



Russian Academy of Sciences
Shirshov Institute of Oceanology

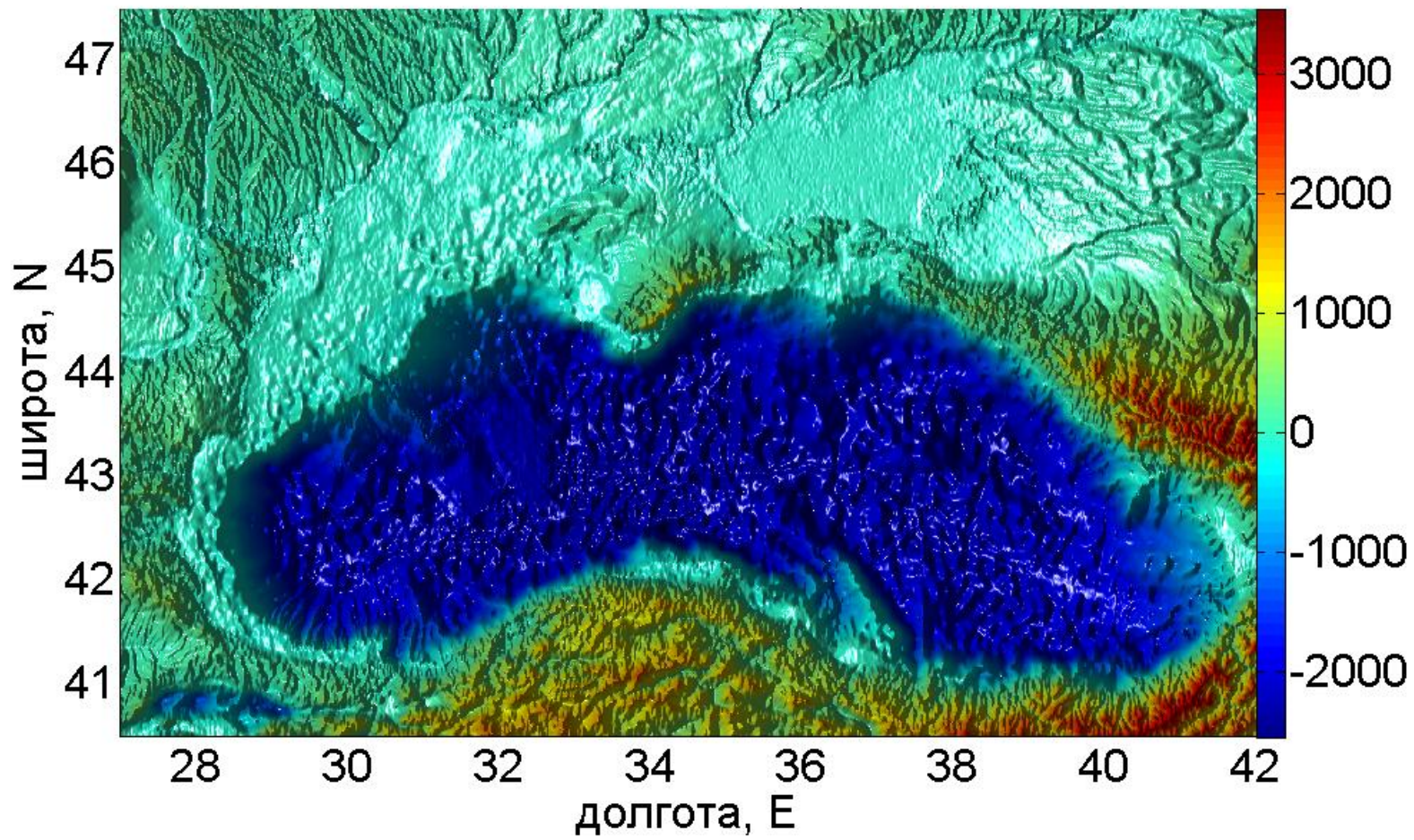
Механизмы образования циркуляционных структур Чёрного моря по данным спутниковых зондирований, измерений *in situ* и численного моделирования

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

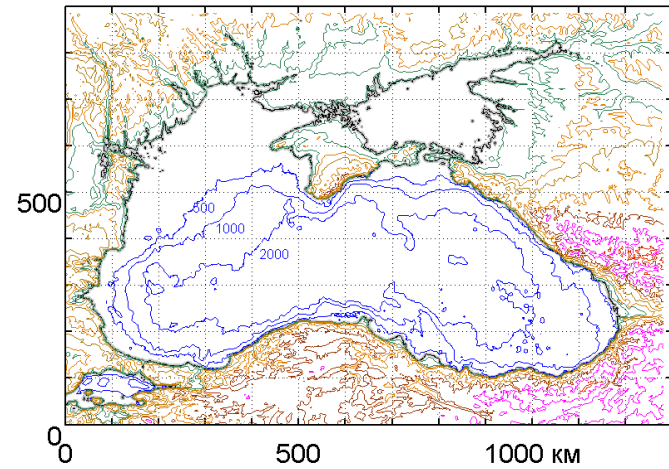
XIX Международная конференция
«Современные проблемы
дистанционного зондирования Земли из космоса»
Москва, ИКИ РАН, 15 - 19 ноября 2021

Outline:

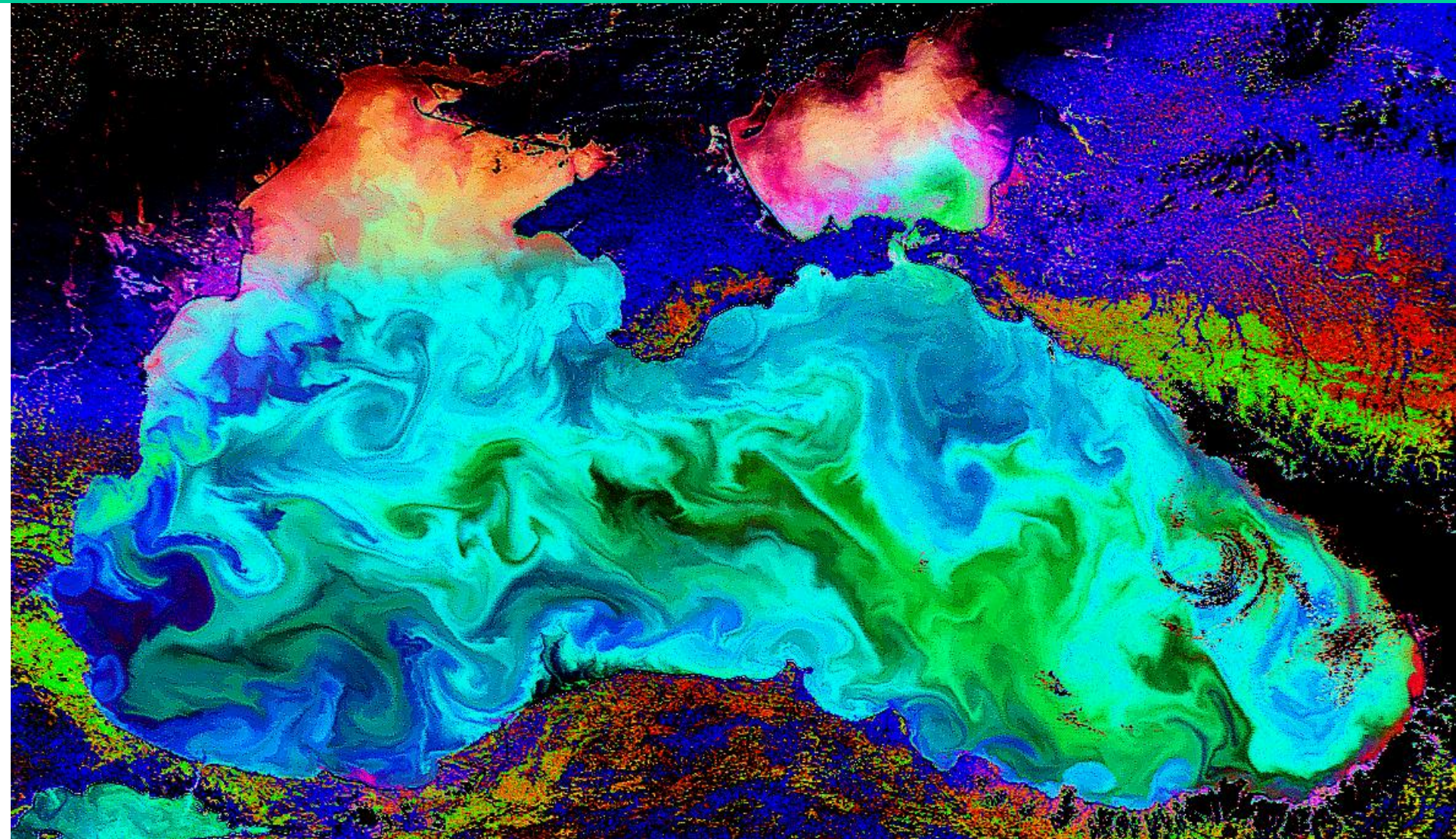




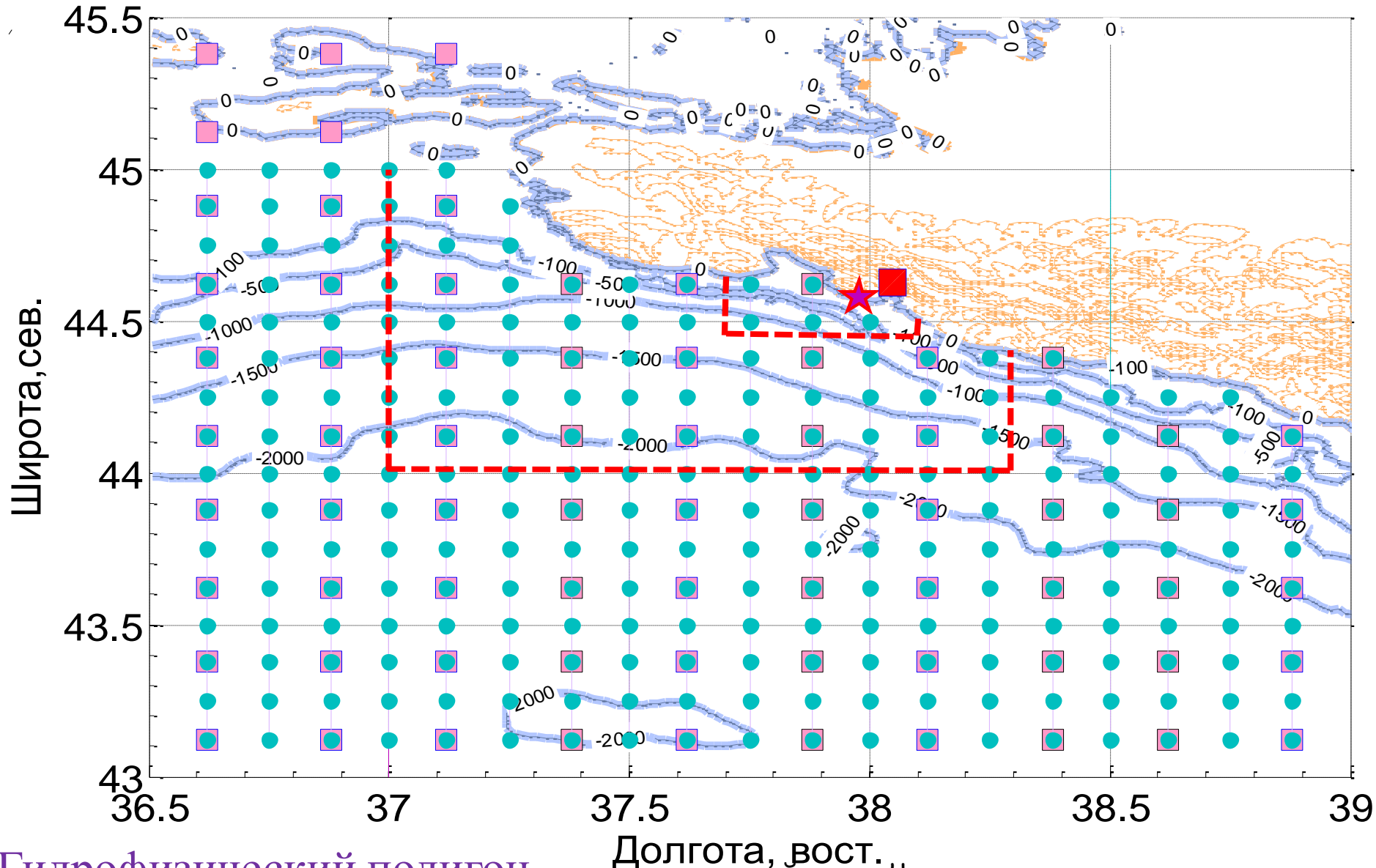
Черное и Азовское моря. Рельеф земной поверхности и дна моря. Шкала высот и глубин в метрах. Данные из Smith, W.H.F. and DT.Sandwell (1997), разрешение 2'.



Многообразие мезомасштабных структур в Черном море



Enhanced SeaWiFS Sea surface color imagery, 11 June 2000



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

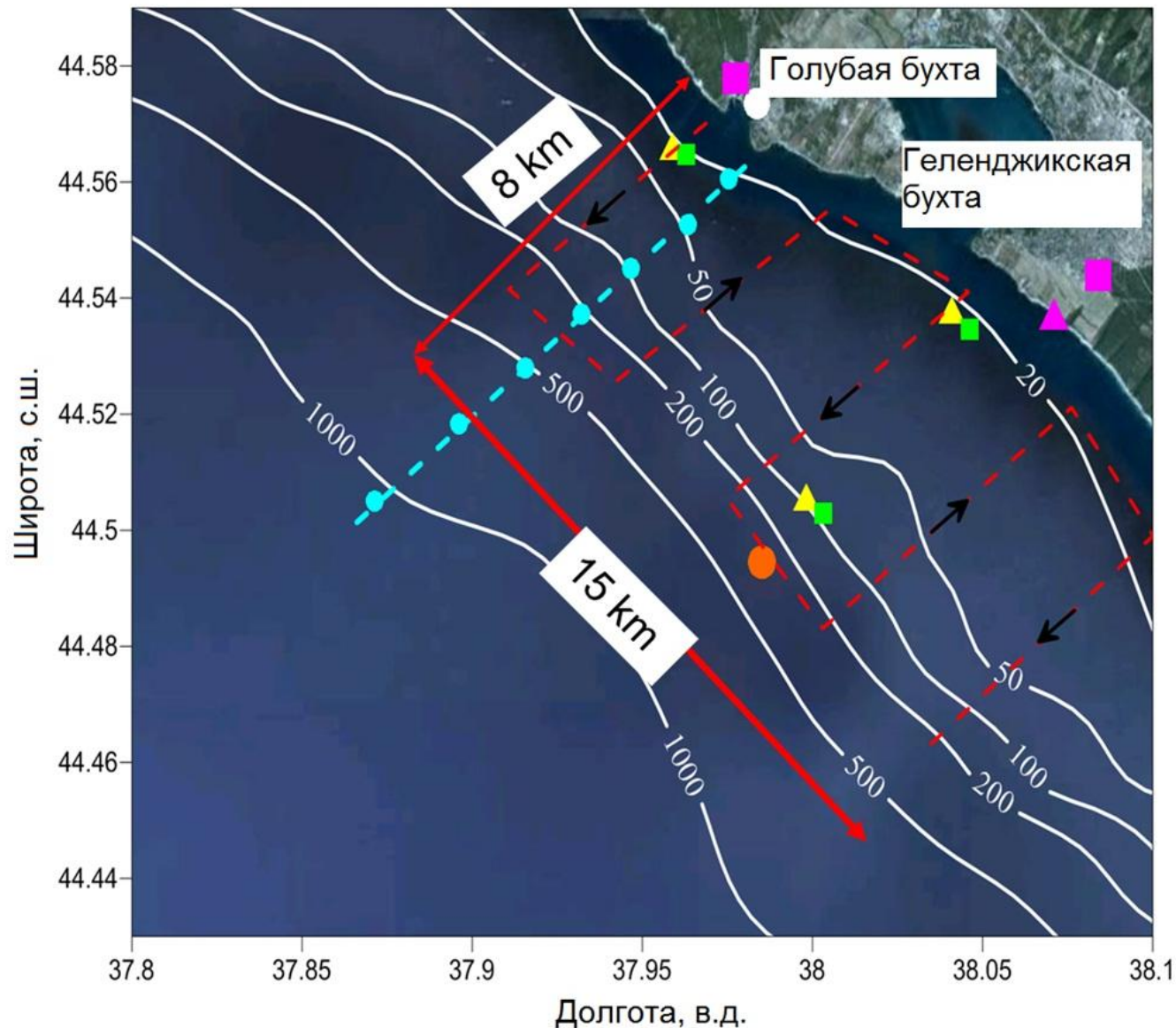


Схема контактных измерений на Гидрополигоне ИО РАН:

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

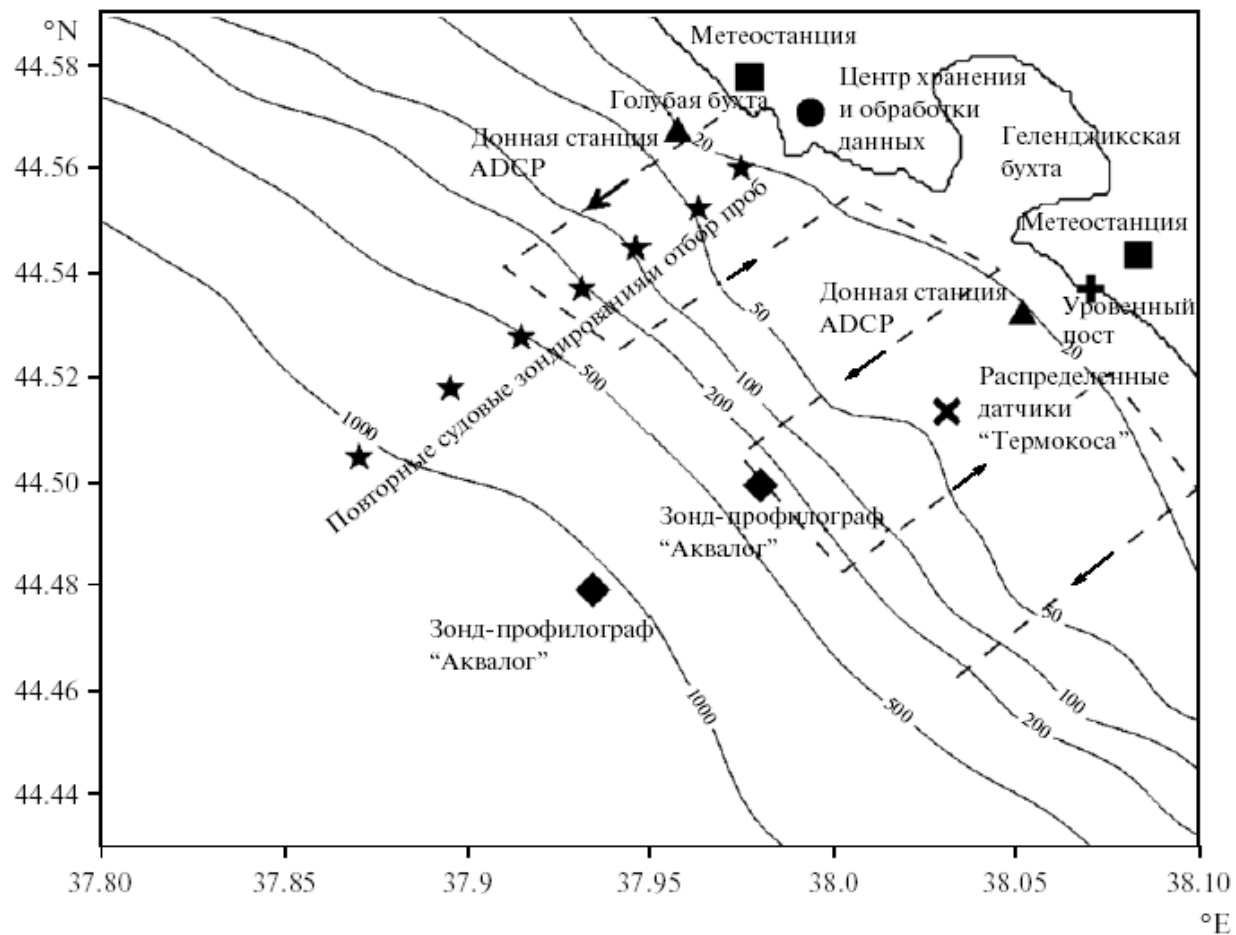
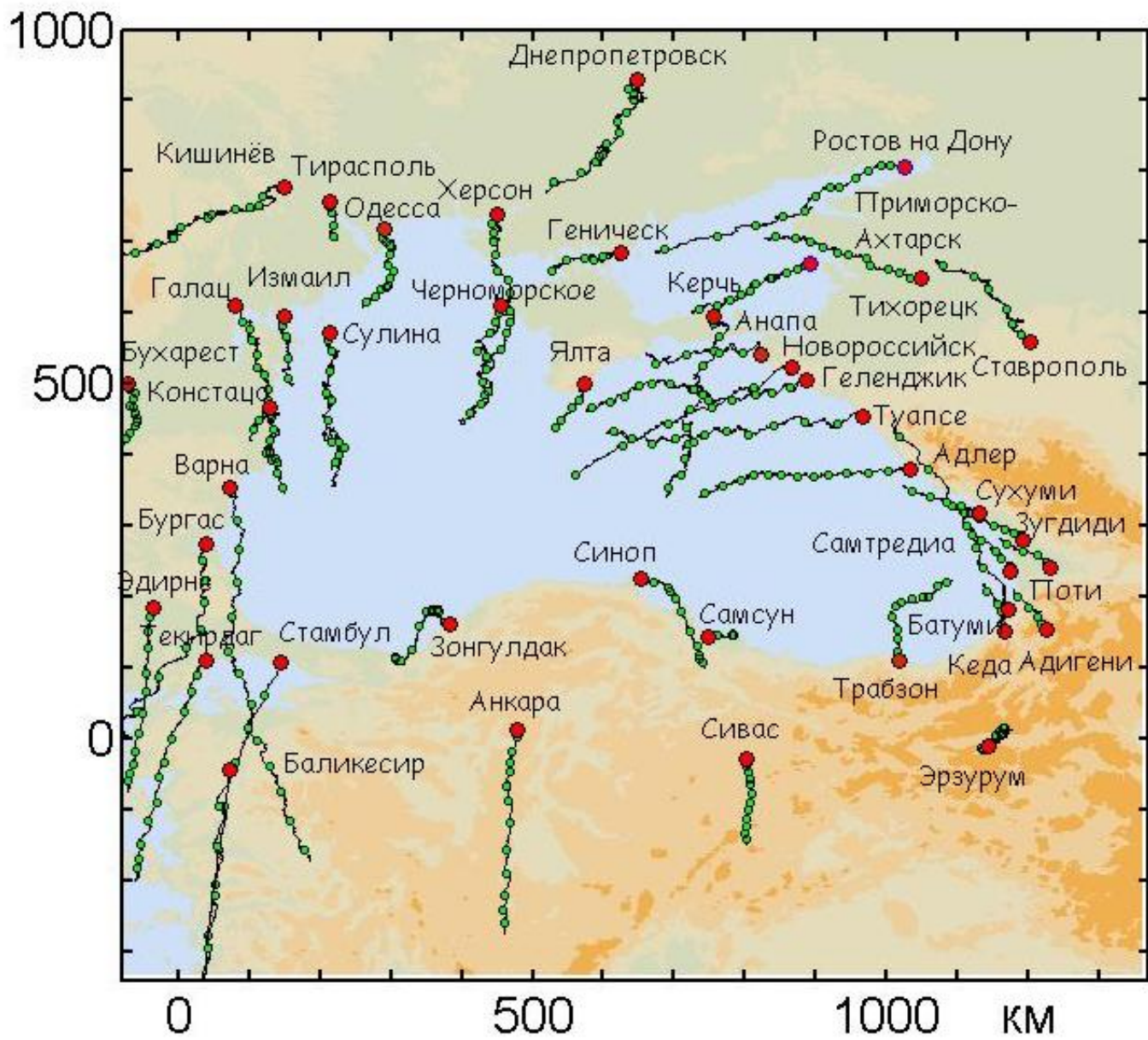
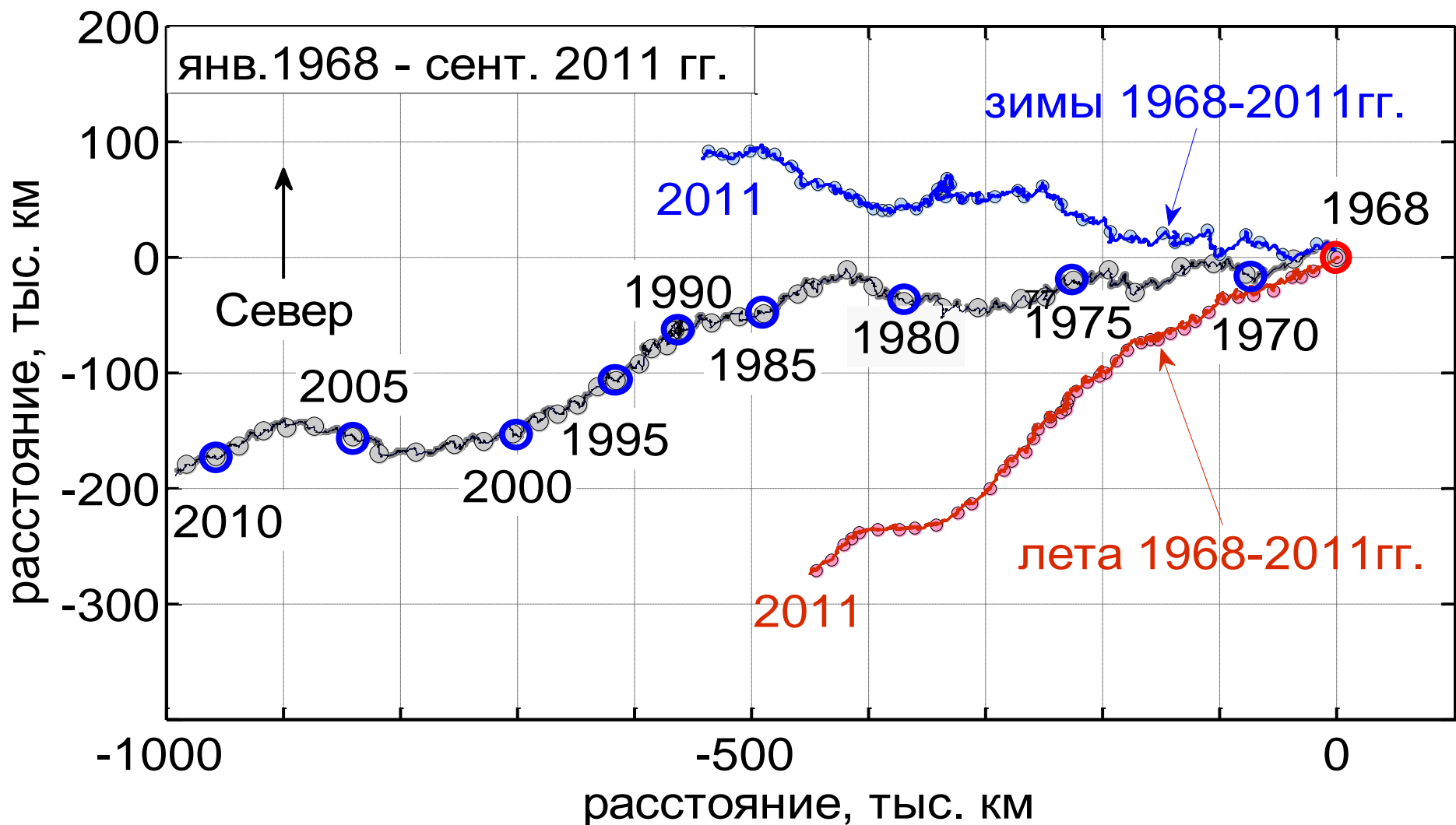


Схема экспериментального подспутникового гидрофизического полигона ИО РАН: Звездочками обозначены станции судовых мониторинговых наблюдений, включающих STD-зондирования. Штриховой линией со стрелками обозначены галсы судна при проведении измерений поля скорости течения, с помощью буксируемого за судном ADCP.



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.



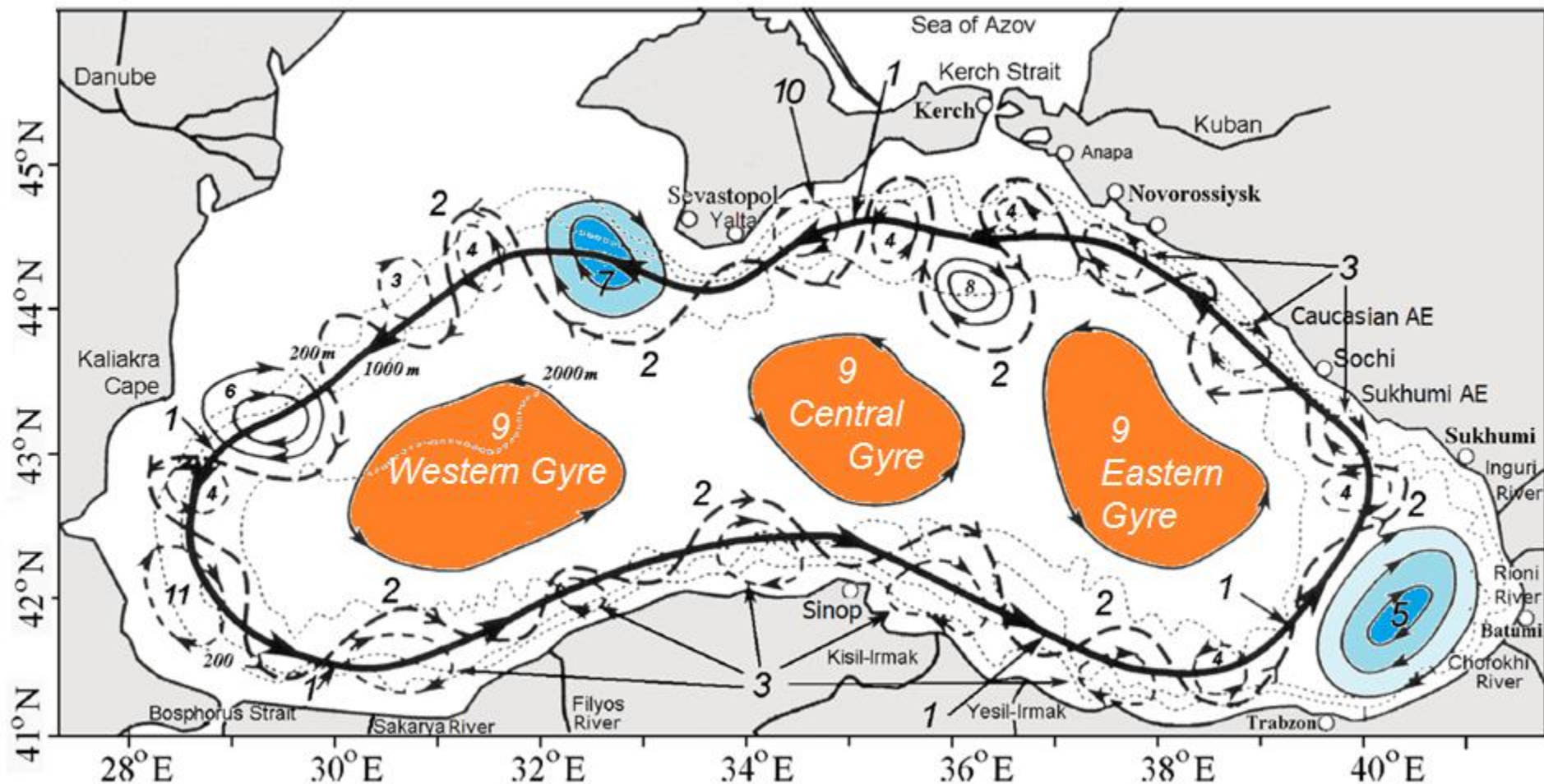
Долговременные изменения ветра на метеостанции Геленджика.
Показаны диаграммы сезонных ветров.

Районы интенсивной генерации топографических мезомасштабных вихрей

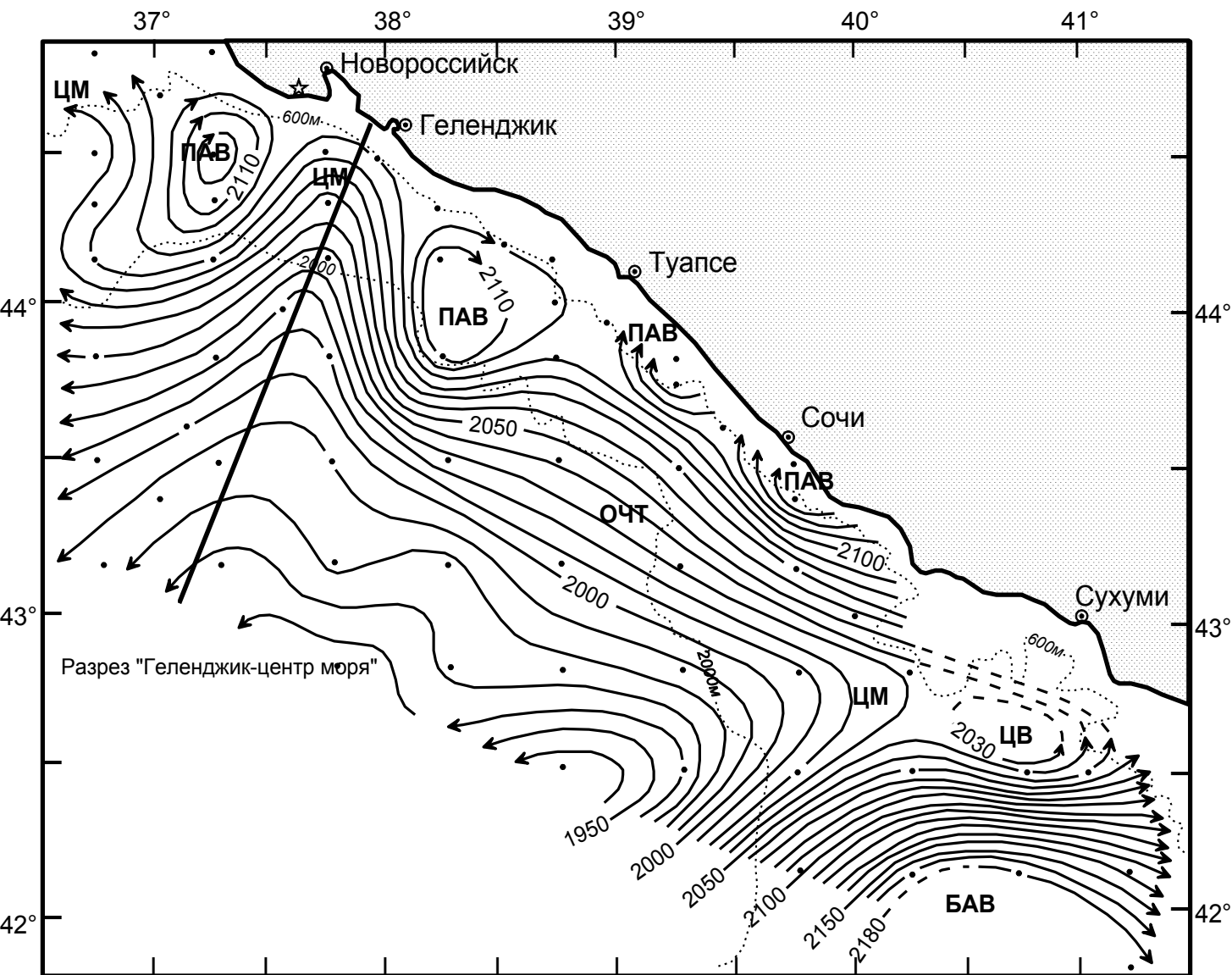


Неоднородность рельефа дна играет важную роль генезисе мезомасштабных вихрей в Черном море

ОЧТ и мезомасштабные структуры ЧМ



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



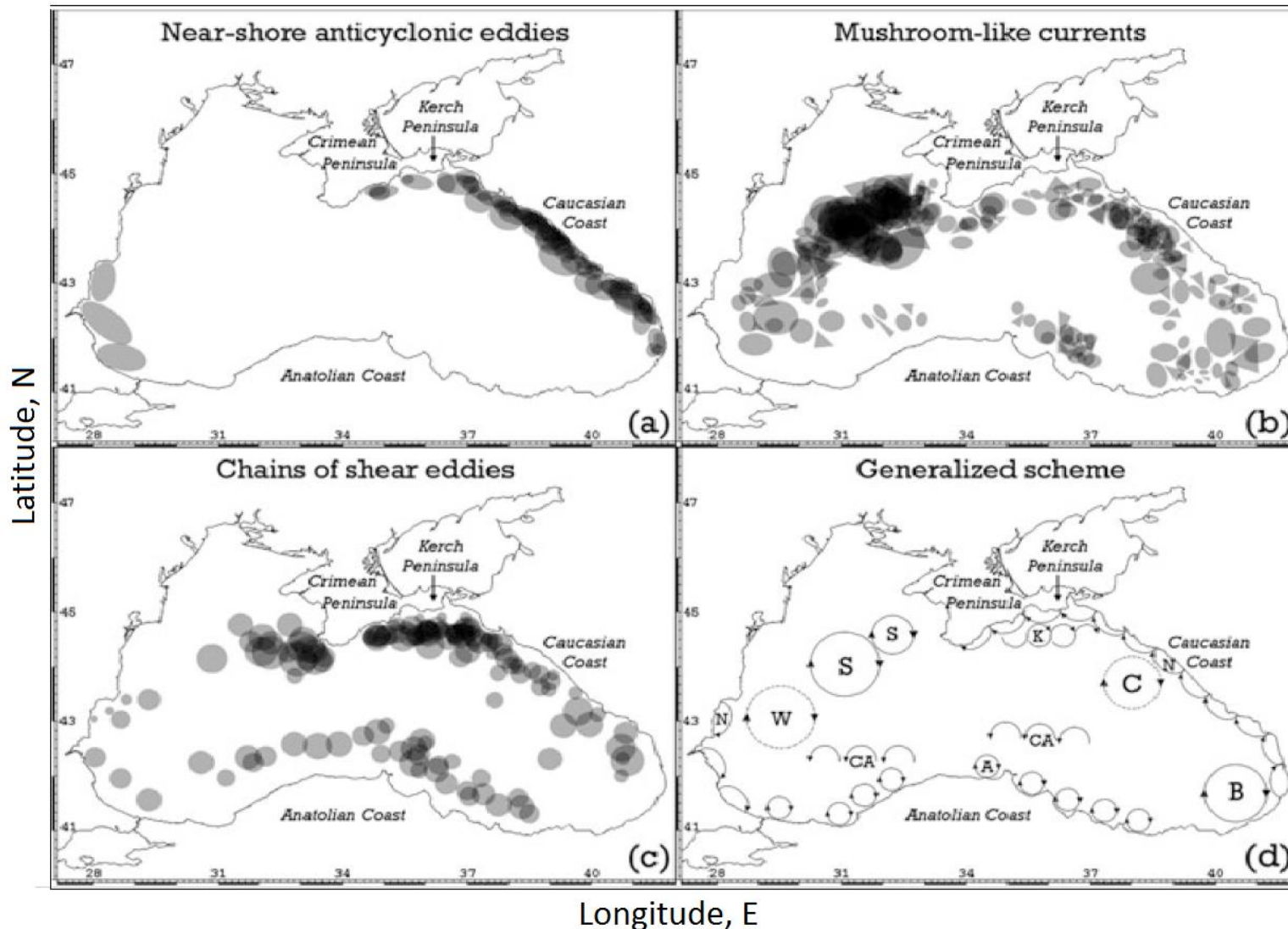
УДК 551.465.062.5
**ИЗМЕНЧИВОСТЬ
 СТРУКТУРЫ И
 ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД
 ПО ДАННЫМ
 МНОГОЛЕТНЕГО
 МОНИТОРИНГА НА
 СТАНДАРТНОМ
 100-МИЛЬНОМ
 РАЗРЕЗЕ
 «ГЕЛЕНДЖИК -
 ЦЕНТР МОРЯ»**
*Кривошея В.Г.,
 Якубенко В.Г.,
 Москаленко Л.В.,
 Кузеванова Н.И.*

Геострофическая циркуляция вод на поверхности моря относительно

изобарической поверхности 500 дб 25.06-06.07 1996 г.

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

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

S. Karimova in:

Remote Sensing of the Changing Oceans | SpringerLink, 2011

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 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;

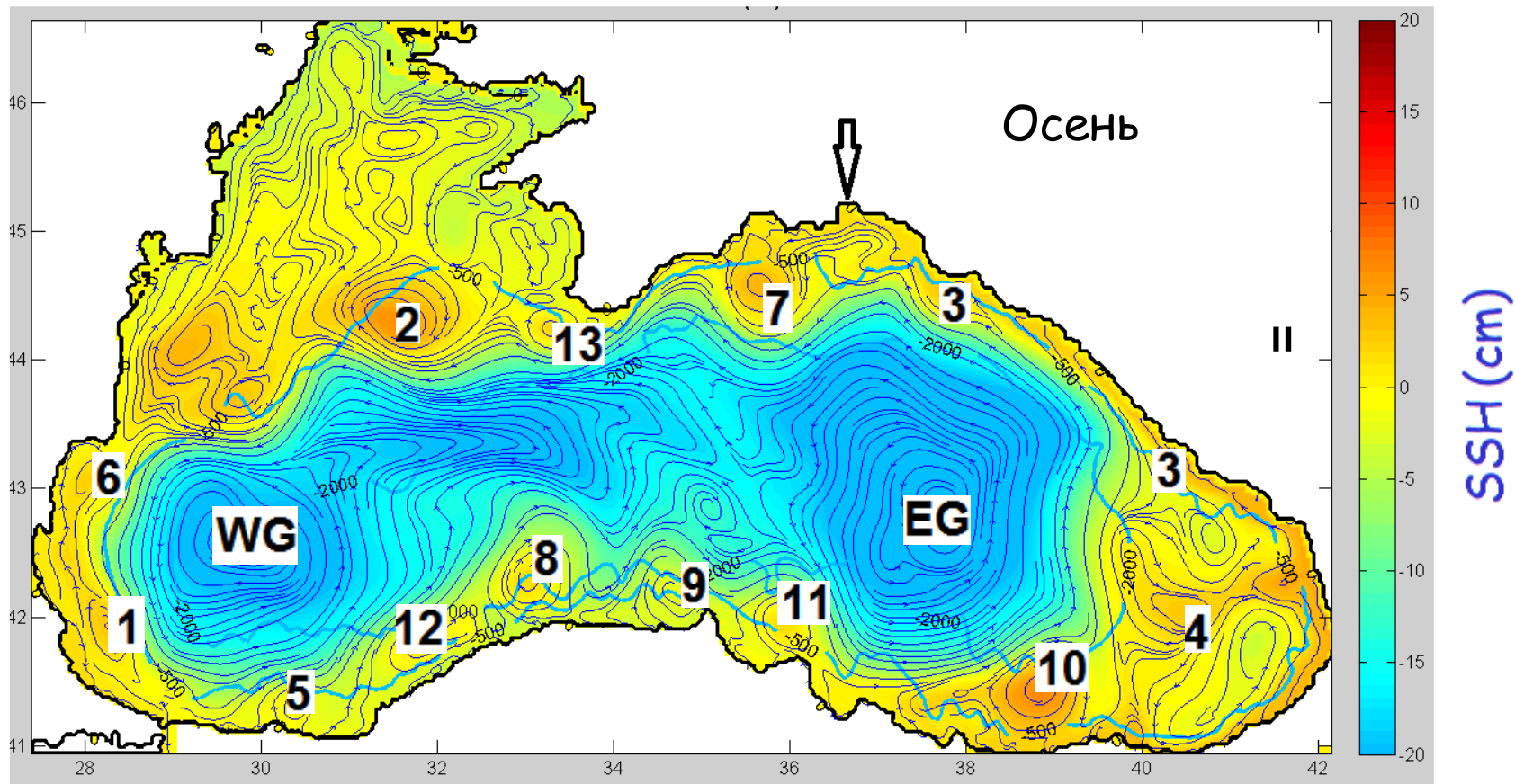
2-min for the Black Sea applied:

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;

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, 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 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 $Q^2 \neq 0$

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 $\psi_0(\eta)$:

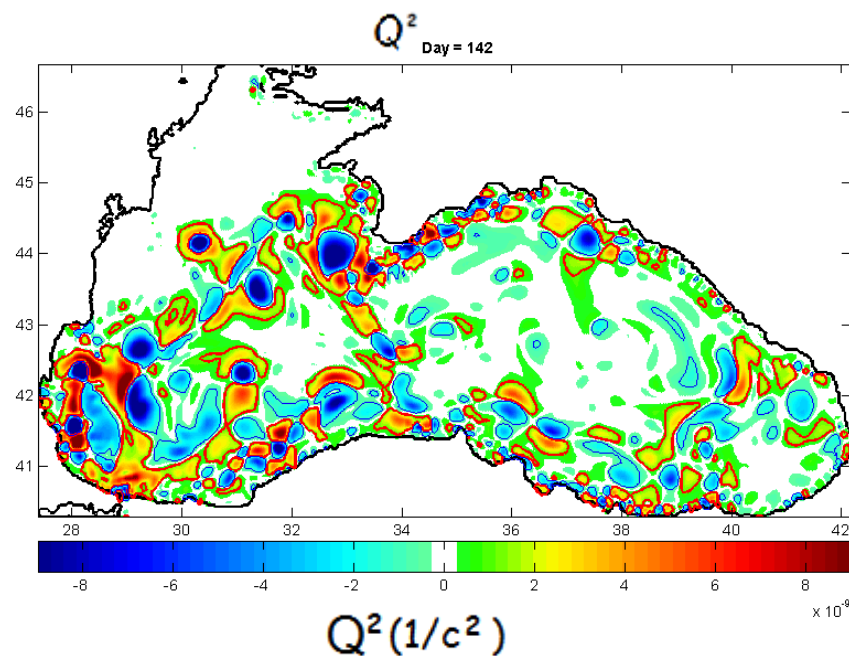
$$W_n(s) = \sum_n^{N-1} X_{n'} \psi^* \left(\frac{(n' - n)\delta t}{s} \right) ,$$

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.

Пространственно-временное распределение параметра Окубо-Вейсса в Черном море

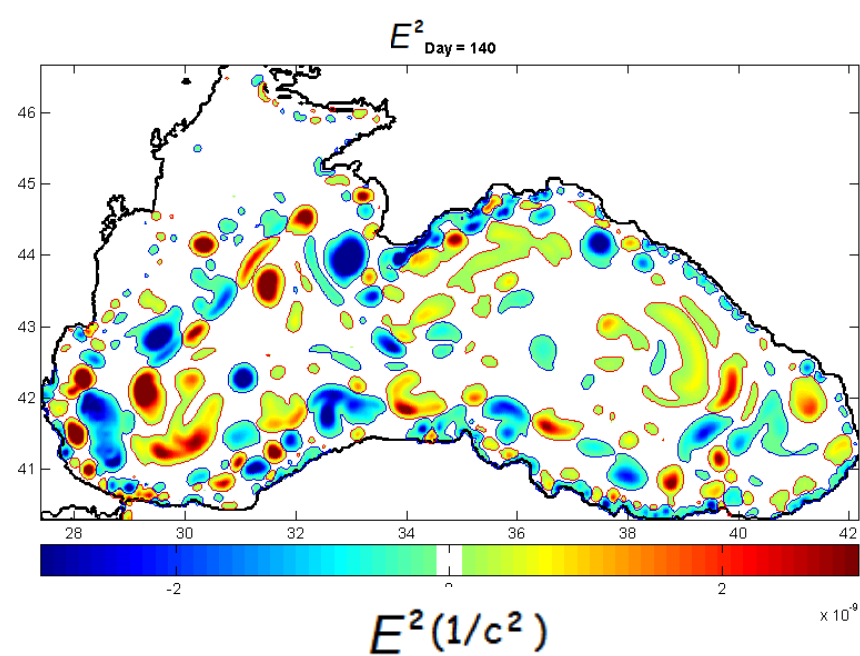
Классический Метод Окубо-Вейса



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

Красный цвет - области, где преобладает деформация скорости

Модифицированный метод Окубо-Вейса

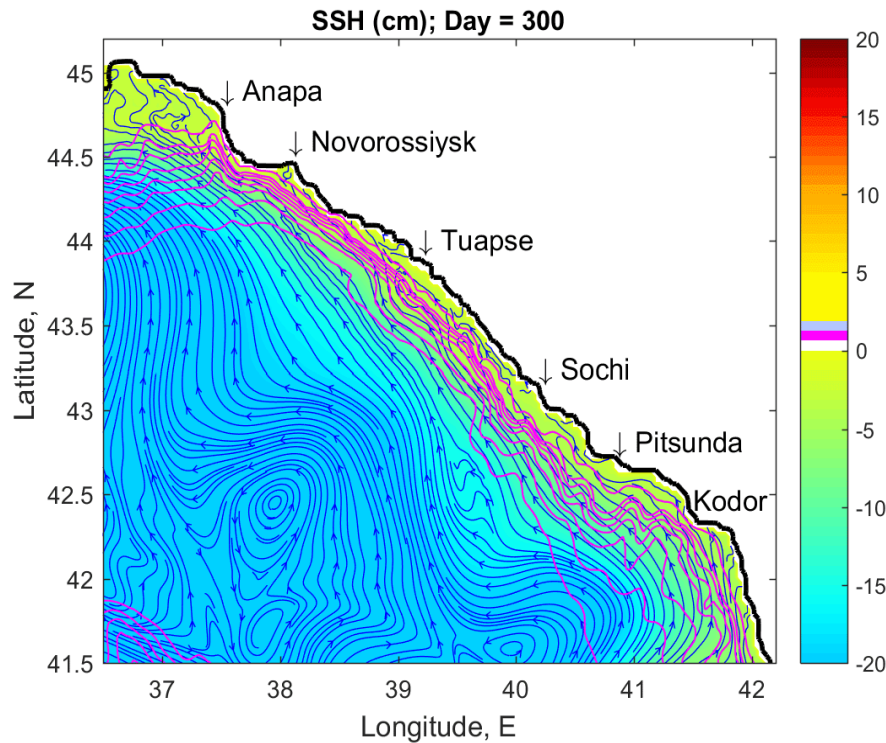


Синий цвет - ядра антициклонических вихрей

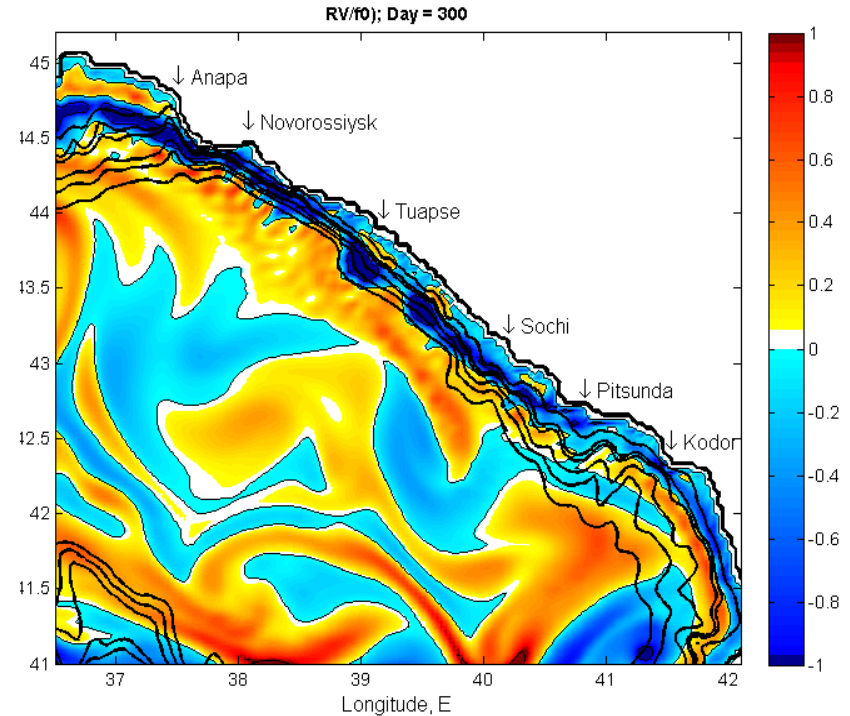
Красный цвет - ядра циклонических вихрей

Генерация и эволюция Кавказского антициклонического вихря (КАВ).

Поверхность моря



Аномалия уровня (см)

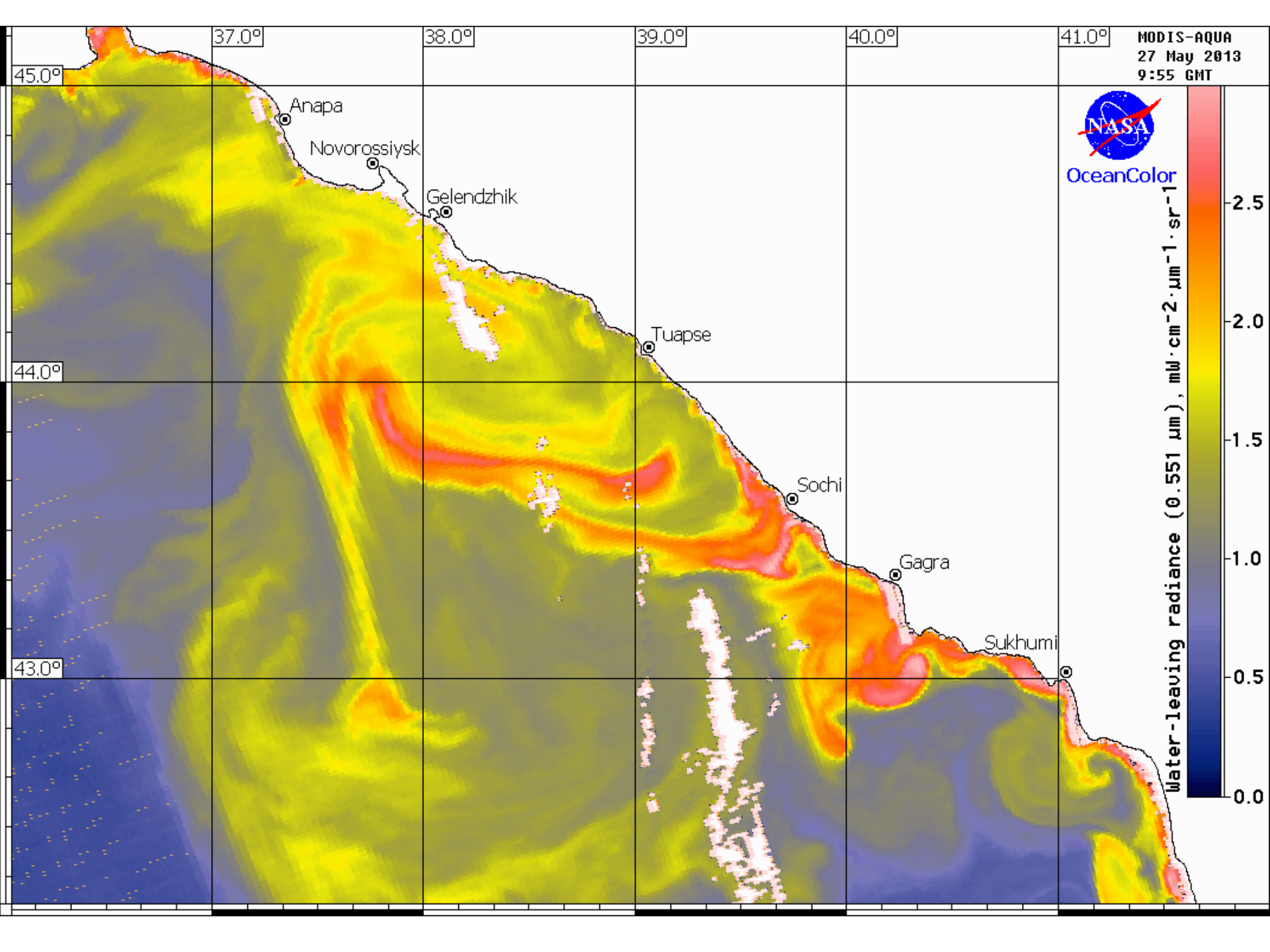


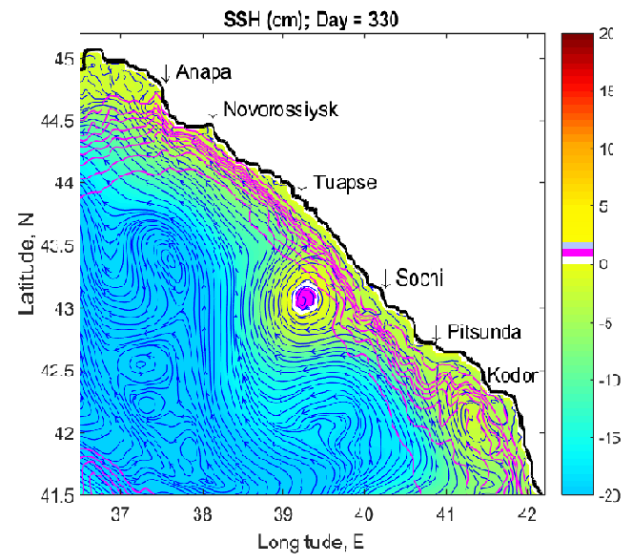
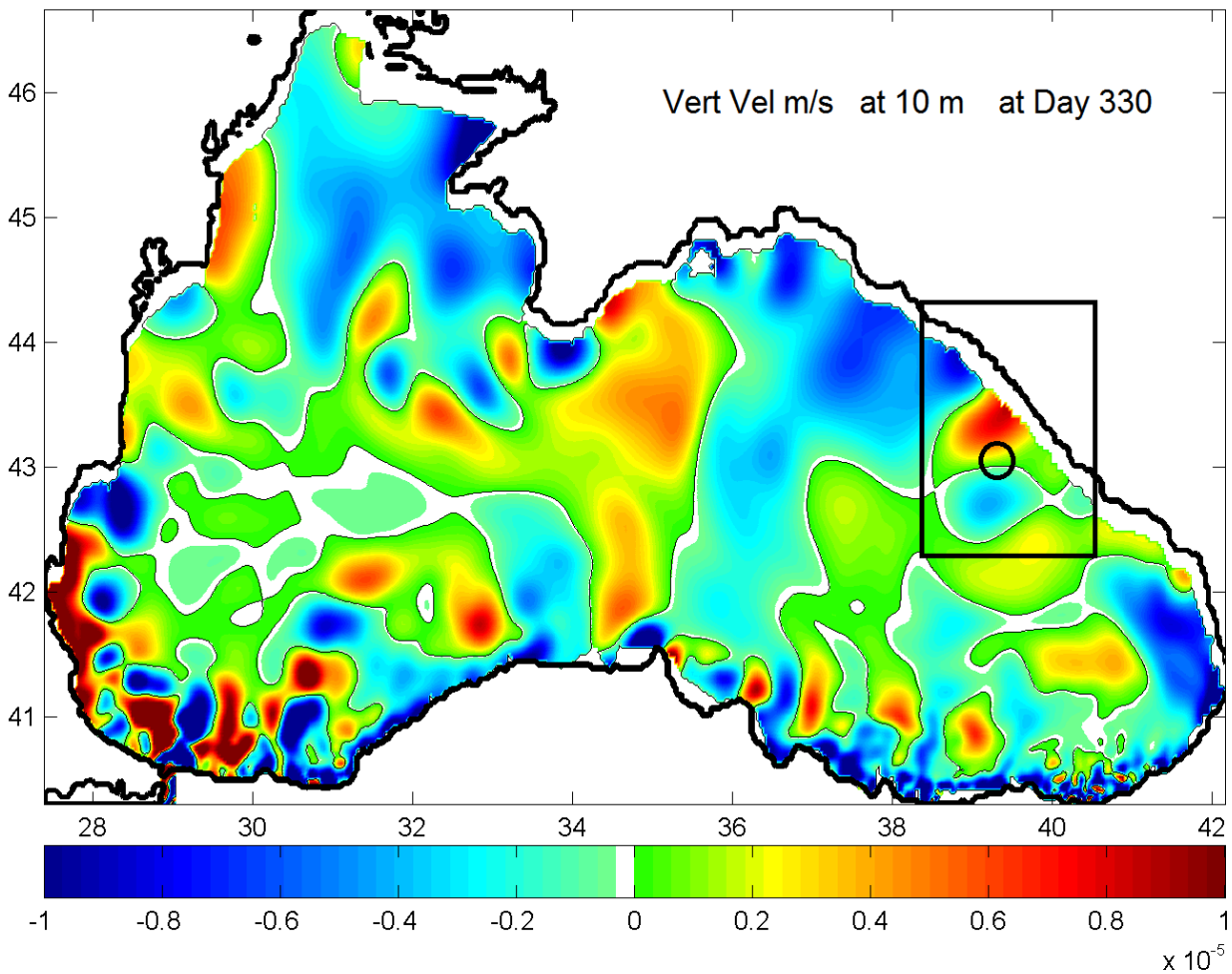
Относительная завихренность (ω/f)

Особенности генерации АЦ вихря за мысом Пицунда:

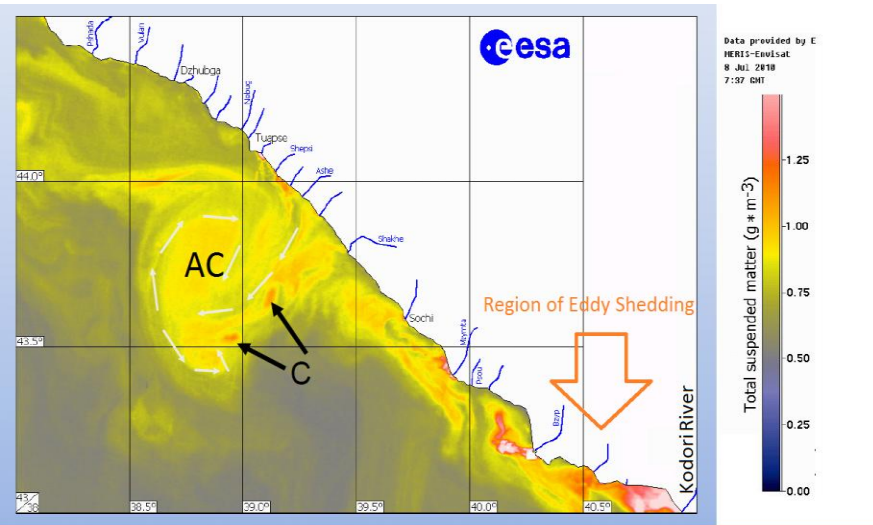
- 1) Большую часть года Батумский АЕ вытесняет ОЧТ от берега, но
- 2) когда ОЧТ подходит близко к берегу (обычно это происходит зимой) и обтекает подводный хребет в районе между м. Кодори и Пицунда, тогда возникает Кавк. АЕ, который идет к Новороссийску, где он диссипирует.

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

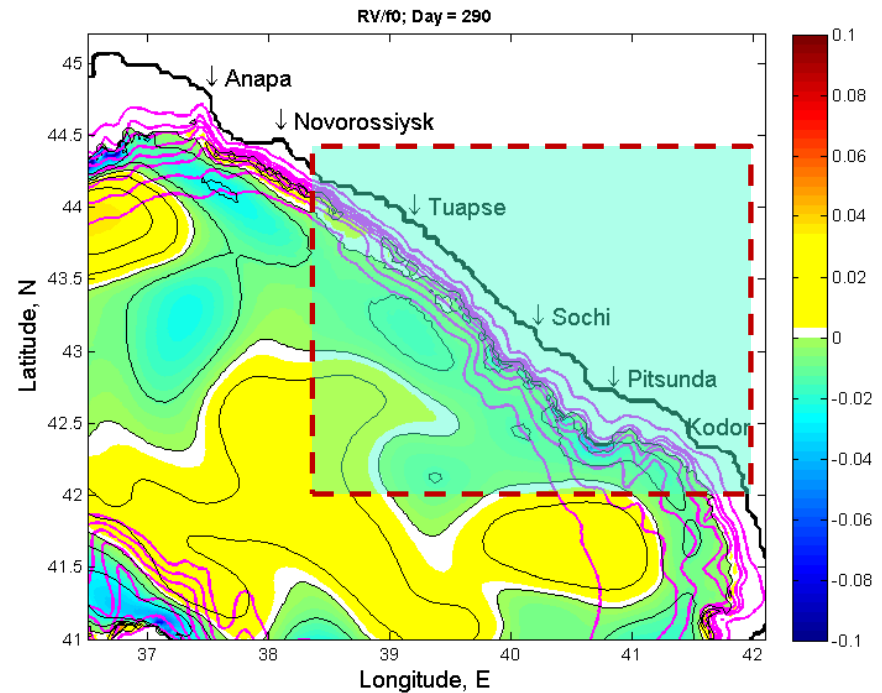




Захват речных стоков прибрежным КАВ. Формирование КАВ в глубинном слое



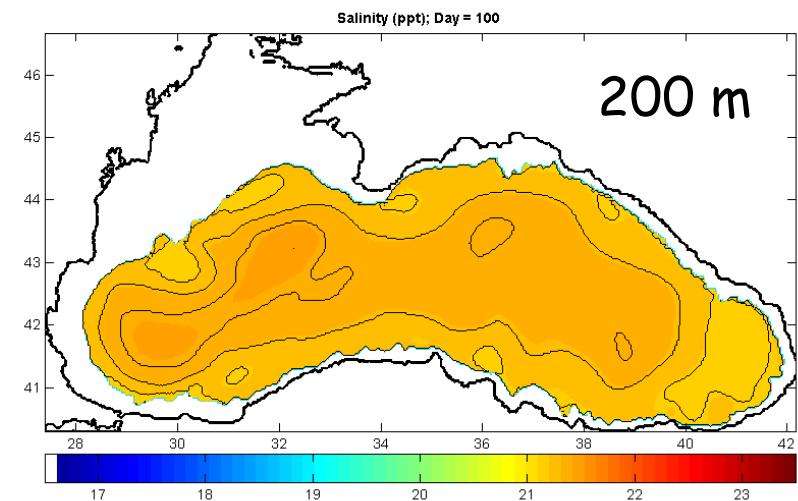
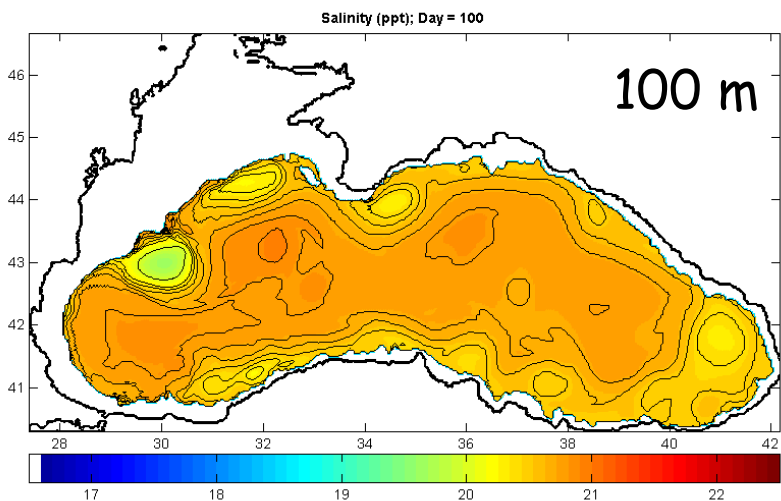
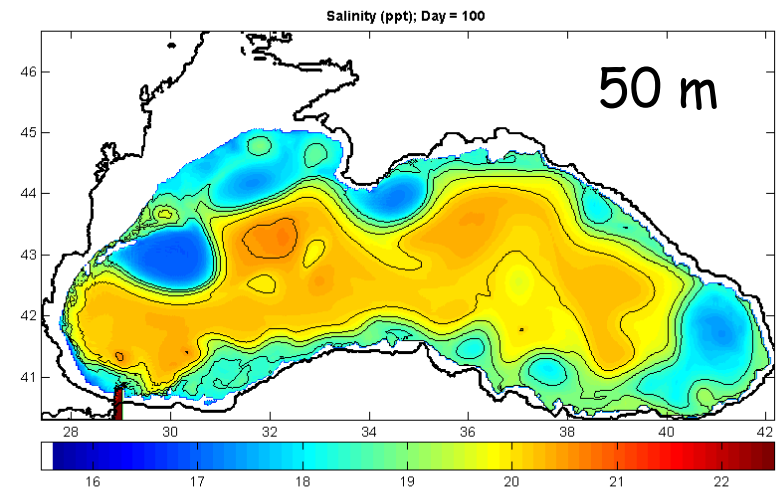
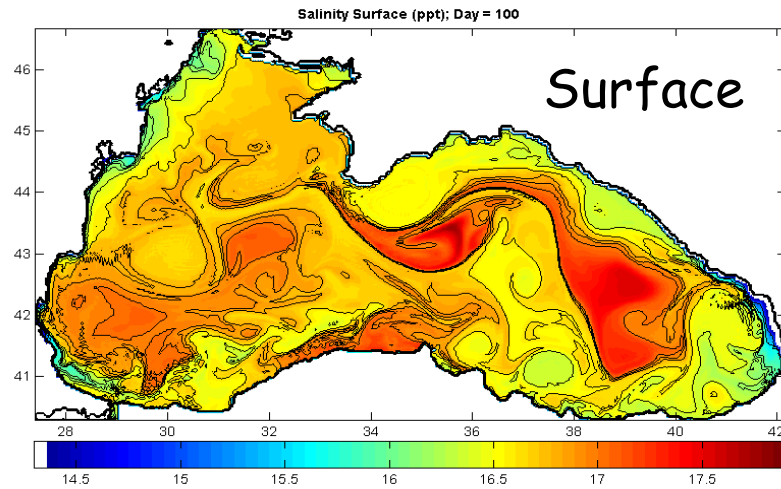
Caucasian Near-Shore Mesoscale AC Eddy (NAE) and Submesoscale Cyclonic Eddies at periphery of NAE
A. Zatsepin personal communication

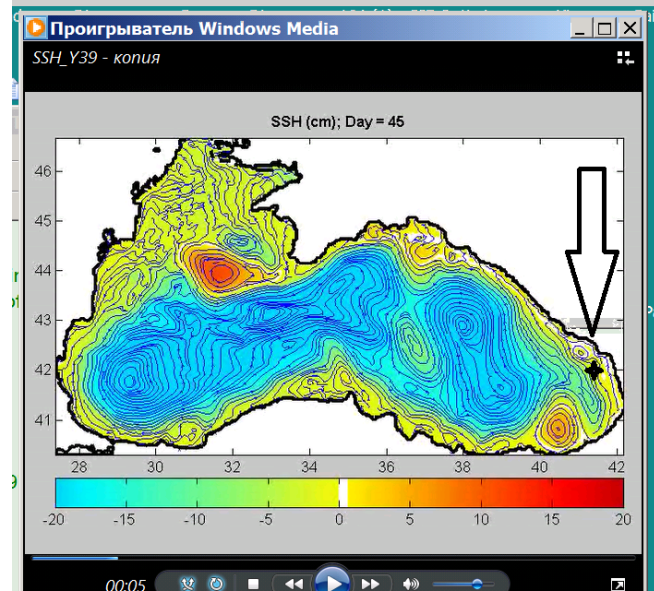
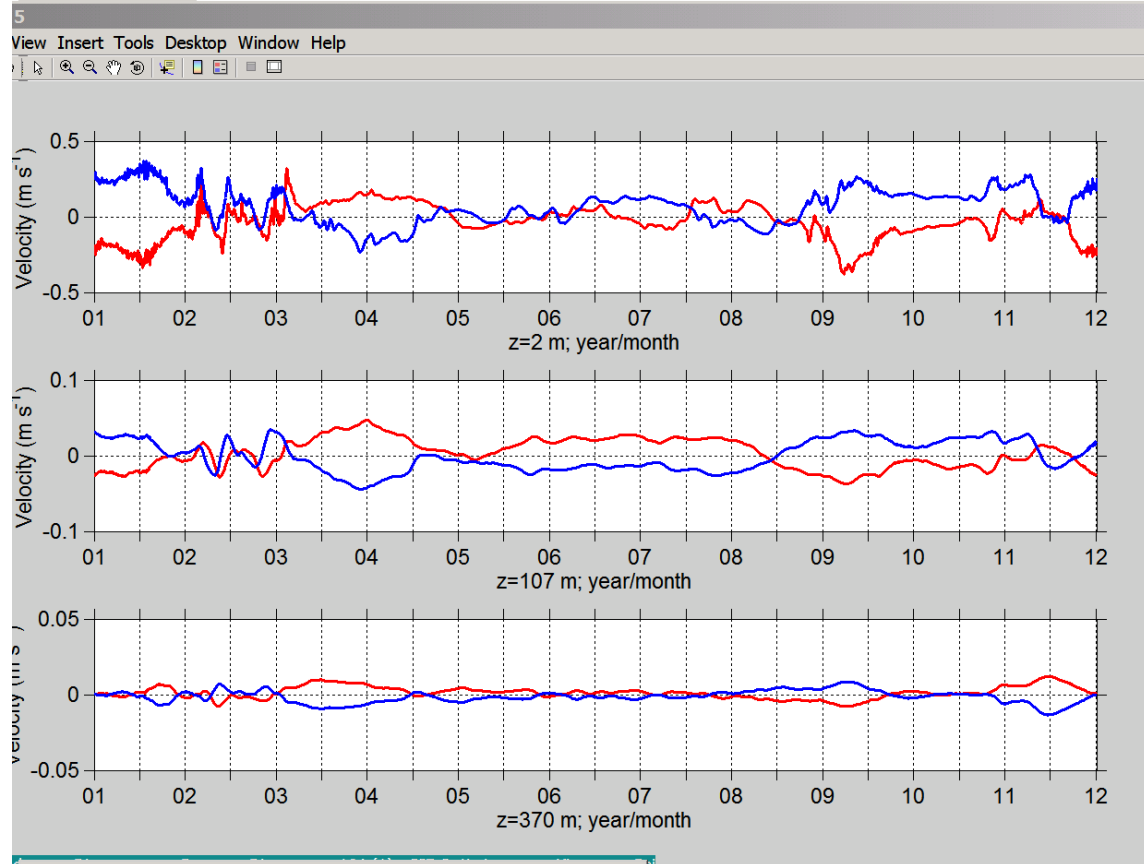


Модель показывает, что КАВ у дна опережает тот, который развивается на поверхности моря, что означает его происхождение за счет генерации в из-за обтекания подводного хребта

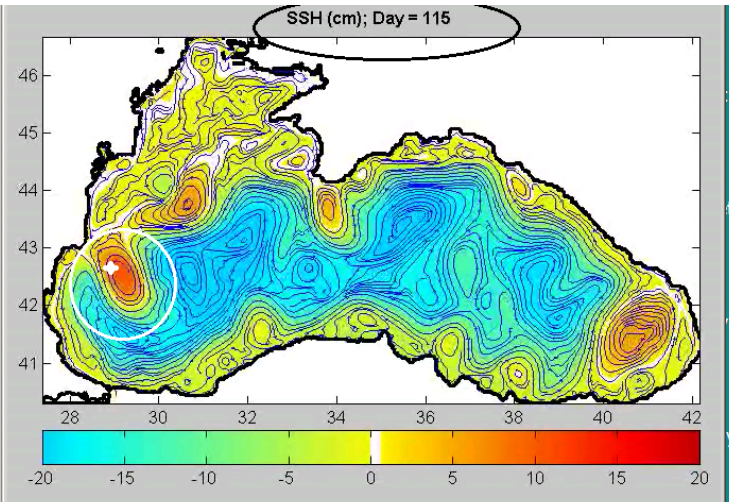
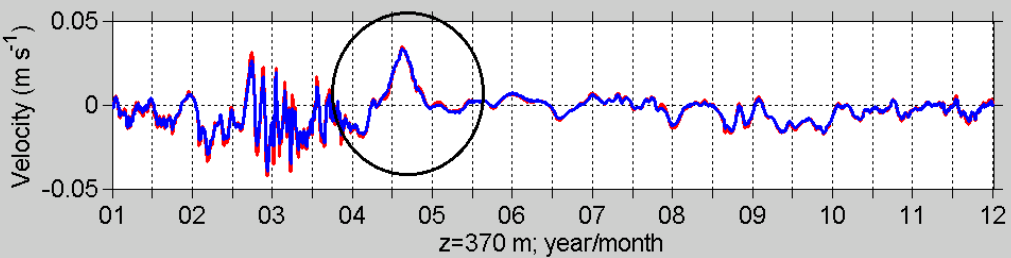
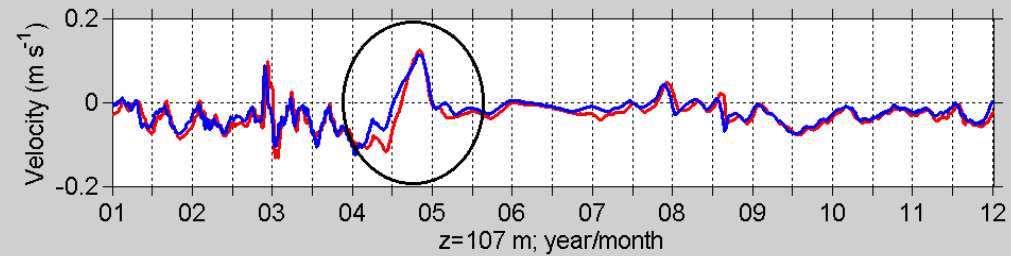
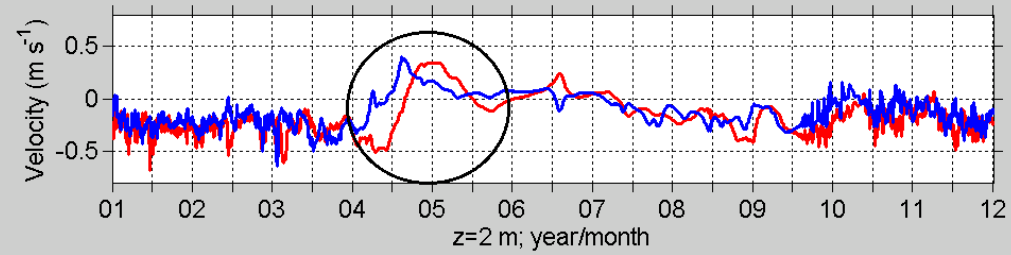
Спутниковый снимок иллюстрирует захват Вихрем взвешенного вещества, поступающего со стоком многочисленных мелких рек. Захваченная примесь компактно переносится вдоль Кавказского побережья вплоть до диссипации КАЕ.

Соленость на разных горизонтах





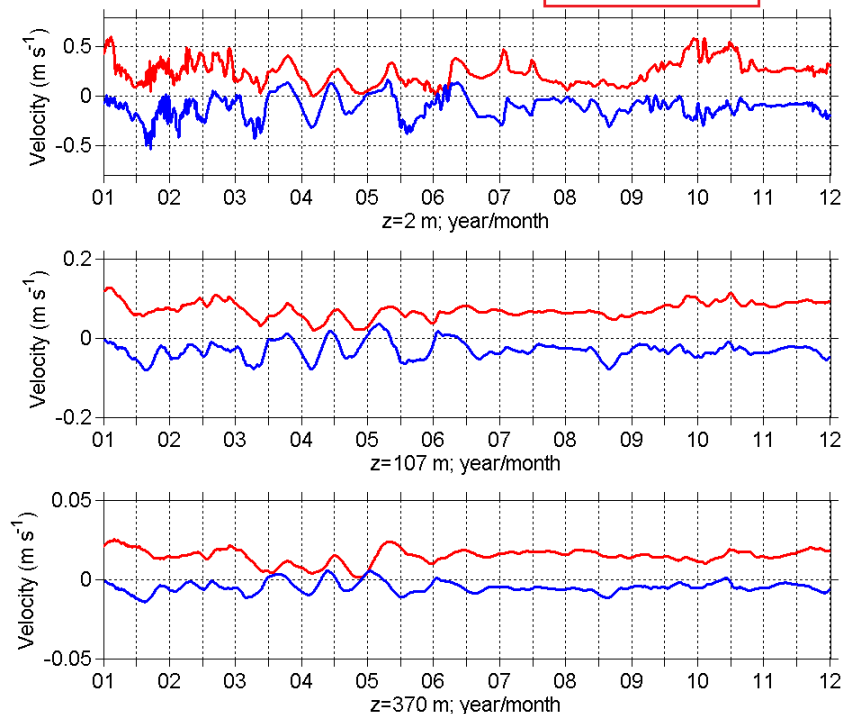
Скорости у мыса Кодор



Sevastopol AE passing offshore by Kaliakra Cape

Kizil-Irmak offshore

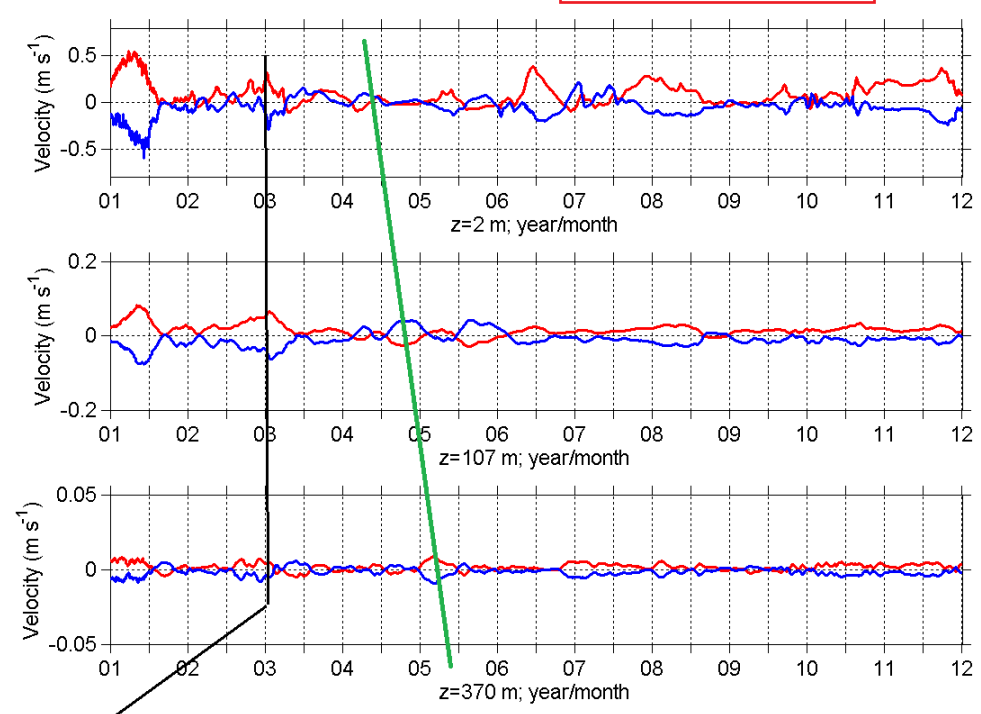
периферия вихрей?



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

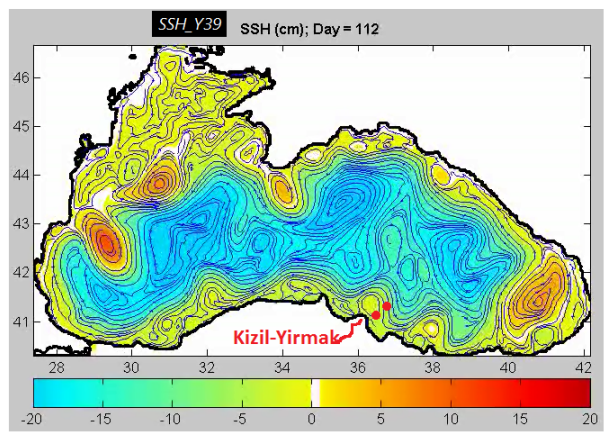
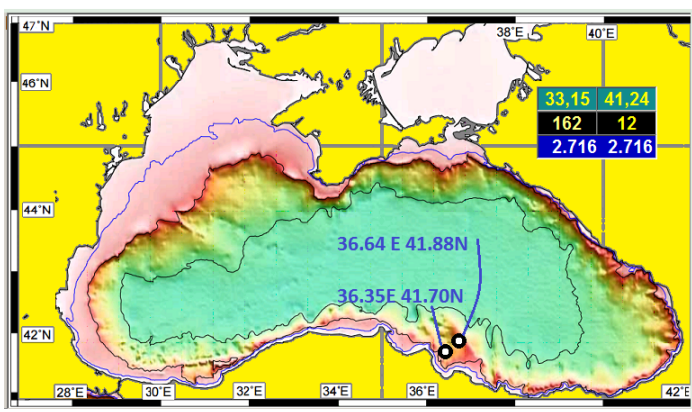
Kizil-Yirmak near-shore

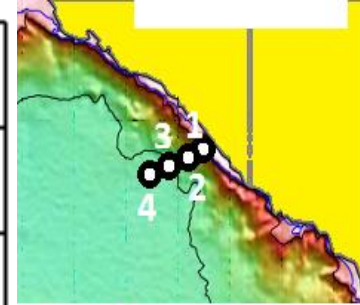
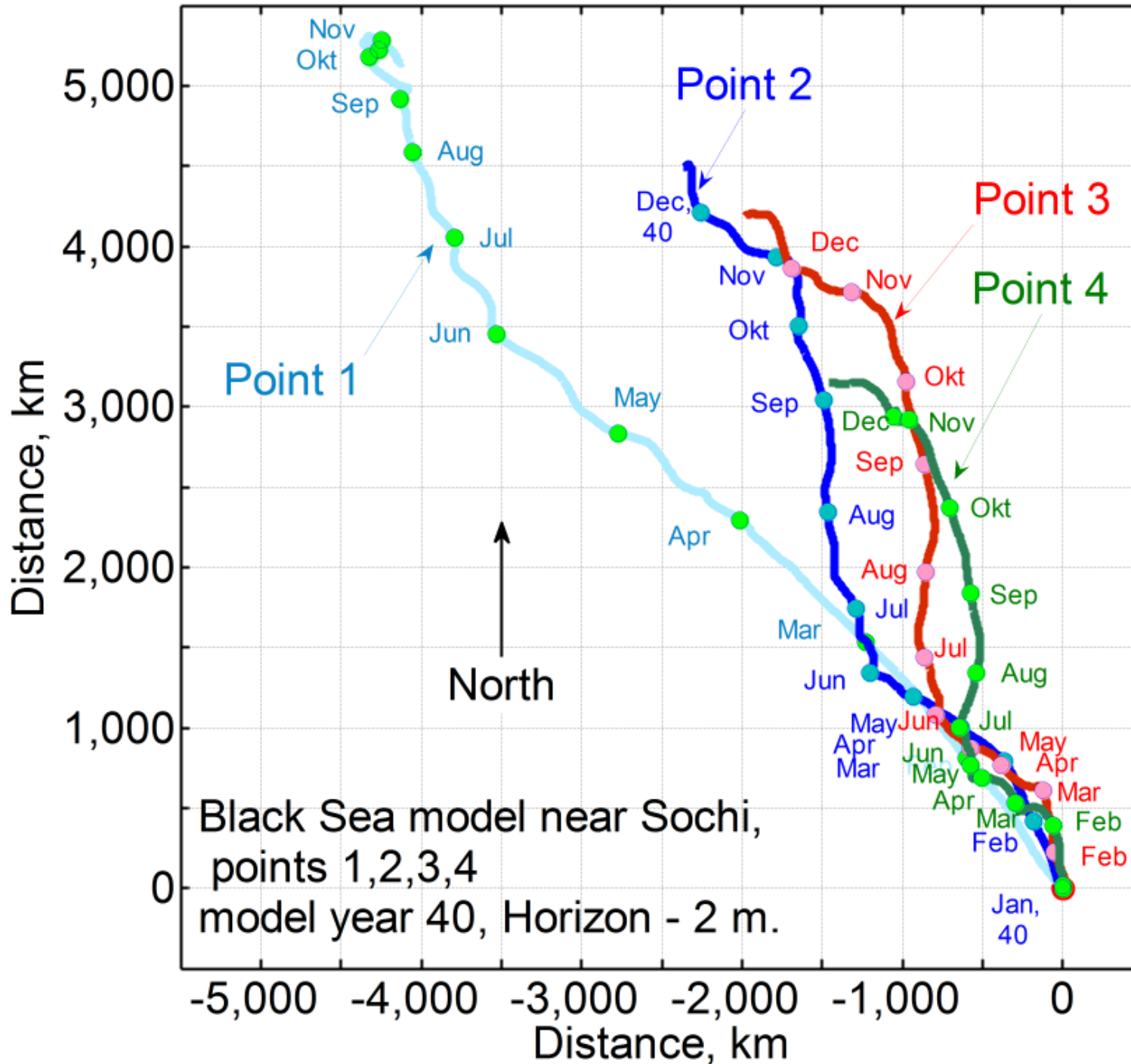
Проходят когерентные вихри



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





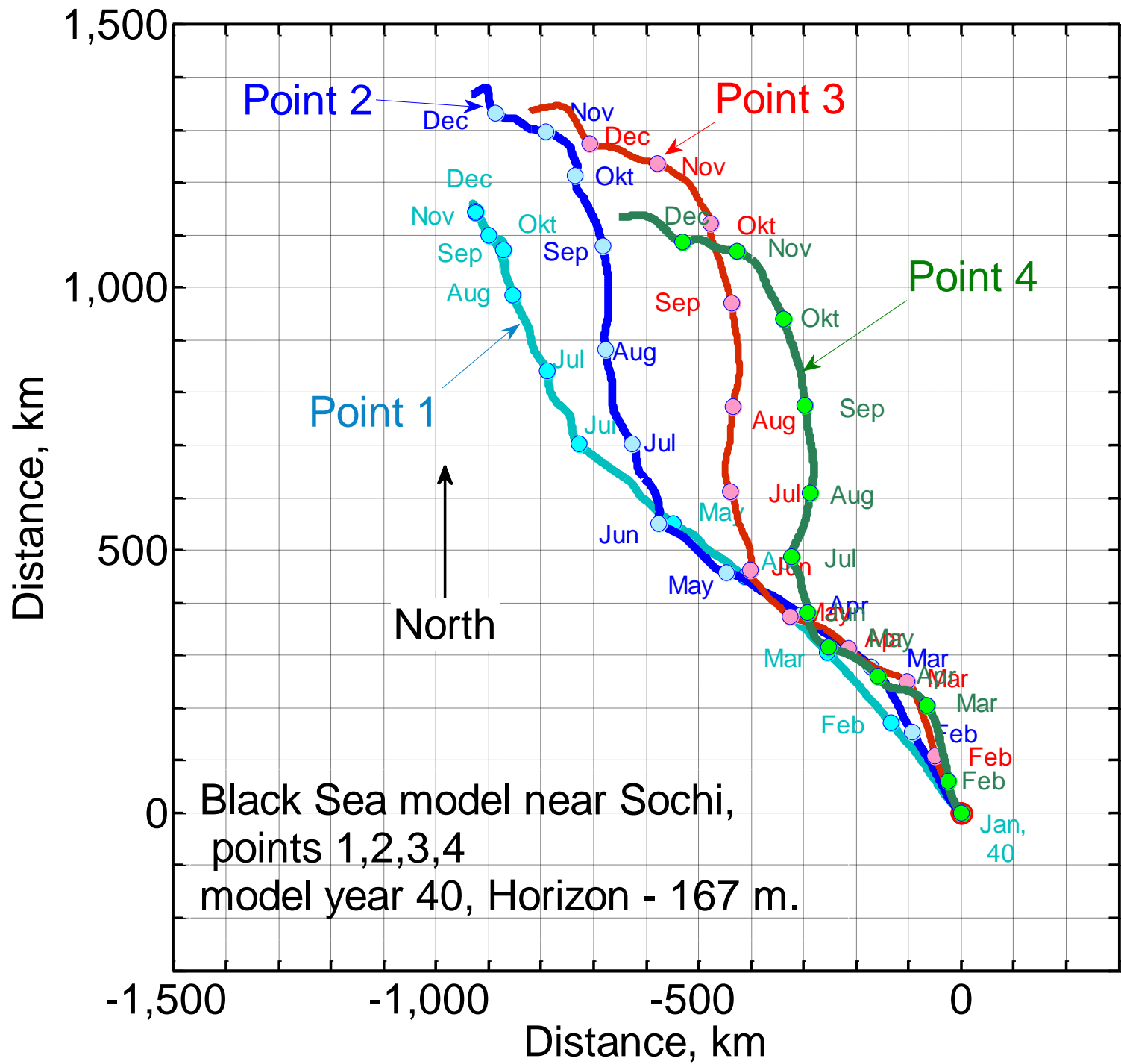
1- 39,15E; 43,73N

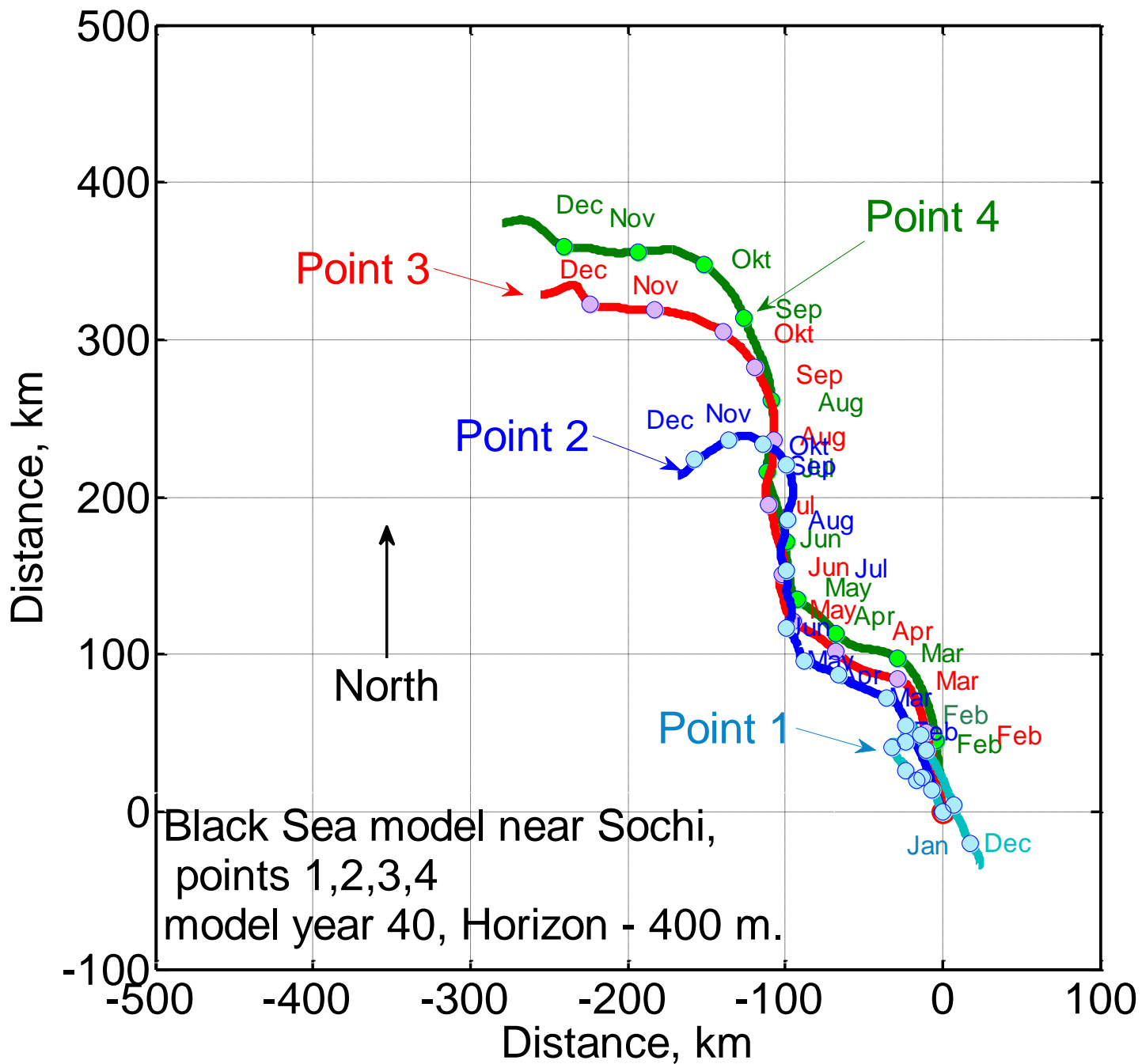
2- 38,96E; 43.68N

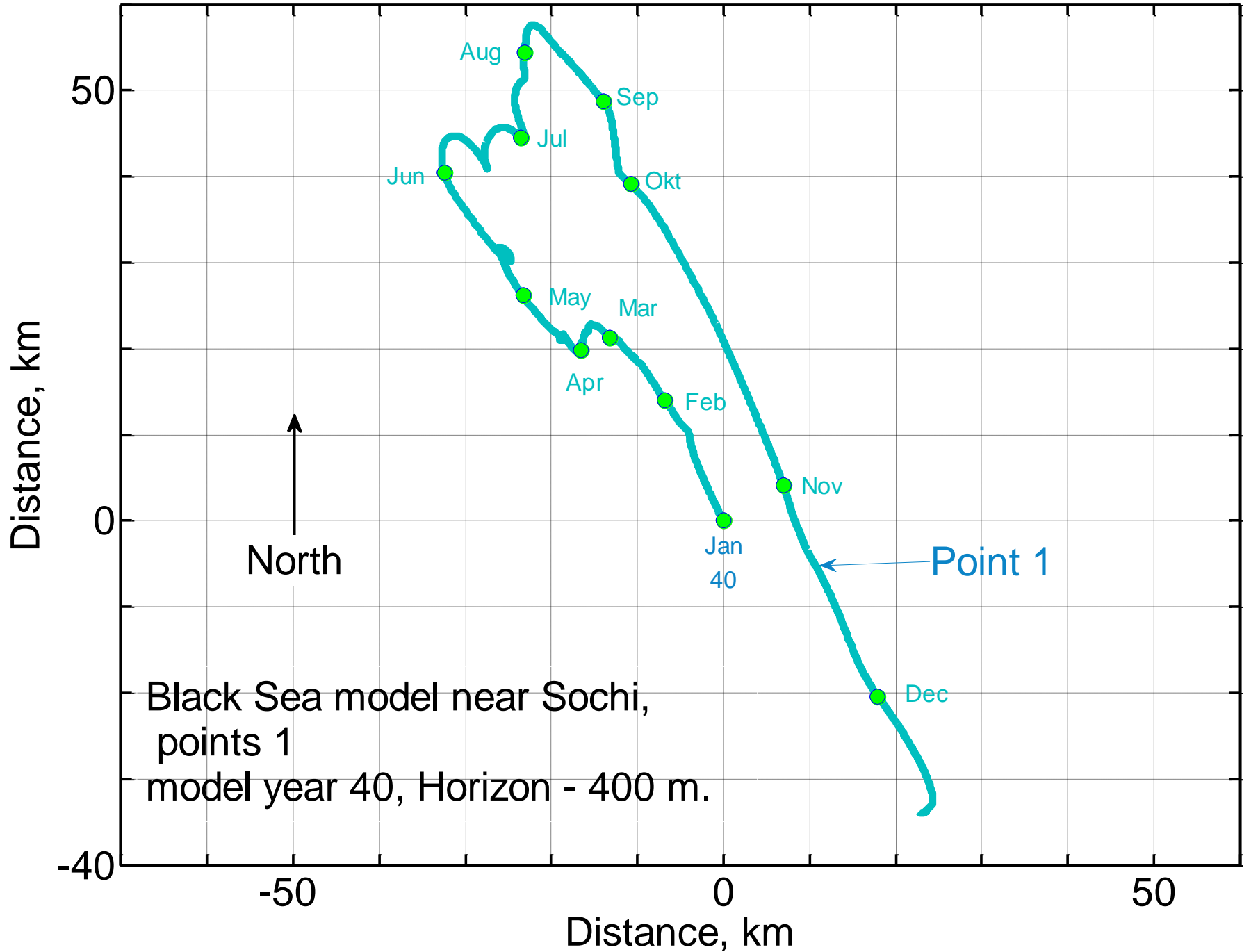
3- 38,76E; 43,58N

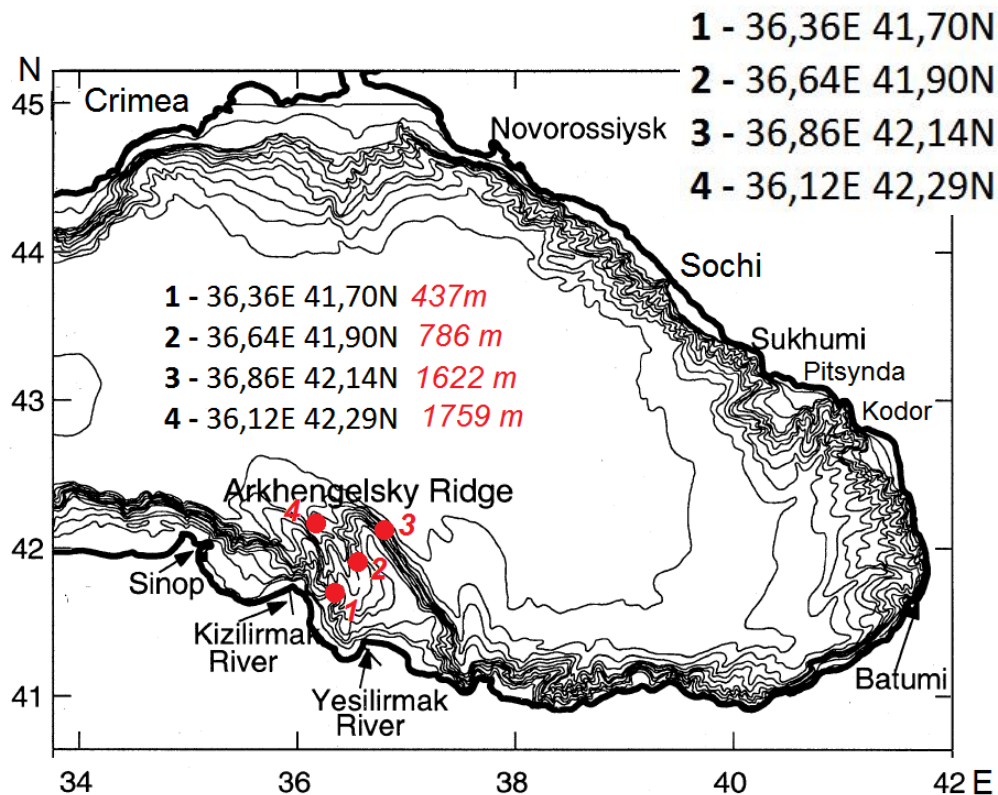
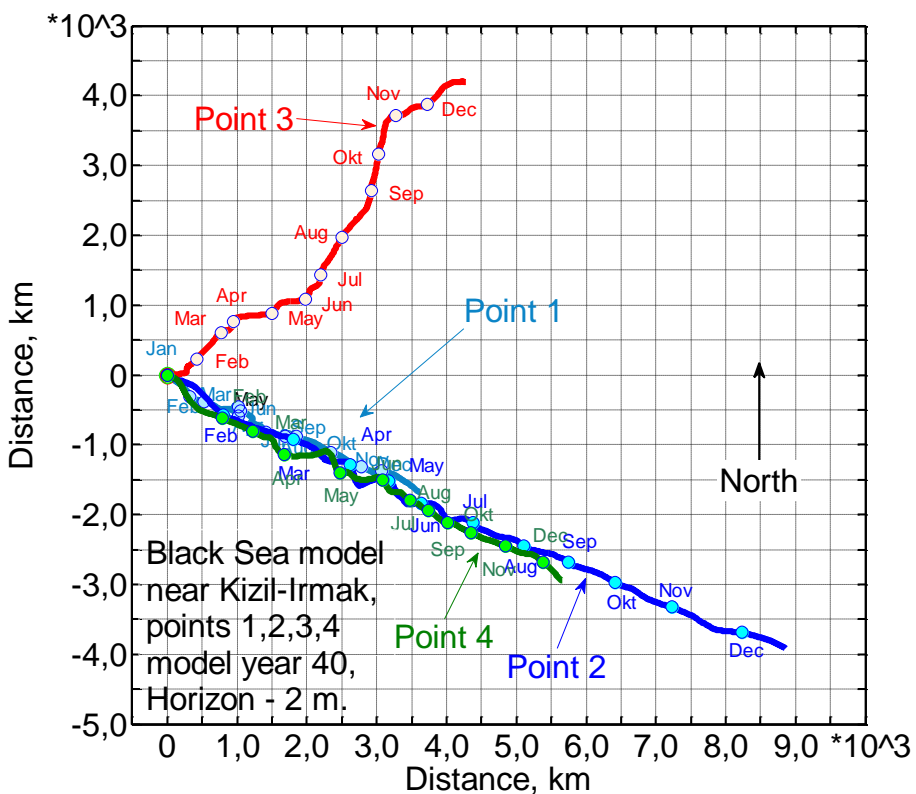
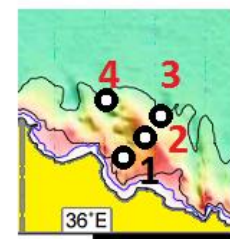
4- 37,47E; 43,51N

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.









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.

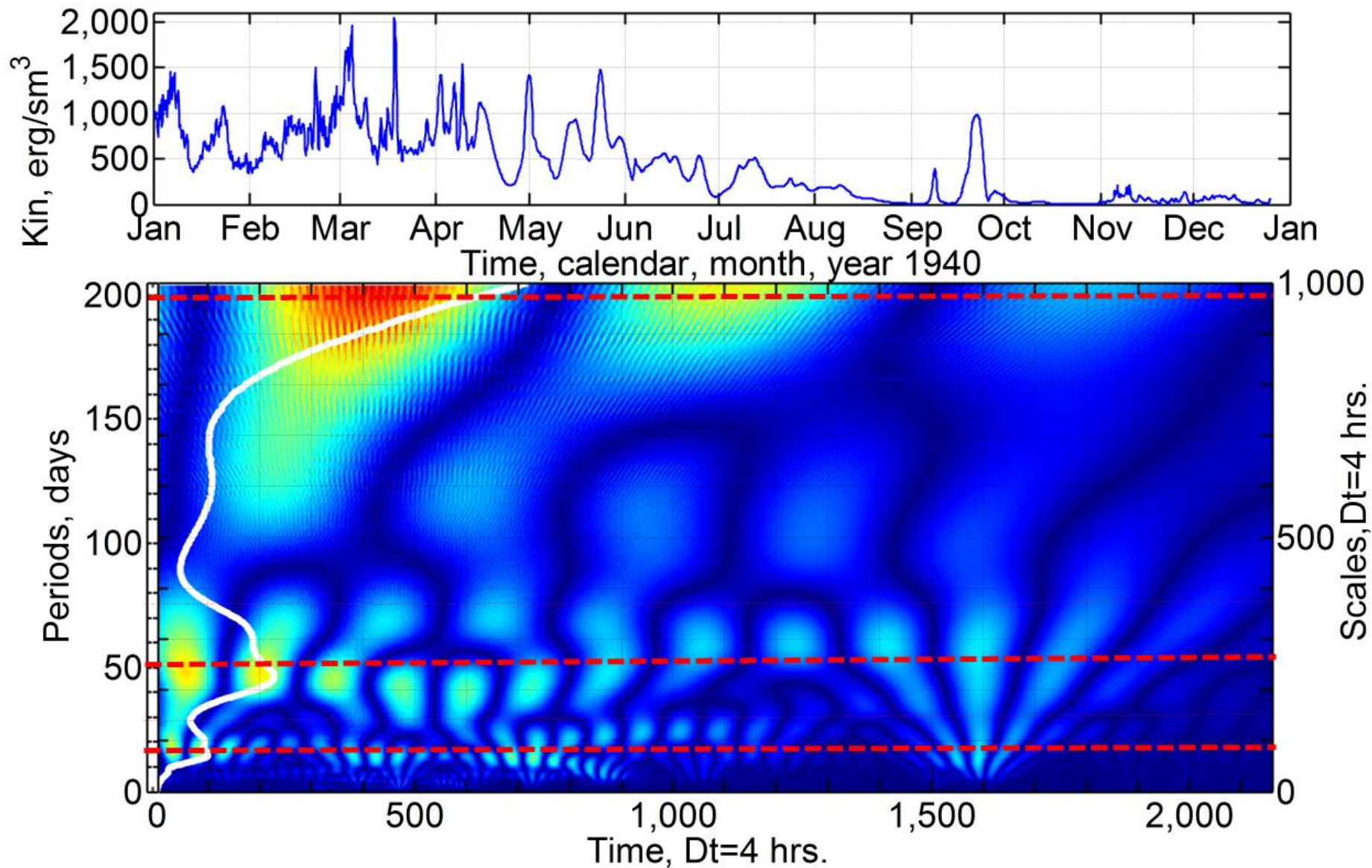
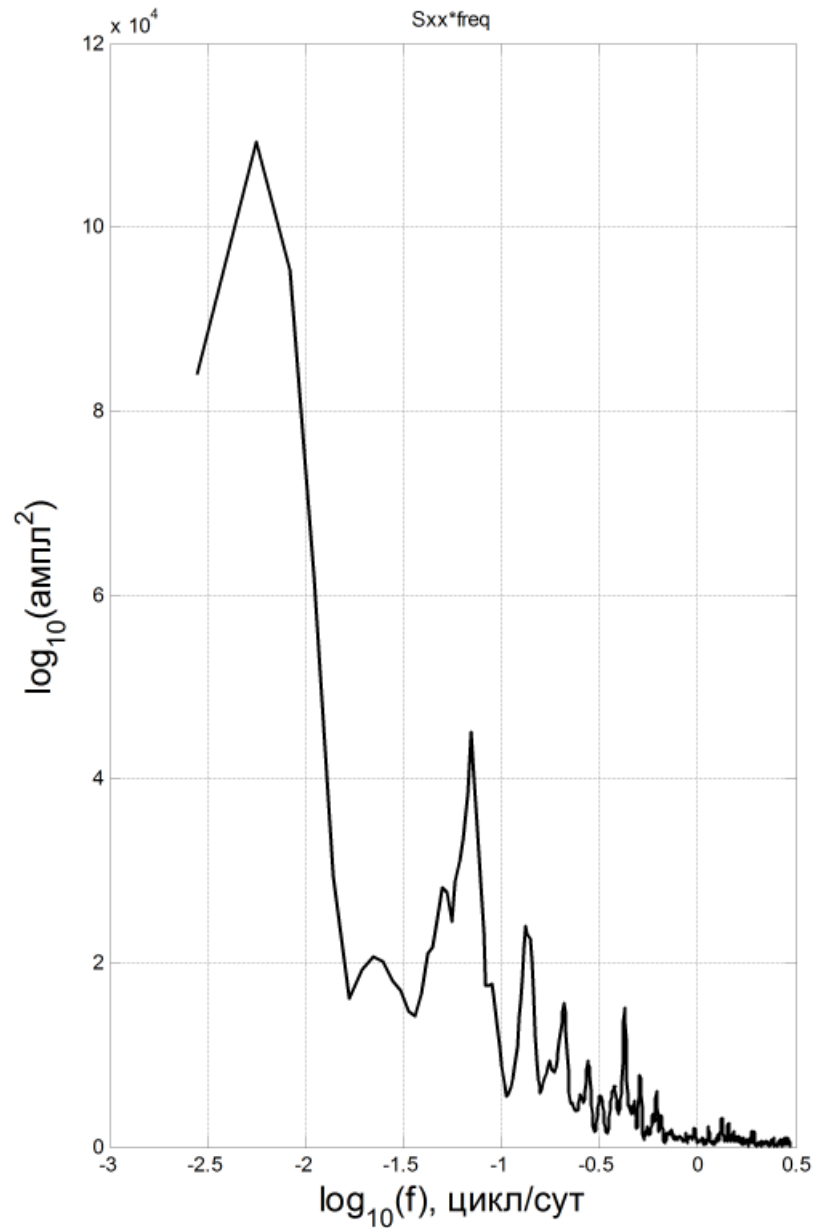
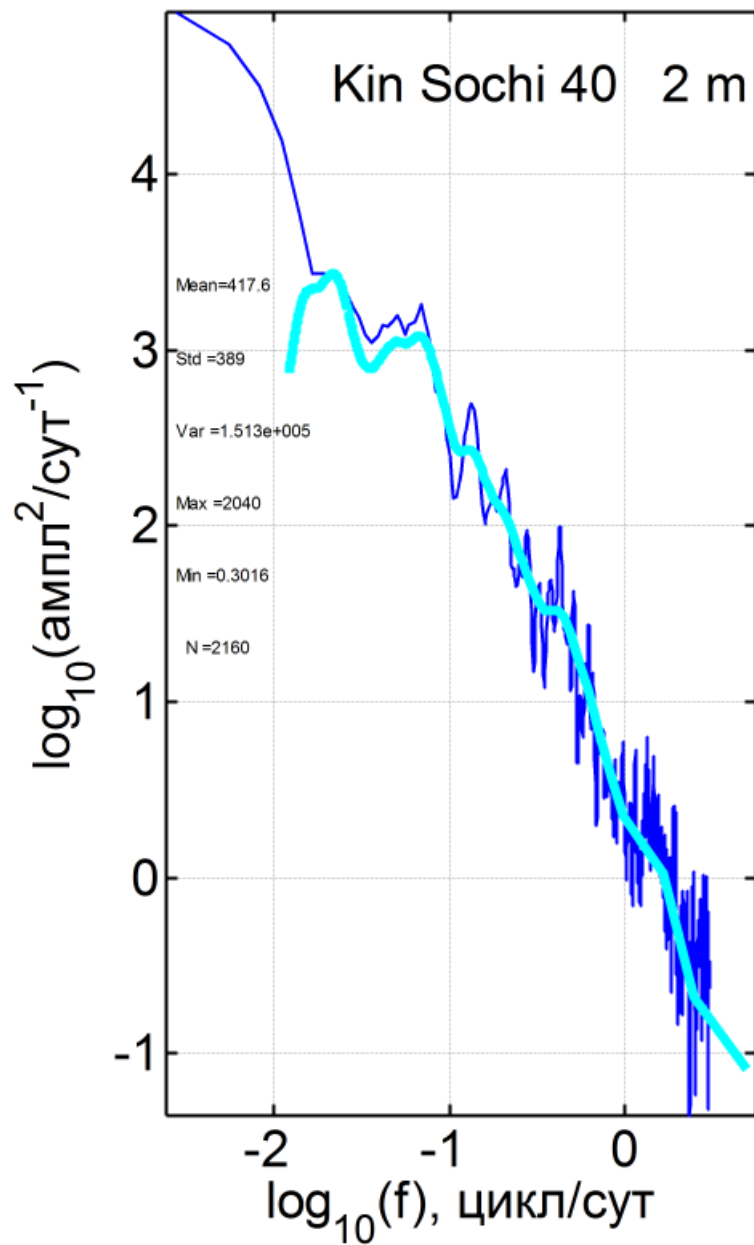
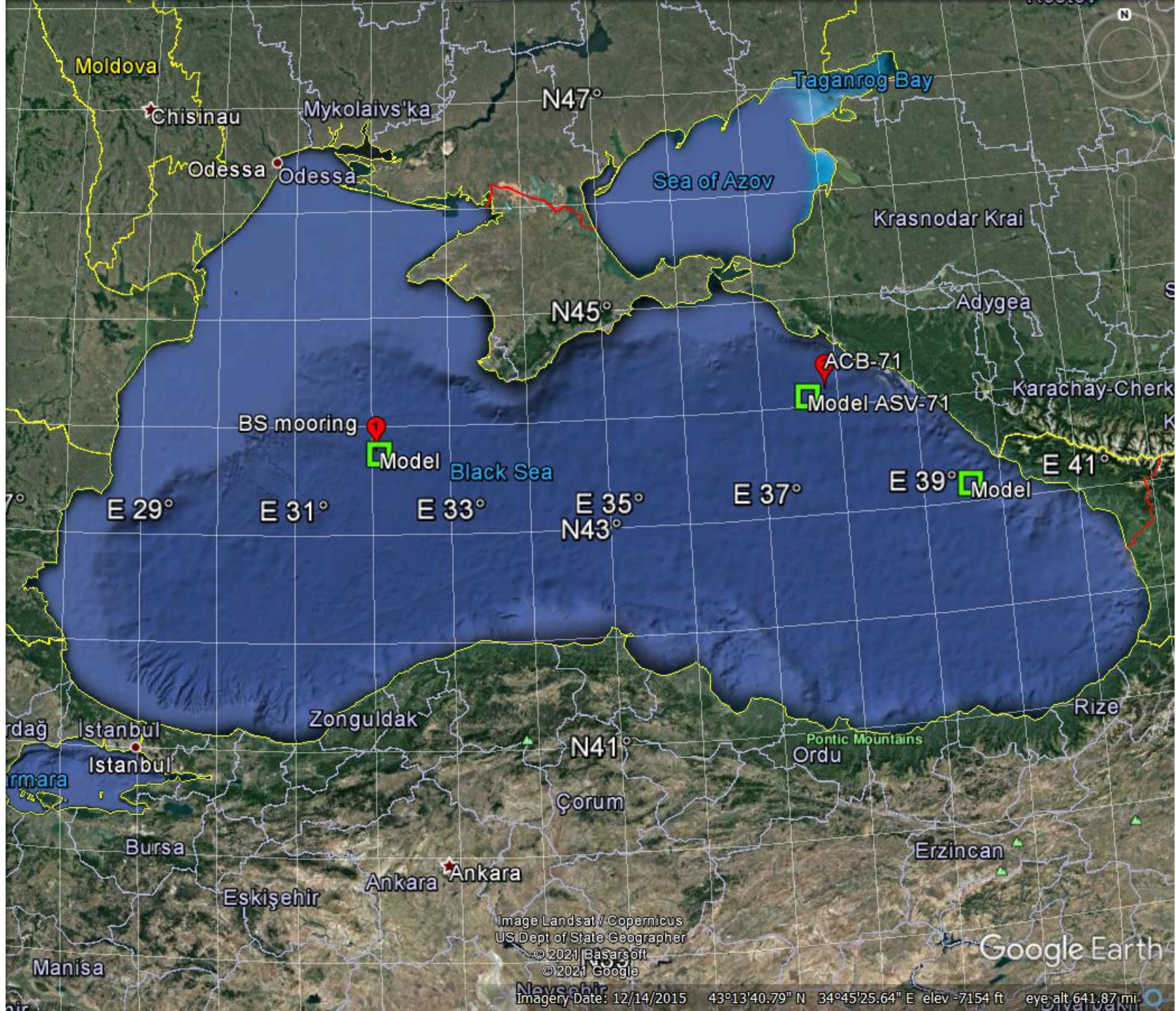


Рис.4. Ход плотности кинетической энергии в точке 1, Чёрное море (верхняя панель) и вэйвлет-плотность кинетической энергии в диапазоне периодов 1-205 сут. (нижняя панель). Светлая линия - спектр вэйвлет-плотности, проинтегрированной по времени.

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.



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.

Спасибо за внимание

*Мельников Василий Андреевич,
Институт океанологии им. П.П.Ширшова
Тел. 916 241 87 16 vmelnikov@ocean.ru*