

XXI Международная конференция

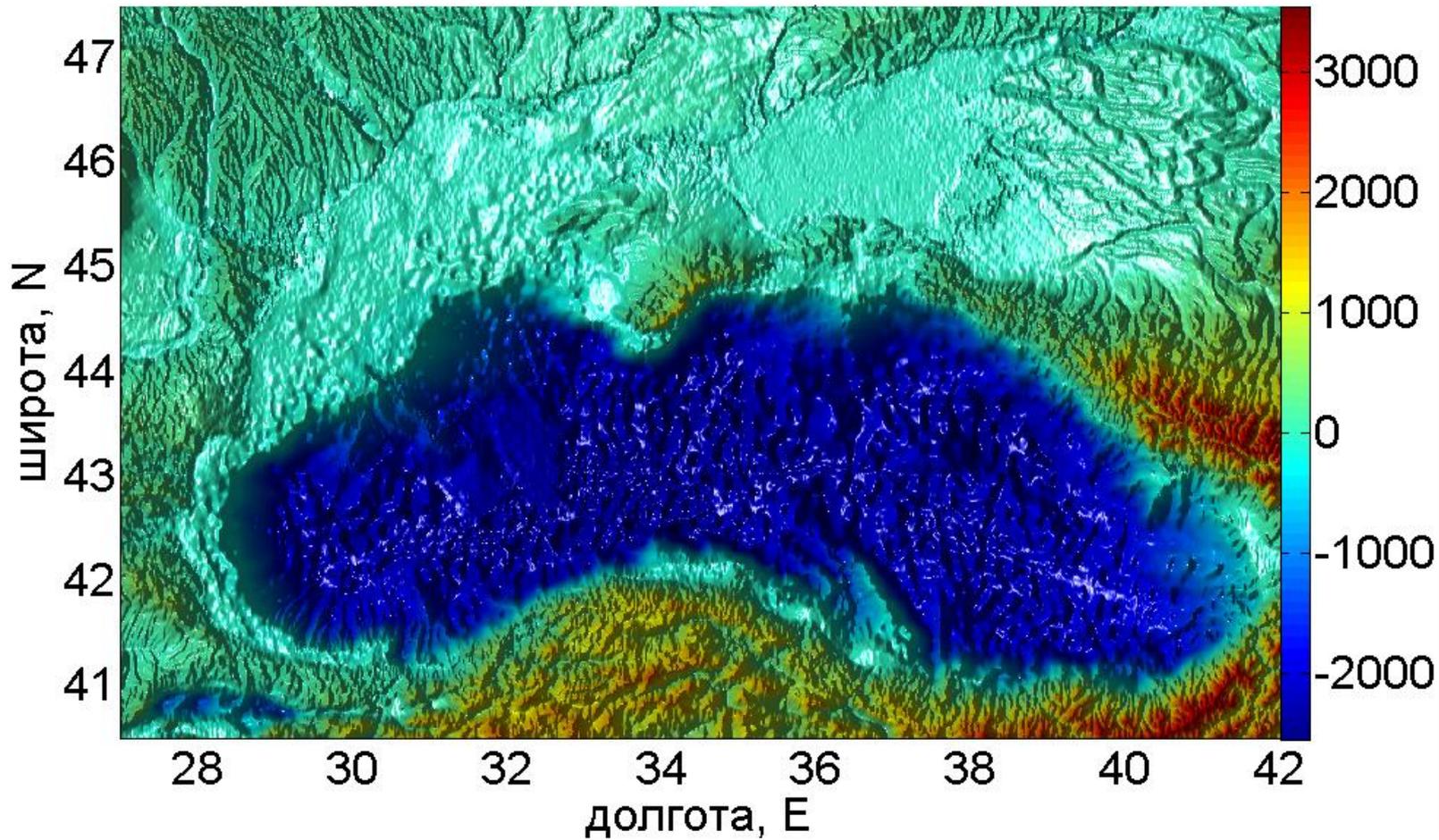
«Современные проблемы
дистанционного зондирования Земли из космоса»,
13 – 17 ноября 2023 г.

Система разномасштабных течений Чёрного моря:
спутниковые наблюдения, измерения и
моделирование

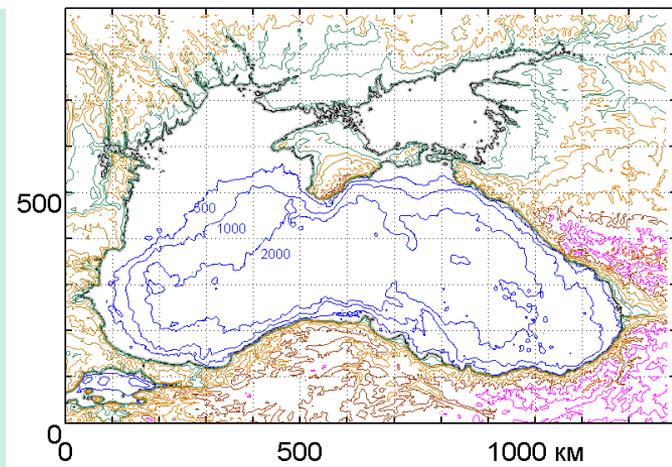
Коротенко К.А., Мельников В.А., Осадчиев А.А.

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН

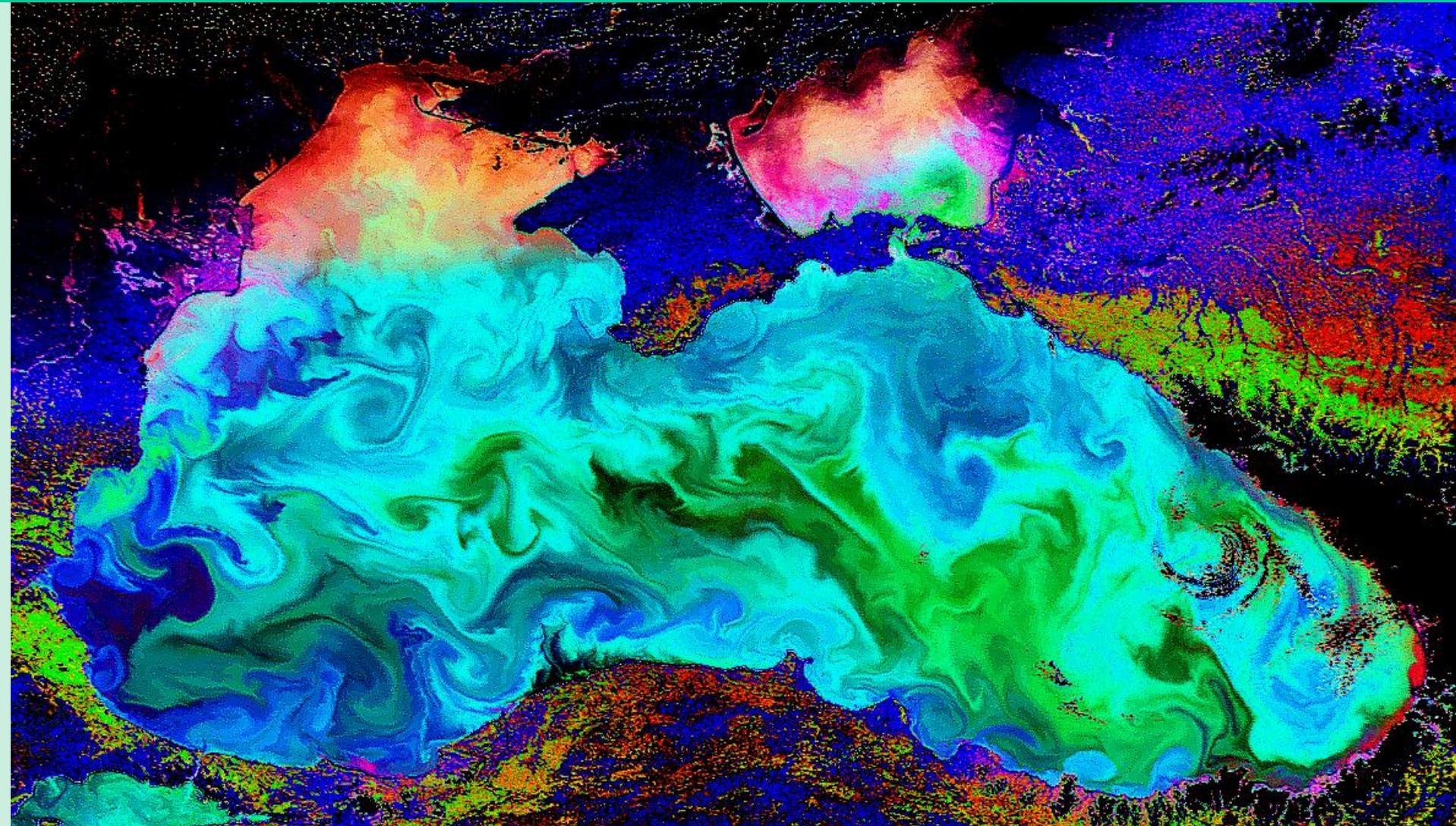
14 ноября 2023 г.
Москва, ИКИ РАН



Черное и Азовское моря. Рельеф земной поверхности и дна моря. Шкала высот и глубин в метрах. Данные из Smith, W.H.F. and D.T. Sandwell (1997), разрешение 2'.



Многообразии мезомасштабных структур в Черном море



Enhanced SeaWiFS Sea surface color imagery, 11 June 2000

Цель работы

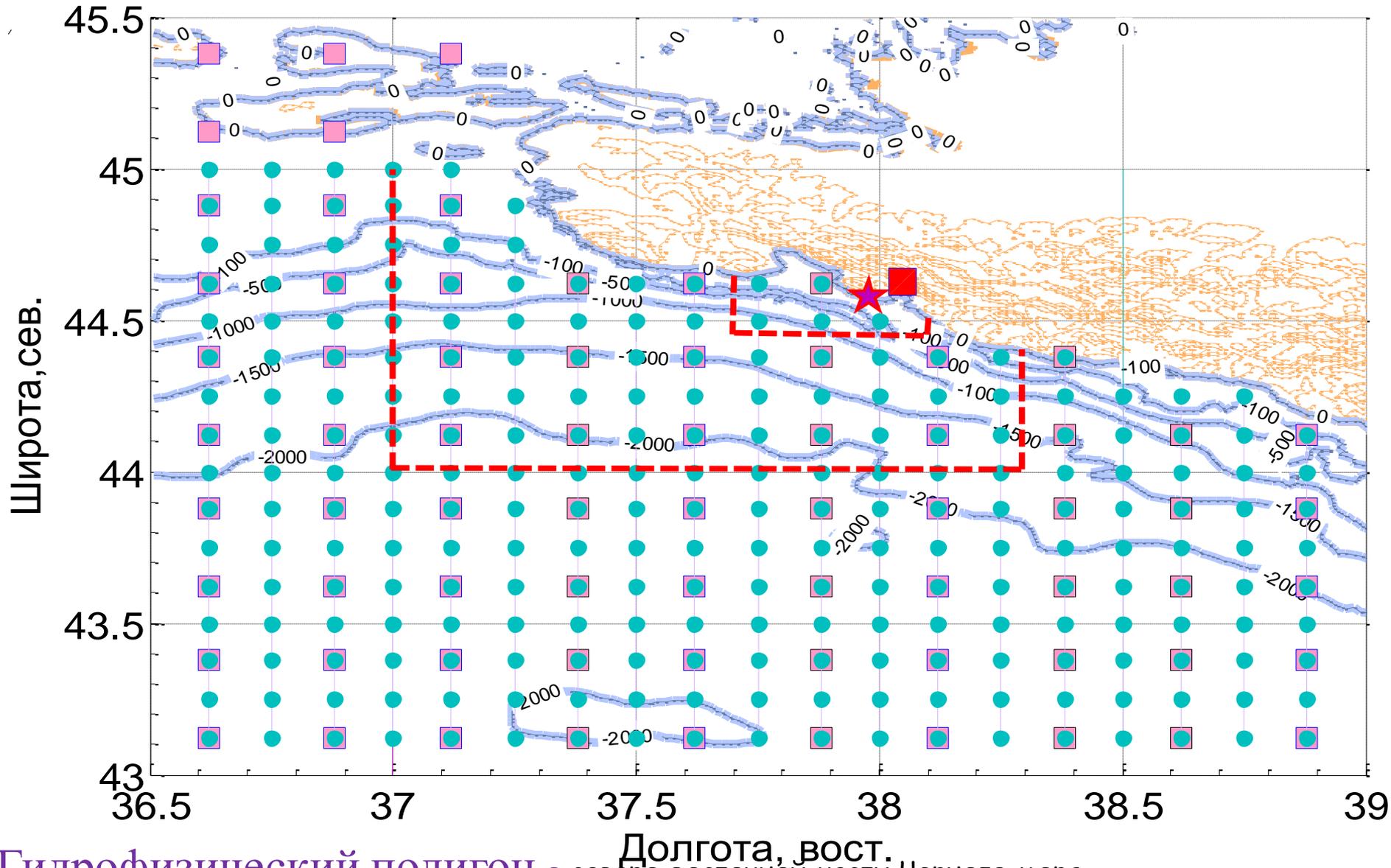
Целью работы является исследование фундаментальных свойств разномасштабных течений Чёрного моря (далее ЧМ), гидродинамических механизмов каскадного переноса кинетической энергии по спектру в широкой полосе частот и пространственных масштабов, на основе обобщения региональных наблюдений и численного моделирования течений при помощи региональной гидродинамической модели Die2BS, которая является модификацией численной модели общей циркуляции океана DieCast применительно к ЧМ. В работе проведено численное моделирование некоторых особенностей наблюдаемых мезомасштабных структур ЧМ, а также верификация модели по данным измерений *in situ*.

Мотивация

Несмотря на бурное развитие спутниковых наблюдений и контактных измерений, представление о циркуляции вод ЧМ остаётся далеко неполным. На это есть несколько причин. Во-первых, опыт океанографических работ показывает, что долговременные постановки контактных измерителей являются дорогими и рискованными. Поэтому, данные измерений *in situ* остаются эпизодическими и фрагментарными. Во-вторых, спутники «видят» обширные акватории, но только на поверхности моря. Бóльшая часть морских гидродинамических процессов на поверхности моря не проявляется. В-третьих, типичное разрешение осреднённых спутниковых «продуктов» (по горизонтали в среднем ~ 60 морских миль) не является достаточным для адекватного представления мезомасштабных структур в наблюдаемых гидрофизических полях. В условиях таких ограничений, интерпретации разномасштабных флуктуаций океанографических параметров в рамках существующих представлений о сложных вихревых полях являются практически невыполнимыми. Однако, дополнительные возможности для изучения гидродинамической системы региона ЧМ появляются при численном моделировании гидродинамики изучаемой акватории. Для ЧМ использовалась вихреразрешающая гидродинамическая модель Die2BS (модификация модели общей циркуляции океана DieCAST) с разрешением 2 морские мили. Ключевым условием для применения любой численной модели для интерпретаций является её проверка на натурных данных с постепенной настройкой параметризаций.

Содержание:

- 
- Черное море - идеальная гидрофизическая лаборатория, позволяющая в реальных масштабах исследовать разномасштабные течения вод, включая процессы генерации и эволюции мезомасштабных вихрей.
 - Данные спутниковых наблюдений и контактных измерений.
 - Модель циркуляции вод Черного моря DieCAST: краткое описание, инициализация, параметризации и примеры результатов моделирования.
 - Спектральная структура поля скорости в прибрежной зоне, над материковым склоном и в открытых частях ЧМ.
 - Инерционные колебания течений по данным измерений *in situ* и в модели DieCAST.



Гидрофизический полигон в северо-восточной части Черного моря.

Условные обозначения: звездочка-причал ИО РАН(44.58°N,37.98°E, Голубая бухта); черный квадрат-метеостанция(44.55°N,38.05°E,г.Геленджик); серые квадраты-ряды спутниковой ТТМ, 1985-2008гг.,(nightly SST,AVHRR,NOAA); точки-ряды аномалий уровня моря (Black Sea MSLA, AVISO products); жирные линии - изолинии глубины моря (в метрах); тонкие линии- изолинии (без оцифровки) рельефа суши; штриховые линии отмечают три области Полигона.

- - метеостанции
- ▲ - уровнемерный
пост
- ▲ - донный ADCP
- - заякоренная
термокоса
- - профилограф
Аквалог
- - CTD-станции
на судовом
разрезе
- - галсы судна
при буксировке
ADCP

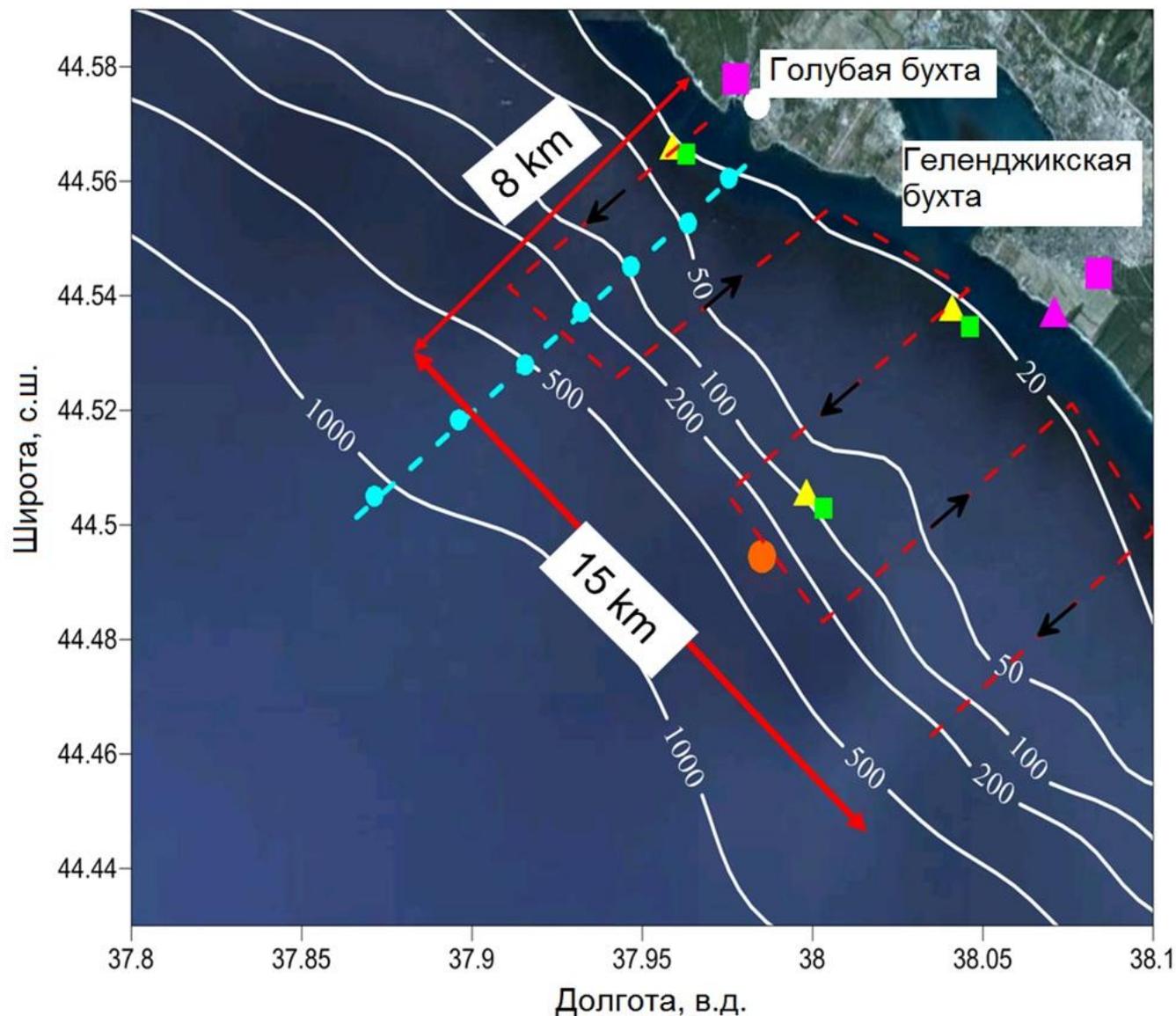


Схема контактных измерений на Гидрополигоне ИО РАН:

Пунктирной линией со стрелками обозначены галсы судна при проведении измерений поля скорости течения, с помощью буксируемого за судном ADCP.



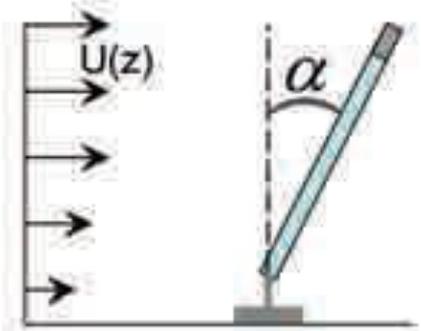
ЛОСЦВА
Получено
в Канцелярии
Гидрографического
отдела

Монтаж измерительного оборудования (ADCP) на поддерживающей раме в виде усечённой пирамиды.



Перспективные и недорогие измерители скорости течений "SeaHorse". Остроумный изобретатель - Виталий Шеремет (Вудс Холл).

Accuracy:
2.5 cm/s in velocity
5° in direction.



Accelerometer

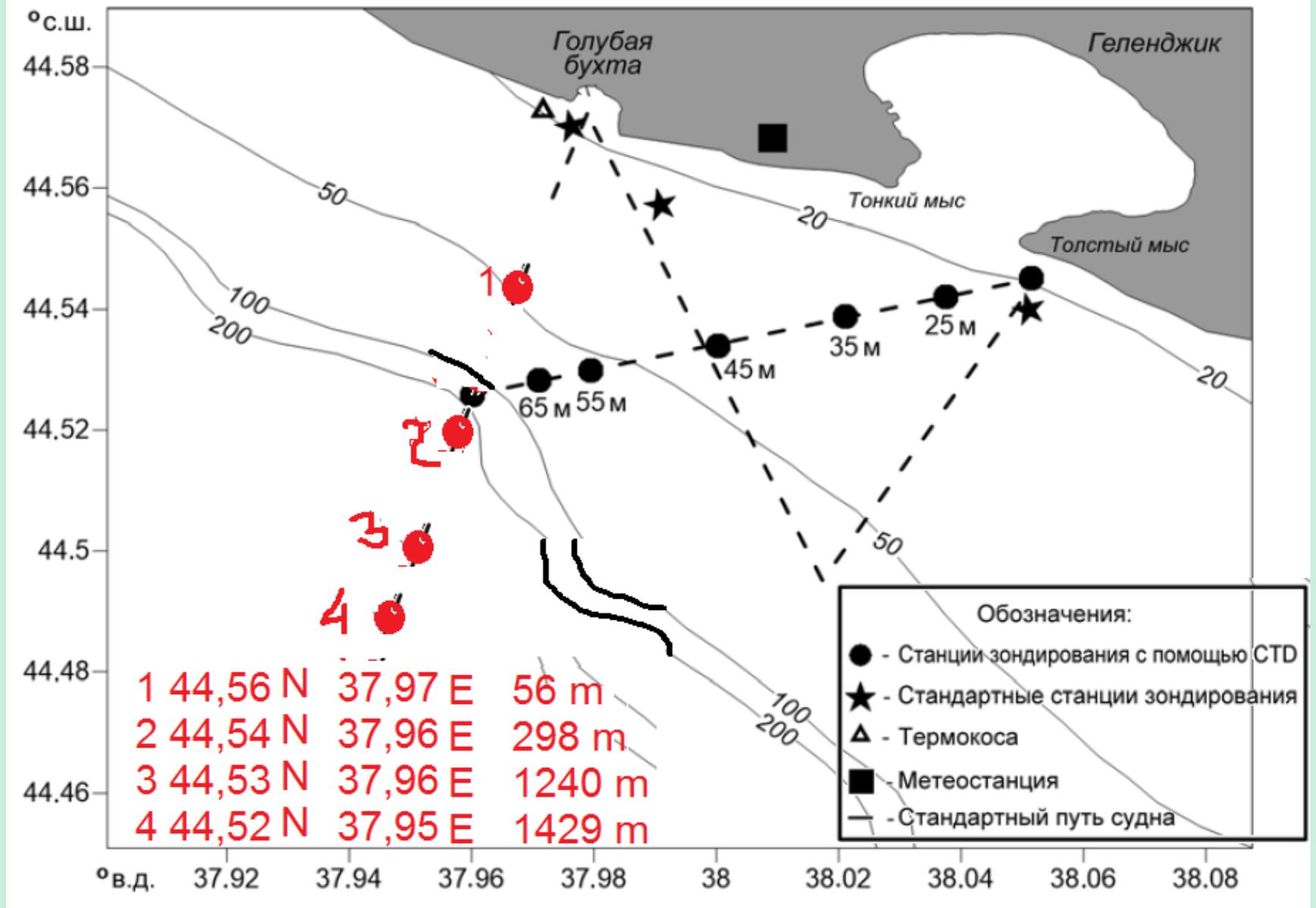
Pressure logger

(Courtesy of M. Merrifield)

Temperature/Light



SeaHorse tilt current meter developed by Vitalii Sheremet from the University of Rhode Island. While in the water, a buoyant plastic pipe containing an accelerometer is anchored vertically to the sea floor. Sea currents cause the pipe to tilt. The angle of the tilt, measured by the accelerometer, is converted into velocity of the current. Additionally, temperature and pressure sensors are attached to the current meter's anchor.



Выбор точек (красные точки) на траверзе Голубой бухты для расчёта модельных рядов гидрологических параметров, продолжительностью 1 год, с дискретностью 4 час.



Расположение Автономных буйковых станций (красные точки) и точек модельных временных рядов (зелёные квадратики).

Моделирование циркуляции Черного моря

- Спутниковые снимки неоценимы для анализа вихревых структур поверхности океана, однако для полной картины необходимо использовать методы, позволяющие описать также внутреннюю структуру вихревых образований.
- К таким методам относятся инструментальные измерения и численное моделирование.
- К настоящему времени есть попытки «сшить» результаты спутниковых наблюдений с результатами численных экспериментов или измерений, чтобы получить целостную 3-х мерную картину.
- Для настройки и валидации численных моделей, а также верификации результатов моделирования необходимы долговременные спутниковые данные и данные долговременных полигонов.
- Для анализа пространственной структуры мезомасштабных вихрей используется вихреразрешающая слабо диссипативная гидродинамическая модель DieCAST.

DieCAST Global Ocean Circulation Model

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

Black Sea version:

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

ETOPO2 Bathymetry;

Resolution: (1/30)^o Steps: Dlon=426; DLat=238;

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

30 unevenly spaced z-levels; 31 Rivers;

Open Boundaries at Bosphorus and Azov Straits;

2-min for the Black Sea applied:

Korotenko, Bowman, Dietrich, (2010)

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

- Initialization: January-averaged temperature and salinity data and forced with climatological winds and surface buoyancy (heat) fluxes, evaporation - precipitation (Staneva et al., 2001)
- and with river runoff (Jaoshvily, 2003);
- Nudging is used;

Для идентификации мезомасштабных вихрей широко используется **Метод Окубо-Вейсса**

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

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

Где s_n , s_s - нормальная и касательная компоненты деформации поля скорости, ω - относительная завихренность потока.

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

Q^2 делит океан на районы, где доминирует завихренность и на те, где доминирует сдвиг или деформация скорости.

Области, где $Q^2 < 0$ идентифицируются как вихри, поскольку в них доминирует компонента завихренности. Важным в данном методе является оптимальное выделение порогового значения Q^2_0 в районах с различной вихревой активностью. Слишком большие значения будут вести к значительной потере вихрей, в то время как выбор слишком малых значений будут приводить к резкому увеличению их количества и объема обработки (Izern-Fontanet et al, 2009).

Модифицированный параметр Окубо-Вейсса

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

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

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

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

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

Спектр мощности рассчитывался на основе представления ряда измерений обобщённого параметра $V(t)$, в декартовой системе координат, в точке с координатами $\mathbf{r}: \{x, y, z\}$, в моменты времени $t_i = i\delta t$, $i=1, 2, \dots, N$, при помощи ряда Фурье:

$$V(t) = \operatorname{Re} \sum_{m=1}^{\frac{N}{2}-1} \hat{V}_m e^{if_m t},$$

где: $\hat{V}_m = [2/(N\delta t)] \sum \delta t V_k(t) \exp(-i2\pi mk/(N\delta t))$ - коэффициенты Фурье на частотах $f_m = 2\pi m/(N\delta t)$, δt - интервал дискретизации. Матрица S_{ij} спектра мощности векторной величины $V(t)$ определяется как $S_{ij} = \langle \hat{u}_i^* \hat{u}_j \rangle$, где \hat{u}_i - компоненты вектора \hat{V}_m ; * - комплексное сопряжение; скобки обозначают осреднение по ансамблю, которое в силу гипотезы об эргодичности процесса, заменяется на осреднение по окну полосы разрешения.

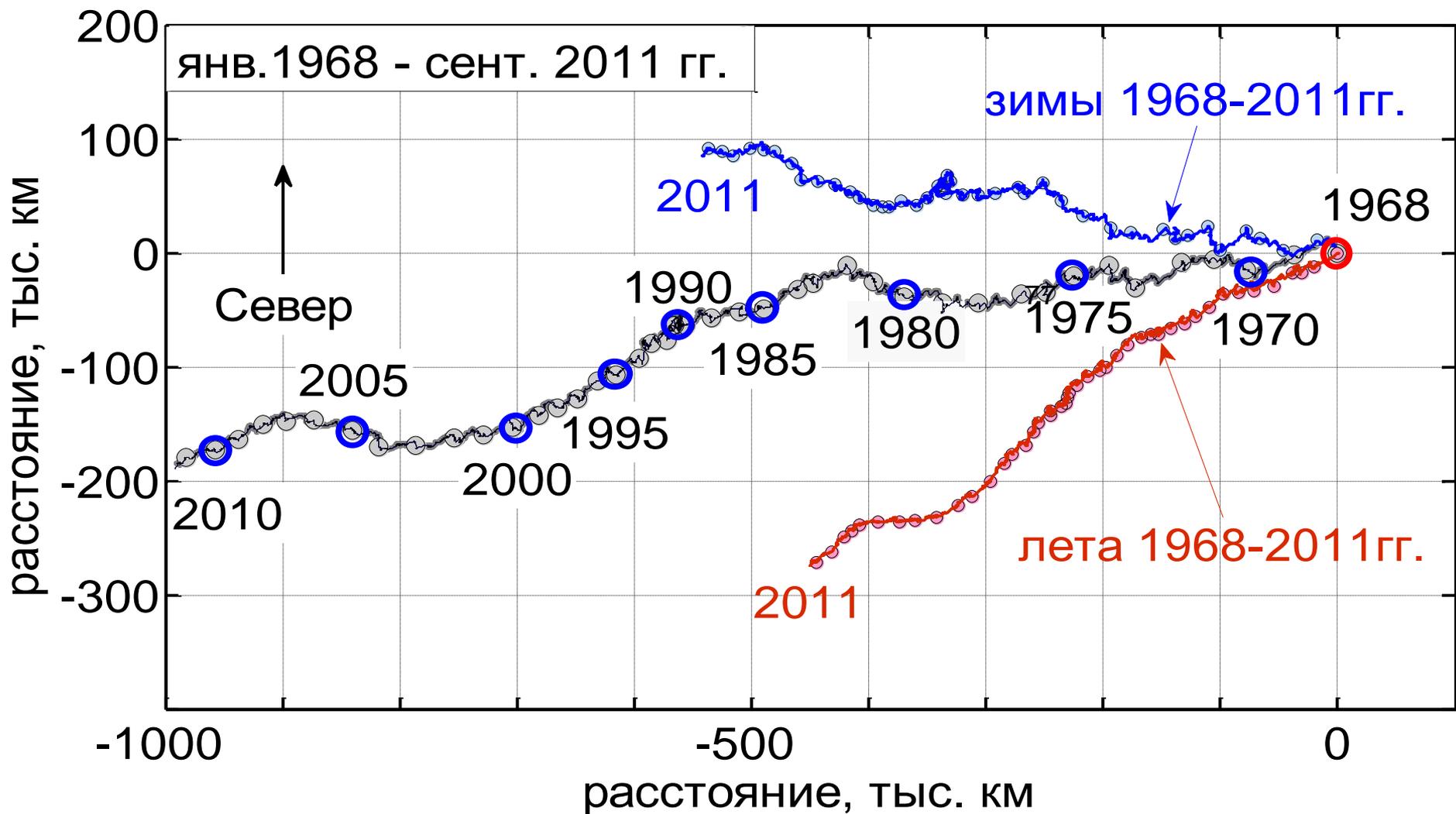
Непрерывное прямое вэйвлет-преобразование $W_n(s)$ определяется как свёртка последовательности значений обобщённого параметра X_i , $i=0, 2, \dots, N-1$, с функцией $\psi_n((n'-n)\delta t/s)$, которая задаётся как нормированная и растянутая копия компактного ядра $\psi_0(\eta)$:

$$W_n(s) = \sum_n^{N-1} X_{n'} \psi^* \left(\frac{(n' - n) \delta t}{s} \right),$$

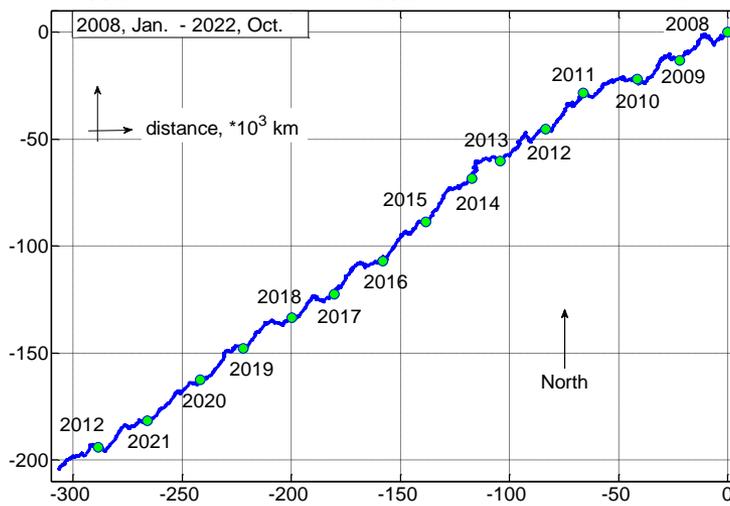
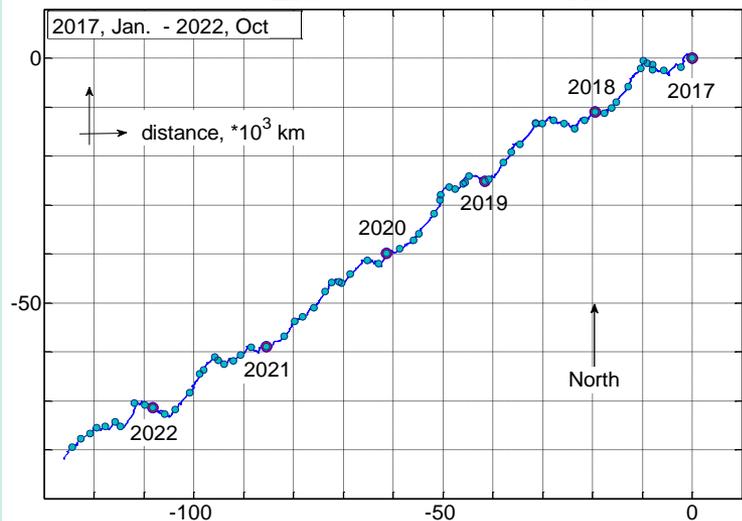
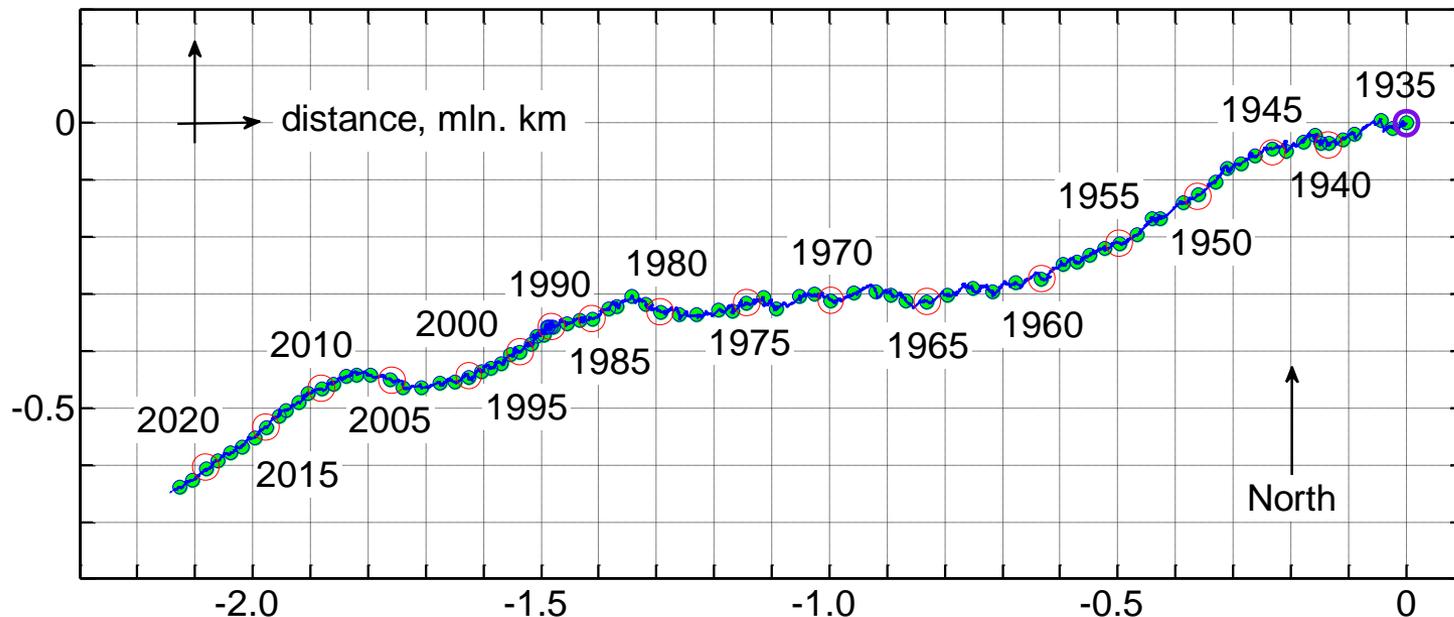
где: * - комплексное сопряжение; s - масштаб временного вэйвлет-окна; n - индекс момента времени. Среди некоторого класса подходящих функций можно выбрать удобный вэйвлет Морле: $\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i2\pi f_0 \eta} e^{-\eta^2/2}$, с преобразованием Фурье $\hat{\psi}(f) = \pi^{-1/4} H(f) e^{-\pi(f-f_0)^2}$, где $H(f)$ - функция Хэвисайда.

Условия нормировки важно выбирать так, чтобы дисперсия ряда (общая "энергия") равнялась сумме квадратов $W_n(s)$, согласно теореме Парсеваля.

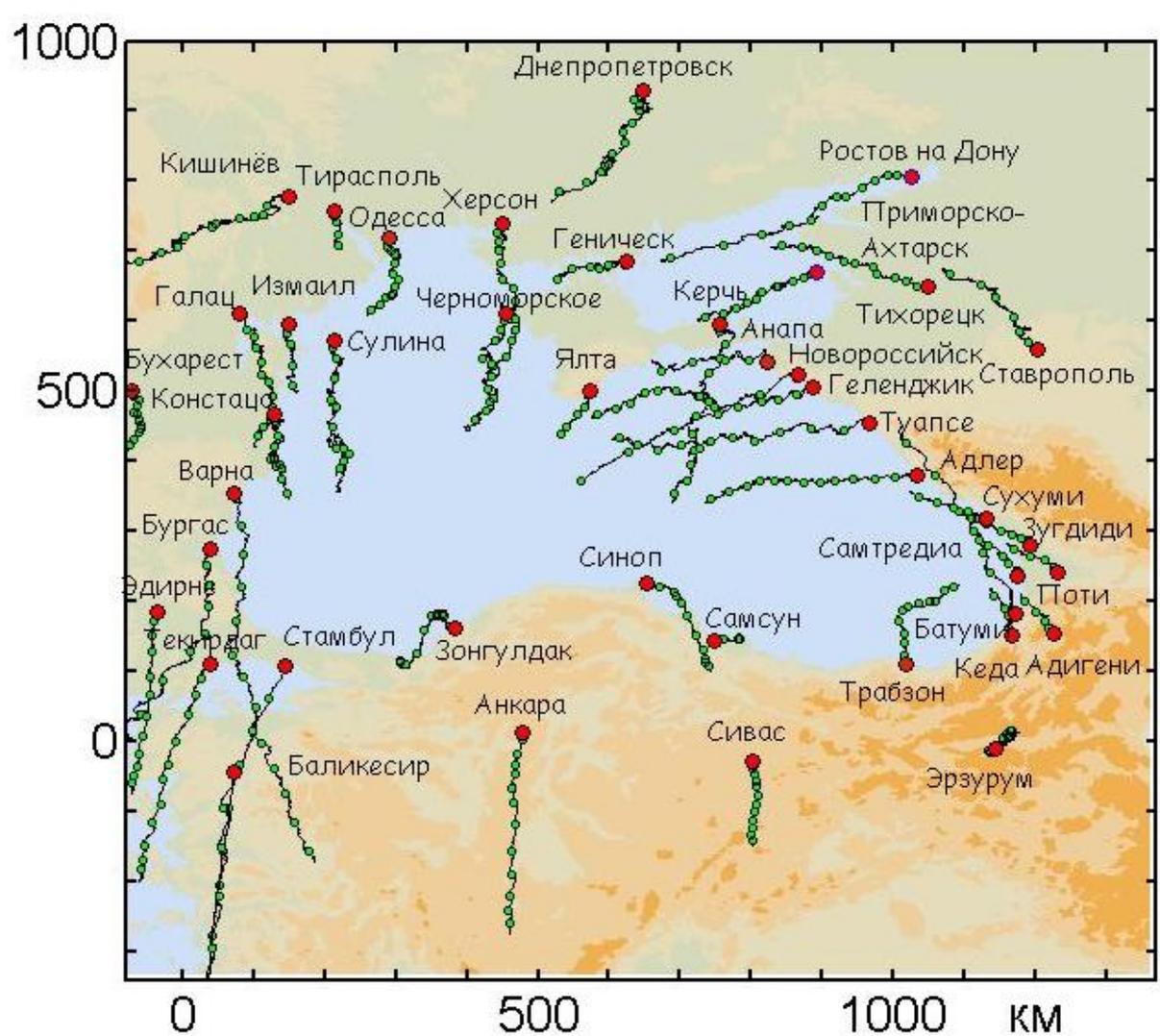
Некоторые сведения о циркуляции воздуха
и вод Чёрного моря



Долговременные изменения ветра на метеостанции Геленджика.
 Показаны прогрессивные векторные диаграммы полных и сезонных ветров.

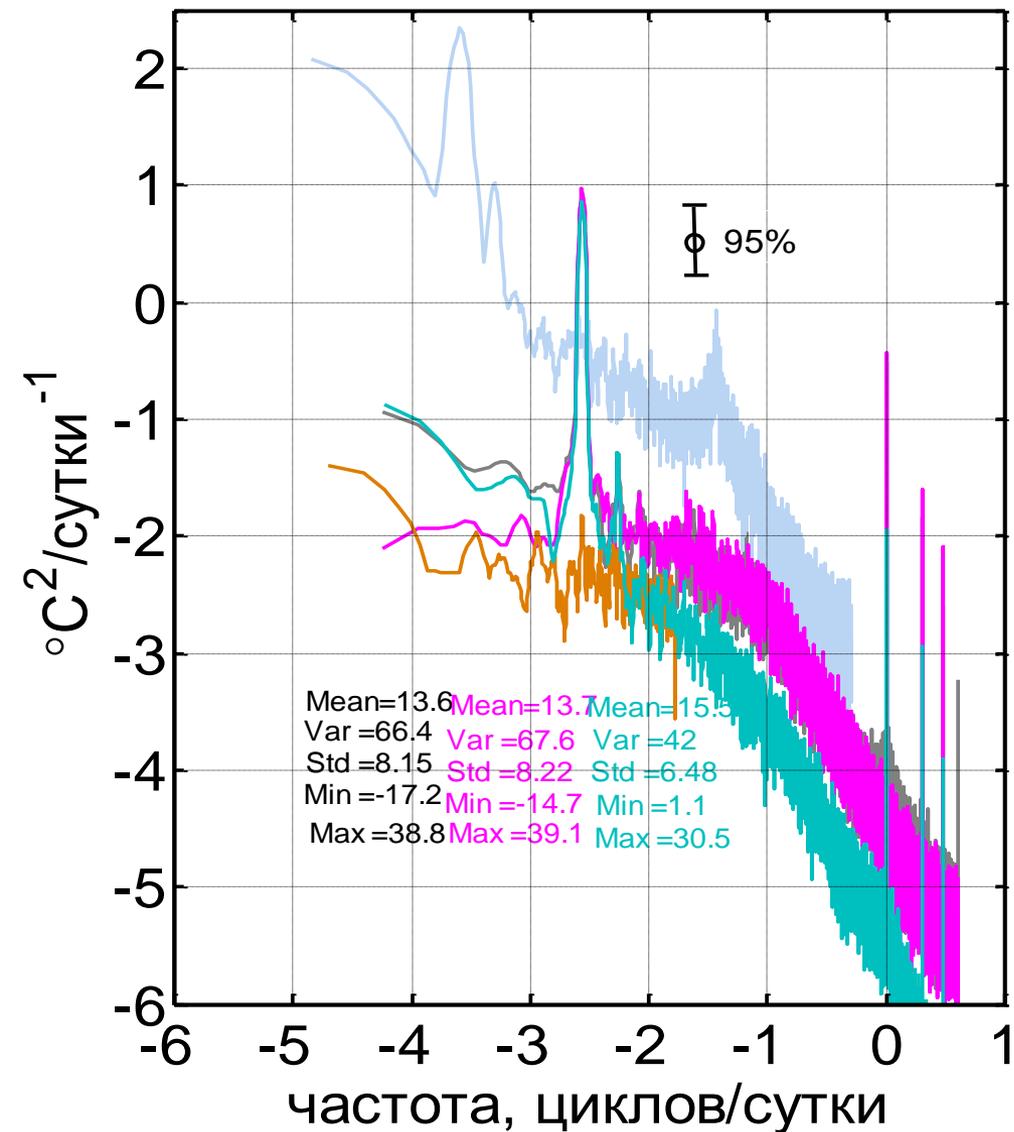


Прогрессивные векторные диаграммы ветра по данным метеостанции Геленджика ($44.55^{\circ}\text{N}, 38.05^{\circ}\text{E}$) с 1935 года по н/время. Зелёные кружки отмечают годы. Красные кружки - пятилетия. Прослеживаются много-масштабные фрактальные климатические колебания скорости ветров.



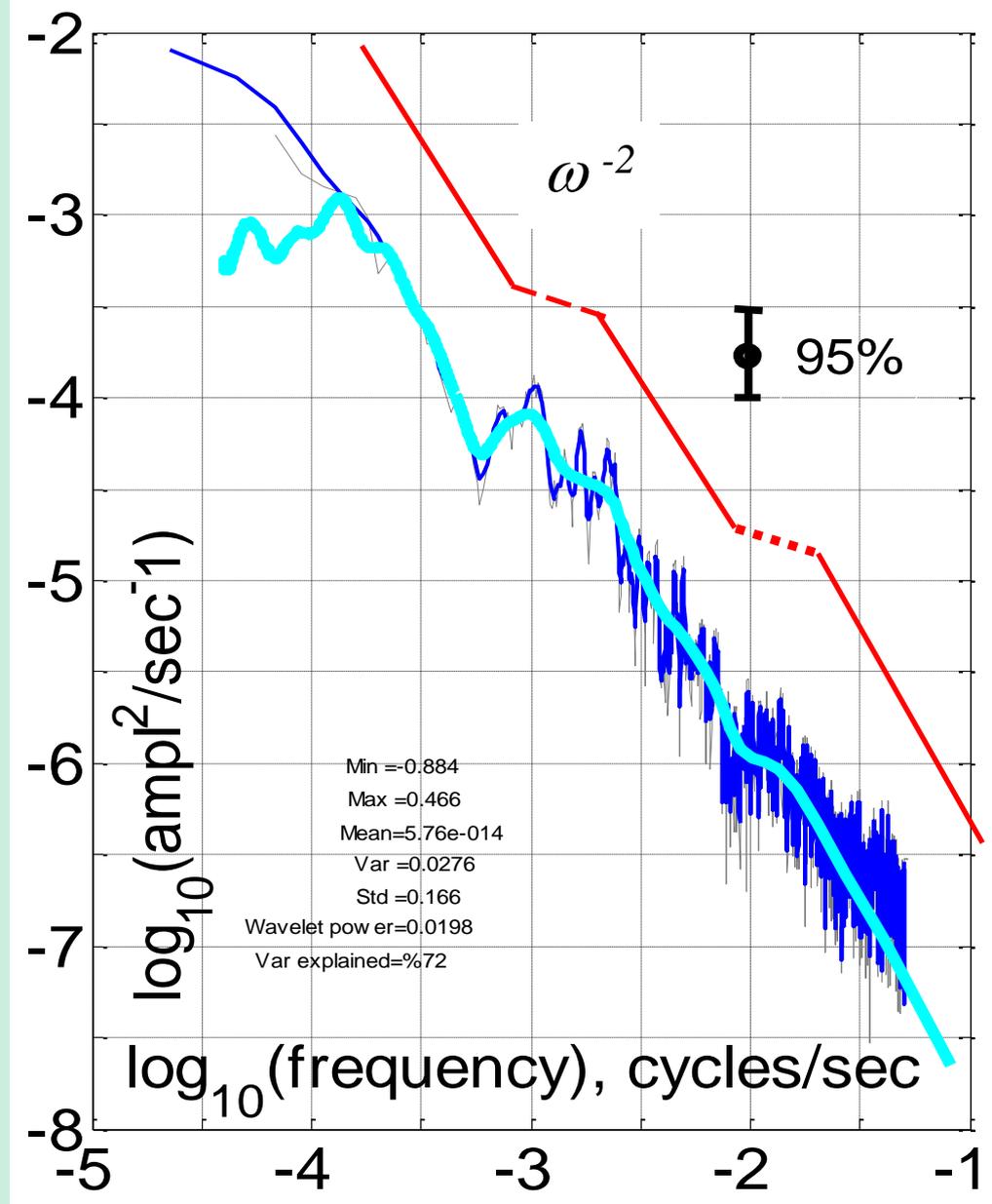
Отмечается циклоническая завихренность долговременных ветров, что может способствовать циклоническому ОЧТ.

Прогрессивные векторные диаграммы ветра по данным черноморских прибрежных метеостанций в период 1998-2011 гг. Диаграммы построены в масштабе: 1 деление шкалы расстояний=1000 км. Зелёные кружки отмечают годы. Красные кружки отмечают местоположение метеостанции и начало каждой диаграммы.



- Спектральные плотности (Фурье), нормированные на дисперсию ряда:
- 1.серый - температура воздуха на метеостанции Геленджика (по срокам).
- 2.розовый - модель временного ряда колебаний температуры воздуха.
- 3.зелёный - температура воды суточные значения на метеостанции Геленджика.
- 4. коричневый - индекс NAO (1853-2012 гг., ежемес.)
- 5. голубой - числа Вольфа (1640-2012 гг., 10 сут.).

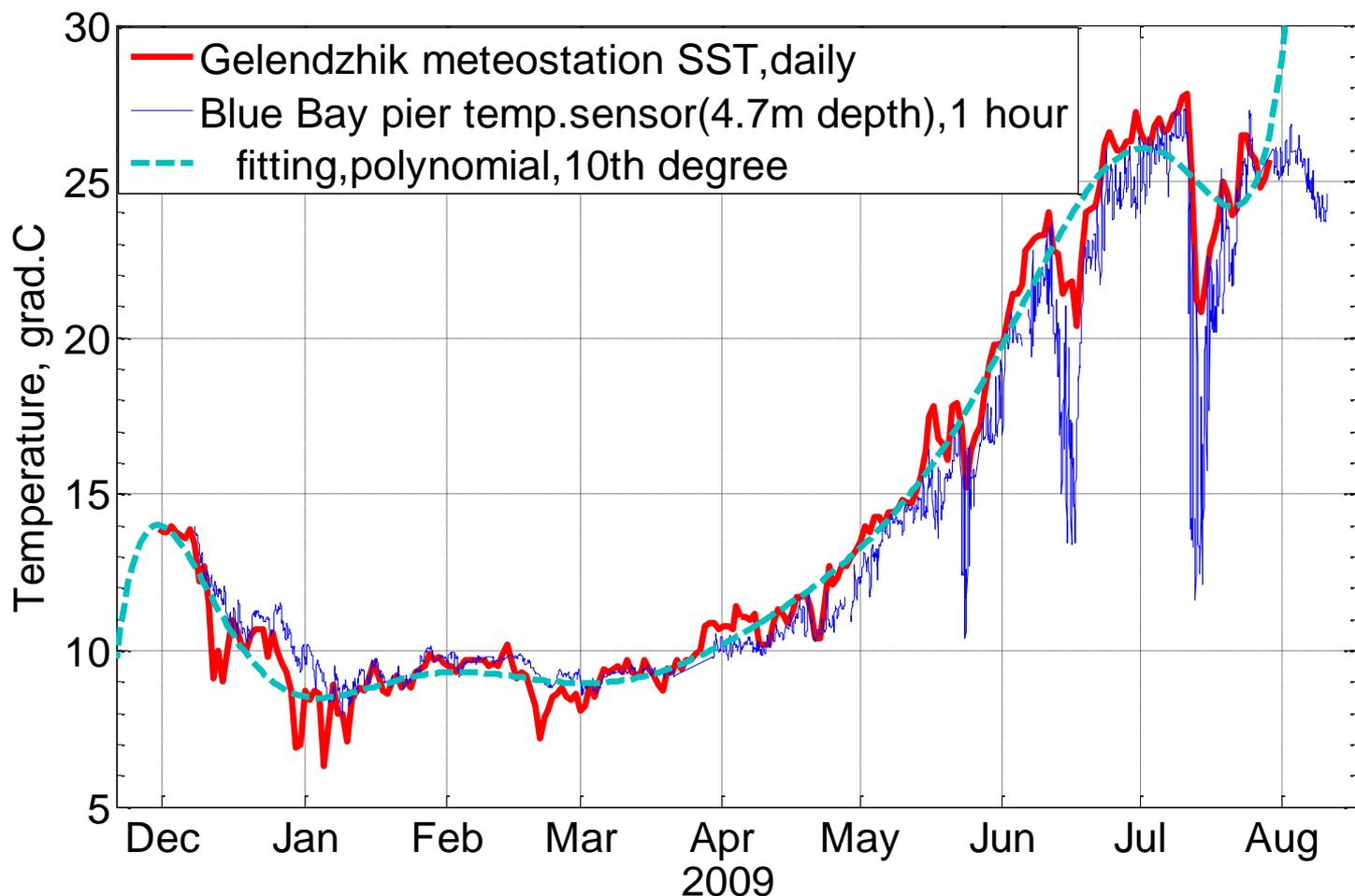
“Красные” Фурье -спектры колебаний температур воздуха и воды по данным измерений на метеостанции Геленджика и марковская модель спектра температуры воздуха служат для верификации модельных (модель DieCAST) временных рядов.



Типичная структура спектров колебаний температуры морской воды.
 Сравнение Фурье и вэйвлет-спектров.

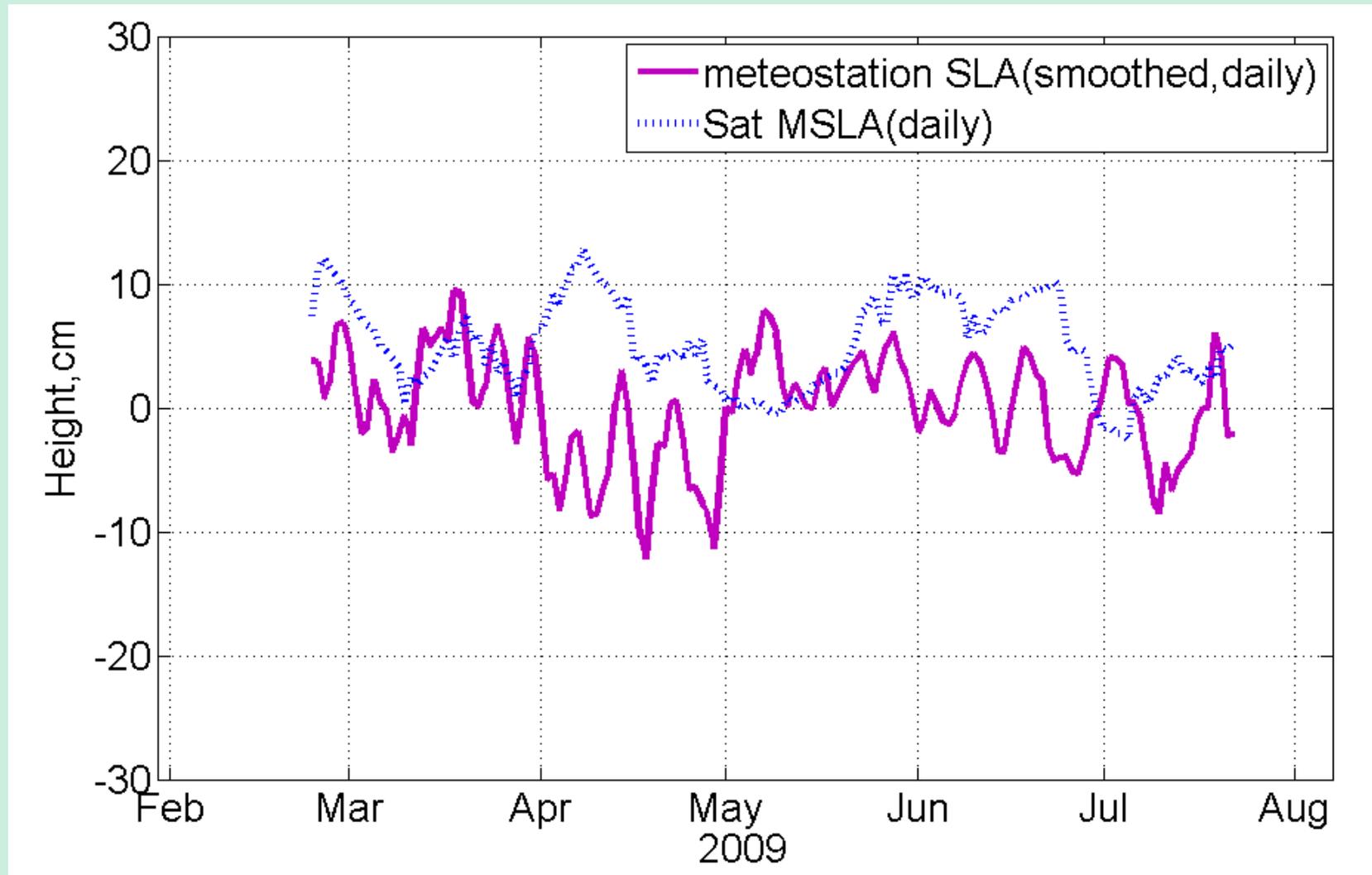
Интеркалибрация данных измерений

Калибрация температуры воды



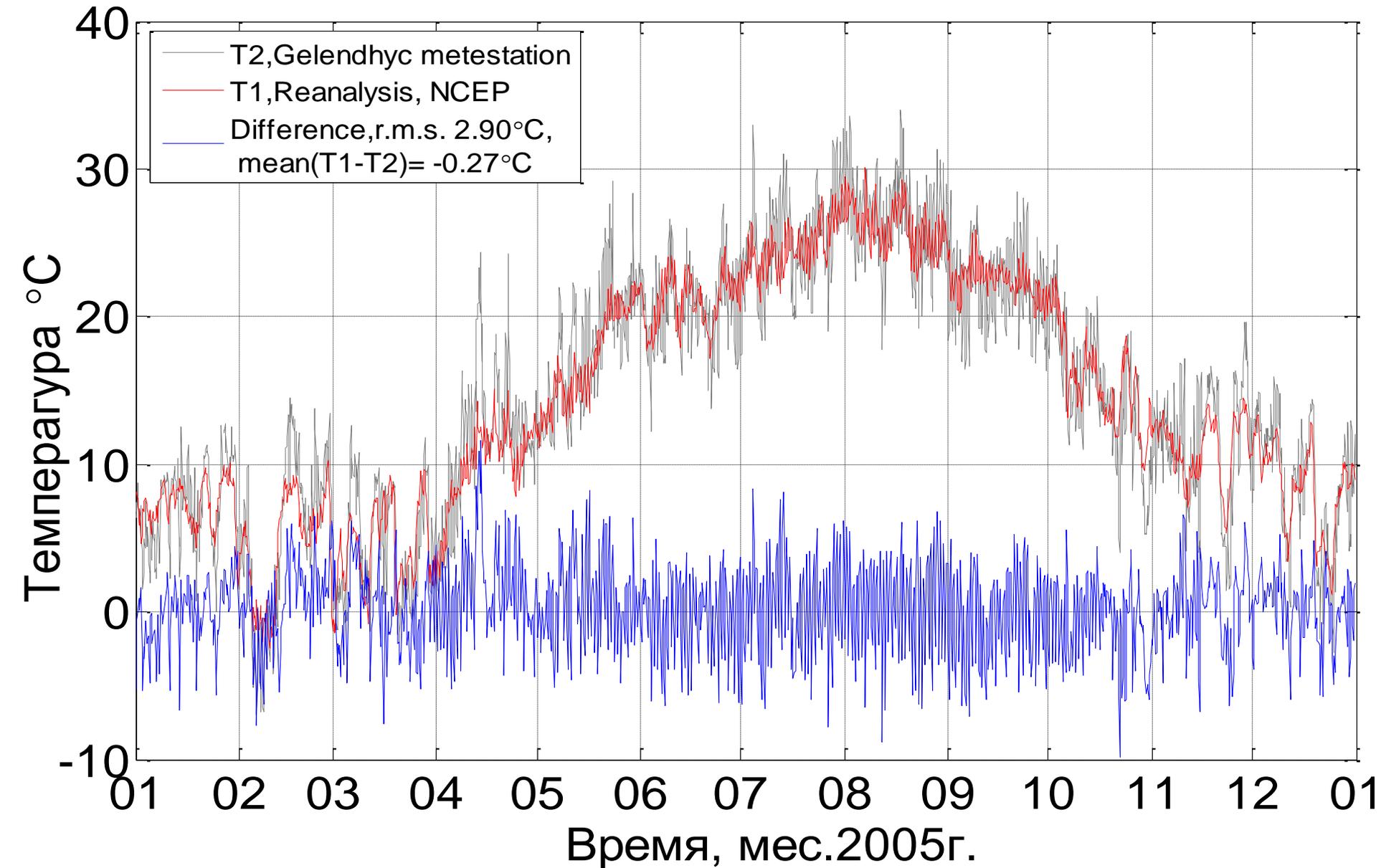
Температура воды на пирсе ИО РАН (44.58°N , 37.98°E , Голубая бухта, г.Геленджик), датчик на глубине 4.7м - синяя линия, и температура поверхности моря на Геленджикской метеостанции (44.55°N , 38.05°E) - красная линия.

Калибрация уровня моря

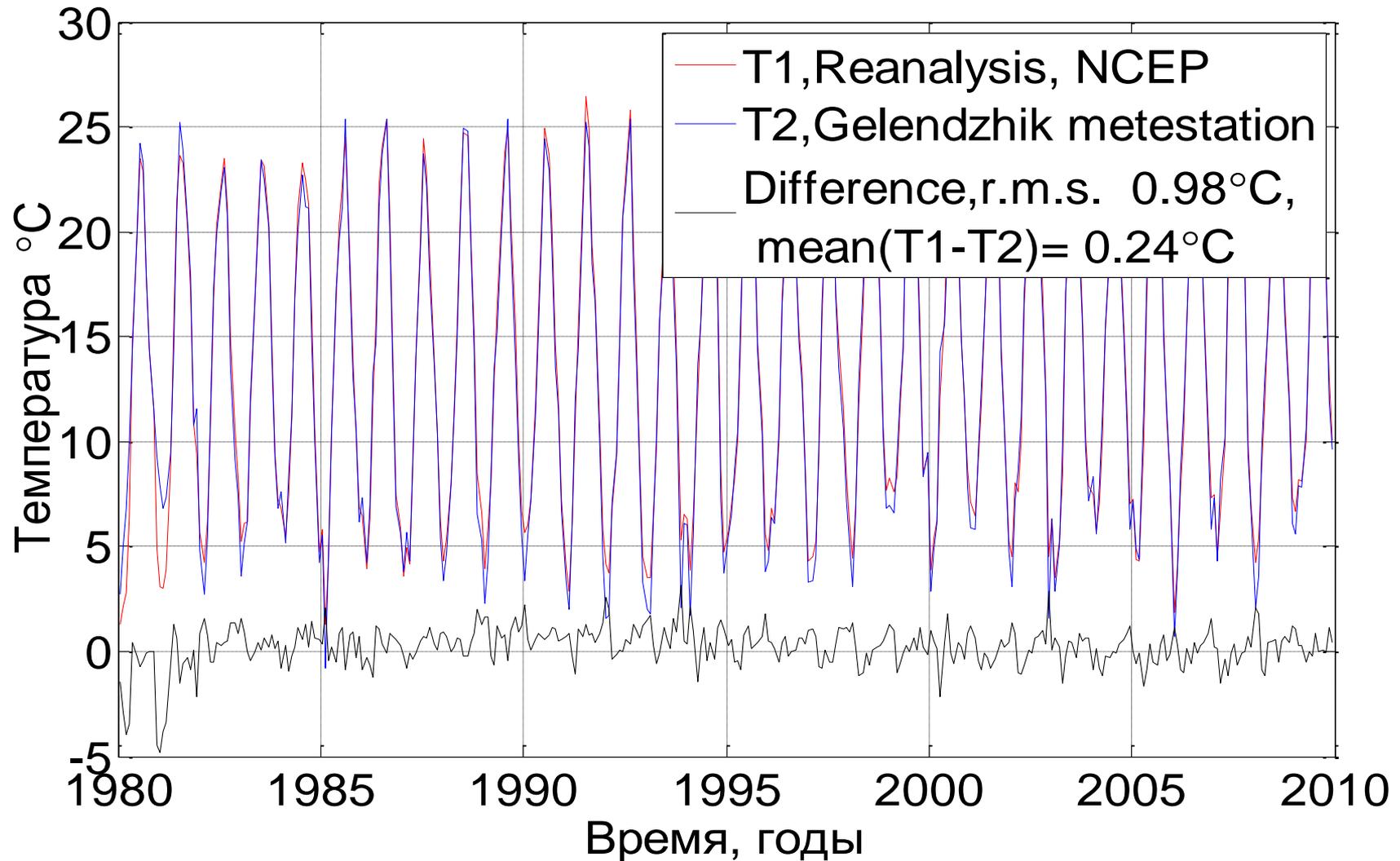


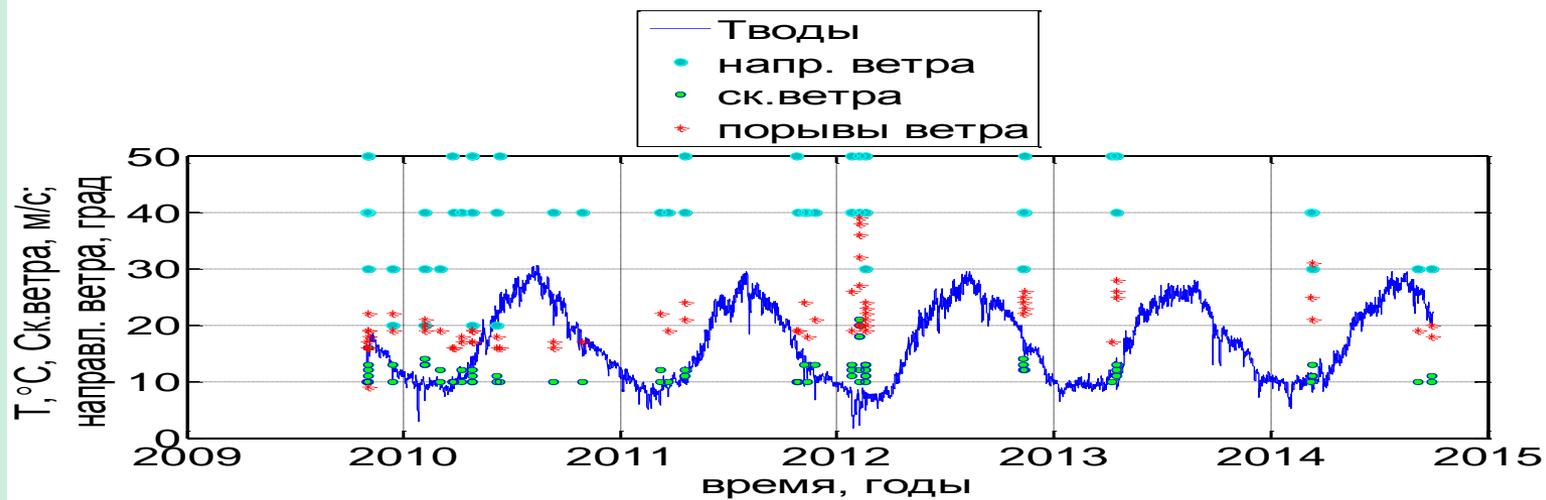
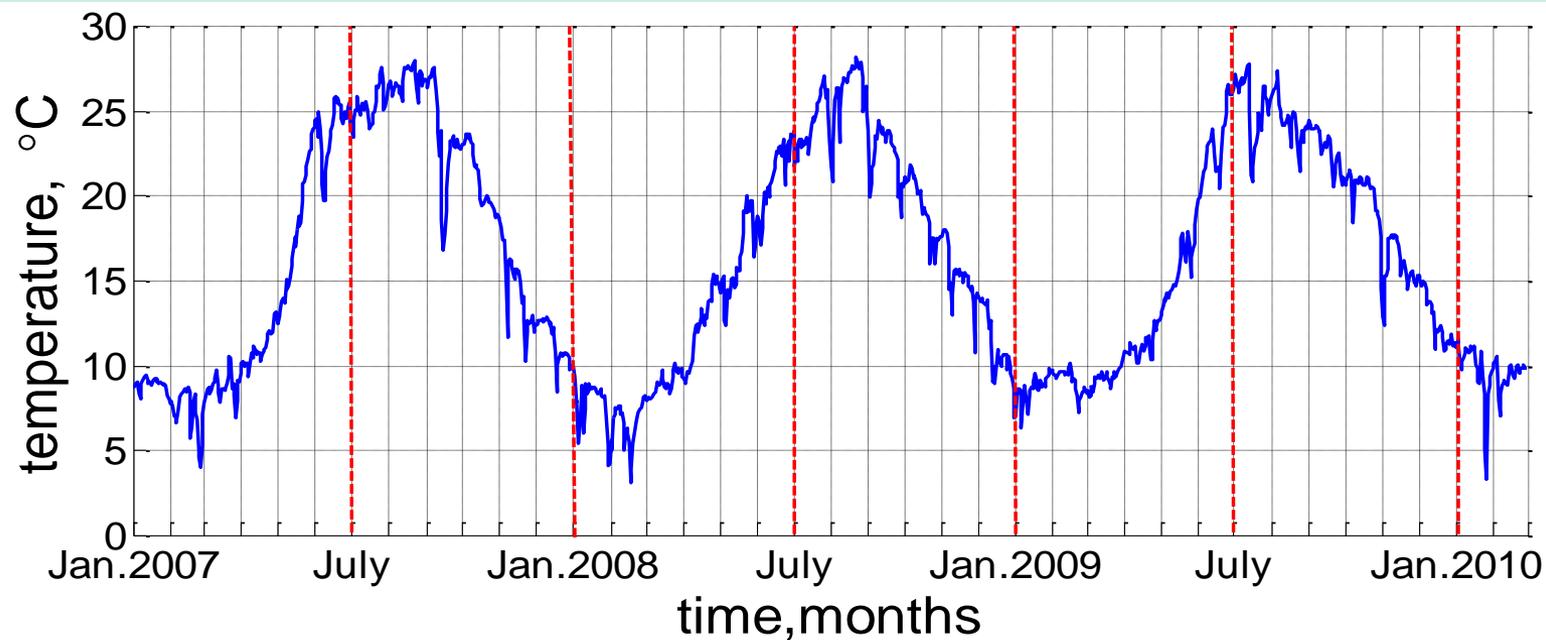
Изменения уровня моря на метеостанции ($44.55^{\circ}\text{N}, 38.05^{\circ}\text{E}$, г. Геленджик) - фиолетовая линия, и спутниковые аномалии уровня моря в точке с координатами $44.5\text{N}, 38.0\text{E}$, на расстоянии 3.7 морских миль от метеостанции - голубые точки.

Калибрация температуры воды на метеост. Геленджика и по реанализу NCEP. Измерения в течение года.



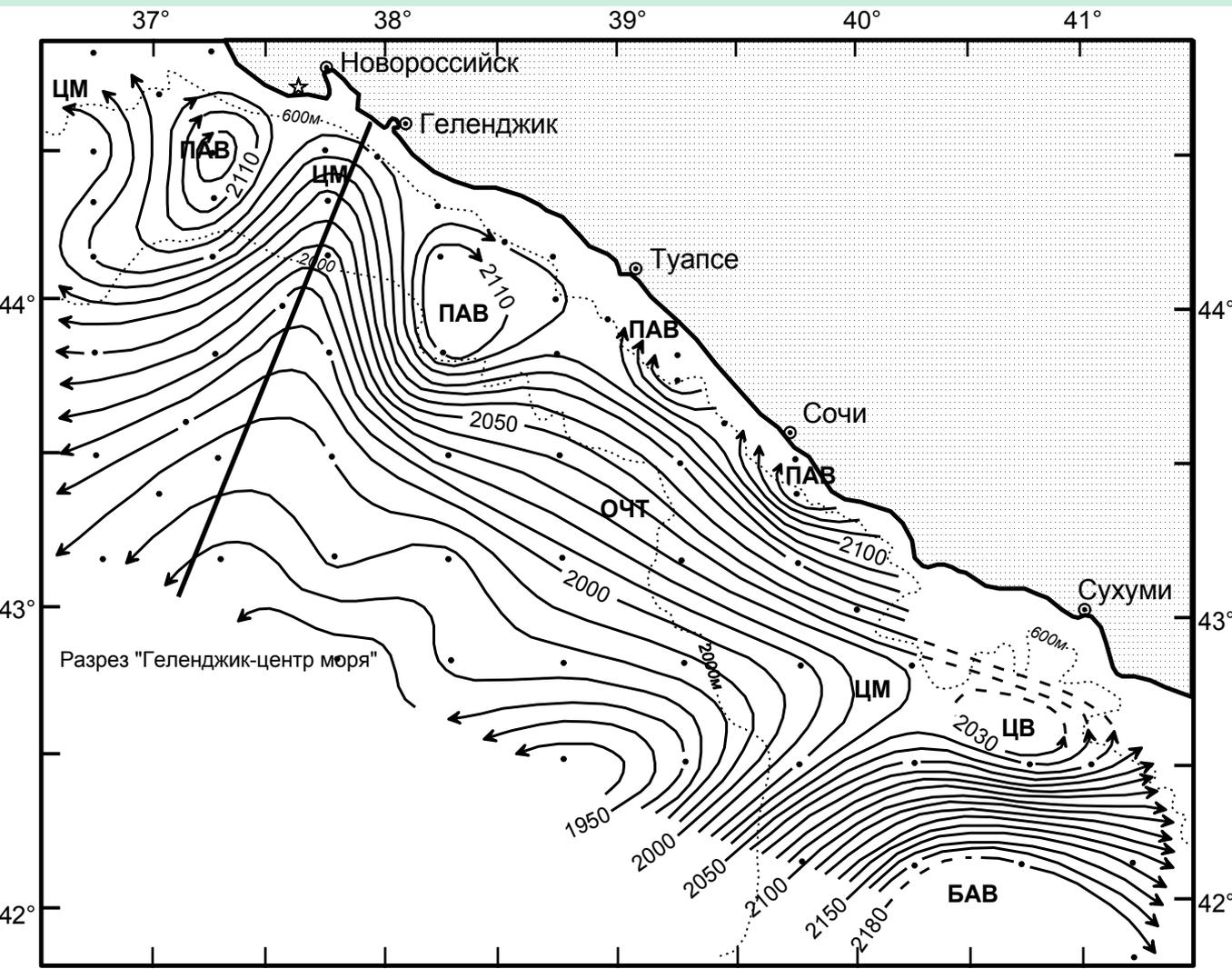
Калибрация температуры воды на метеост. Геленджика и по реанализу NCEP. Измерения в течение 30 лет.





Суточная температура воды у поверхности моря на метеостанции Геленджика в период 2007-2010 гг. и связь апвеллингов с северо-восточным ветром.

Некоторые сведения о циркуляции вод Чёрного моря

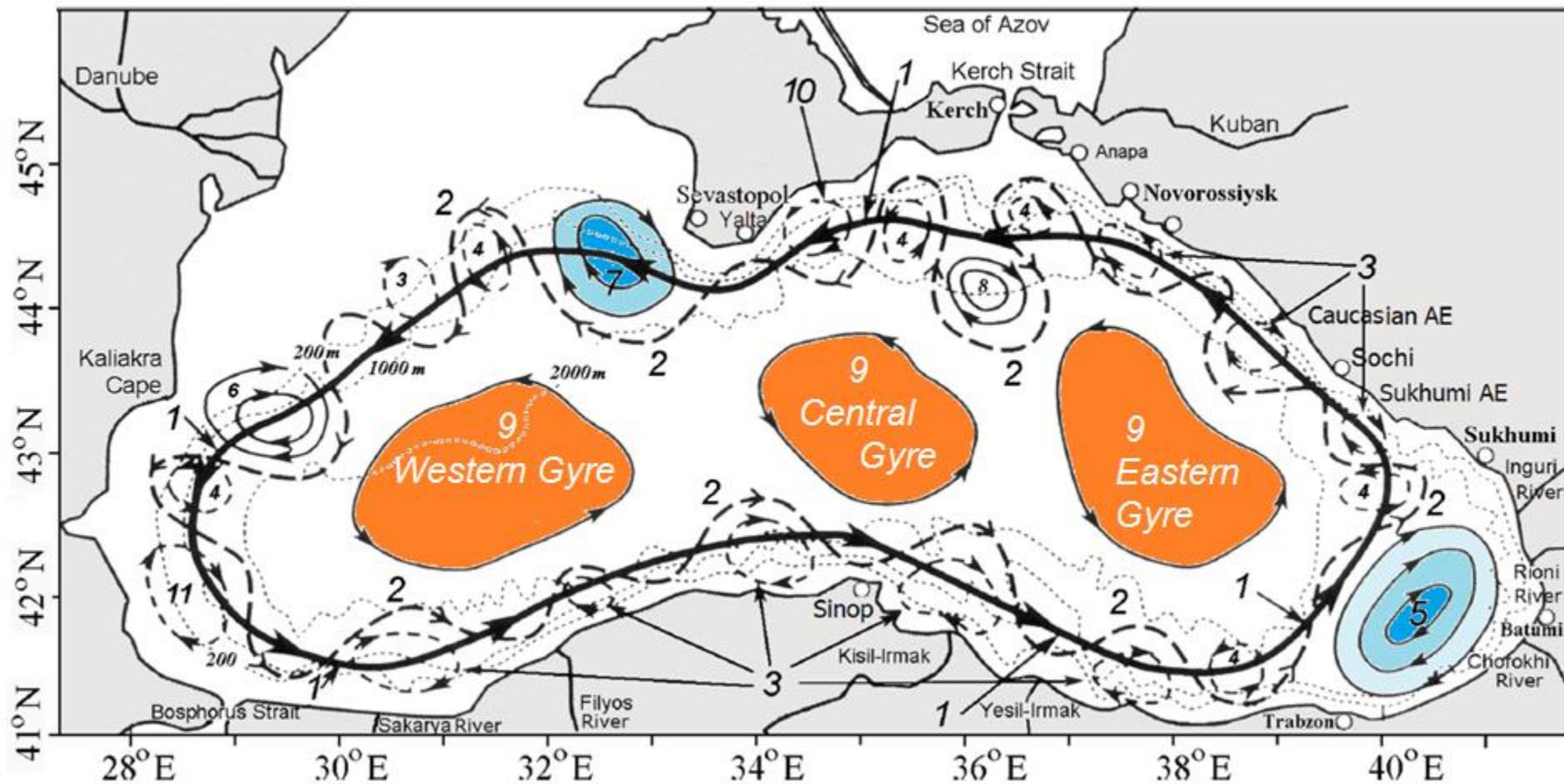


Изменчивость структуры и циркуляции вод по данным многолетнего мониторинга на стандартном 100-мильном разрезе «Геленджик - центр моря». Кривошея В.Г., Якубенко В.Г., Москаленко Л.В., Кузеванова Н.И.

Геострофическая циркуляция вод на поверхности моря относительно изобарической поверхности 500 дб, 25.06-06.07 1996 г.

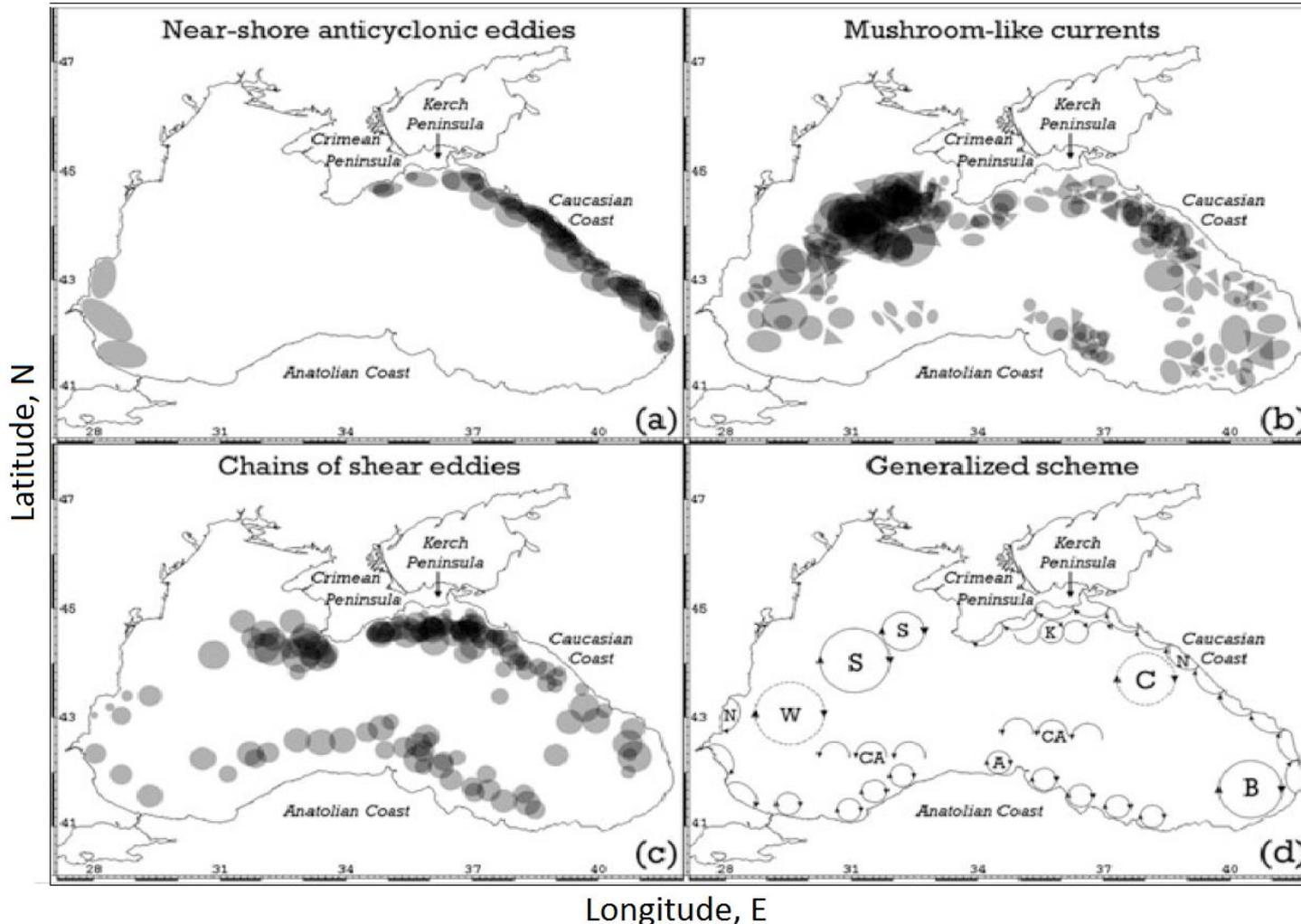
ОЧТ - Основное черноморское течение; ЦМ - циклонический меандр; ПАВ - прибрежный антициклонический вихрь; ЦВ - циклонический вихрь; БАВ - Батумский антициклонический вихрь.

ОЧТ и мезомасштабные структуры ЧМ



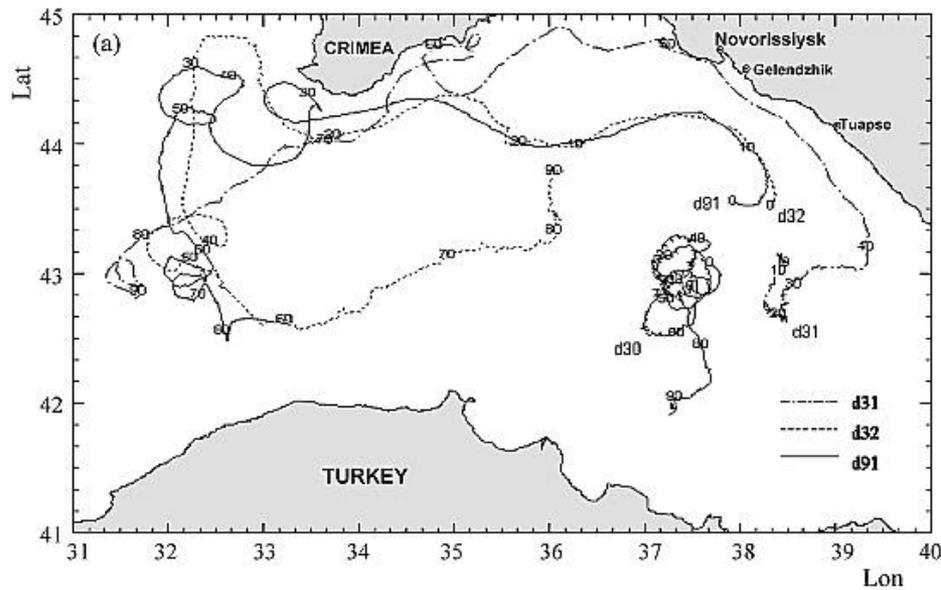
Обобщенная схема по многолетним данным измерений Кривошея и др. Океанология, (2001)

Сводная схема мезомасштабных структур в Черном море по данным спутниковых наблюдений

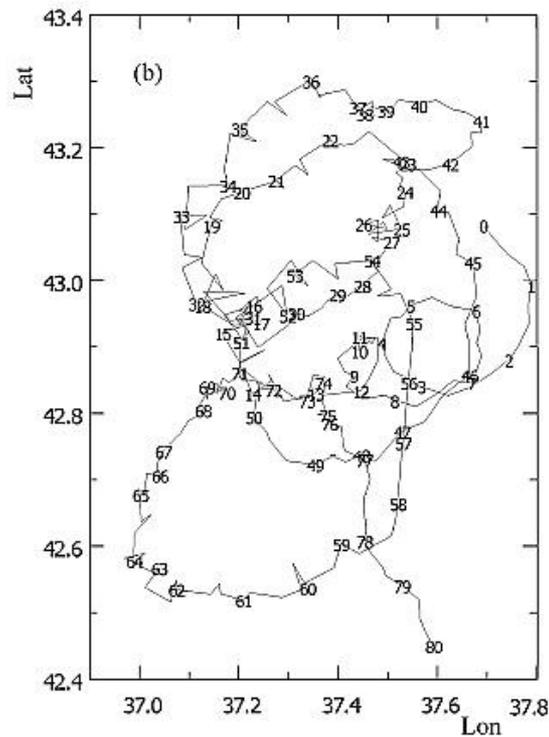


Quasy-Permanent Structures

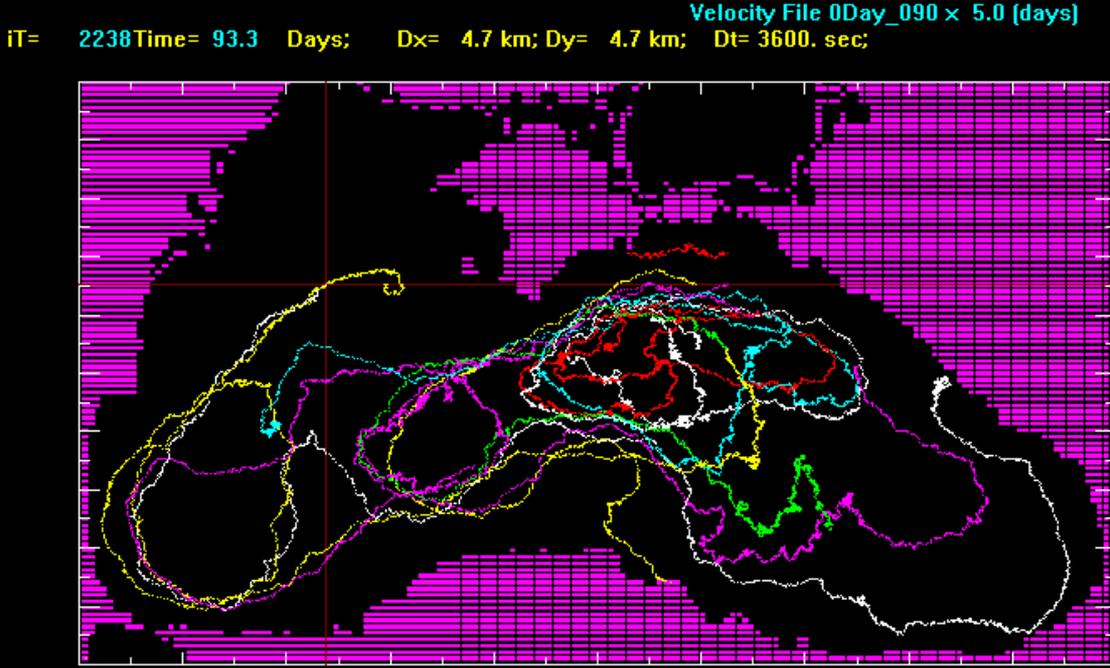
W - western meander,
 S - Sevastopol ACE,
 K - Kerch ACE
 C - Caucasus ACE,
 N - near-shore ACEs,
 CA - cyclonic Anatolian Eddies,
 A - Anatolian ACEs.



Верхняя панель:
 Сводная карта первичных траекторий дрейфтеров в Черном море. Цифры вдоль траектории показывают время в сутках после запуска, с 29 сентября 1999 г.
 Нижняя панель: фрагмент траектории дрейфтера №30.

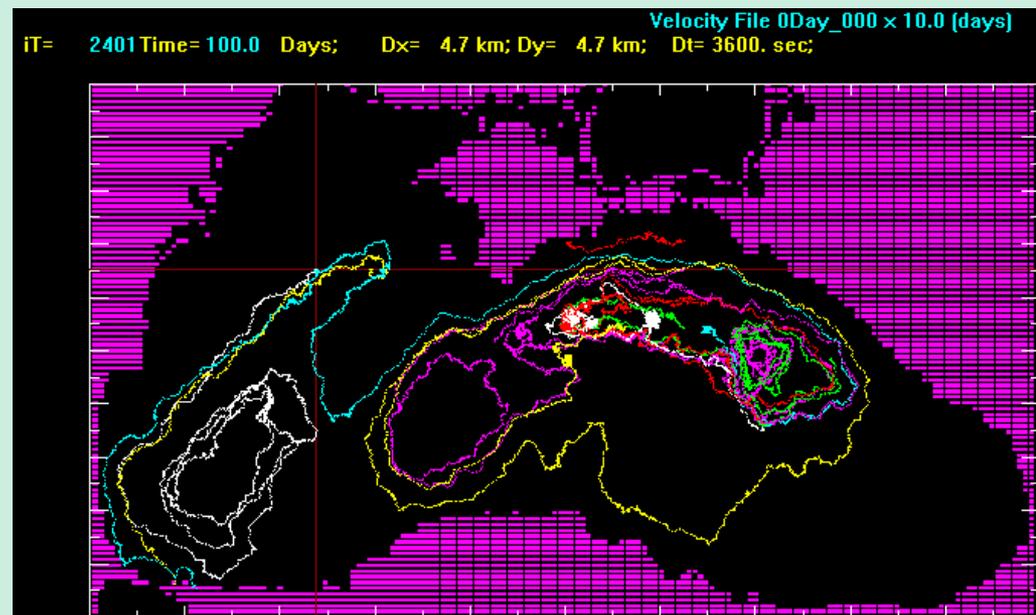


Моделирование циркуляции вод Чёрного моря

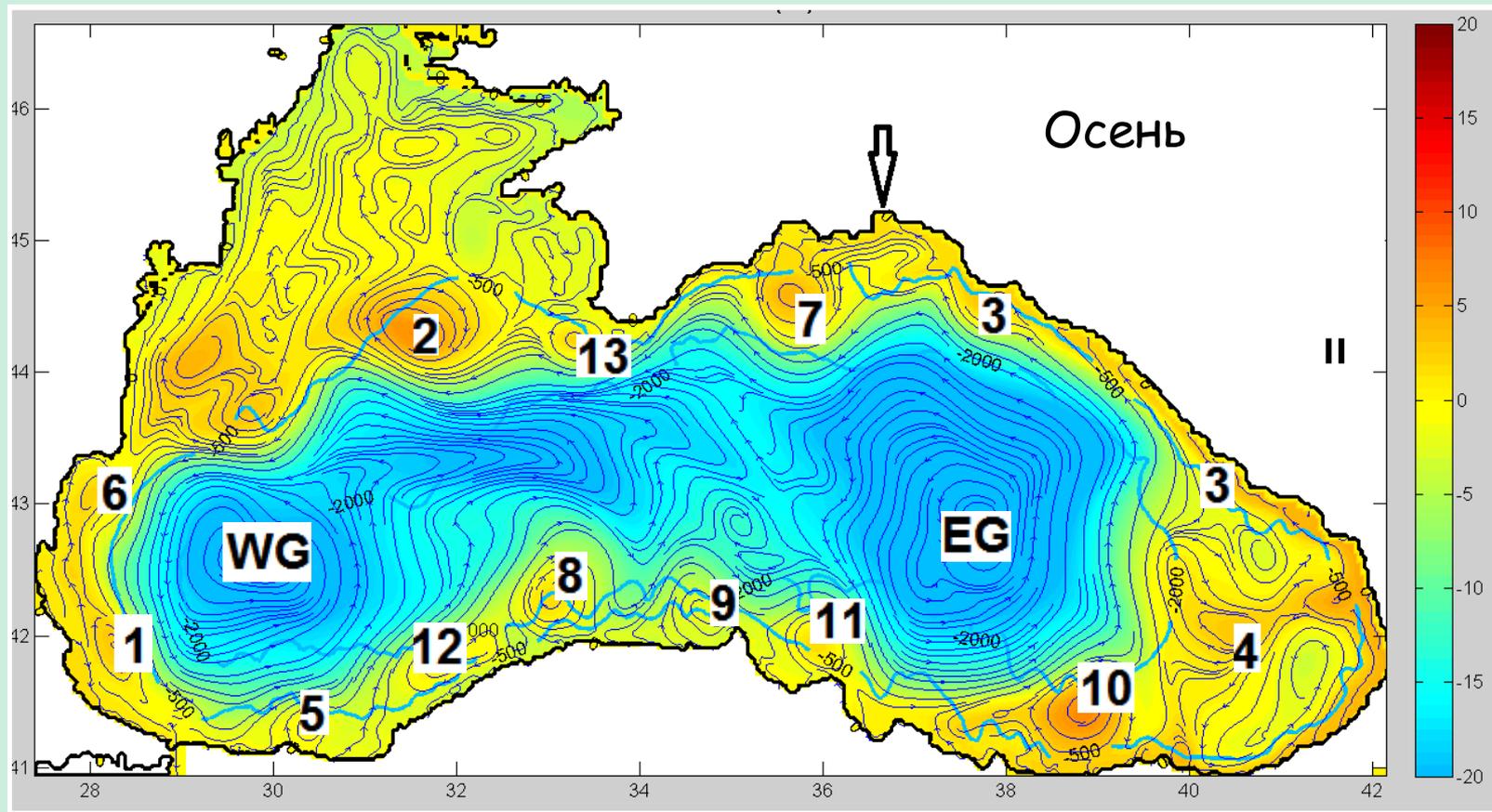


<http://www.aha.ru/~koroten/Drift.gif>

Моделирование траекторий
дрифтеров.



ОЧТ и мезомасштабные структуры: DieCAST



Mesoscale Eddies:

1-Bosphorus AE ; 2-Sevastopol AE; 3-Caucasian AE; 4- Batumi AE; 5-Sakarya AE; 6-Kaliakra AE, 7-Kerch AE, 8-Kerempe AE, 9-Sinop AE, 10-Trabson AE, 11-Kisil-Yimak AE, 12-Filyos AE, 13-Yalta AE; WG- Western Gyre, EG-Eastern Gyre

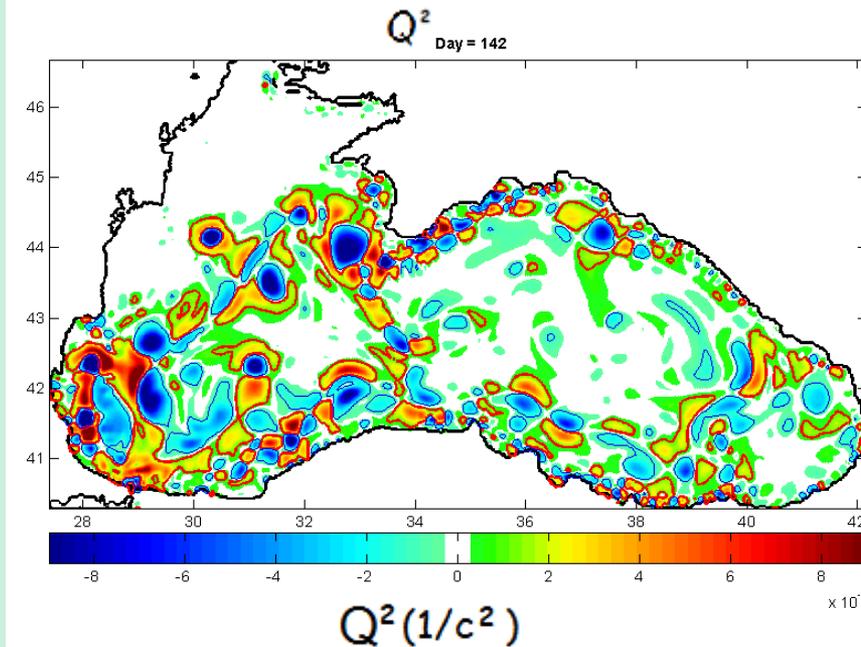
Районы интенсивной генерации топографических мезомасштабных вихрей



Неоднородность рельефа дна играет важную роль генезисе мезомасштабных вихрей в Черном море

Пространственно-временное распределение параметра Окубо-Вейсса в Черном море

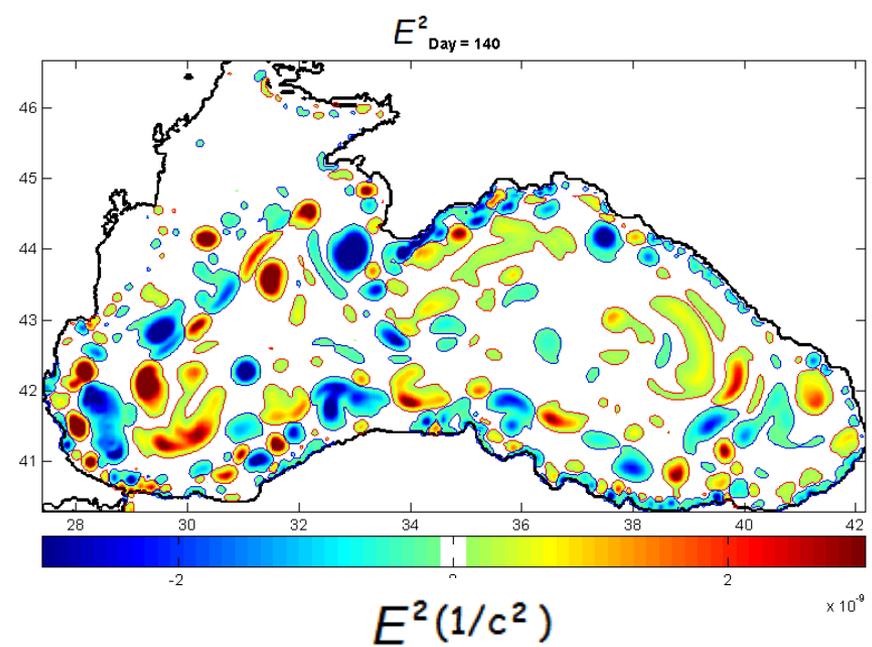
Классический Метод Окубо-Вейсса



Синий цвет - области, где преобладают вихревой структуры, как циклонические так и антициклонические

Красный цвет - области, где преобладает деформация скорости

Модифицированный метод Окубо-Вейсса



Синий цвет - ядра антициклонических вихрей

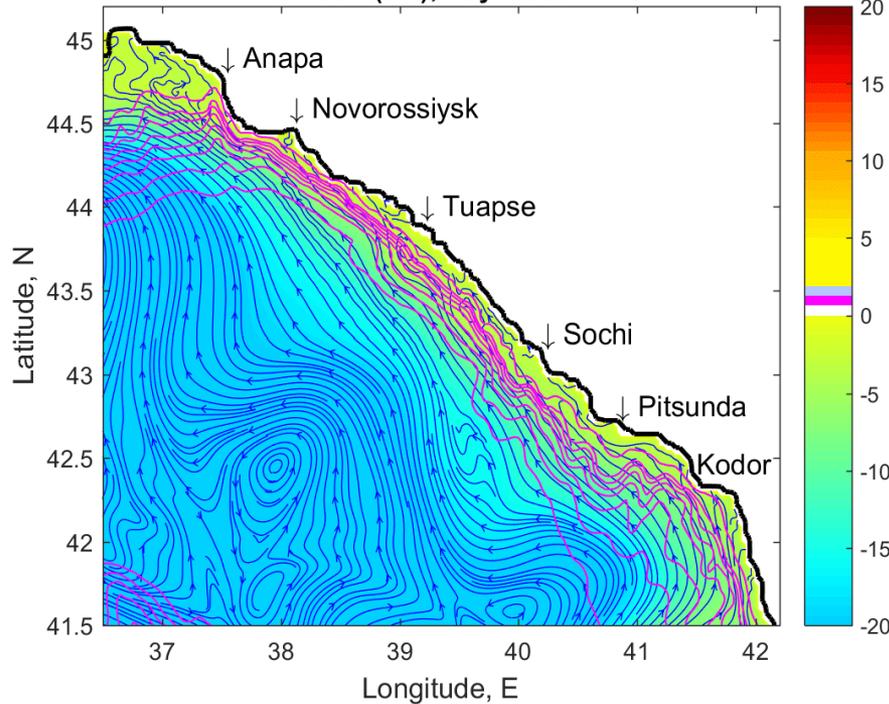
Красный цвет - ядра циклонических вихрей

Генерация и эволюция Кавказского антициклонического вихря (КАВ).

Rimini

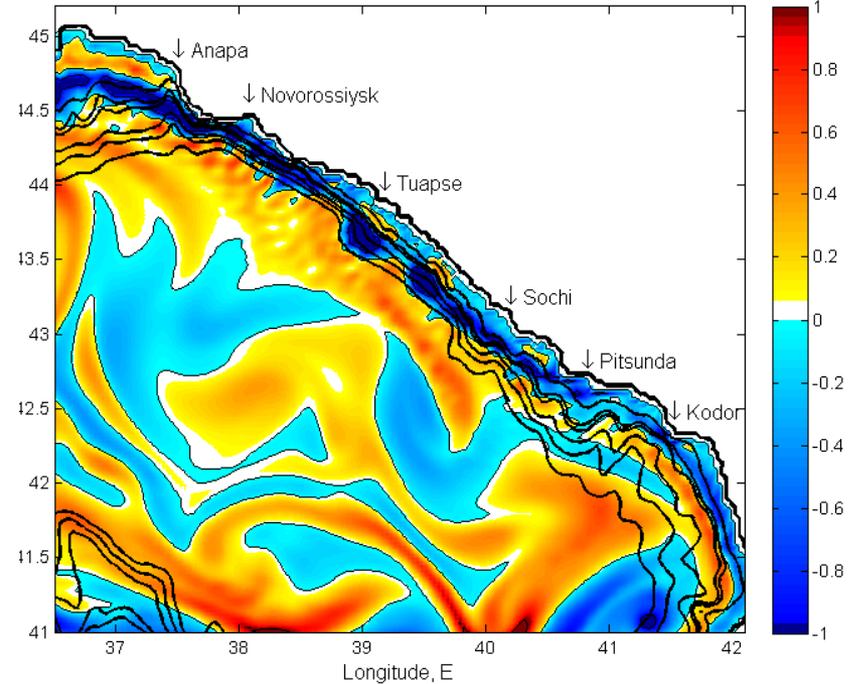
Поверхность моря

SSH (cm); Day = 300



Аномалия уровня (см)

RV(f0); Day = 300



Относительная завихренность (ω/f)

Особенности генерации АЦ вихря за мысом Пицунда:

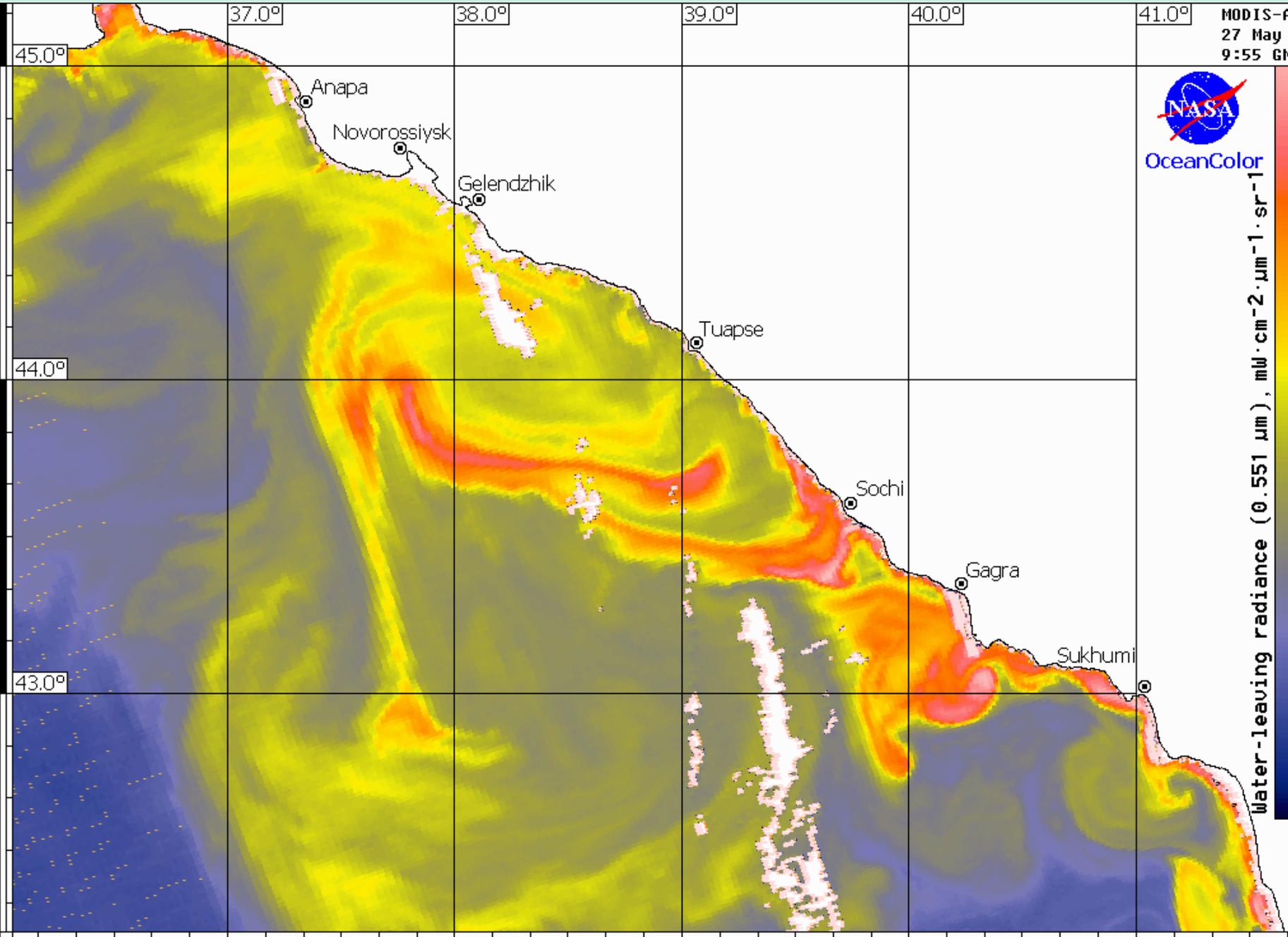
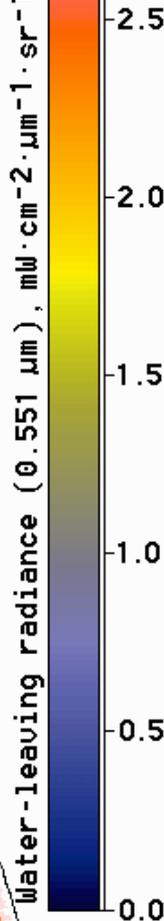
- 1) Большую часть года Батумский АЕ вытесняет ОЧТ от берега, но
- 2) когда ОЧТ подходит близко к берегу (обычно это происходит зимой) и обтекает подводный хребет в районе между м. Кодори и Пицунда, тогда возникает Кавк. АЕ, который идет к Новороссийску, где он диссипирует.

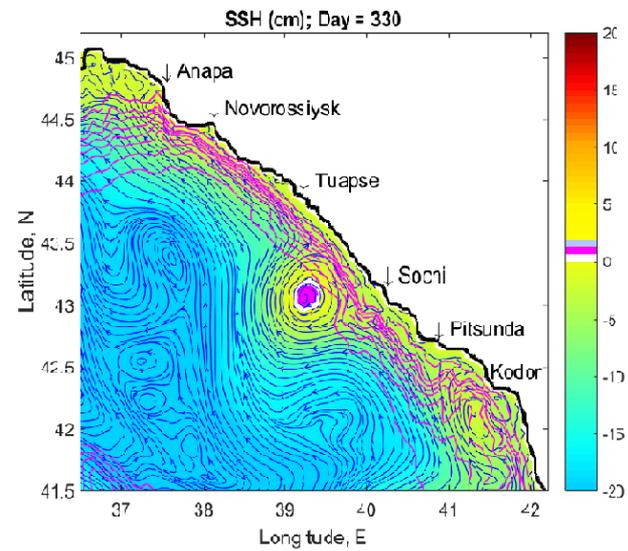
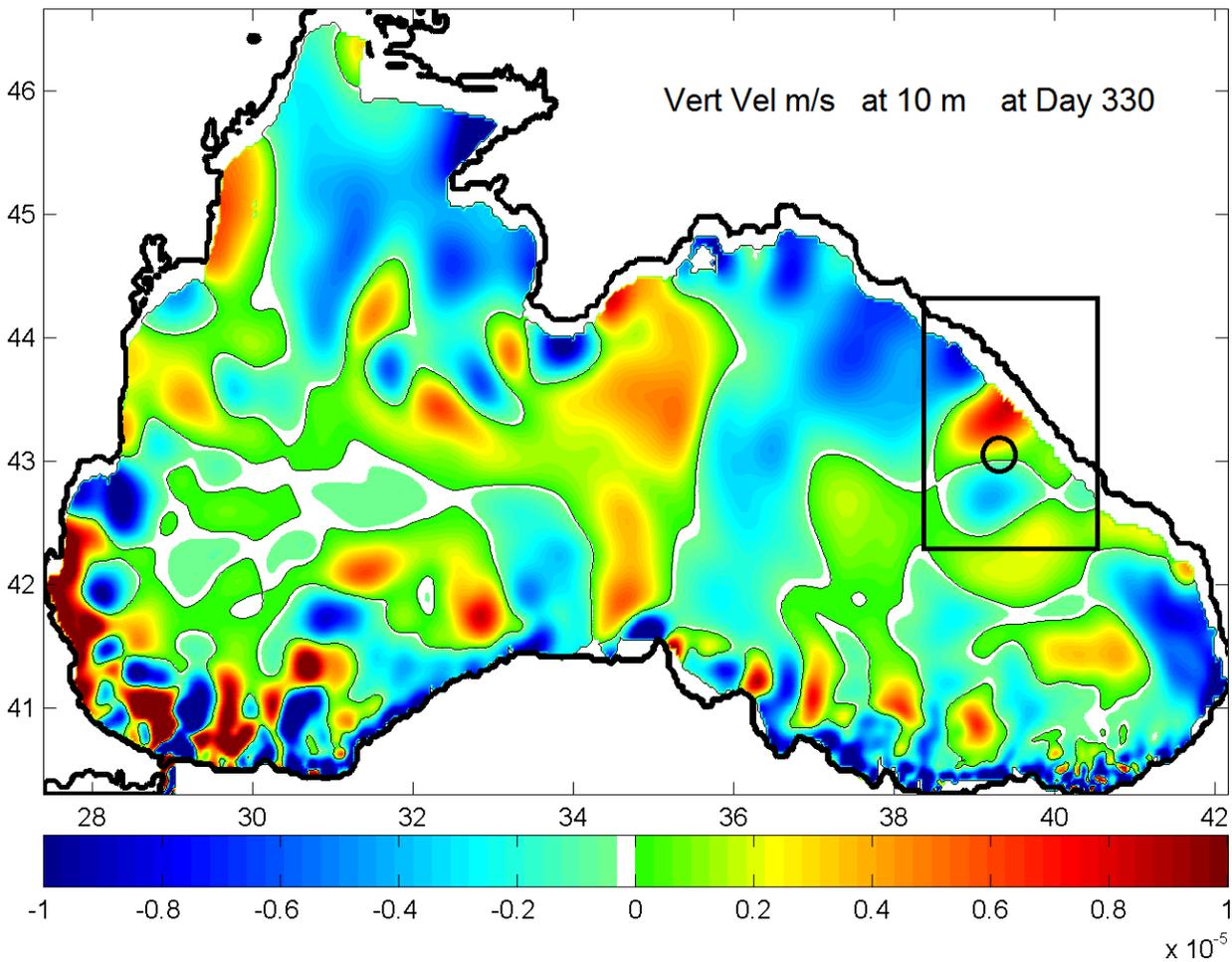
Скорость переноса вихря 360км/40 дней ~ 0.1 м/с

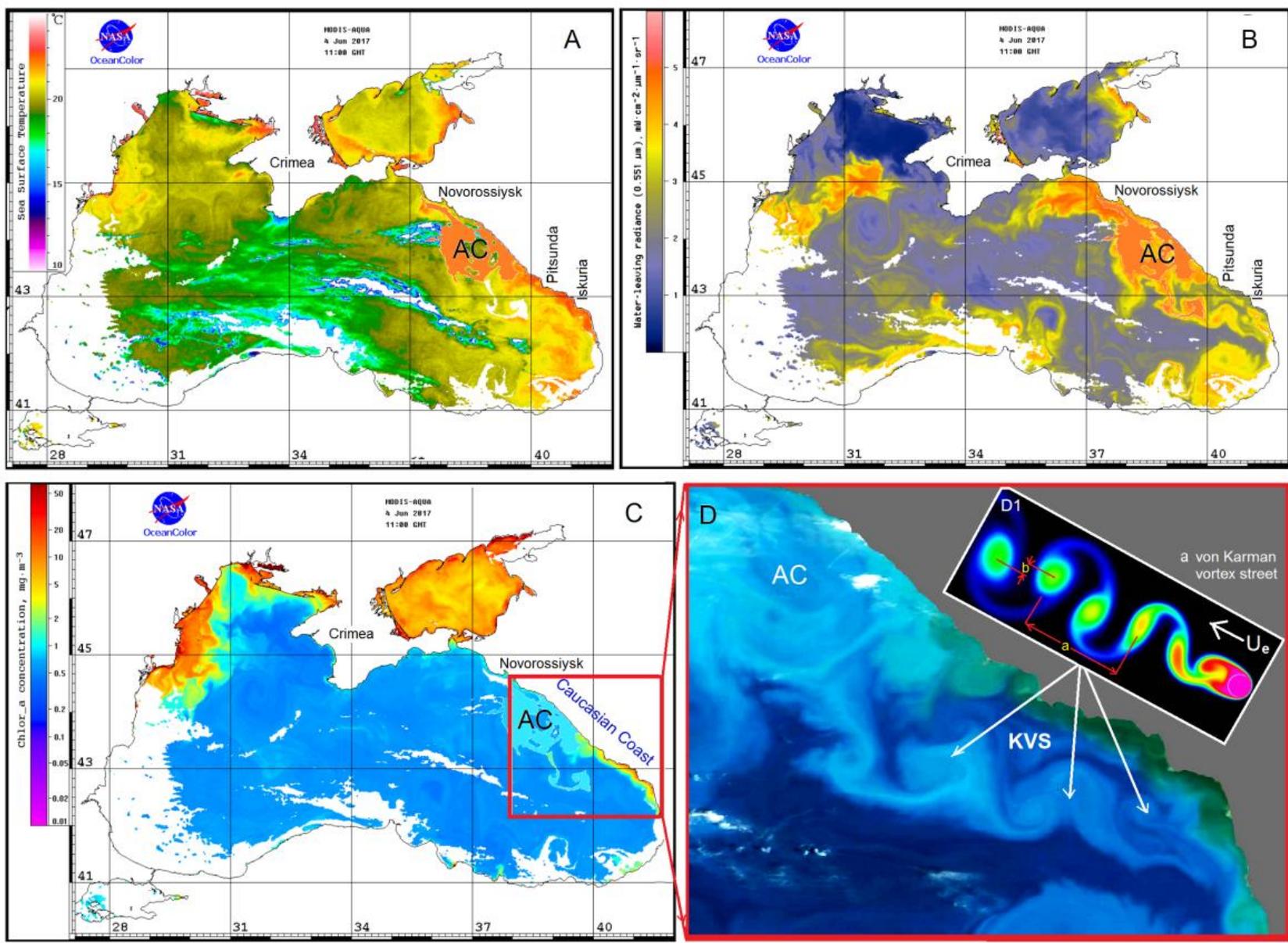
MODIS-AQUA
27 May 2013
9:55 GMT



OceanColor

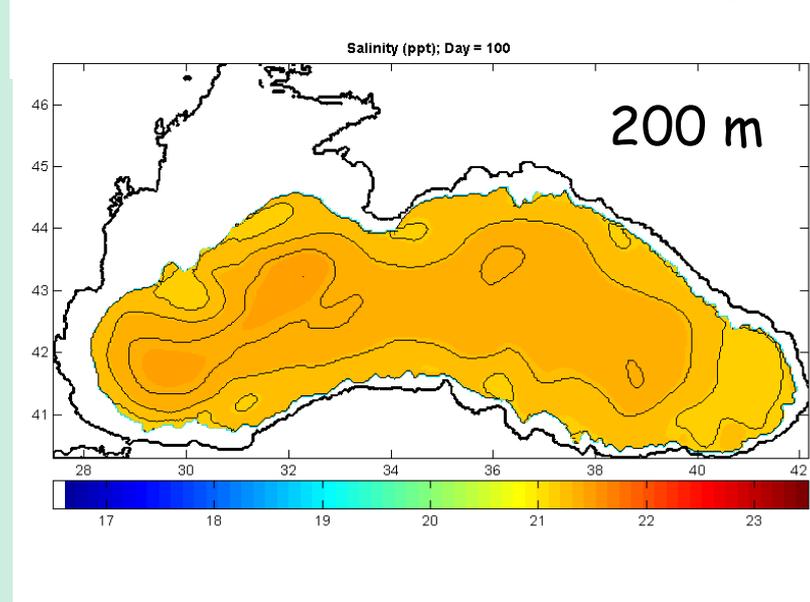
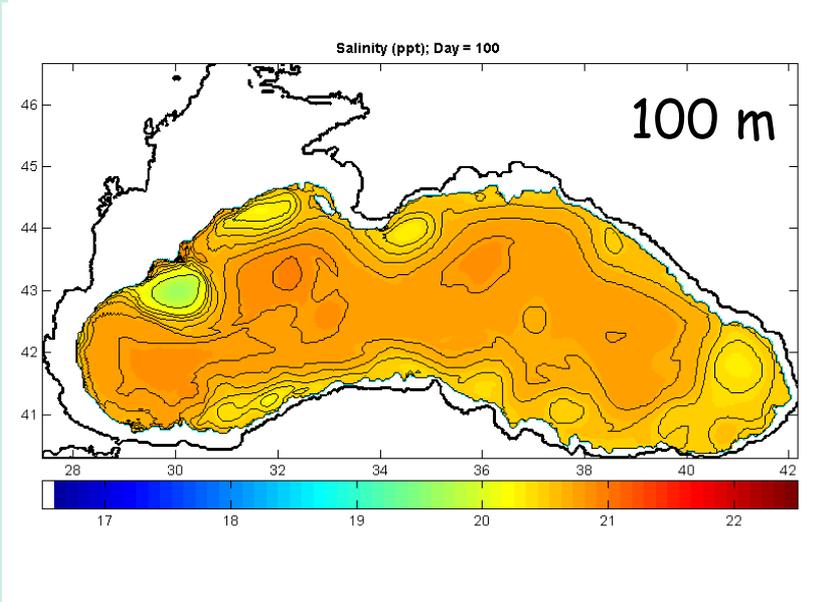
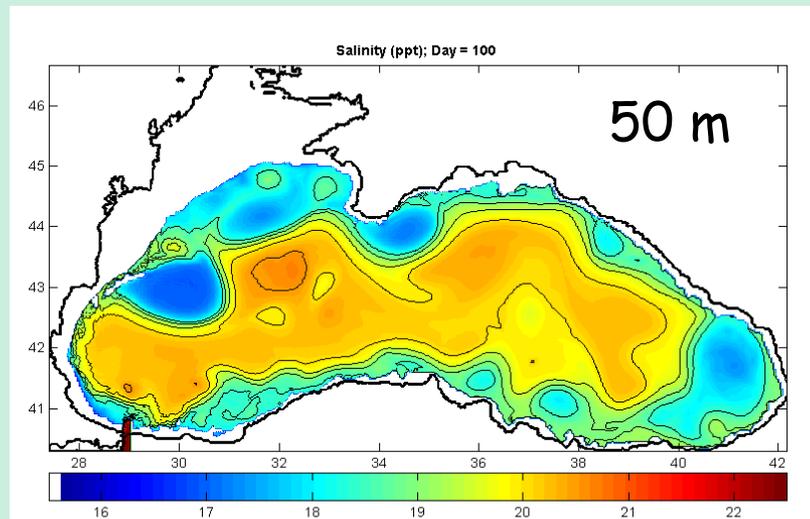
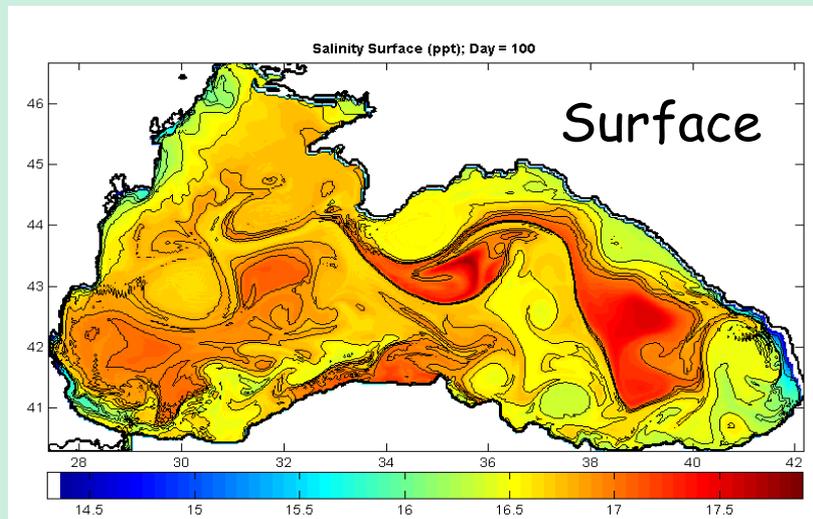


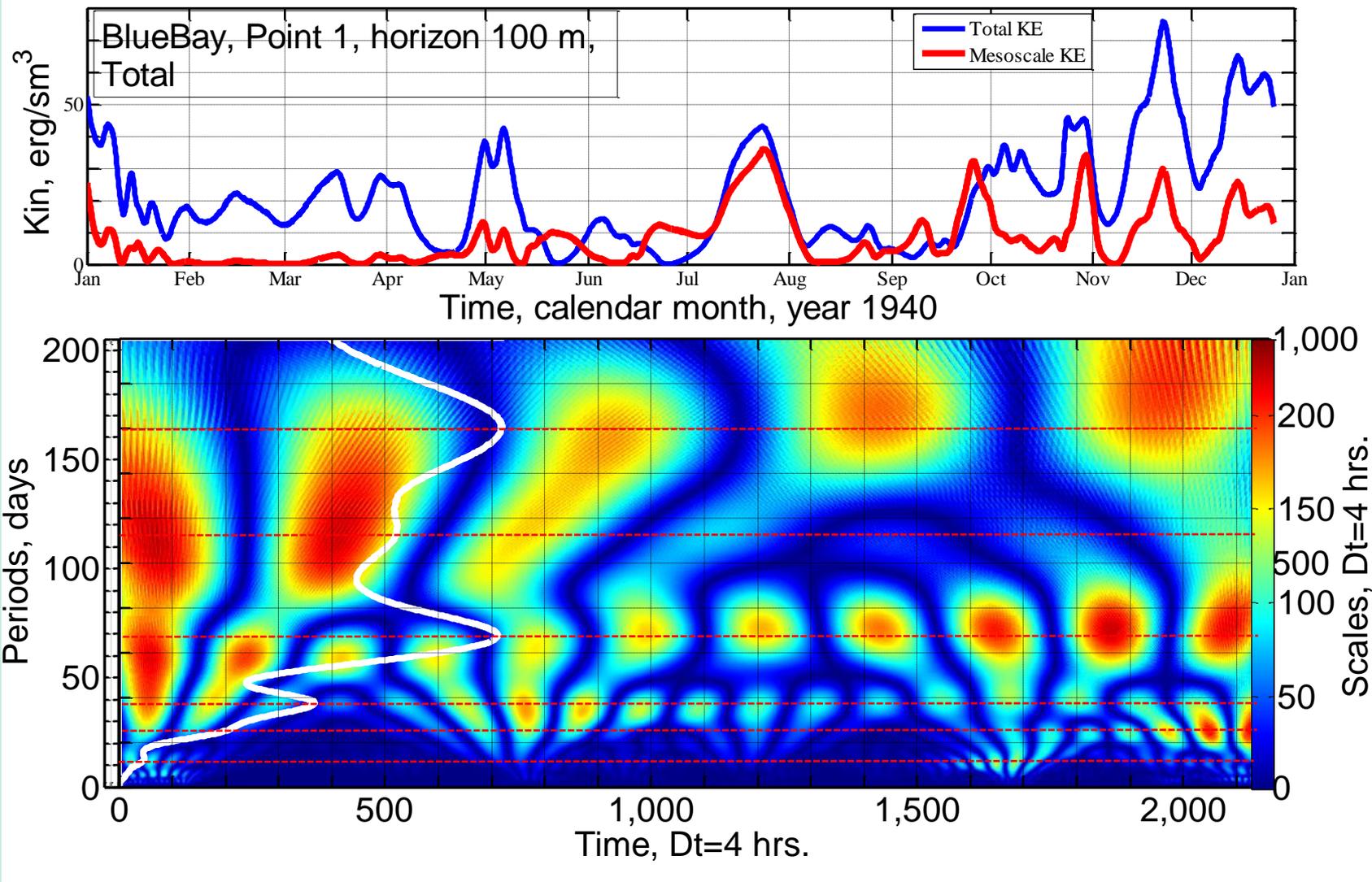




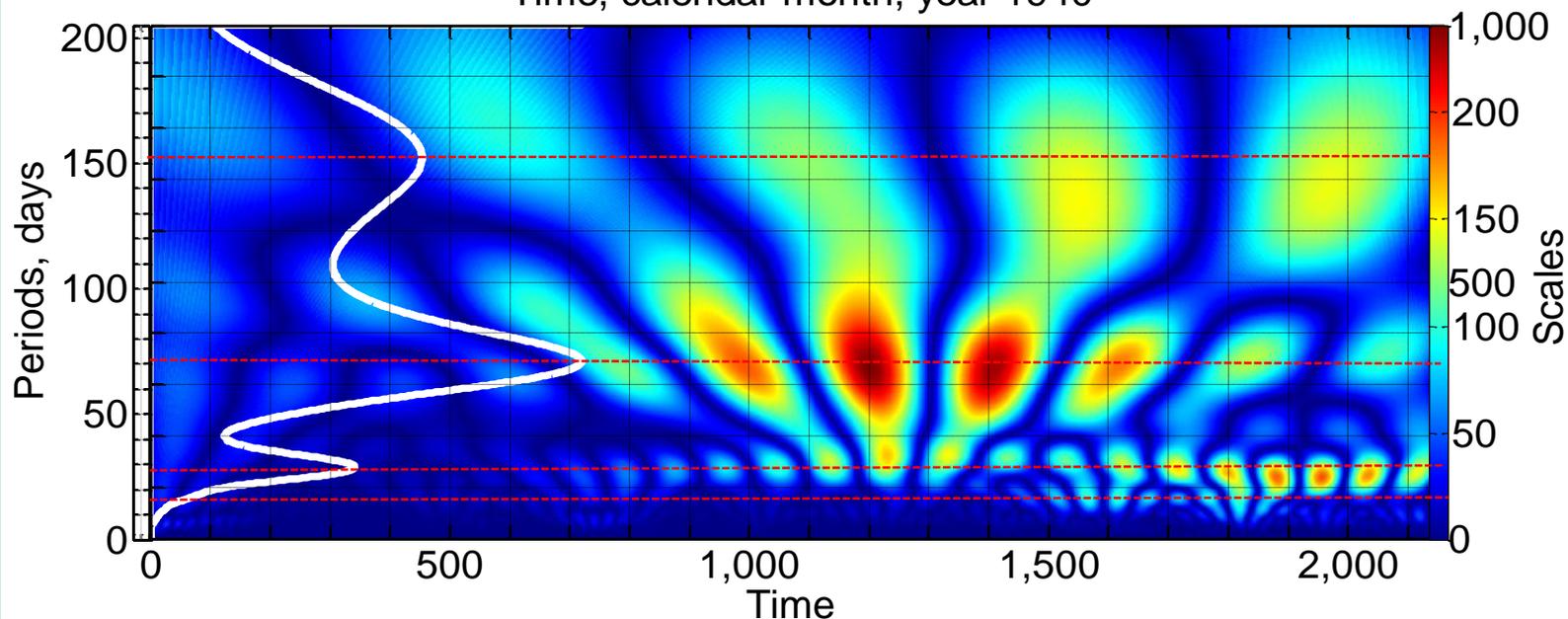
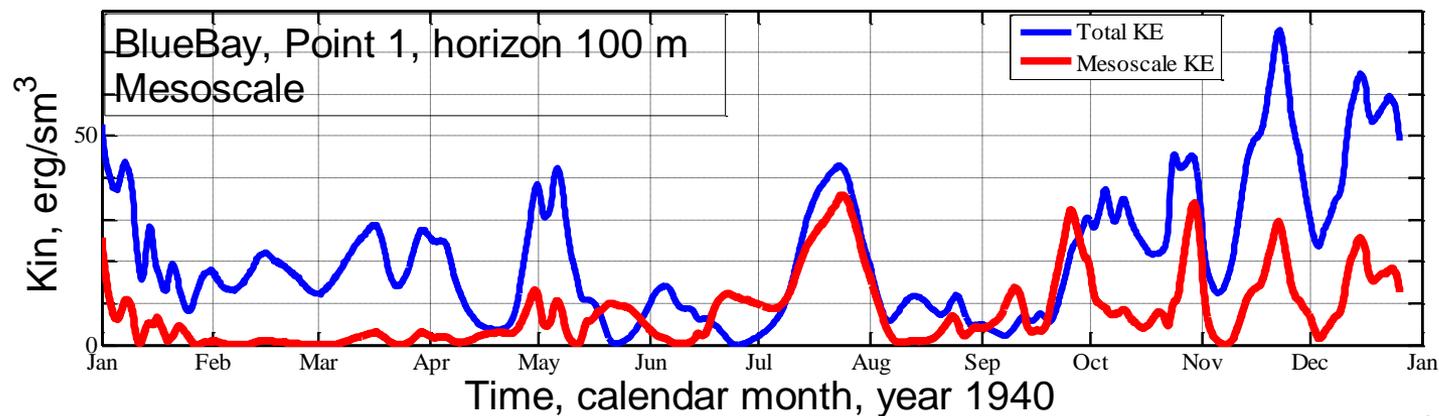
Спутниковые снимки (MODIS-Aqua) поля хлорофилла-а и видимого RGB композита от 4 июня 2014 г., в 11:00 по Гринвичу. Красным прямоугольником на панели (C) показана акватория вблизи побережья Кавказа с вихревой активностью.. На панели (D) показаны увеличенные изображения мезомасштабного антициклонического вихря (AC) и субмезомасштабной вихревой структуры, напоминающей вихревую дорожку Кармана (KVS, von Karman Vortex Street). Схематично структура KVS изображена на вставке D1.

Соленость по модели на разных горизонтах

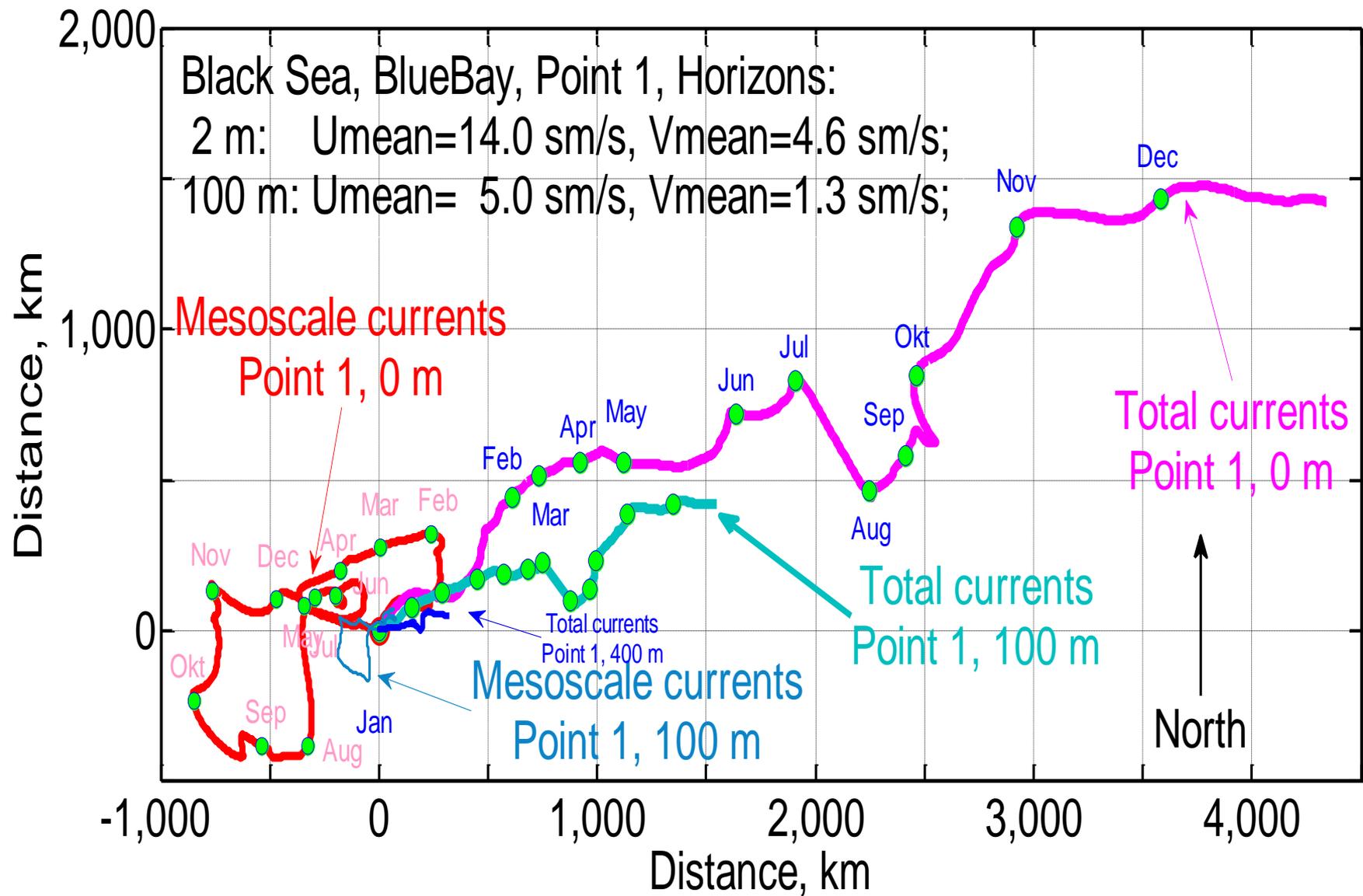




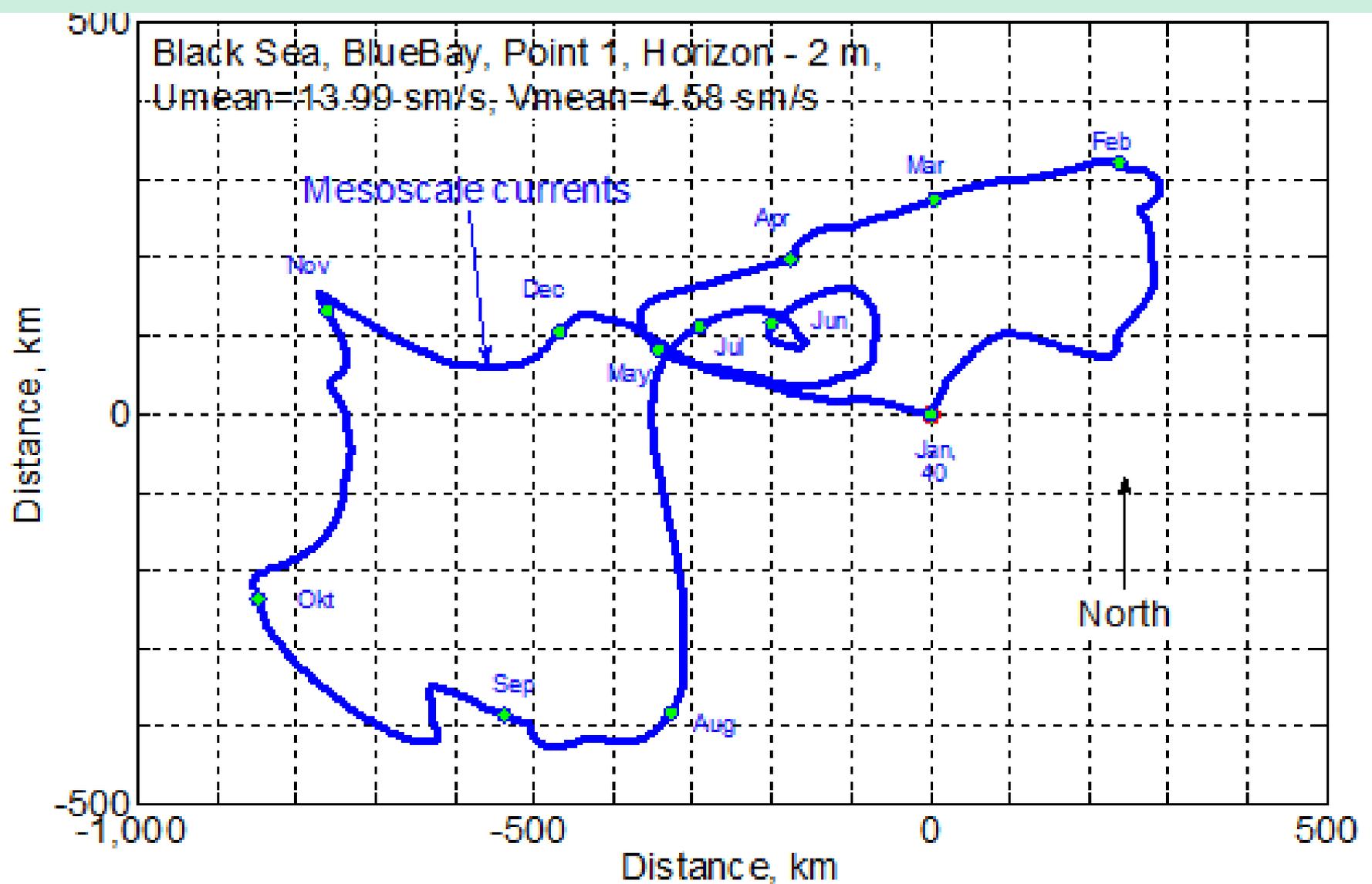
Ход плотности кинетической энергии в точке 1, (горизонт 100 м) Чёрное море (верхняя панель) и вэйвлет-плотность кинетической энергии в диапазоне периодов 1-205 сут. (нижняя панель). Светлая линия - спектр вэйвлет-плотности, проинтегрированной по времени.



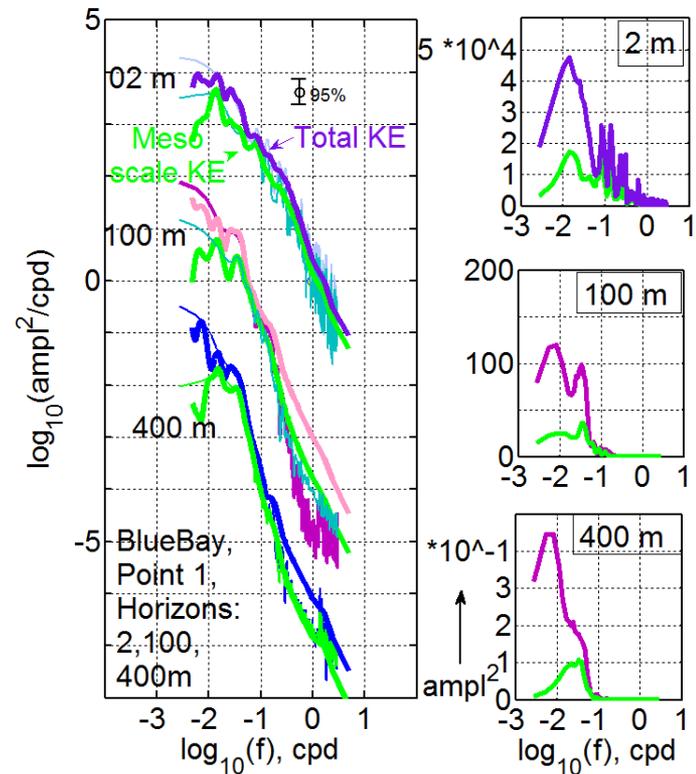
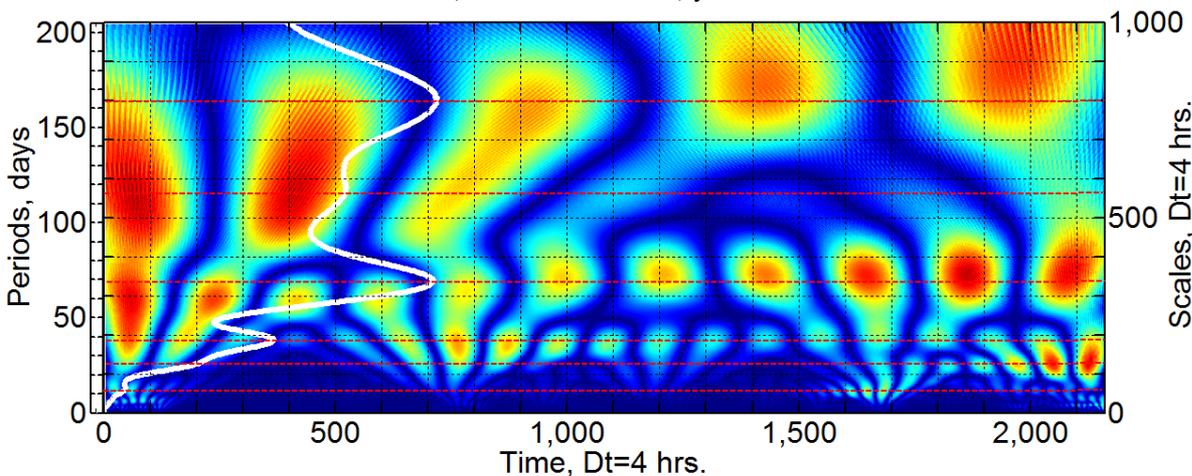
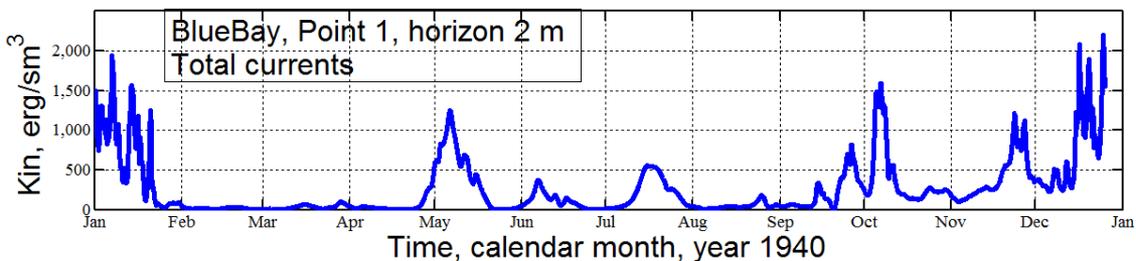
Ход плотности мезомасштабной кинетической энергии в точке 1, (горизонт 100 м) Чёрное море (верхняя панель) и вэйвлет-плотность МЗ кинетической энергии в диапазоне периодов 1-205 сут. (нижняя панель). Светлая линия - спектр вэйвлет-плотности, проинтегрированной по времени.



Прогрессивные векторные диаграммы течений в точке 1, (горизонты 2 и 100 м) около Геленджика, 360 модельных суток (год 40), 2160 значений с дискретностью через 4 часа.

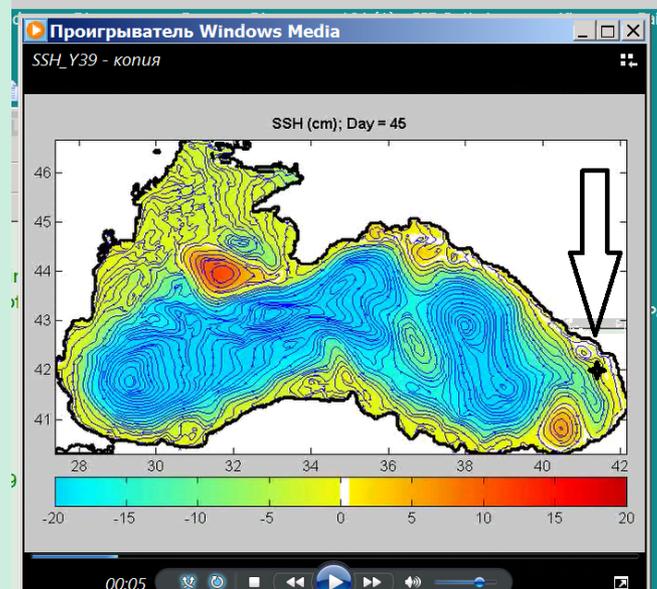
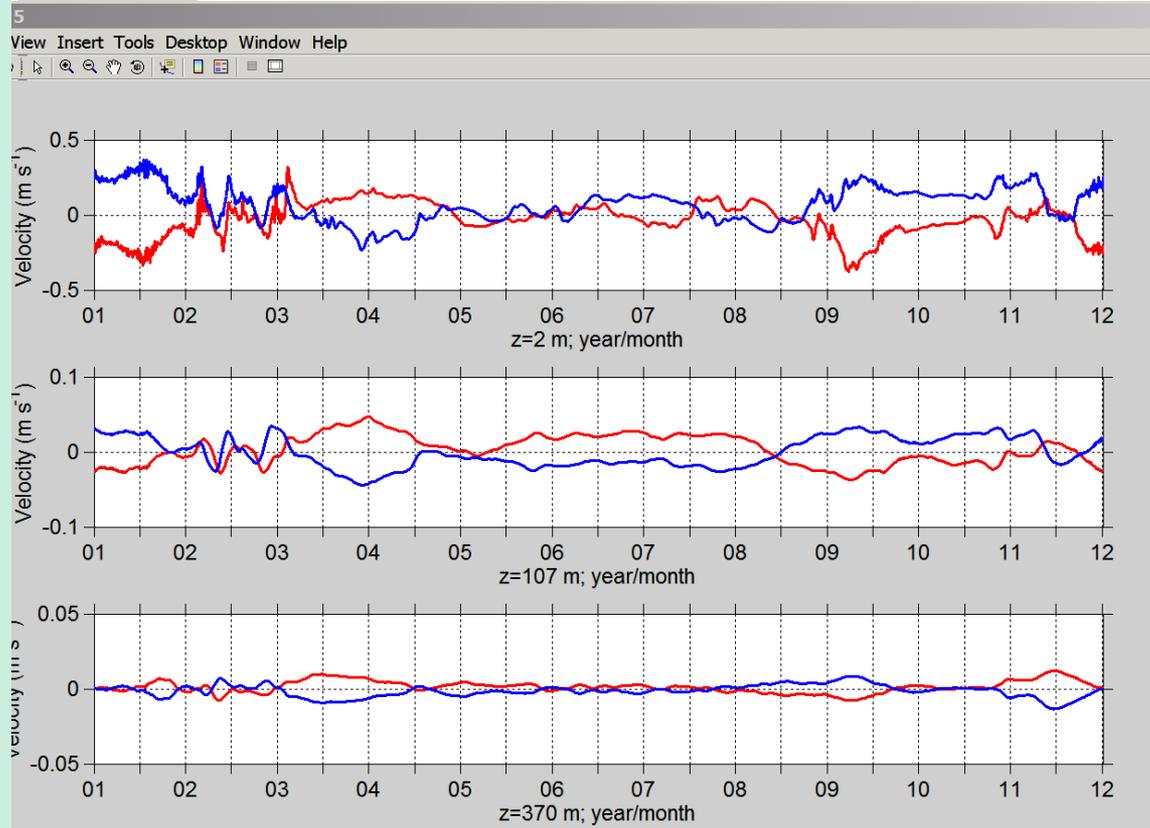


Иерархия вихревых масштабов. Прогрессивные векторные диаграммы течений на шельфе, вблизи Голубой бухты (Гидрополигон, Южное отделение ИО РАН, г. Геленджик), 360 модельных суток, 2160 значений с дискретностью 4 час.

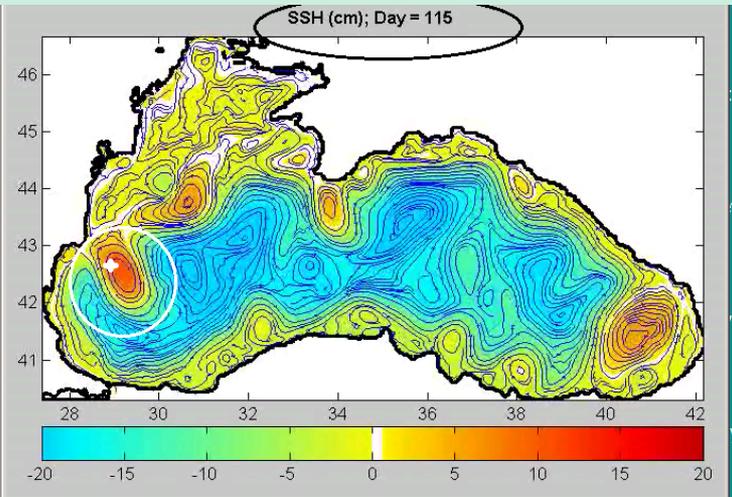
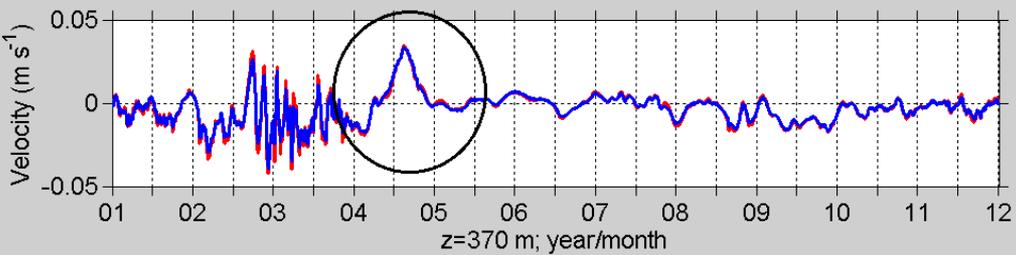
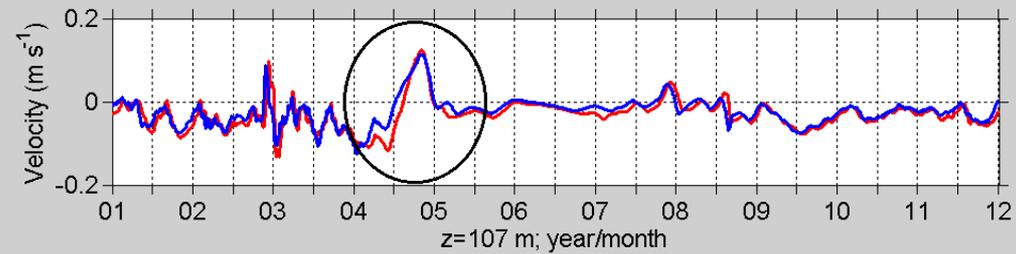
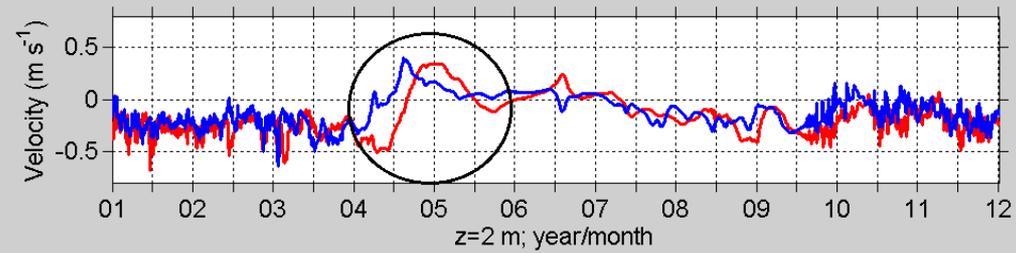


Панель слева: Ход плотности общей ПКЭ в точке на траверсе Голубой бухты (Гидрополигон ИО РАН, ЧМ) и вэйвлет-диаграмма в диапазоне периодов 1-205 сут. Светлая линия - спектр вэйвлет- плотности, проинтегрированной по времени.

Панель справа: Спектральные плотности Фурье ПКЭ - слева; спектры дисперсии (variance preserving spectra) - справа в точке на траверсе Голубой бухты на горизонтах 2, 167 и 400 м. Светлые кривые – спектры вэйвлет- плотности, проинтегрированной по времени.



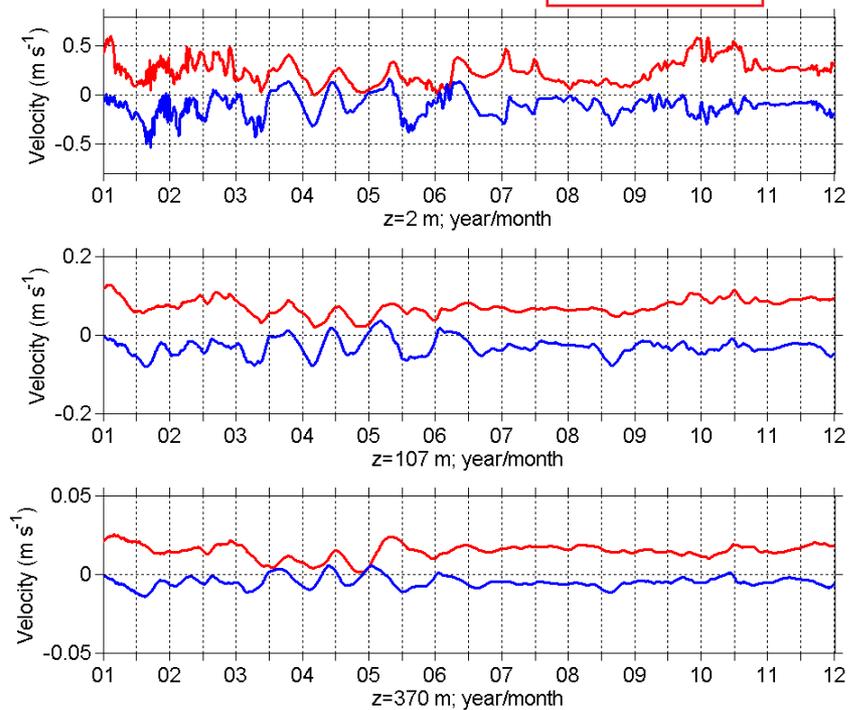
Скорости у мыса Кодор



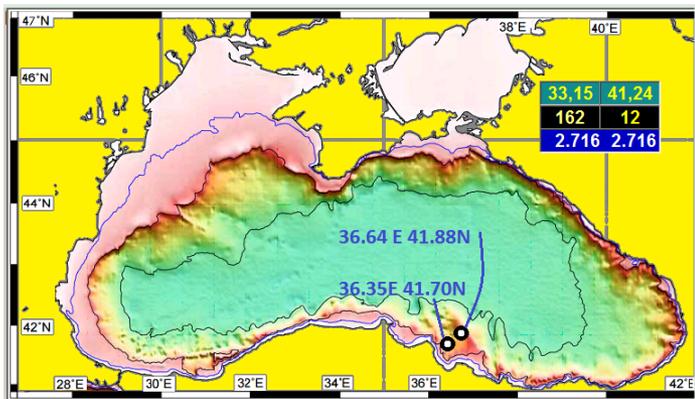
Sevastopol AE passing offshore by Kaliakra Cape

Kizil-Irmak offshore

периферия вихрей?

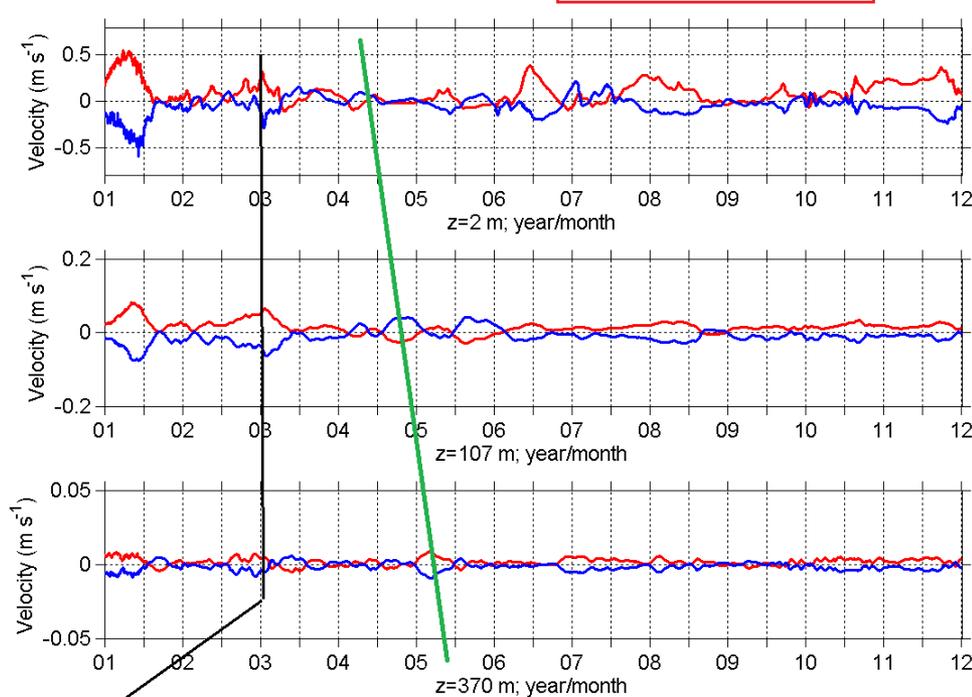


через точку проходят вихри, родившиеся ранее (западнее) и те, которые рождаются в самой точке



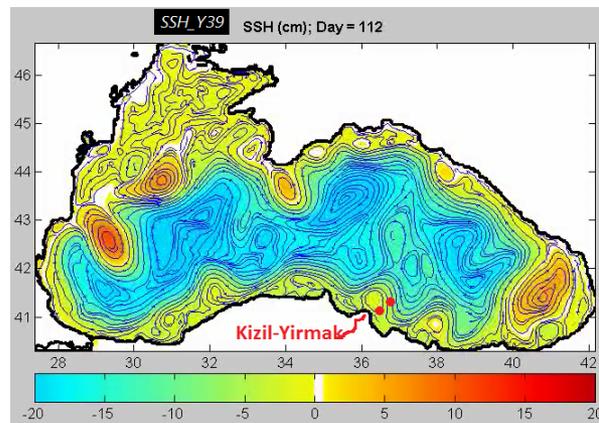
Kizil-Yirmak near-shore

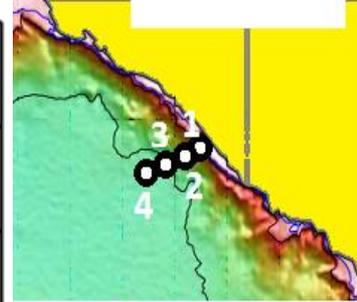
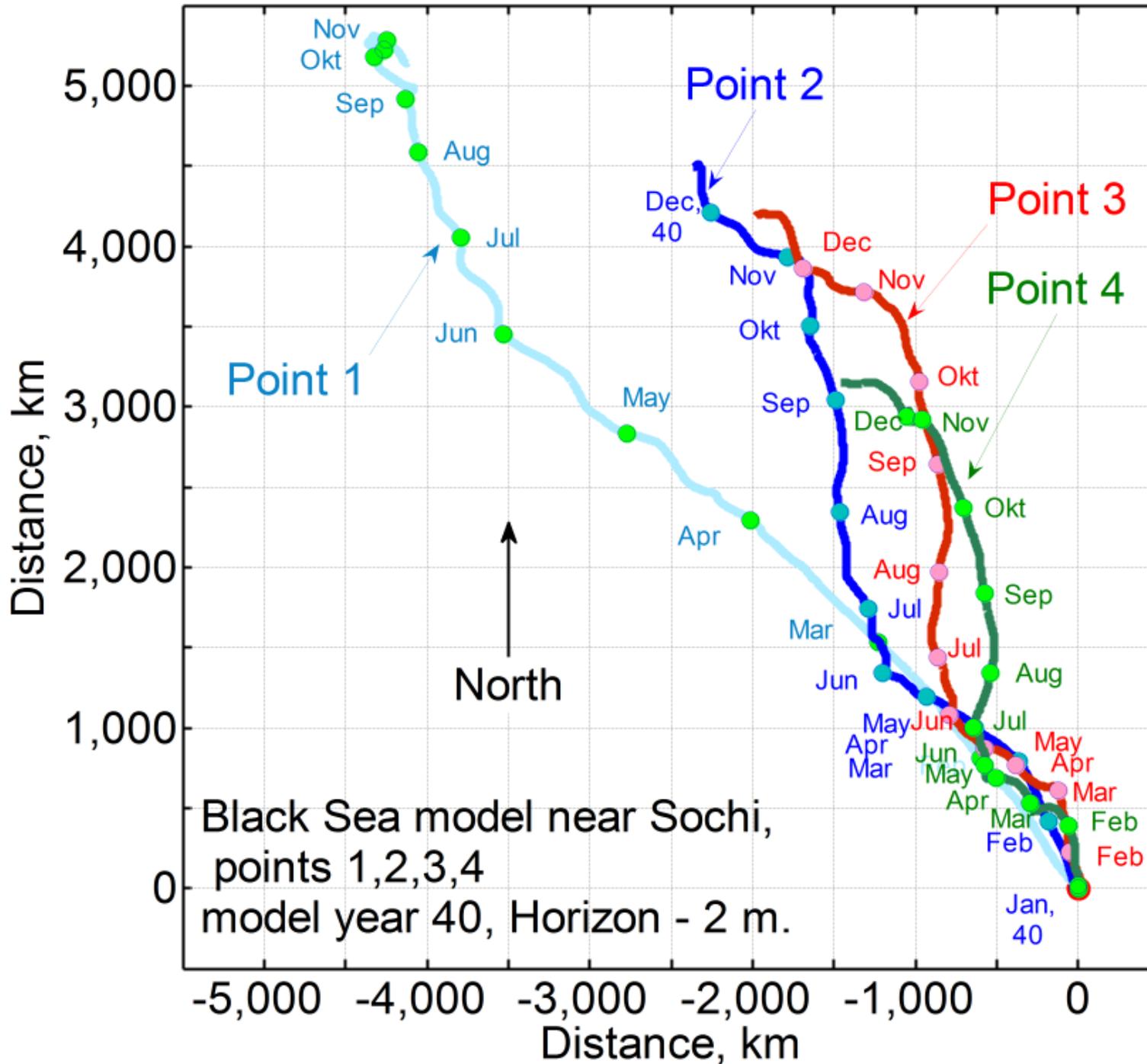
Проходят когерентные вихри



по наклону получается, что вихрь у дна идет быстрее, ТО ЕСТЬ он генерируется на рельефе дна и распространяется вверх из-за чего лаг по времени

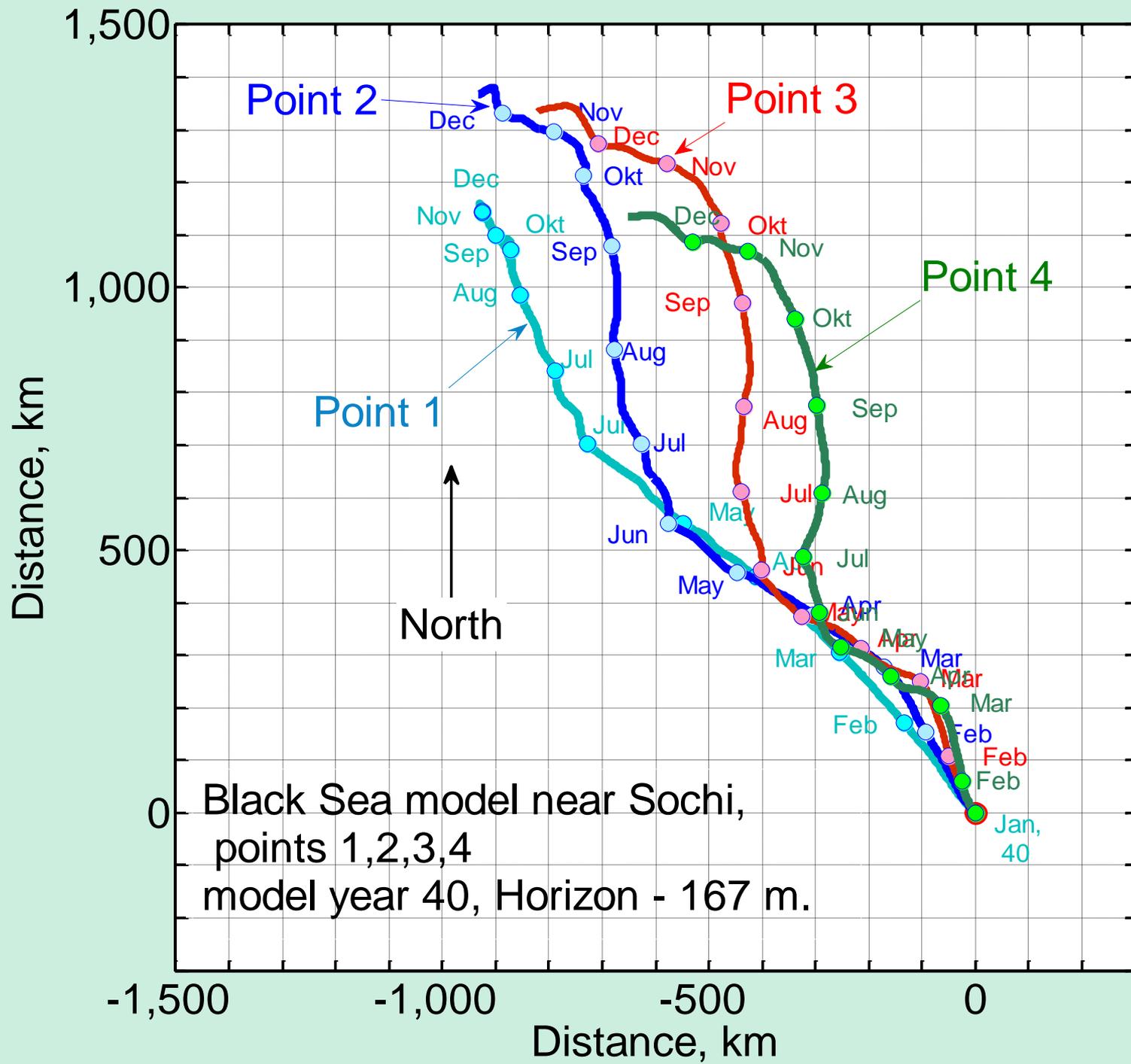
а этот синхронно по глубине

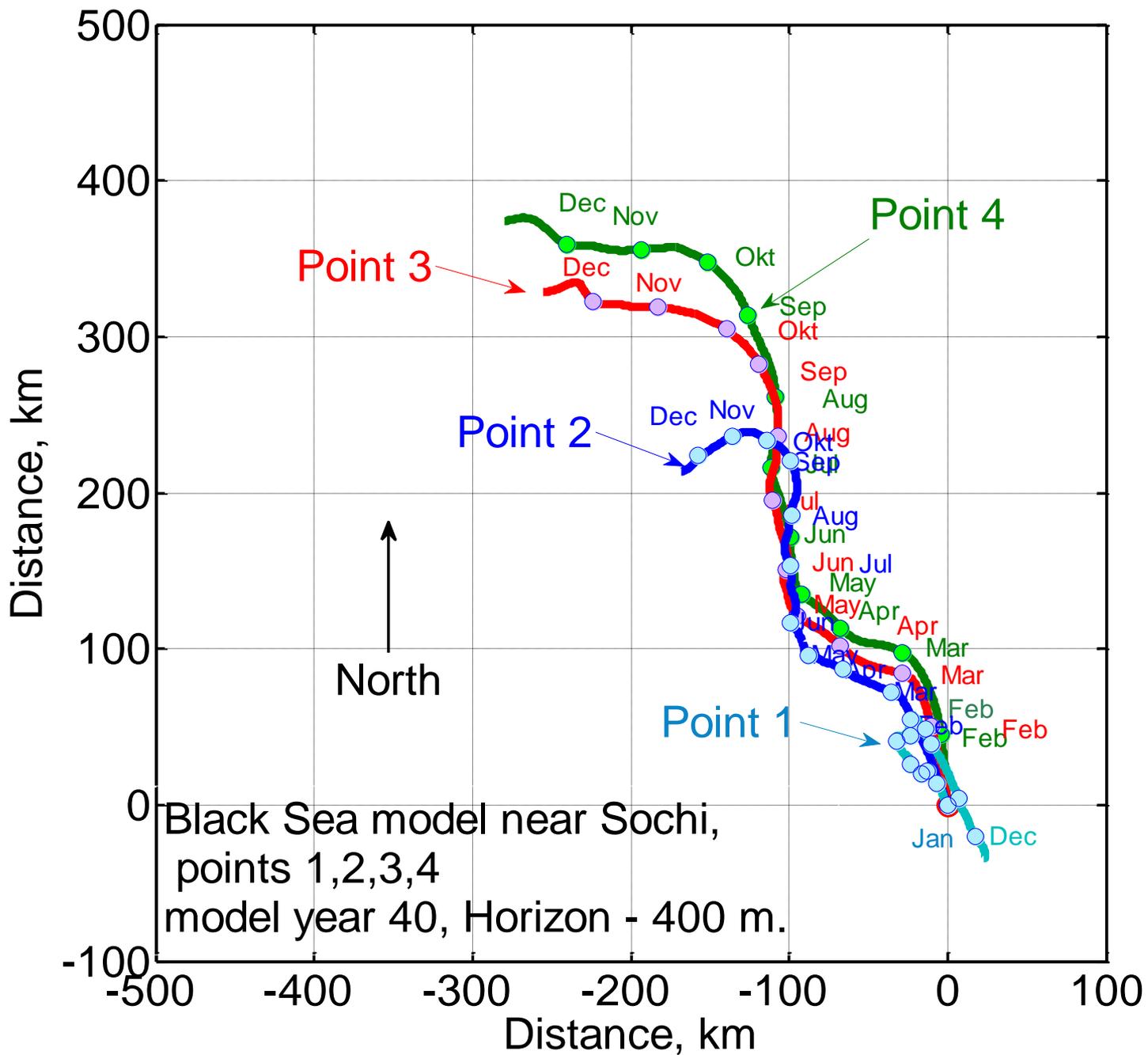


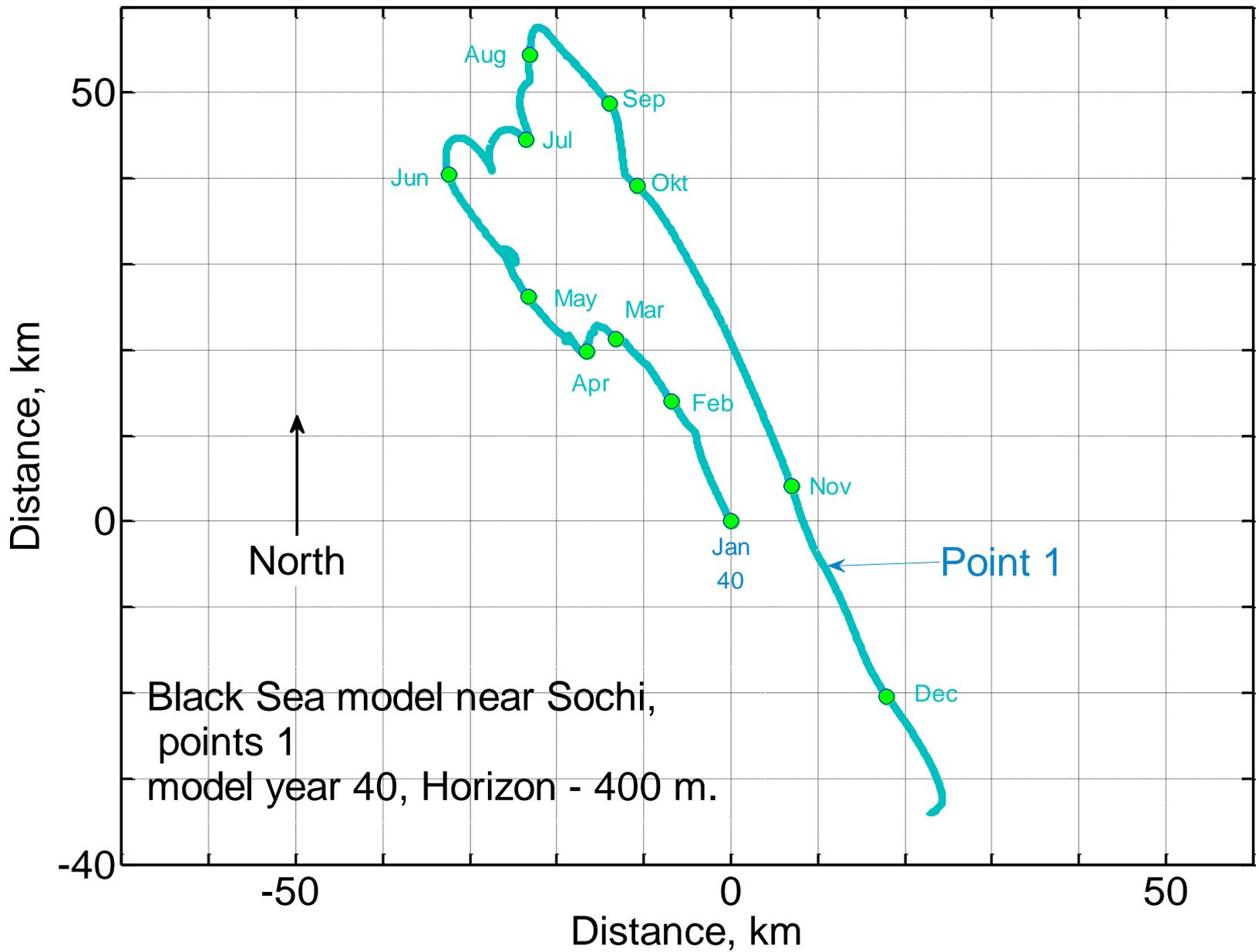


- 1- 39,15E; 43,73N
- 2- 38,96E; 43.68N
- 3- 38,76E; 43,58N
- 4- 37,47E; 43,51N

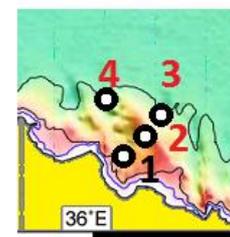
Прогрессивные векторные диаграммы течений в точках 1,2,3,4 около Сочи (Чёрное море), 360 модельных суток (год 40), 2160 значений с дискретностью через 4 часа.



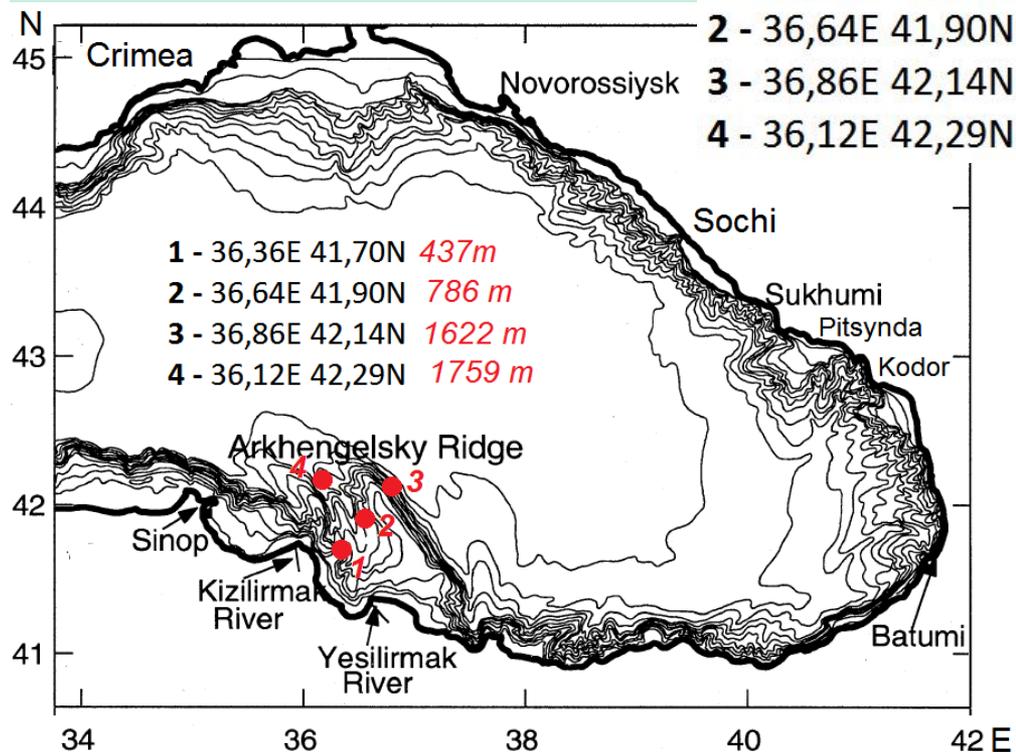
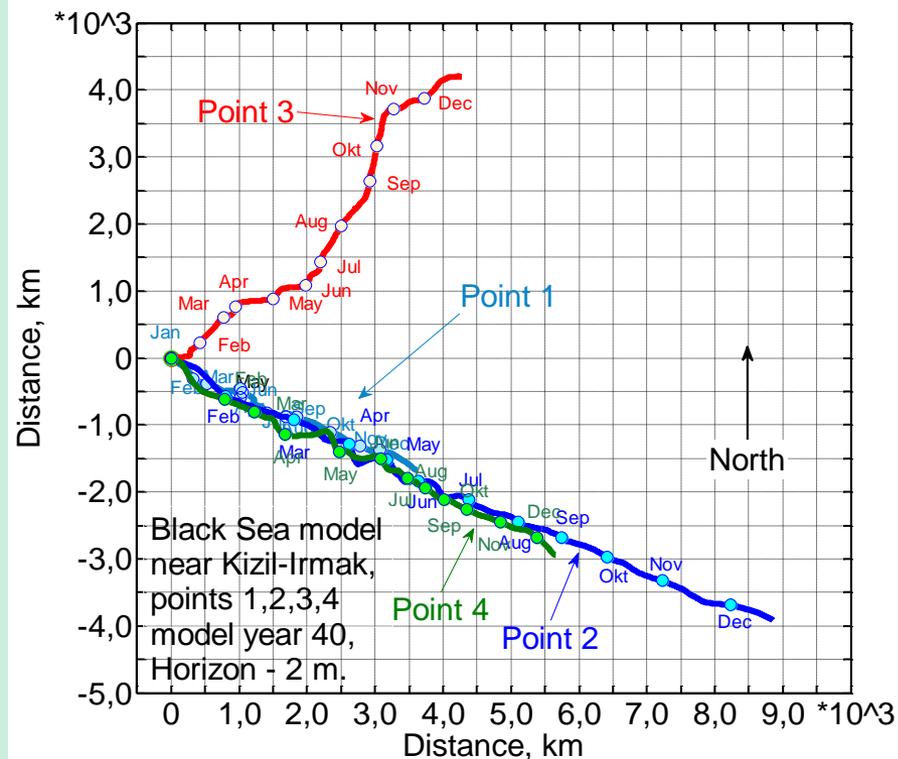




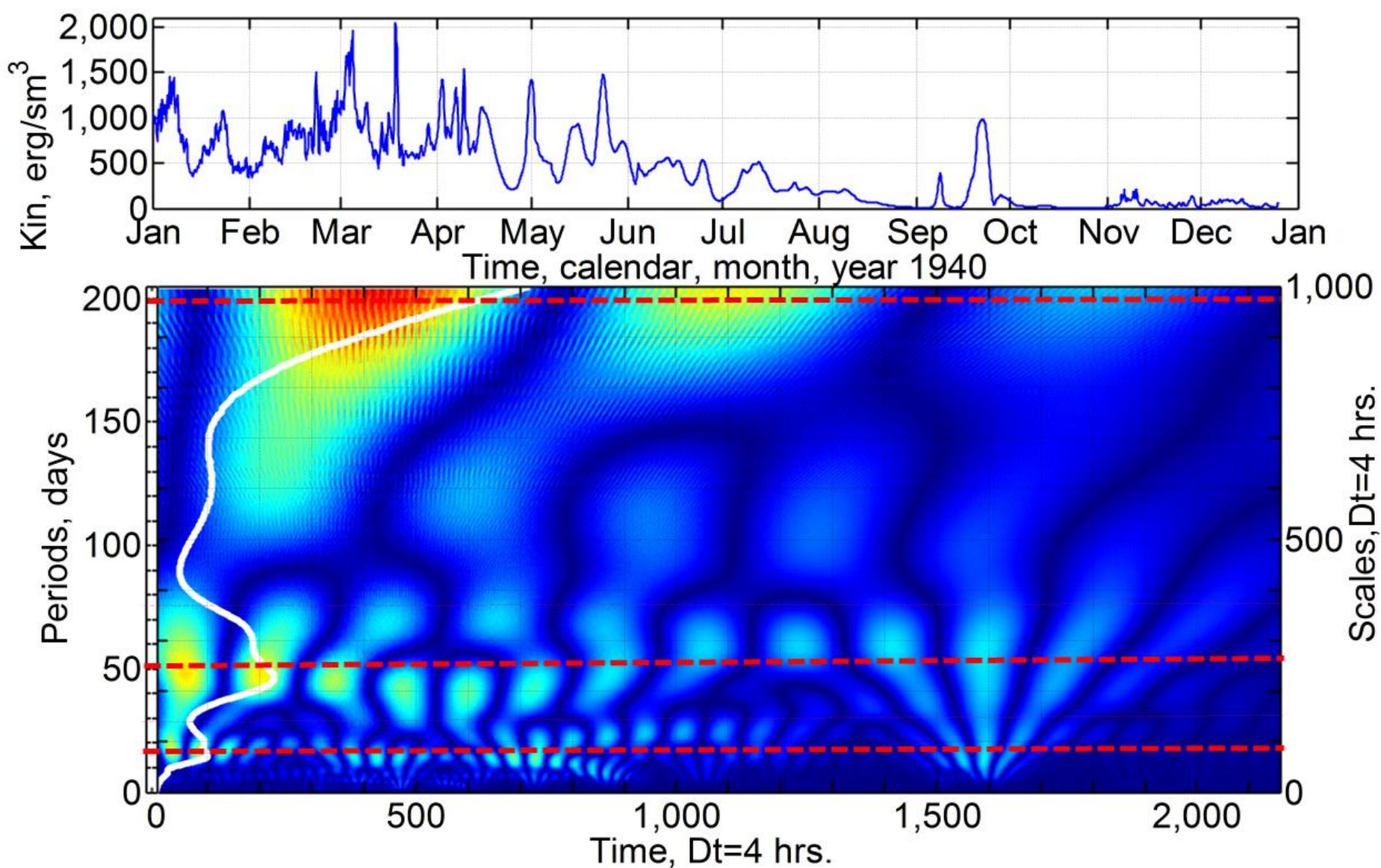
Возвратные течения на глубине 400 м на материковом склоне около г. Сочи, 360 модельных суток, 2160 значений с дискретностью 4 час.



- 1 - 36,36E 41,70N
- 2 - 36,64E 41,90N
- 3 - 36,86E 42,14N
- 4 - 36,12E 42,29N

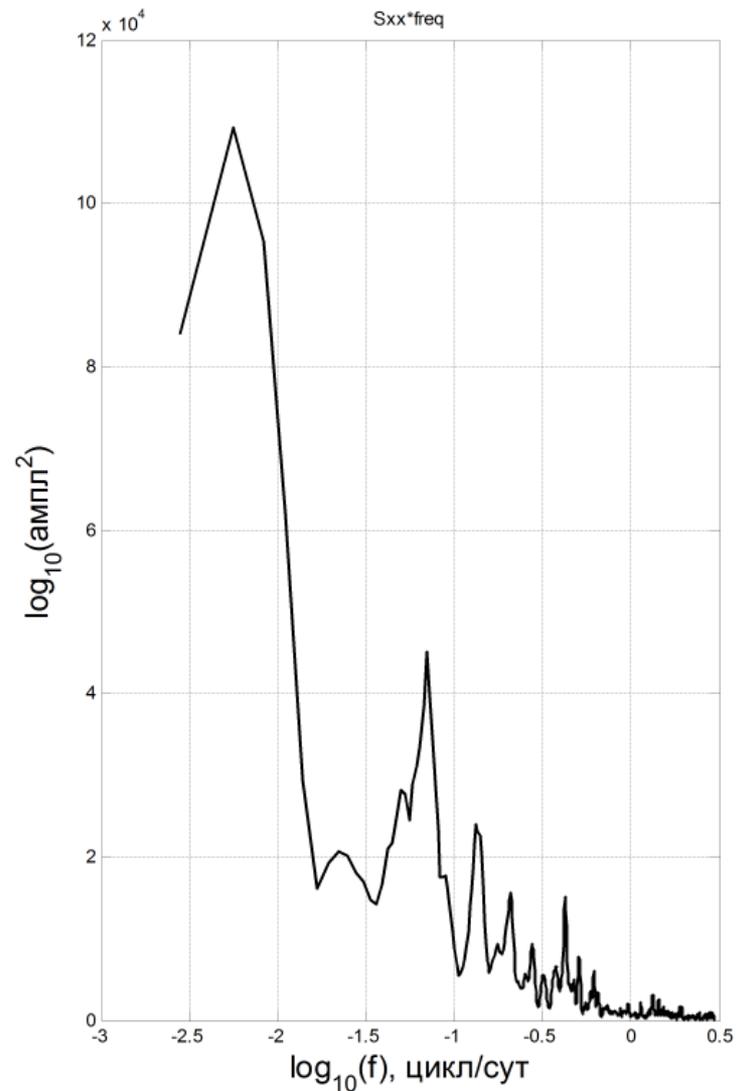
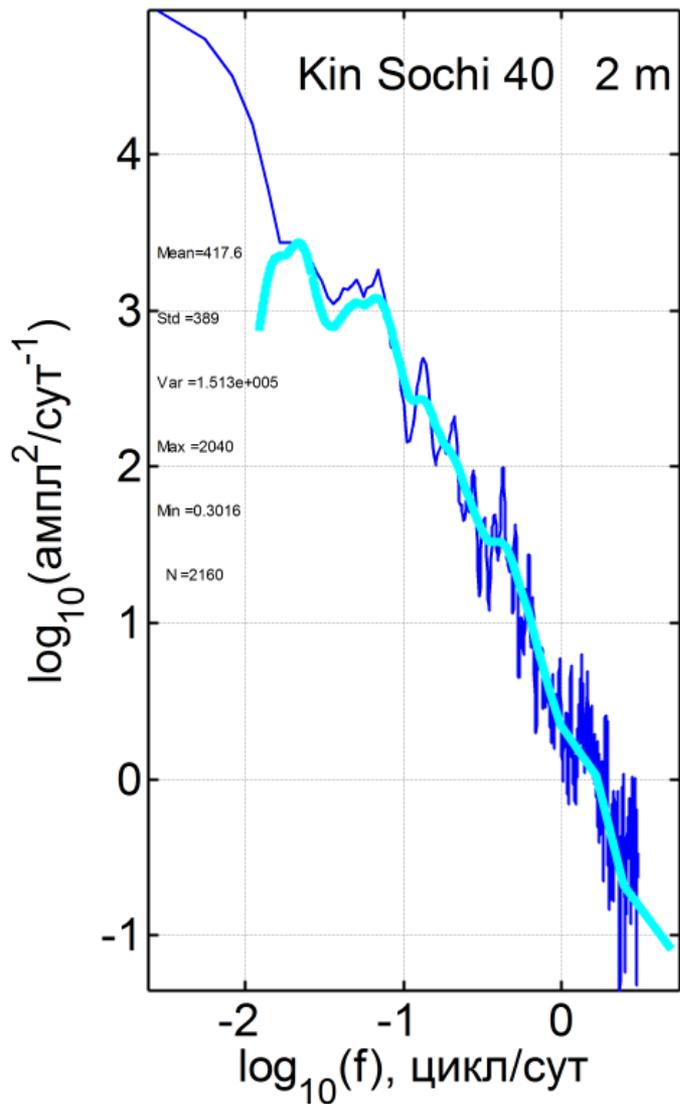


Разворот ОЧТ к северу над хребтом Архангельский. Прогрессивные векторные диаграммы течений на поверхности моря в точках 1,2,3,4 в районе устья реки Кизил-Йермак (Чёрное море), 360 модельных суток (год 40), 2160 значений с дискретностью через 4 часа.

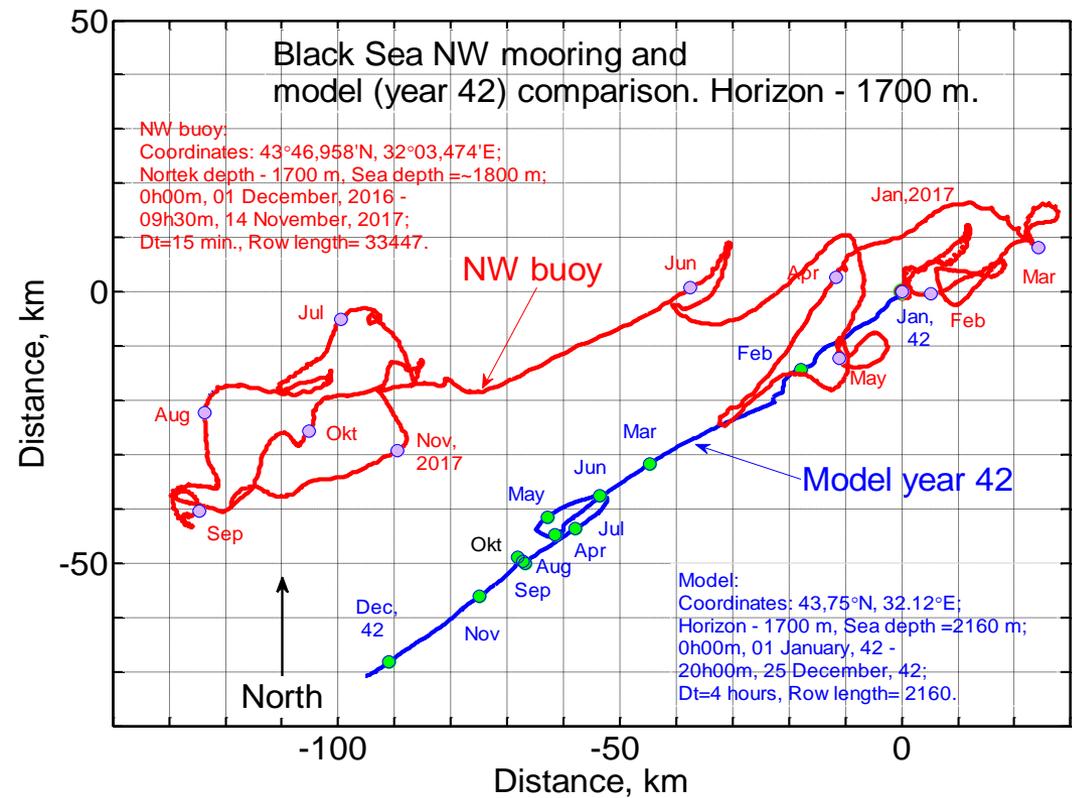
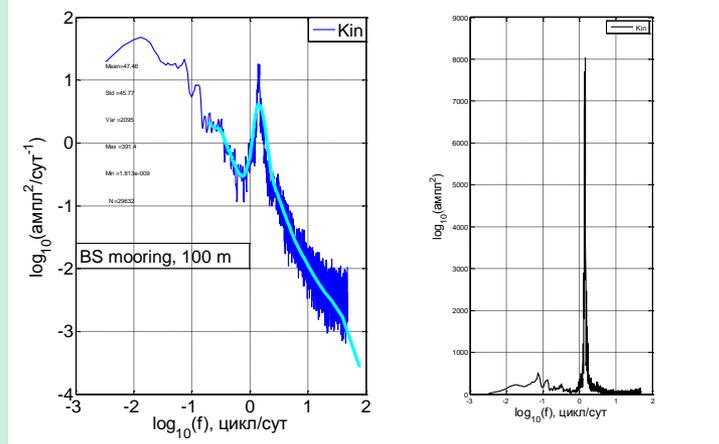
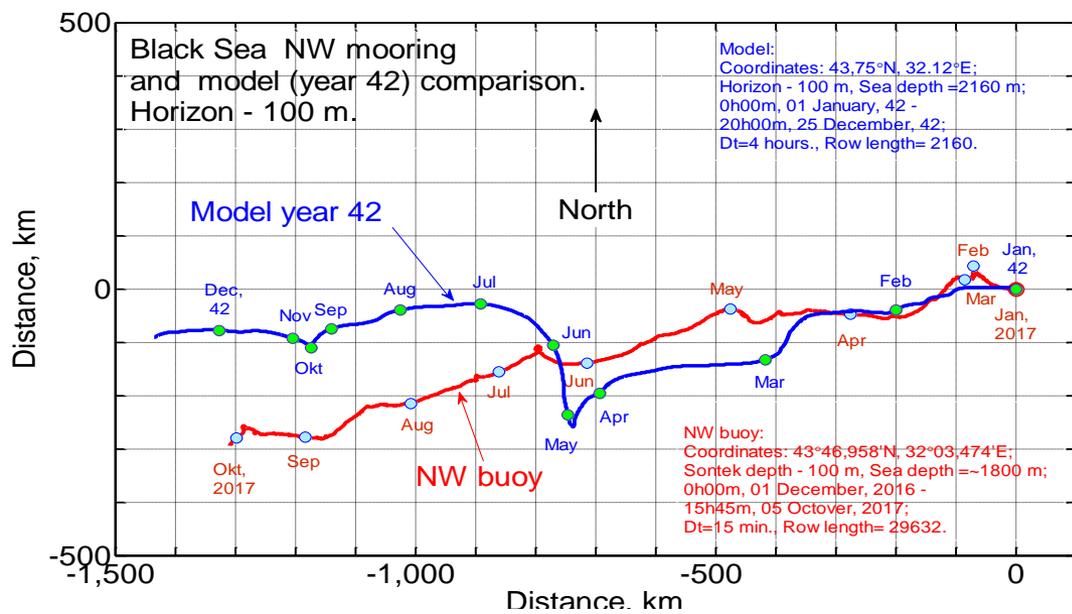


Ход плотности кинетической энергии в точке 1, Чёрное море (верхняя панель) и вэйвлет-плотность кинетической энергии в диапазоне периодов 1-205 сут. (нижняя панель). Светлая линия - спектр вэйвлет-плотности, проинтегрированной по времени.

Примечание. Привлекает внимание существенное замедление течений к концу года, а также расщепление частотных составляющих вариаций энергии, например 50 сут. на 40 и 70 сут. с марта по май, и др.



Спектральные плотности Фурье плотности кинетической энергии, - панель слева; спектр дисперсии плотности кинетической энергии (справа) в точке 1, (39.15 E, 43.73 N) около Сочи. Светлая кривая - спектр вэйвлет- плотности, проинтегрированной по времени.



Прогрессивные векторные диаграммы течений на горизонтах 100 м и 1700 м. Сравнение расчётов по модели DieCAST и почти однолетних данных измерений скорости течений и температуры на притопленном буйе в Северо-западной части Чёрного моря, при глубине моря ~1800 м.

Данные измерений из работы:
Клювиткин А. А., Островский А. Г., академик РАН Лисицын А. П., член-корреспондент РАН Коновалов С. К. Энергетический спектр скорости течения в глубокой части Чёрного моря. Доклады Академии наук, 2019, том 488, № 5, с. 550–554

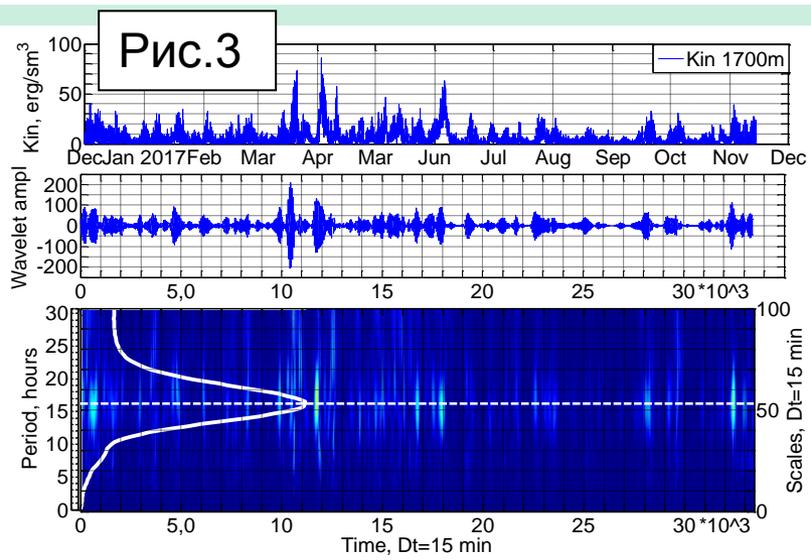
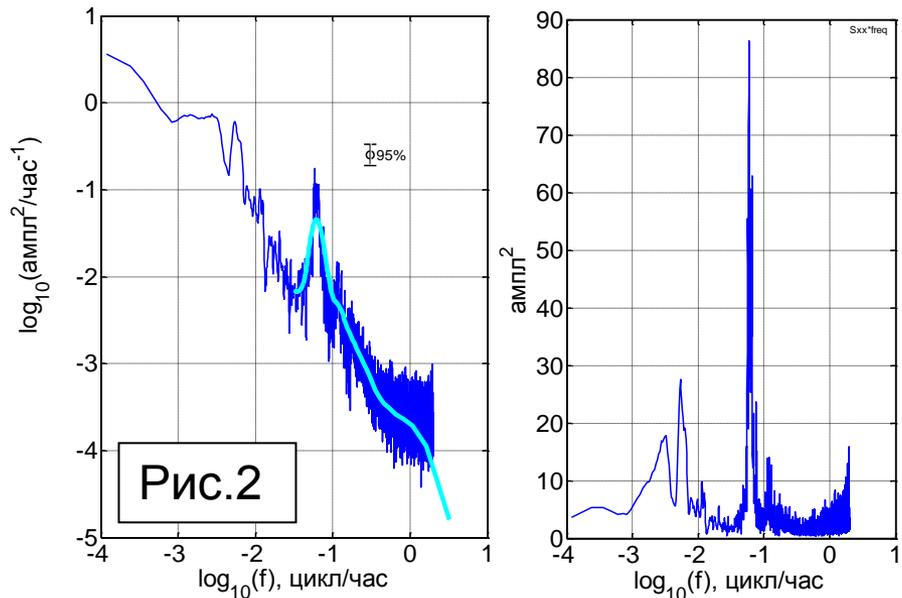
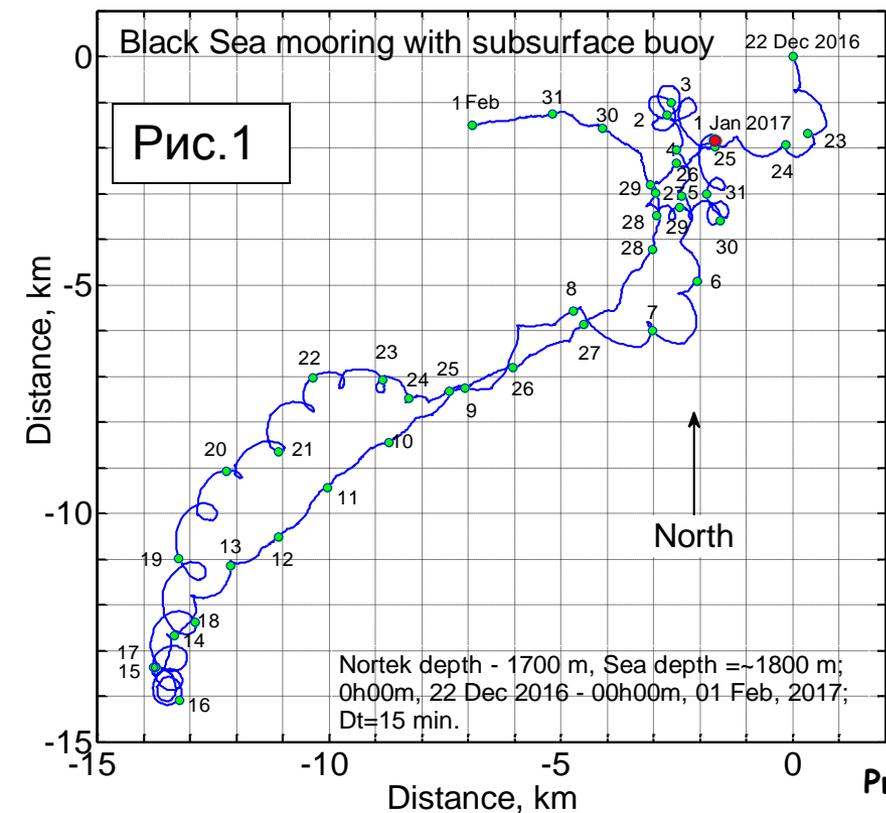
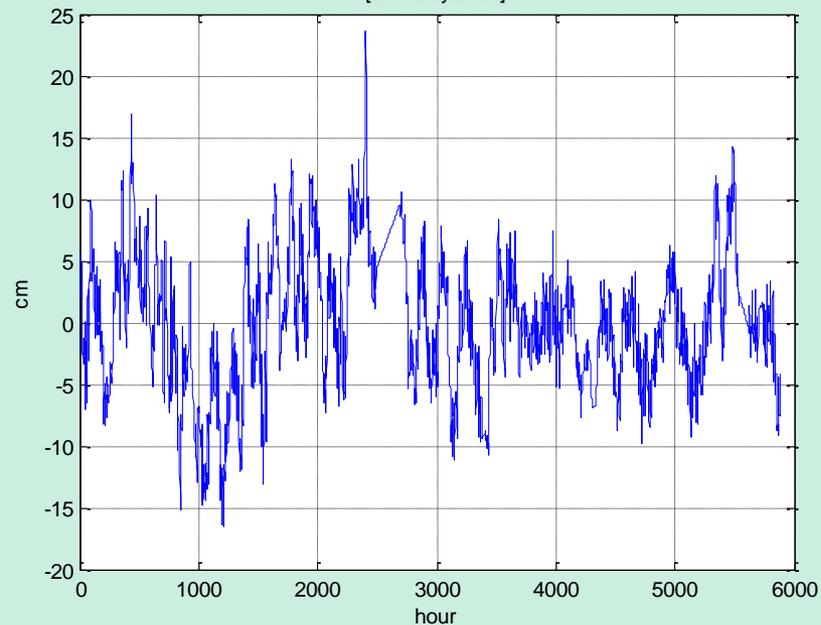


Рис. 1. Разнообразные по форме инерционные колебания в придонном слое на глубине 1700м, у подножия северо-западного материкового склона ЧМ. Прогрессивная векторная диаграмма течений.

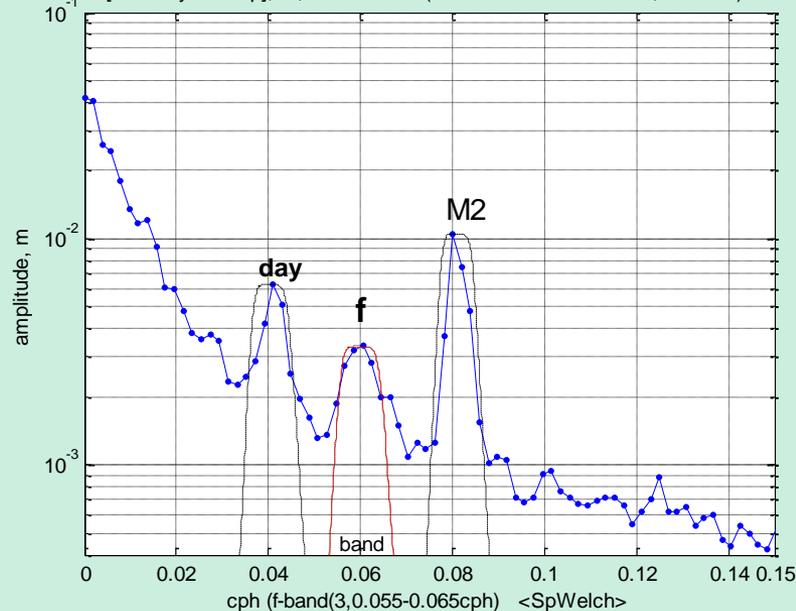
Рис. 2. Инерционный пик в спектральной плотности Фурье на глубине 1700 м. Рисунок слева - спектр плотности кинетической энергии течений $Kin=0.5\rho(U^2+V^2)$, $U(east)$ и $V(north)$ (синяя линия); спектр проинтегрированной по времени вейвлет-плотности Kin - зелёная светлая линия; панель справа - спектр дисперсий; «ампл» - в эрг/см³.

Рис. 3. Теремежаемость инерционных колебаний на глубине 1700 м. Верхняя панель: Ход по времени суммарной плотности кинетической энергии течений Kin . Средняя панель: Вэйвлет-амплитуда Kin на инерционном периоде $T_{инерц}=17.34$ час. Нижняя панель: вэйвлет-плотность Kin в диапазоне периодов 0-30 час.

[BlueBayLevel]

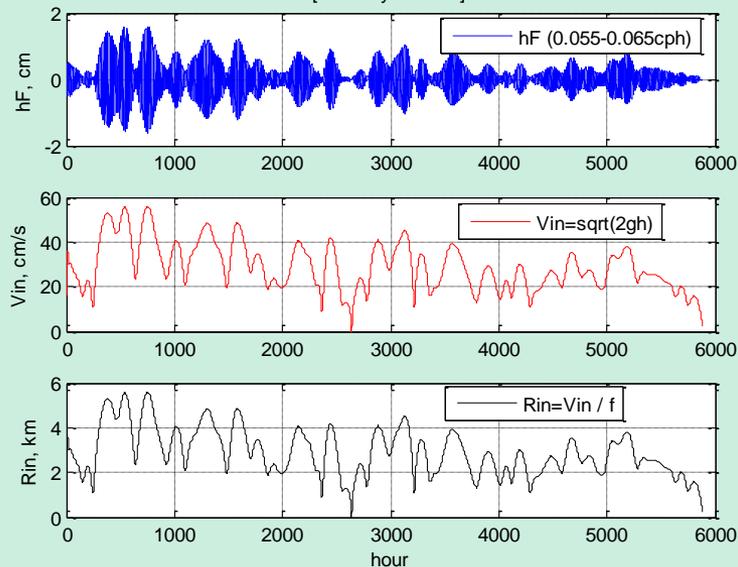


[BlueBayLevelSp], m, 5881 h data (09.12.2008 - 12.08.2009, Sokolov)



Уровень (y1) data в 100 м от уреза воды. Спектр амплитуд колебаний уровня моря.

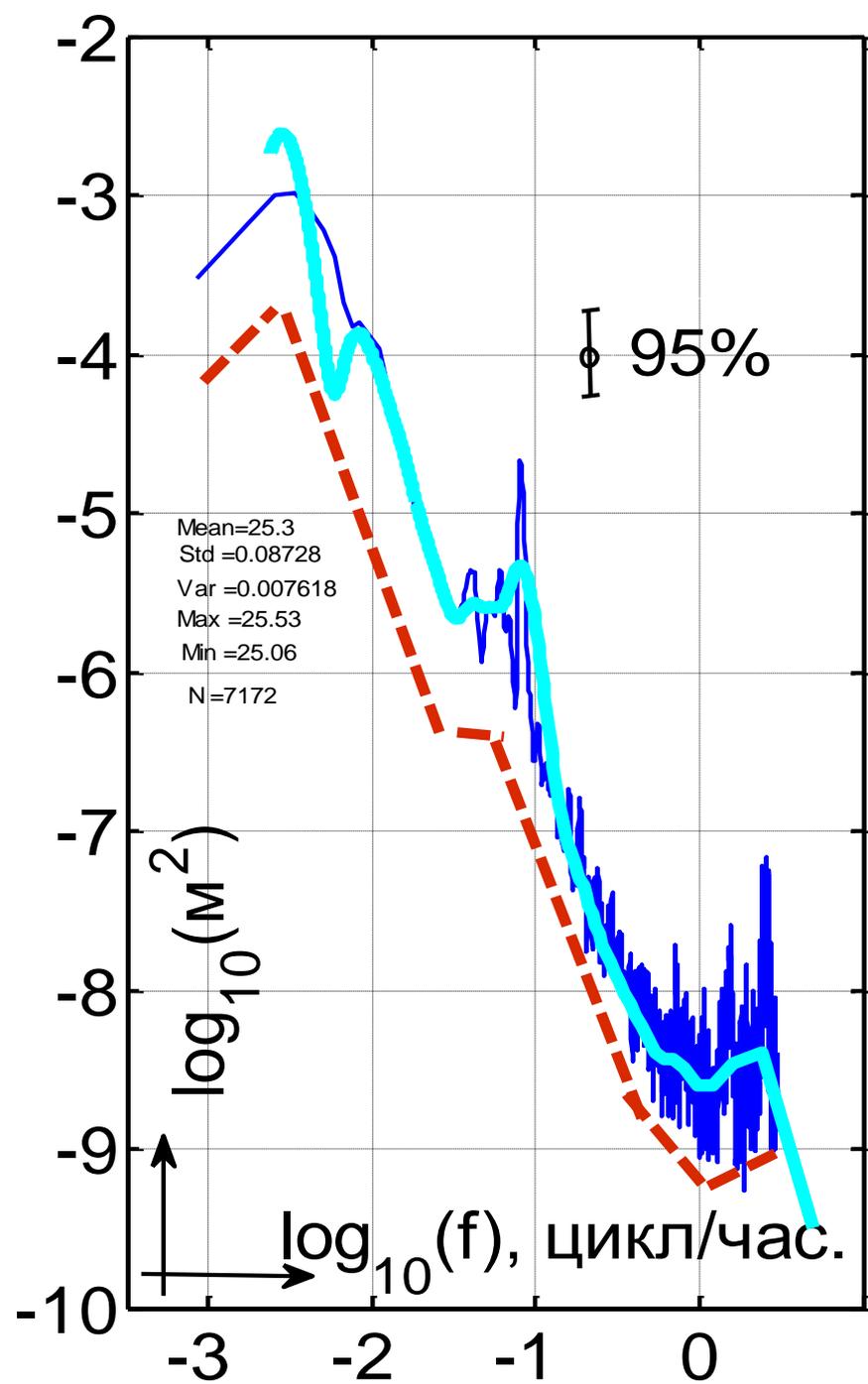
[BlueBayVinRinF]



(а) Инерционные колебания уровня у конца пирса в Голубой бухте (в 100 м от уреза воды).

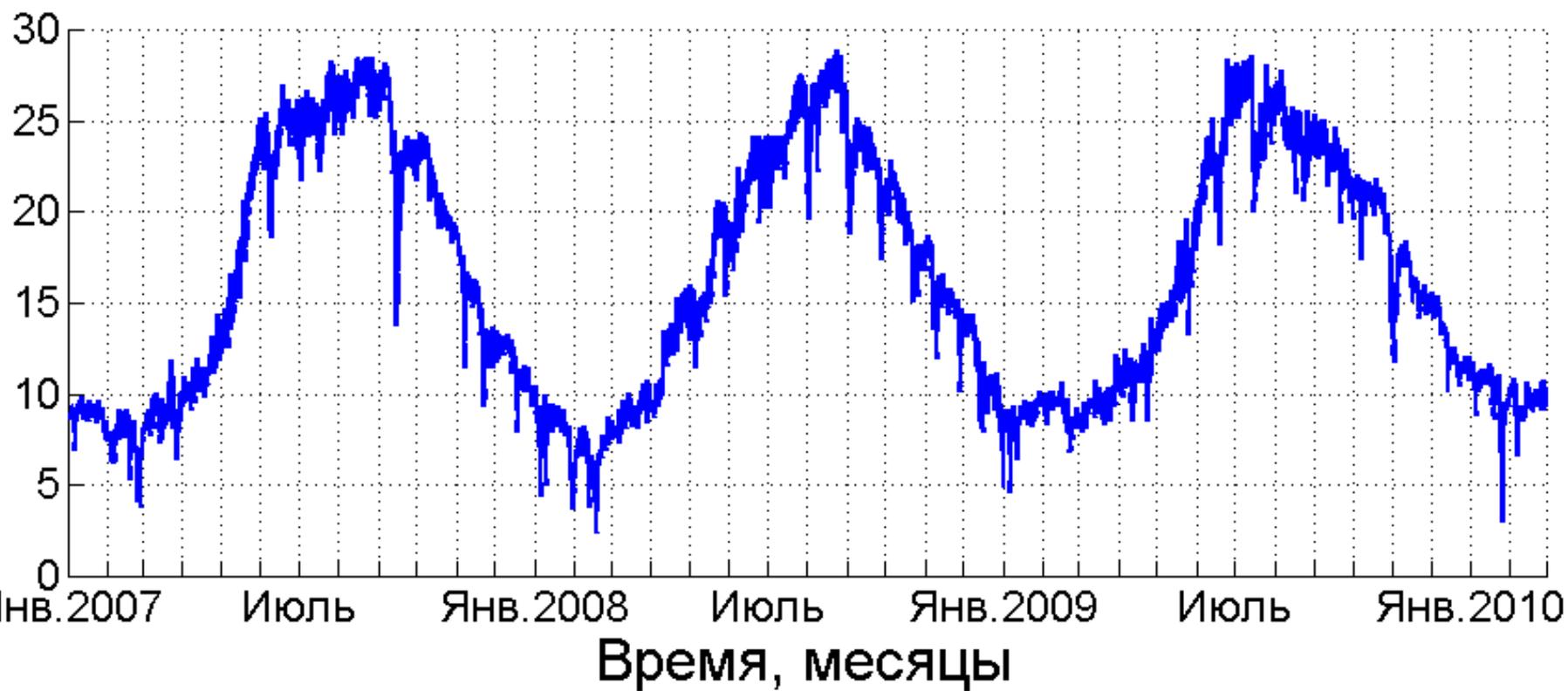
(б) амплитуда инерционных течений вдали от берега (на расстоянии $>2R_{in}$).

(в) Радиус круга инерции R_{in} в км.



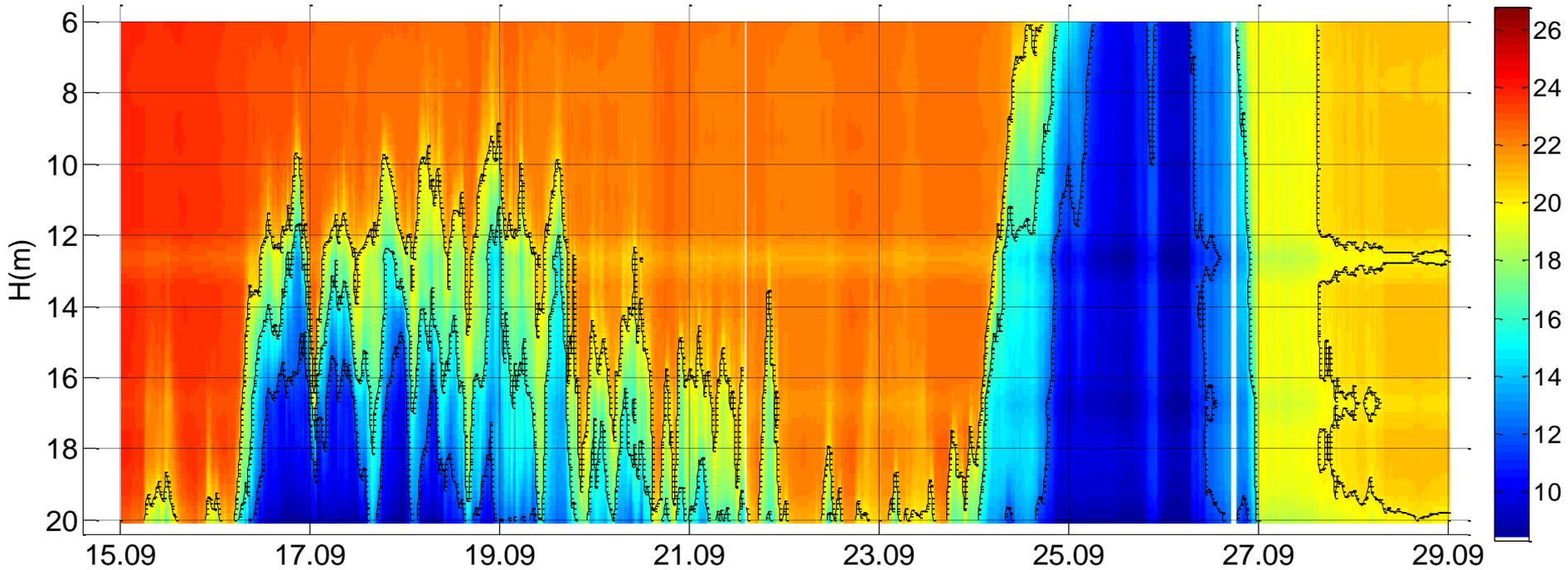
Амплитудный спектр на станции AWAC в период 01.10, 12ч00м по 20.11, 07ч10м 2013 г. Дискретность измерений -10 мин. Сглаженный спектр с 20-ю степенями свободы - синяя линия
 Интегрированная по времени вэйвлет-амплитуда - зелёная линия
 Структура спектра по наклонам - красный пунктир

Температура воды, град. С

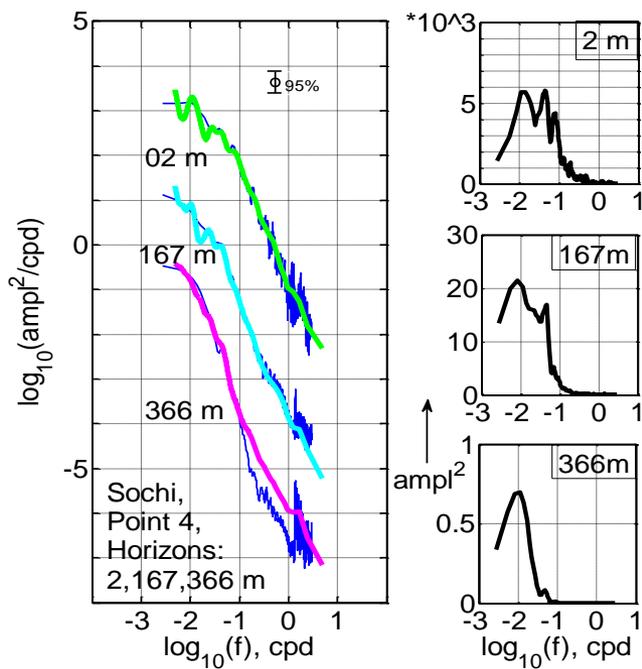
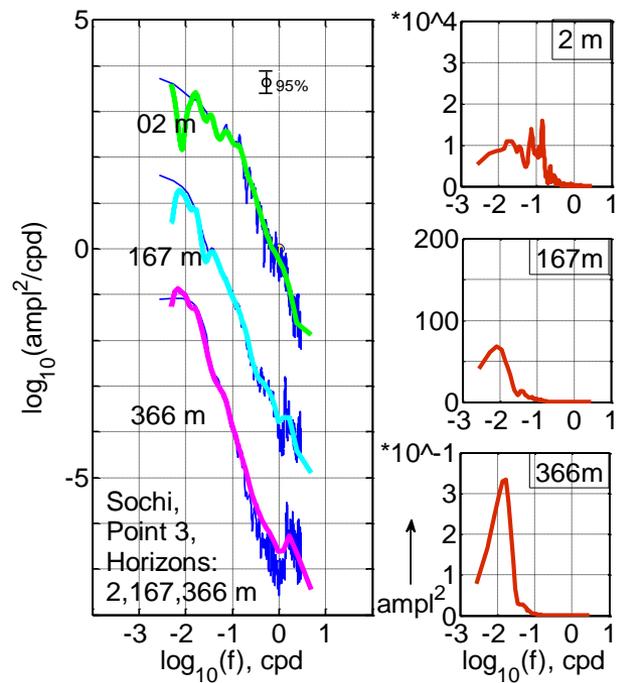
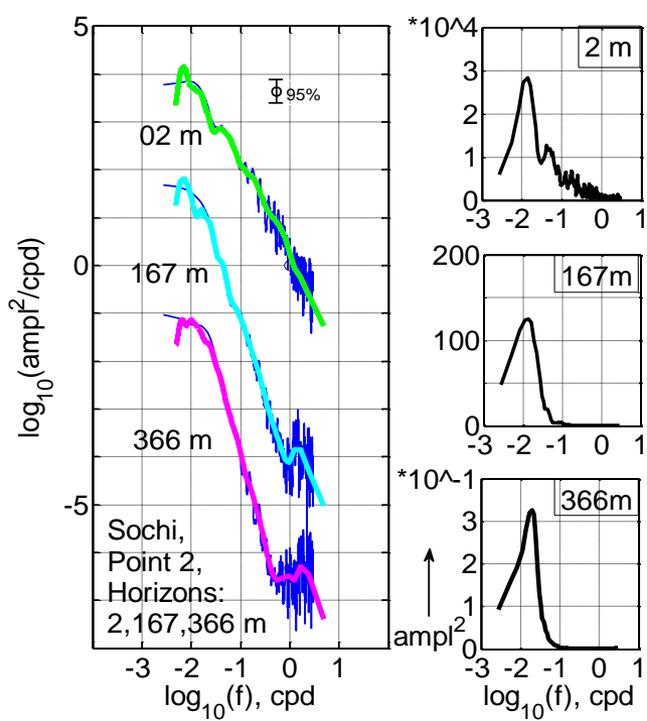
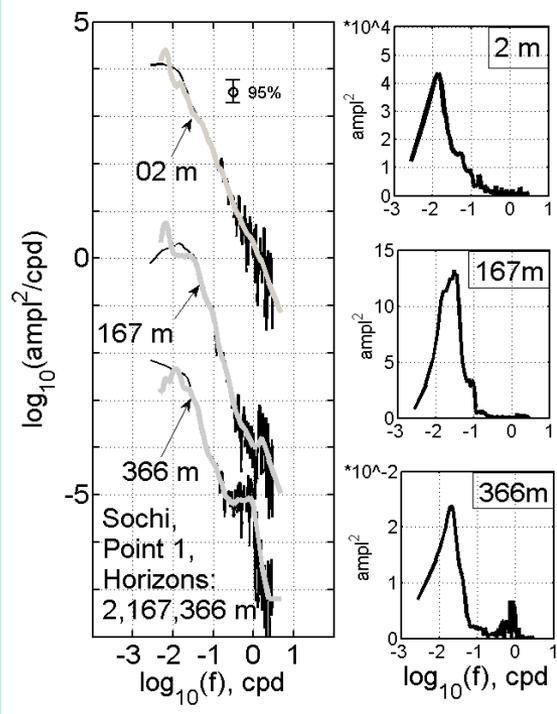


Апвеллинги. Среднесуточная температура воды на поверхности моря на метеостанции Геленджика в период 2007-2010гг.

15.09.2013 00:06 - 28.09.2013 23:58



Наблюдение апвеллинга 24-27.09.2013 г. Изотермы 15.09-29.09 2013 г. В период 17-21.09.2013 г. наблюдается пакет неполных апвеллингов.



Спектральные плотности Фурье и проинтегрированного по времени взъвет-преобразования (около Геленджика).

Выводы:

- 2-х мин. гидродинамическая модель DieCAST позволяет исследовать многообразие мезомасштабных структур: струй, меандров, вихрей, диполей, протрузий, бифуркаций и т.д.
- Многие интересные явления, которые удалось обнаружить в модельных экспериментах, связаны с генерацией мезомасштабных вихрей, напр., вихрей у м. Пицунда и Кодори, имеющей сезонный характер. При этом, они порождаются за мысом либо при обтекании ОЧТ осенью-зимой, либо проходящие у мыса после отрыва от Батумского АЦ.
- Моделирование решает ряд важных вопросов. Где и как формируются вихри? Показано, что особенности рельефа дна и береговой линии, сток рек влияют на формирование вихрей и их перемещения вдоль берега.
- Относительная завихренность в методе Окубо - Вейсса - является эффективным индикатором для обнаружения и прослеживания мезомасштабных вихрей. С помощью метода Окубо - Вейсса можно оценить размеры, скорость перемещения, время жизни и другие параметры.
- Спутниковые данные, наряду с получением информации о структурах и их эволюции в Черном море, неоценимы для настройки и валидации численных моделей, а также верификации результатов.

Литература:

1. Зацепин А.Г. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой части Черного моря // Известия РАН. Физика атм. и океана. Т.50. №1. 2014. С.16-29, <http://dx.doi.org/10.7868/S0002351513060163>.
2. Коротенко К.А. Моделирование мезомасштабной циркуляции Черного моря // Океанология. Т. 55. № 6. 2015. С. 909–915.
3. Dietrich D.E., Lin C.A., Mestas-Nunez A. et al. A High Resolution Numerical Study of Gulf of Mexico Fronts and Eddies // Meteorol. Atmos. Phys. V. 64. 1997. P. 187–201.
4. Korotenko K., Osadchiv A., Melnikov V. Mesoscale Eddies in the Black Sea and Their Impact on River Plumes: Numerical Modeling and Satellite Observation // Remote Sens. V.14. 4149. 2022, 29 pp. <https://doi.org/10.3390/rs14174149>.
5. Palazov A., Ciliberti S., Peneva E., Gregoire M., Staneva J., Lemieux-Dudon B., Masina S., Pinardi N., Vandenbulcke L., Behrens A., Lima L., Coppini G., Marinova V., Slabakova V., Lecci R., Creti S., Palermo F., Stefanizzi L., Valcheva N. and Agostini P. Black Sea Observing System // Front. Mar. Sci. 6:315. 2019. doi: 10.3389/fmars.2019.00315.



Спасибо за внимание

*Мельников Василий Андреевич,
Институт океанологии
им. П.П.Ширшова РАН,
Тел. 9162418716*