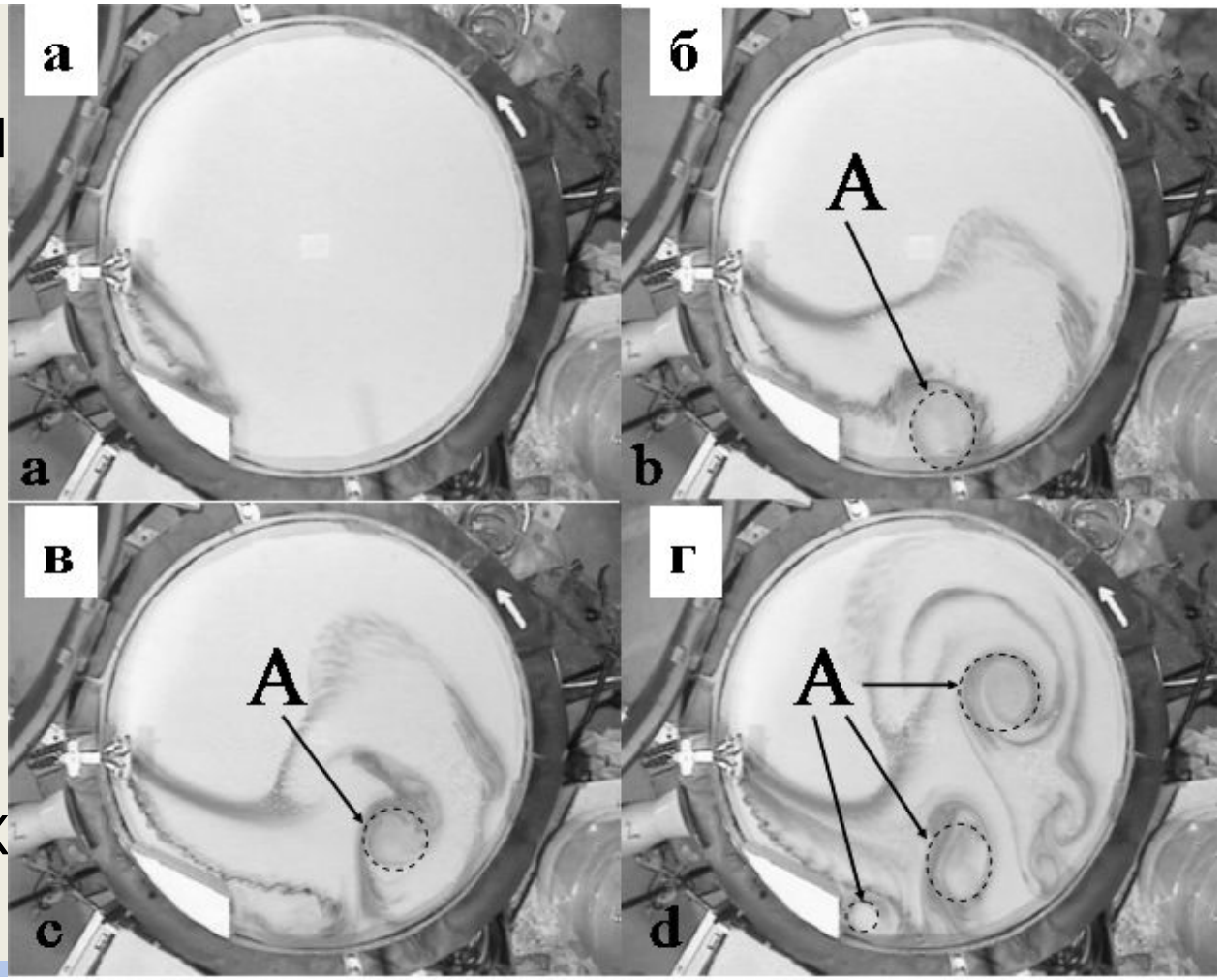
St = D/UT $\approx$ 0.1 !

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;

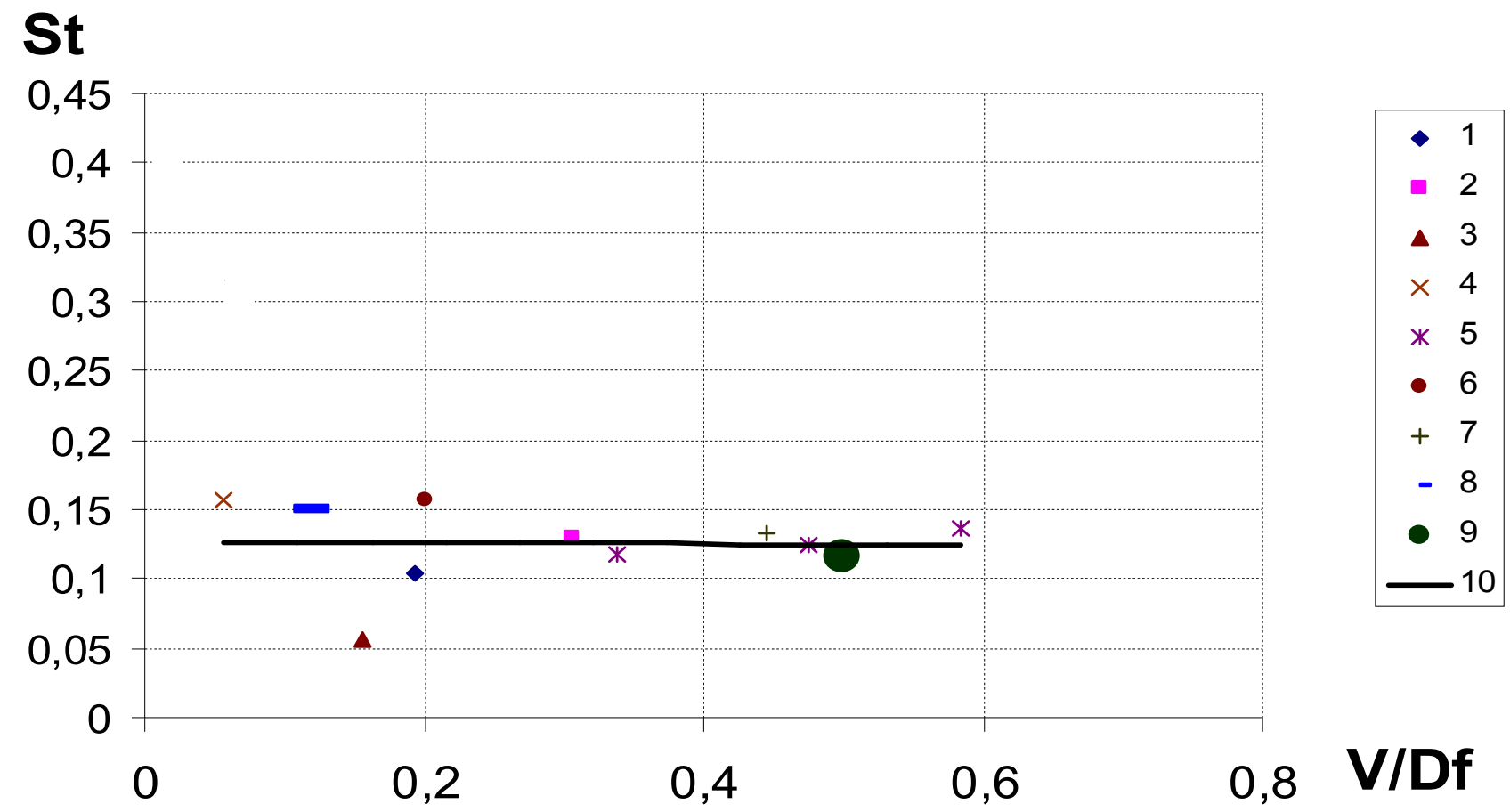
б) t/T_2 = 5 – первый вихрь перед отрывом от полуострова;

в) t/T_2 = 6 – отрыв первого вихря и появление второго;

г) t/T_2 = 9 – отрыв второго и появление третьего вихря.

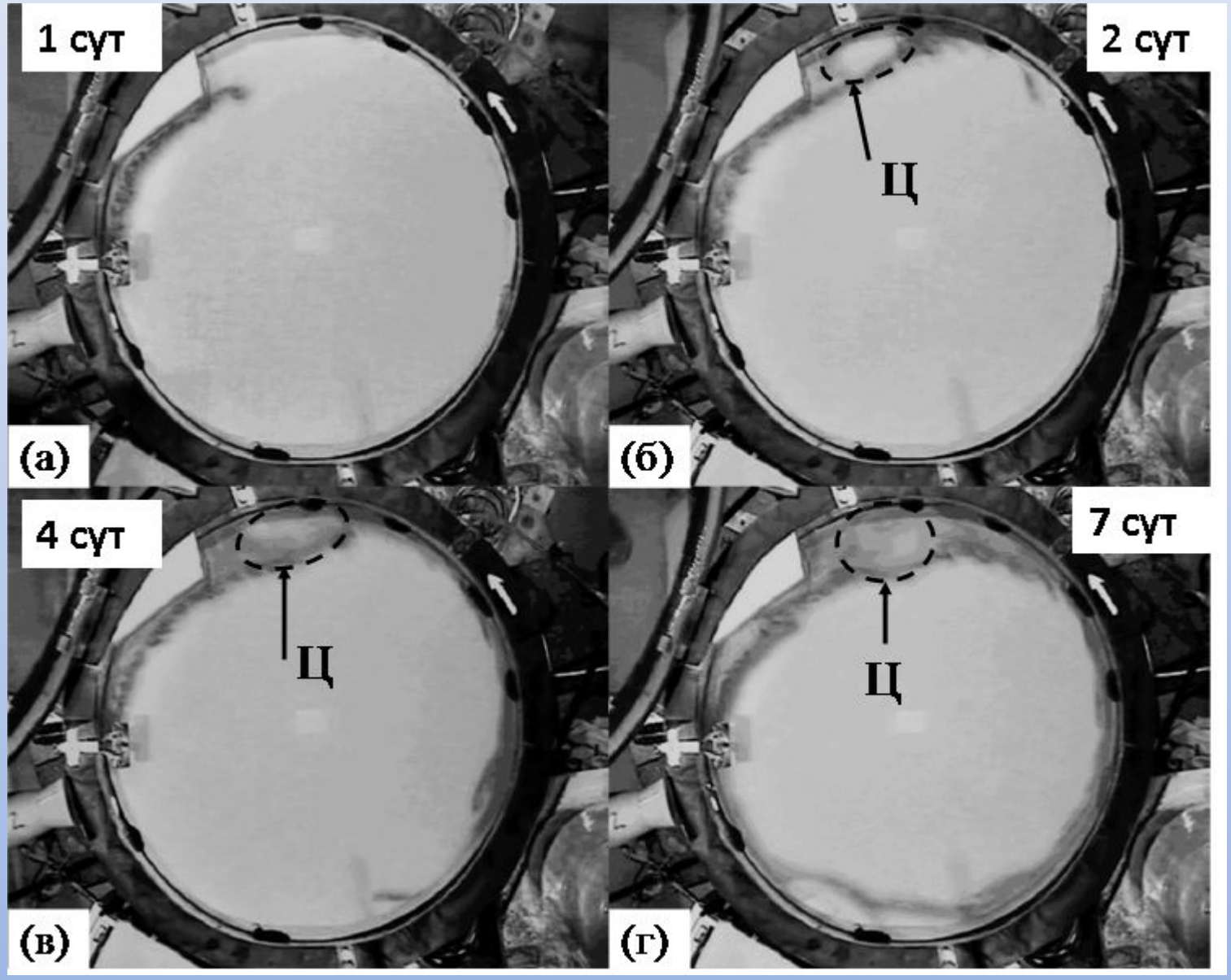
Антициклонические вихри (А) маркированы пунктиром. **ФИЛЬМ №1**

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

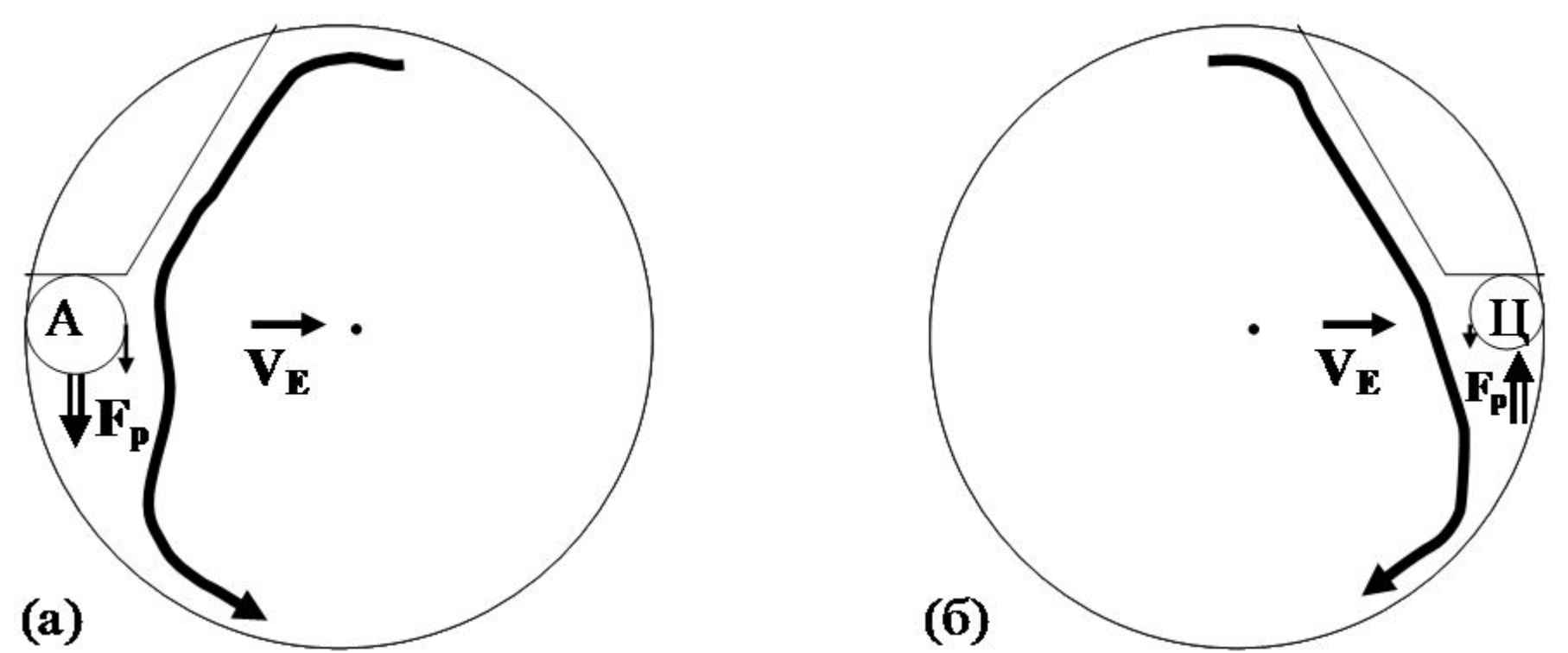
Другие серии опытов

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 запрепятственного вихря



Тормозящееся циклоническое течение

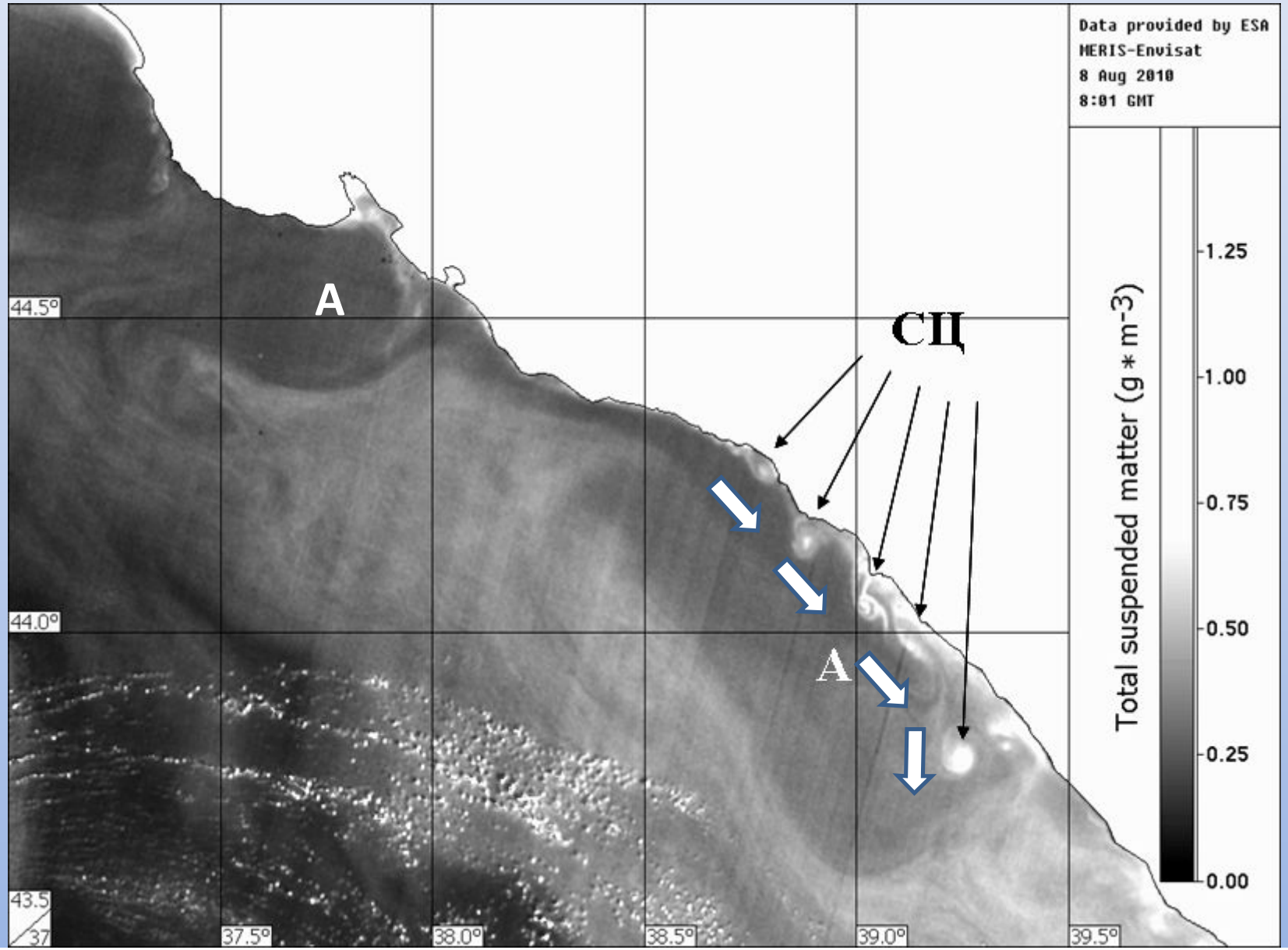
Тормозящееся антициклоническое течение

Промежуточные выводы

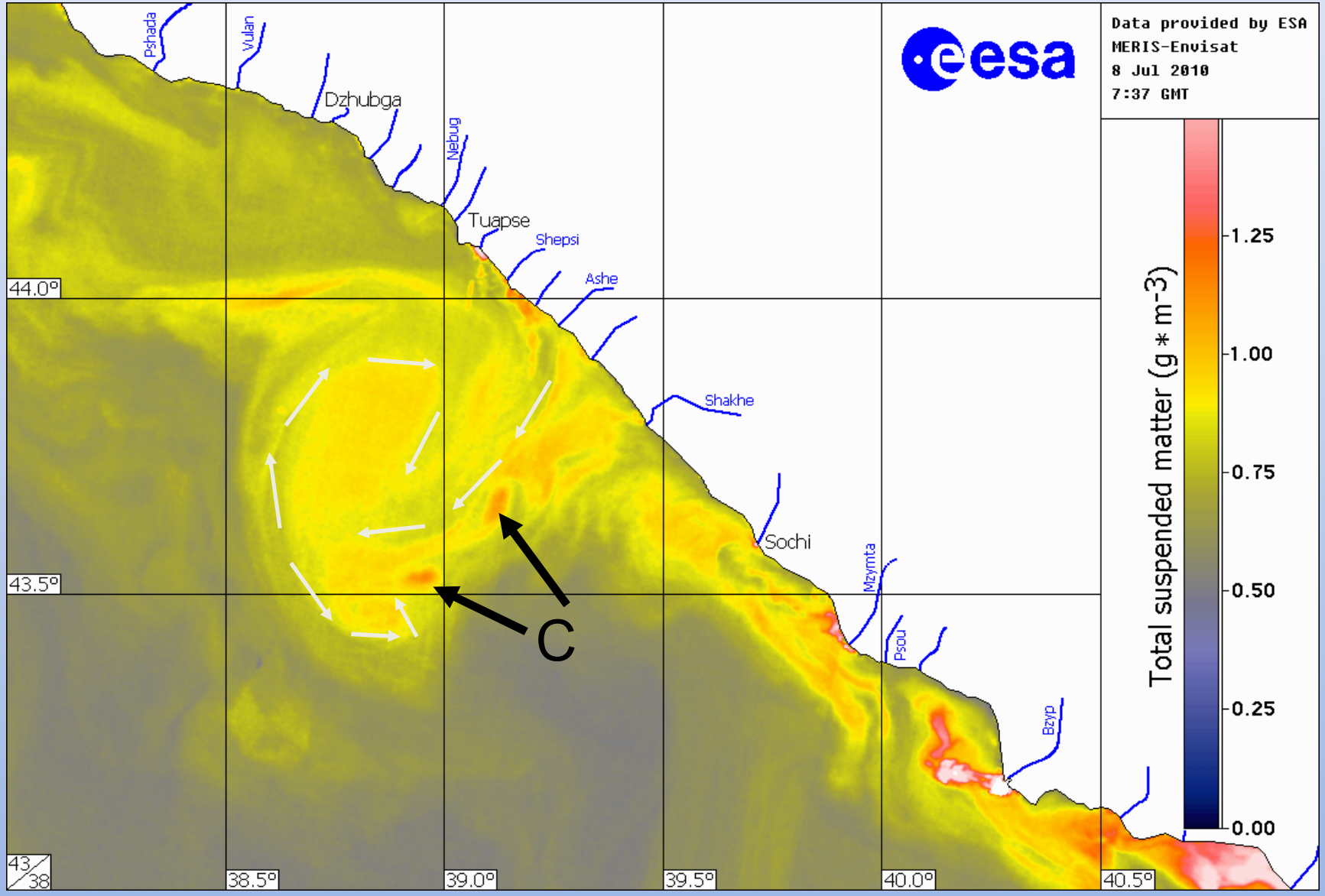
Явление периодического вихреобразования за мысами и полуостровами наблюдается лишь во вращающейся жидкости в случае затухающей струи циклонического вдольберегового течения, обтекающего препятствие.

2. Формирование цепочек вихрей в сдвиговом течении

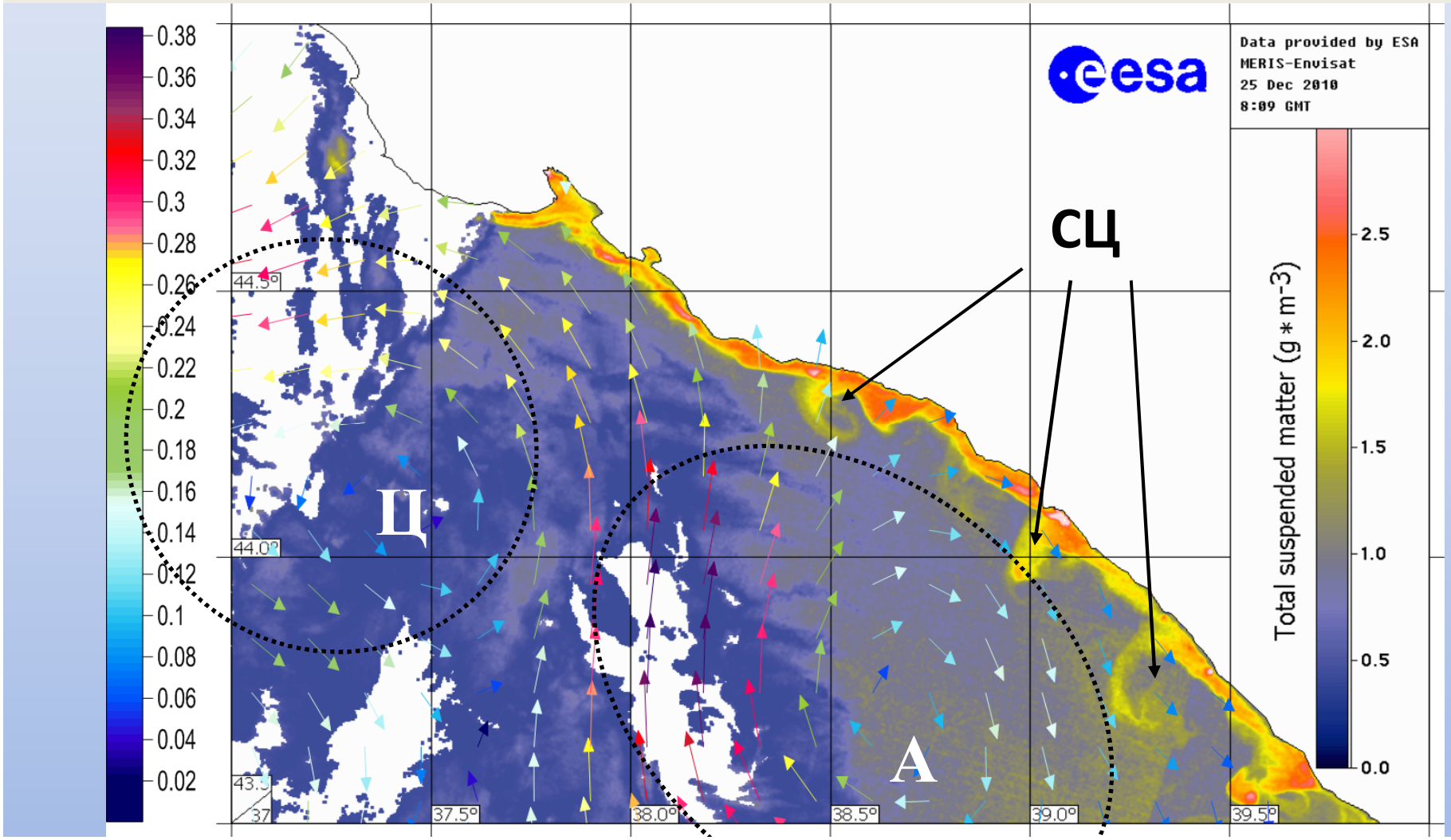
Субмезомасштабные циклоны (СЦ)на периферии мезомасштабного антициклона (А) 08.08.2010



Субмезомасштабные циклонические вихри на спутниковом изображении (08.07.10)



Субмезомасштабные циклоны на периферии мезомасштабного антициклона «А» 25.12.2010.



Вектора скорости поверхностного гестрофического течения (рассчитаные 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

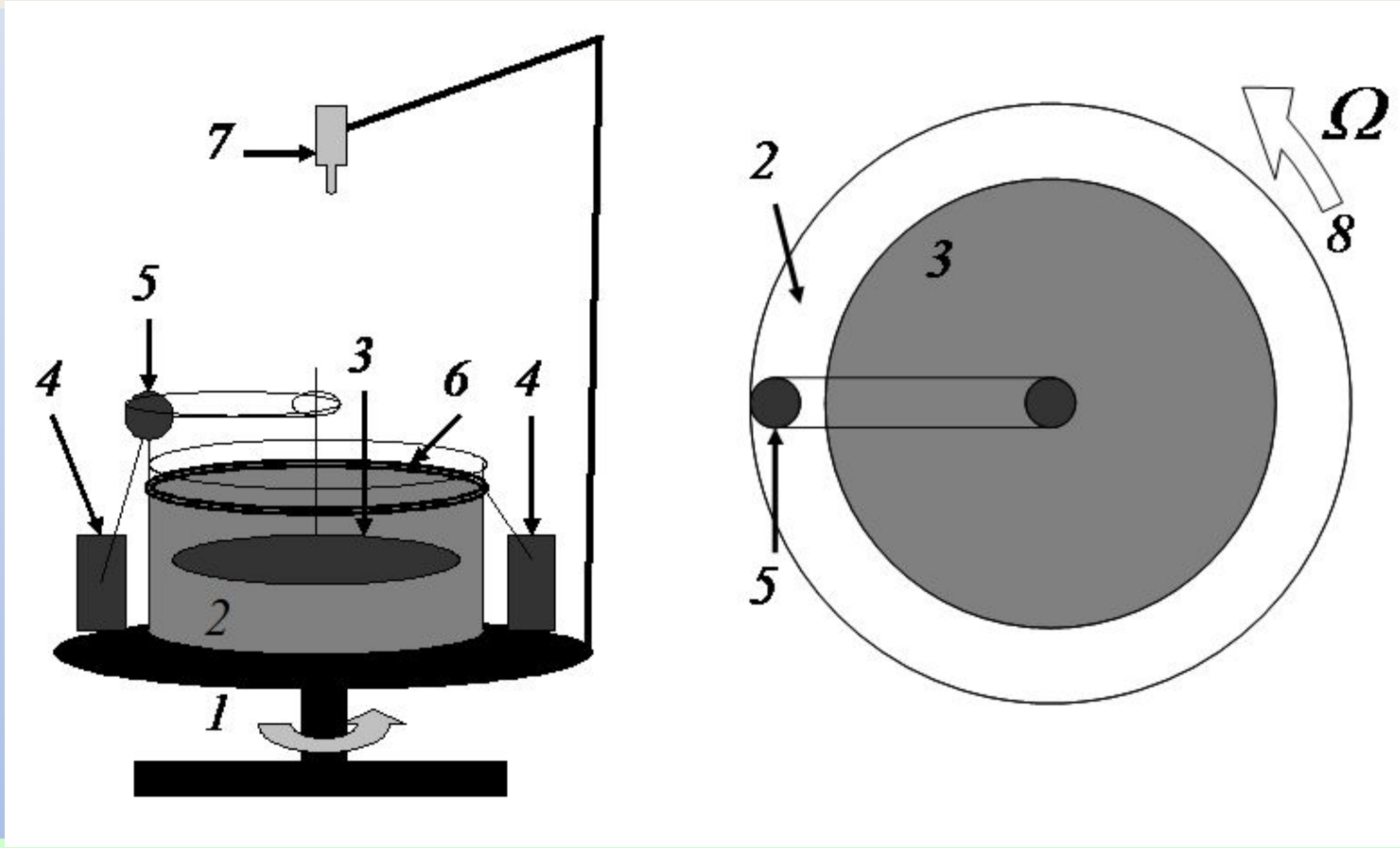
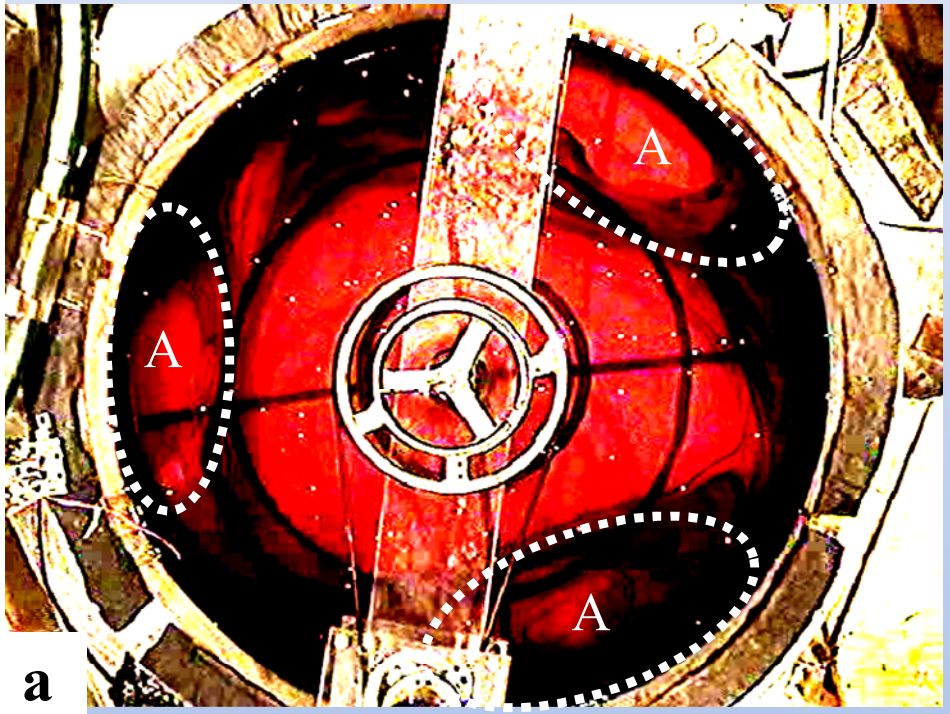
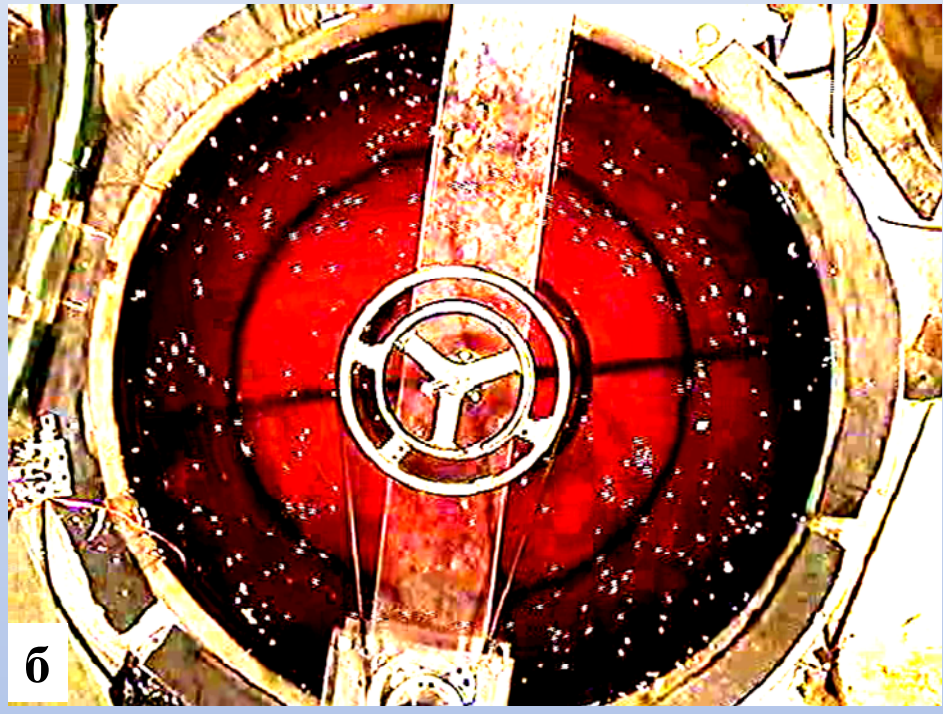


Схема лабораторной установки. Вид сбоку: 1 - вращающаяся платформа; 2 – бассейн, заполненный жидкостью; 3 – дифференциально вращающийся диск; 4 – блок питания с регулятором напряжения; 5 – электромотор; 6 – видеокамера. Вид сверху: 3 – диф. вращ. диск; 5 – шкив; 2 - зазор между диском и стенкой бассейна.

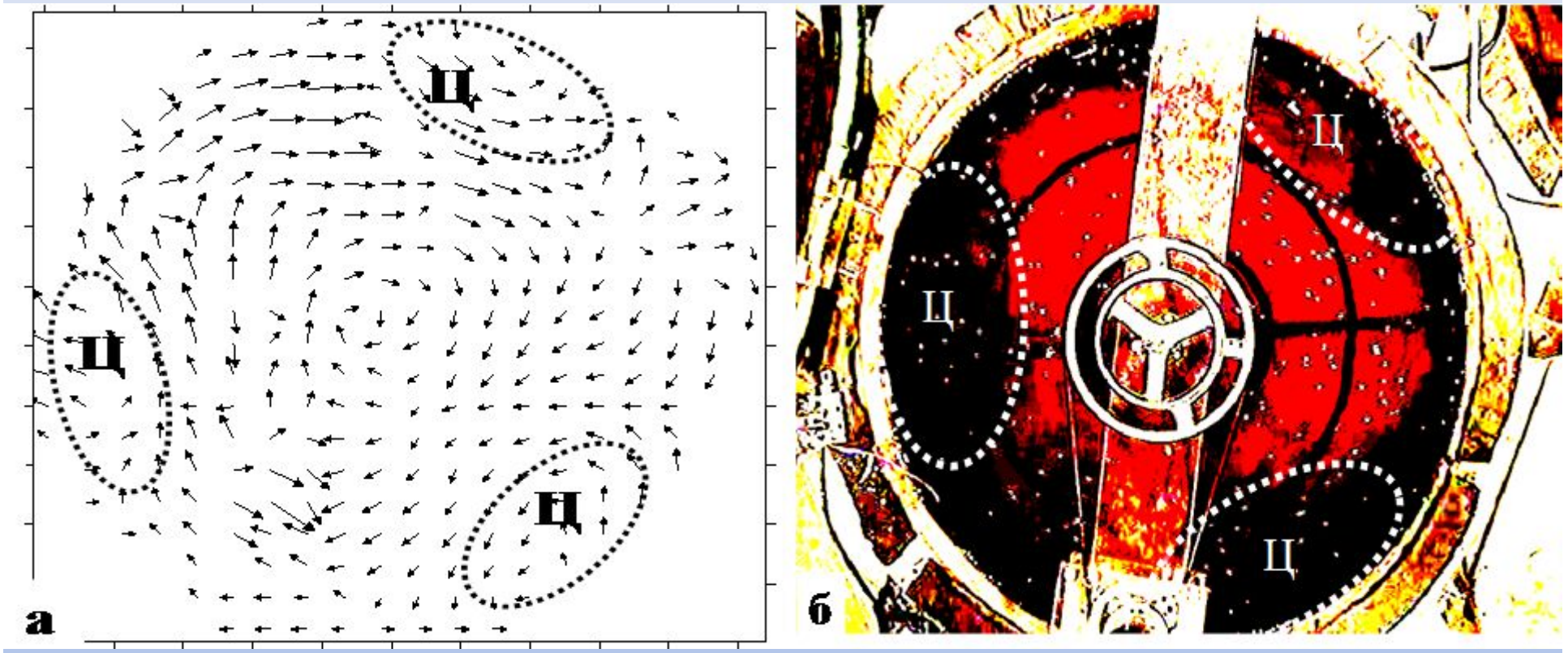
Антициклонический сдвиг скорости





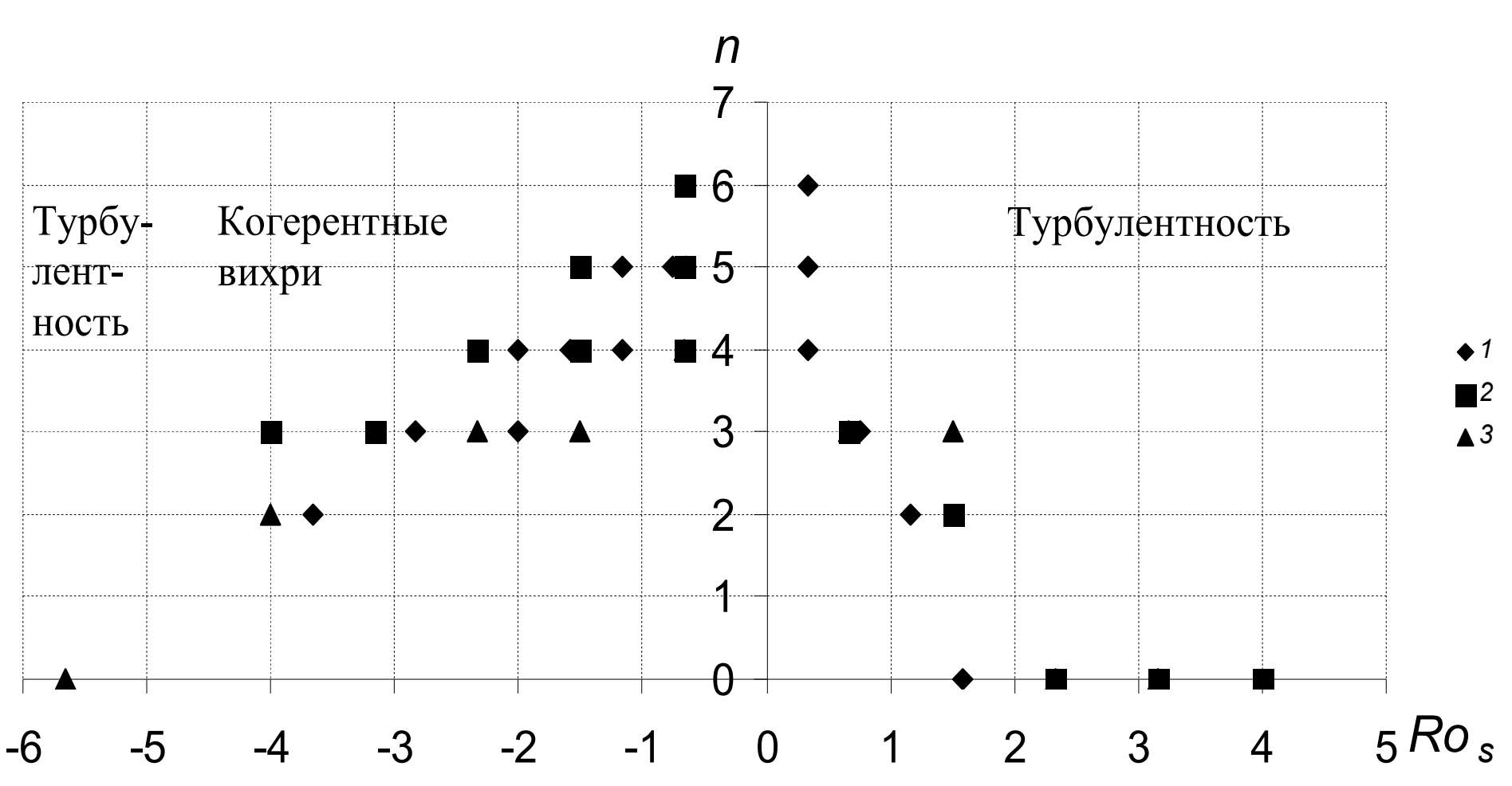
Течение на поверхности слоя жидкости, в тех опытах, где вдольбереговое течение было циклоническим, а сдвиг скорости в зазоре - антициклоническим: **(а)** $\boldsymbol{Ro_s = 0.6}$**; (б)** $\boldsymbol{Ro_s = 2.3}$**.** Буквой «А» отмечены антициклоны, которые оконтурены пунктиром.

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 Ros , 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:

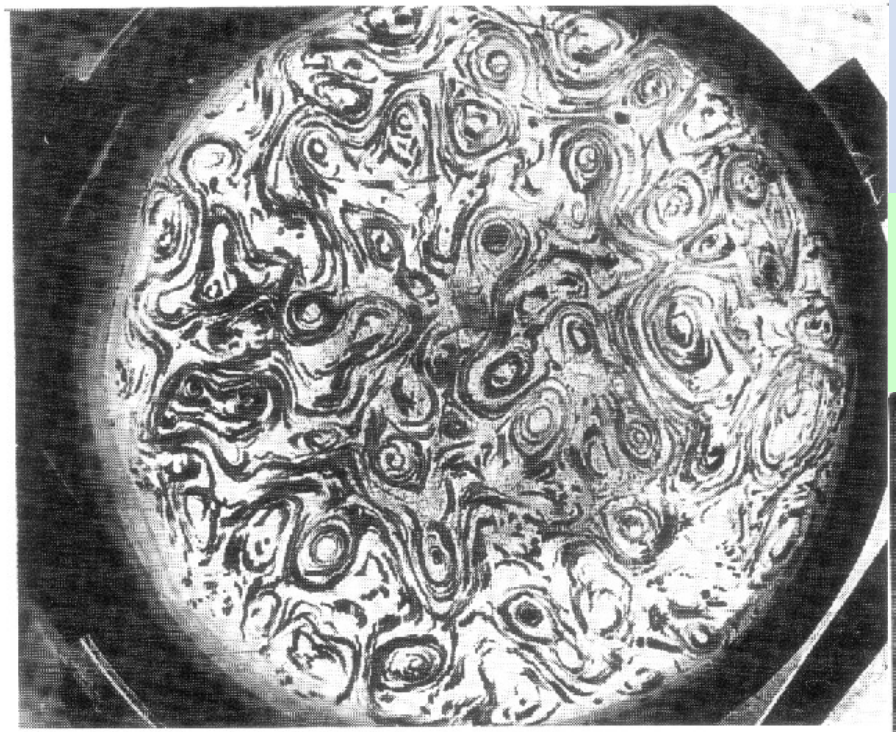
$$f > \partial U/\partial y \qquad (1)$$

Введем безразмерный параметр:

$\mathbf{Ro_s} = (\partial U/\partial y)/f$ – число Россби

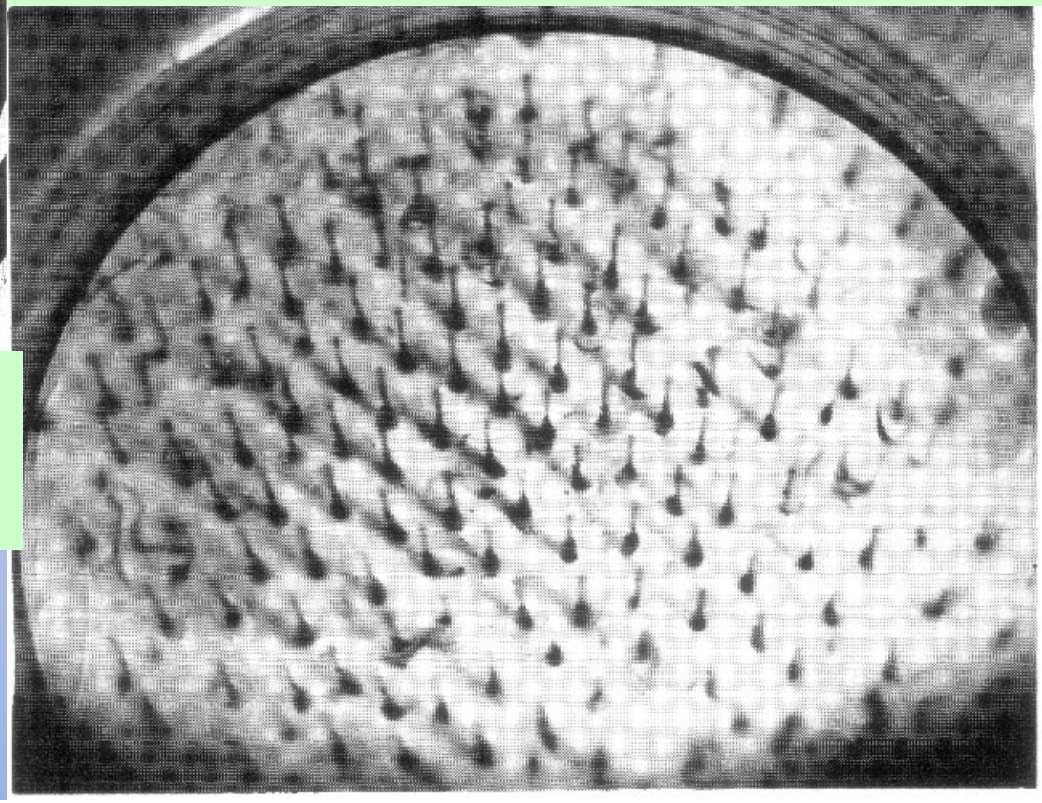
Из (1) следует, что течение более устойчивое при $\mathbf{Ro_s < 1}$. При $\mathbf{Ro_s > 1}$ устойчивость течения понижена и облегчен переход к турбулентности.

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



Свободная конвекция при
Ra = 2*10^8, Ta = 7*10^7.

Свободная конвекция при
Ra = 7*10^7, Ta = 6*10^8.



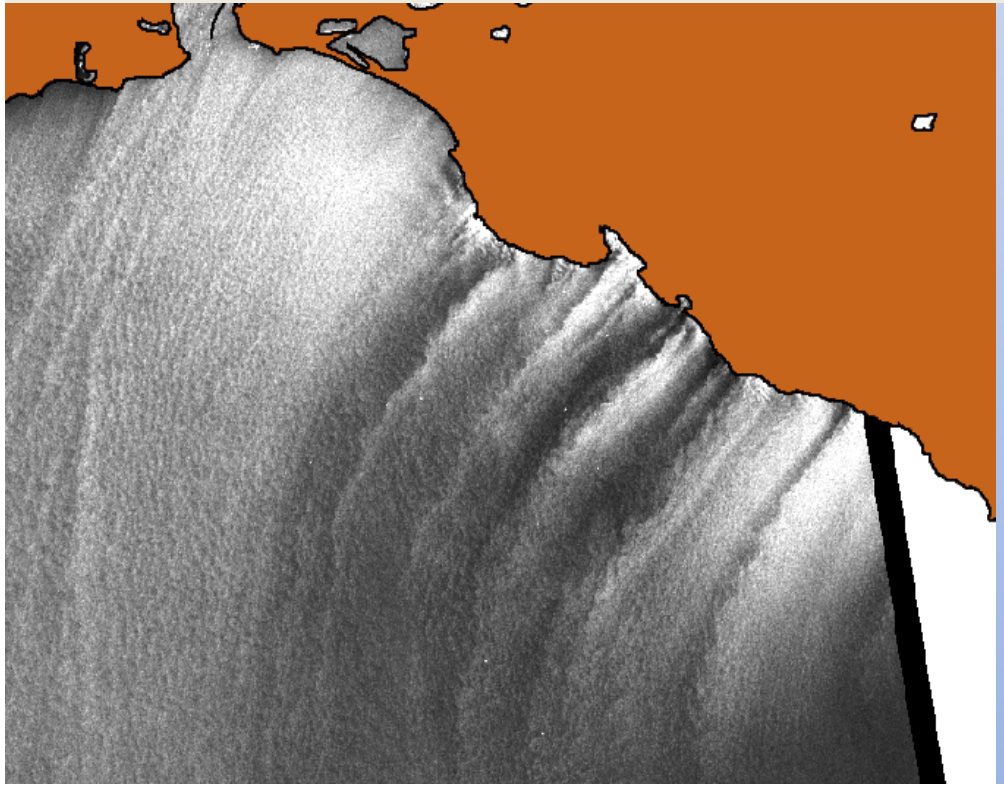
ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ВЫВОДЫ

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

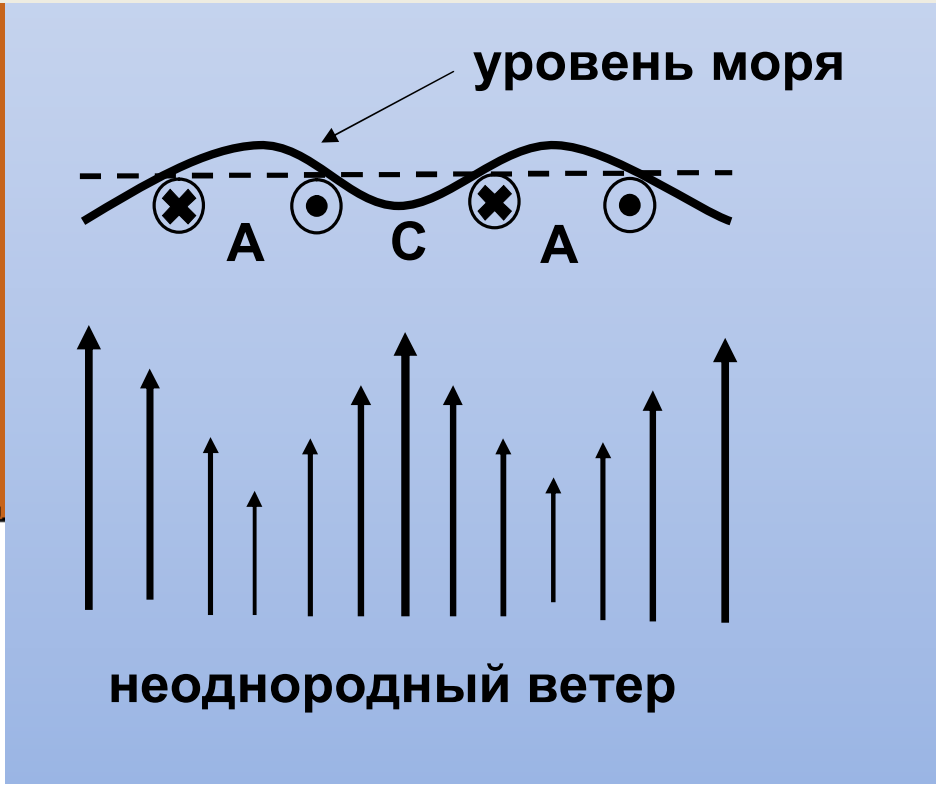
(В лаб. эксперименте $3000 < Re = \omega R_1 d/\nu < 30000$)**.**

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

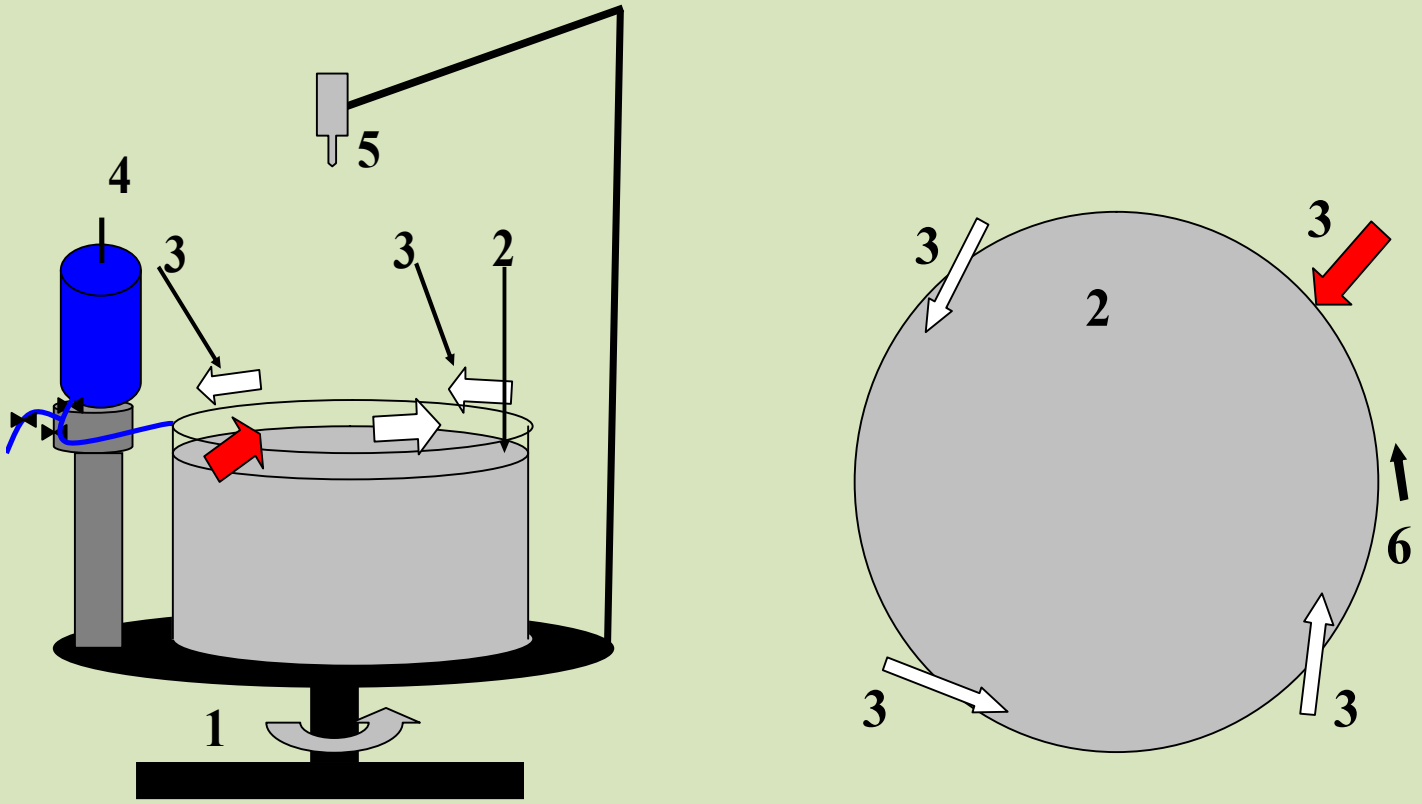
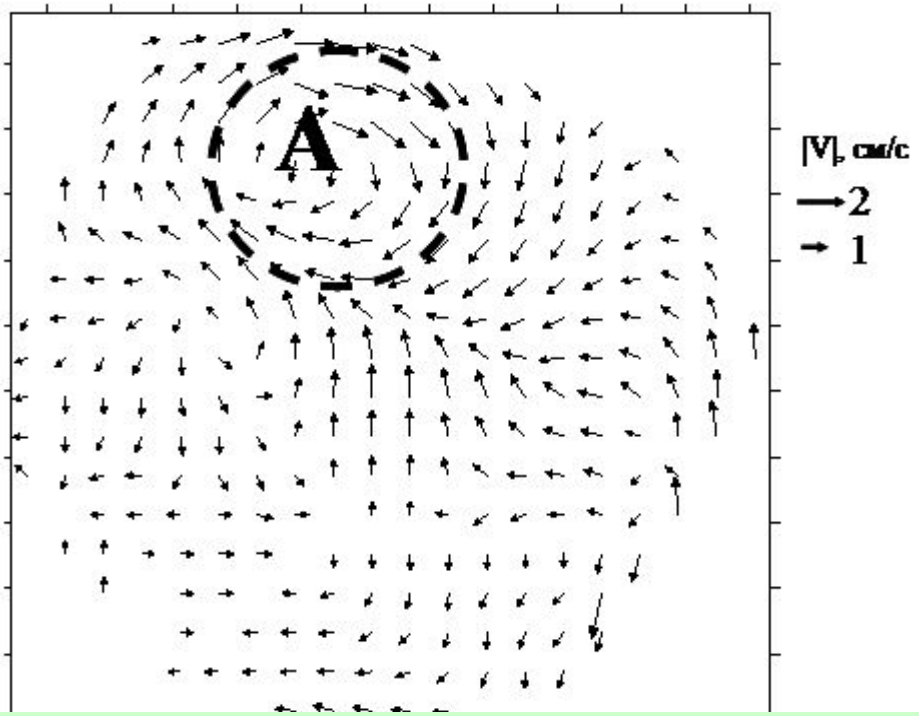


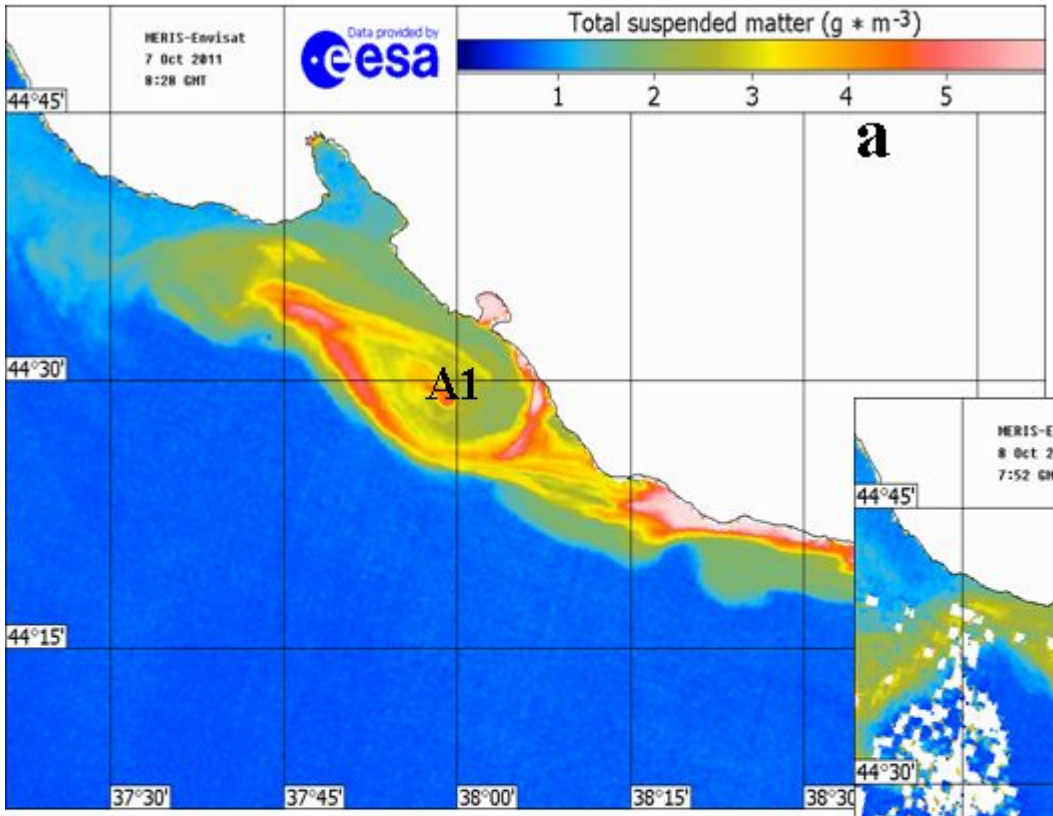
Схема лабораторной установки: а) – вид сбоку: 1 - вращающаяся платформа; 2 – бассейн из органического стекла с однородной или двухслойной жидкостью; 3 – четыре воздуходувки (красным выделена воздуходувка, направленная по радиусу к центру бассейна; 4 – источник постоянного расхода; 5 – видеокамера; 6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

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



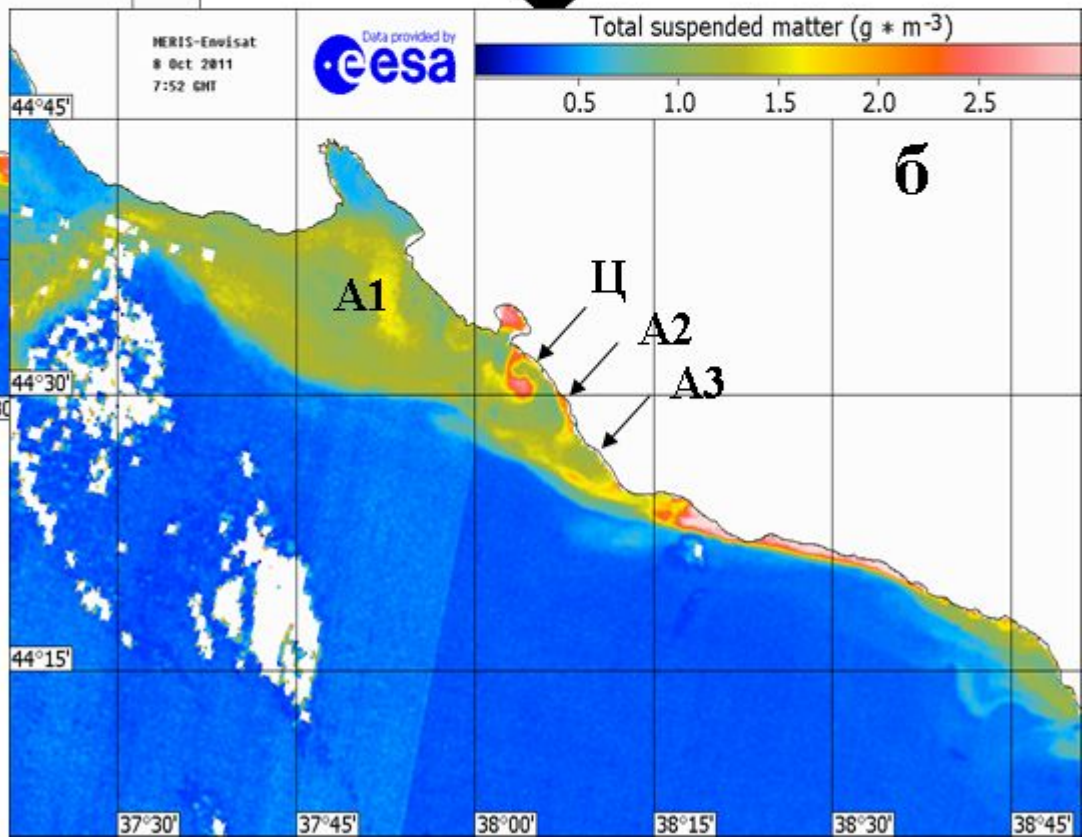
Период вращения платформы - 5 с, толщина слоя соленой воды 5 см, соленость - 10 psu, толщина слоя пресной воды - 2 см, бароклинный радиус деформации - 2.8 см. Радиальный ветер действовал 80 с (16 лаб. сут). Скорость воздушного потока на расстоянии 5 см от сопла воздуходувки - от 3 до 4 м/с. На расстоянии 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

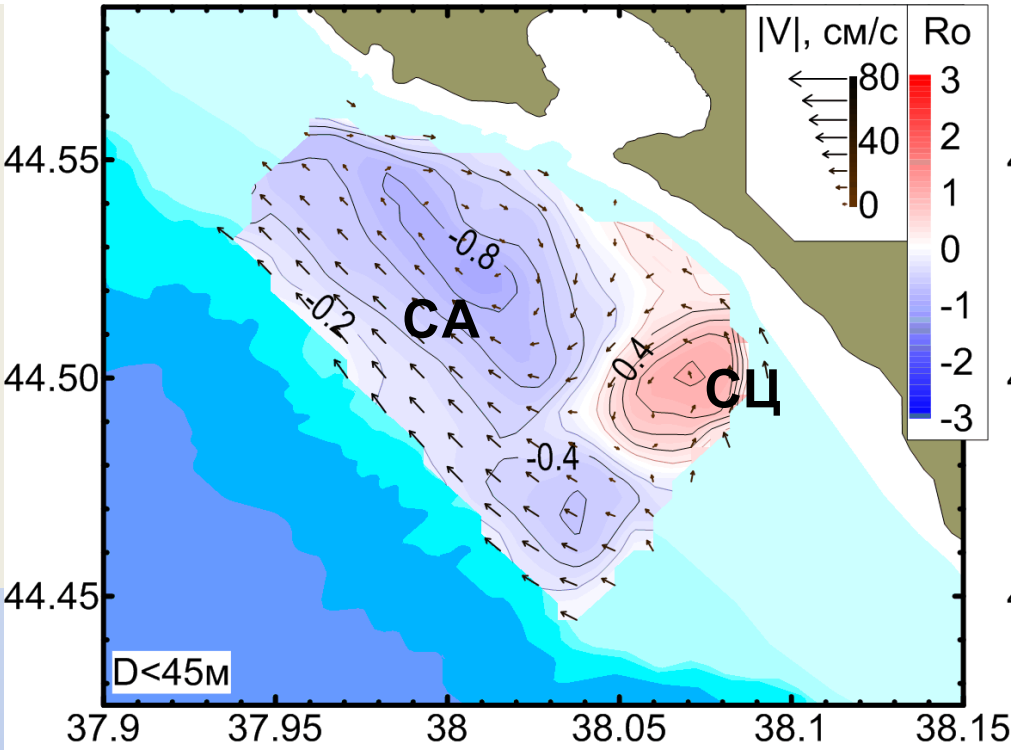


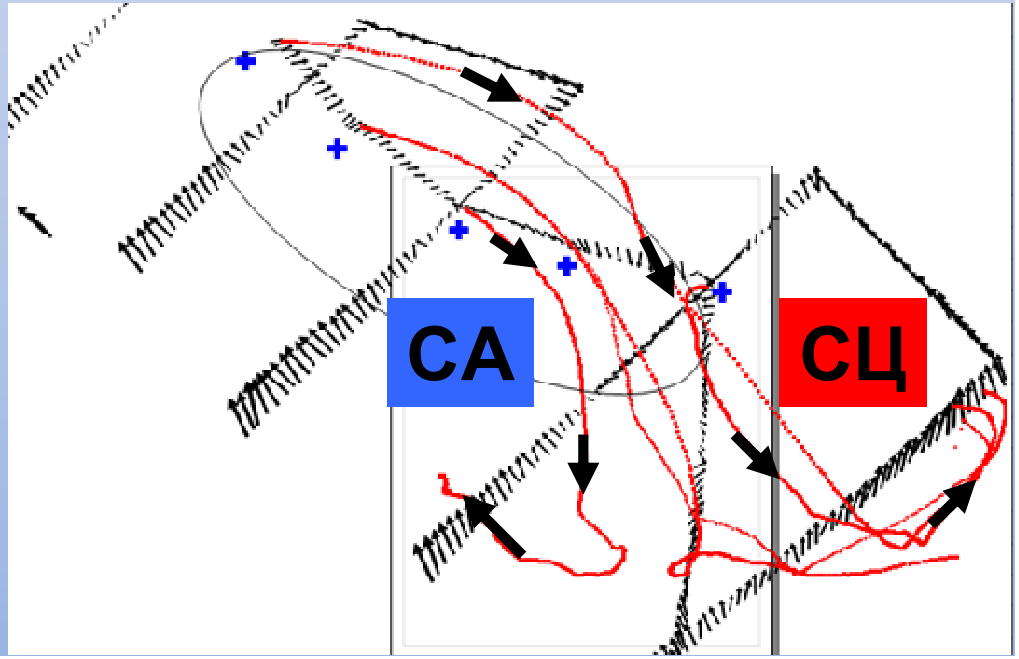
а) субмезомасштабный антициклон А1 за Идокопасом (MERIS-Envisat, взвесь, 07:52 07.10.11)

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



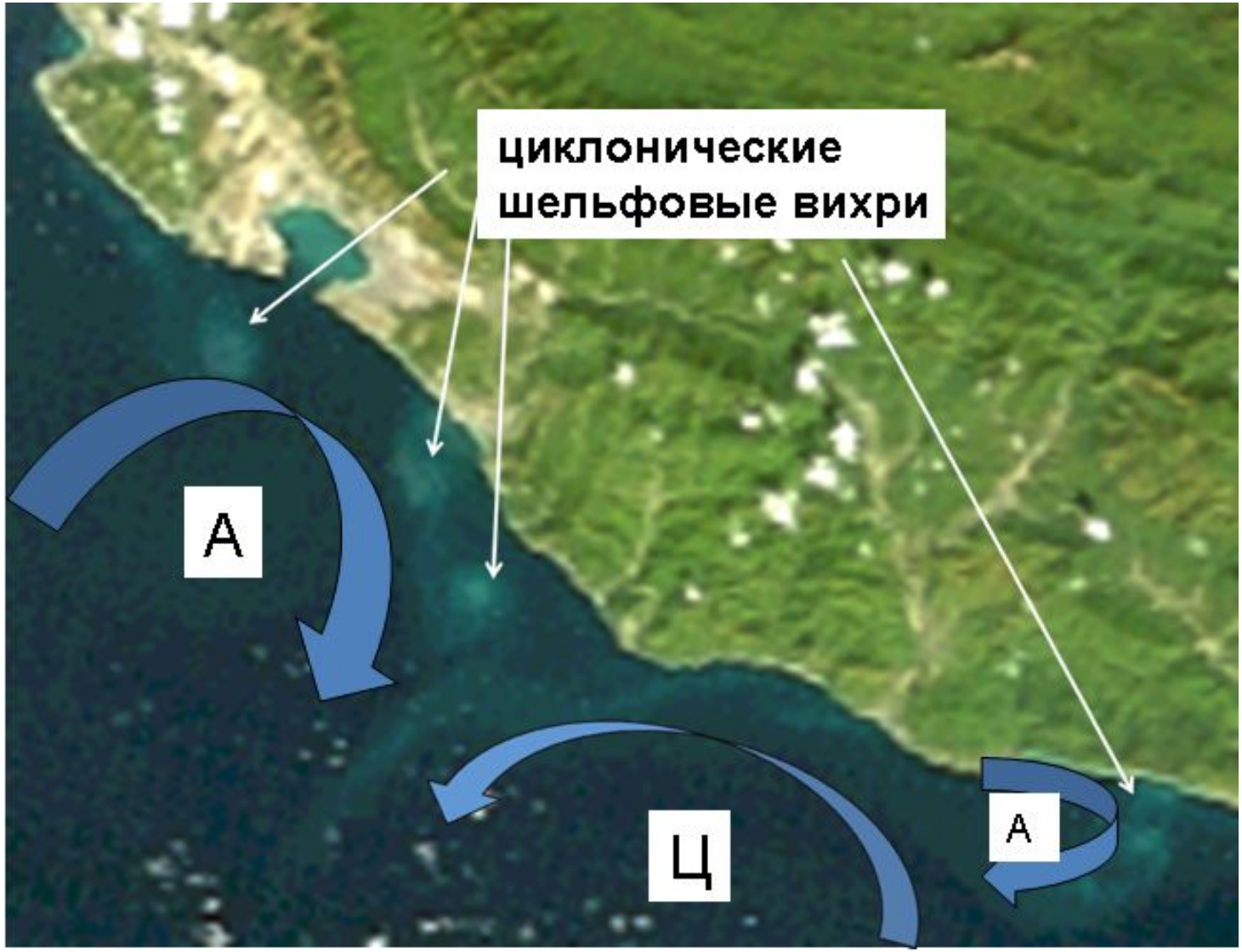
Сопоставление данных дрифтерного эксперимента 29-30.09.2013 г. с данными ADCP-съемки поля течения 29.09.2013 г.



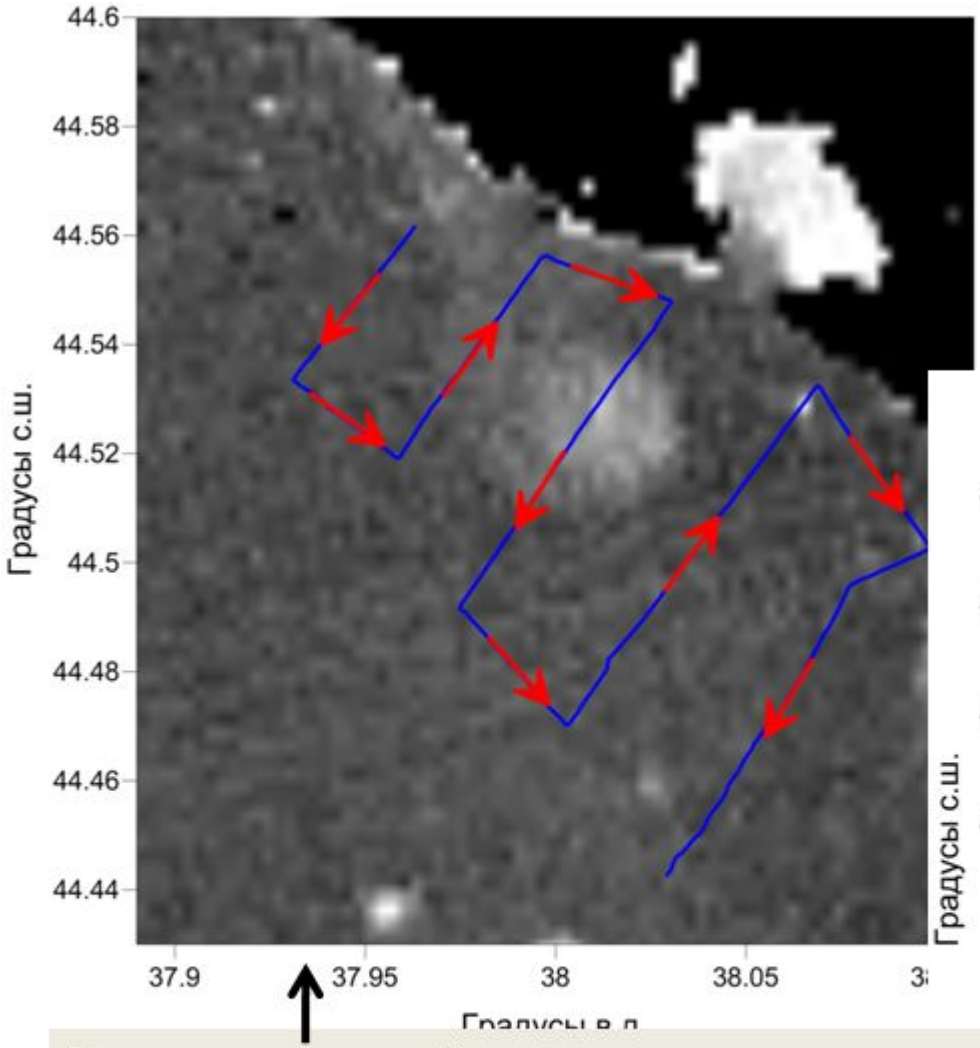


Субмезомасштабные циклонические вихри как источники локального апвеллинга

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

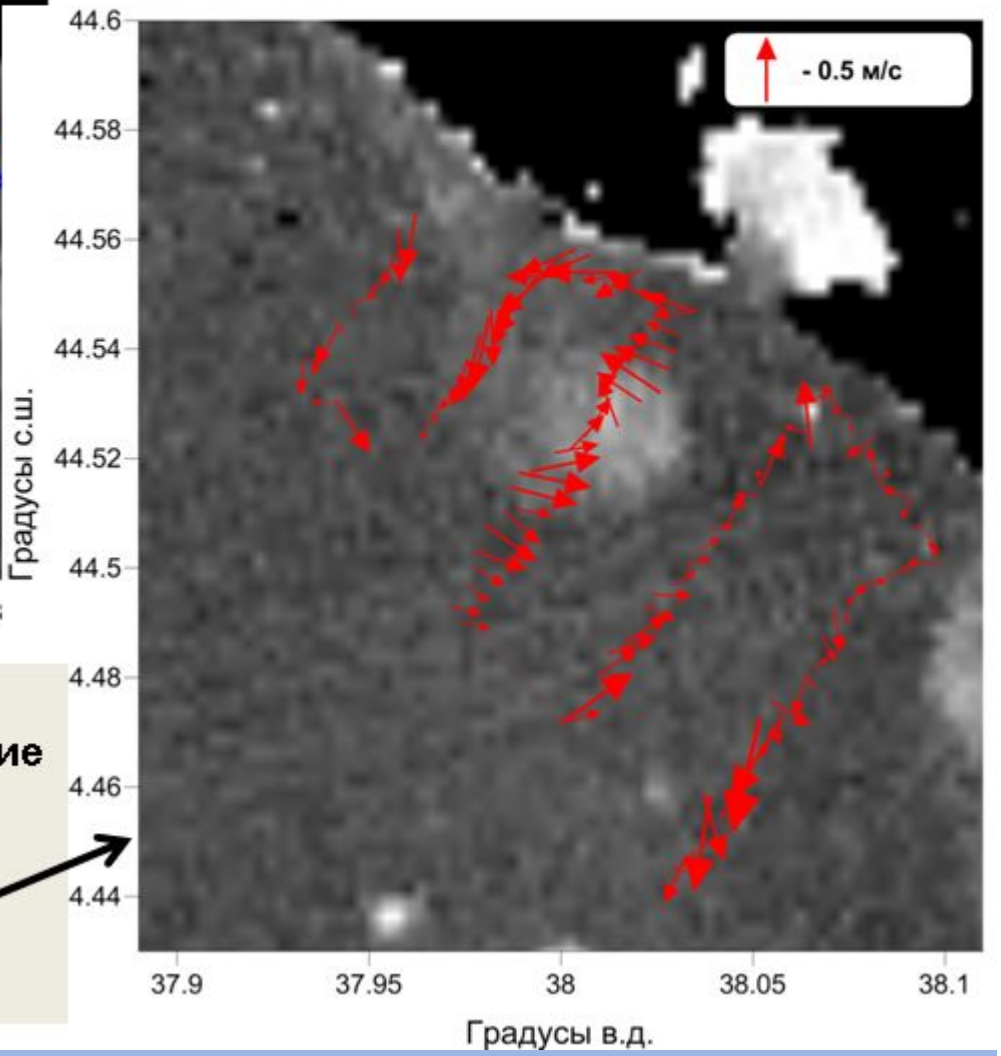


Исследование циклонического вихря на геленджикском шельфе Черного моря с помощью буксируемого ADCP

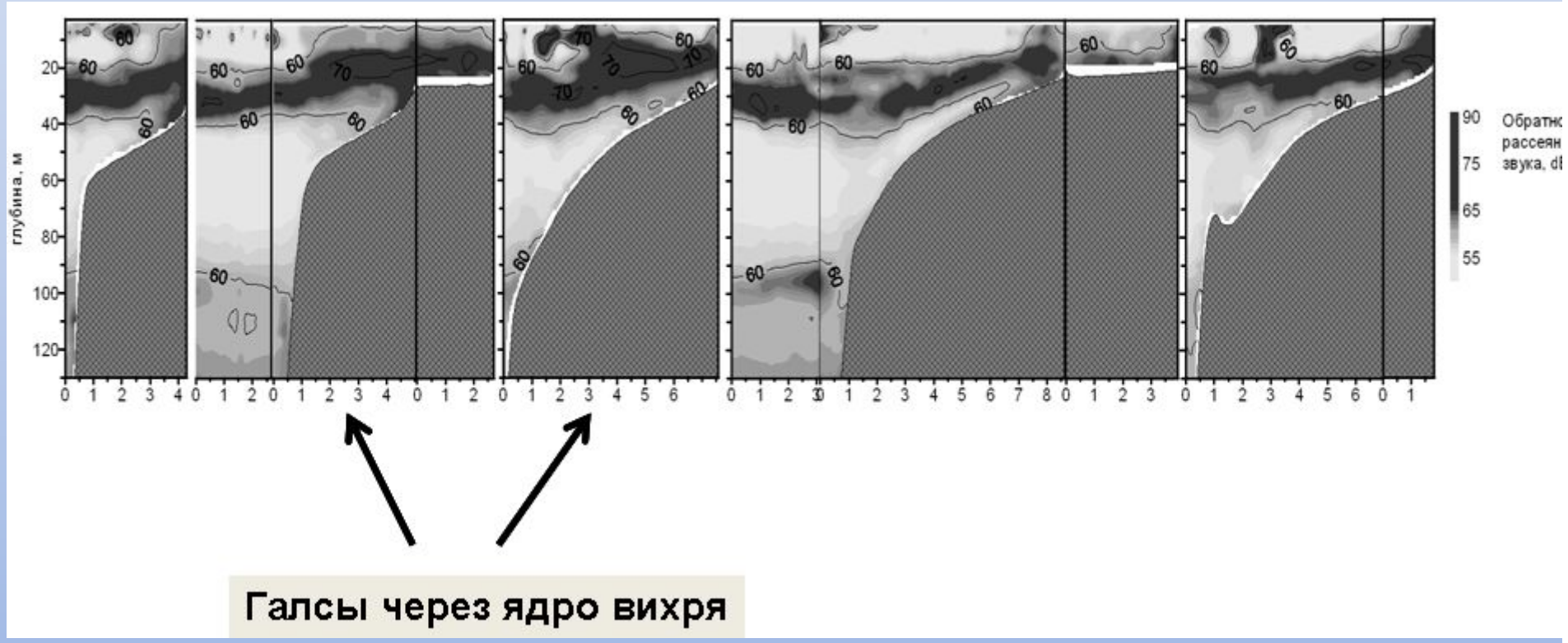


Галсы судна при буксировке, наложенные на спутниковое изображение от 25.09.2012 в поле хлорофилла.

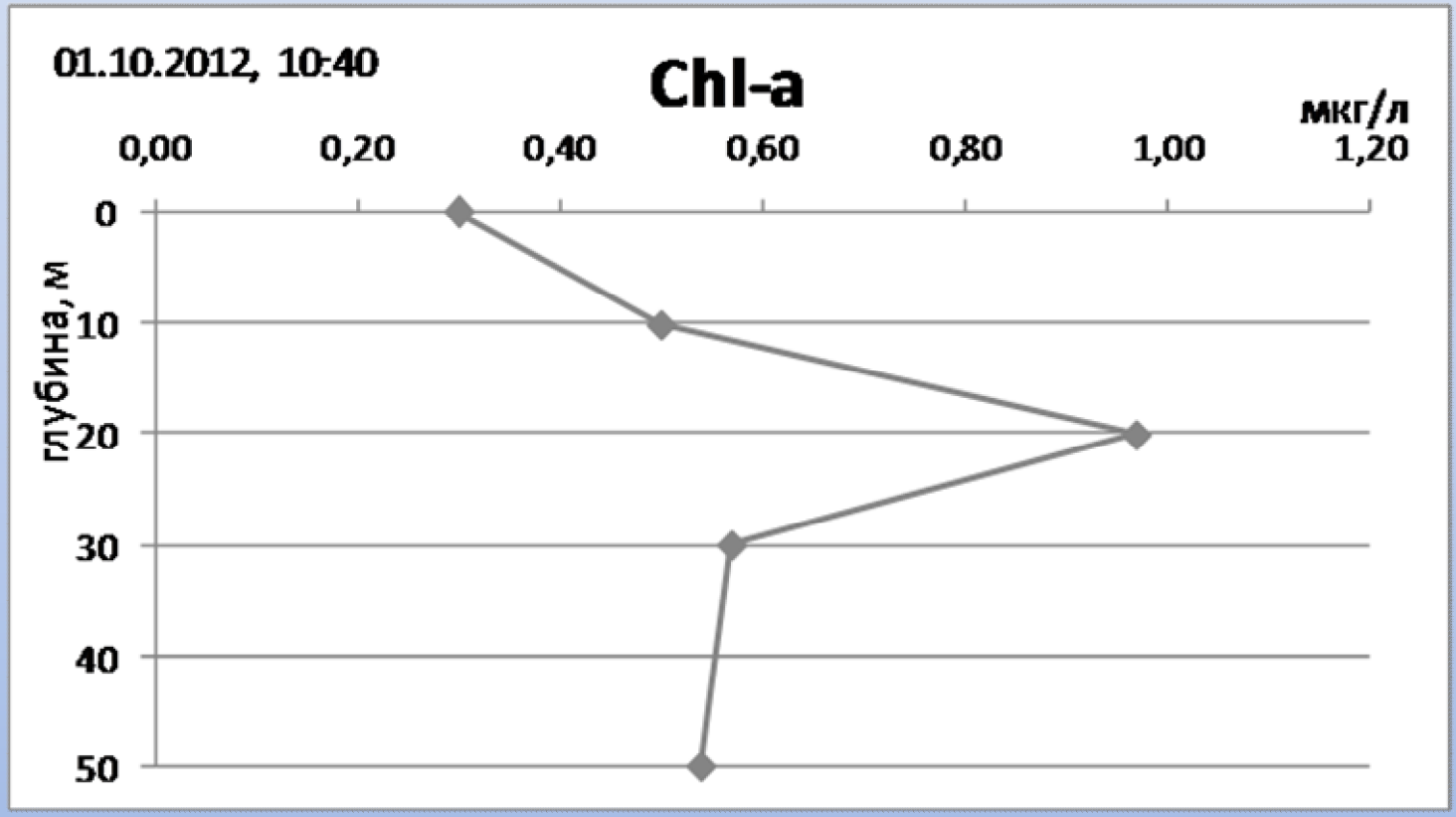
Вектора горизонтальной скорости осредненные по верхнему слою, наложенные на тоже изображение



Сигнал обратного акустического рассеяния на буксировочных галсах

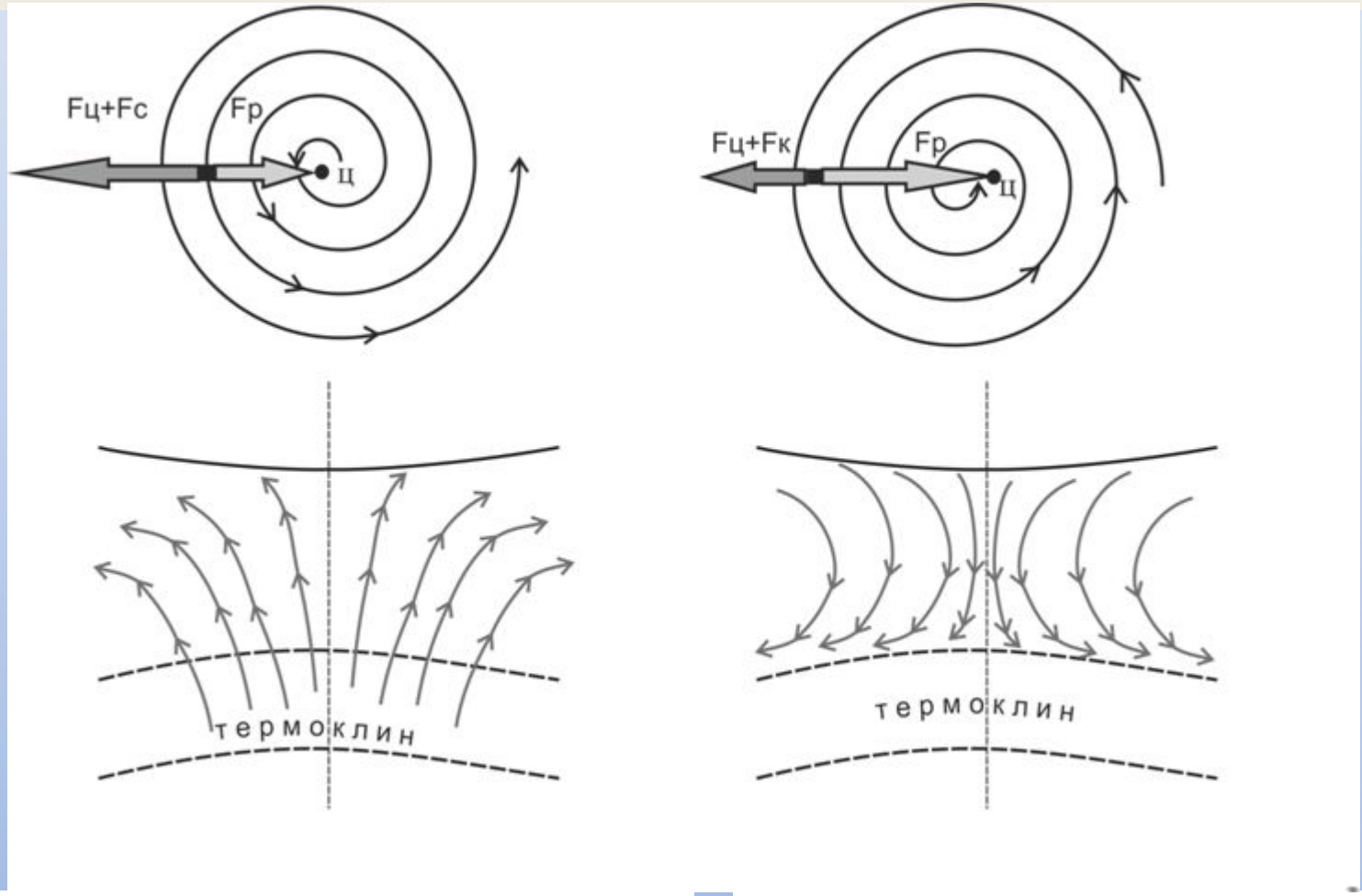


Профиль концентрации хлорофилла_а, построенный по результатам обработки и анализа проб воды, отобранных батометрами в прибрежной части Черного моря в районе г. Геленджик 01.10.2012.



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

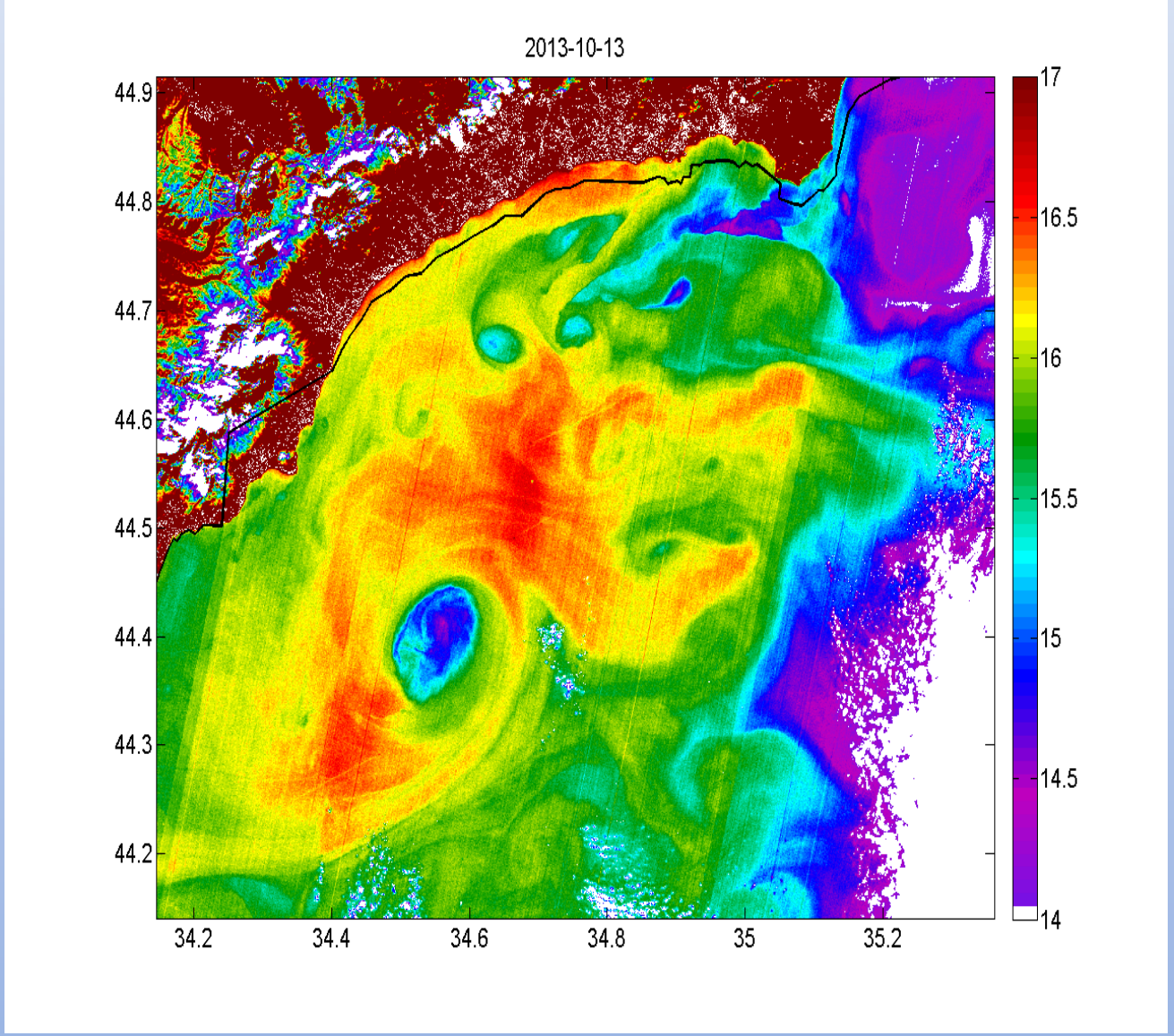
Горизонтальная (вверху) и вертикальная (внизу) циркуляция вод и баланс действующих сил в субмезомасштабном циклоническом вихре



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)



Оценка скорости апвеллинга в ядре циклонического субмезомасштабного вихря

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

Если $R = 2$ км $= 2*10^5$ см, $dR/dt = 1$ км/сут ≈ 1 см/с, $H = 20$ м $= 2*10^3$ см, то $w = 0.02$ 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

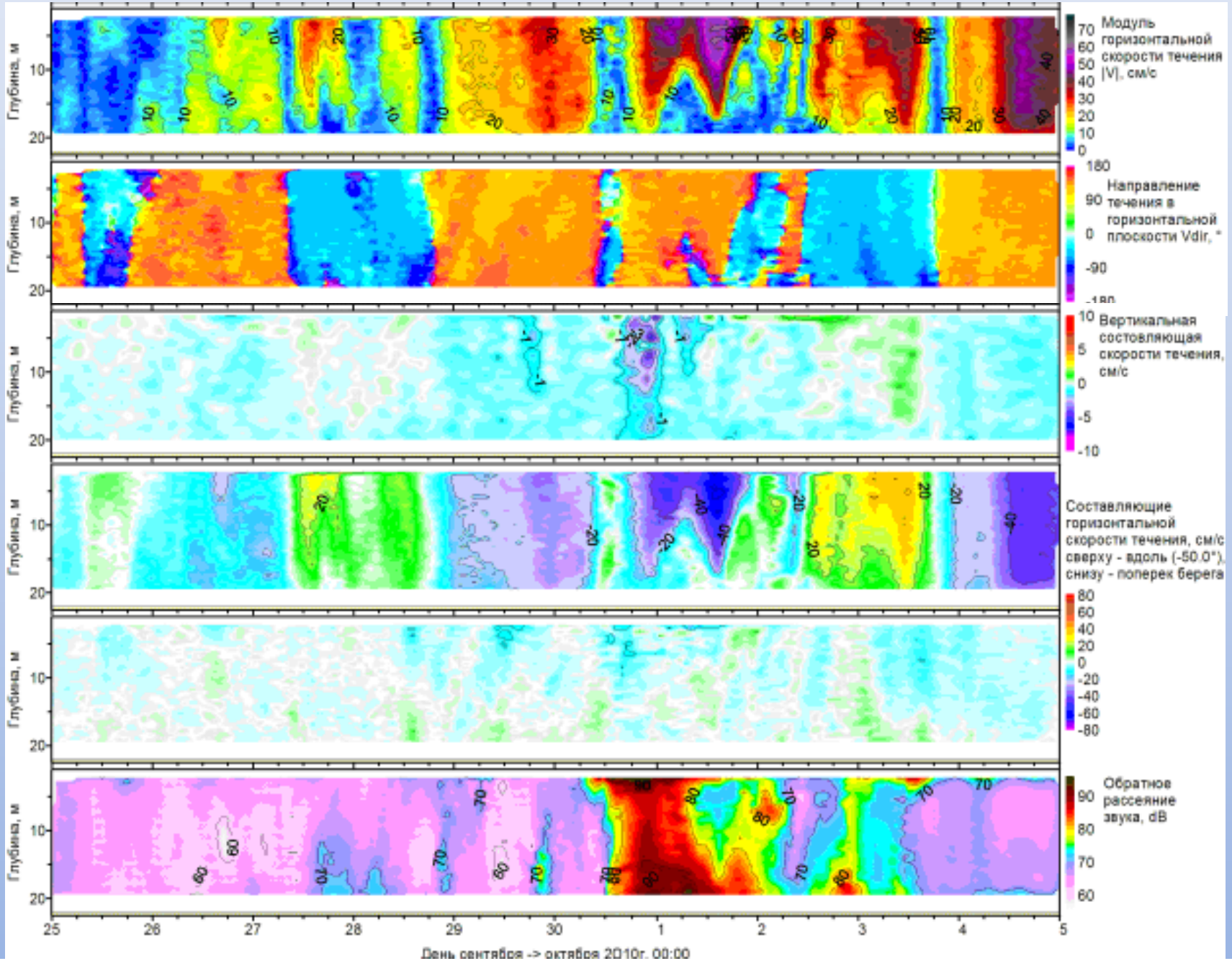
1. Установлено, что субмезомасштабные вихри, как правило, присутствуют на черноморском шельфе, причем встречаемость вихрей циклонического или антициклонического знака приблизительно одинакова. Циклоны имеют диаметр 2-4 км и они приблизительно в 1.5 раза меньше антициклонов, характерный диаметр которых 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 лабораторого 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.

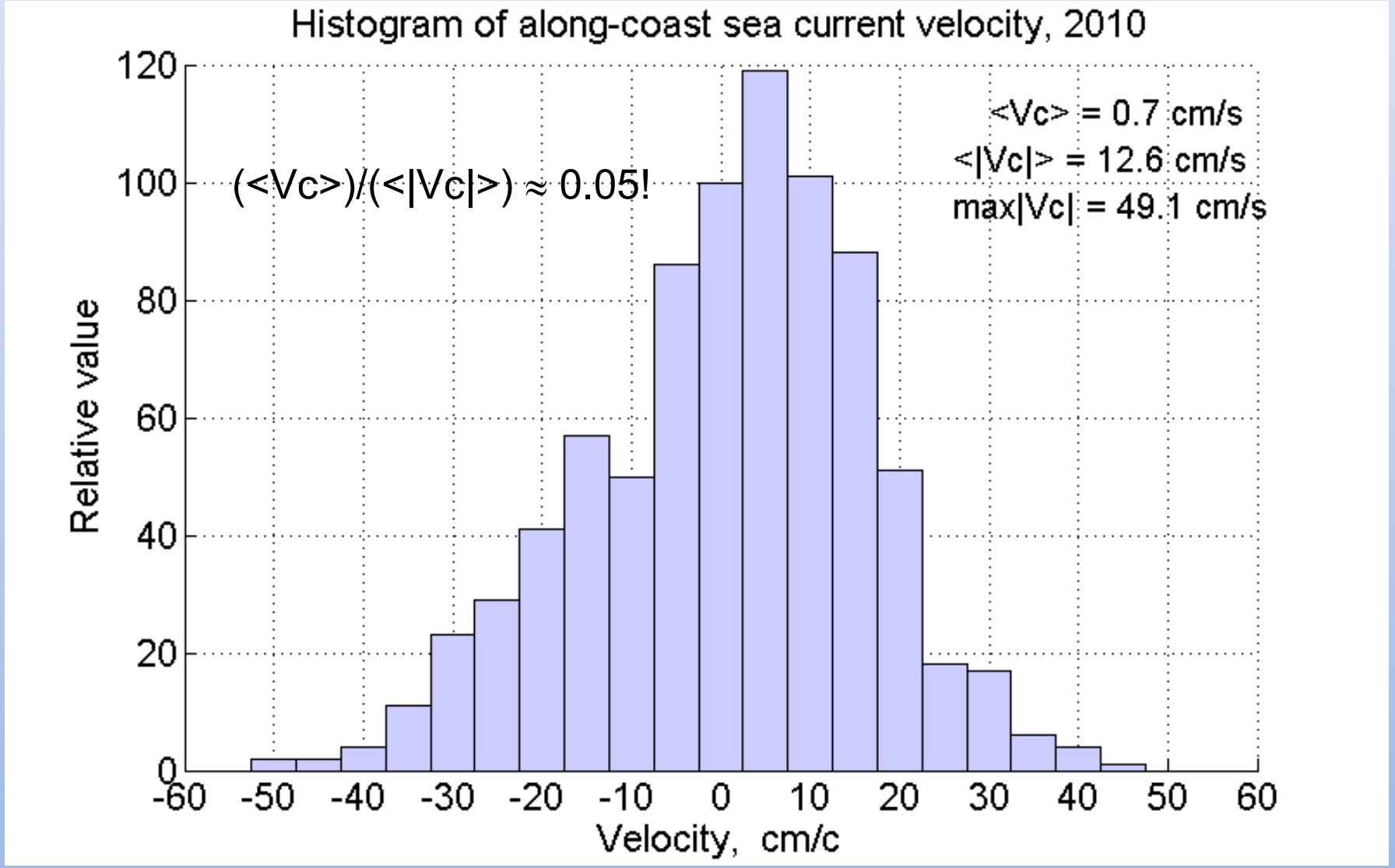
3. Вращение Земли и способствует образованию когерентных динамических структур - интенсивных циклонических и антициклонических субмезомасштабных вихрей «ламинаризирует» горизонтальный пограничный слой на шельфе. Это усложняет кросс-шельфовый обмен, делает его мало предсказуемым и способствует собиранию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

Спасибо за внимание!

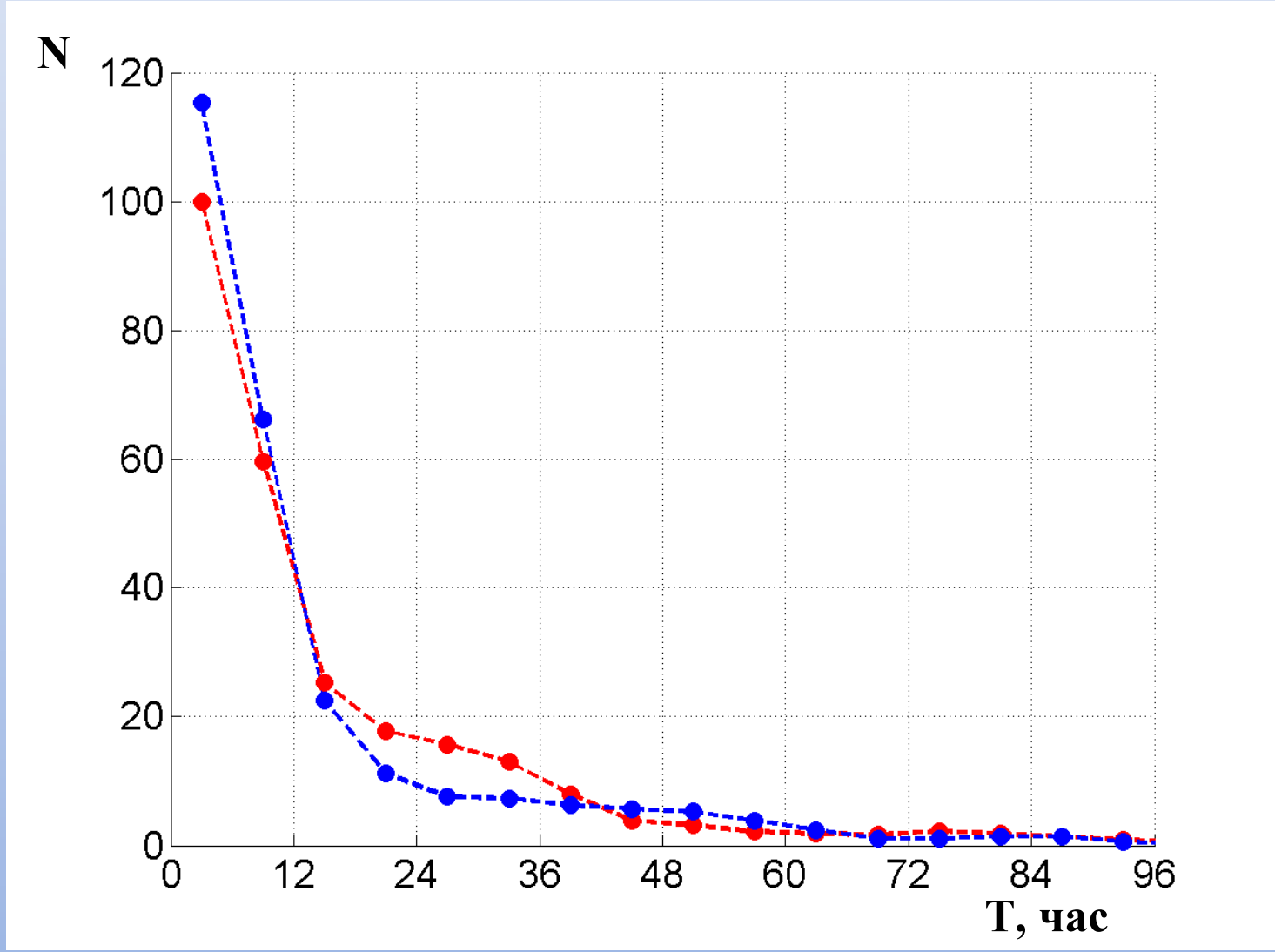
Пример обработки записи ADCP за декаду с 25.09 по 05.10.10



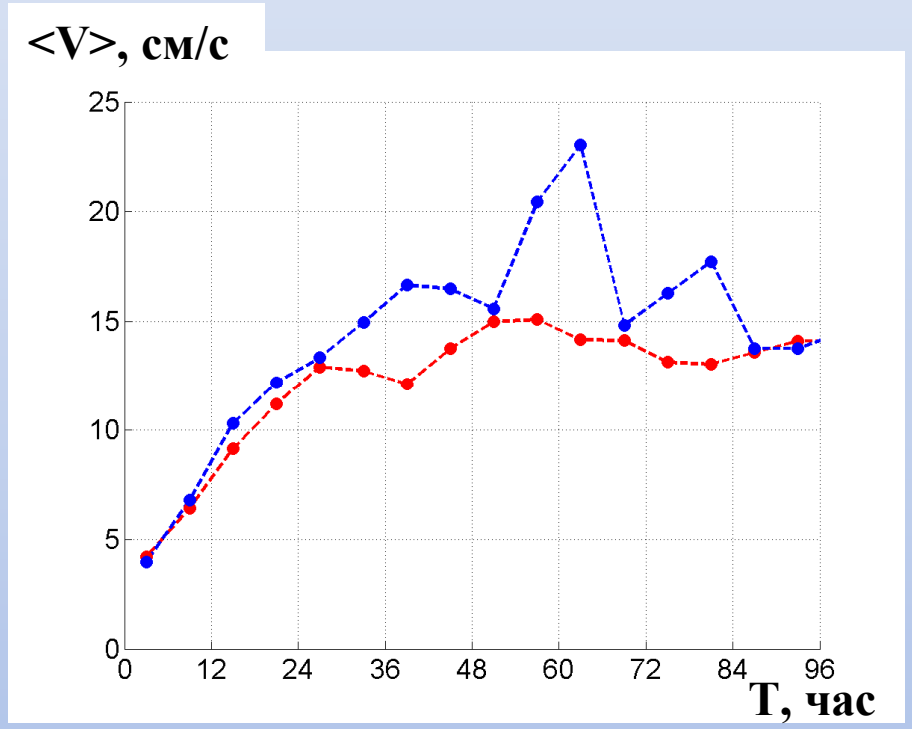
Гистограмма амплитуды вдольбереговой скорости

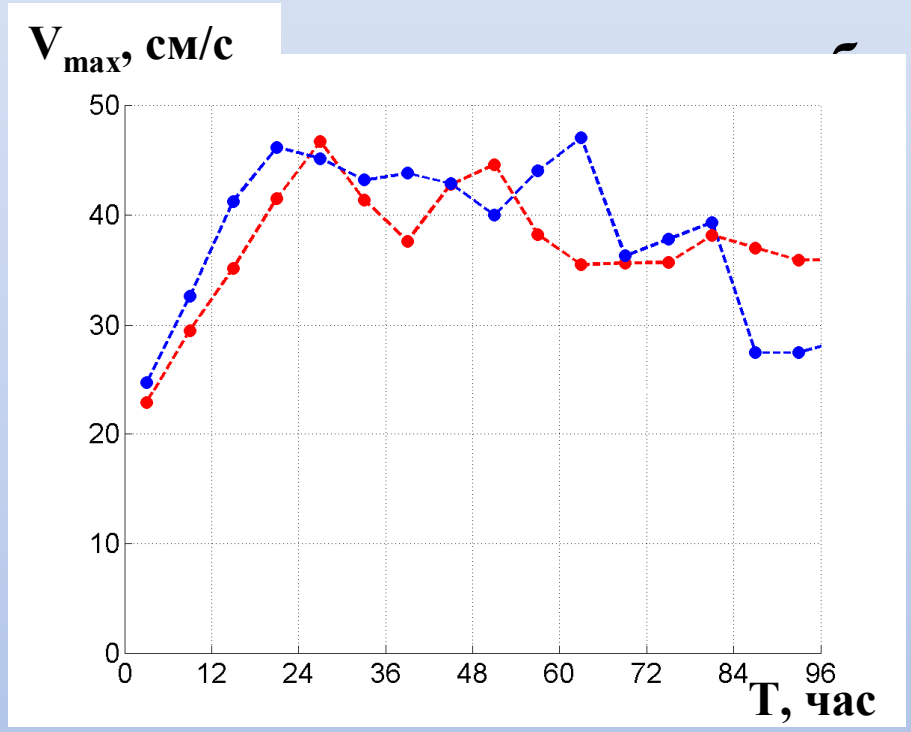


Число N периодов знакопостоянства вдольбереговой скорости в зависимости от продолжительности периода T



Вдольбереговая скорость в периоды знакопостоянства скорости в зависимости от продолжительности периода





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

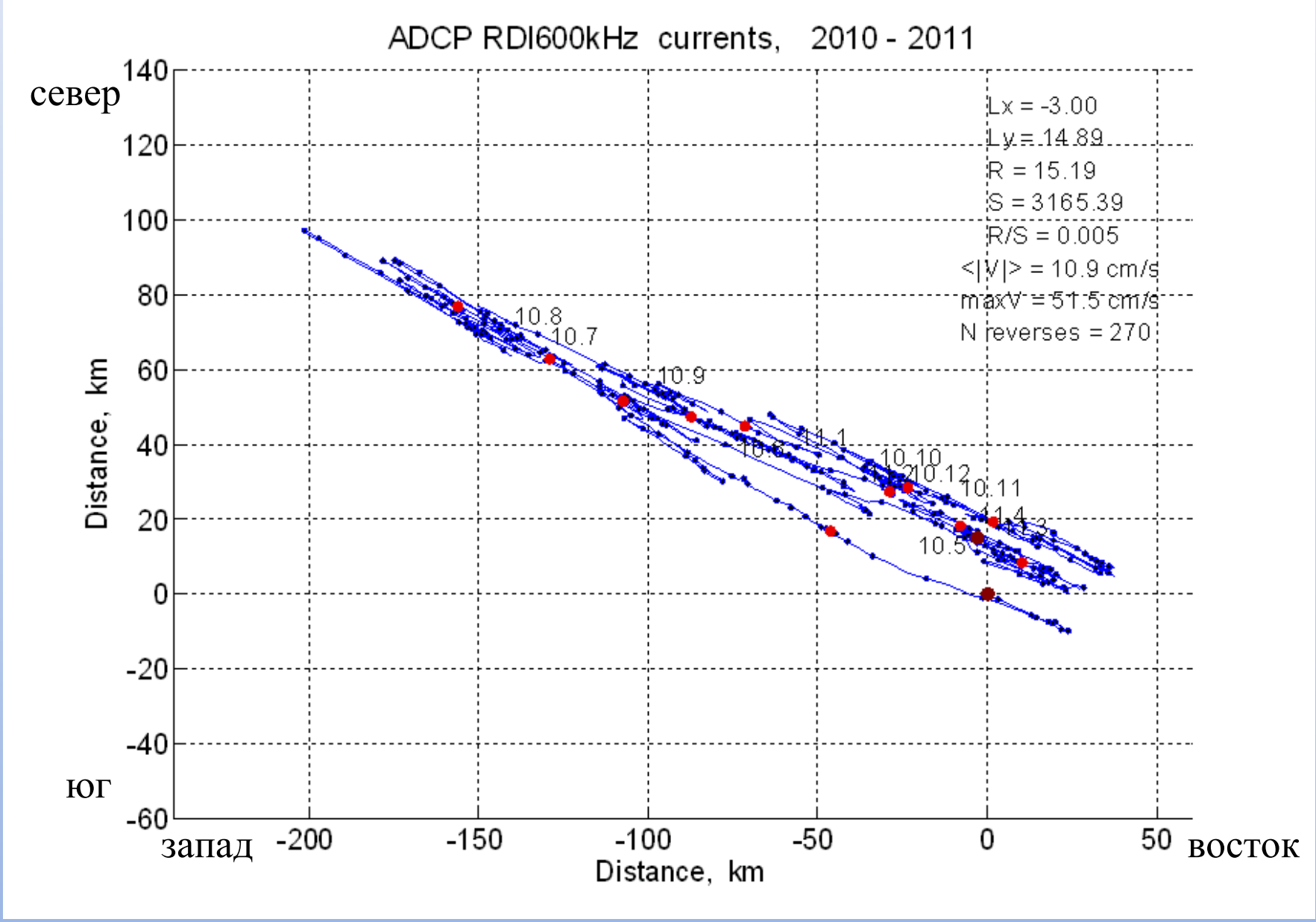
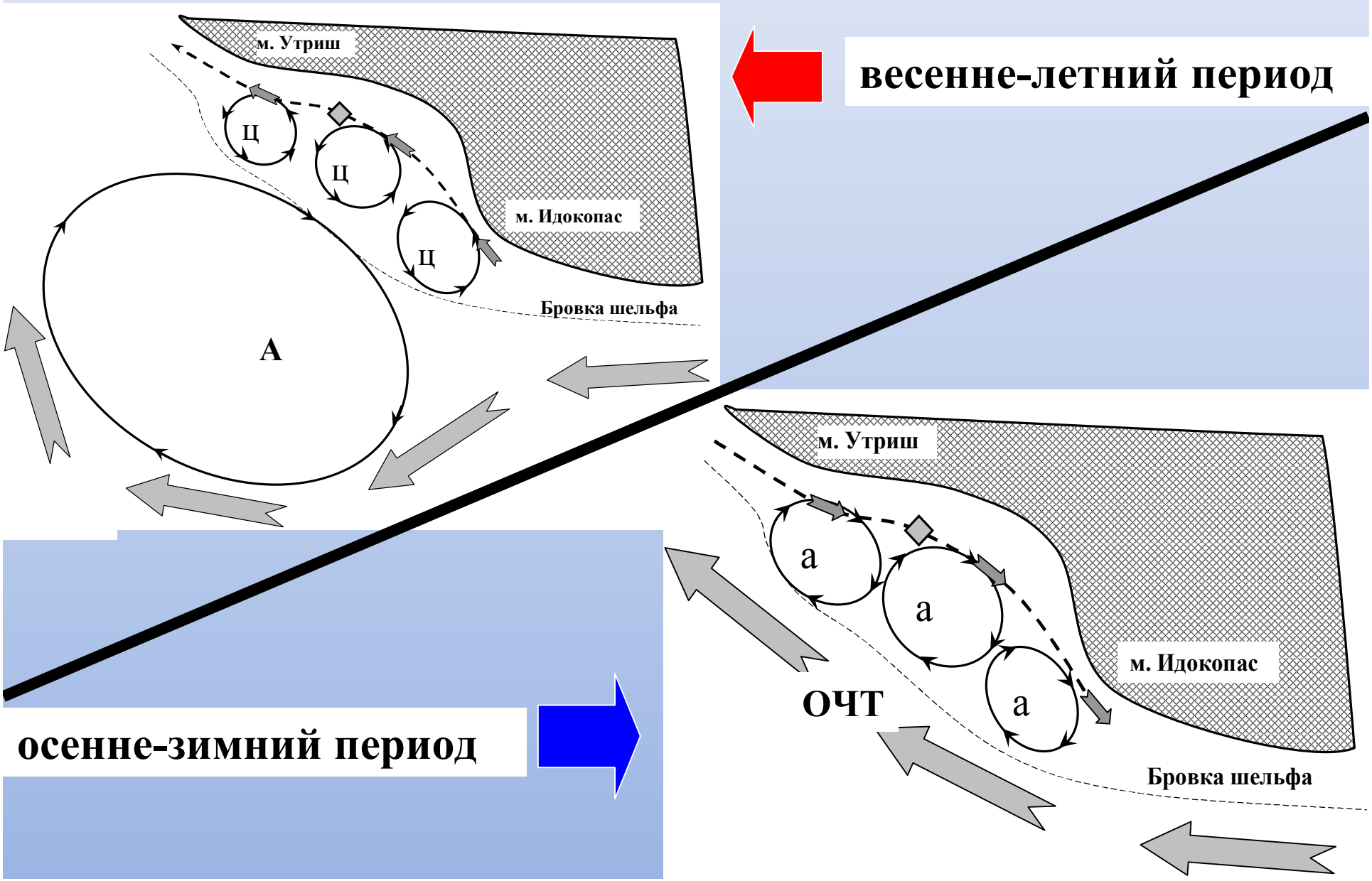
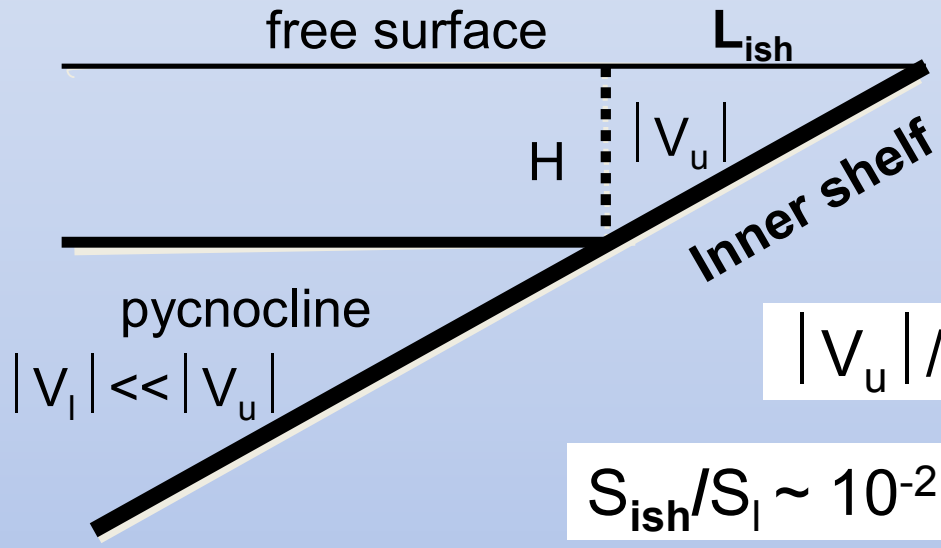


Схема формирования вихревого пограничного слоя на узком черноморском шельфе



Роль внутреннего шельфа в диссипации энергии ОЧТ и мезомасштабных вихрей



$$D \sim (|V|)^3/\lambda$$

$$|V_u| / |V_l| \sim 0.1 \longrightarrow D_{ish}/D_l \sim 10^3$$

$$S_{ish}/S_l \sim 10^{-2} \longrightarrow (S_{ish}D_{ish})/(S_{ish}D_l) \sim 10!$$

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

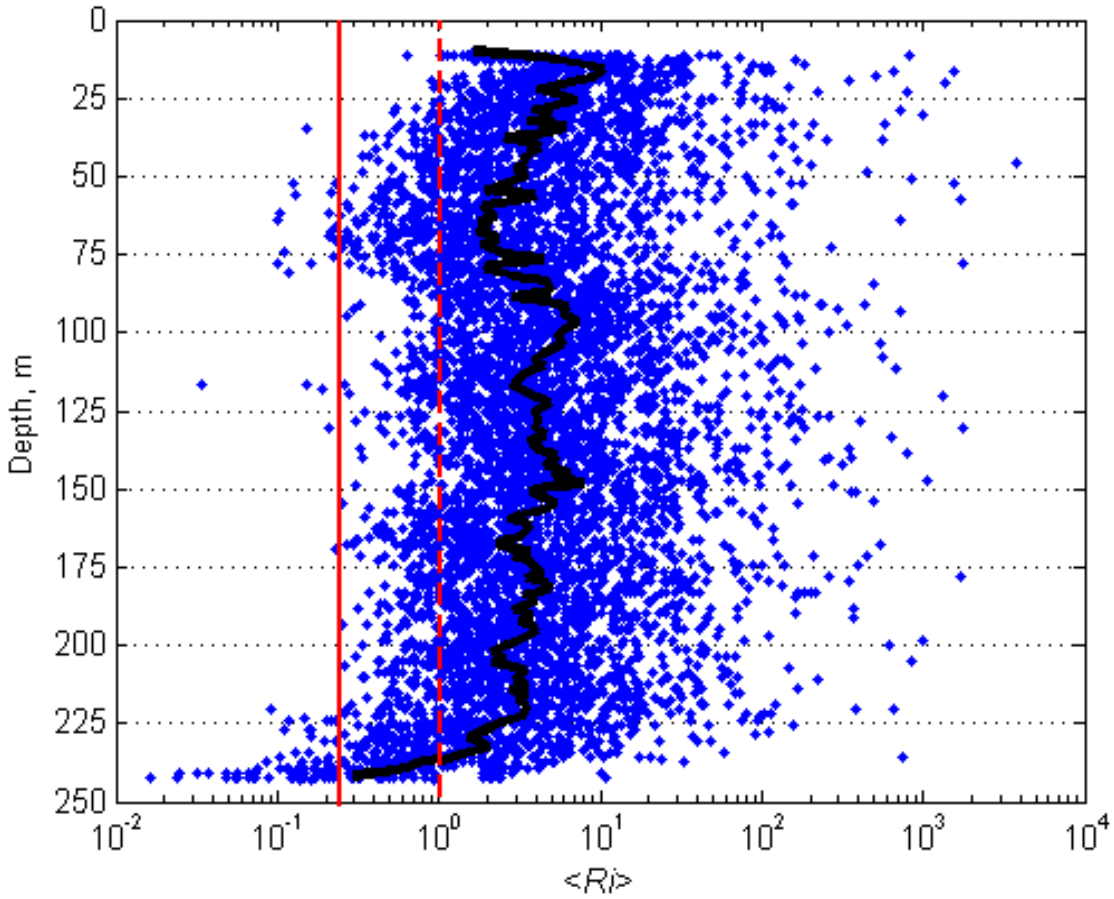
Суб-мезомасштабная (1-10 км) и короткопериодная (1-100 часов) изменчивость динамики вод на узком шельфе Черного моря в районе г. Геленджика является предметом исследований, проводимых ИО РАН на протяжении последних 5 лет. Путем инструментальных измерений, а также с помощью спутниковой информации высокого 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 ρ(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**.

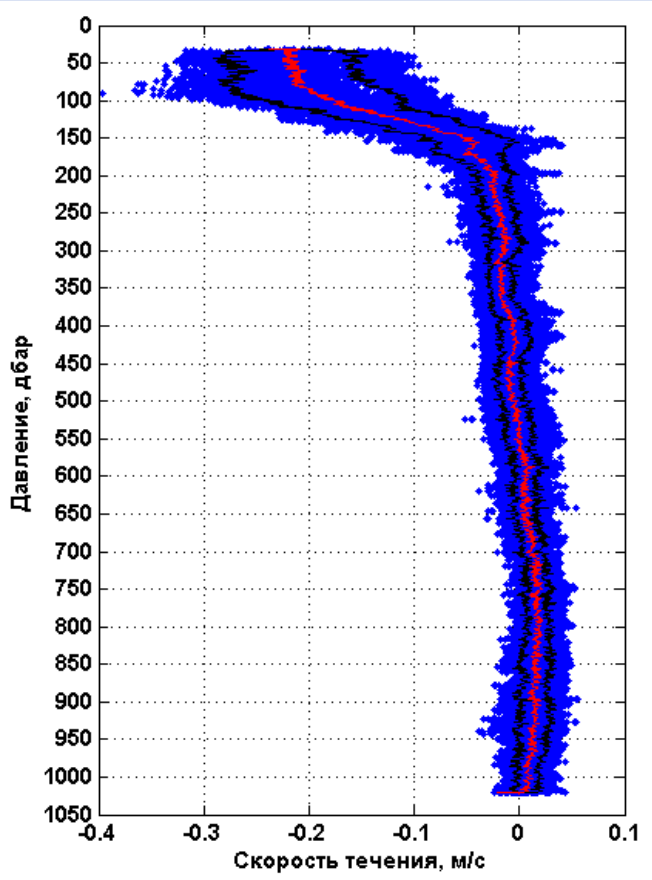


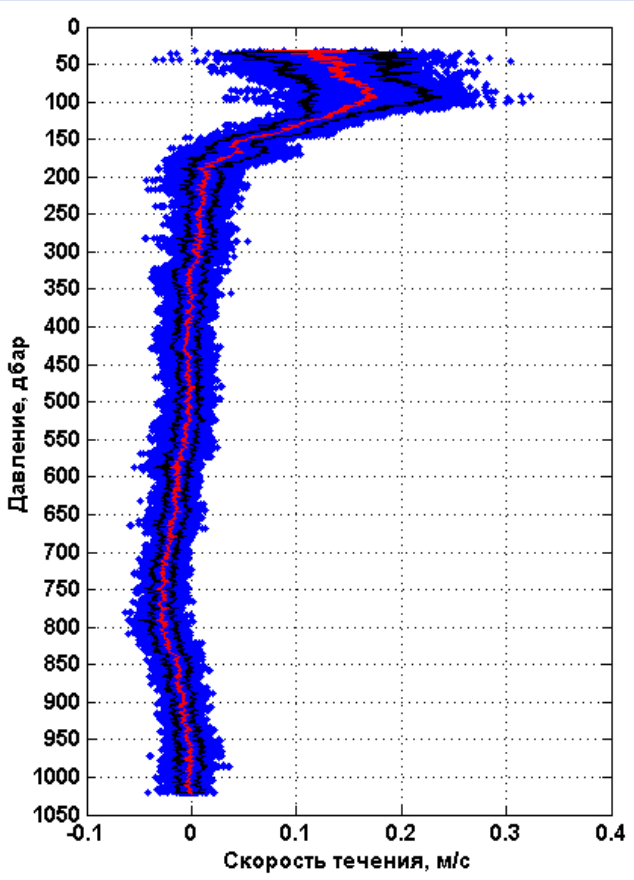
Градиентное число Ричардсона $\langle Ri \rangle = \langle N^2 \rangle / \langle U_z^2 \rangle$ рассчитанное по данным Аквалога (Черное море, 11-13 июля, 2007). Толстая черная линия – ср. медианное значение, красная - $\langle Ri \rangle = 0.25$, красный пунктир - $\langle Ri \rangle = 1$. Коэффициенты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

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

(Pacanowski and Philander 1981)

Пример уникальной регистрации вертикального профиля скорости течения комплексом «Аквалог»

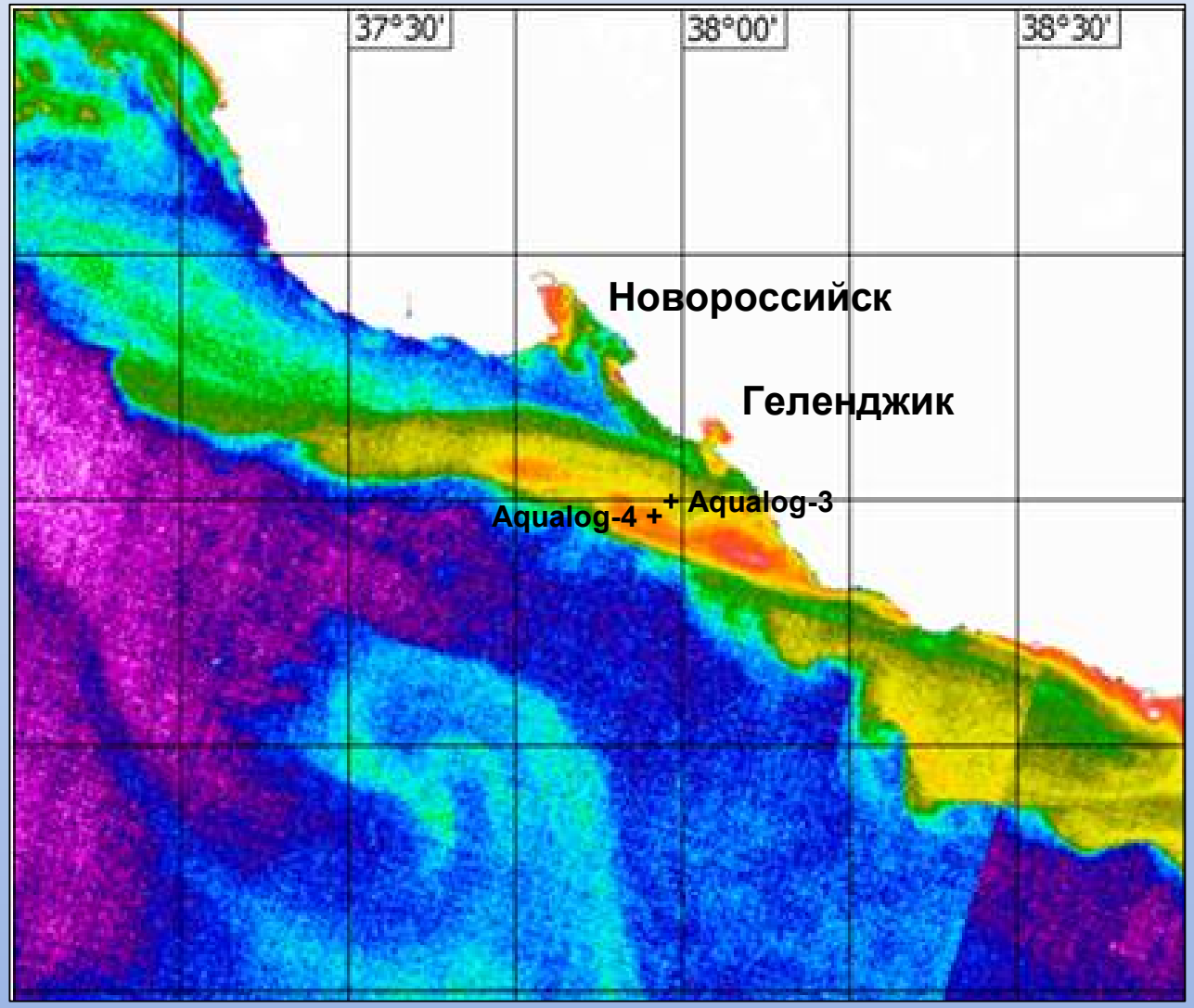




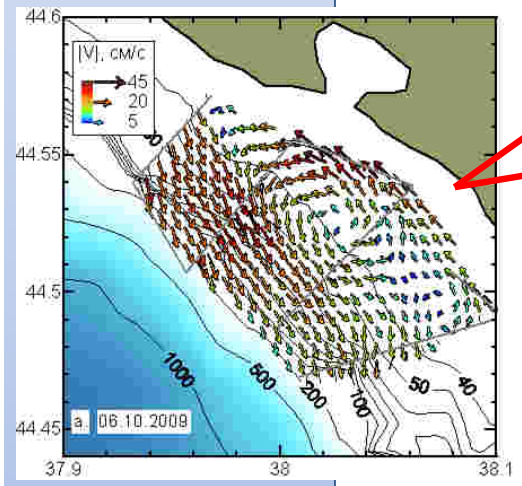
Вертикальные профили зональной (слева) и меридиональной (справа) компонент скорости течений в 1000 м слое по данным измерений зонда-профилографа Аквалог (Черное море, 17-19 июня 2011 г). Синие точки – индивидуальные измерения, красные линии – профили средних значений скорости течения, черные линии –стандартное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

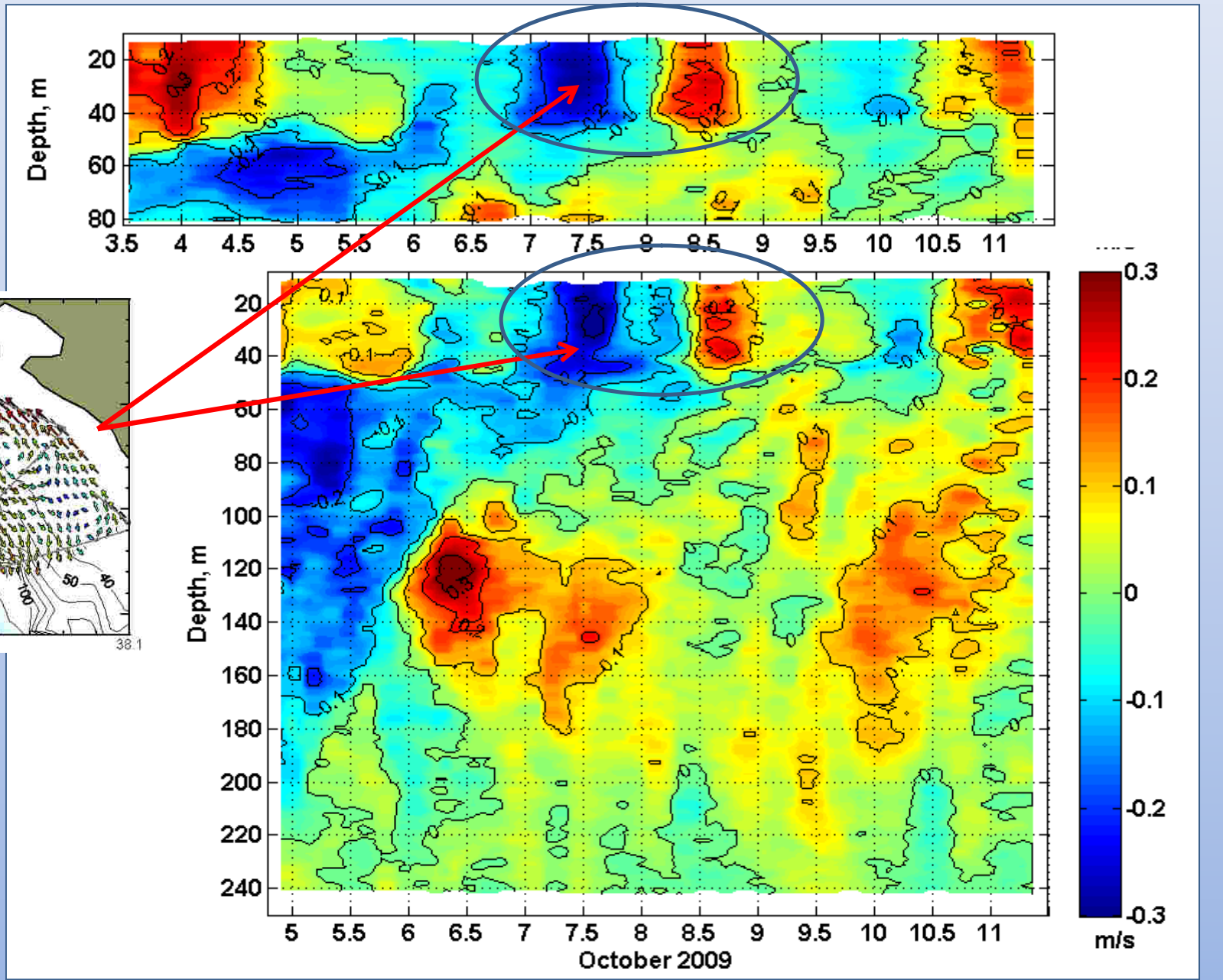
Постановка «Аквалога» на заякоренную линию в Черном море с катера «Ашамба»

Спутниковое изображение концентрации хлорофилла_а 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)



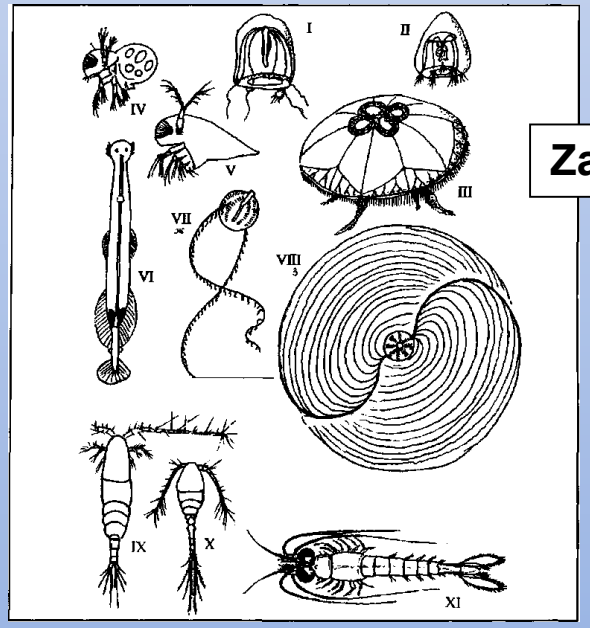


Анализ сигнала акустического рассеяния измерителя скорости Nortek Aquadop – 2 мГц

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 “a” удовлетворяет условию: k*a=1, где “k”= 2π/λ = 2πf/c – волновое число. Данные Aqaudop отображают сигнал рассеяния на частицах, для которых 10>k*a>0.1, что соответствует частицам с радиусом от 10 микрон до **1 мм.**

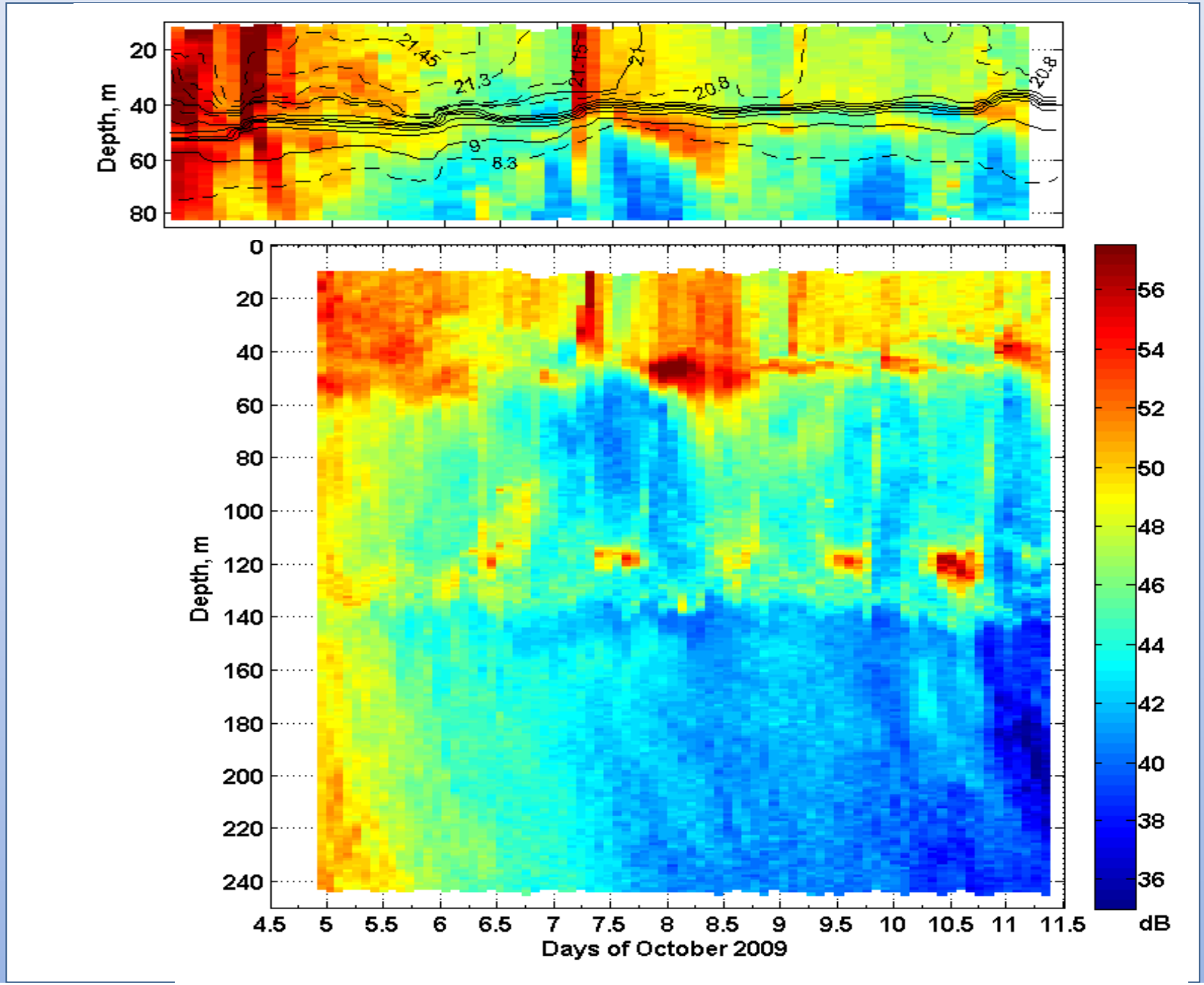
Frequency (MHz)	Particle diameter for k*a = 1
10	50 μm
3.0	160 μm
1.5	320 μm
0.50	960 μm

Zooplankton scatterers:
- swim-bladdered fish,
- Pteropods,
- Capepods.

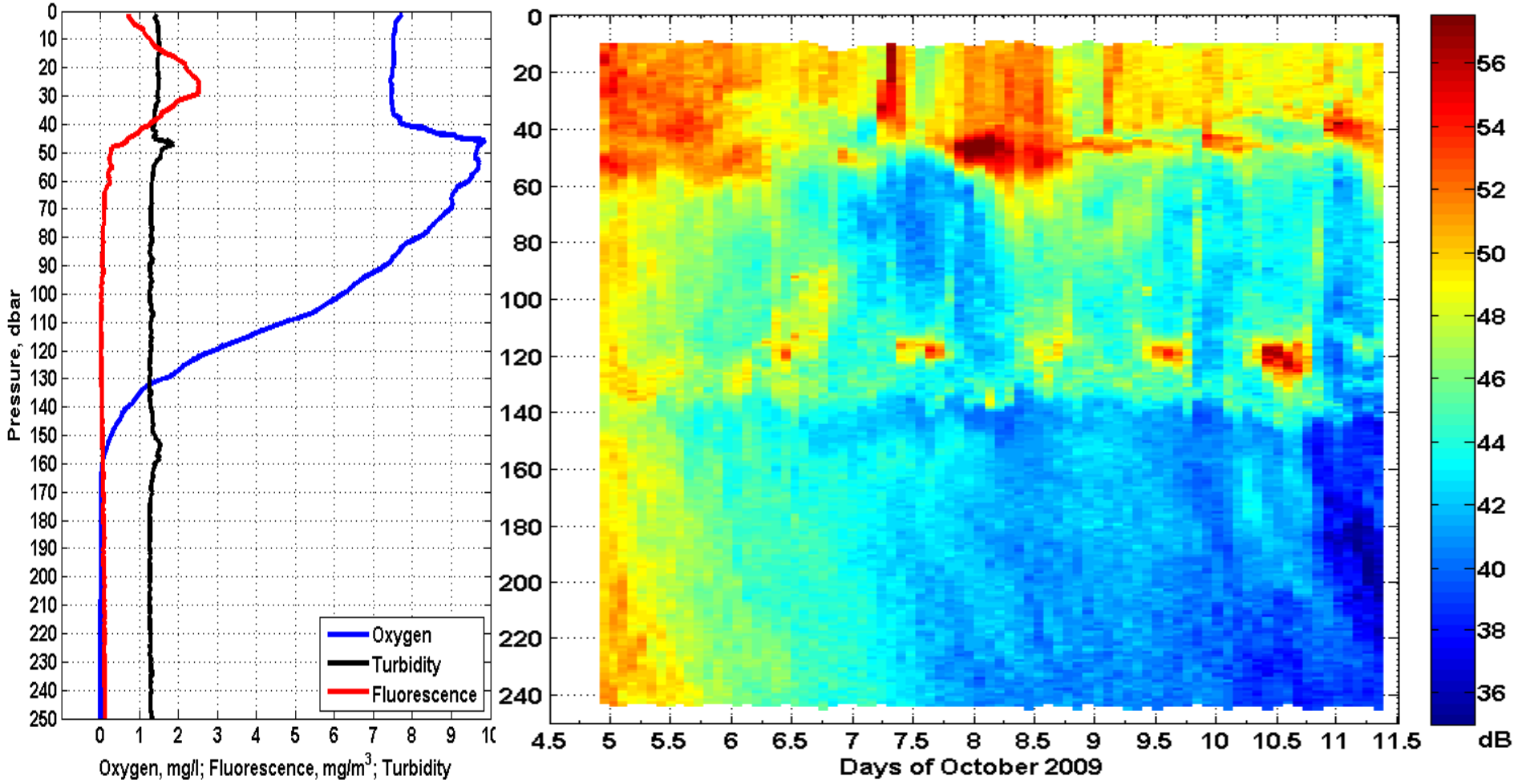


Zaitsev, 1998

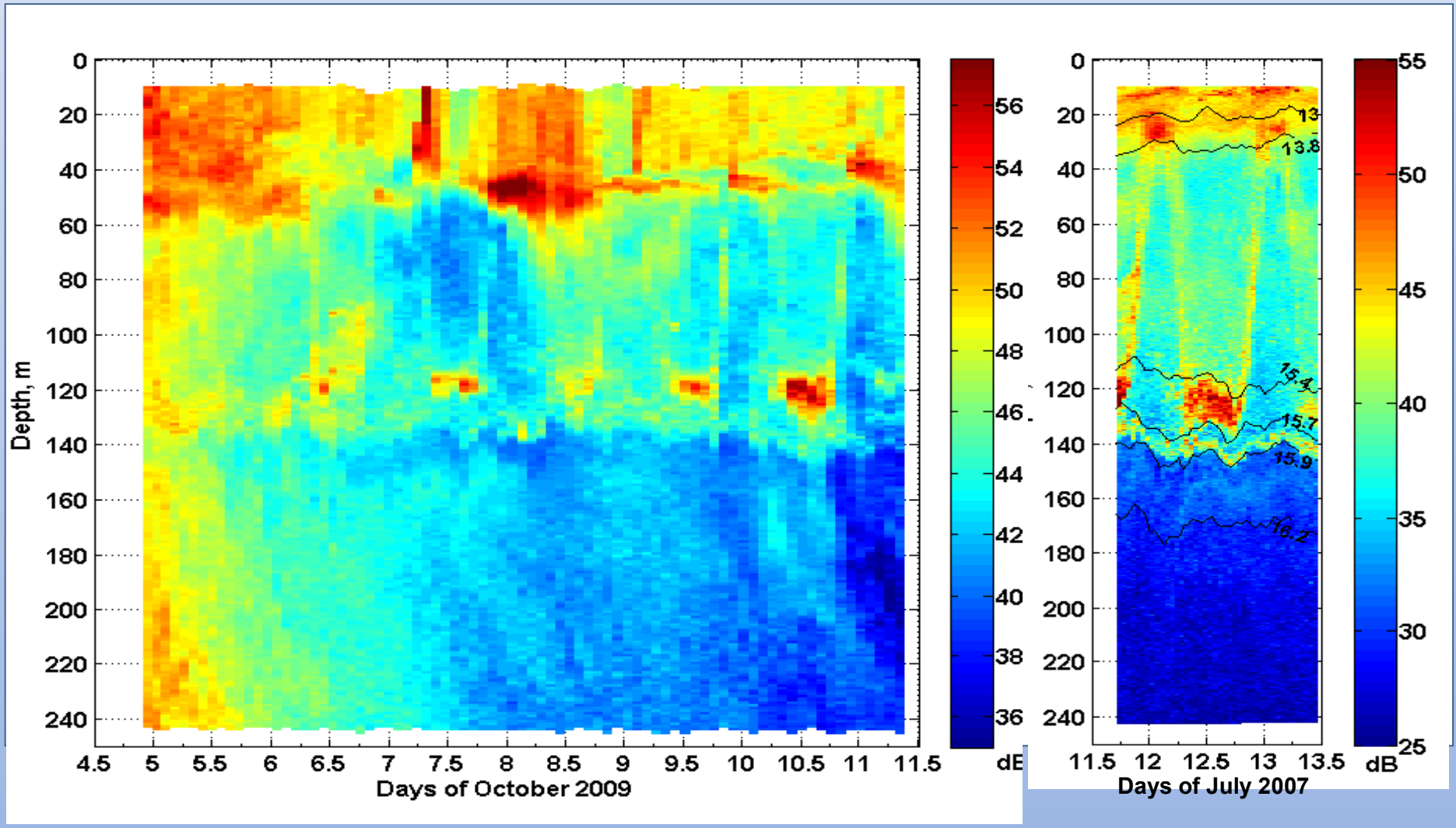
Изменчивость сигнала акустического рассеяния Nortek Aquadop



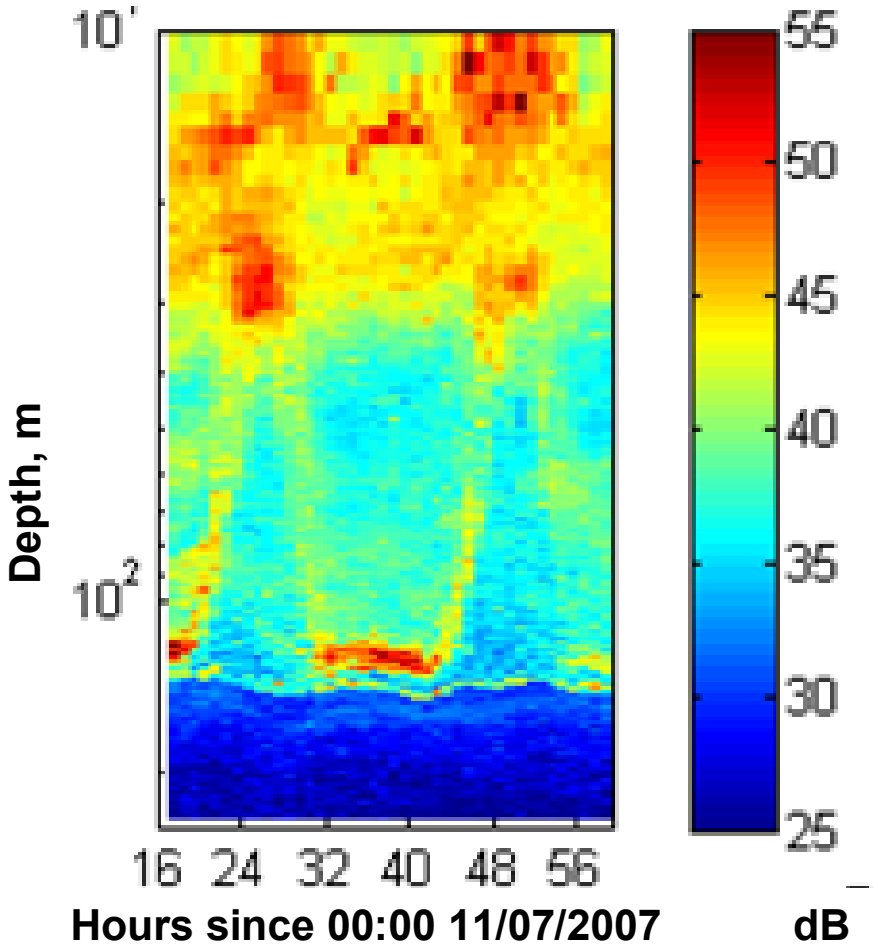
Изменчивость сигнала акустического рассеяния Nortek Aquadop (справа) и сопутствующие профили концентрации растворенного кислорода (синяя кривая), флюоресценции хлорофилла (красная кривая), мутности (черная кривая)



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 измерениям сетные ловы зоопланктона позволили установить, что мигрирующим видом является *Calanus euxinus.*