



Прибрежные субмезомасштабные вихри у Крыма по спутниковым измерениям и механизмы их образования

Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В., Медведева А.И.

Семнадцатая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы
дистанционного зондирования Земли из космоса»

г. Москва 2019

Субмезомасштабные процессы ($L=1-10$ км, $T=1-10$ суток) являются промежуточным звеном между синоптическими и турбулентными процессами, отвечающими за мелкомасштабное перемешивание в океане.

Из-за высоких орбитальных скоростей и завихренности субмезомасштабные вихри способны значительно влиять на перенос взвешенного вещества в прибрежной зоне.



Sentinel-2, 6 июля 2017 г.



Sentinel-2, 31 июля 2017 г.

Субмезомасштабные вихри можно наблюдать в поле трассеров, например, в поле взвеси по спутниковым оптическим измерениям (*Lavrova et al., 2006, 2012; Костяной и др., 2010*). Зоны дивергенции и конвергенции в вихрях позволяют наблюдать их по данным локаторов синтезированной апертуры.

Цель работы - провести анализ основных особенностей субмезомасштабной вихревой динамики у берегов Крымского полуострова на основе большого массива оптических данных высокого разрешения спутников Landsat-8 и Sentinel -2

Данные

Использовался массив данных со спутников Landsat 4,5,7 и 8 с 1987 по 2018 гг., Sentinel-2 с 2015г. По 2018 г. и архив данных MODIS с 2003 года

Спутники Landsat 7 и 8 имеет пространственное разрешение 15-30 м для видимого и 60-100 м для теплового ИК

Спутники Landsat 4 и 5 - 30 м для видимого излучения и 80 м для ИК

Спутник Sentinel-2 имеет разрешение 10 м для каналов B2 (490 нм), B3 (560 нм), B4 (665 нм)

При построении композитных изображений (RGB) использовались комбинации каналов (2,3,4)- Landsat 8 и Sentinel-2; (1,2,3)- Landsat 7,5 для получения «естественного цвета».

Пространственное разрешение для прибора MODIS составляло 1 км для видимого диапазона.

Районы исследования

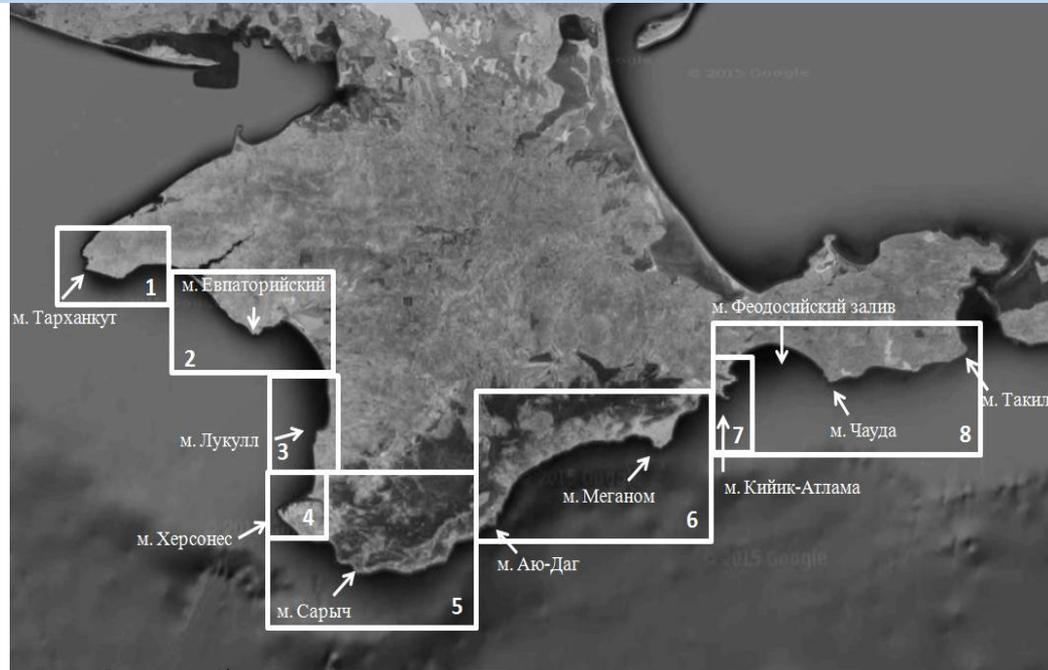


Схема берега Крыма. Прямоугольниками указаны области, выбранные для анализа

На проявление субмезомасштабных вихрей по спутниковым данным оказывает влияние **состав берегового материала:**

- у размываемых песчаных и глинистых берегов субмезомасштабные вихри видны в поле оптического трассера – взвеси.
- у скалистых берегов отсутствие таких трассеров затрудняет наблюдения за субмезомасштабными процессами.

Для анализа использовался долговременный массив данных **Landsat** (с 1983 г.) и **Sentinel-2** (с 2015 г.). Всего рассмотрено около **700** снимков.

Картирование субмезомасштабных процессов у берегов Крыма

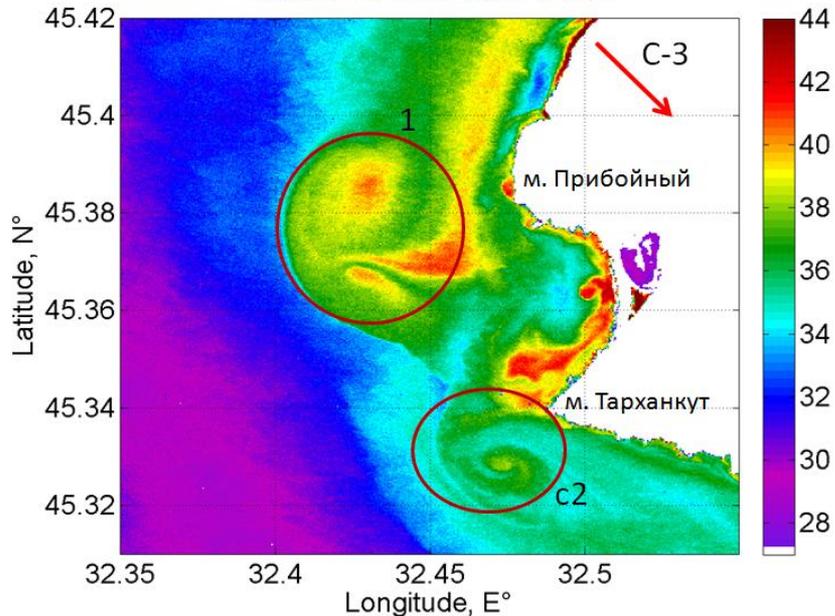
На основе проведенного анализа за 1983 -2019 гг. выделены наиболее характерные субмезомасштабные процессы в различных районах побережья Крыма.



Схема основных мест возникновения субмезомасштабных процессов

Мыс Тарханкут

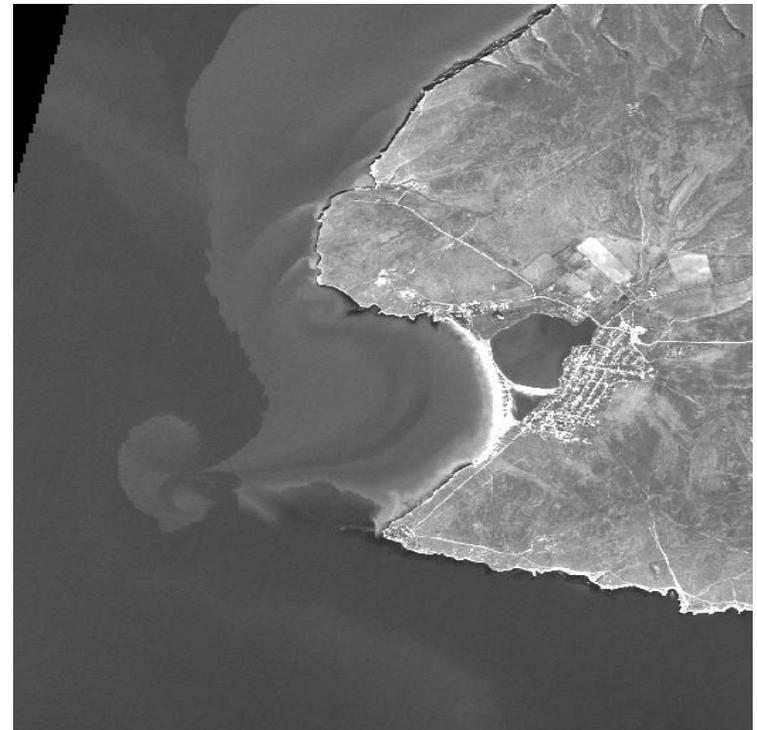
Band 3 - 5. Date=2017-04-22



Вихревые структуры характеризуются повышенной концентрацией взвеси, которую они, в антициклонической части, вероятно, захватывают с береговой ЗОНЫ

Севернее мыса прибрежное течение направлено вдоль берега на юго-запад. Возле мыса оно отрывается от берега и сталкивается с водами открытой части шельфа.

Столкновение прибрежной струи с мористыми водами приводит к ее торможению.



16 февраля 2017 года на $\lambda=0,490$ мкм

Мыс Евпаторийский

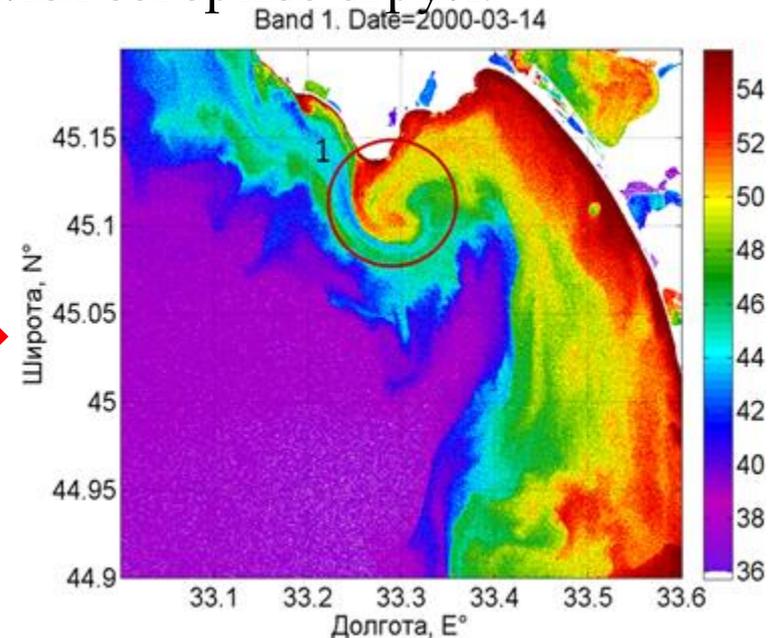
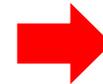


Landsat 5, 23 сентября 2009 г.

Вдольбереговой поток вод направлен изначально на север, потом меняет направление на южное.

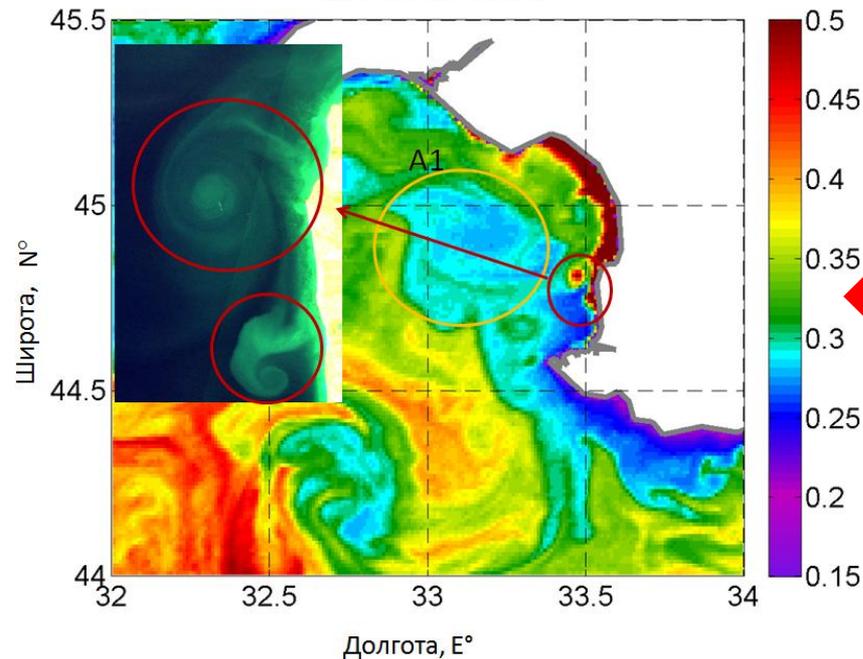
Столкновение разнонаправленных течений у мыса привело к тому, что циклонический вихрь сформировался перед мысом.

При действии северо-восточного ветра образуется северное течение. Образуется грибовидная структура на расстоянии около 16 км за мысом. Циклонический вихрь значительно более развит, чем антициклонический. Его размер составляет около 10 км. Вероятно его образование связано с торможением потока при взаимодействии с водами, находящимися севернее струи.



Мыс Лукулл и п. Николаевка

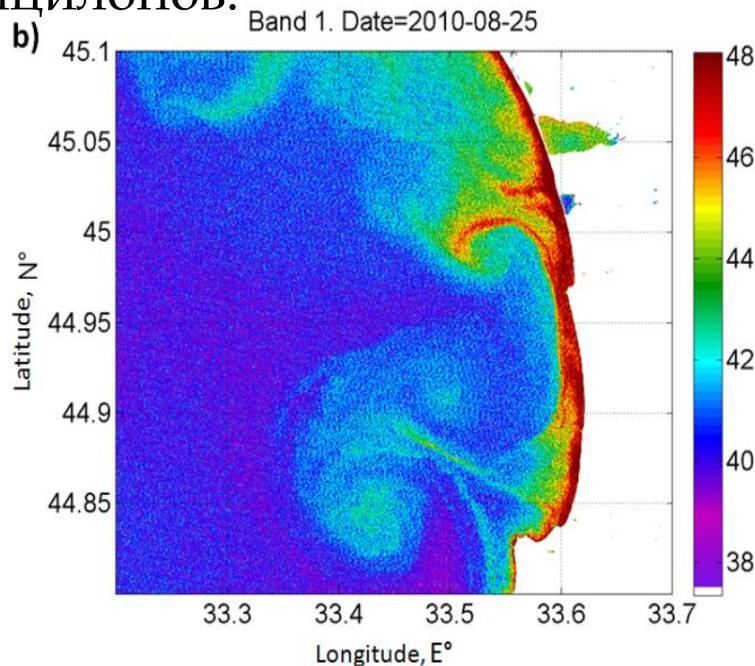
2017-09-08-00-00



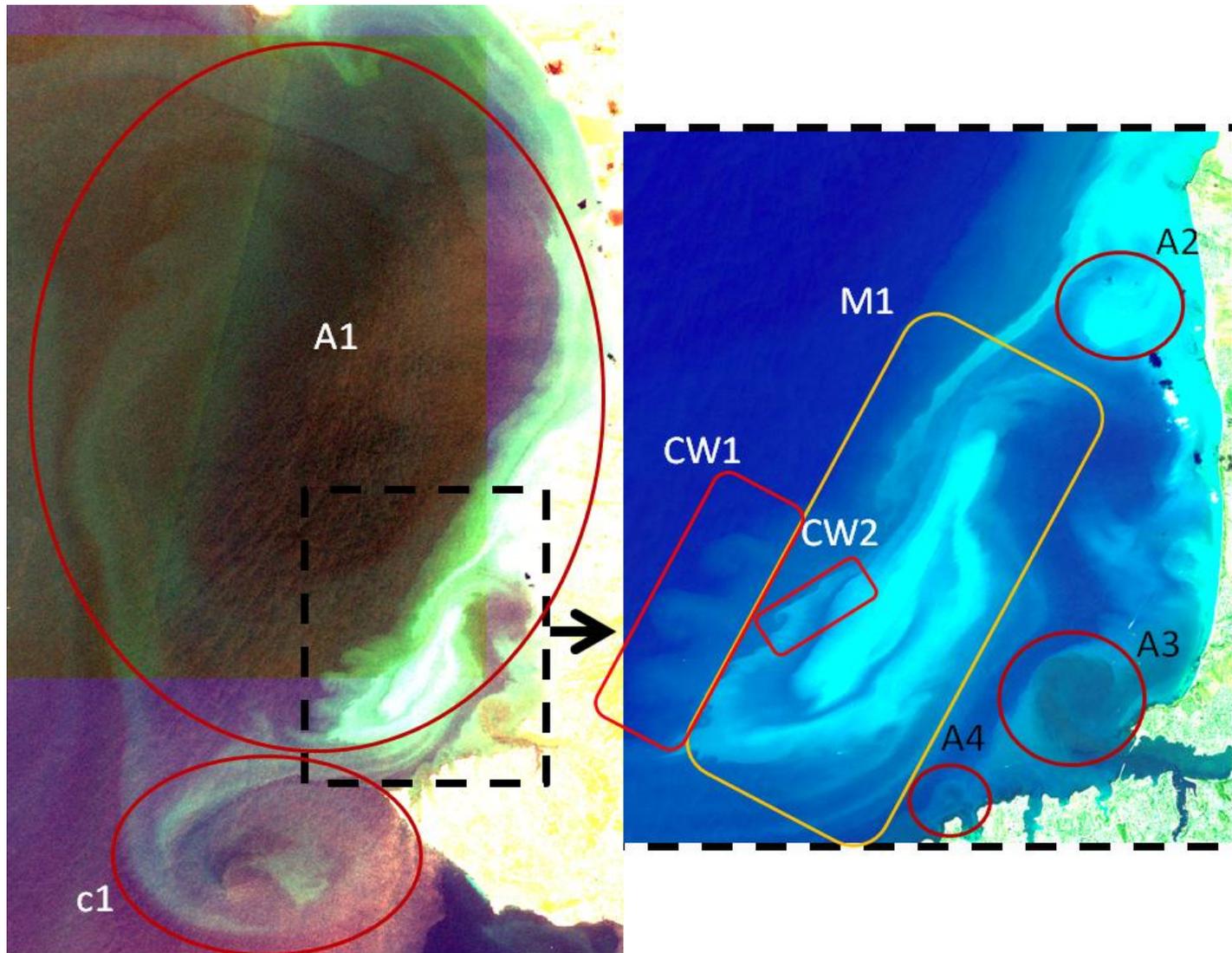
На западной границе вихря у берега образуются два субмезомасштабных циклона, с размерами 7 км и 3 км.

Вероятная причина генерации этих вихрей является градиент завихренности, возникающий на периферии синоптических антициклонов.

При сильных ветрах, направленных от берега, вблизи мысов можно наблюдать образование интенсивных струй. На конце выноса наблюдается генерация грибовидных структур, образование которых связано с торможением этих течений.



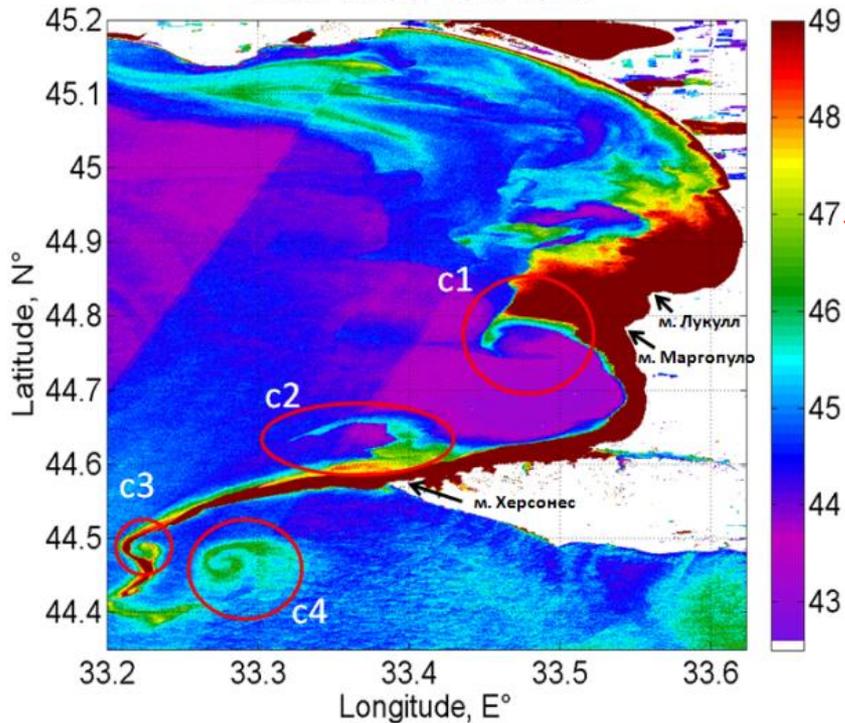
Южная часть Западного побережья Крыма



Sentinel-2, 25 августа 2017 г.

Южная часть Западного побережья Крыма

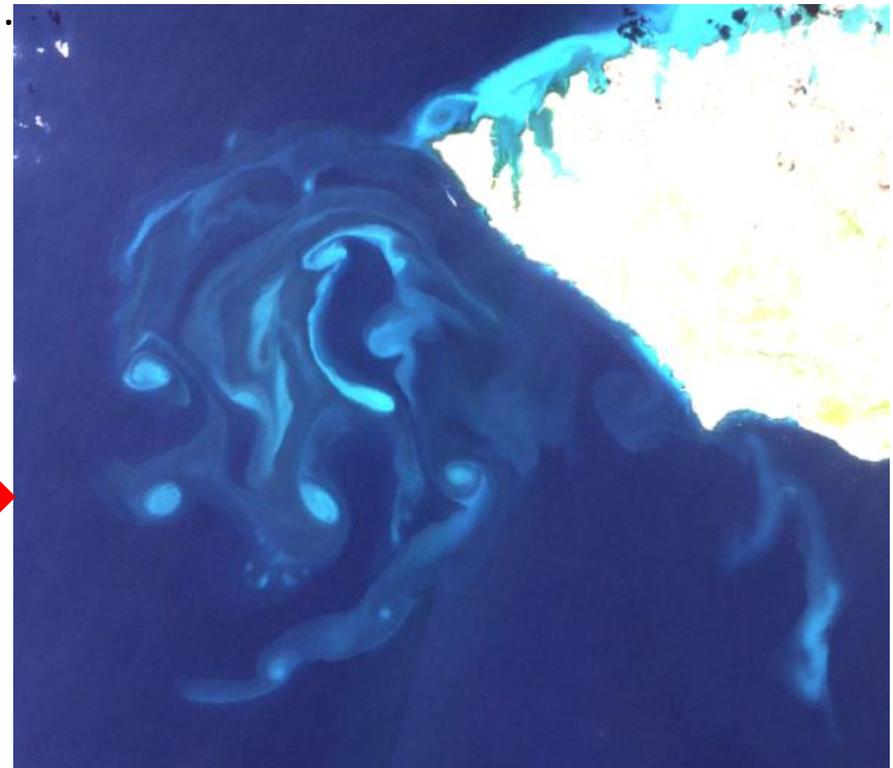
Band 1. Date=2013-10-20



Landsat 8, 20 октября 2013 на $\lambda=0.433 - 0.453$ мкм

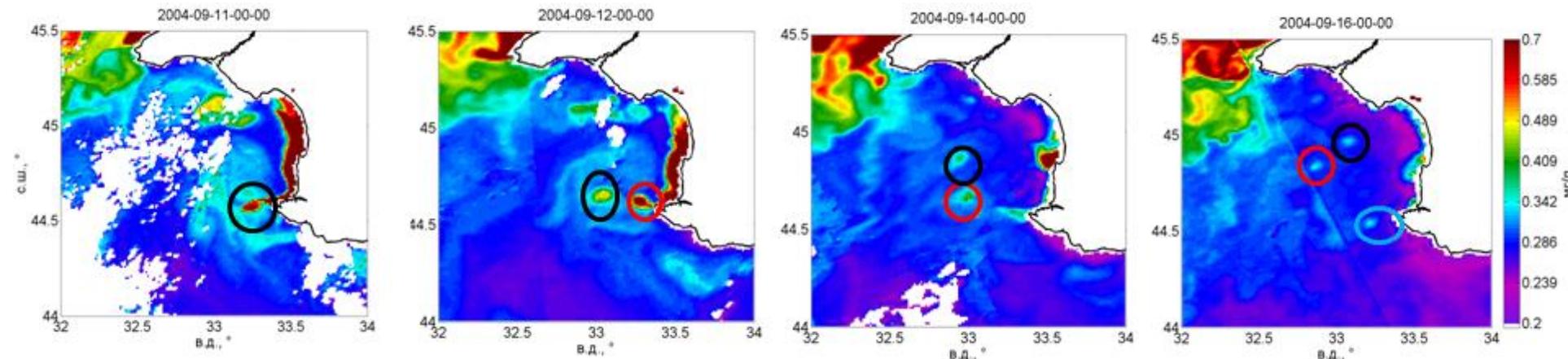
При действии северных штормов, наблюдается интенсивный вынос взвеси в виде узкого мощного вдольберегового потока направленной на юг.

На конце потока возникает не один циклонический вихрь, а множество субмезомасштабных циклонических вихрей с размерами около 1 км.

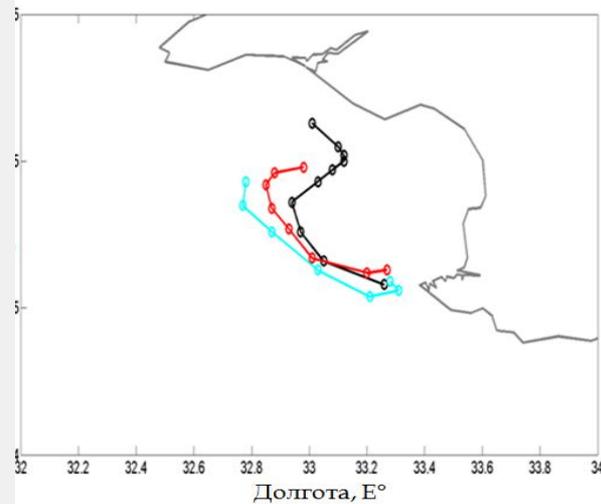
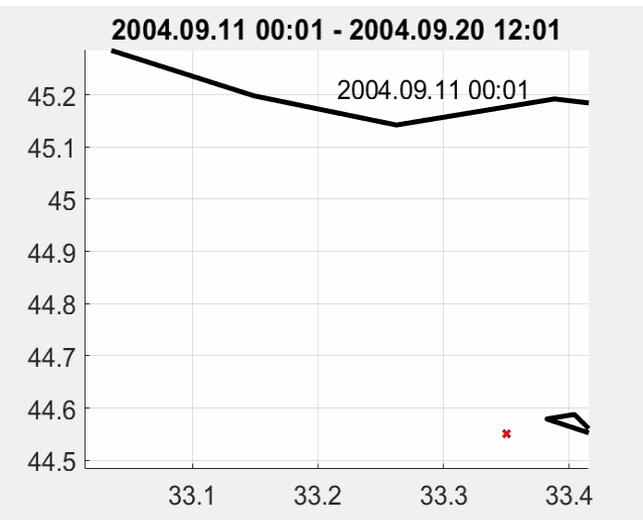


Sentinel-2, 24 сентября 2017 г.

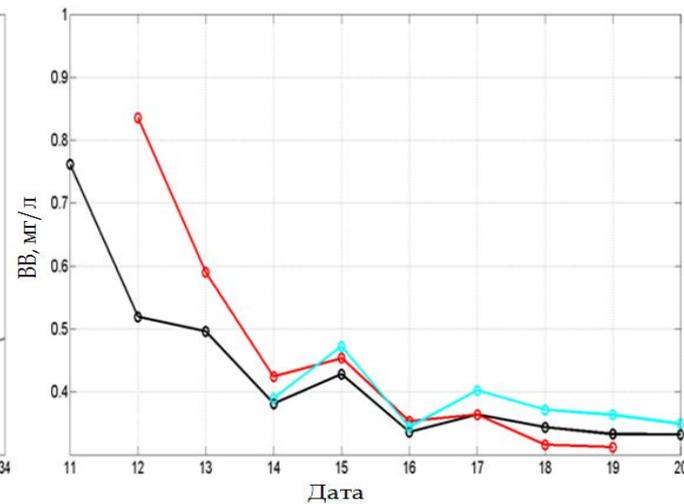
Распространение и характеристики субмезомасштабных вихрей у Западного берега Крыма



MODIS, 11-16 сентября 2004 год



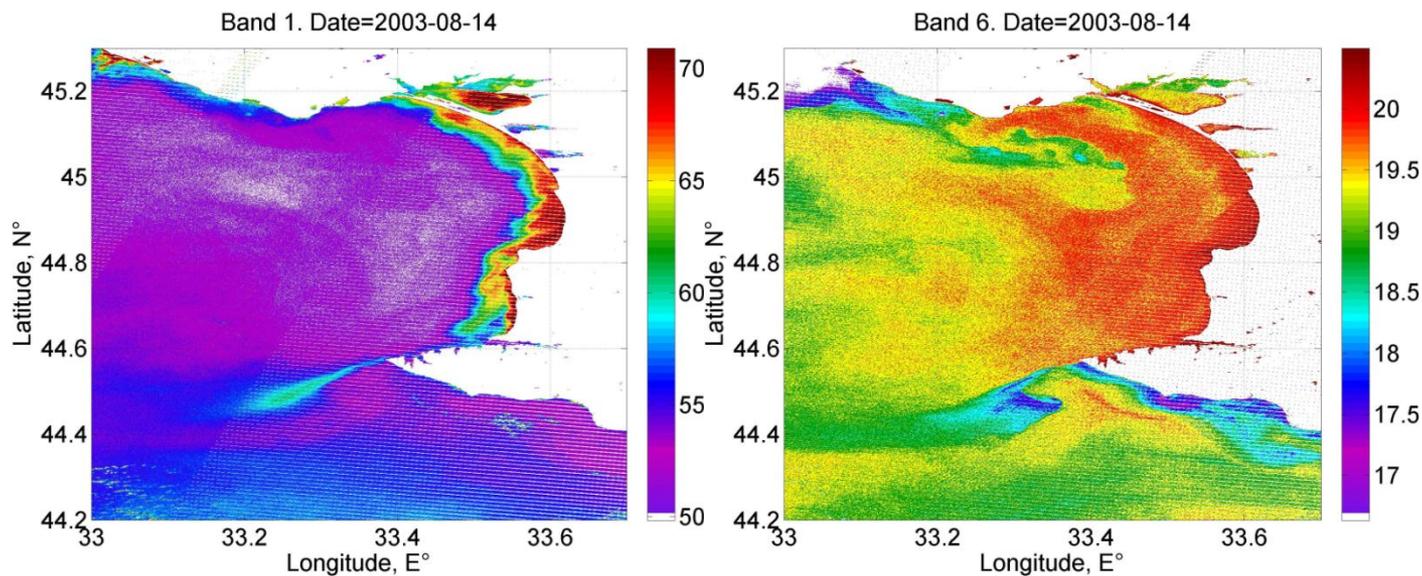
Траектория движения вихрей



Изменение концентрации
взвеси в ядрах вихрей

Распространение и характеристики субмезомасштабных вихрей у Западного берега Крыма

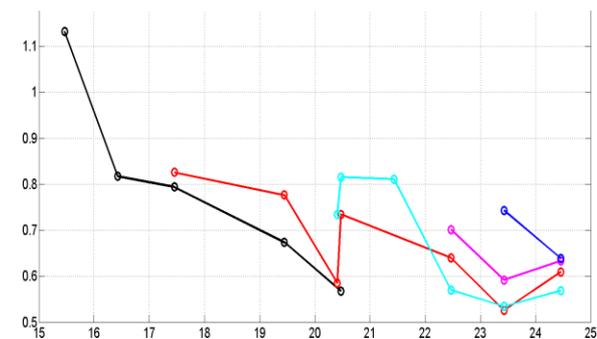
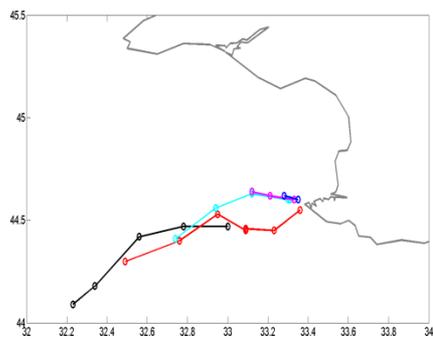
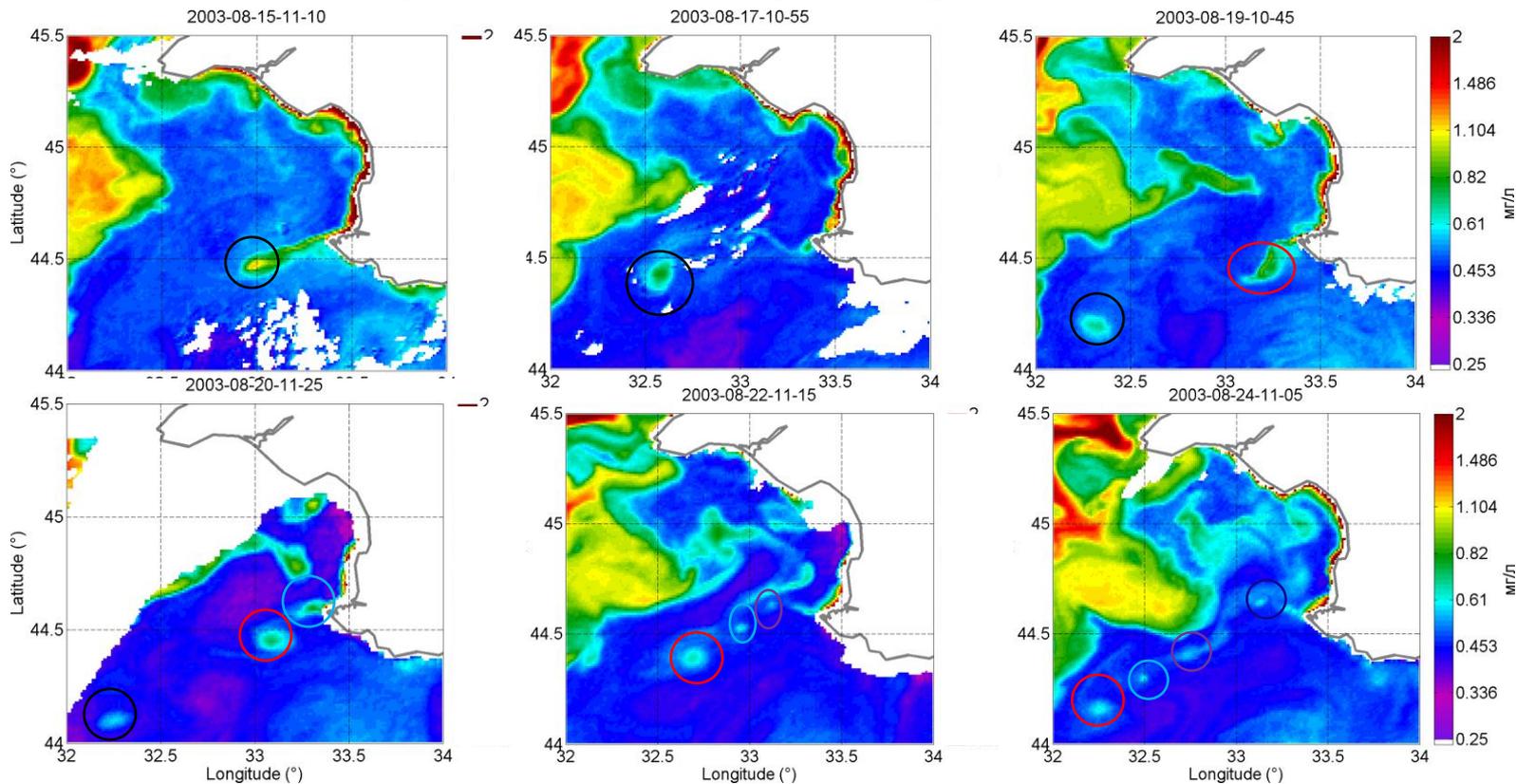
При северо-западном штормовом ветре у ЮБК образуется апвеллинг, на периферии которого наблюдается струйное течение. На окончании потока образуются субмезомасштабные вихри, которые могут распространяться в открытом море в южном направлении вдоль ОЧТ или захватываться в Севастопольский антициклон и перемещаться в северном направлении по его периферии.



Субмезомасштабные вихри характеризуются **высокими значениями завихренности**. Создаваемый вихрем динамический барьер препятствует перемешиванию вод вихря с окружающими водами.

Транспорт ВВ, субмезомасштабными циклонами, является важным механизмом **быстрого поступления берегового вещества в открытое море**.

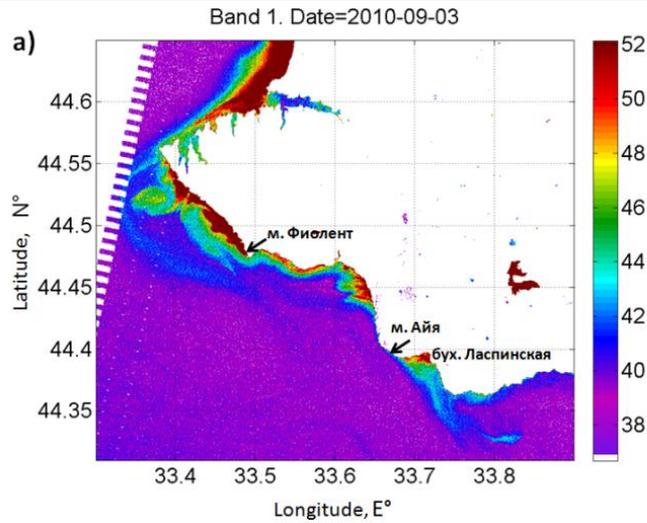
Распространение и характеристики субмезомасштабных вихрей у Западного берега Крыма



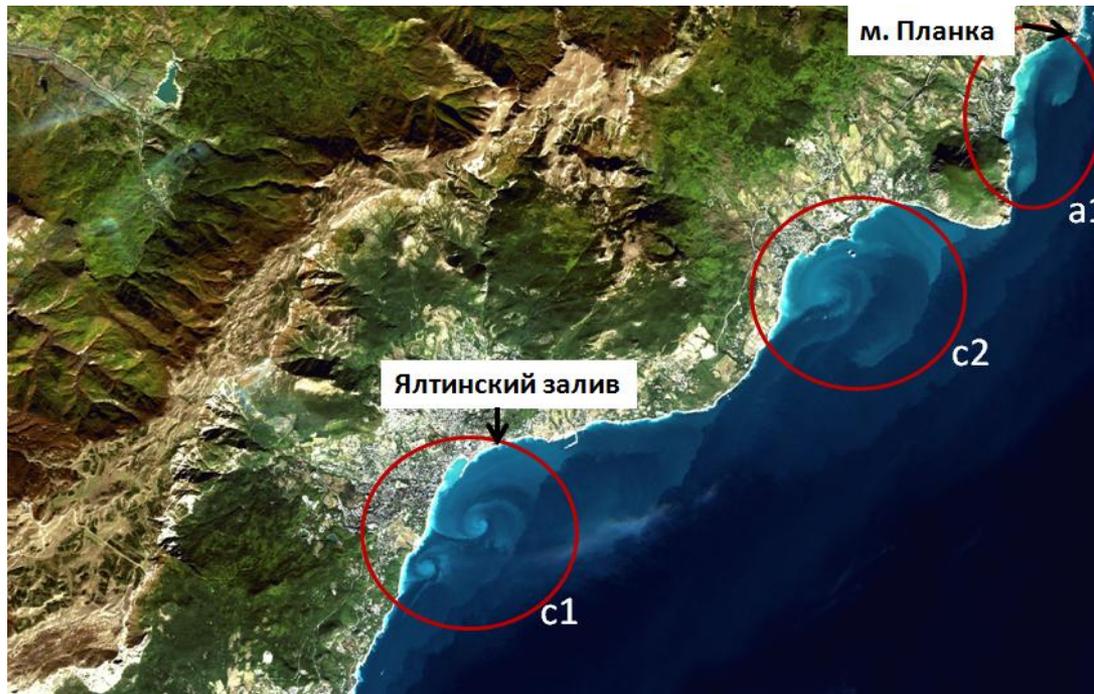
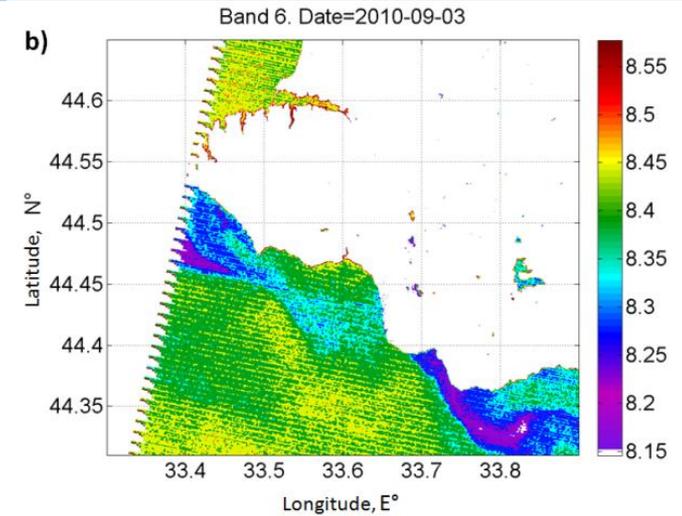
Траектория движения вихрей

Изменения значений концентрации хлорофилла в ядрах вихрей

ЮБК (от м. Херсонес до м. Аю-Даг)



После действия юго-западного штормового ветра со скоростью около 10 м/с возникает апвеллинг.

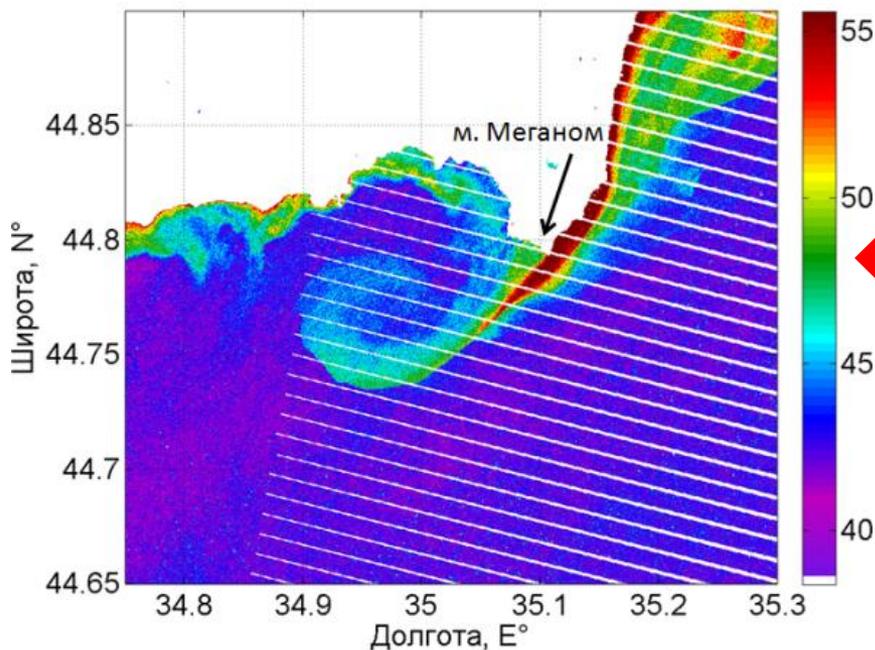


После действия северо-восточного ветра со скоростью 10 м/с

Sentinel-2, 19 октября 2016 г.

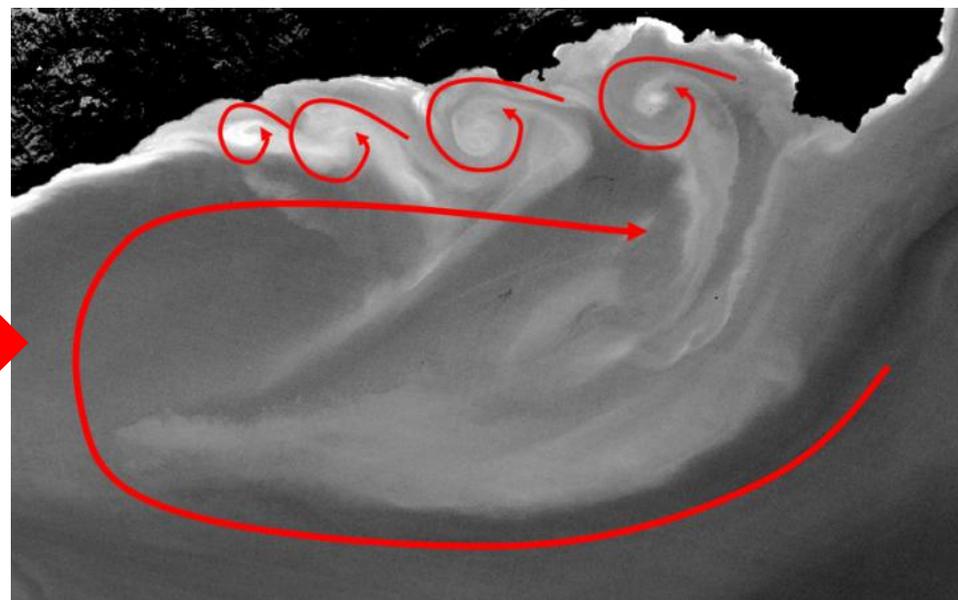
Юго-восточное побережье Крыма от м. Аю-Даг до м. Кыик-Атлама

Band 1. Date=2010-09-11



За м. Меганом поток азовоморских вод закручивается в антициклонический вихрь с размерами около 16 км, что примерно соответствует размеру мыса.

На периферии антициклонического вихря образуются циклоны. Место генерации циклонов, по-видимому связано с небольшими выступами берега. Циклонические вихри захватывают взвешенное вещество в свои ядро.



Landsat 8, 21 августа 2017 г. на $\lambda=0,450-0,515\text{мкм}$

Юго-восточное побережье Крыма от м. Аю-Даг до м. Кыик-Атлама



Sentinel-2, 8 декабря 2017 г.

При юго-западных и северо-западных ветрах поток вод направлен вдоль берега в северо-восточном направлении.

Цепочки из циклонических вихрей наблюдается за мысами: м. Меганом, м. Кыик-Атлама и м. Ильи.



Sentinel-2, 9 октября 2016 г.

Мыс Киик-Атлама.

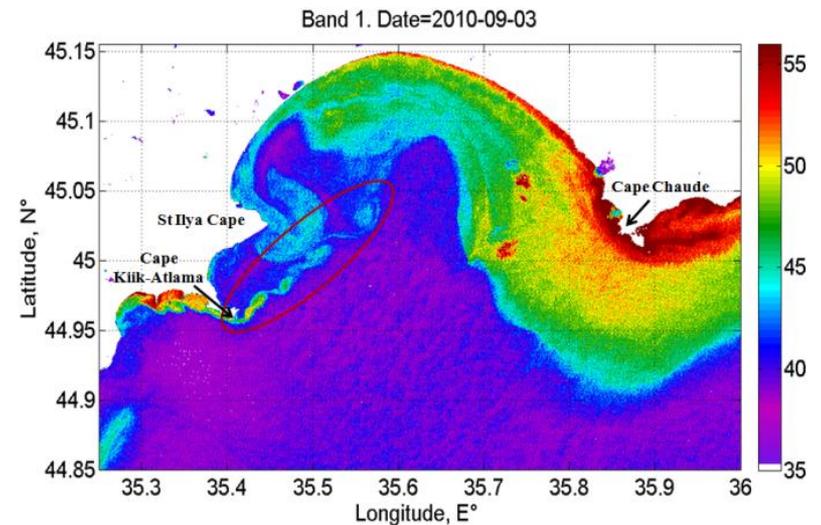
Чем дальше распространяются вихри от топографического препятствия, тем больше становятся их размеры.



Sentinel-2, 2 сентября 2015 г.

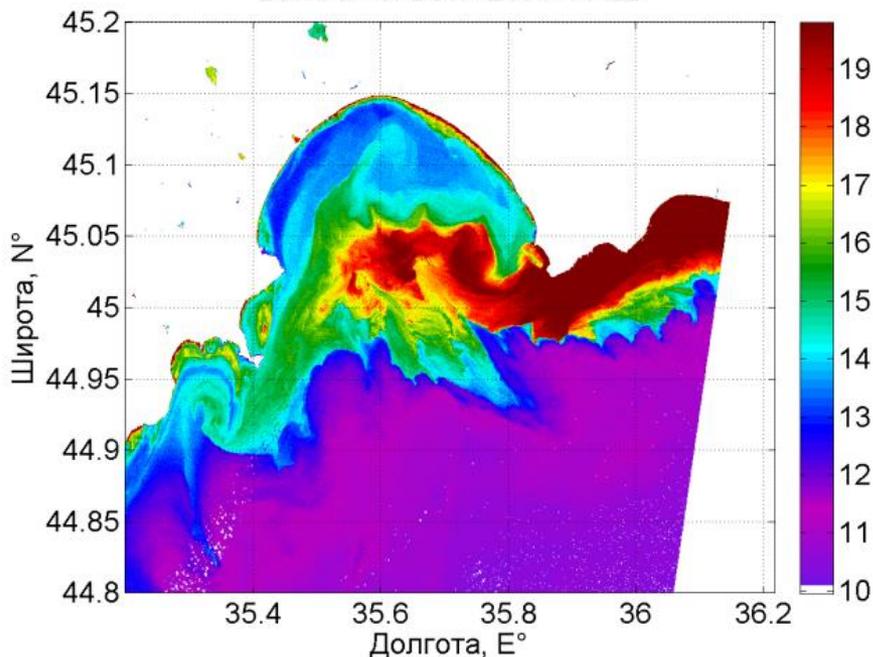


Sentinel-2, 26 февраля 2017 г.

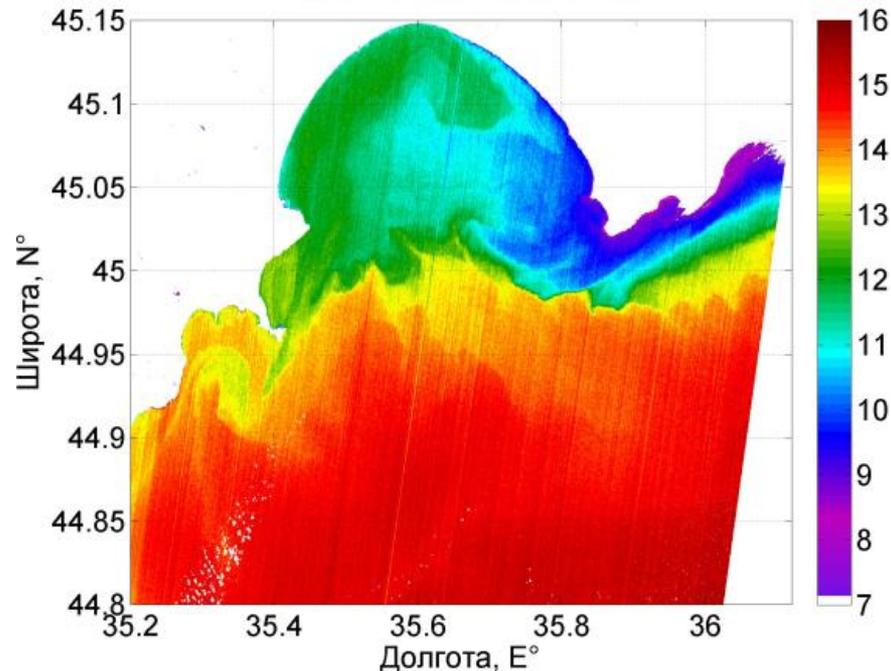


Феодосийский залив

Band 3 - 5. Date=2016-11-22



Band 11. Date=2016-11-22



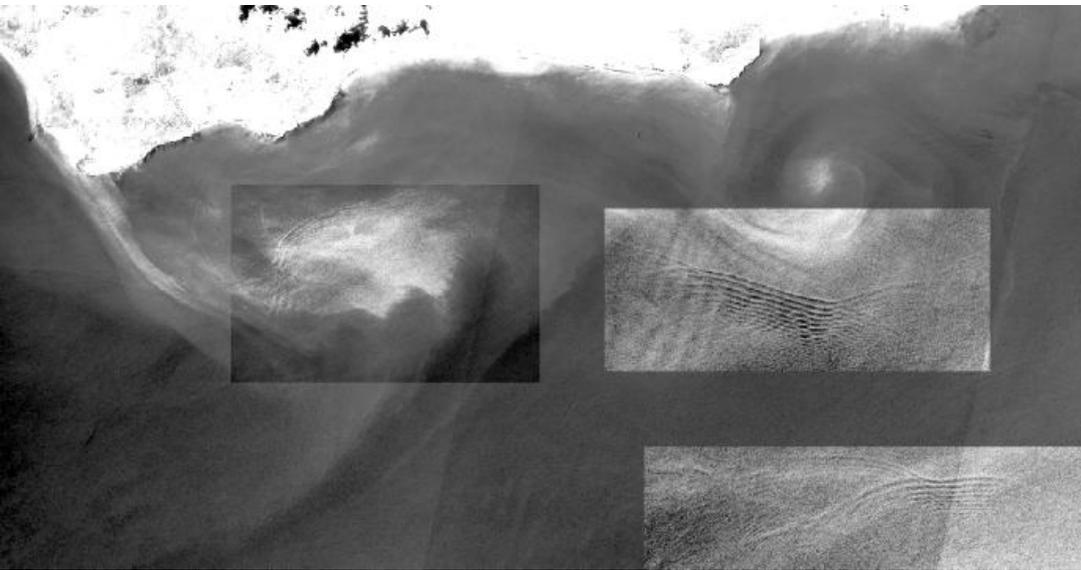
Заток азовоморских вод в Феодосийский залив, который образовался вследствие действия северо-восточного ветра с 19 по 22 ноября со скоростью 10 - 14 м/с.

Данные воды характеризуются пониженными значениями температуры по сравнению с окружающими водами .

Поток имеет антициклоническую завихренность за м. Чауда, благодаря чему азовоморские воды затекают в Феодосийскую бухту.

Мыс Чауда и мыс Такиль

При умеренных ветрах у берегов данных мысов возможно наблюдать следующие динамические процессы с максимальными размерами до 10 км:



Sentinel-2, 3 июля 2018 г. на $\lambda(\text{central wavelength})=0,49$ мкм



Sentinel-2, 9 сентября 2017 г.

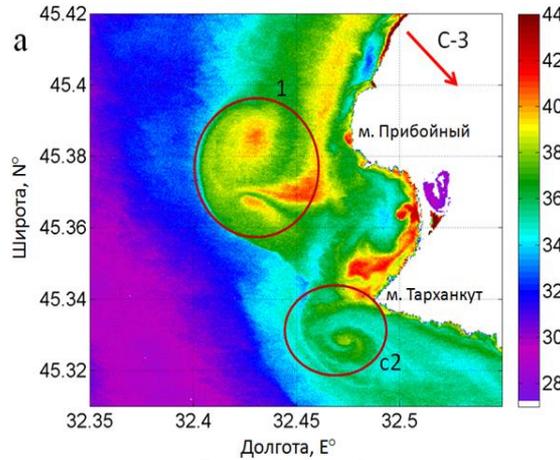


Sentinel-2, 30 января 2016 г.

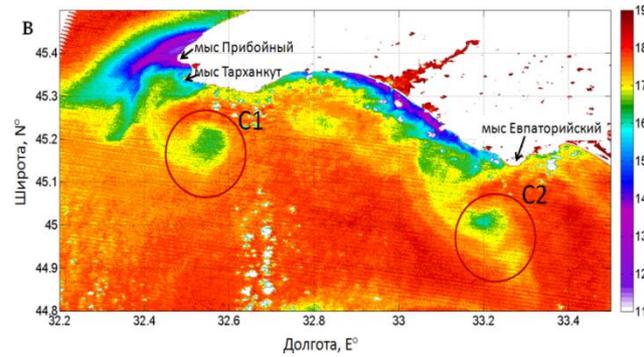
Примеры субмезомасштабных вихрей у берегов Крыма

Существенное влияние на генерацию субмезомасштабных вихрей оказывают:

- конфигурация береговой линии
- относительное направление вынуждающей силы (ветра, геострофических течений)



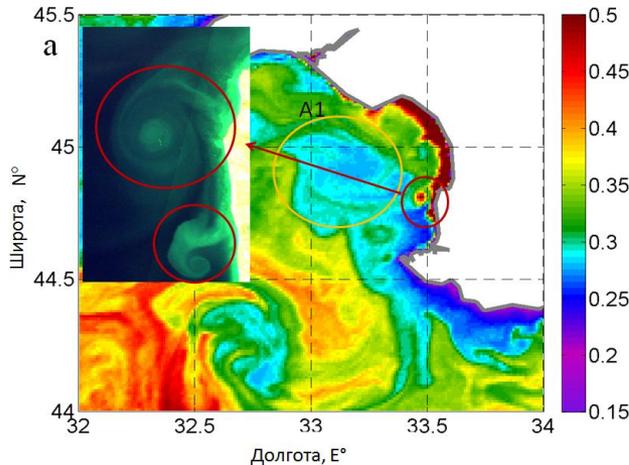
Landsat-8
22 апреля 2017 г.



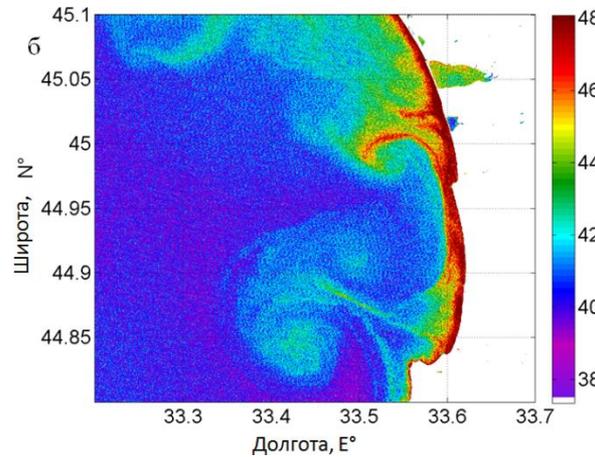
Landsat-5
21 июля 2009 г.



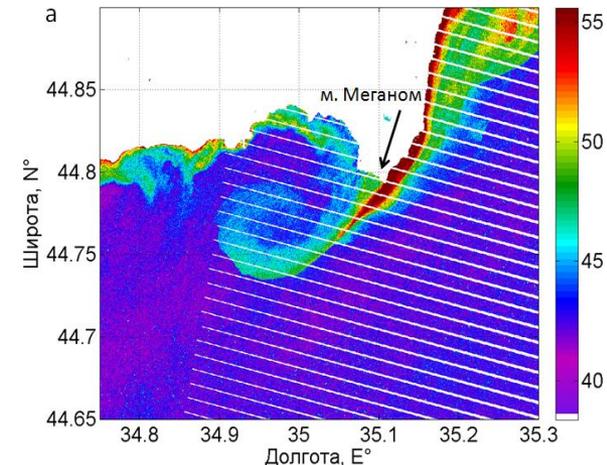
Sentinel-2
8 декабря 2017 г.



MODIS и Sentinel-2
8, 9 сентября 2017 г.



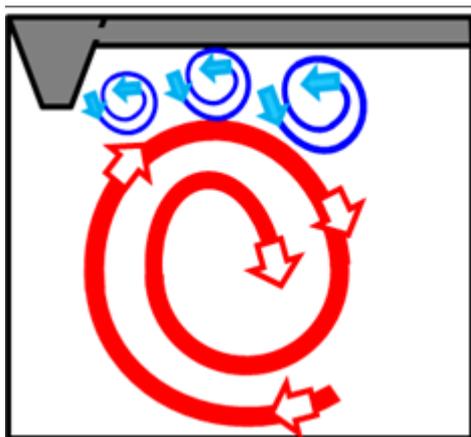
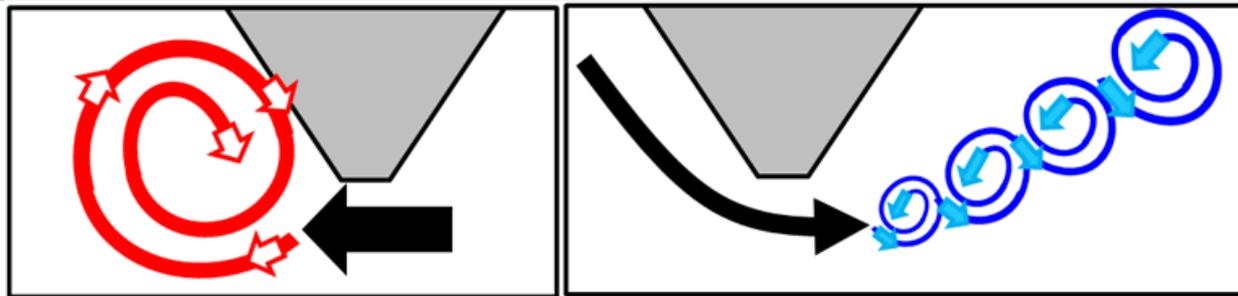
Landsat-5
25 августа 2010 г.



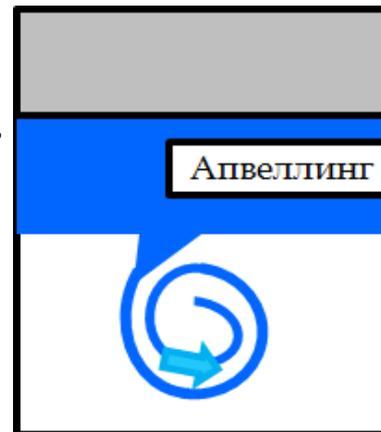
Landsat-7
11 сентября 2010 г.

Основные механизмы образования субмезомасштабных вихрей

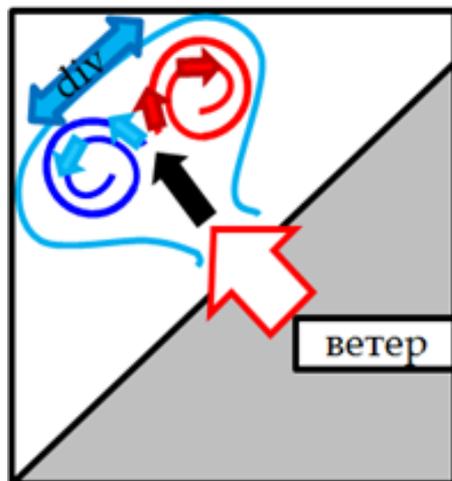
Обтекание потоков вод мысов и выступов берегов
(Elkin, Zatsepin, 2013, 2014;
Gula et al, 2015; McWilliams, 2016)



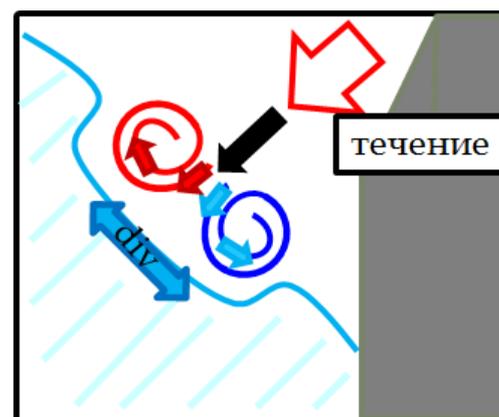
Сдвиговая неустойчивость на периферии синоптических антициклонов
(Capet et al., 2008; Zatsepin et al., 2011, 2019; Elkin et al., 2013, 2014; Manucharyan et al., 2013)



Неустойчивость течения на периферии прибрежных апвеллингов
(Thomas et al., 2005; Thomas et al., 2007; Machadevan et al., 2006; Capet et al., 2008)



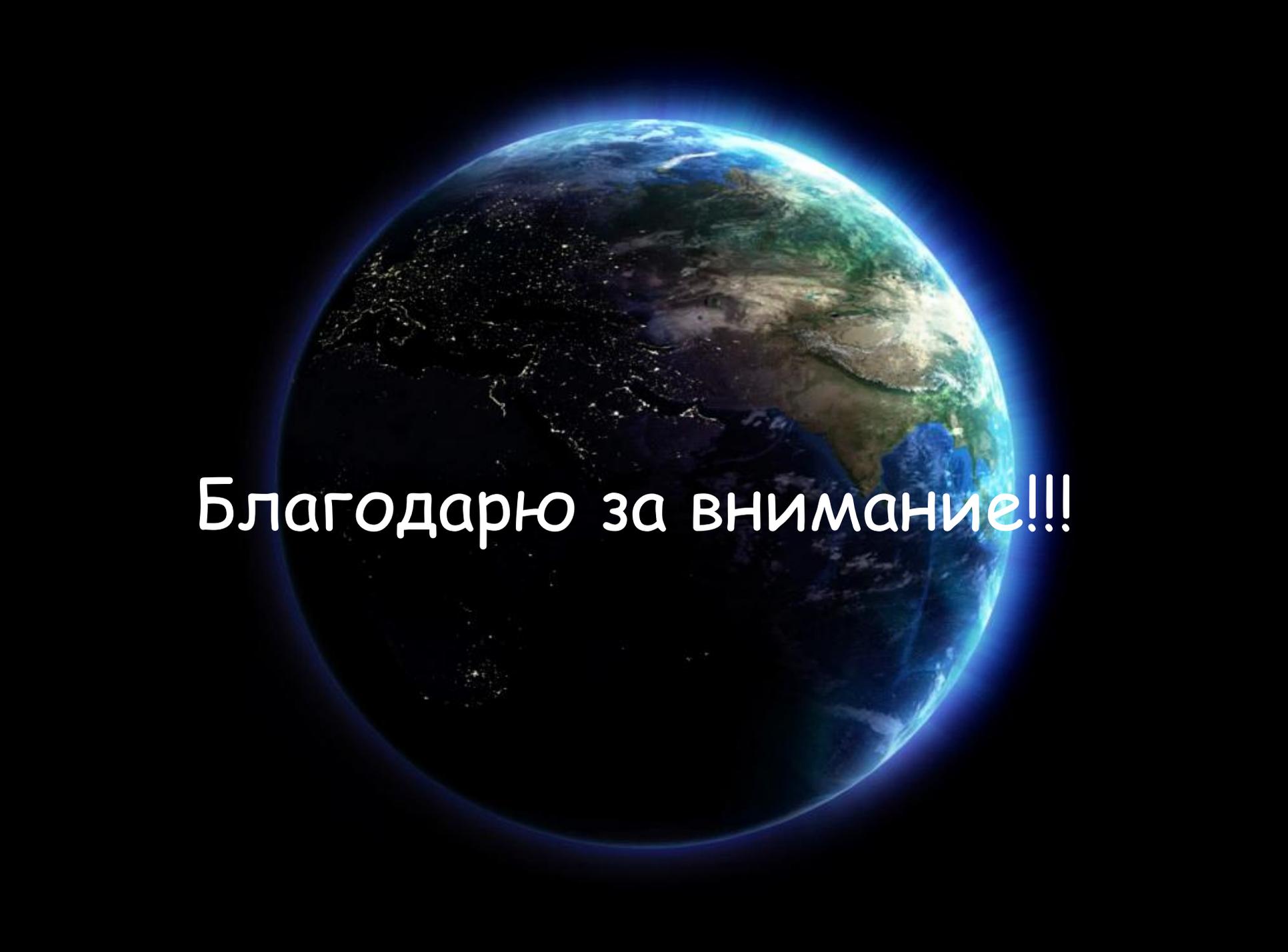
Возникновение грибовидных течений при торможении прибрежных течений
(Федоров, Гинзбург, 1989; Zatsepin et al., 2019)



Образование грибовидных течений на фронте вод с различными свойствами
(Zatsepin et al., 2019)

Выводы

- ✓ Определены основные параметры субмезомасштабных вихрей – их размеры места образования и факторы, влияющие на их образование (направление ветра, топография береговой линии, течения) для различных районов прибрежной зоны Крыма на основе 700 снимков со спутников Landsat (с 1983 г.) и Sentinel-2 (с 2015 г.)
- ✓ Отмечено, что в прибрежной зоне в основном наблюдается образование больше мелких циклонических вихрей (диаметр 1-5 км), чем более крупных антициклонических (5-10 км).
- ✓ Выделены основные механизмы образования субмезомасштабных процессов по оптическим спутниковым снимкам:
 - сдвиговая неустойчивость на периферии синоптических антициклонов;
 - обтекание потоков вод мысов и выступов берегов;
 - неустойчивость течения на периферии прибрежных апвеллингов;
 - возникновение грибовидных течений при торможении прибрежных течений;
 - образование грибовидных течений на фронте вод с различными свойствами.

A high-resolution image of the Earth as seen from space, showing the curvature of the planet and a glowing blue atmosphere. The landmasses of Africa, Europe, and Asia are visible, with the Indian subcontinent and parts of Southeast Asia clearly shown. The text 'Благодарю за внимание!!!' is overlaid in white, bold, sans-serif font across the center of the image.

Благодарю за внимание!!!