



Russian Academy of Sciences  
Shirshov Institute of Oceanology

# Гидродинамика акватории на траверзе Геленджикской бухты. Спутниковые наблюдения, контактные измерения и численное моделирование

**Мельников В.А., Коротенко К.А., Осадчиев А.А.  
(Институт океанологии РАН)**

**XX Международная конференция  
«Современные проблемы  
дистанционного зондирования Земли из космоса»  
Москва, ИКИ РАН, 14 - 18 ноября 2022**

## Цель работы

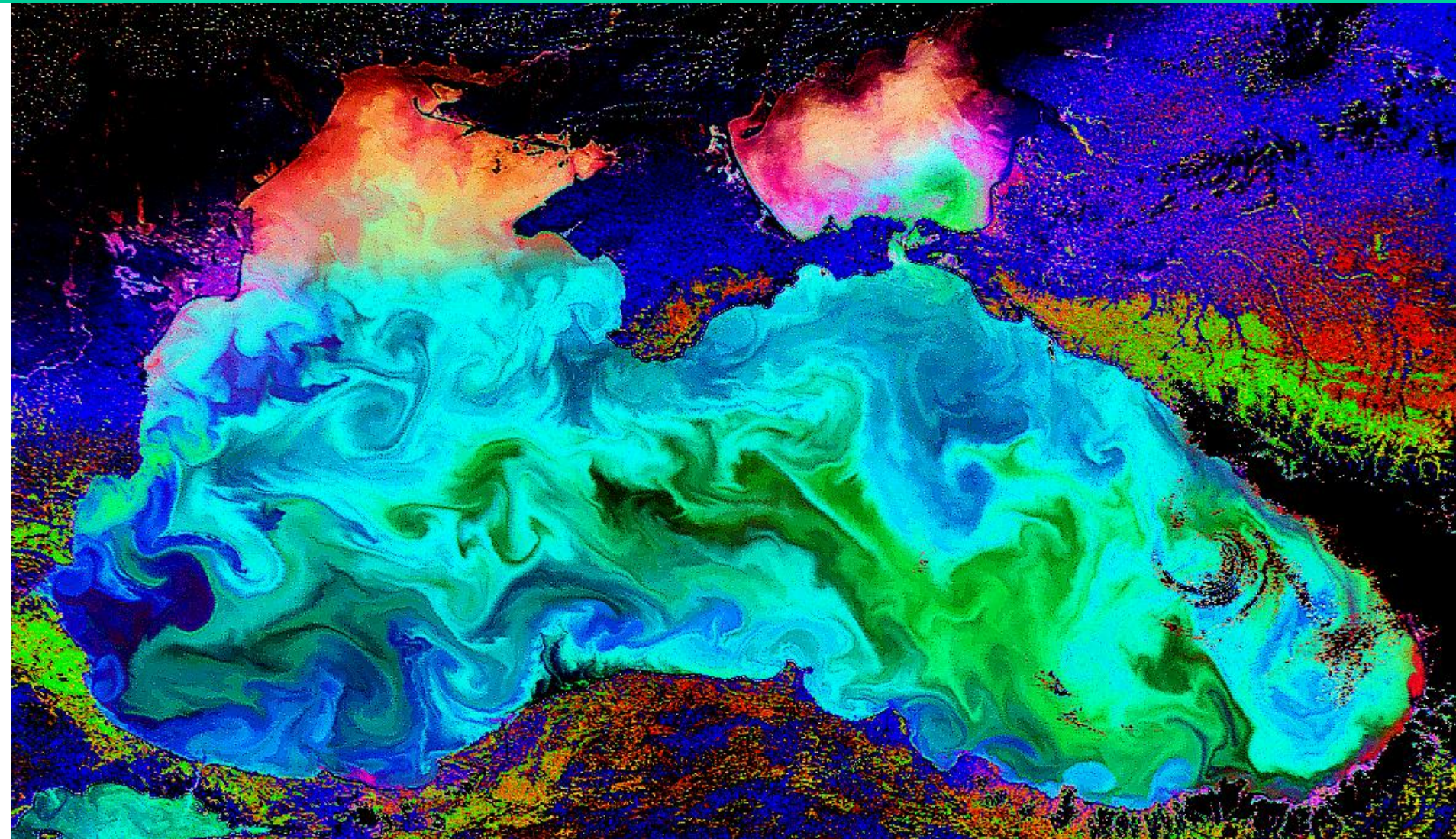
Изучение региональной гидродинамики в северо-восточной части Чёрного моря: спектральный состав и связи с общей циркуляцией Чёрного моря и многомасштабными атмосферными воздействиями.

Используются архивы контактных измерений по новейшим технологиям (Зацепин и др., 2014), спутниковая информация (поля температуры поверхности моря (ТПМ), аномалий уровня моря, ветра), а также данные прибрежных метеорологических станций.

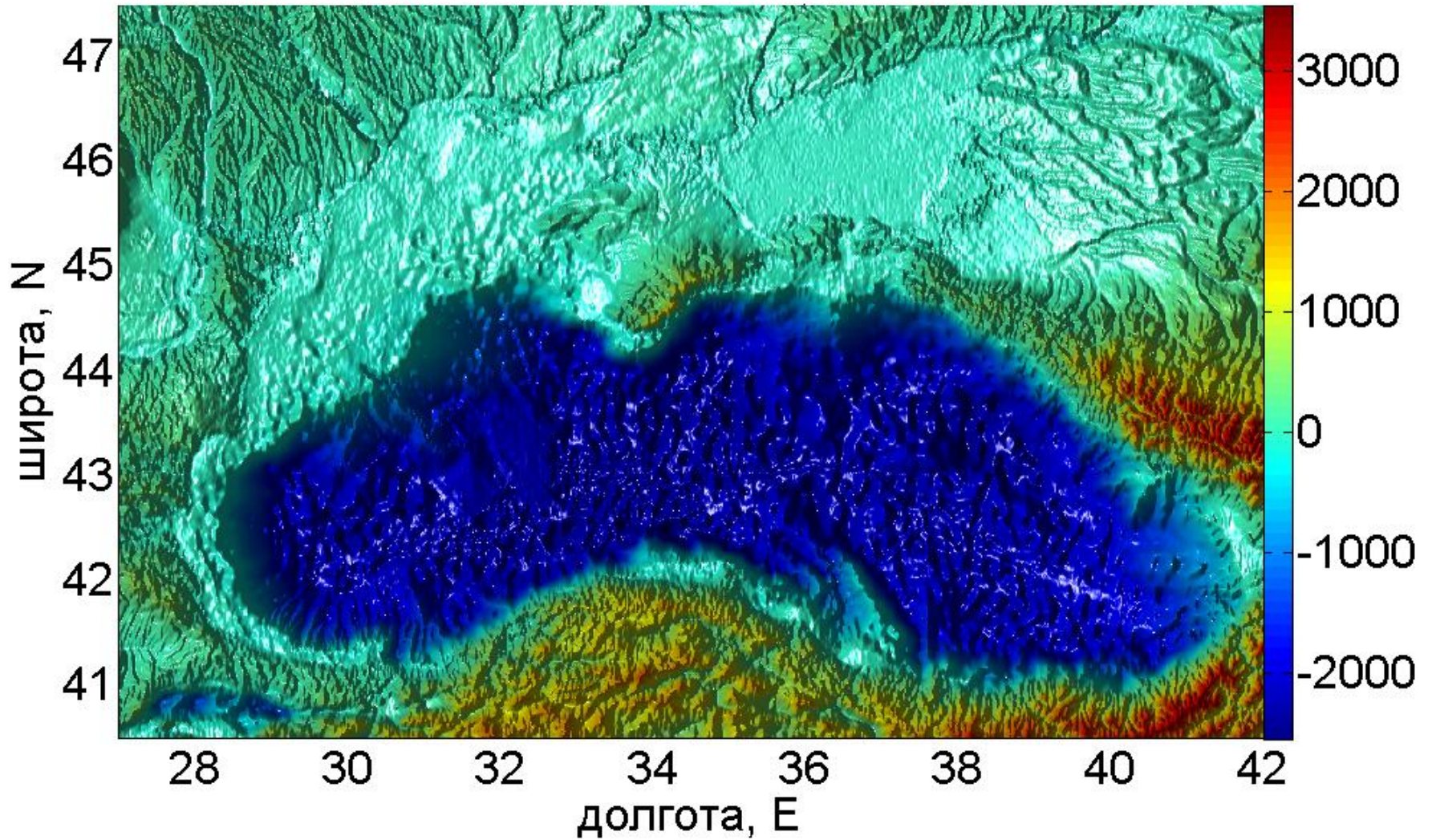
Выполнено численное моделирование гидродинамических процессов в регионе на трверзе Геленджикской бухты. Применяется вихреразрешающая гидродинамическая модель DieCAST (Dietrich et al., 1997; Коротенко, 2015) с разрешением 2 морские мили.

Для ряда точек на нормальном к берегу разрезе от порта Геленджик, были рассчитаны гидрологические флуктуации, скорости течений и завихренность поля течений на разных глубинах.

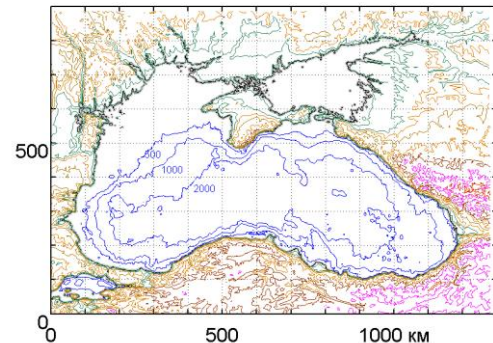
# Многообразии мезомасштабных структур в Черном море

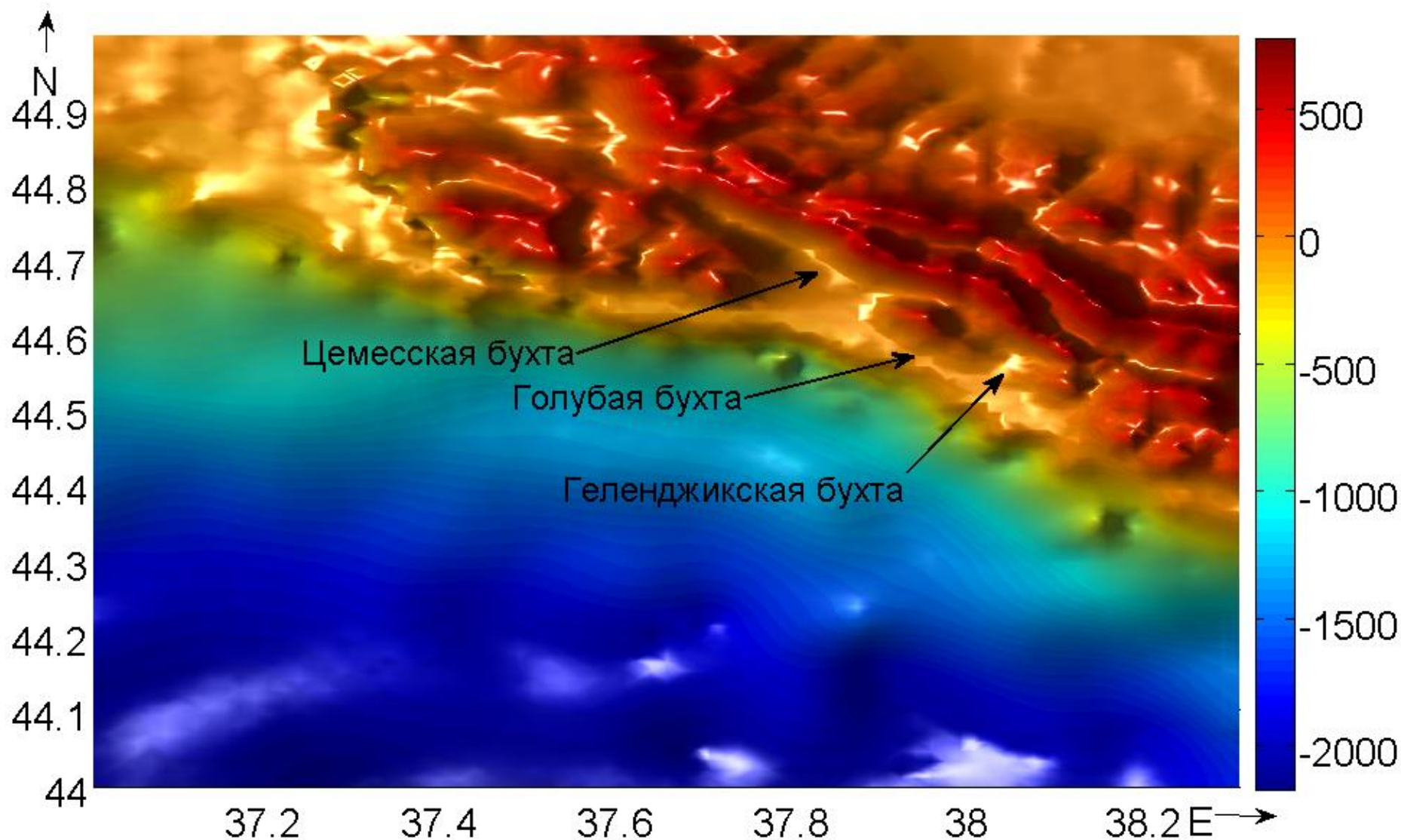


Enhanced SeaWiFS Sea surface color imagery, 11 June 2000

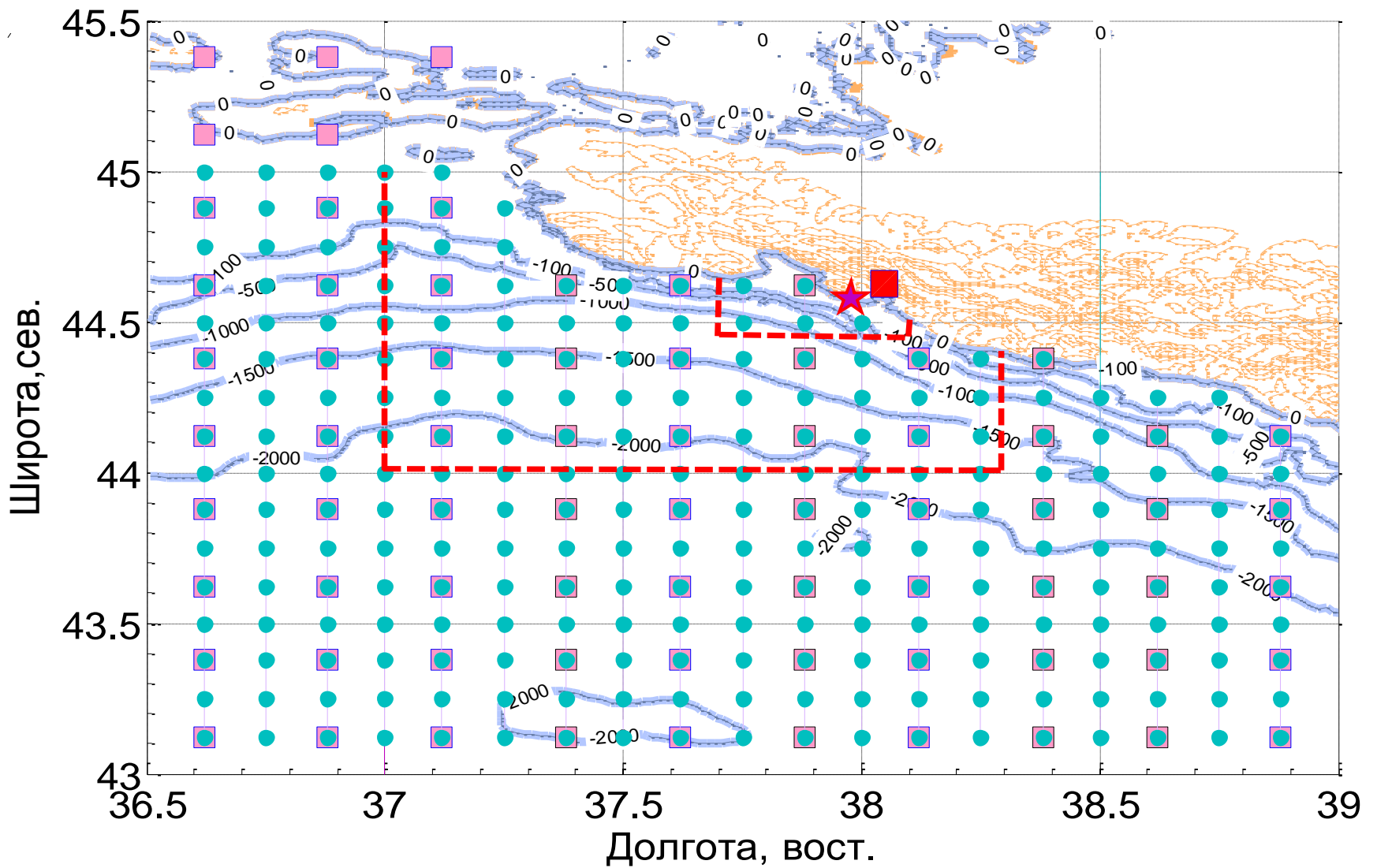


Черное и Азовское моря. Рельеф земной поверхности и дна моря. Шкала высот и глубин в метрах. Данные из Smith, W.H.F. and D.T. Sandwell (1997), разрешение 2'.





Рельеф земной поверхности и дна в северо-восточной части Чёрного моря, в районе Гидрополигона. Изометрическая проекция. Цветная шкала высот и глубин - в метрах.



## Гидрофизический полигон около Геленджика на Чёрном море.

Условные обозначения: звездочка-причал ИО РАН(44.58°N,37.98°E, Голубая бухта); красный 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 голубые линии - изолинии глубины моря (в метрах); тонкие коричневые линии-изолинии (без оцифр.) рельефа суши; штриховые красные линии отмечают три области Полигона.

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

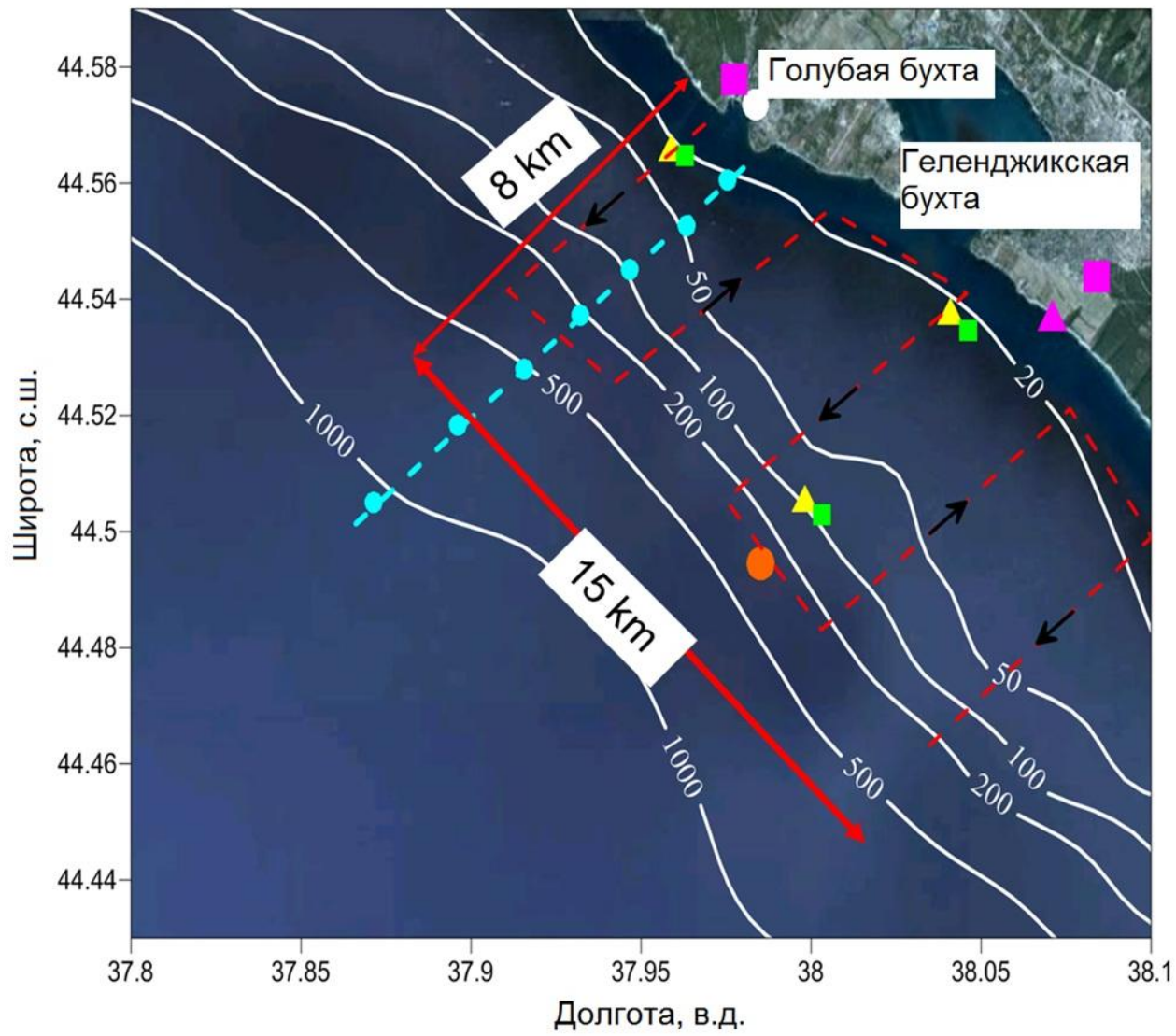


Схема одного из этапов контактных измерений на Гидрополигоне ИО РАН. Пунктирной линией со стрелками обозначены галсы судна при проведении измерений поля скорости течения, с помощью буксируемого за судном ADCP.



ЛОСЦВА  
Получено  
в Канцелярии  
Гидрографического  
участка

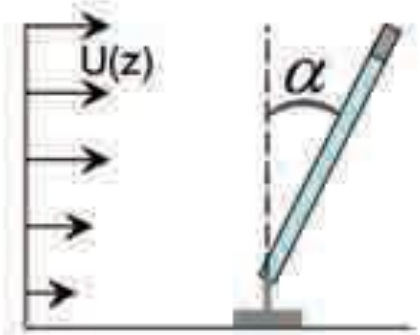
Монтаж измерительного оборудования на поддерживающей раме в виде усечённой пирамиды..





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

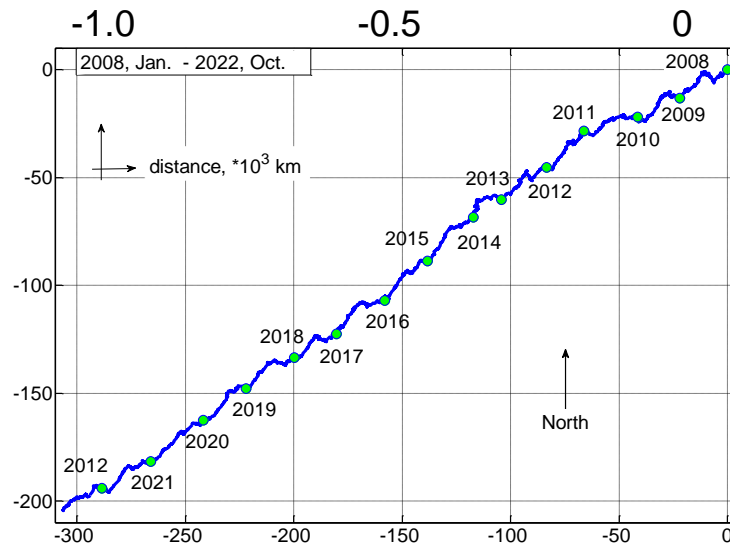
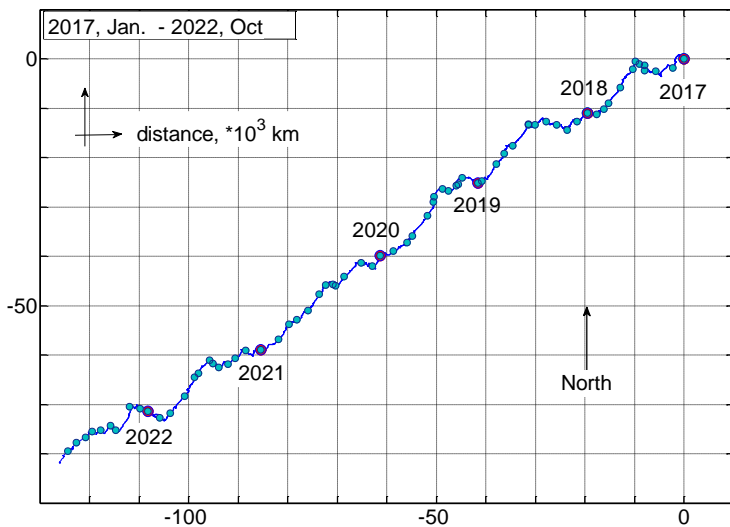
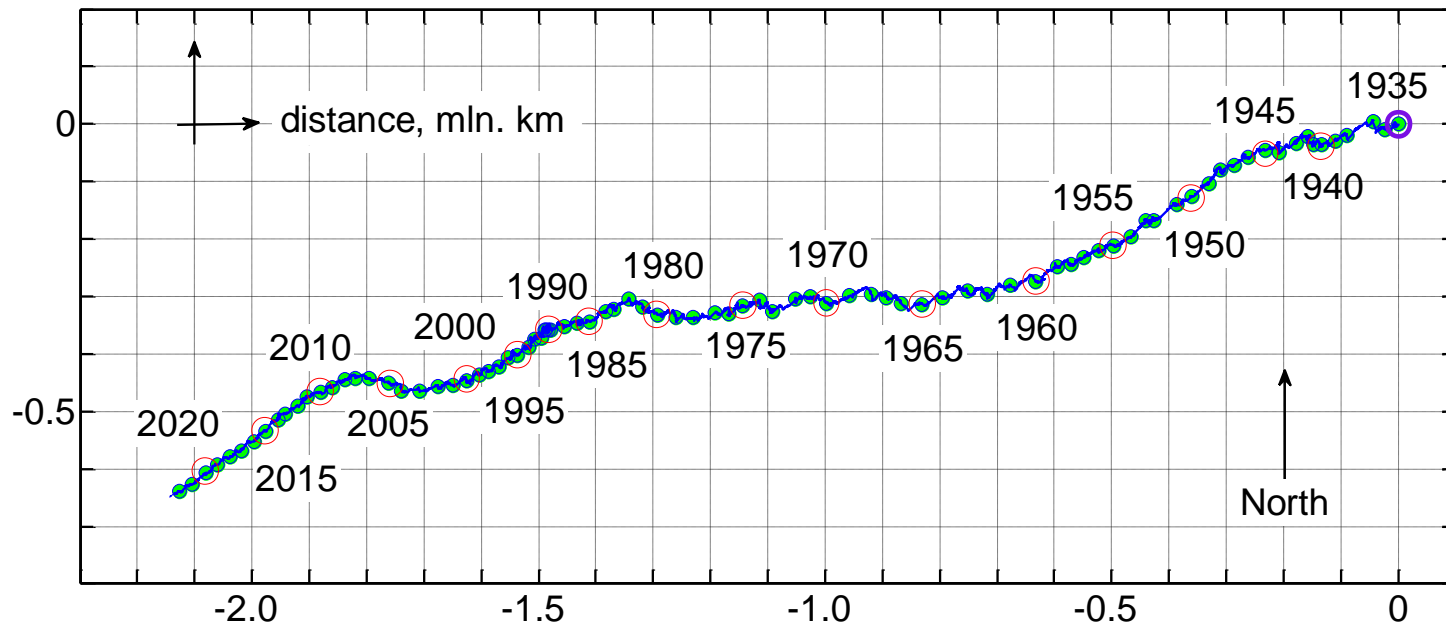
(Courtesy of M. Merrifield)

Temperature/Light

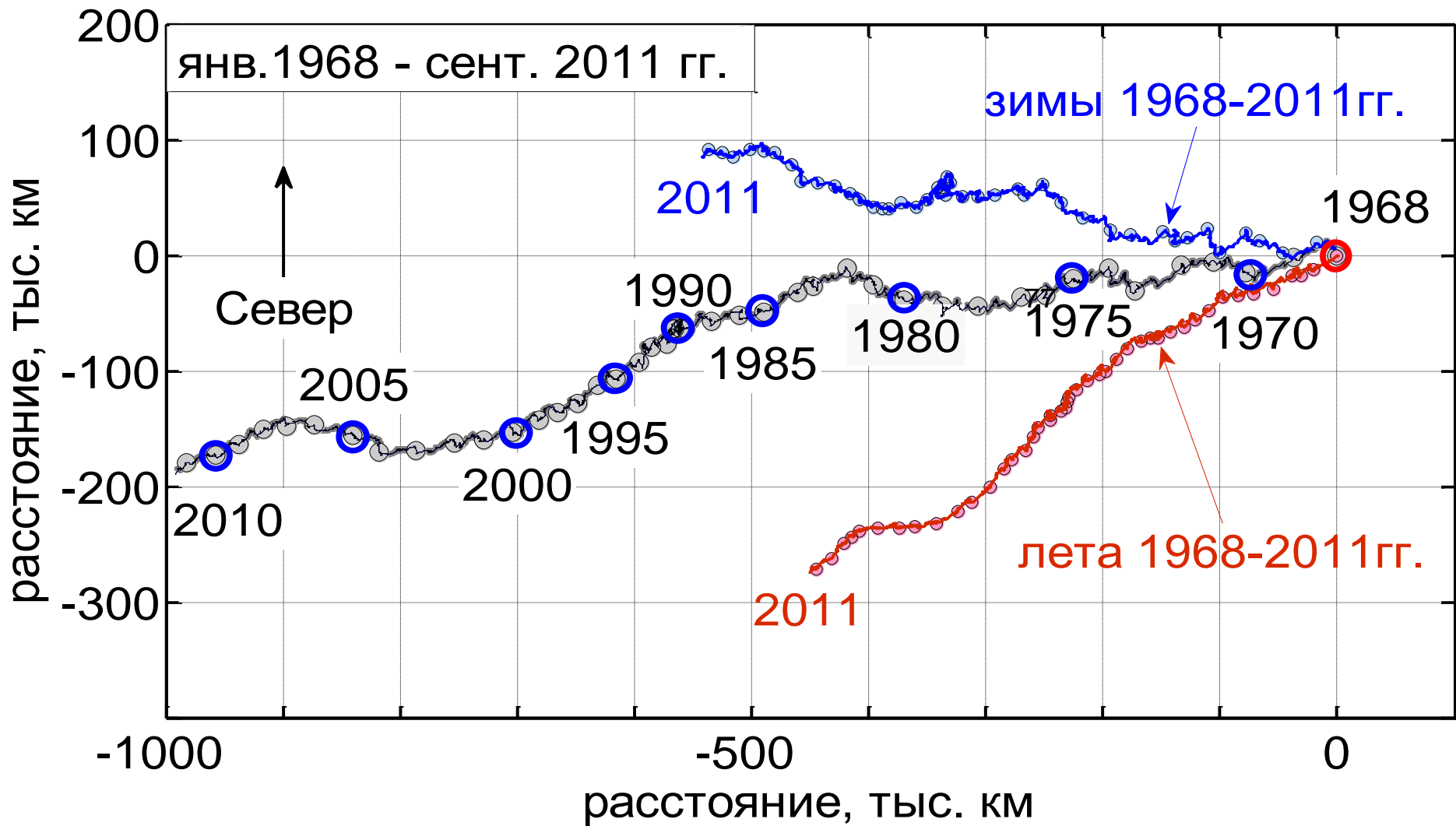


SeaHorse tilt current meter developed by Vitalii Sheremet from the University of Rhode Island. While in the water, a buoyant plastic pipe containing an accelerometer is anchored vertically to the sea floor. Sea currents cause the pipe to tilt. The angle of the tilt, measured by the accelerometer, is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

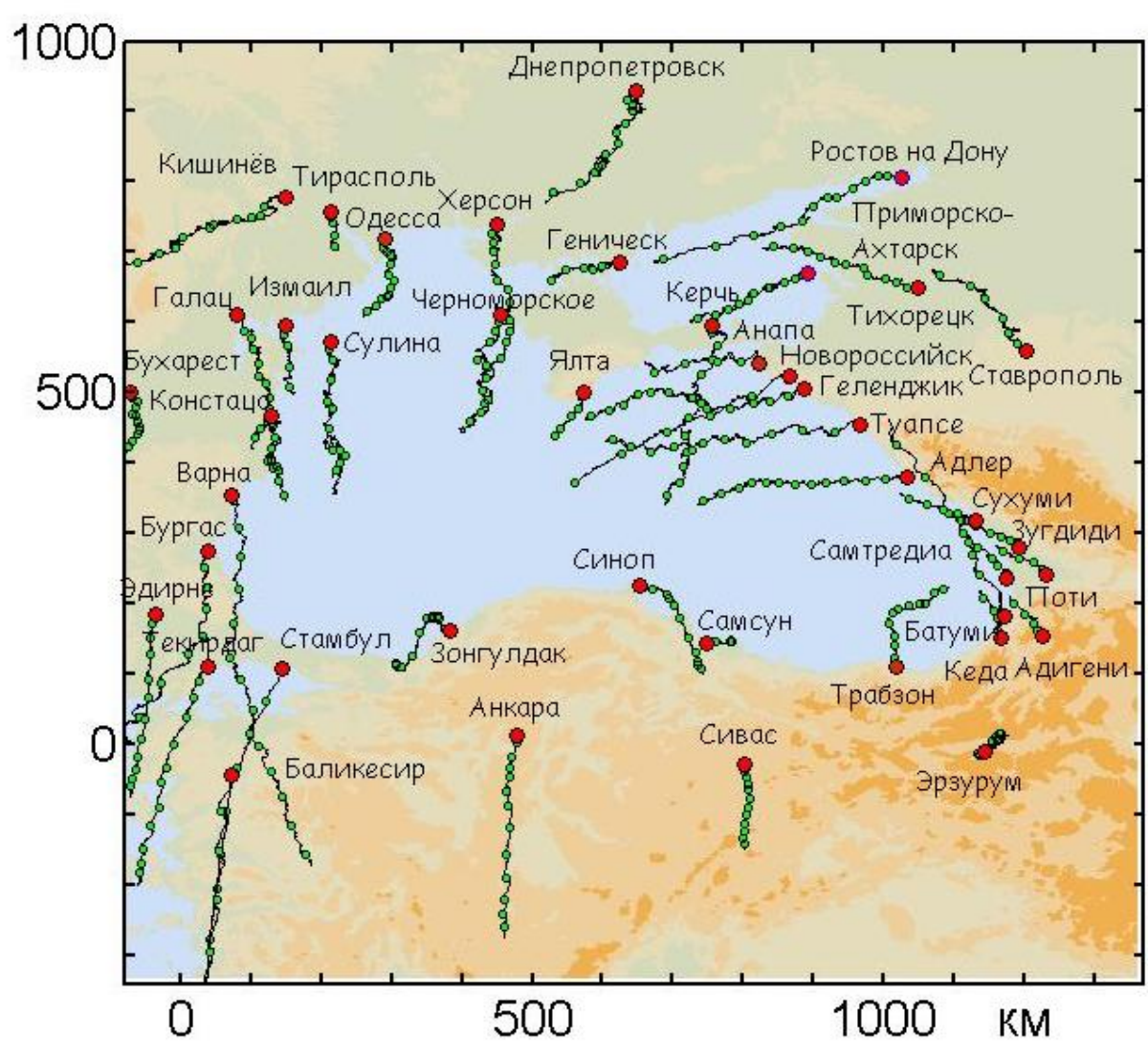
# Некоторые особенности гидрометеорологических полей в районе Гидрополигона



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.

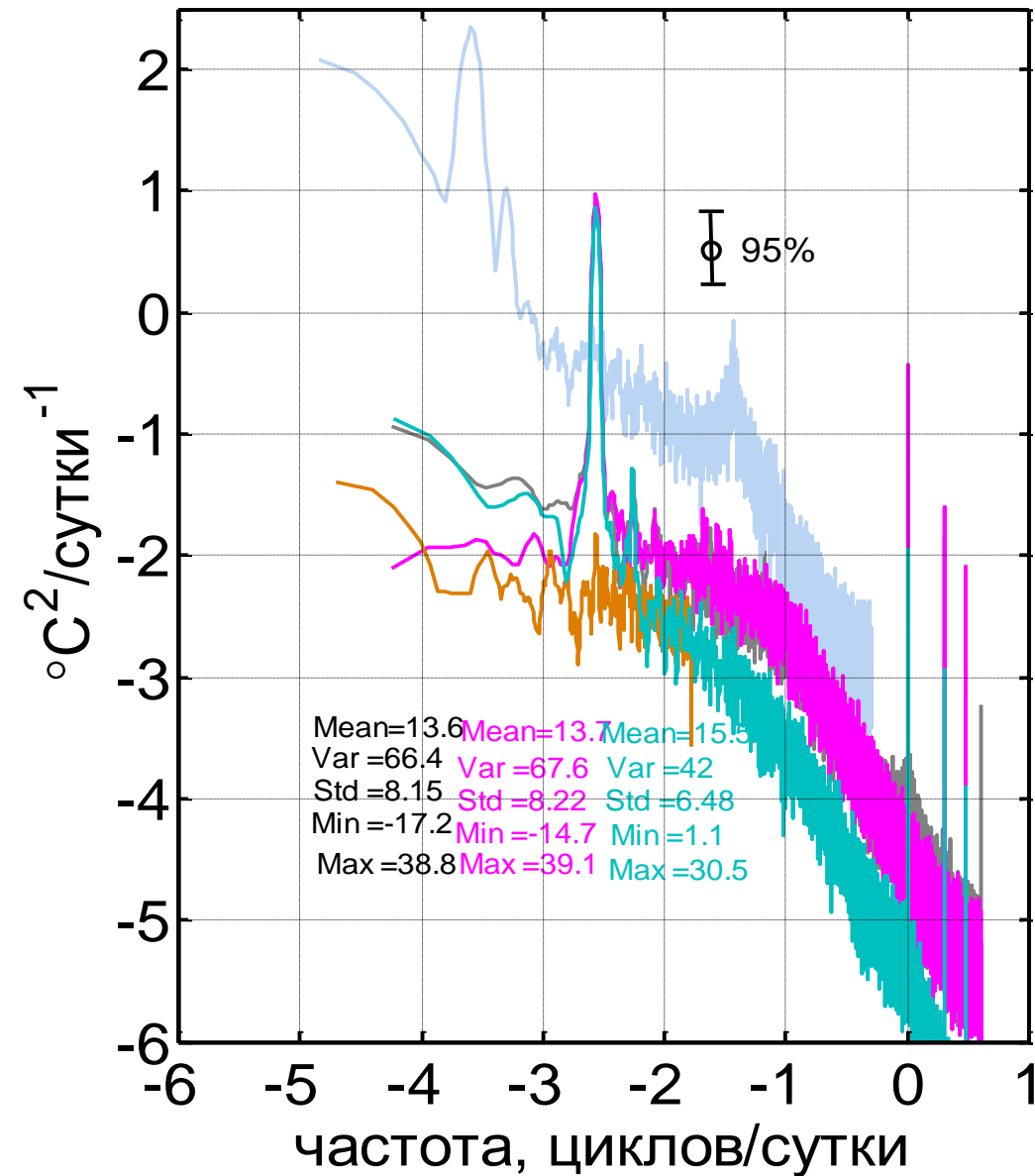


Долговременные изменения ветра на метеостанции Геленджика. Показаны прогрессивные векторные диаграммы сезонных ветров. Зимой доминирует Сибирский антициклон, а летом - Северо-Атлантическое колебание.



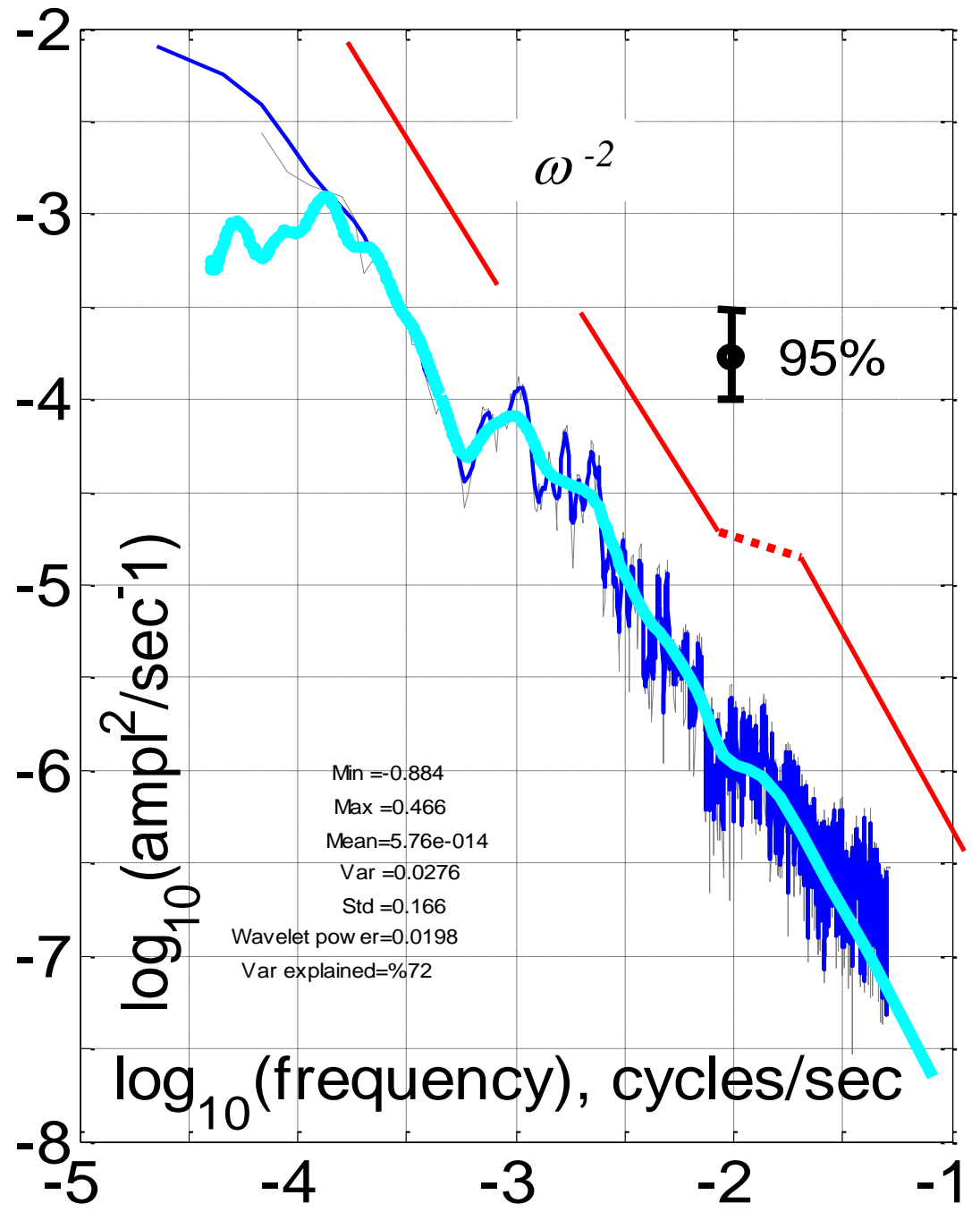
Отмечается циклоническая завихренность долговременных ветров, что может способствовать циклоническому ОЧТ.

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.



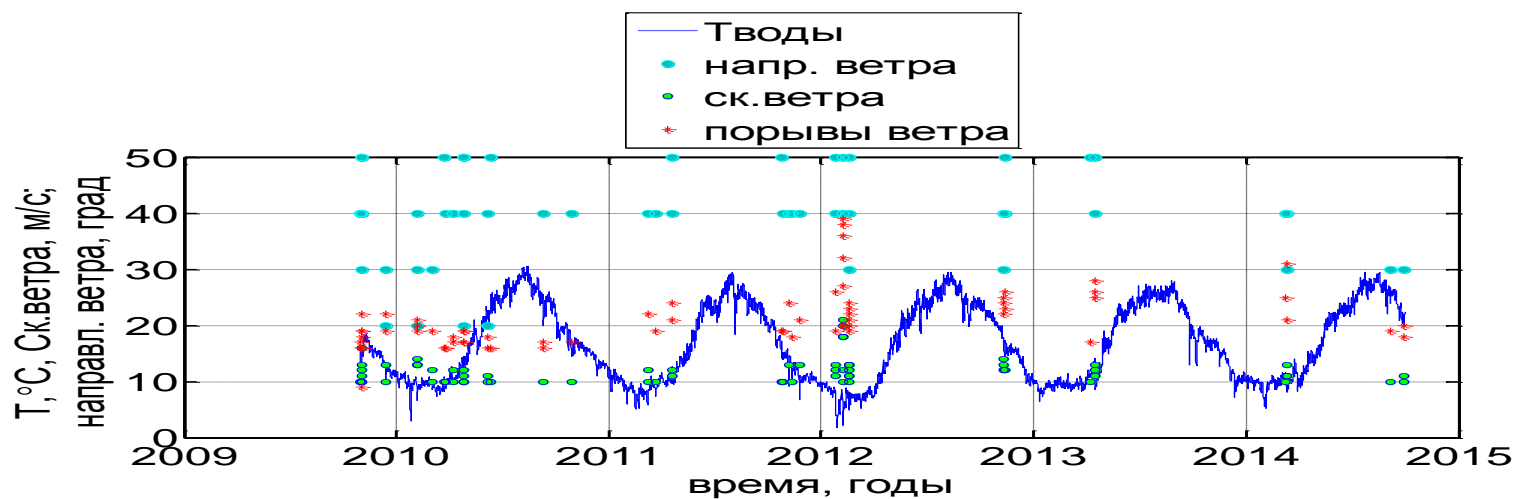
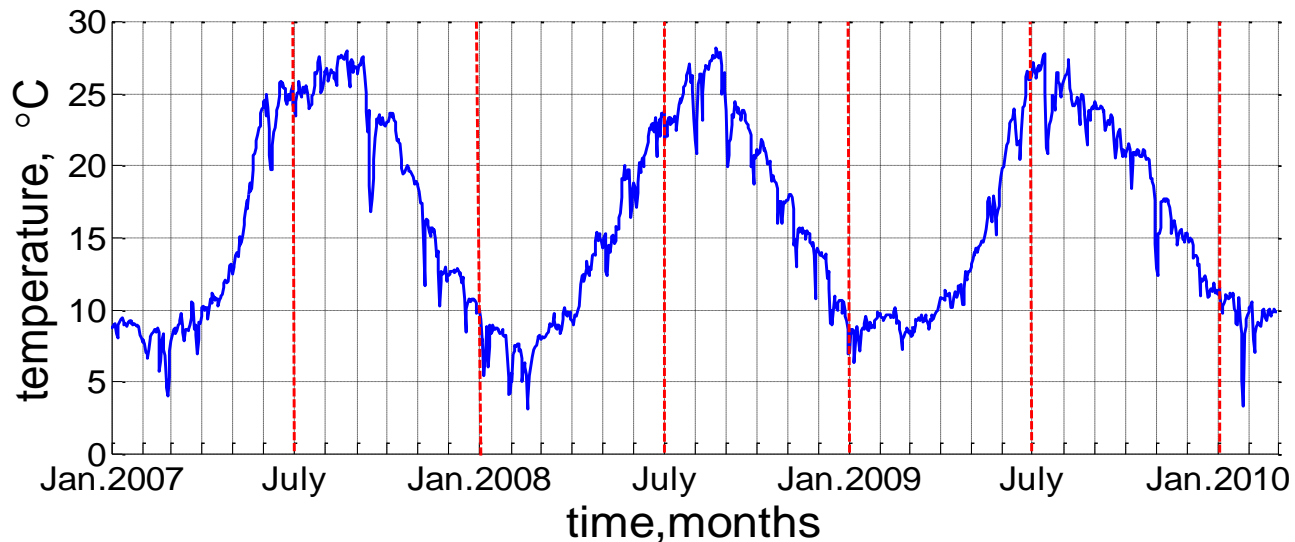
- Спектральные плотности (Фурье), нормированные на дисперсию ряда:
- 1.серый - температура воздуха на метеостанции Геленджика (по срокам).
- 2.розовый - модель временного ряда колебаний температуры воздуха.
- 3.зелёный - температура воды суточные значения на метст. Геленджика.
- 4. коричневый - индекс 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 модель спектра температуры воздуха.

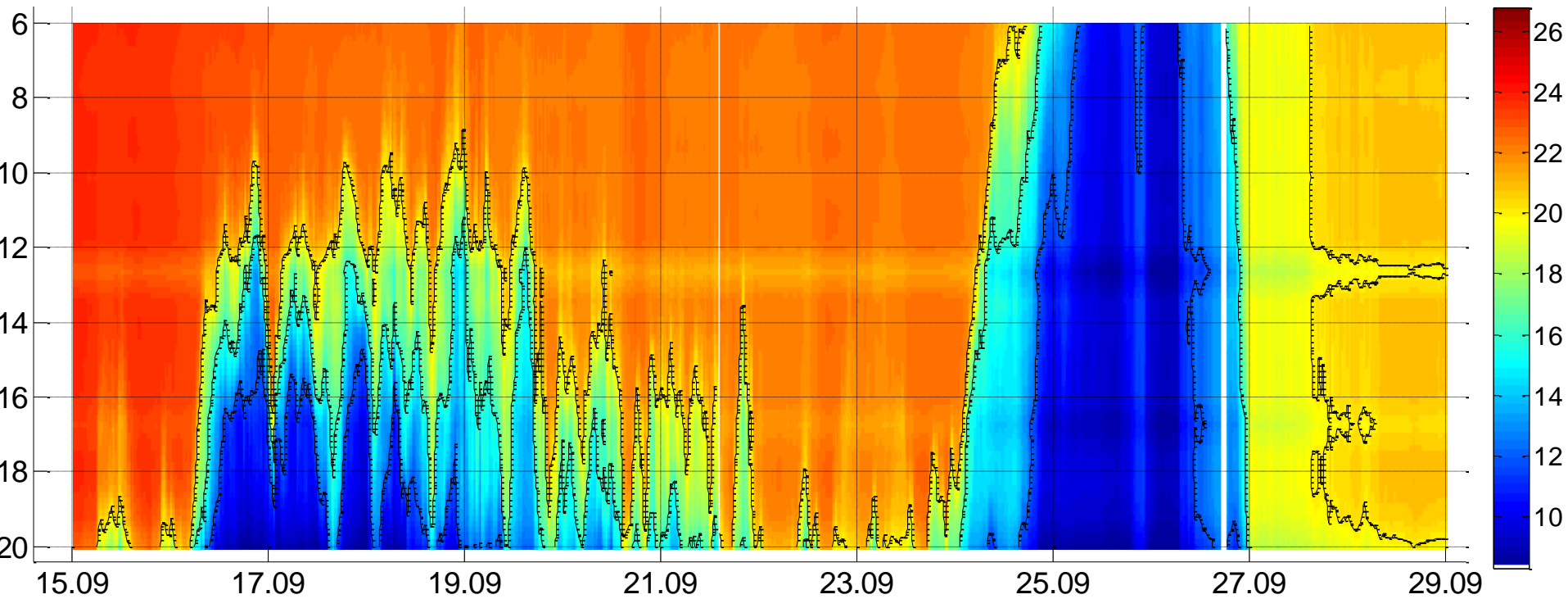


Типичная структура спектров колебаний температуры воды. Сравнение Фурье и вэйвлет-спектров.



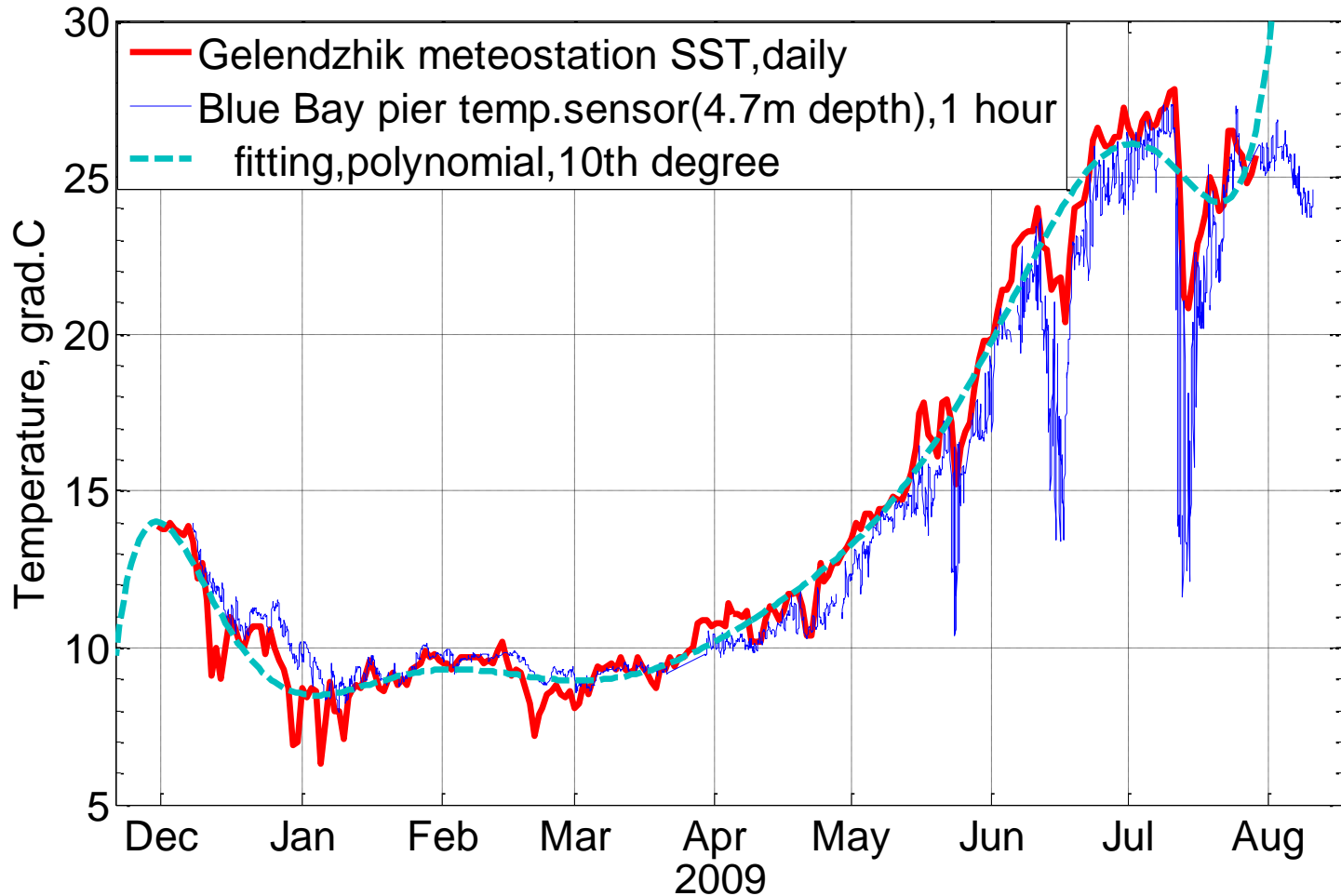


The daily water temperature at the sea surface at the meteorological station of Gelendzhik in the period 2007-2010 and relation of upwellings to the North-East wind.

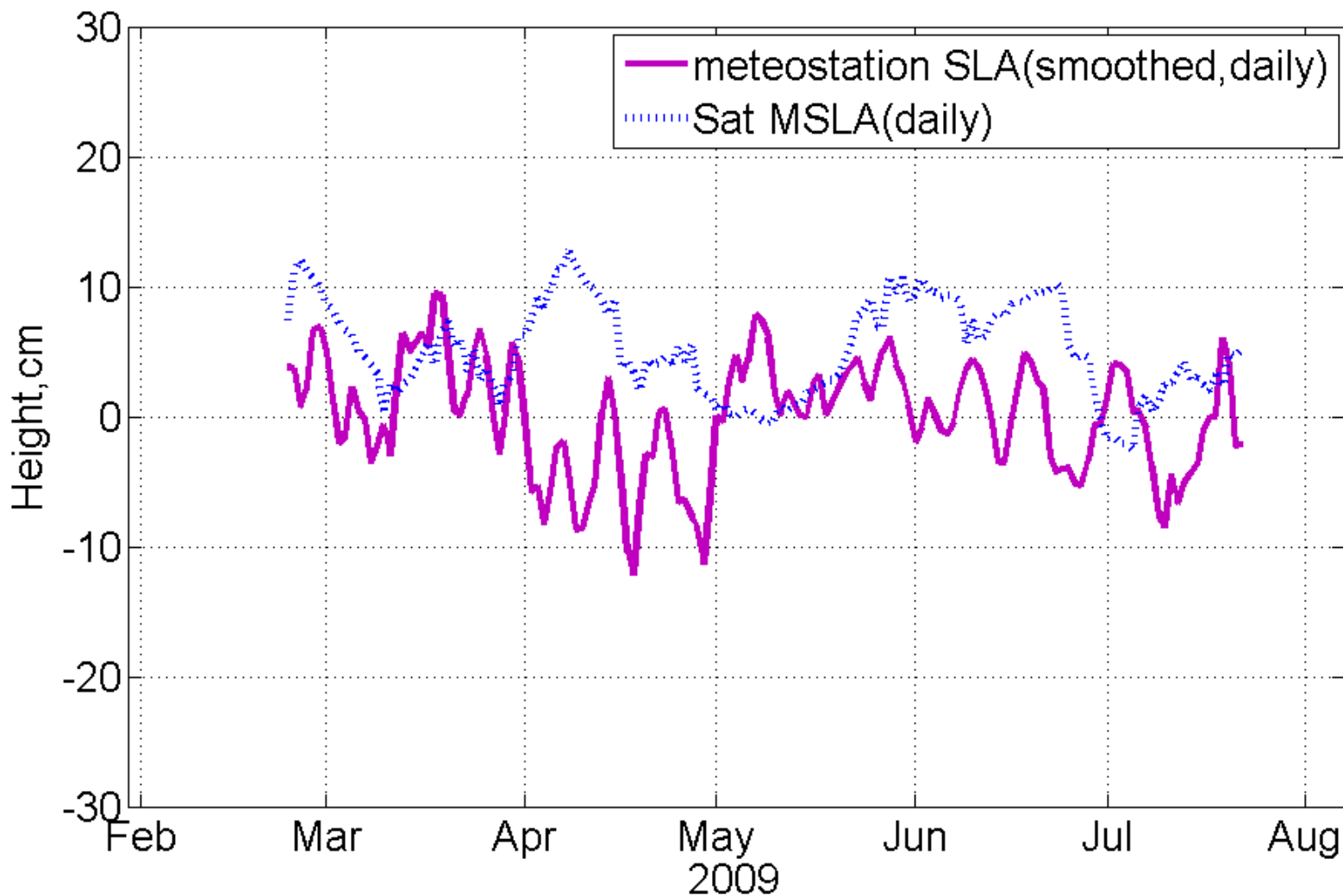


Temperature(°C) variations at coastal station abeam Blue Bay, in September, 2013. Fully developed upwelling - in the period 24-27.09.2013; earlier, in 17-21.09.2013, the train of partial upwellings was observed (after Zatsepin A.G.).

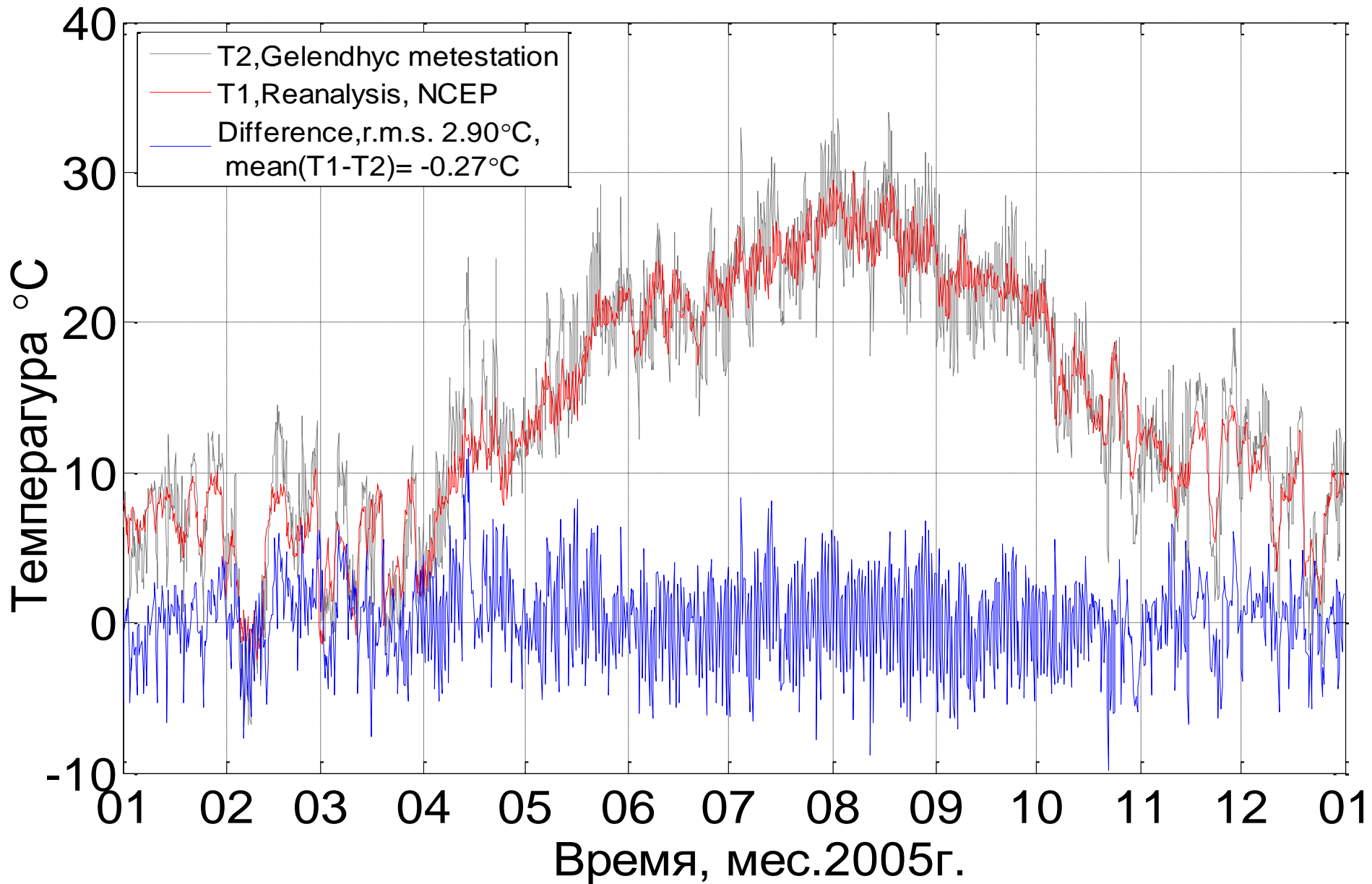
# Калибрация

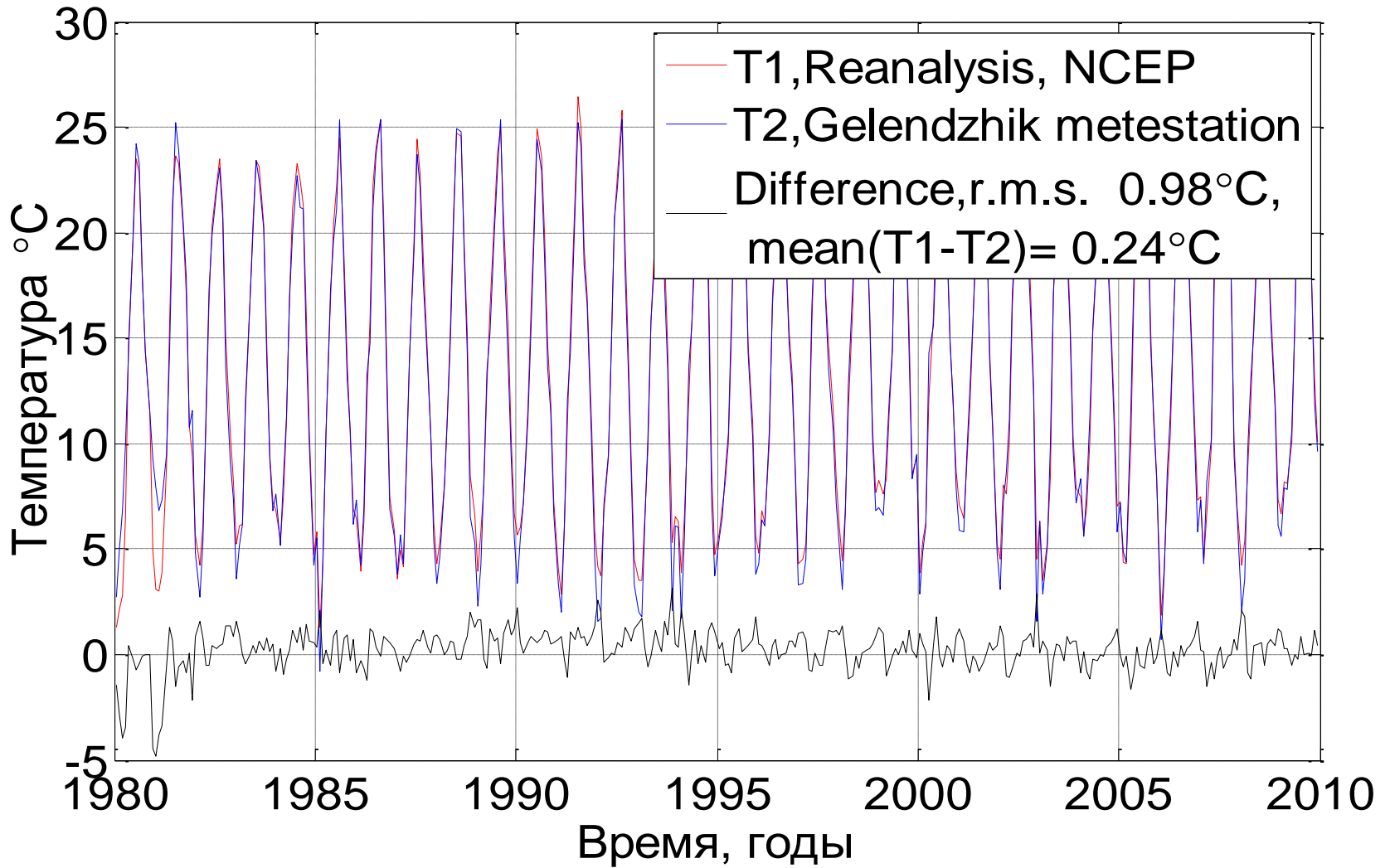


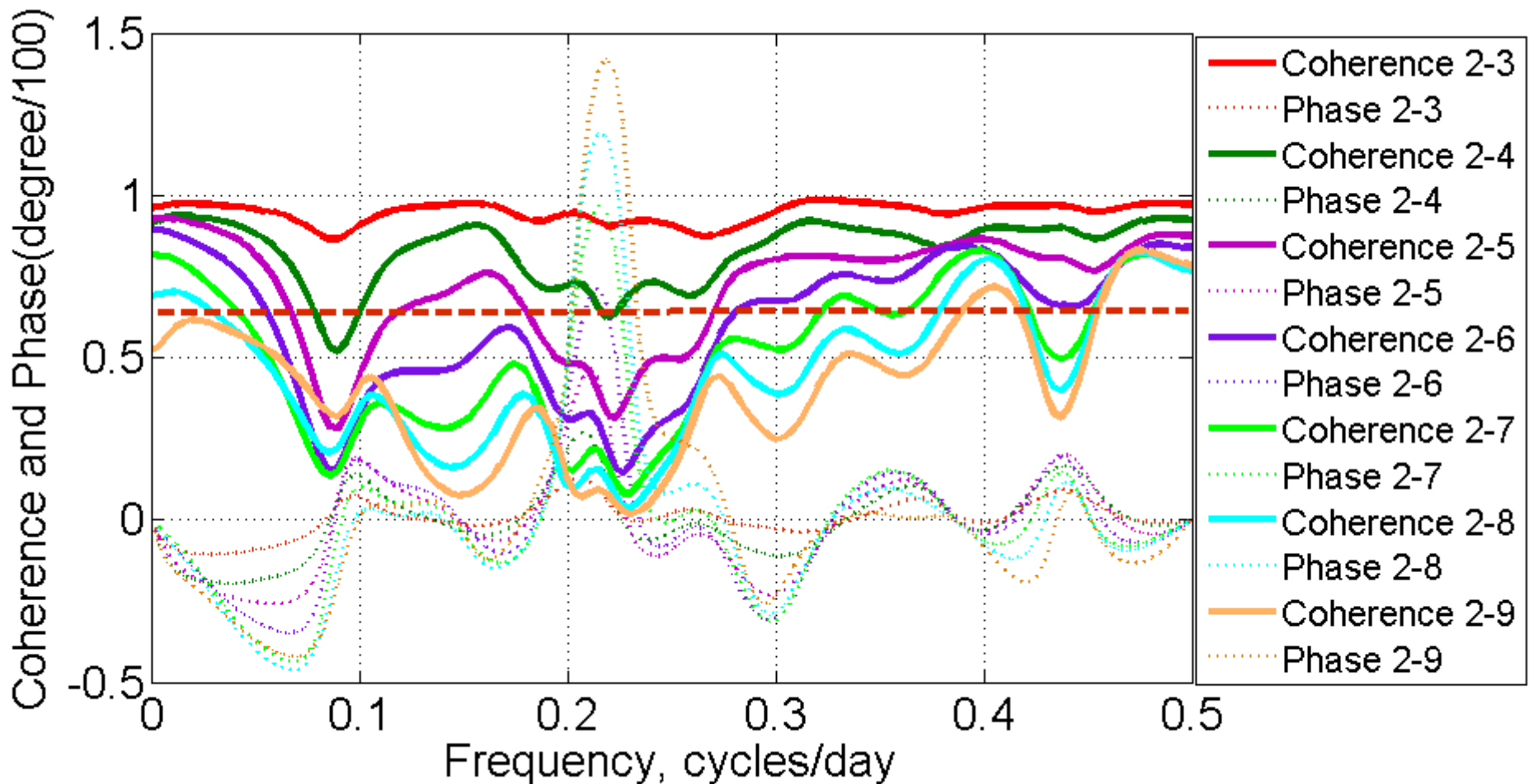
Температура воды на пирсе ИО РАН(44.58°N,37.98°E, Голубая бухта, г.Геленджик), датчик на глубине 4.7м - синяя линия , и температура поверхности моря на Геленджикской метеостанции (44.55°N, 38.05°E) - красная линия.



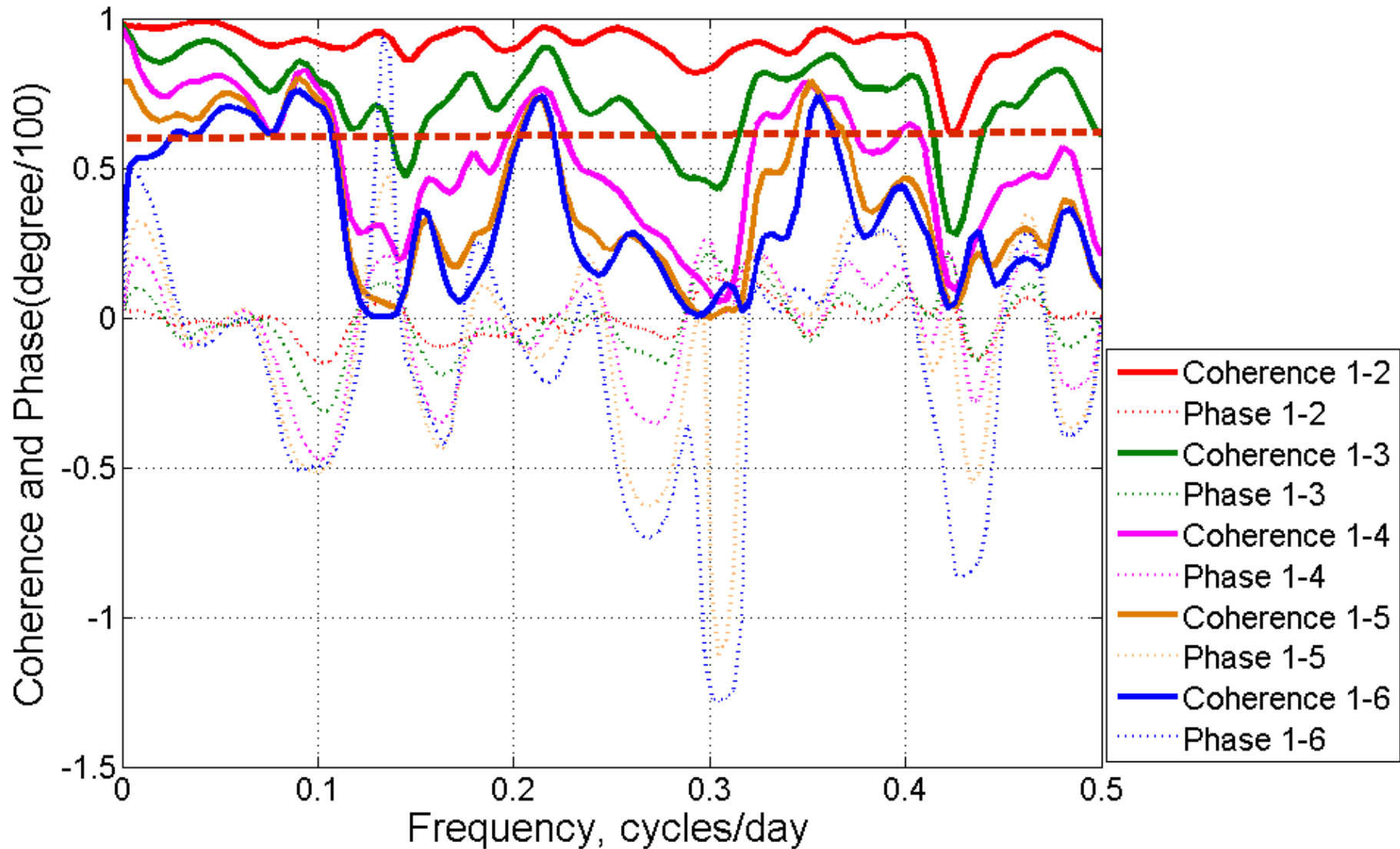
Изменения уровня моря на метеостанции ( $44.55^{\circ}\text{N}, 38.05^{\circ}\text{E}$ , г. Геленджик) - фиолетовая линия, и спутниковые аномалии уровня моря в точке с координатами  $44.5\text{N}, 38.0\text{E}$ , на расстоянии 3.7 морских миль от метеостанции - голубые точки.





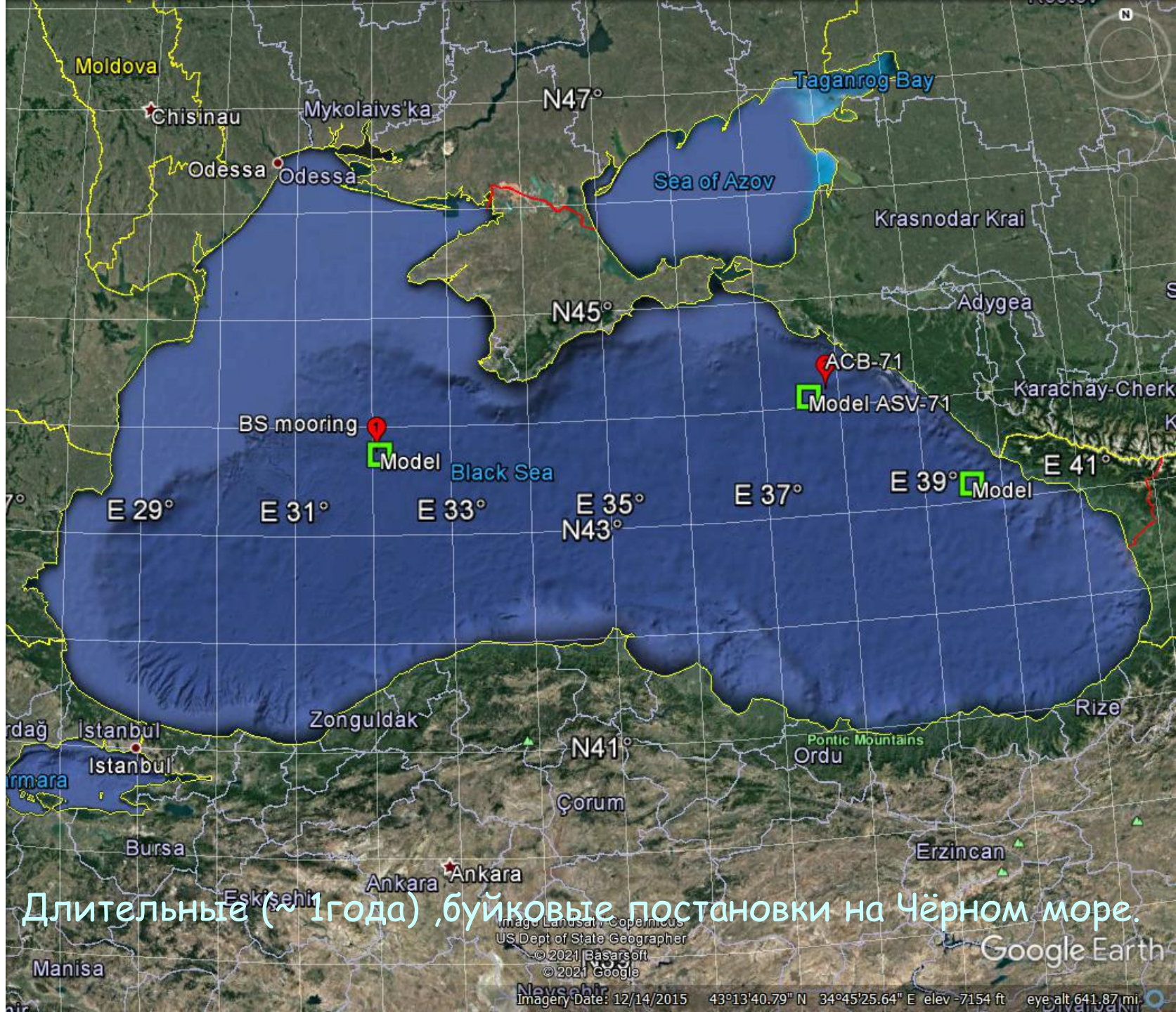


Когерентности и фазы между рядом АУМ в точке № 2 и рядами АУМ в точках №3,4,5,6,7,8,9. В Таблице 2 указаны координаты точек. Красная пунктирная линия отмечает 95% уровень нулевой когерентности.



Когерентности и фазы между рядом ТПО в точке №1 и рядами ТПО в точках №2, 3,4,5,6. В Таблице 3 указаны координаты точек. Красная пунктирная линия отмечает 95% уровень нулевой когерентности.



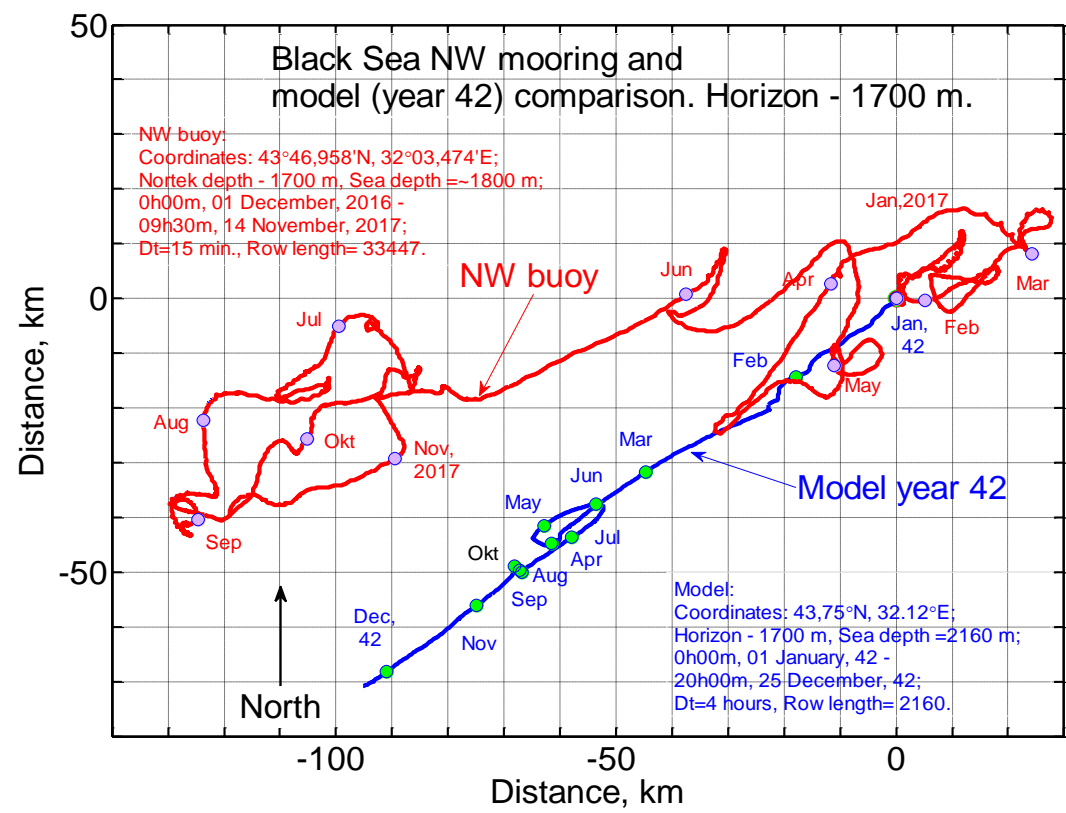
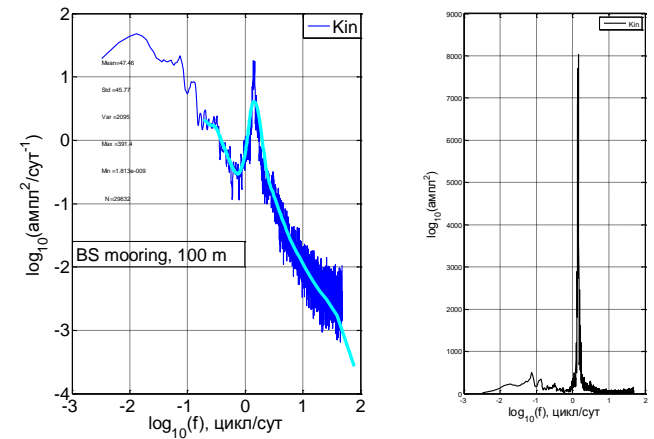
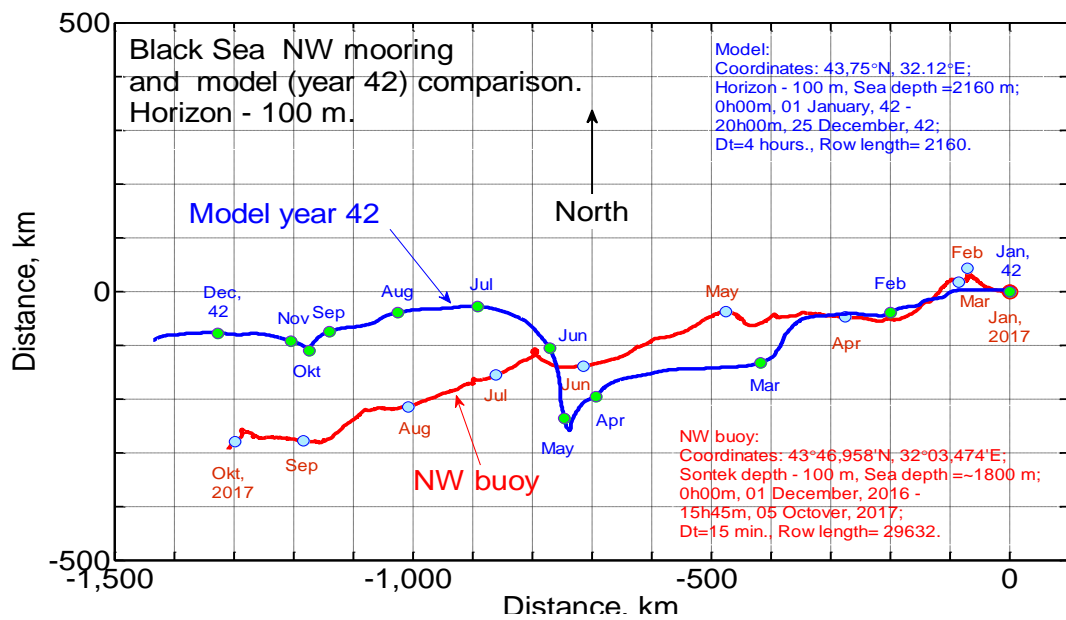


Длительные (~1года) буйковые постановки на Чёрном море.

Image Landsat Copernicus  
US Dept of State Geographer  
© 2021 Esri  
© 2021 Google

Google Earth

Imagery Date: 12/14/2015 43°13'40.79" N 34°45'25.64" E elev -7154 ft eye alt 641.87 mi



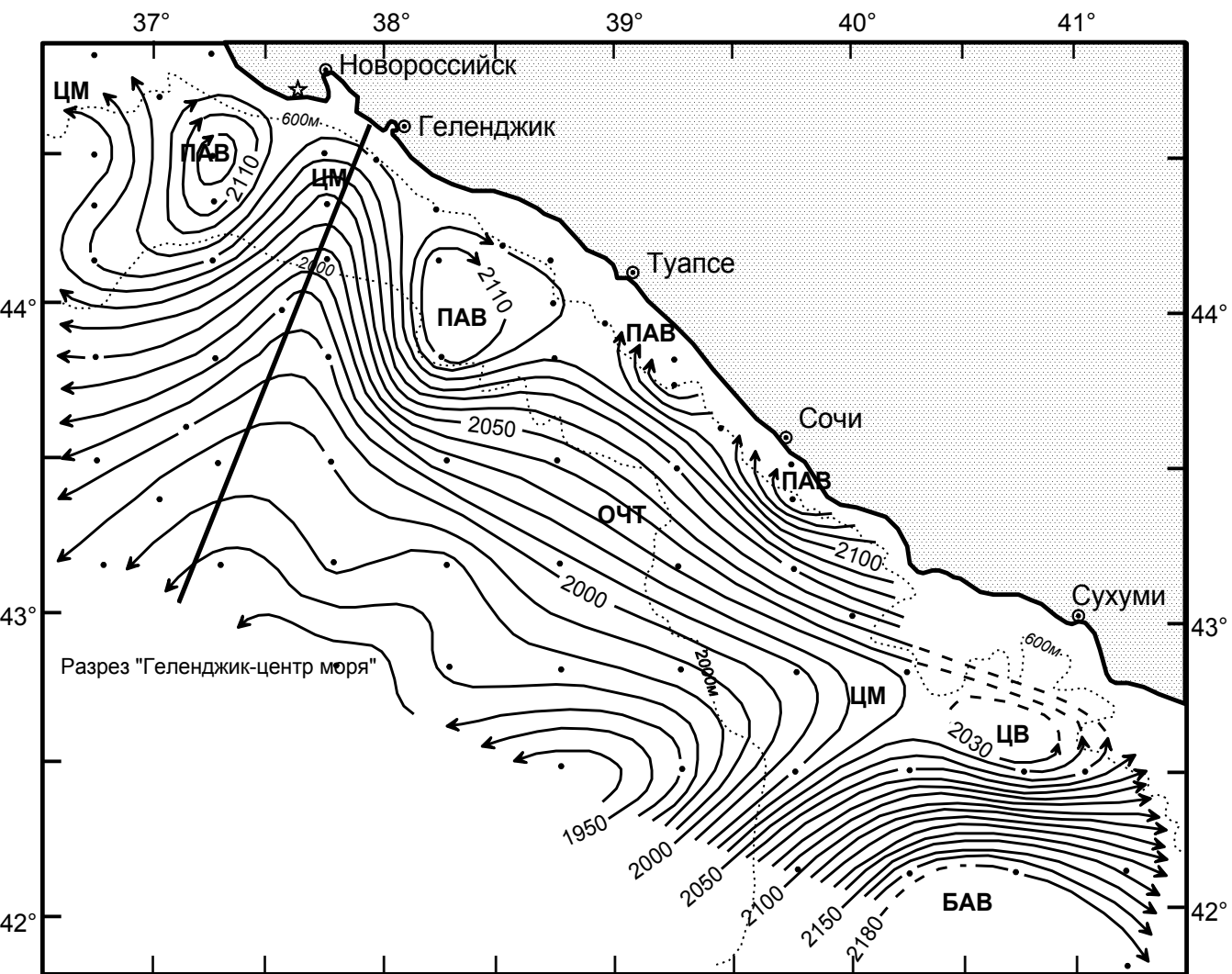
Прогрессивные векторные диаграммы течений на горизонтах 100 м и 1700 м. Сравнение расчётов по модели DieCAST и почти однолетних данных измерений скорости течений и температуры на притопленном буе в Северо-западной части Чёрного моря, при глубине моря ~1800 м.

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.

# Районы интенсивной генерации топографических мезомасштабных вихрей



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

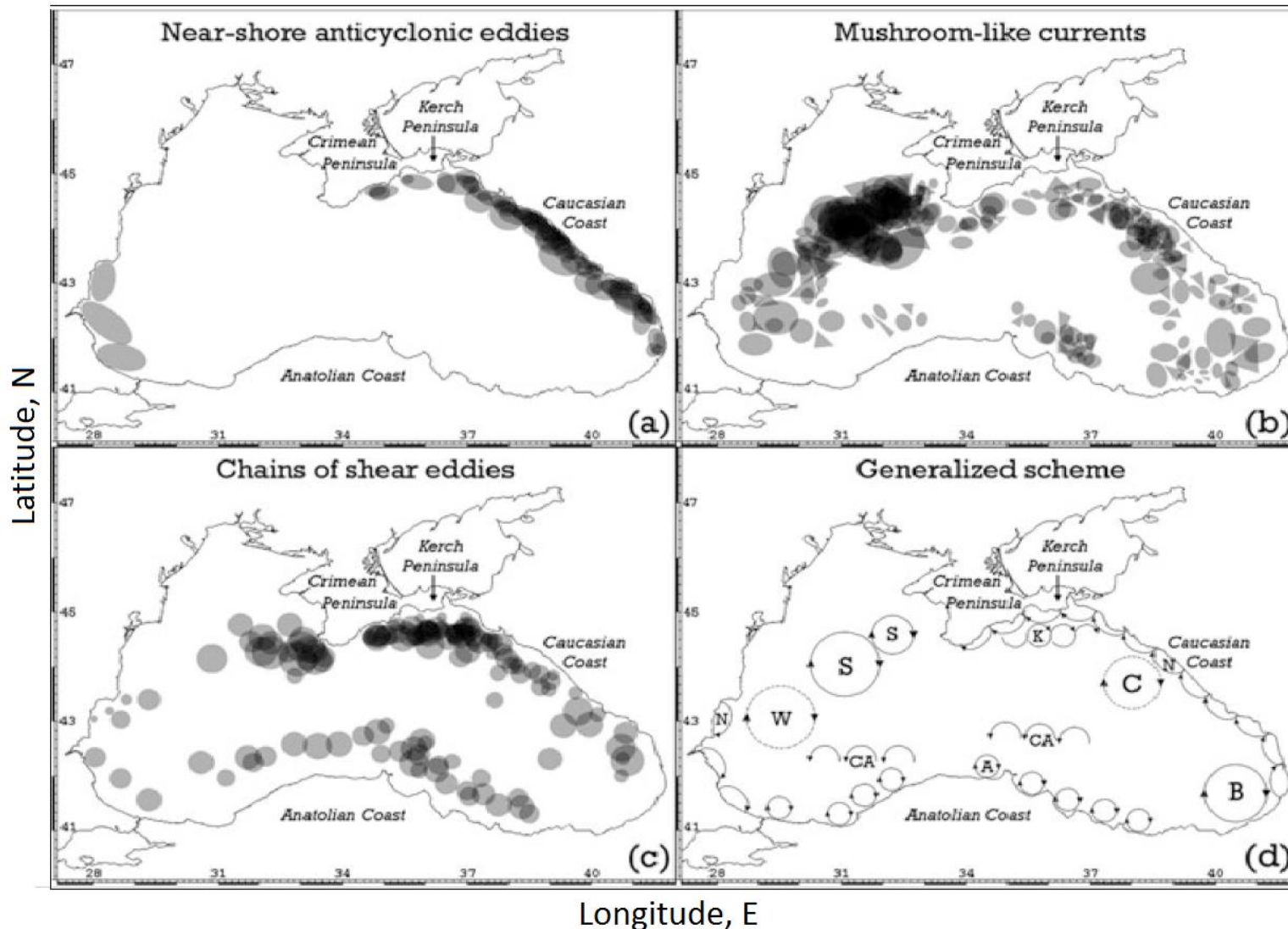


УДК 551.465.062.5  
 Изменчивость  
 структуры и  
 циркуляции вод  
 по данным  
 многолетнего  
 мониторинга на  
 стандартном  
 100-мильном  
 разрезе  
 «Геленджик -  
 центр моря»  
*Кривошея В.Г.,  
 Якубенко В.Г.,  
 Москаленко Л.В.,  
 Кузеванова Н.И.*

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.

# Сводная схема мезомасштабных структур в Черном море по данным спутниковых наблюдений



Quasi-Permanent Structures

W - western meander

S - Sevastopol ACE

K - Kerch ACE

C - Caucasus ACE

N - near-shore ACEs

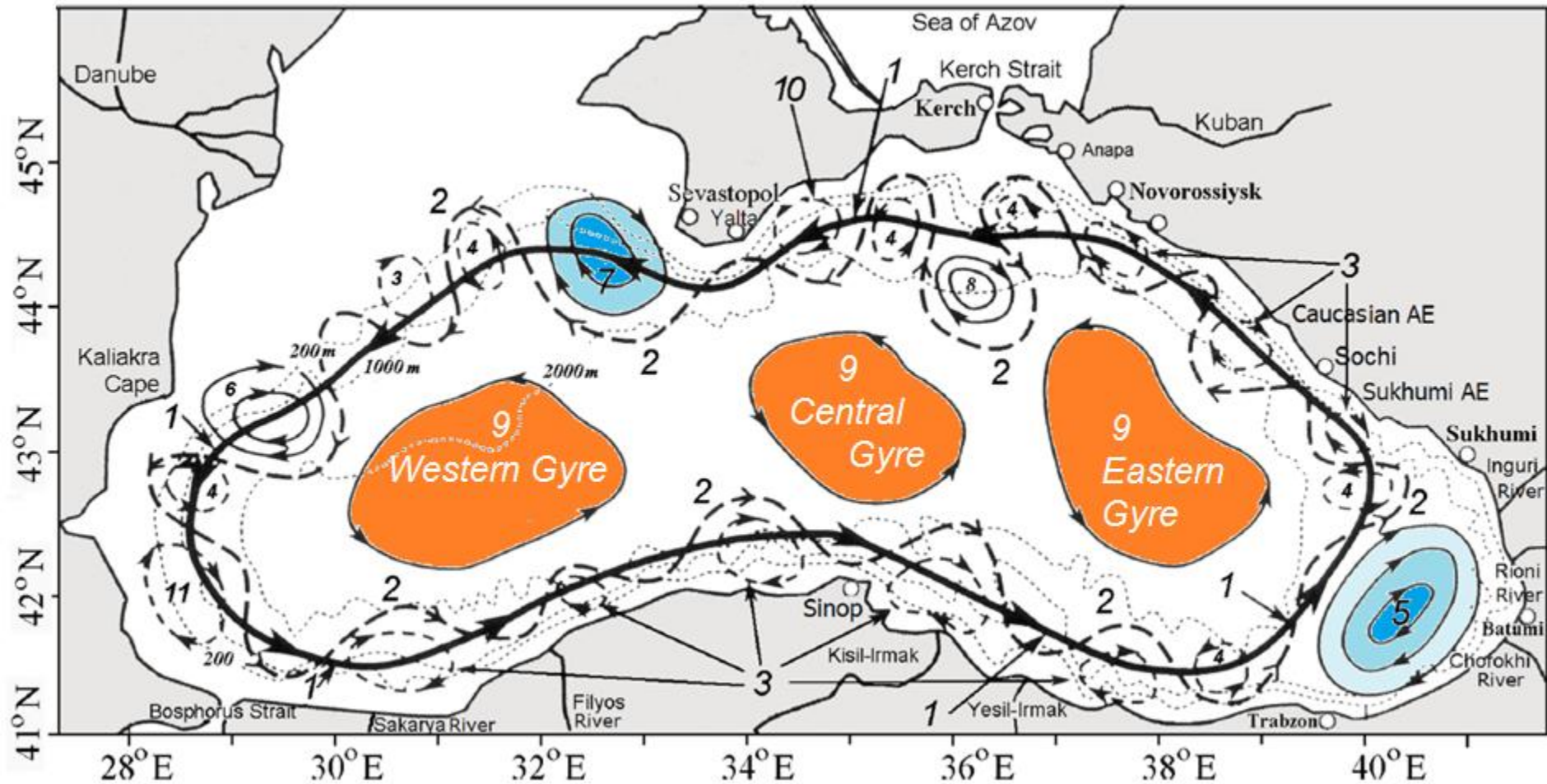
CA - cyclonic Anatolian Eddies

A - Anatolian ACEs

S. Karimova in:

Remote Sensing of the Changing Oceans | SpringerLink, 2011

# ОЧТ и мезомасштабные структуры ЧМ



Обобщенная схема по многолетним данным измерений.

Palazov A., et al., Black Sea Observing System // Front. Mar. Sci. 6:315. 2019.

# 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.
- В настоящей работе 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 4<sup>th</sup> 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)<sup>o</sup> Steps: Dlon=426; DLat=238;

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

30 unevenly spaced z-levels; 31 Rivers;

Open Boundaries at Bosphorus and Azov Straits;

2-min for the Black Sea applied:

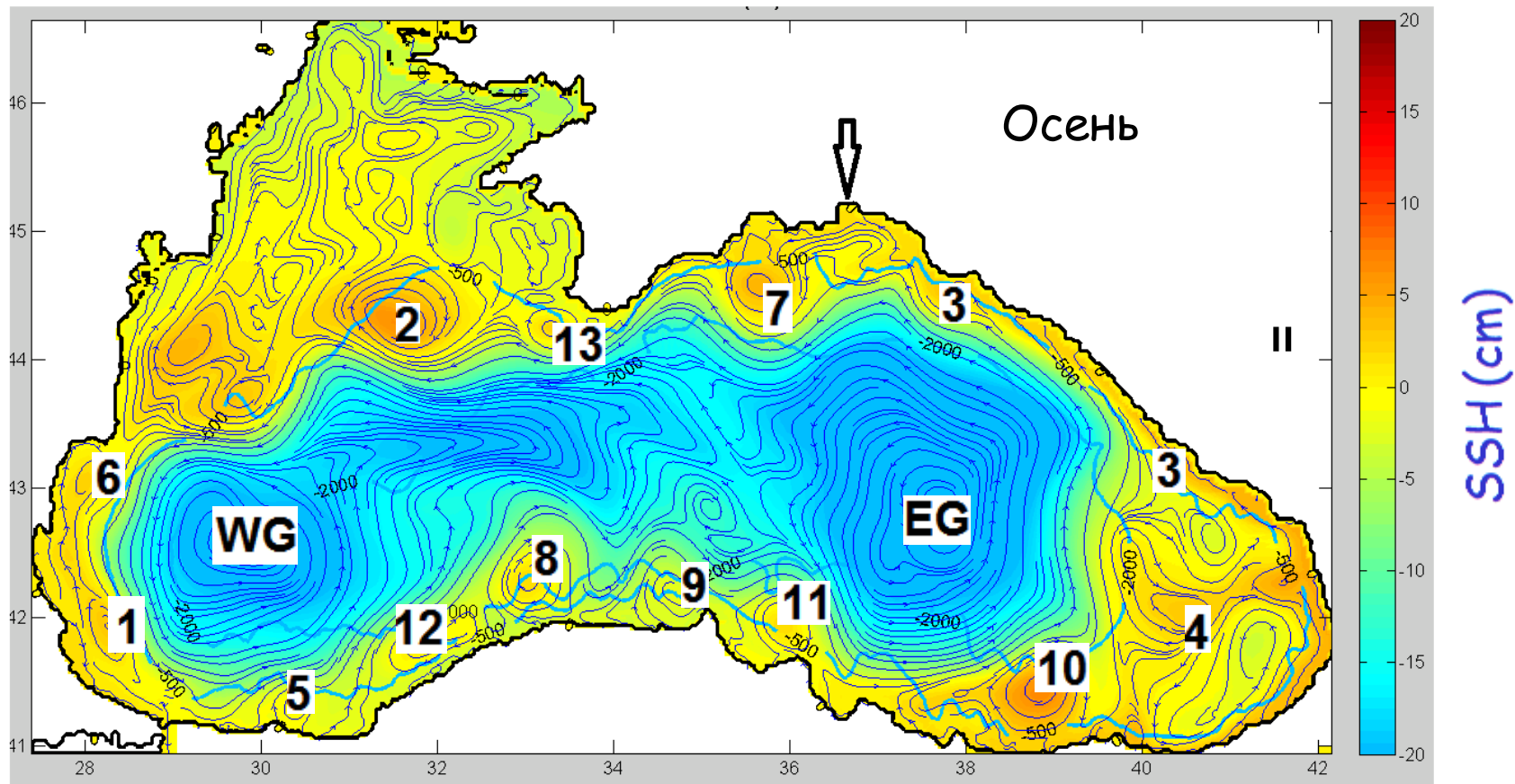
Korotenko, Bowman, Dietrich, (2010)

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;



# 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

# 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,  $\omega$  - относительная завихренность потока.

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

$Q^2$  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 объему 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  $Q^2 \geq 0$

**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  $r: \{x, y, z\}$ , 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  $f_m = 2\pi m/(N\delta t)$ ,  $\delta t$  - 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  $\psi_0(\eta)$ :

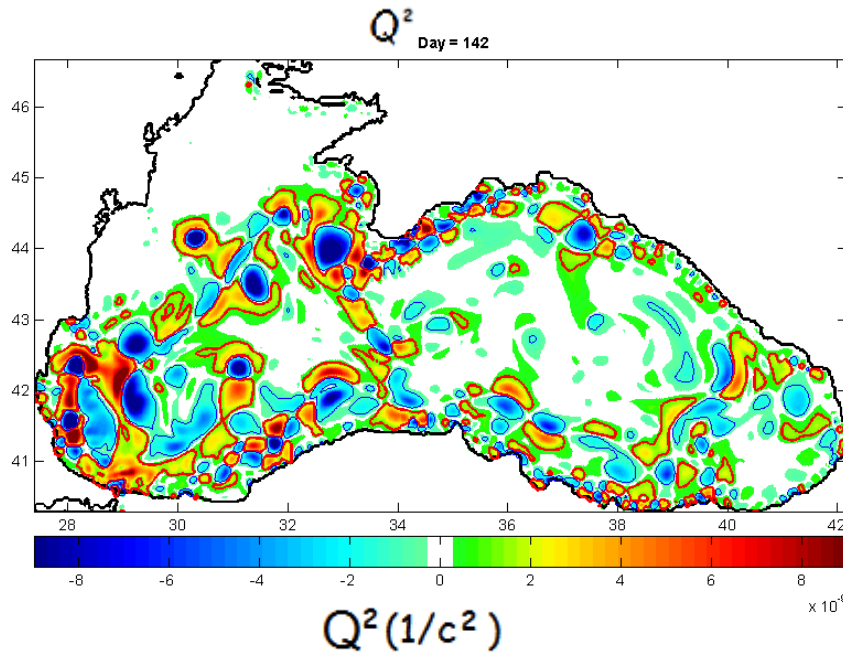
$$W_n(s) = \sum_n^{N-1} X_{n'} \psi^* \left( \frac{(n' - n)\delta t}{s} \right) ,$$

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.

# Пространственно-временное распределение параметра Окубо-Вейсса в Черном море

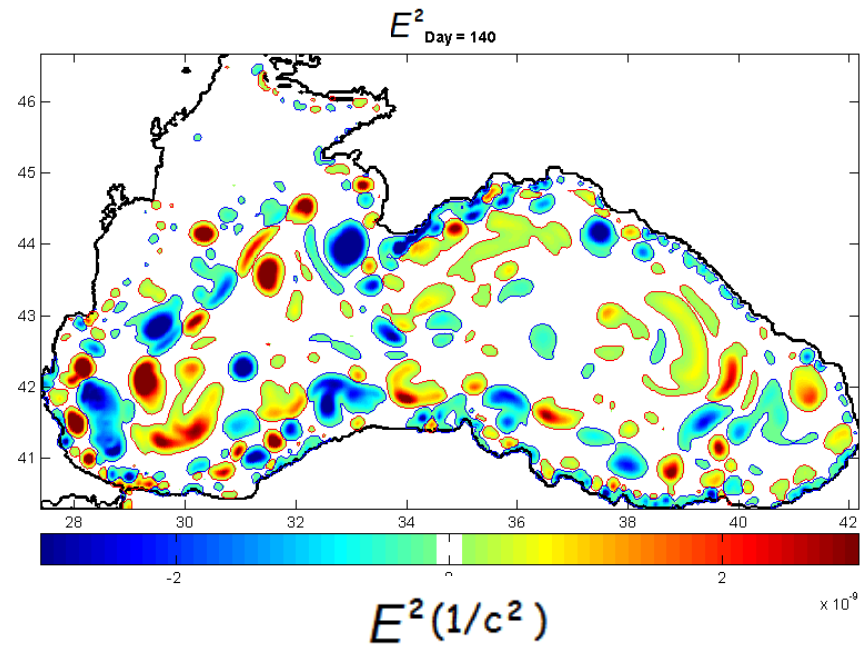
Классический Метод Окубо-Вейса



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

**Красный цвет** - области, где преобладает деформация скорости

Модифицированный метод Окубо-Вейса

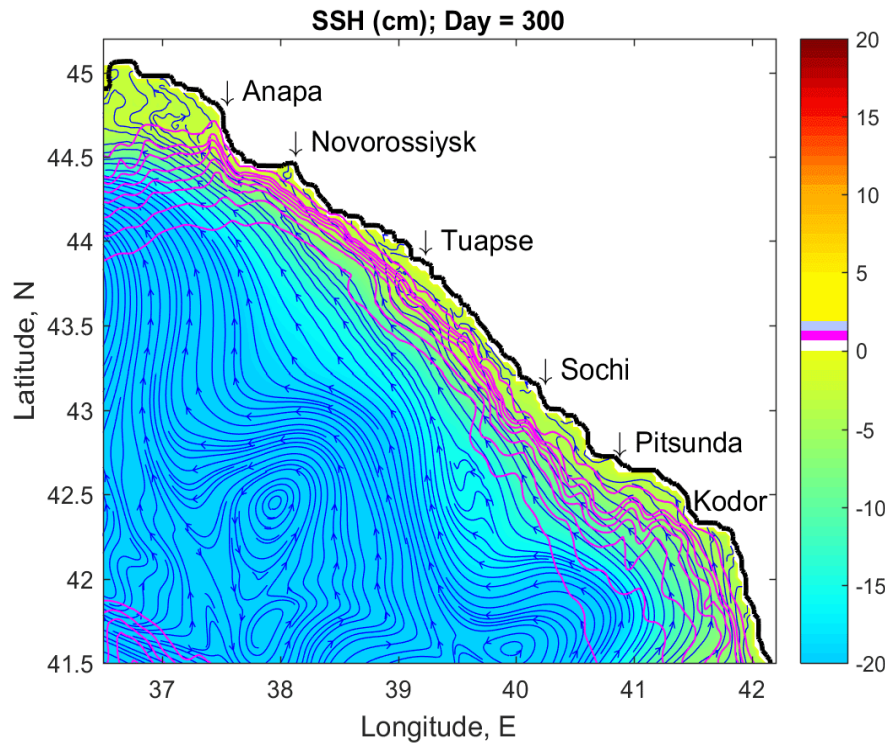


**Синий цвет** - ядра антициклонических вихрей

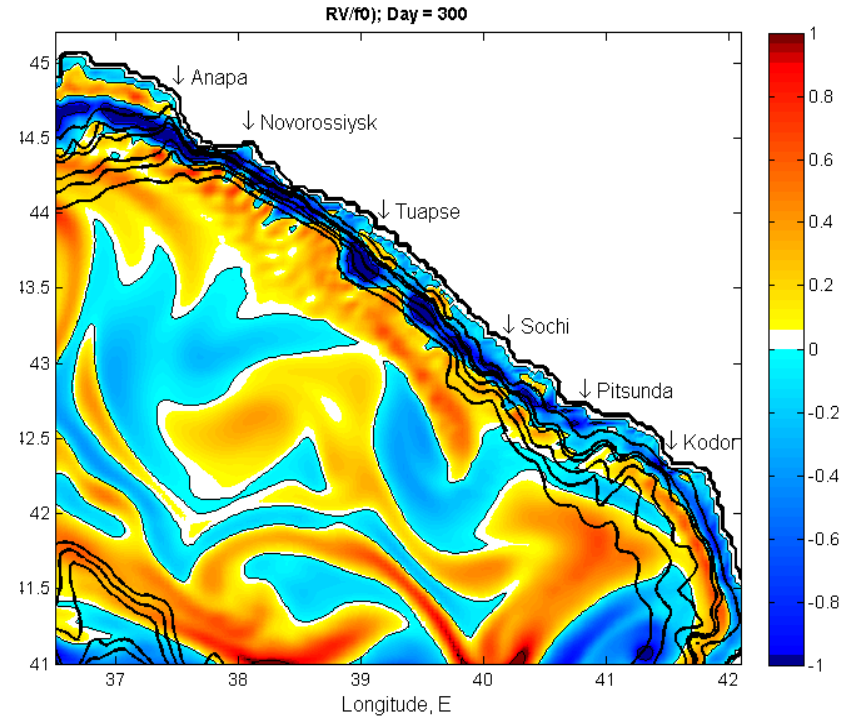
**Красный цвет** - ядра циклонических вихрей

# Генерация и эволюция Кавказского антициклонического вихря (КАВ).

## Поверхность моря



Аномалия уровня (см)

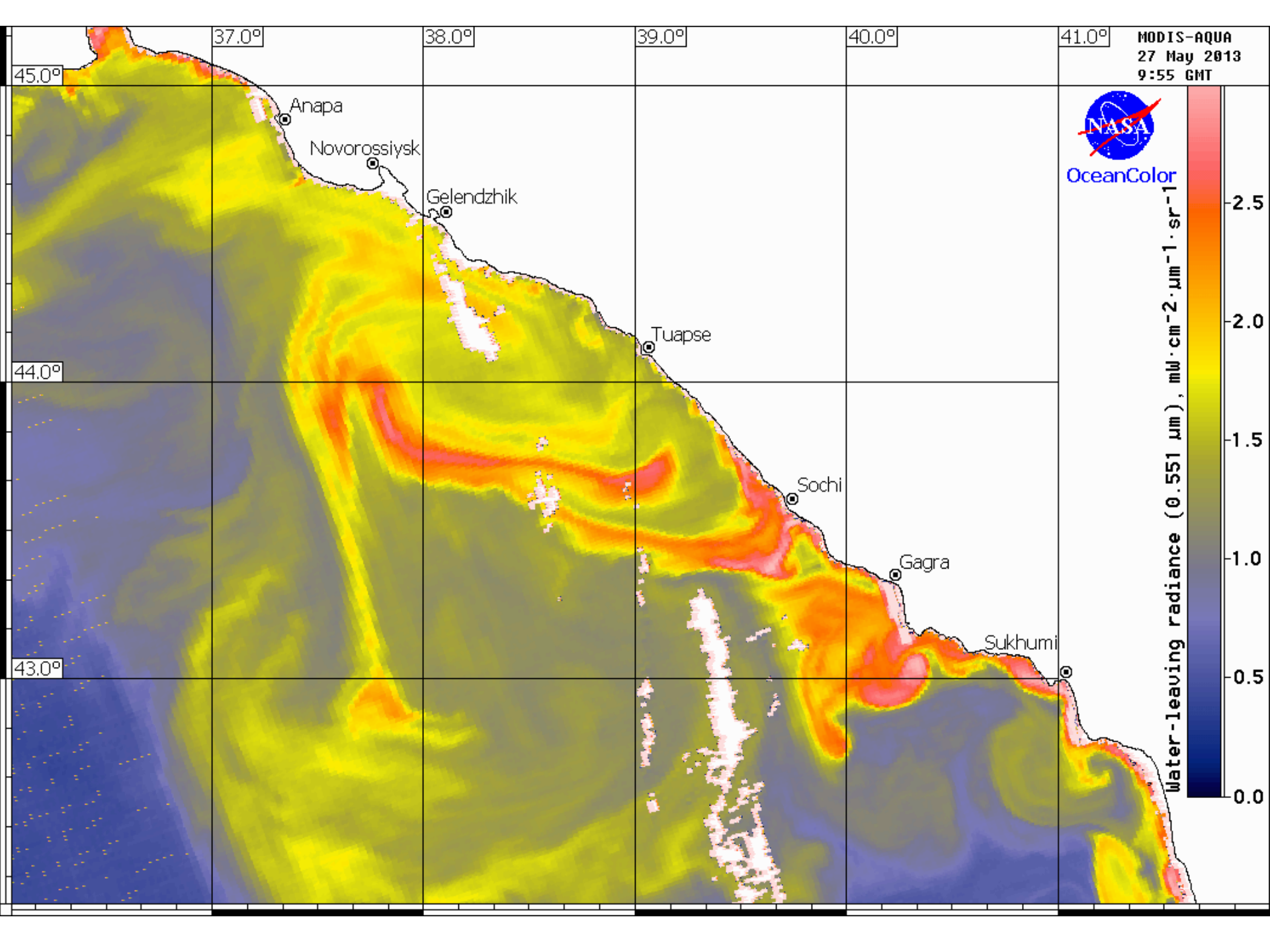


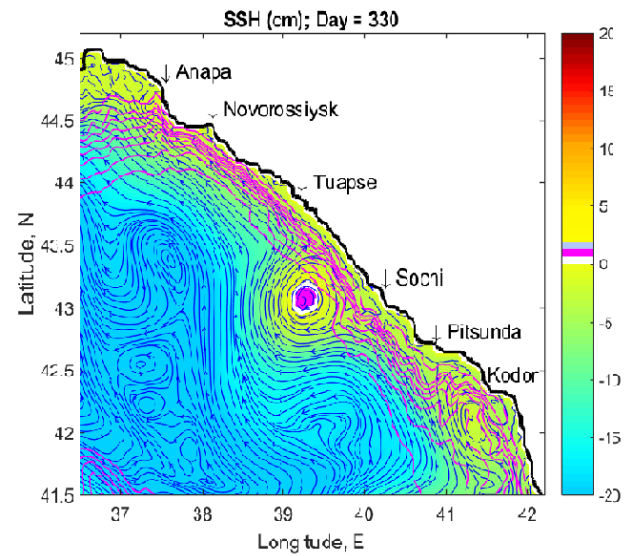
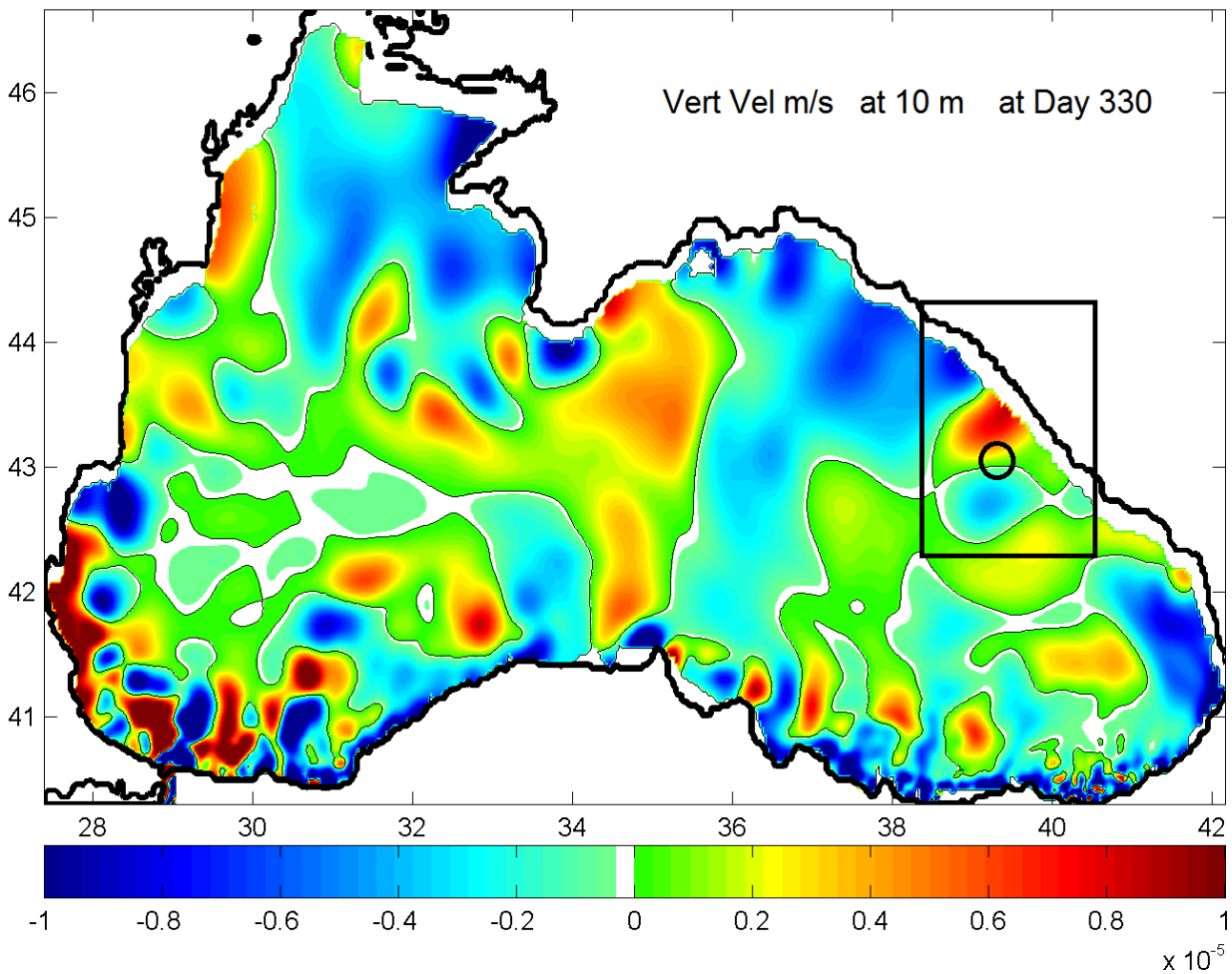
Относительная завихренность ( $\omega/f$ )

### 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.

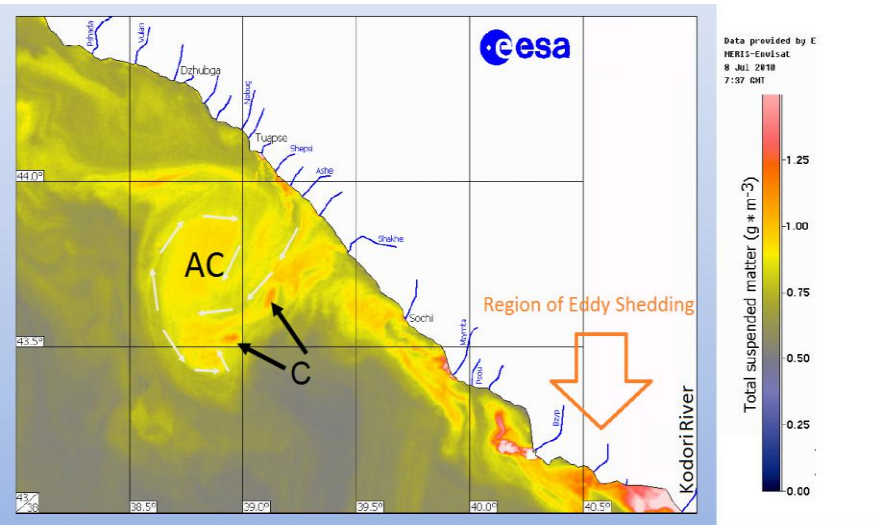
Скорость переноса вихря 360км/40 дней ~ 0.1 м/с





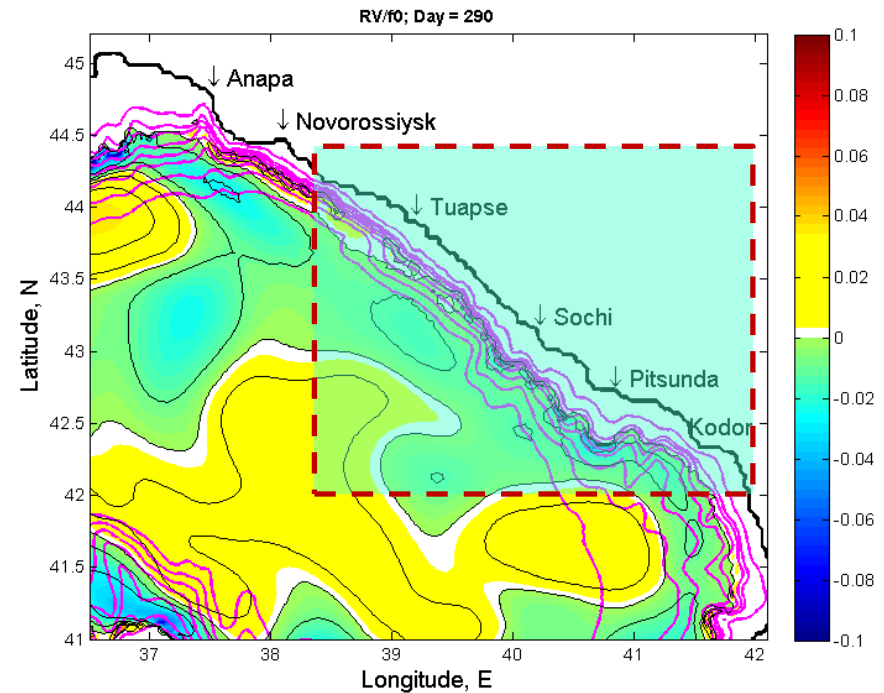


# Захват речных стоков прибрежным КАВ. Формирование КАВ в глубинном слое



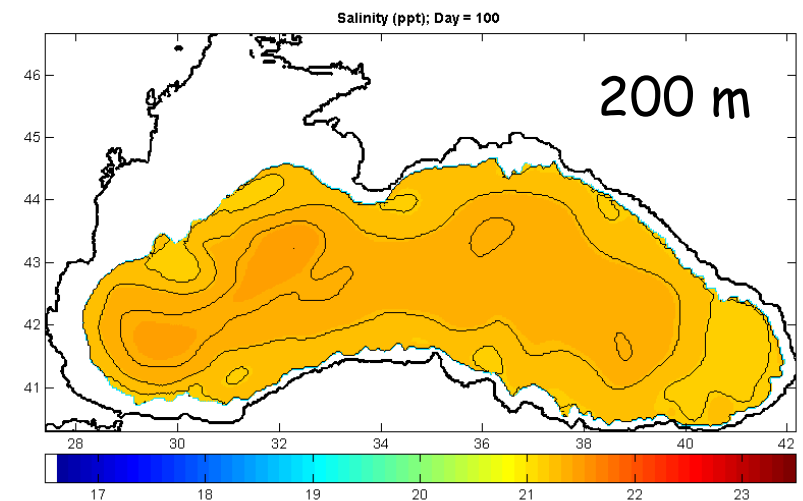
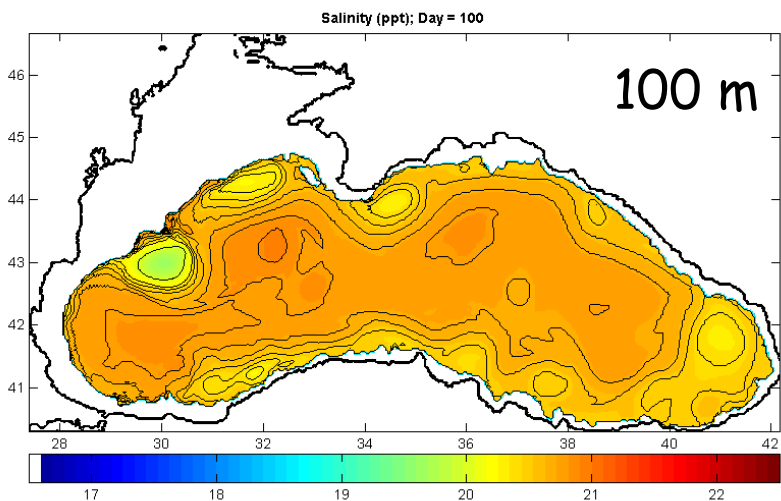
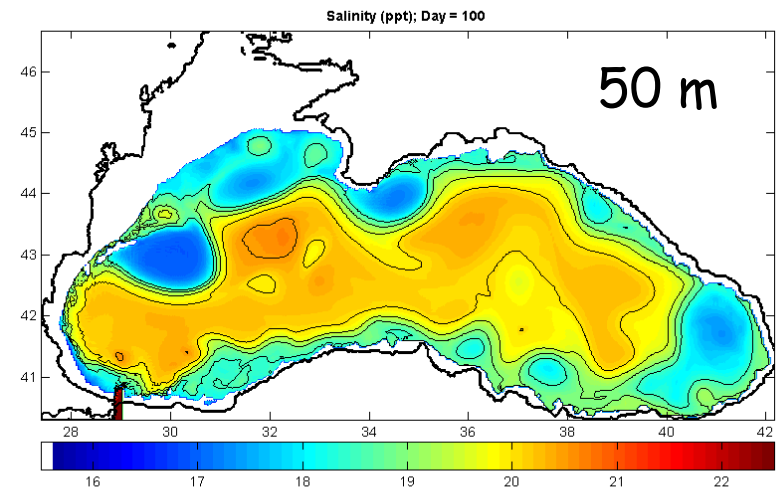
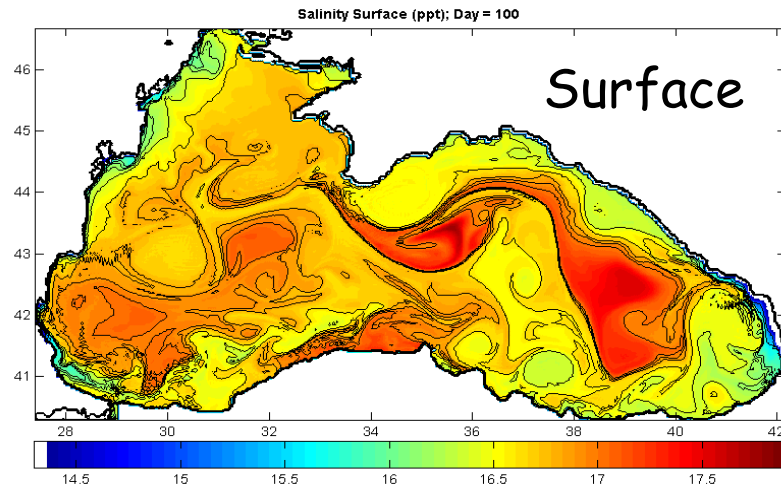
Caucasian Near-Shore Mesoscale AC Eddy (NAE) and Submesoscale Cyclonic Eddies at periphery of NAE  
A. Zatsepin personal communication

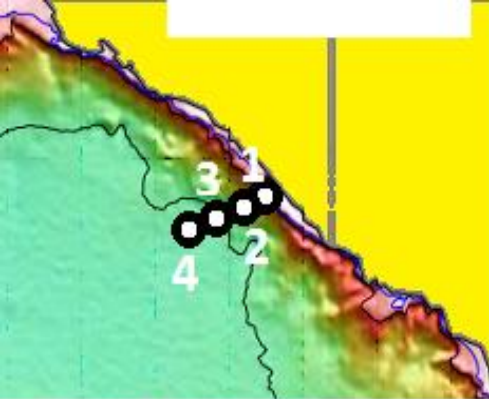
Спутниковый снимок иллюстрирует захват Вихрем взвешенного вещества, поступающего со стоком многочисленных мелких рек. Захваченная примесь компактно переносится вдоль Кавказского побережья вплоть до диссипации КАЕ.



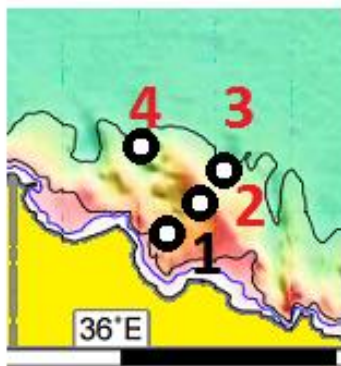
Модель показывает, что КАВ у дна опережает тот, который развивается на поверхности моря, что означает его происхождение за счет генерации в из-за обтекания подводного хребта

# Соленость на разных горизонтах

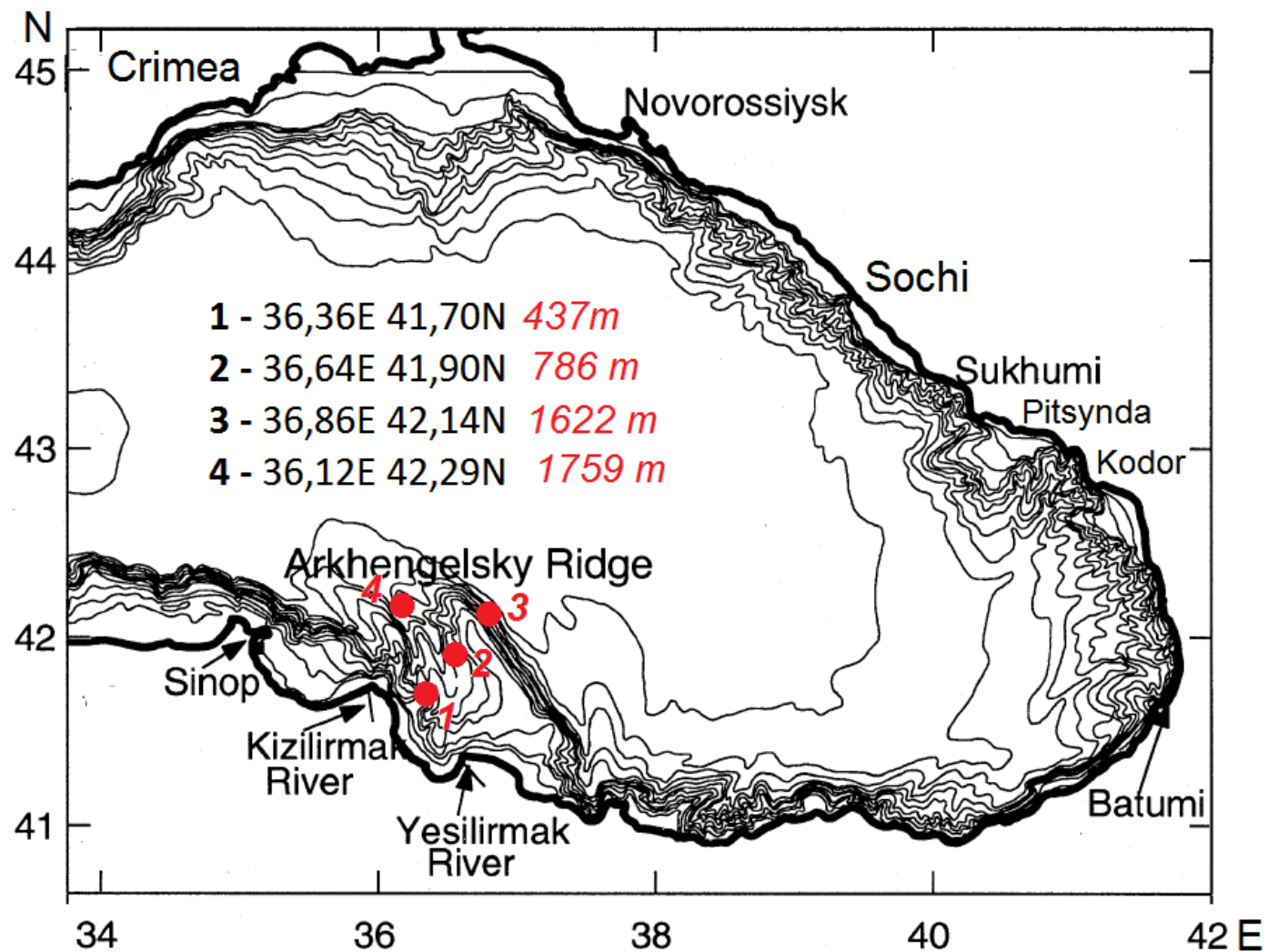


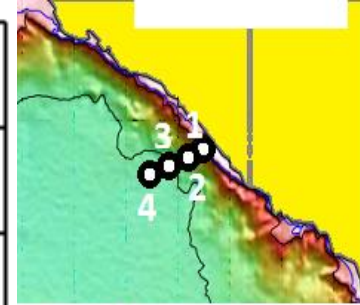
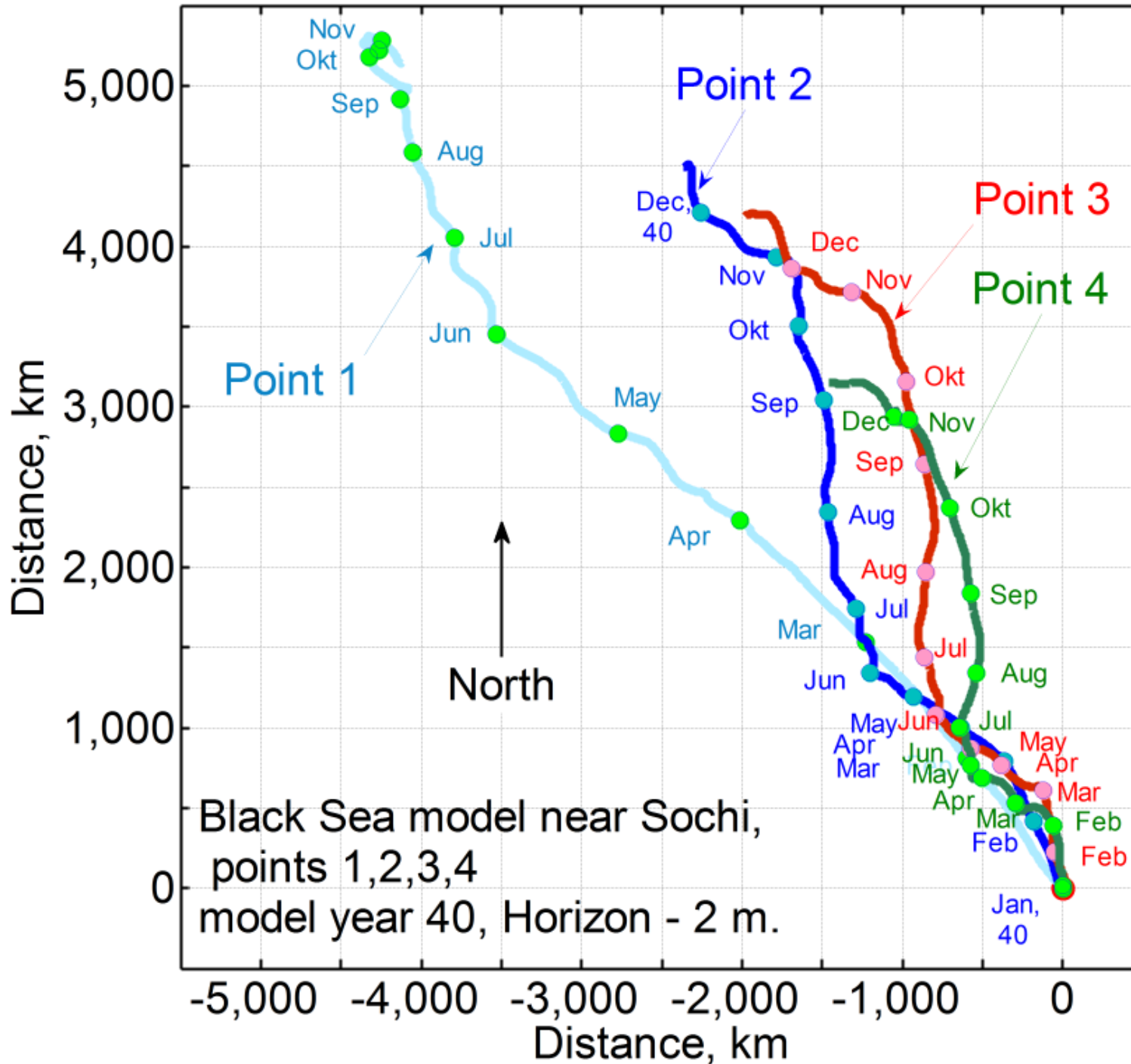


- 1- 39,15E; 43,73N
- 2- 38,96E; 43.68N
- 3- 38,76E; 43,58N
- 4- 37,47E; 43,51N



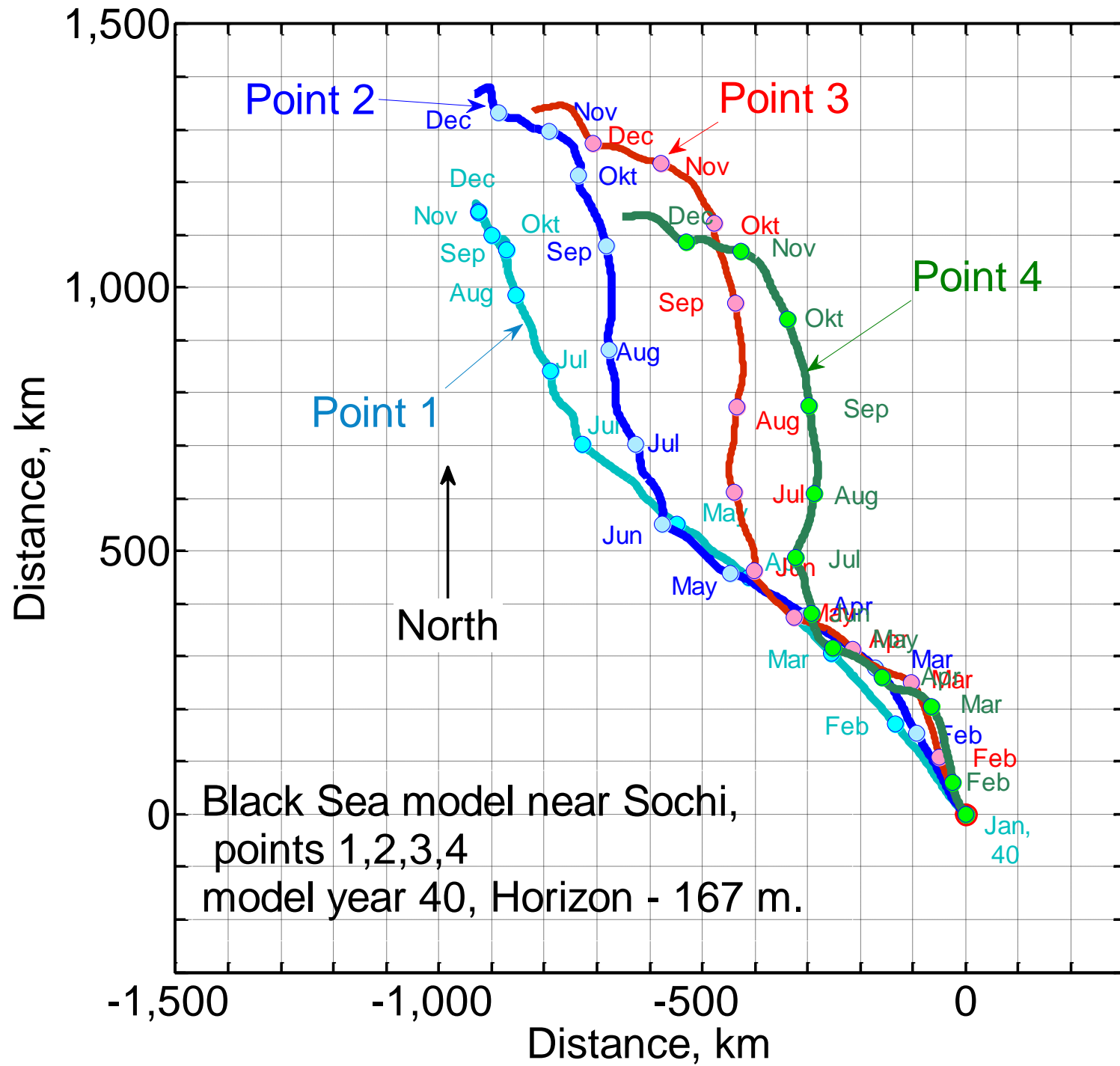
- 1 - 36,36E 41,70N
- 2 - 36,64E 41,90N
- 3 - 36,86E 42,14N
- 4 - 36,12E 42,29N

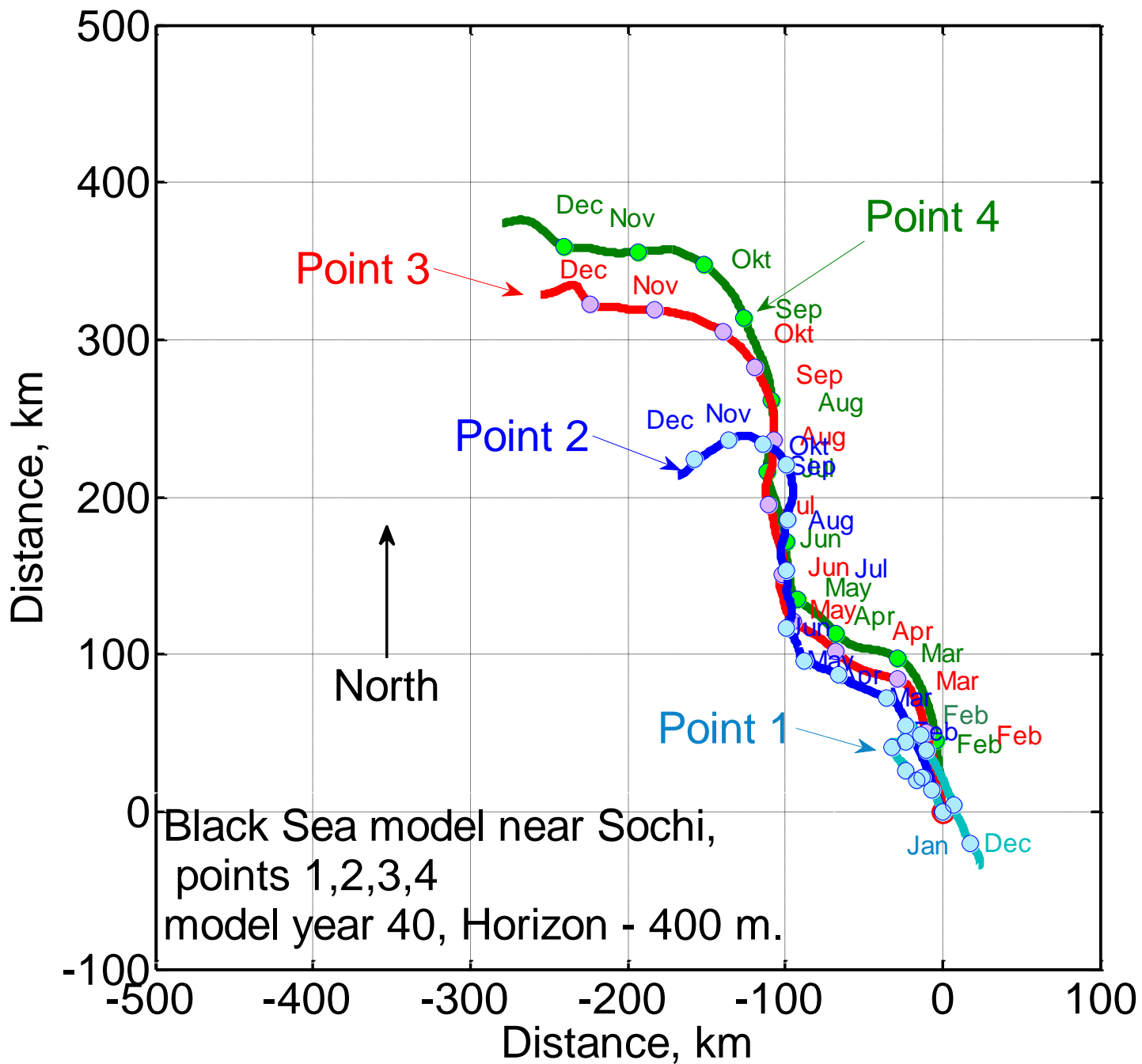


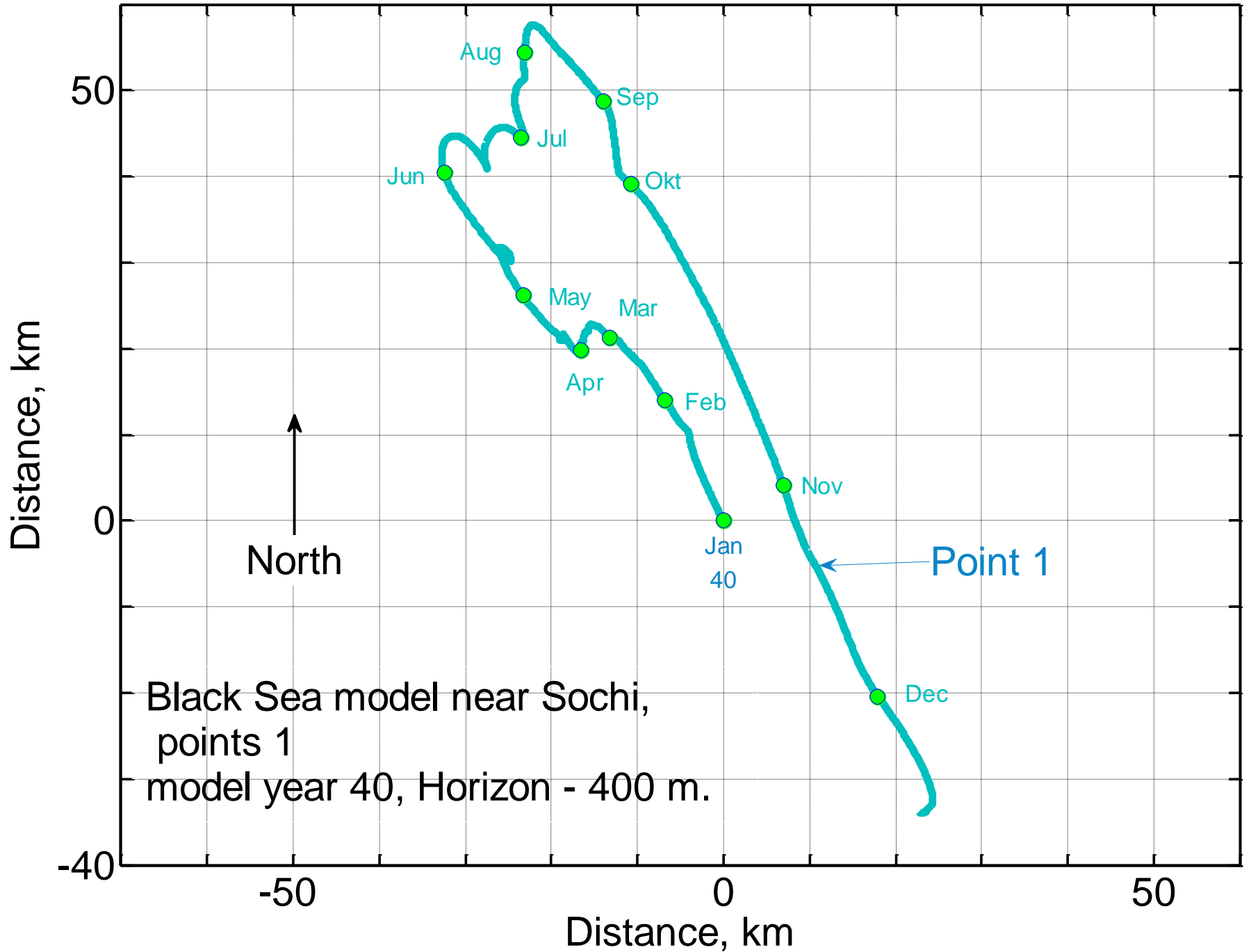


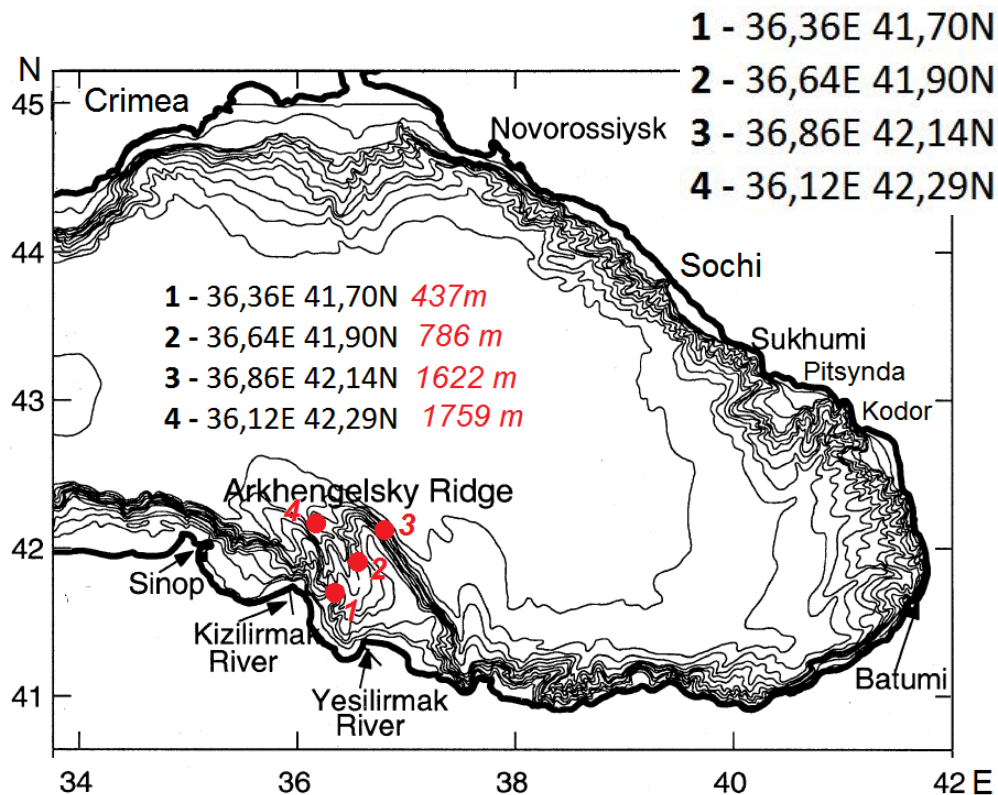
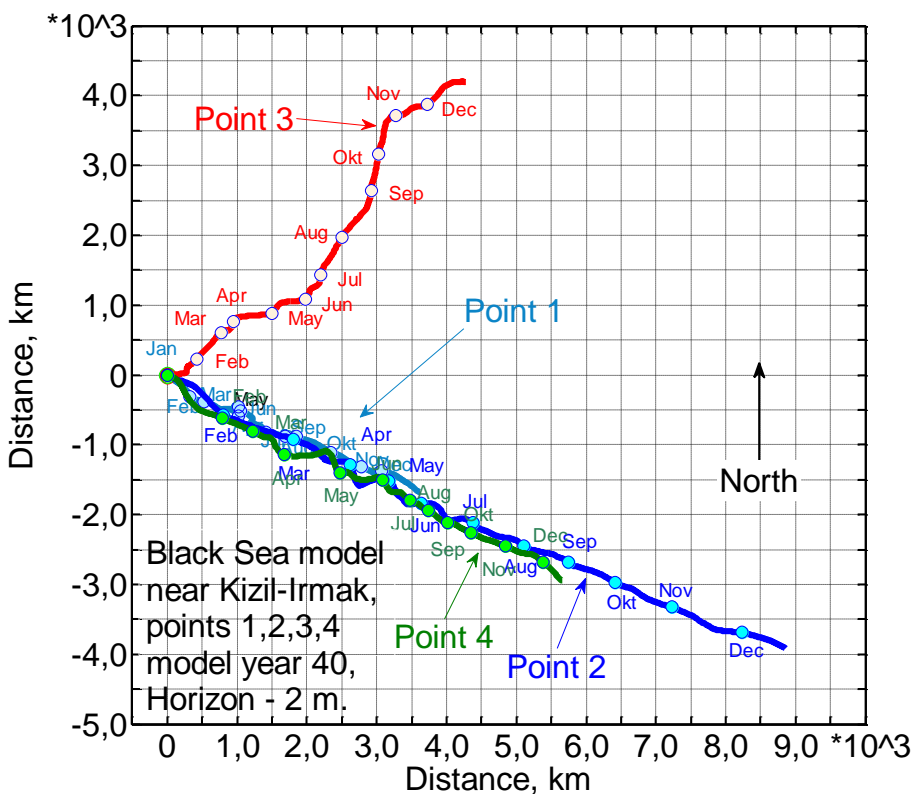
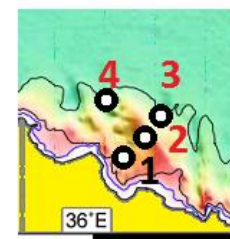
1- 39,15E; 43,73N  
 2- 38,96E; 43.68N  
 3- 38,76E; 43,58N  
 4- 37,47E; 43,51N

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.



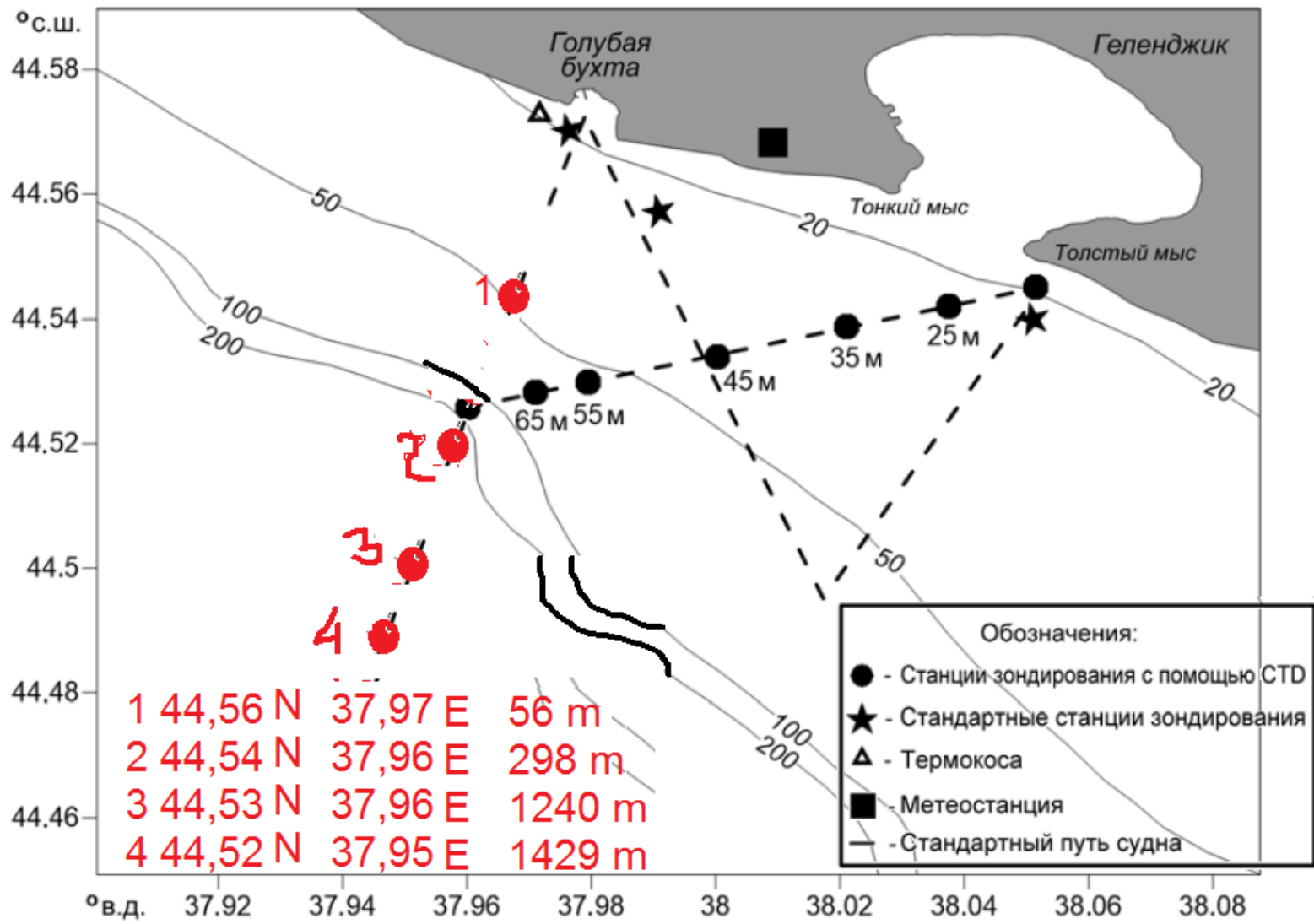






Прогрессивные векторные диаграммы течений на поверхности моря в точках 1,2,3,4 около Кизил-Йермак (Чёрное море), 360 модельных суток (год 40), 2160 значений с дискретностью через 4 часа.





- 1. 44, 63 N; 34,60 E H= 636 m;
- 2. 44, 49 N; 34,28 E H= 1953 m;
- 3. 44, 45 N; 37,96 E H= 2076 m;
- 4. 44, 52 N; 37,64 E H= 2181 m;

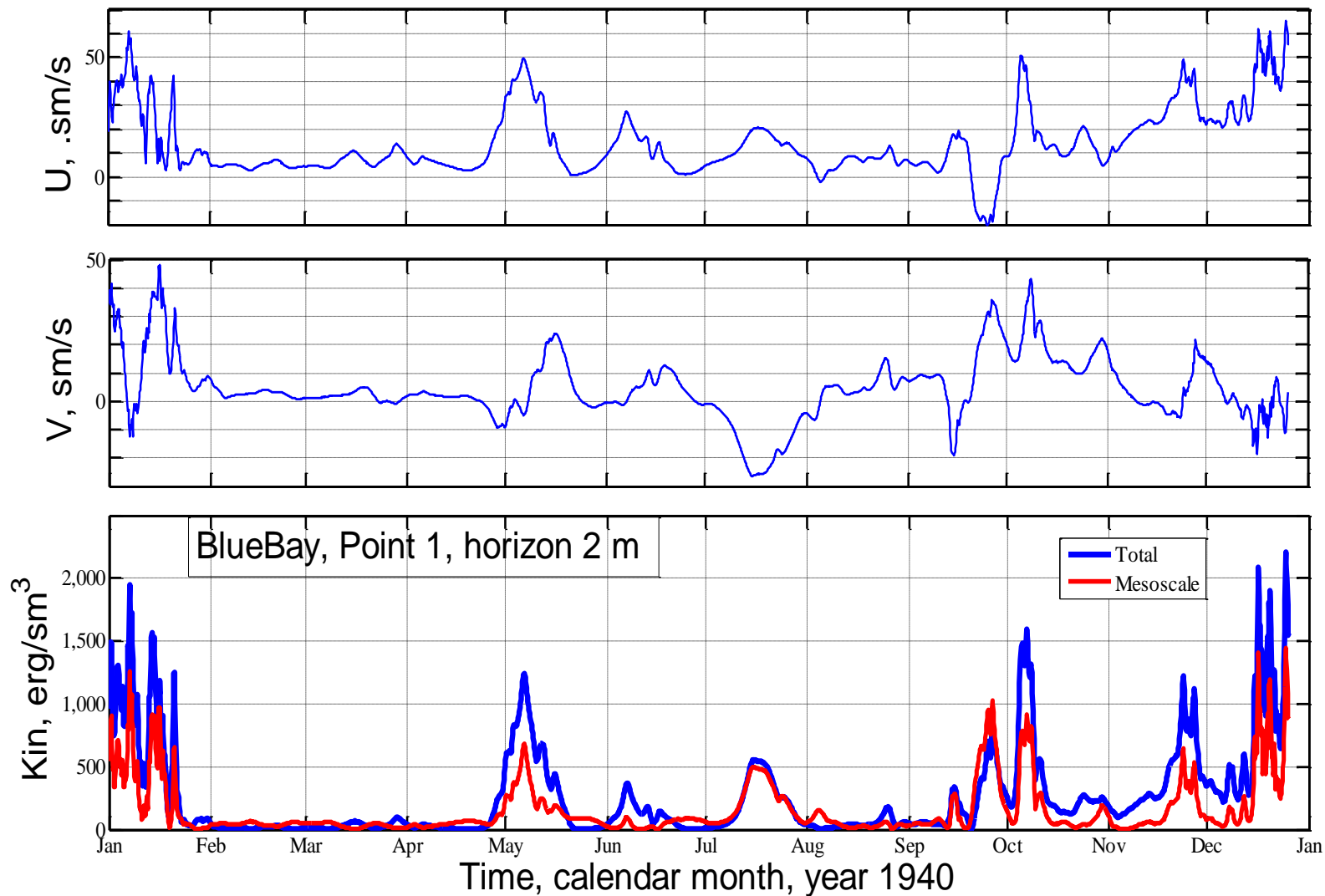
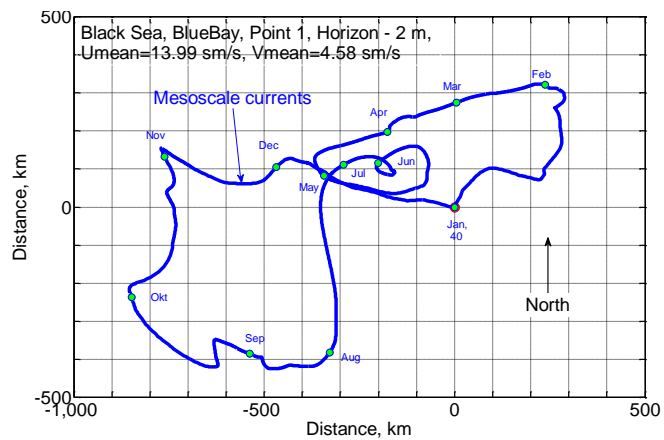
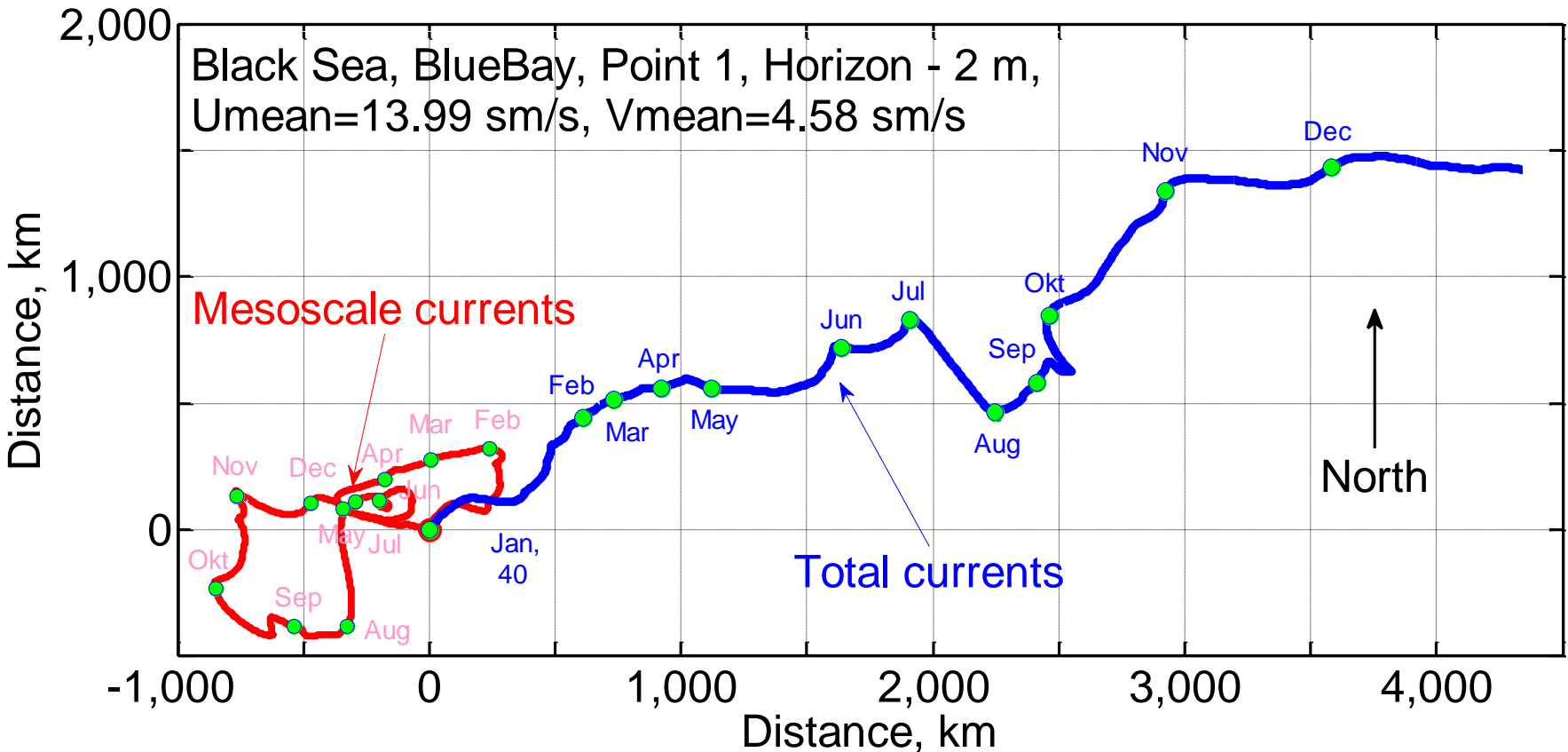
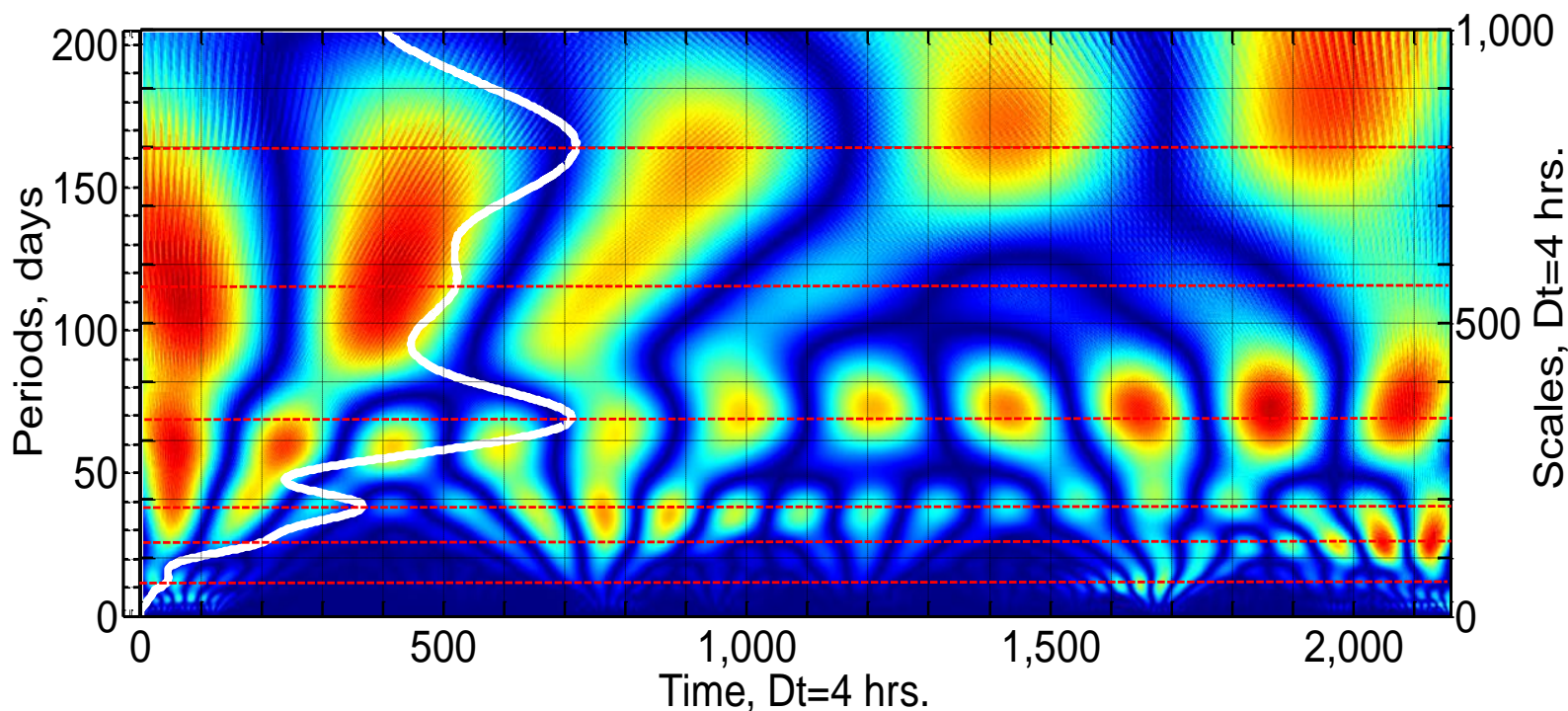
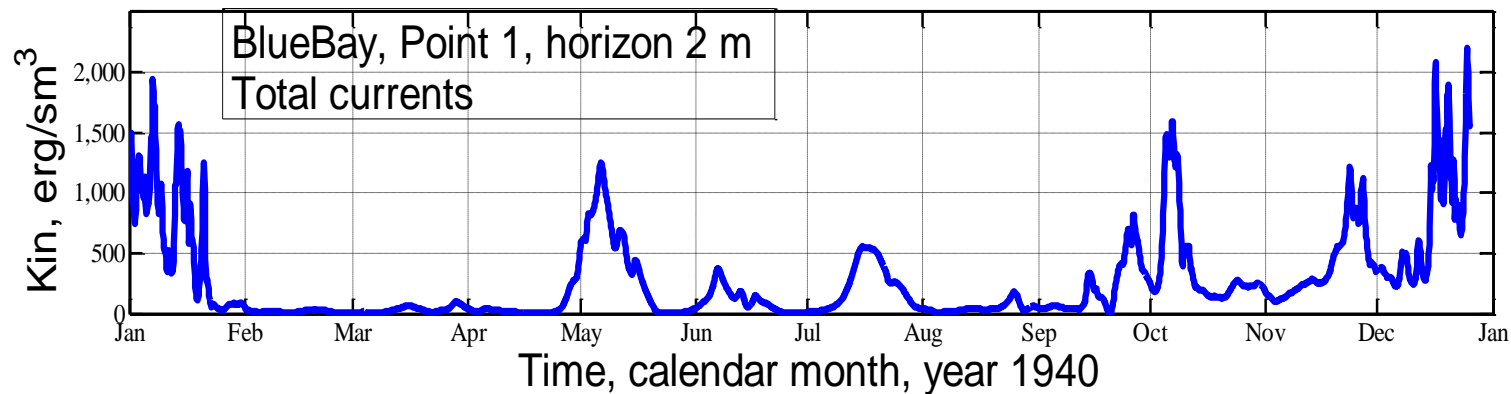


Рис. Декартовы компоненты горизонтальной скорости  $U, V$  и плотность кинетической энергии  $Kin=0.5\rho(U^2+V^2)$  на поверхности моря (0 м), в точке 1, ( $44, 63^\circ N$ ;  $34,60^\circ E$ ), около BlueBay, Чёрное море), глубина моря 636 м. Модельное время: с 01.01.1940 0ч.0мин.0с по 25.12.1940 20ч.0мин.0с, 360 модельных суток, 2160 значений с дискретностью через 4 часа.



Прогрессивные векторные диаграммы течений в точке 1, около Геленджика, 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.

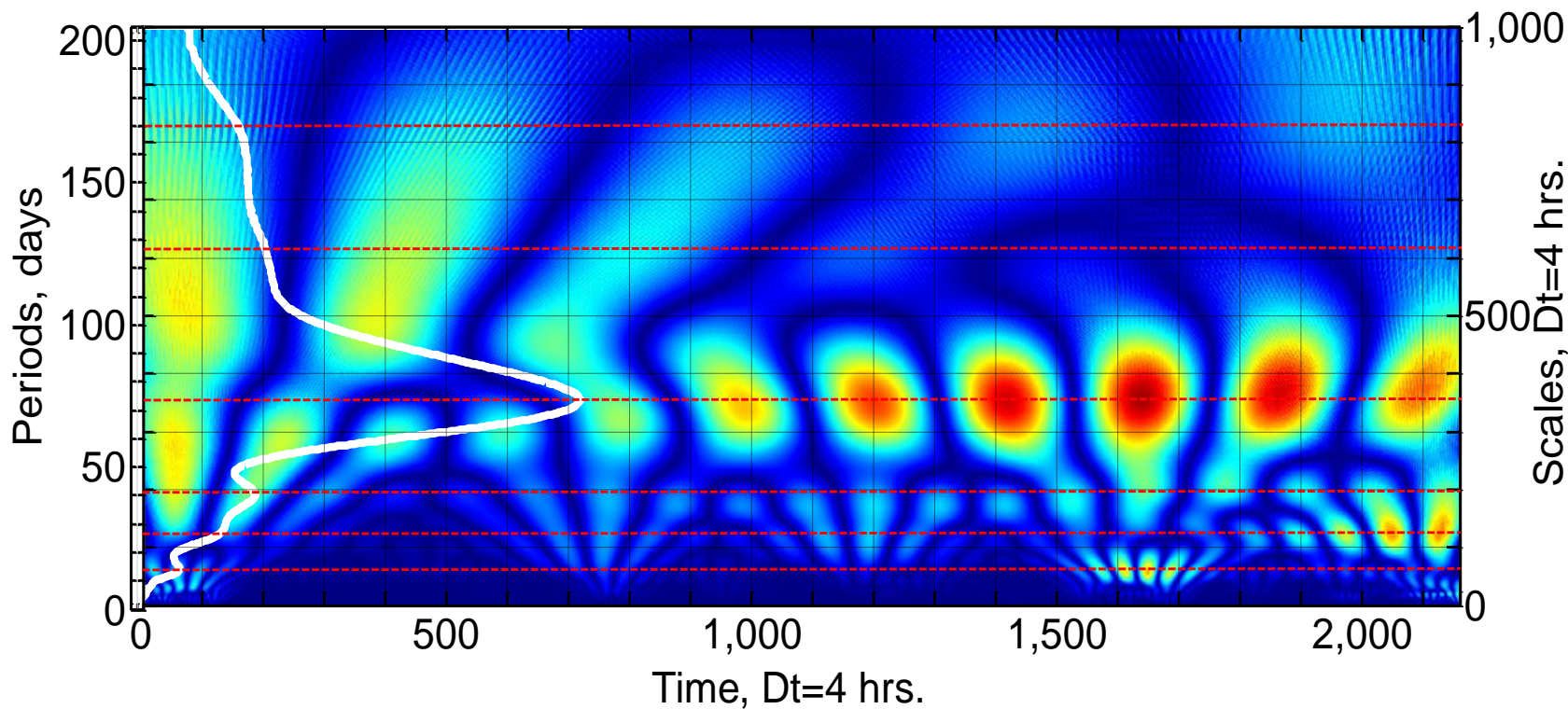
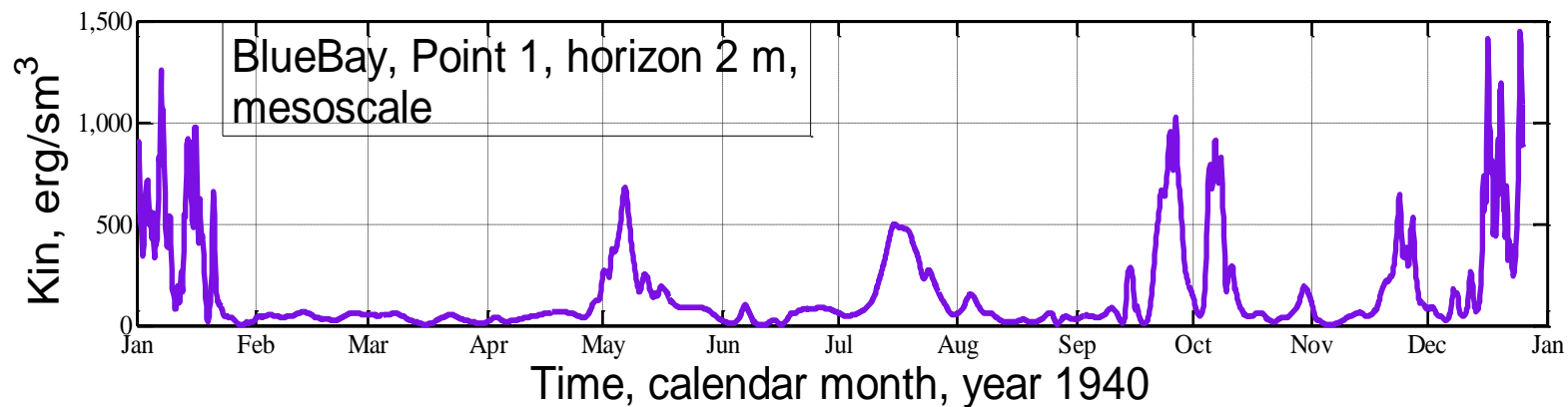


Рис. Ход плотности мезомасштабной кинетической энергии в точке 1, Чёрное море (верхняя панель) и вэйвлет-плотность МЗ кинетической энергии в диапазоне периодов 1-205 сут. (нижняя панель). Светлая линия - спектр вэйвлет-плотности, проинтегрированной по времени.

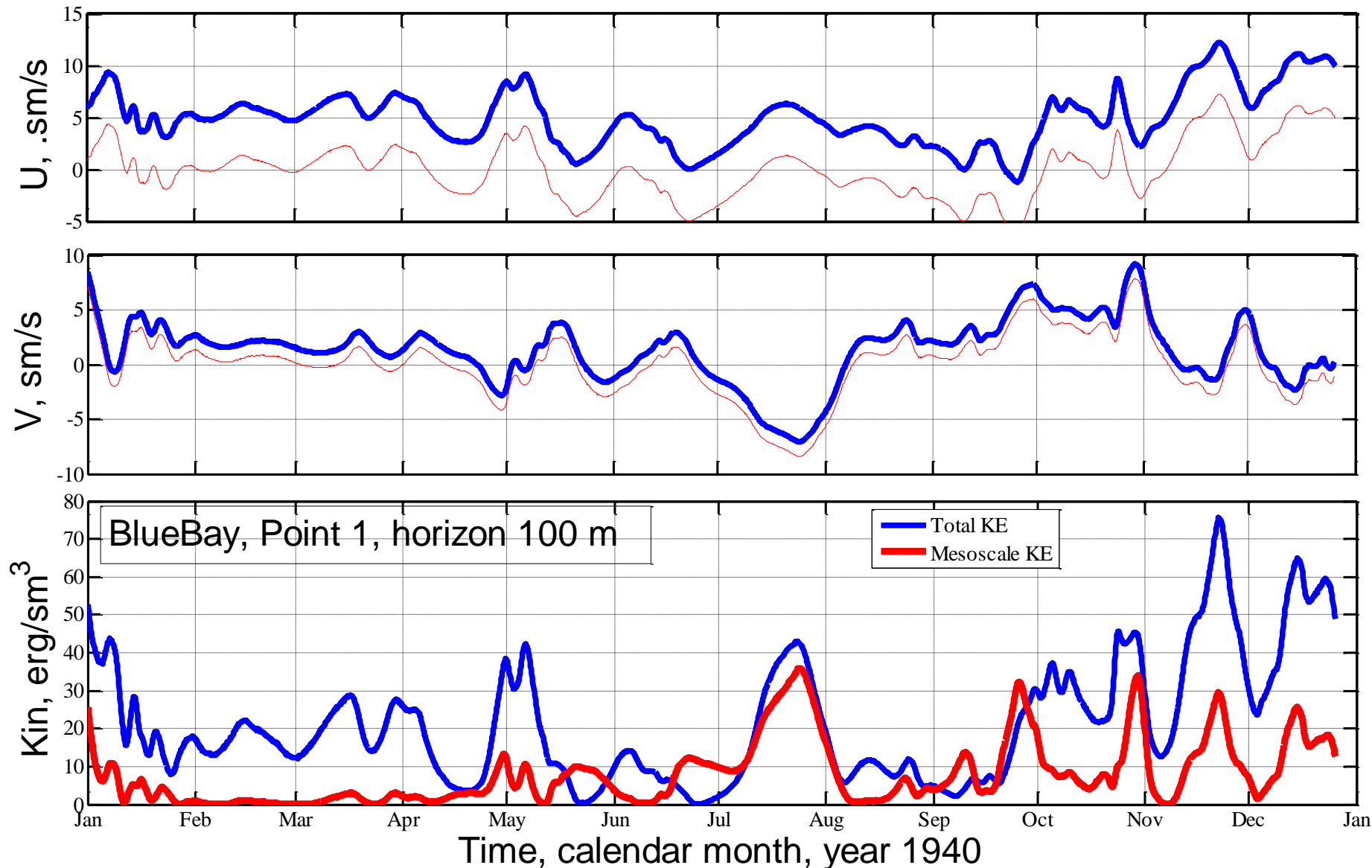
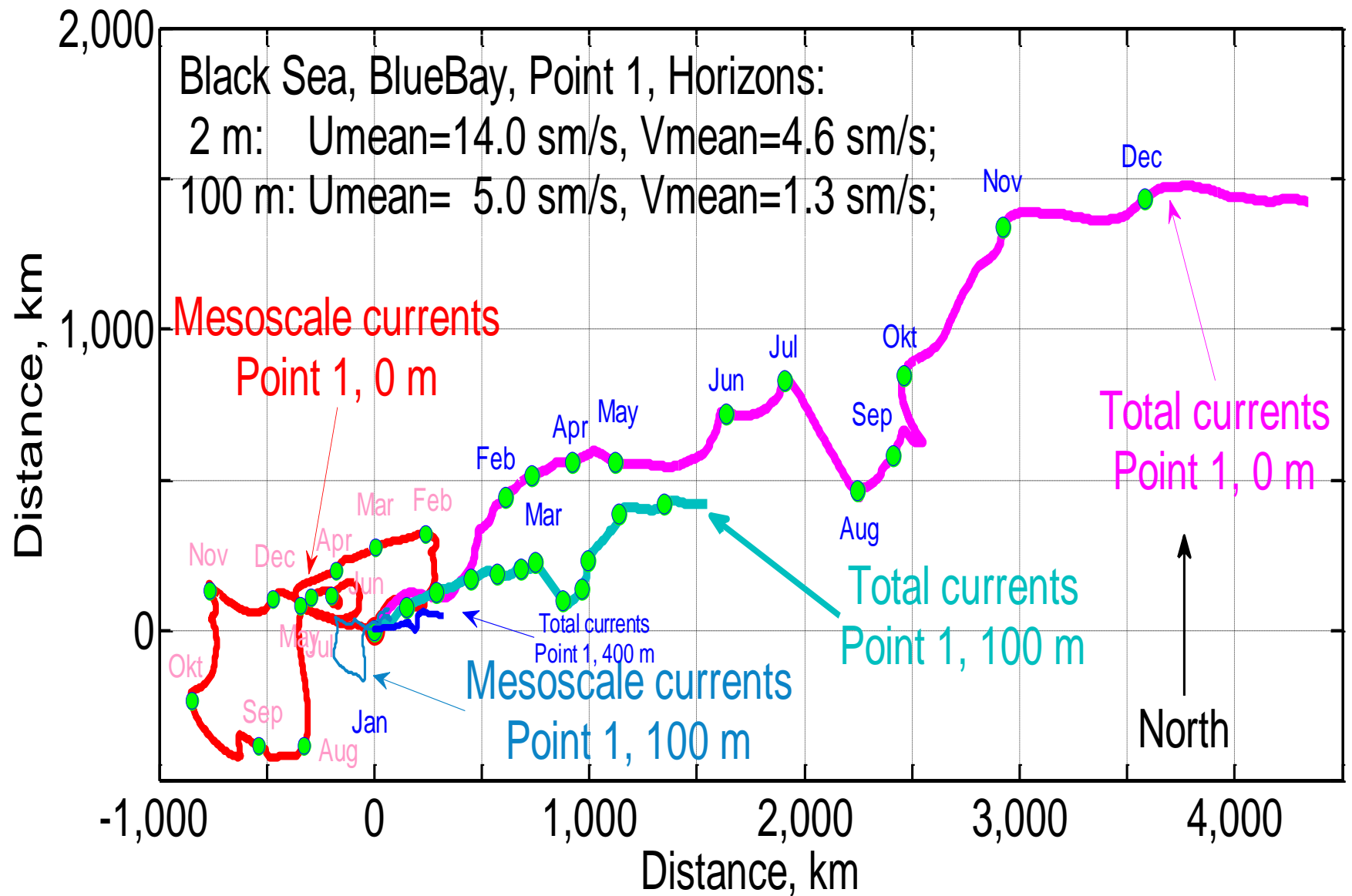
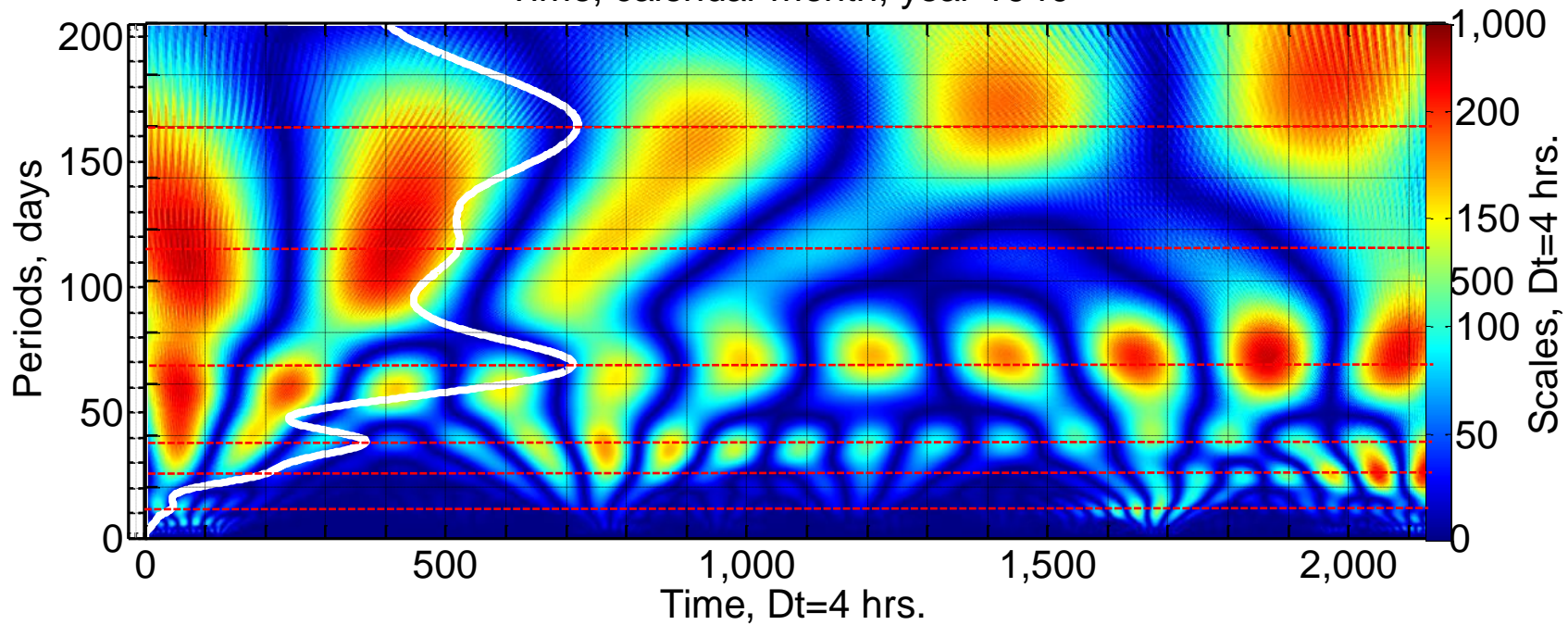
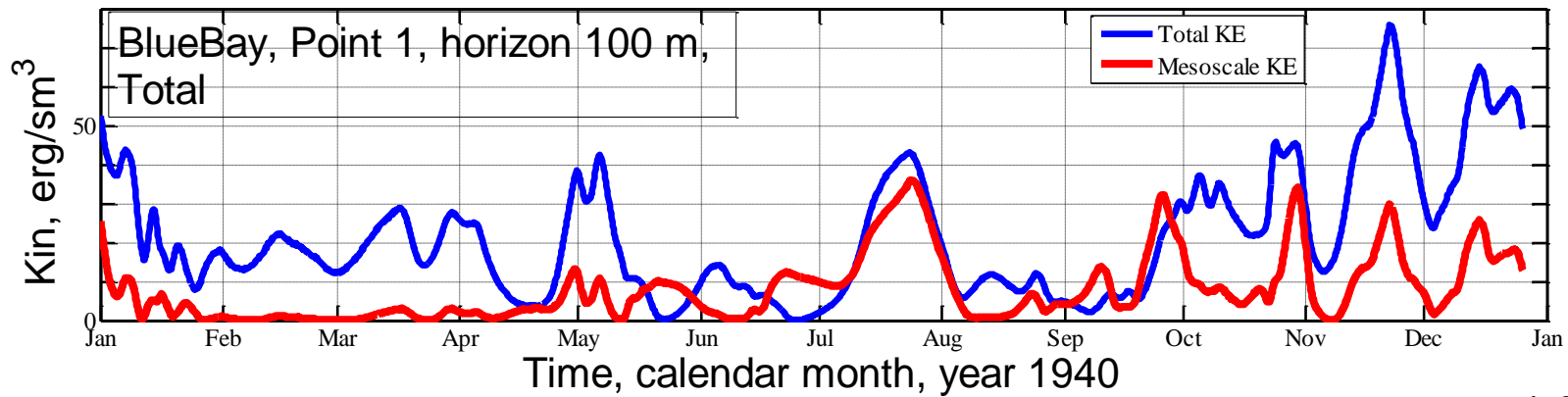


Рис. Декартовы компоненты горизонтальной скорости  $U, V$  и плотность кинетической энергии  $Kin=0.5\rho(U^2+V^2)$  на глубине 100 м, в точке 1, ( $44, 63^\circ \text{ N}$ ;  $34,60^\circ \text{ E}$ ), около Голубой бухты (BlueBay), Чёрное море), глубина моря 636 м. Модельное время: с 01.01.1940 0ч.0мин.0с по 25.12.1940 20ч.0мин.0с, 360 модельных суток, 2160 значений с дискретностью через 4 часа.

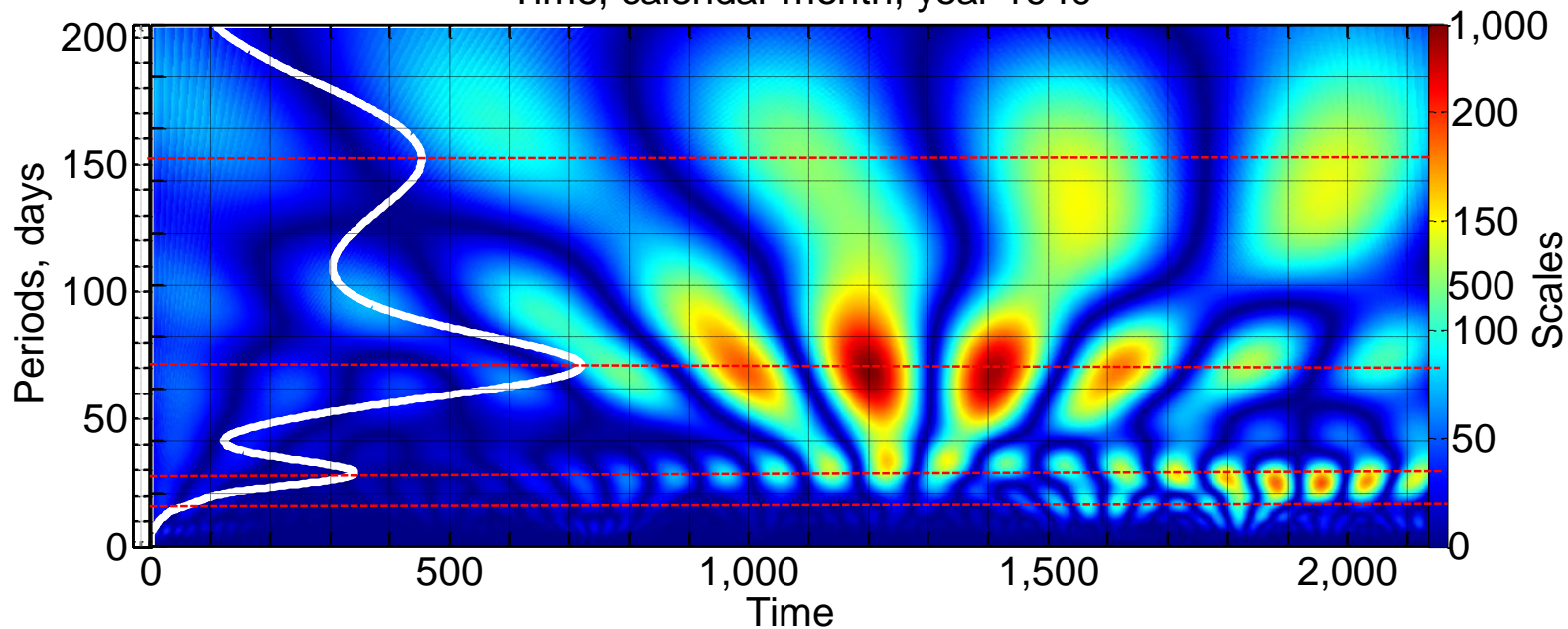
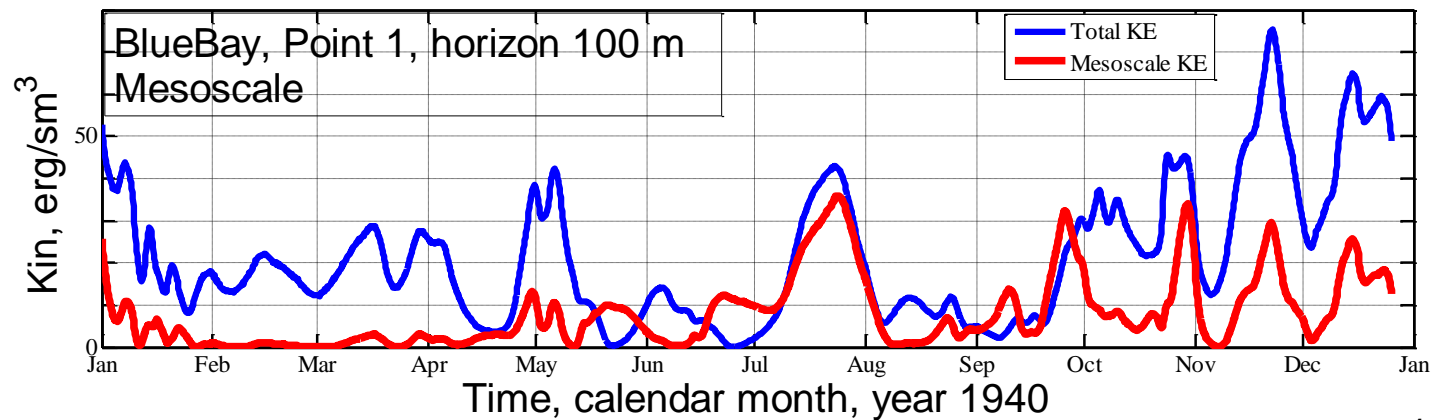


Прогрессивные векторные диаграммы течений в точке 1, (2 и 100 м) около Геленджика, 360 модельных суток (год 40), 2160 значений с дискретностью через 4 часа.

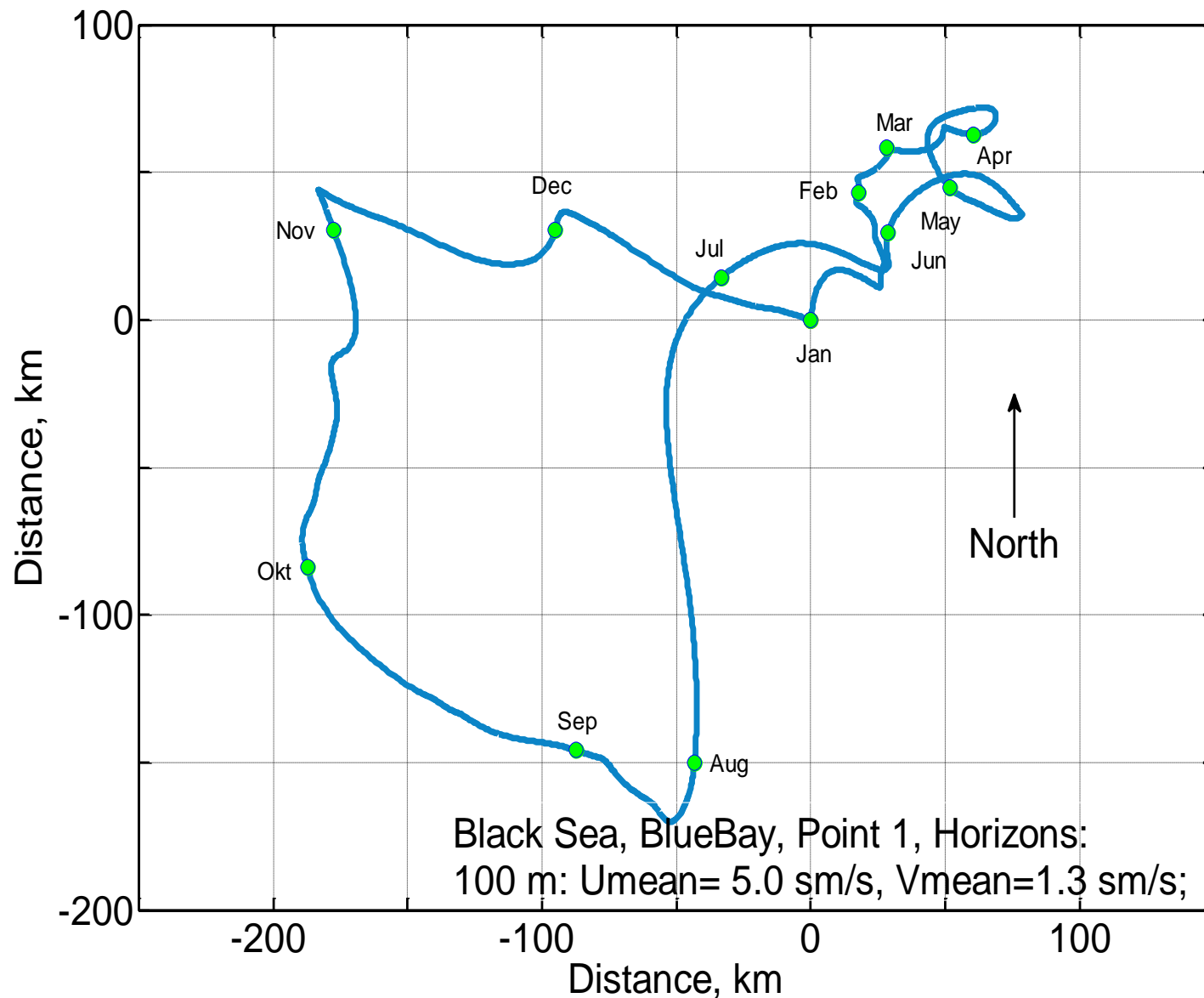


Ход плотности кинетической энергии в точке 1, (100 м) Чёрное море (верхняя панель) и вэйвлет-плотность кинетической энергии в диапазоне периодов 1-205 сут. (нижняя панель). Светлая линия - спектр вэйвлет-плотности, проинтегрированной по времени.

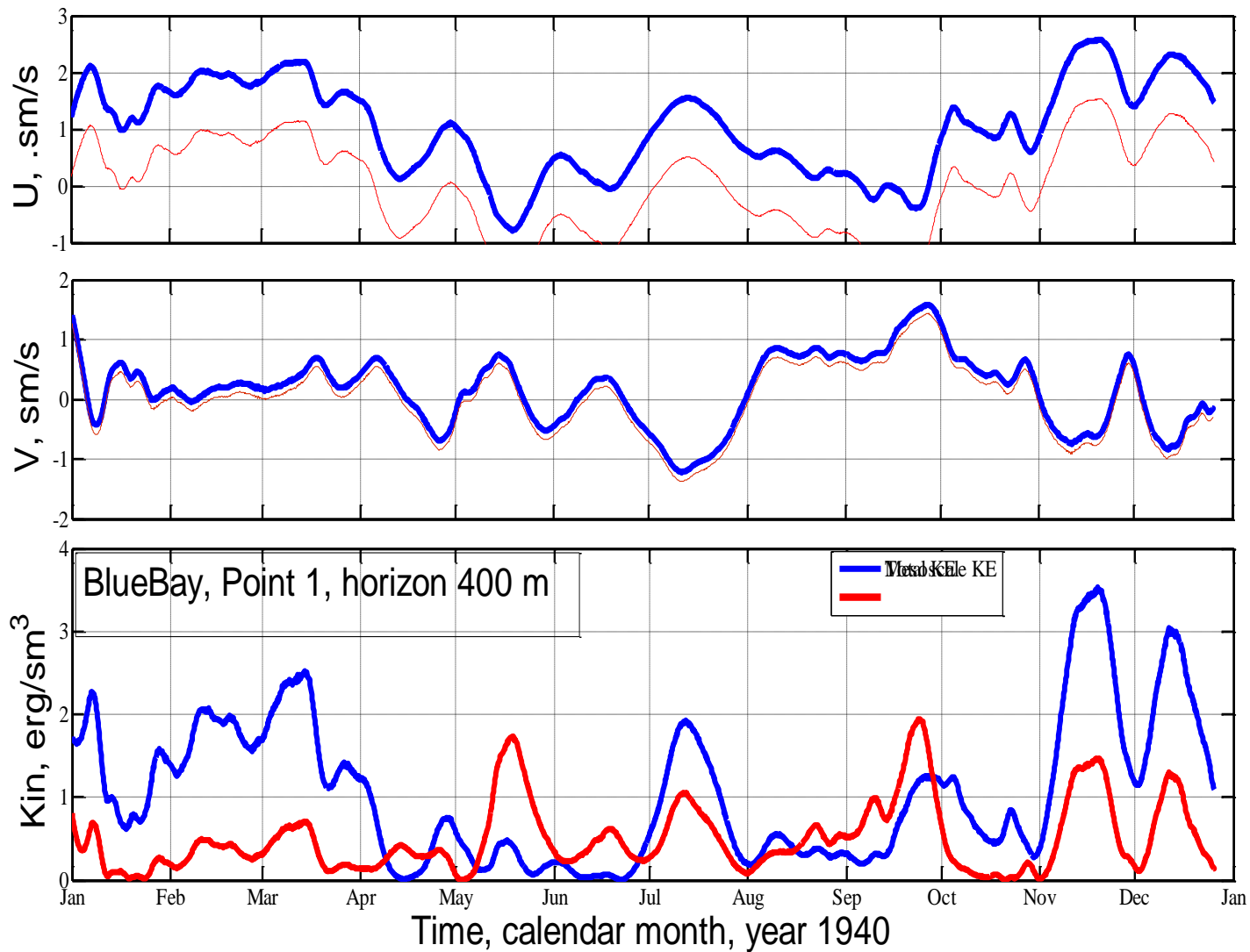




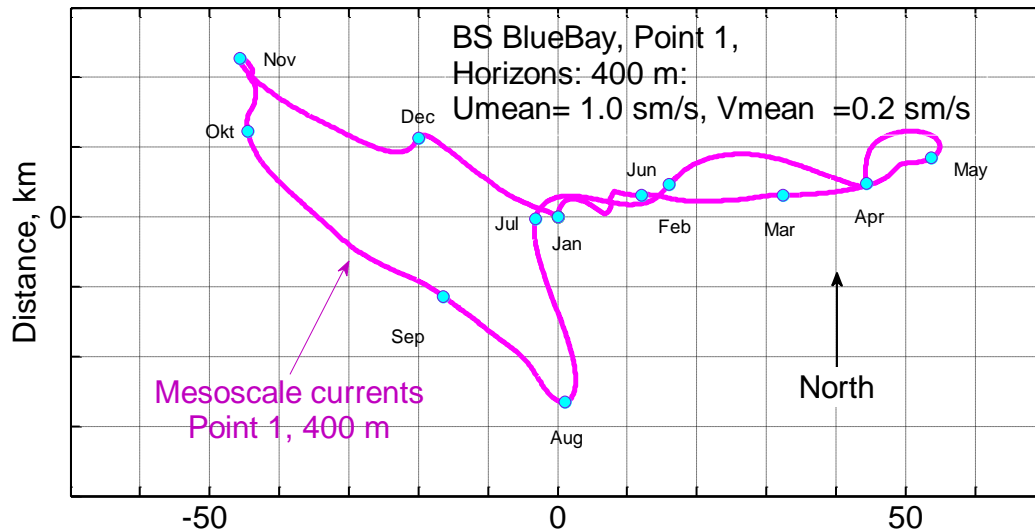
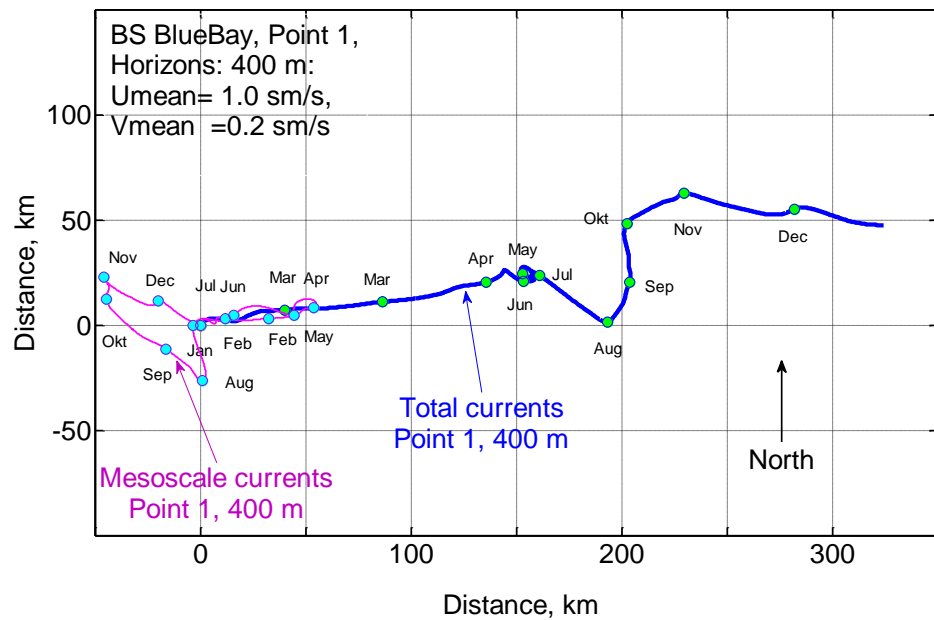
Ход плотности мезомасштабной кинетической энергии в точке 1, (100 м) Чёрное море (верхняя панель) и вэйвлет-плотность  $M_3$  кинетической энергии в диапазоне периодов 1-205 сут. (нижняя панель). Светлая линия - спектр вэйвлет-плотности, проинтегрированной по времени.



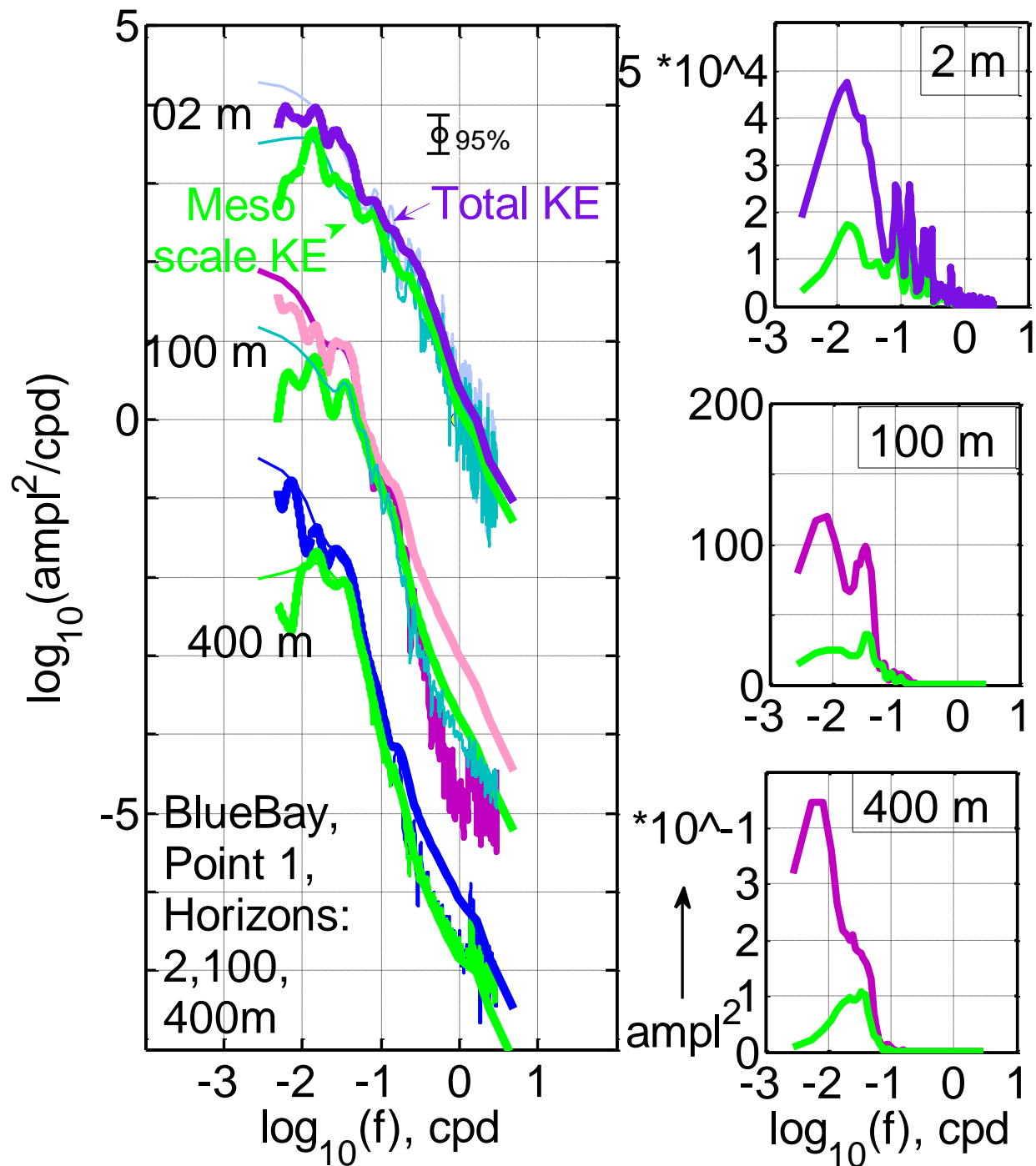
Прогрессивные векторные диаграммы течений в точке 1, (100 м) около Геленджика, 360 модельных суток (год 40), 2160 значений с дискретностью через 4 часа.



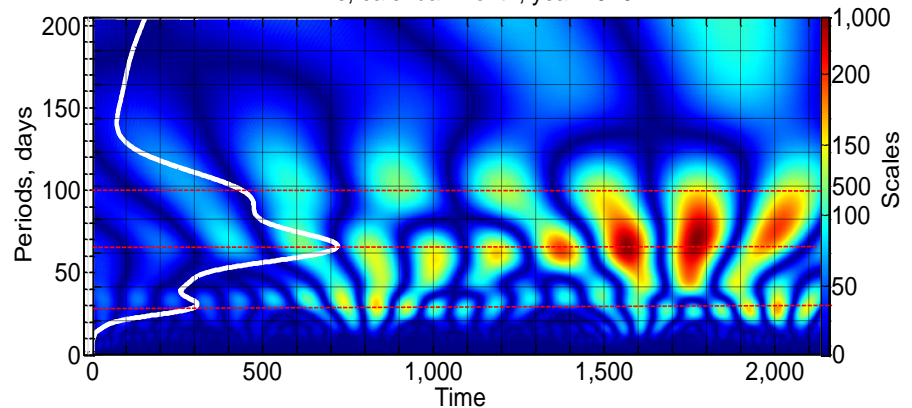
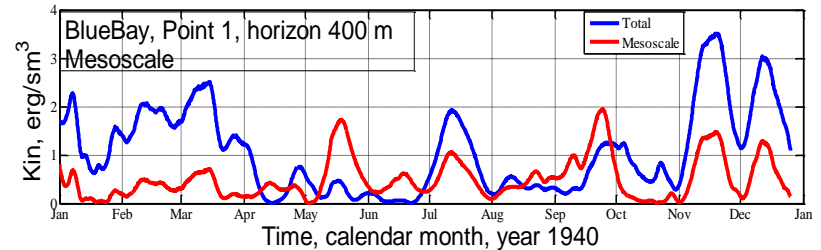
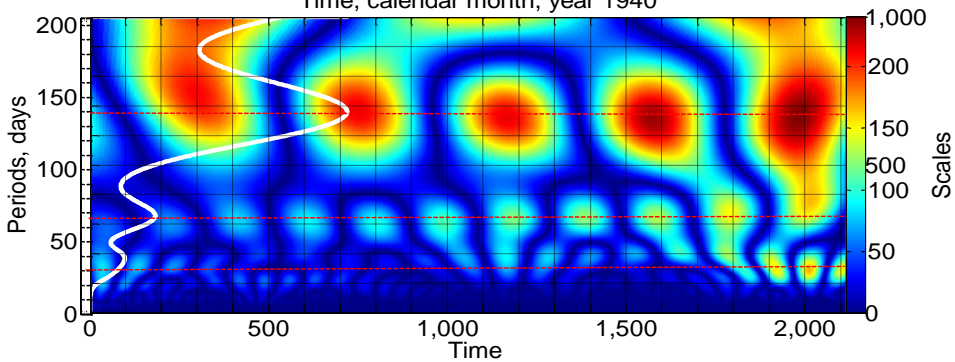
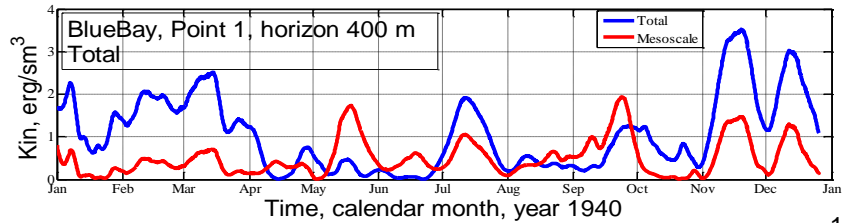
Декартовы компоненты горизонтальной скорости  $U, V$  и плотность кинетической энергии  $Kin=0.5\rho(U^2+V^2)$  на глубине 400 м, в точке 1, ( $44, 63^\circ N$ ;  $34,60^\circ E$ ), около Голубой бухты (BlueBay), Чёрное море), глубина моря 636 м. Модельное время: с 01.01.1940 0ч.0мин.0с по 25.12.1940 20ч.0мин.0с, 360 модельных суток, 2160 значений с дискретностью



Прогрессивные векторные диаграммы течений в точке 1, (400 м) около Геленджика, 360 модельных суток (год 40), 2160 значений с дискретностью через 4 часа.



Спектральные плотности Фурье плотности кинетической энергии, - панель слева; спектр дисперсии плотности кинетической энергии (справа) в точке 1 около Геленджика. Светлая зелёная кривая - спектр вэйвлет-плотности, проинтегрированной по времени.



Ход плотности мезомасштабной кинетической энергии в точке 1, (400 м) Чёрное море (верхняя панель) и вэйвлет-плотность  $M3$  кинетической энергии в диапазоне периодов 1-205 сут. (нижняя панель). Светлая линия - спектр вэйвлет-плотности, проинтегрированной по времени.

# Выводы:

- 2-х минутная гидродинамическая модель DieCAST позволяет исследовать многообразие мезомасштабных структур: струй, меандров, вихрей, диполей, интрузий, бифуркаций и др. Модель применена для района Гидрофизического Полигона ИО РАН около Геленджикской бухты.
- Многие интересные явления, которые удалось обнаружить в модельных экспериментах, связаны с генерацией мезомасштабных вихрей.
- Разнообразные спутниковые данные и измерения *in situ*, 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.



A photograph of a sunset over a calm body of water. The sky transitions from a deep blue at the top to a bright orange and yellow near the horizon. The water is dark and reflects the colors of the sky. A few small, distant lights are visible on the horizon.

Спасибо за внимание

*Мельников Василий Андреевич,  
Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН ,  
Тел. 916 241 87 16 [vmelnikov@ocean.ru](mailto:vmelnikov@ocean.ru)*



ИВАН ПЕТРОВ

12

ИВАН ПЕТРОВ