Распространение загрязнений морской поверхности под действием динамических и циркуляционных процессов: сравнение результатов спутниковых наблюдений, измерений in-situ и компьютерного моделирования

Лаврова О.Ю.[1], Краюшкин Е.В.[1,2]

[1]Институт космических исследований РАН
[2]МГУ им. М.В. Ломоносова

olavrova@iki.rssi.ru

ИКИ

В данных исследованиях принимали участие:

Митягина М.И., Назирова К.Р., Сазонов Д.С., Строчков А.Я., Калашникова Н.А. (ИКИ РАН)

Костяной А.Г. (ИО РАН им. П.П. Ширшова)

Голенко Н.Н., Голенко М.Н. (АО ИО РАН)

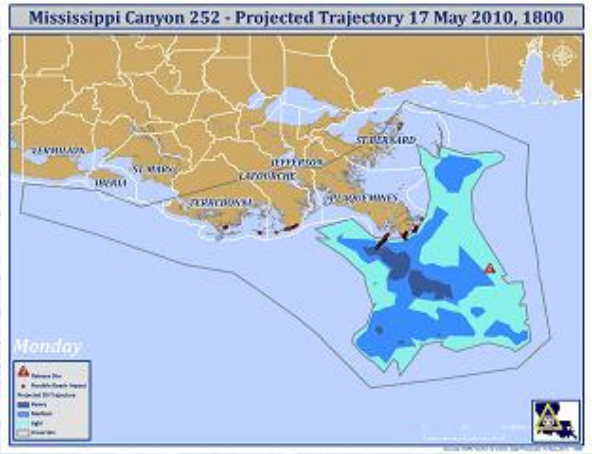
Серебряный А.Н., Сабинин К.Д. (АКИН, ИКИ РАН)

Соловьев Д.М., Кубряков А.А. (МГИ)

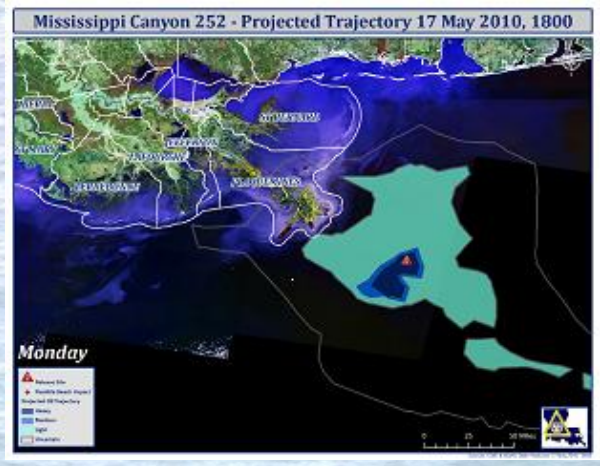
Актуальность

Выброс «нефтяной струи»

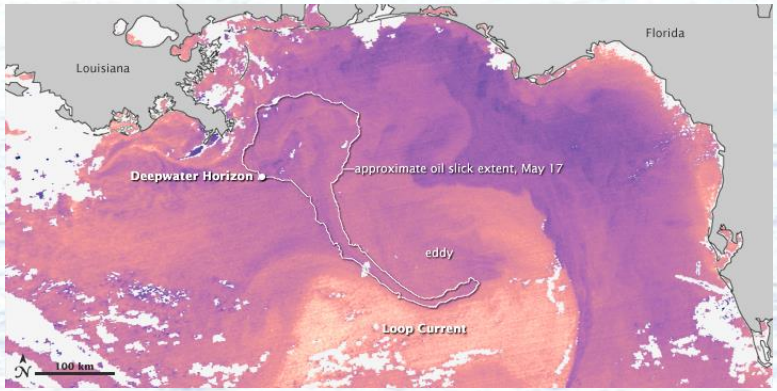
Спутниковое изображение нефтяного загрязнения с образовавшейся струей по данным MODIS-Terra от 17 мая 2010 г. 16:40 UTC



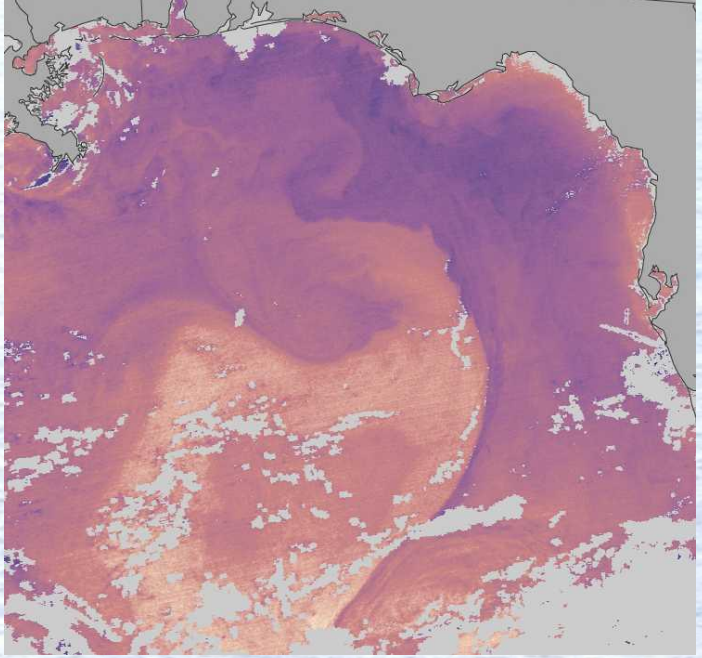
Прогноз распространения пятна на 17-ое мая, составленный 15-ого мая



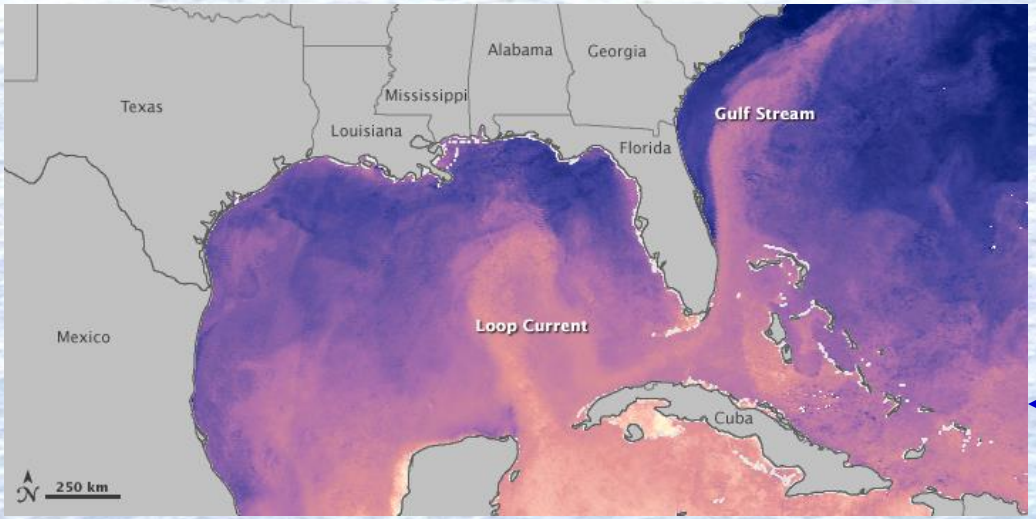
Уточненный прогноз, составленный на базе спутниковых данных 17-ого мая в 08:30 UTC



Температура поверхности северной части Мексиканского залива по данным MODIS-Terra от 18 мая 2010 г. Условно отмечена конфигурация нефтяного пятна на 17 мая



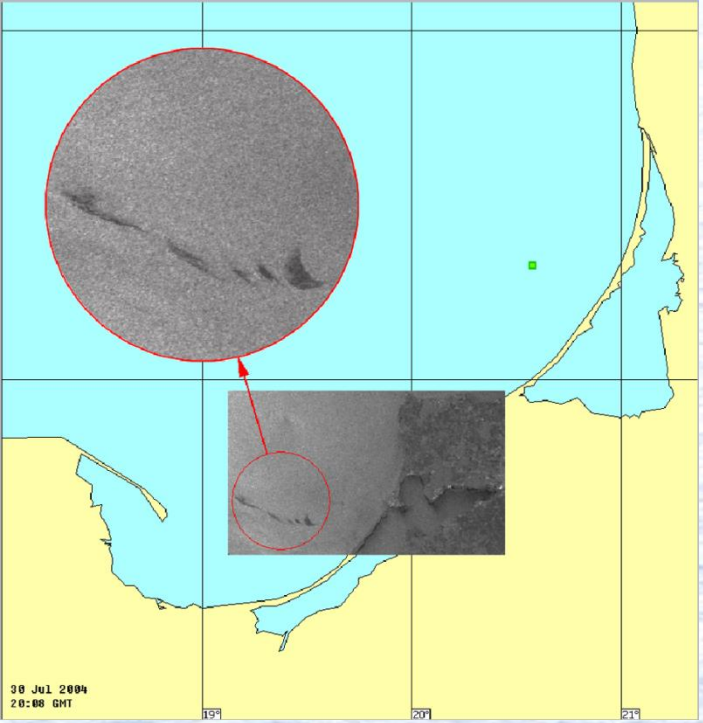
«Плотная упаковка» диполей в районе распространения нефтяной струи. Карта температуры поверхности Мексиканского залива по данным MODIS-Terra от 18 мая 2010 г.



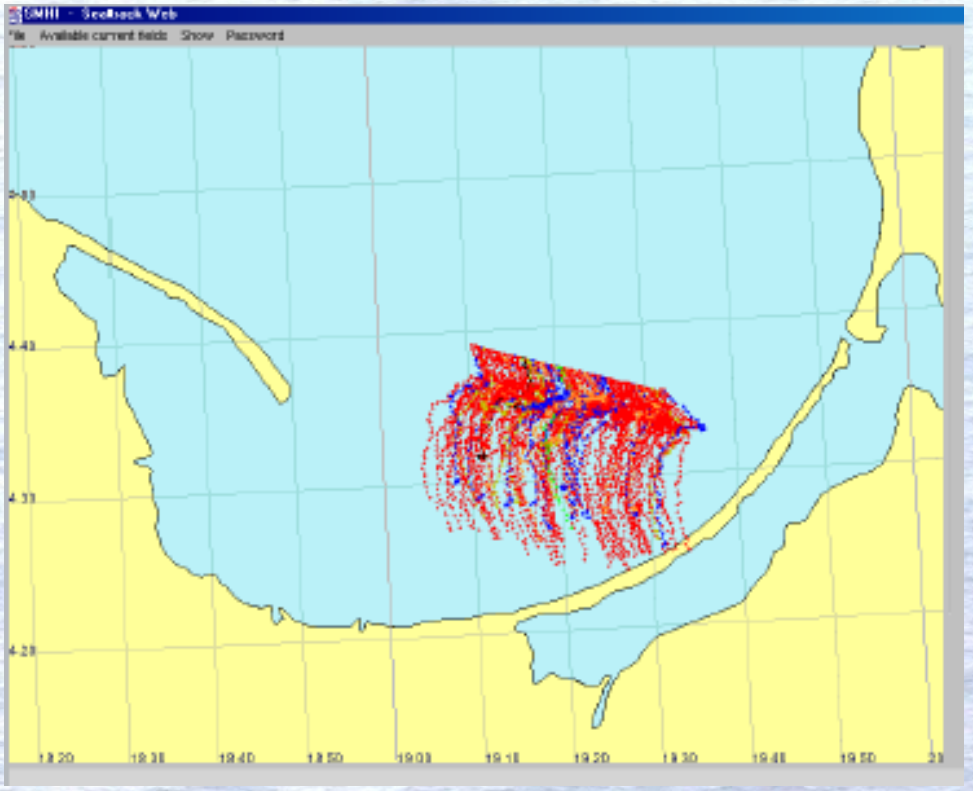
Температура поверхности Мексиканского залива и положение *Loop Current* по сводным данным MODIS-Terra за 1-8 мая 2010 г.

Причина образования гигантской «нефтяной струи» возможно заключается в том, что нефтяное пятно частично попало в зону действия интенсивного и гигантского дипольного вихря общим поперечным размером 300 км, направленного на запад. Часть пятна была захвачена передним фронтом диполя и вовлечена в вихревое движение циклоническим вихрем диполя. Этот циклонический вихрь одновременно является частью другой дипольной структуры размером 350 км, расположенной южнее и направленной на восток к западному побережью Флориды

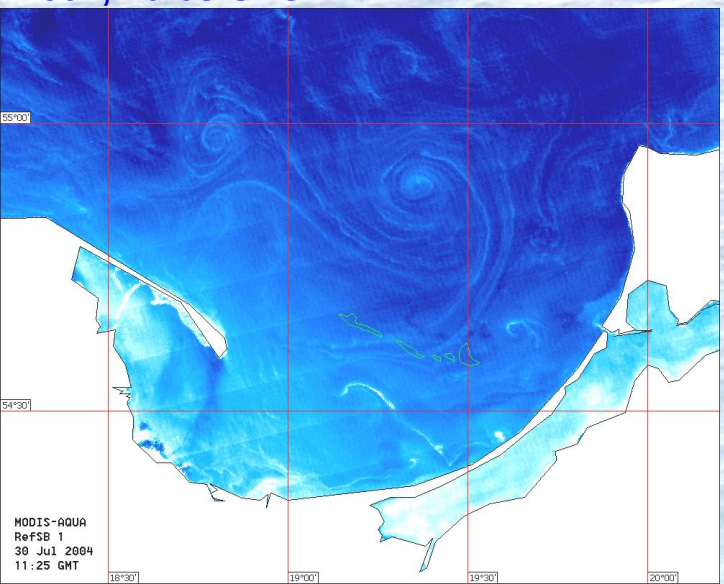
Влияние мезомасштабной циркуляции на дрейф нефтяного загрязнения



ASAR Envisat изображение юго-восточной части Балтики от 30.07 2004, 20:08 UTC

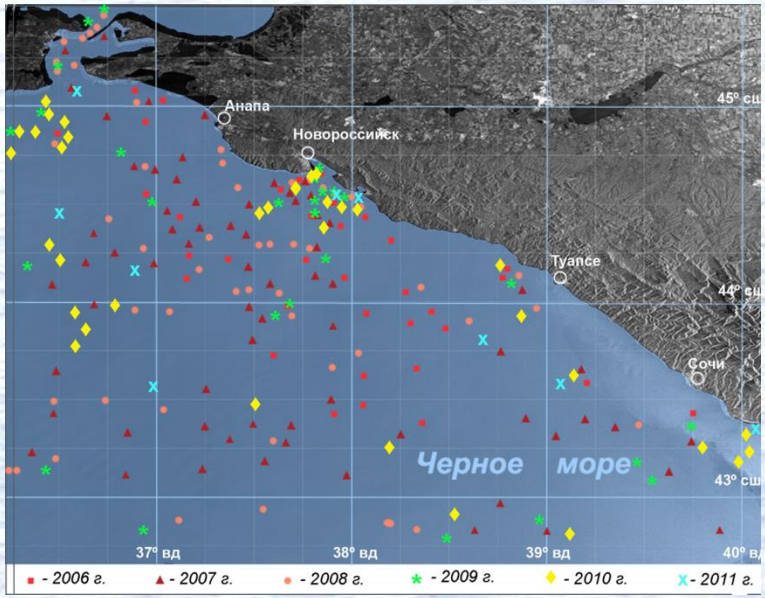


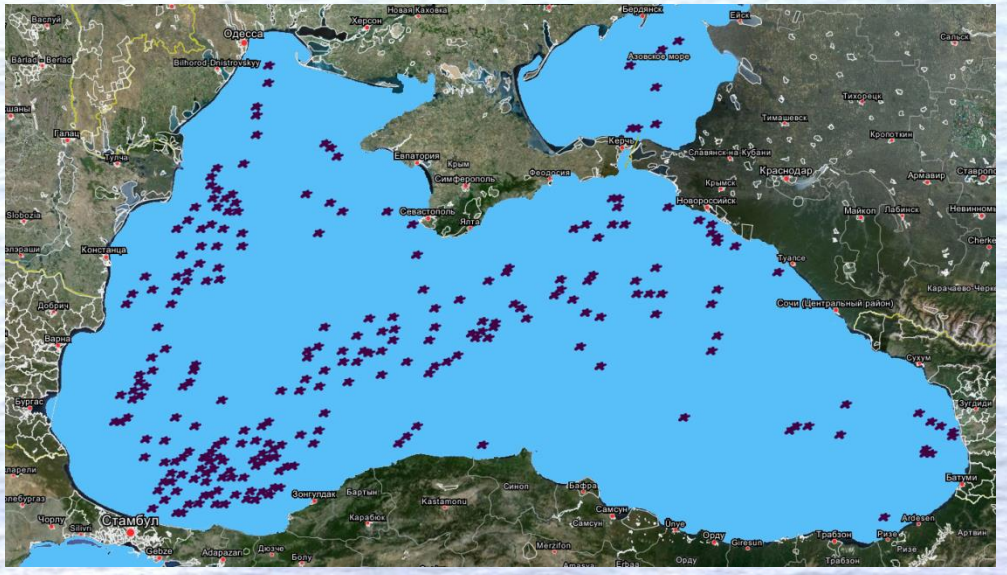
Численное моделирование дрейфа по модели SMHI SeaTrack в течение периода 30.07 – 03.08 2004 цепочки нефтяных пятен, детектированных на радиолокационном изображении ASAR Envisat от 30.07. 2004



Мезомасштабные процессы в Гданьском заливе по данным MODIS-Terra (разрешение 250 м) от 30.07 2004, 11:25 UTC. Зеленым контуром отмечено положение нефтяных пятен, выявленных на РЛИ. Цепочка пятен под влиянием вихря перемещалась в юго-западном направлении

Мониторинг антропогенных загрязнений Черного моря





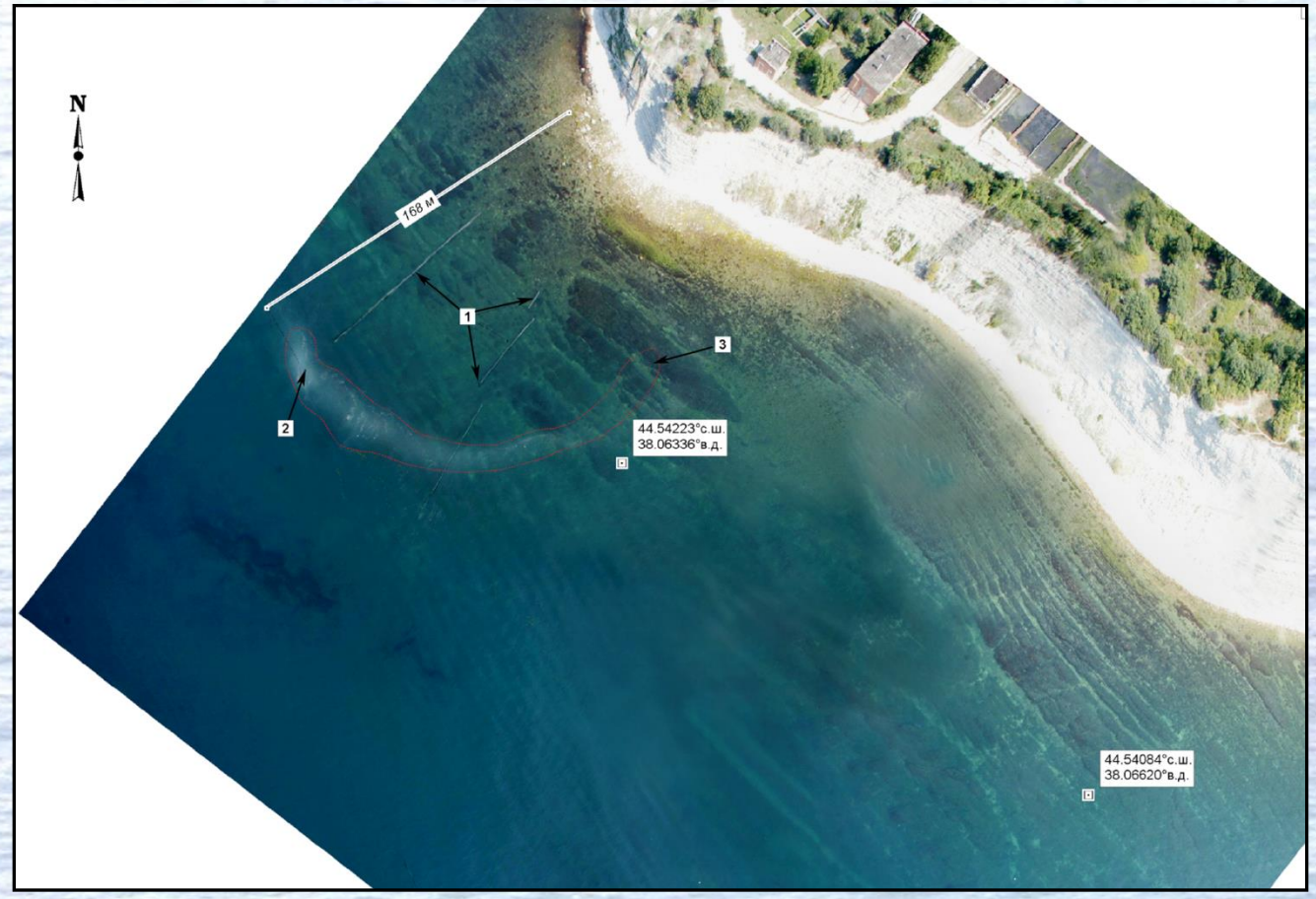
Обобщенная карта-схема значительных нефтяных загрязнений российского сектора Черного моря, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации высокого разрешения, полученных в 2006 – 2011 гг.

Обобщенная карта-схема всего Черного моря, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации высокого разрешения, полученных в 2010 гг.

Основные районы загрязнений совпадают с основными судоходными трассами

Глубоководный выпуск сточных вод в районе м. Толстый г. Геленджик

Утечка сточных вод из трубопроводов глубоководного выпуска в районе г. Геленджик



1 – трассы глубоководных выпусков; 2 – место утечки;
3 – зона загрязнения (3360 м^2)

Антропогенные загрязнения в районе Геленджикской бухты

Загрязнения в районе сброса сточных вод.
Фрагмент ASAR Envisat IMP VV изображения от 29.09.2010, 07:28 UTC.
Пространственное разрешение 12,5 м

Загрязнения у «трубы»

Фрагмент TerraSAR-X изображения, полученное 11.10.11 в 03:43 UTC с разрешением в точке 1,2 м

Используемые спутниковые данные:

Экспериментальную основу исследований составляют изображения морской поверхности, полученные над различными акваториями Мирового океана и внутренних морей с помощью сенсоров, установленных на различных спутниках, в том числе:

ASAR ИСЗ ***Envisat*** *(Европейское космическое агентство)*, **SAR** ИСЗ ***ERS-1, 2, Sentinel-1*** *(Европейское космическое агентство)*, SAR ИСЗ ***RADARSAT-2*** (Канадское космическое агентство), и ***TerraSAR-X, TanDem-X*** (Германское космическое агентство).

Возможность заказывать съемку районов интереса и получать архивные снимки предоставлена бесплатно Европейским космическим агентством в рамках проектов C1P.6342, Bear 2775 and C1P.1027, а также в рамках совместного российско-германского проекта SOAR RADARSAT-2/TerraSAR-X Project #5074.

Для интерпретации РЛИ привлекаются данные сенсоров **MODIS** *ИСЗ,* ***Aqua/Terra***, **MERIS** *ИСЗ* ***Envisat*** *и* **AVHRR** *ИСЗ* ***NOAA*** видимого и инфракрасного диапазонов, данные сканирующих радиометров **ETM+** *ИСЗ* ***Landsat 7***, **TM** ***Landsat 5*** *и* **OLI** ***Landsat 8***, а также данные гиперспектральных сенсоров **HICO** *и* **Hyperion**.

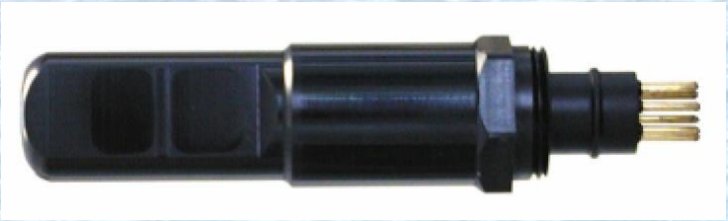
Ключевым вопросом является решение задачи комплексного использования данных, различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические и ИК данные), пространственному разрешению и размерности

Используемые океанографические приборы

Высокоточный CTD-зонд RBRconcerto

ADCP WorkHorse Sentinel 300 kHz

Термодатчики – 10 шт.



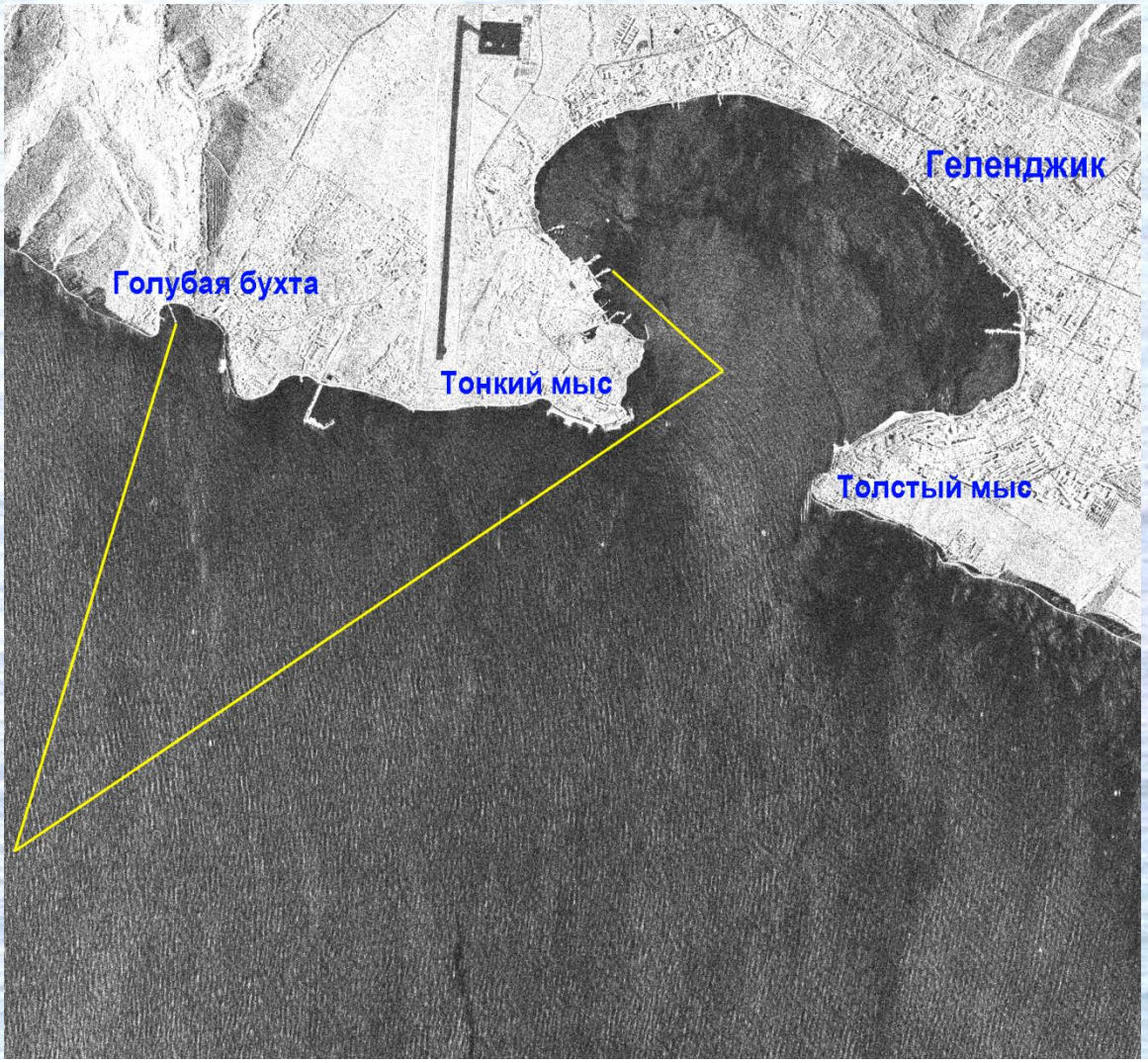
Датчик мутности Seapoint Turbidity Meter

Судовая метеостанция

Исследования в северо-восточной части Черного моря

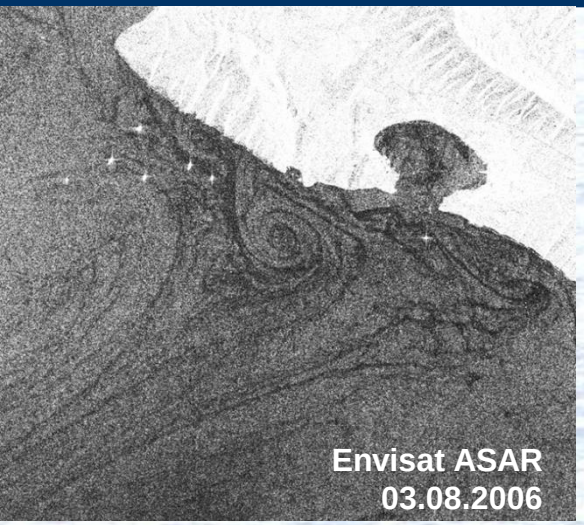
Измерения с борта яхты «Вита»
(*фото Комаровой Н.Ю.*)

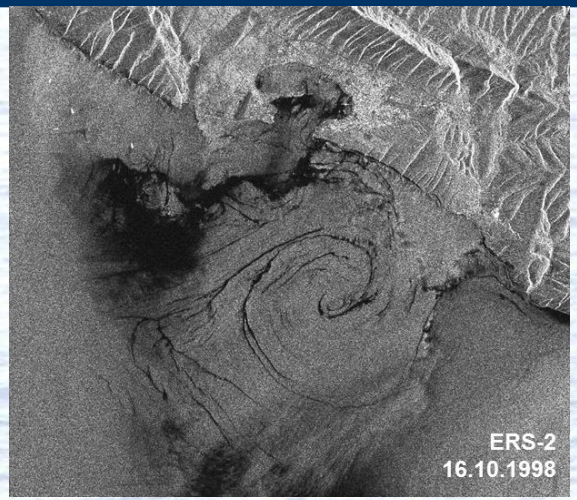
Район подспутниковых экспериментов

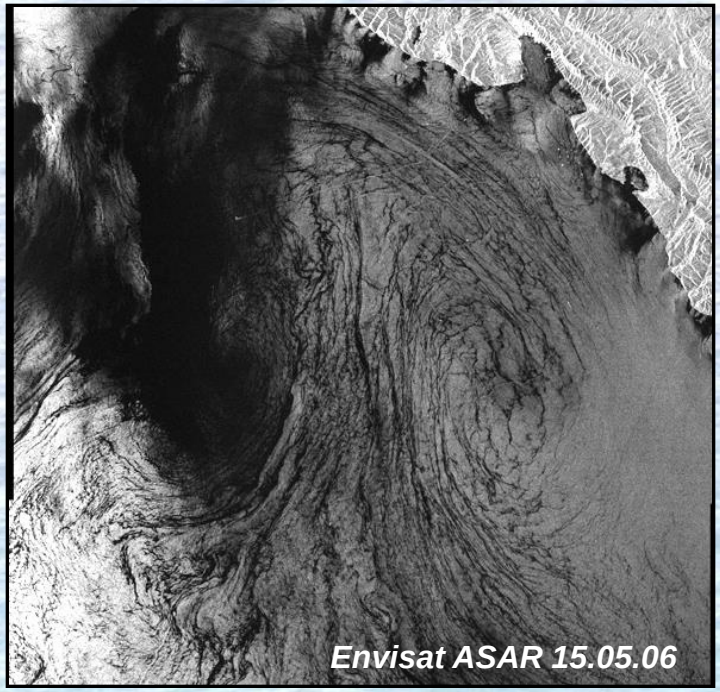


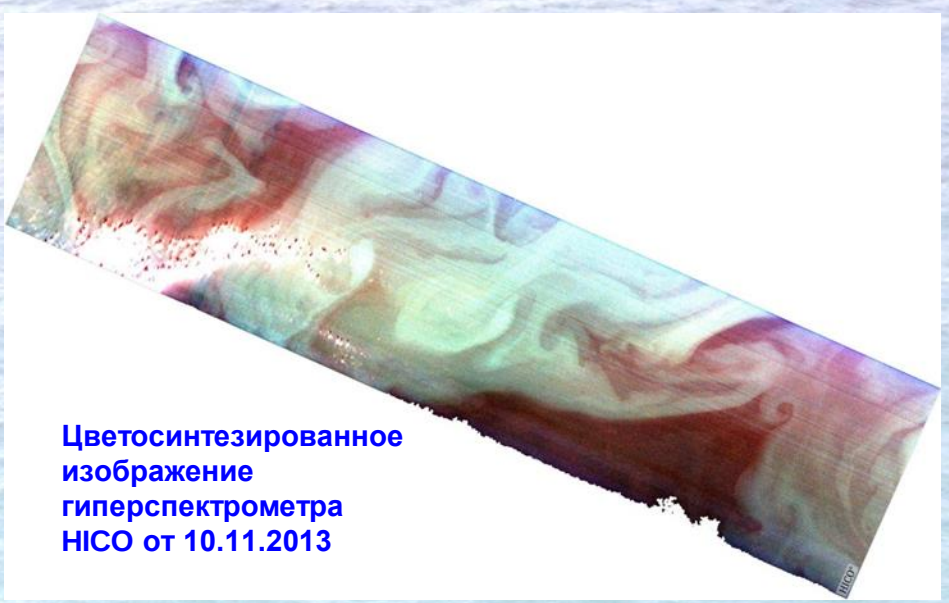
Подспутниковые измерения проводятся на акватории шельфа Черного моря вблизи Геленджика в пределах границ от траверза Голубой бухты до мыса Толстого

Субмезомасштабные вихри



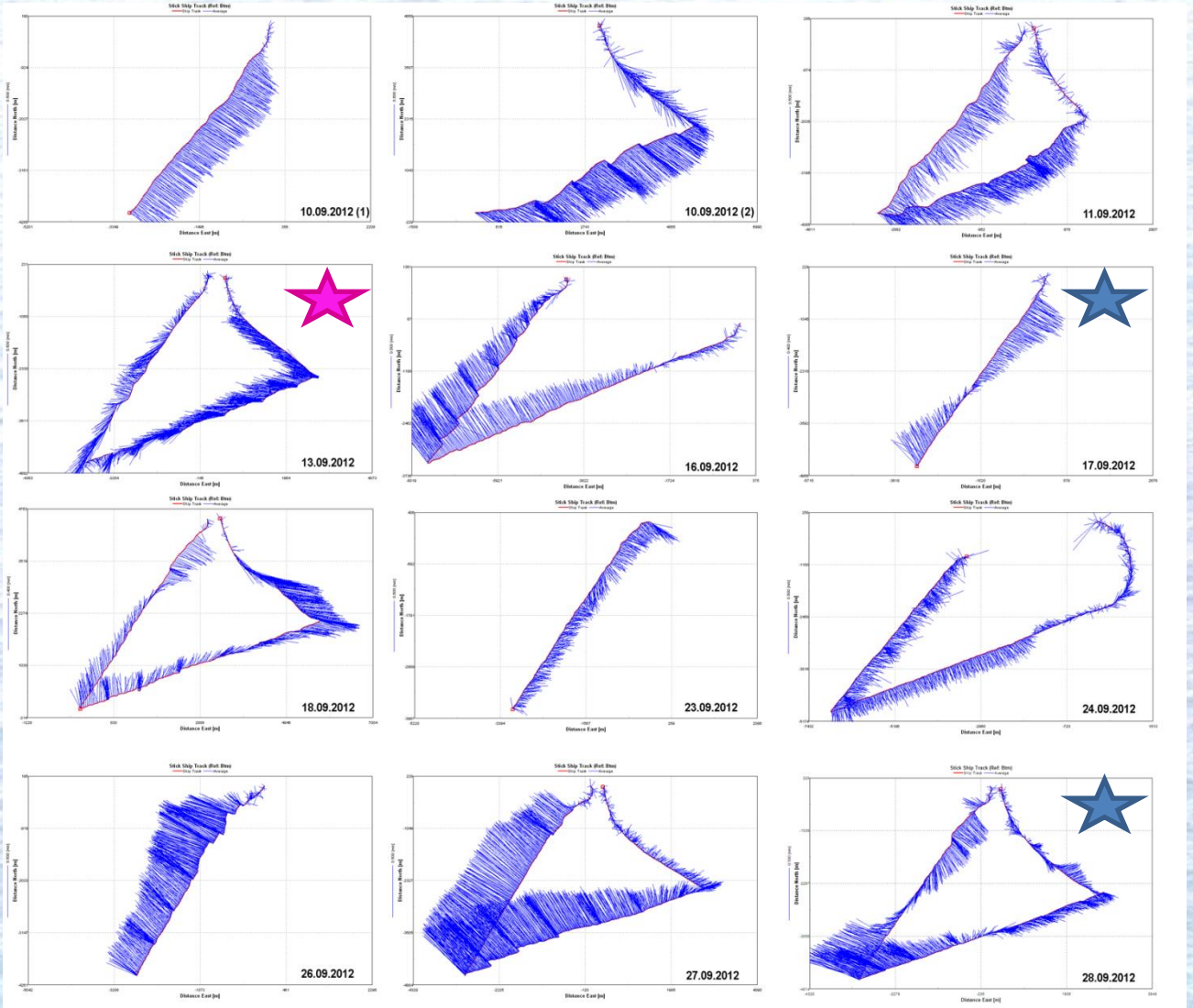






Цветосинтезированное изображение гиперспектрометра HICO от 10.11.2013

Выявление субмезомасштабных вихрей с помощью ADCP



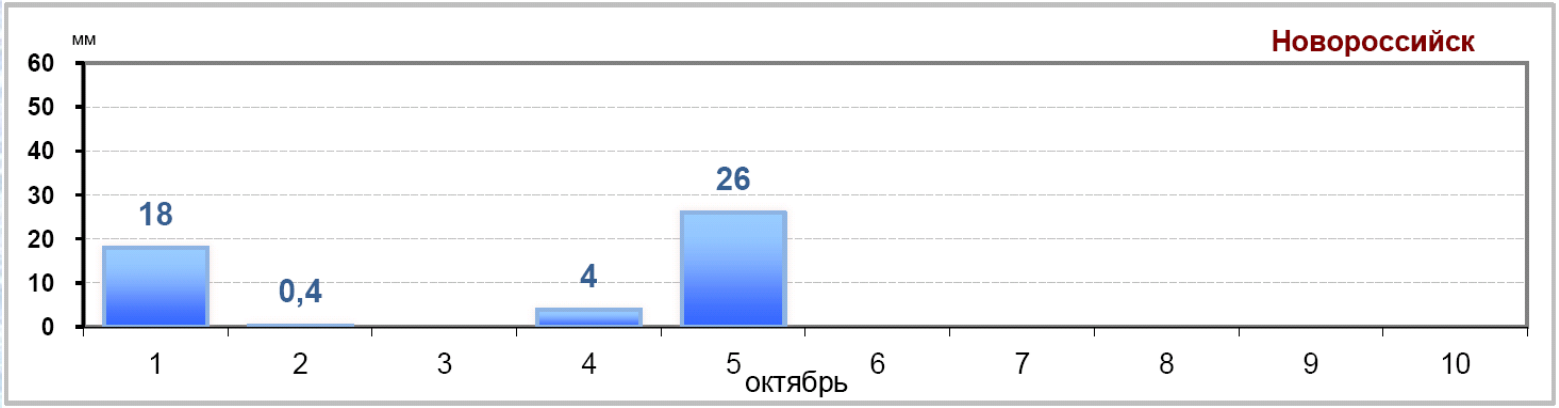
Антициклонический вихрь

Циклонический вихрь

Результаты

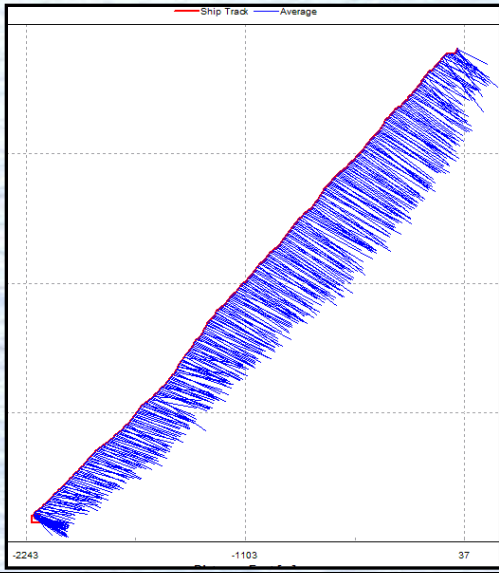
Задача 1

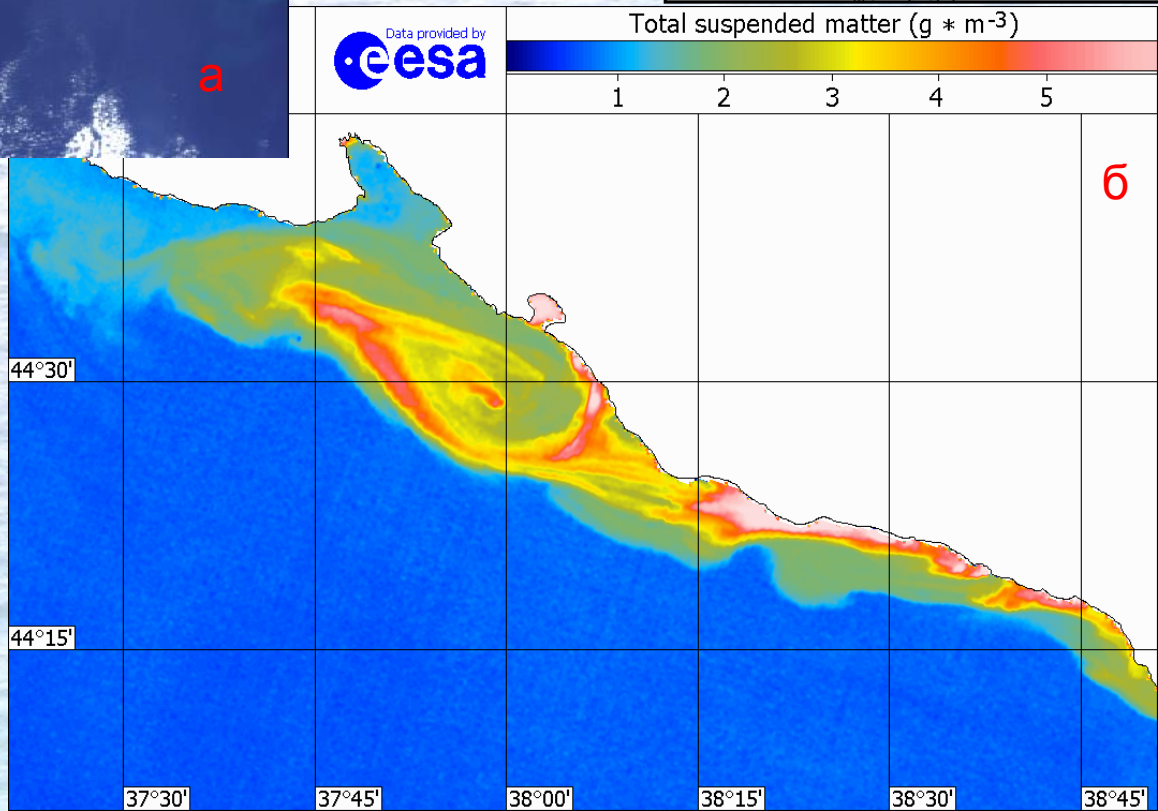
Аварийный сброс после сильных ливневых дождей



Распространение загрязненных вод под действием антициклонического вихря 07.10.2011

Течения на разрезе по данным ADCP, юго-восточное направление соответствует антициклоническому вихрю





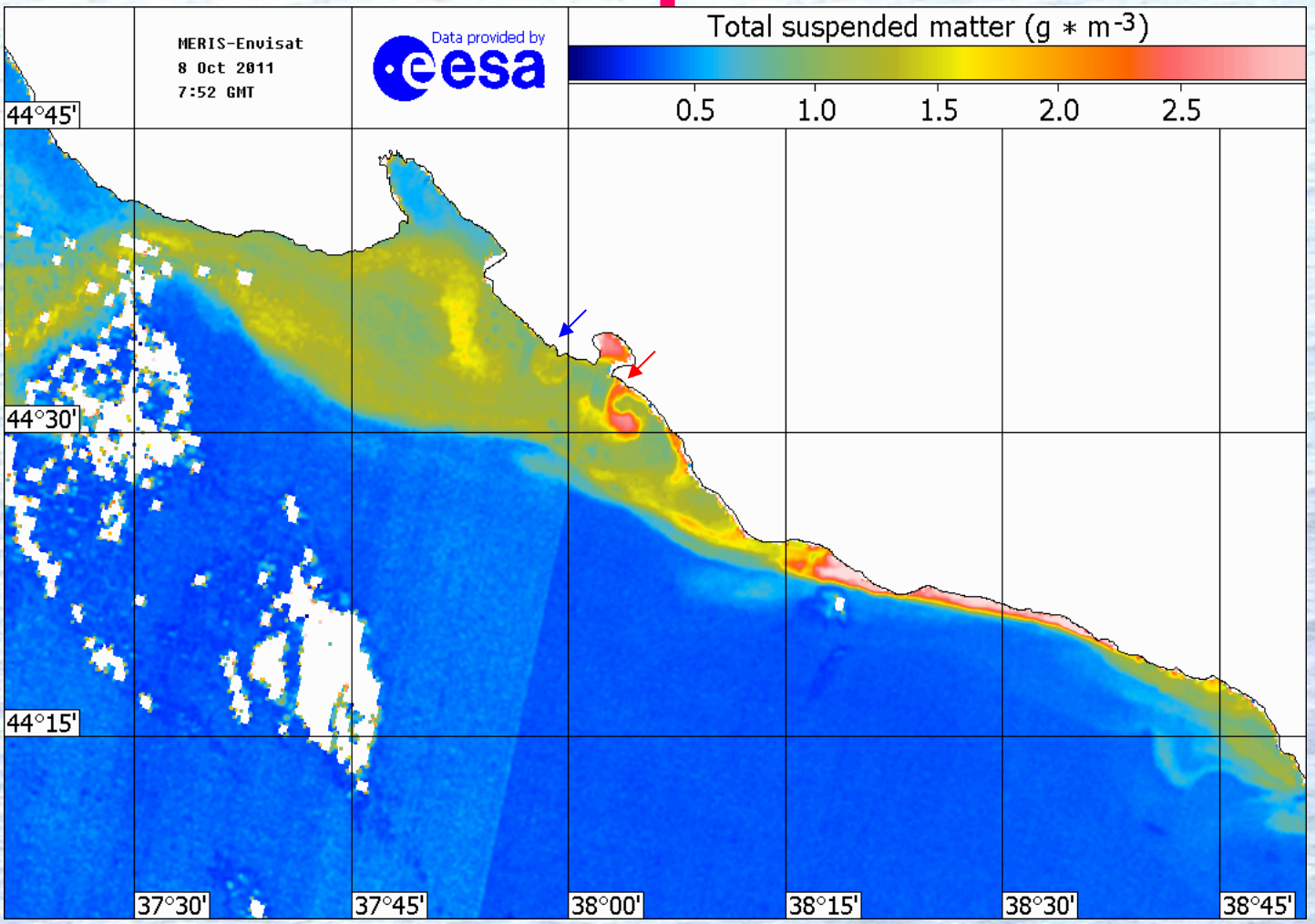
После сильных ливневых дождей 5 октября с речными и сточными водами в море попало большое количество взвеси.

а) Фрагмент MERIS Envisat изображения (композит 7, 5 и 2 каналов), полученного с разрешением 260 м.

б) Карта пространственного распределения взвешенного вещества, построенная на основе данных MERIS Envisat

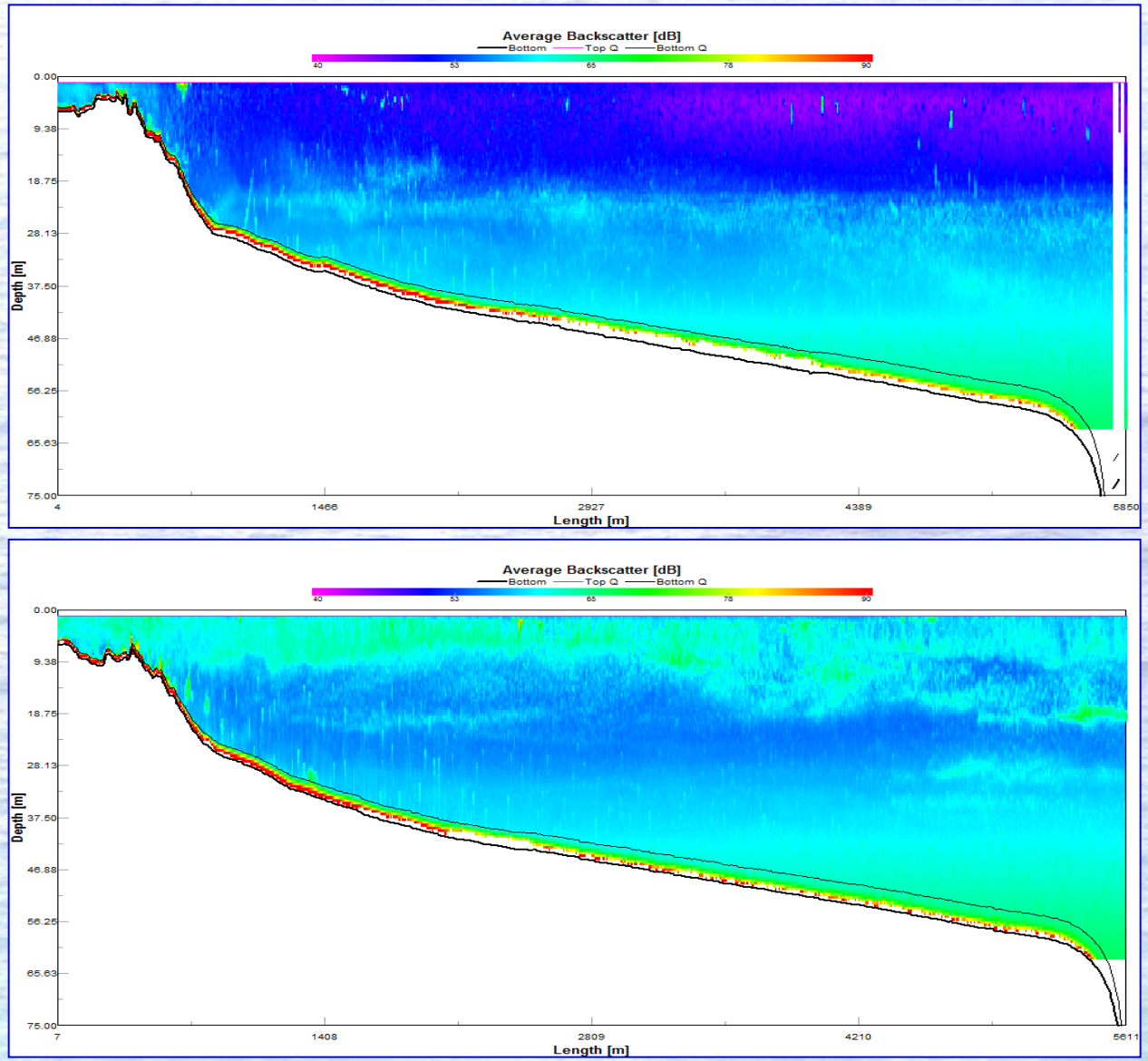
Размеры вихря: диаметр
большой оси – 35 км;
малой – 16 км

8 октября 2011

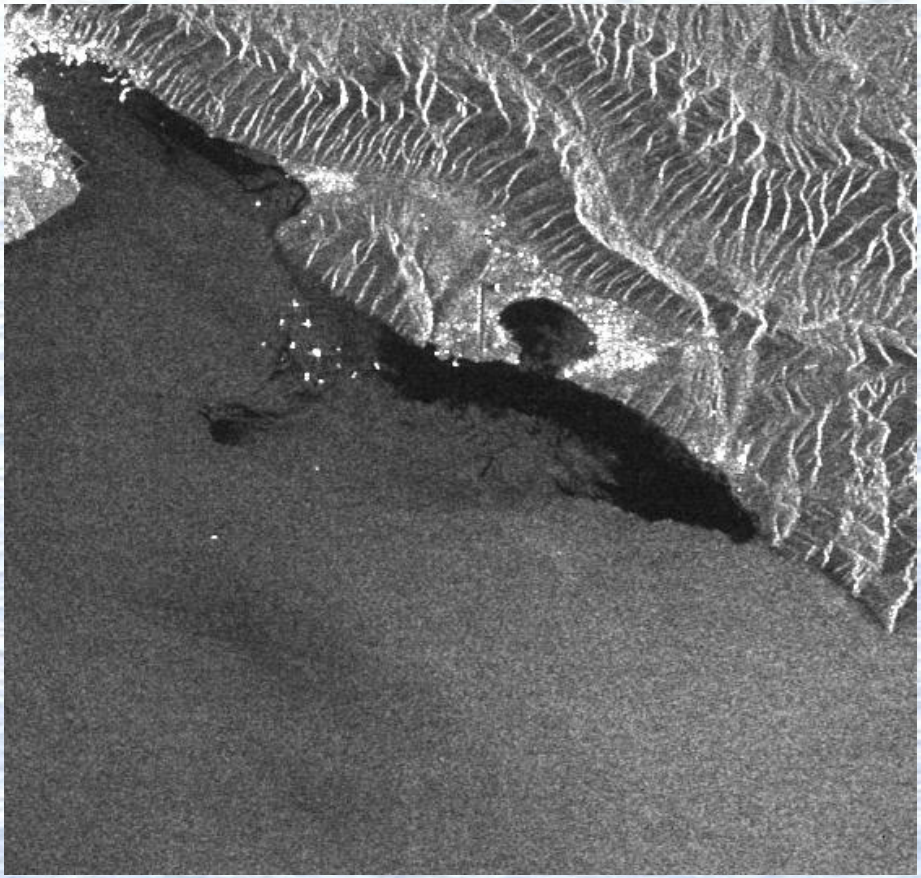


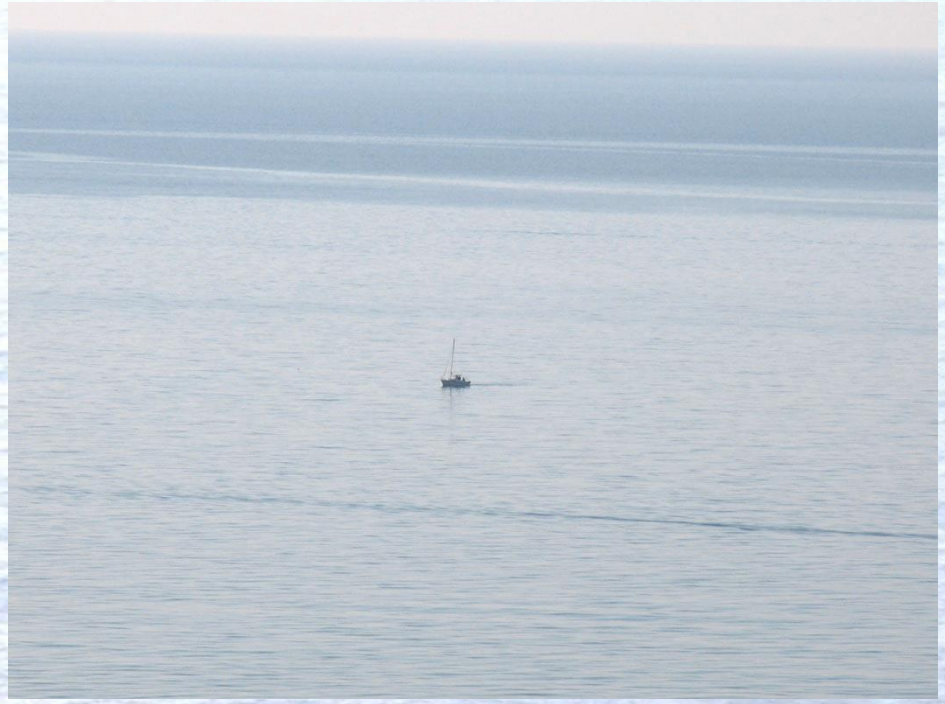
Карта пространственного распределения взвешенного вещества, построенная на основе данных MERIS Envisat Д.М. Соловьевым (МГИ). Хорошо видно, что основной источник взвеси – очистные сооружения на Толстом мысу (красная стрелочка). Диаметр центральной части вихря – 4 км. Еще один источник взвеси – вынос р. Ашамба (синяя стрелочка)

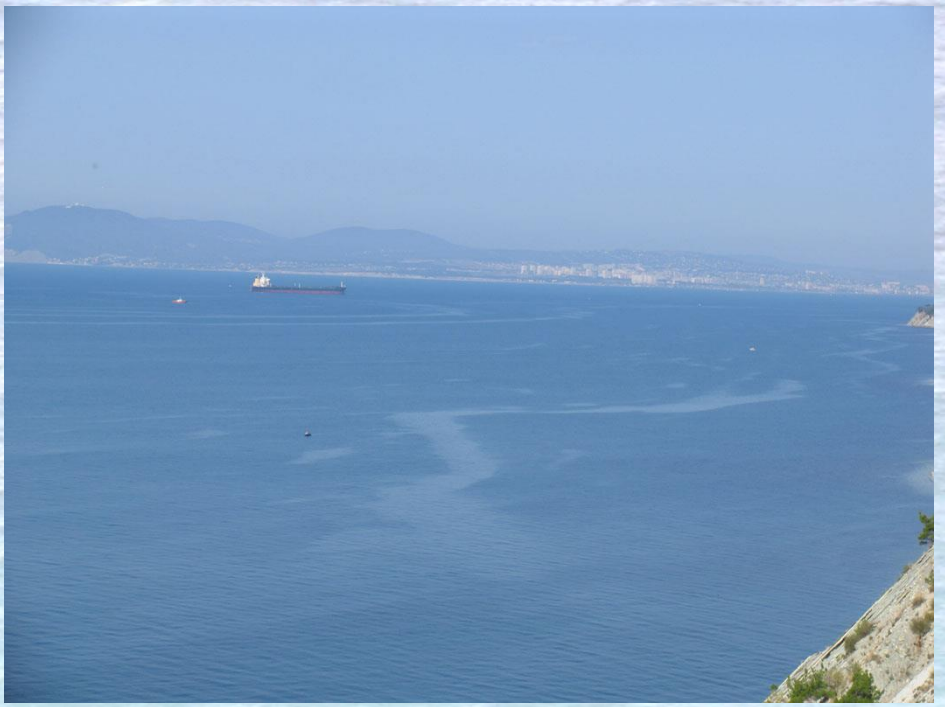
Картины обратного рассеяния на сечениях поперек шельфа до шторма (28 сент.) – вверху, и после шторма (8 окт.) -внизу



8 октября 2011

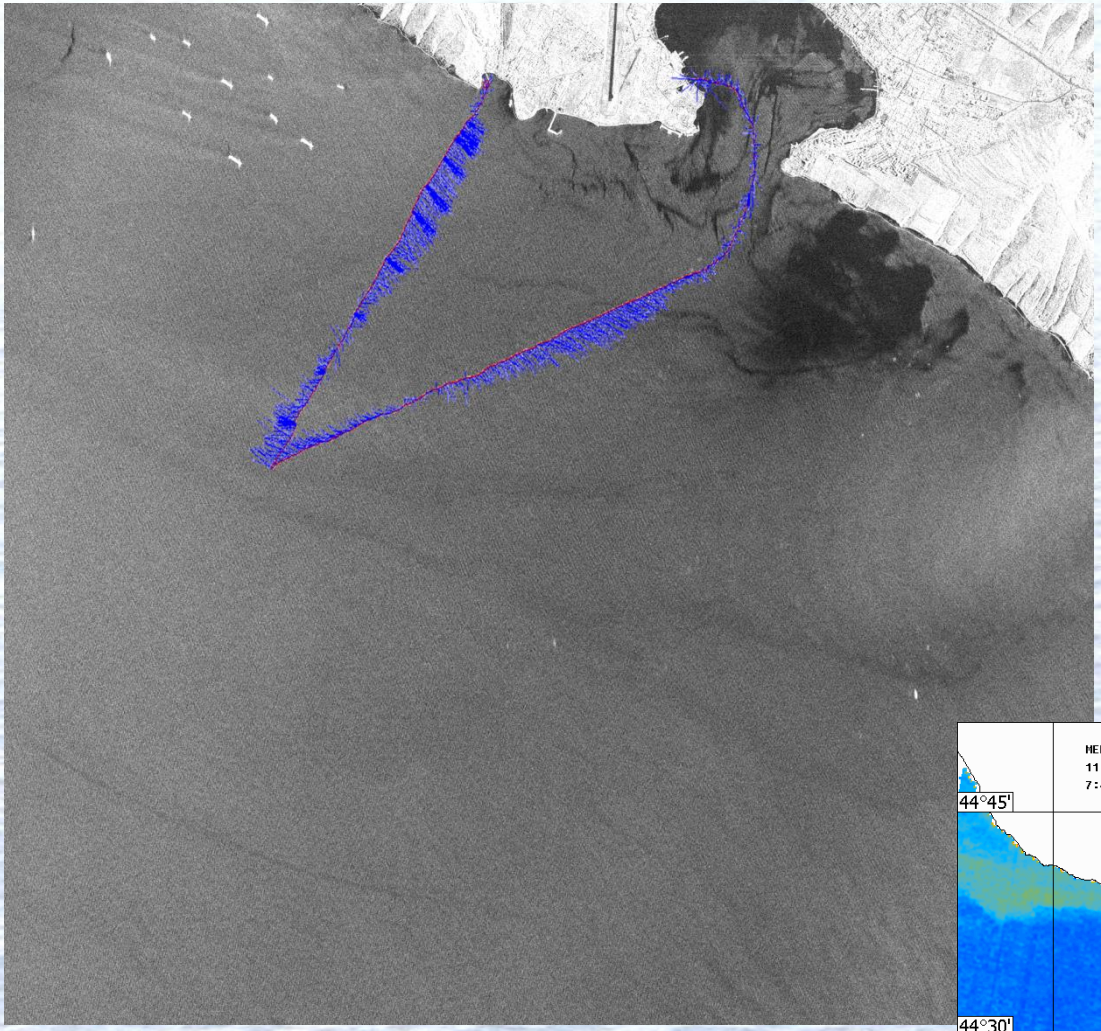


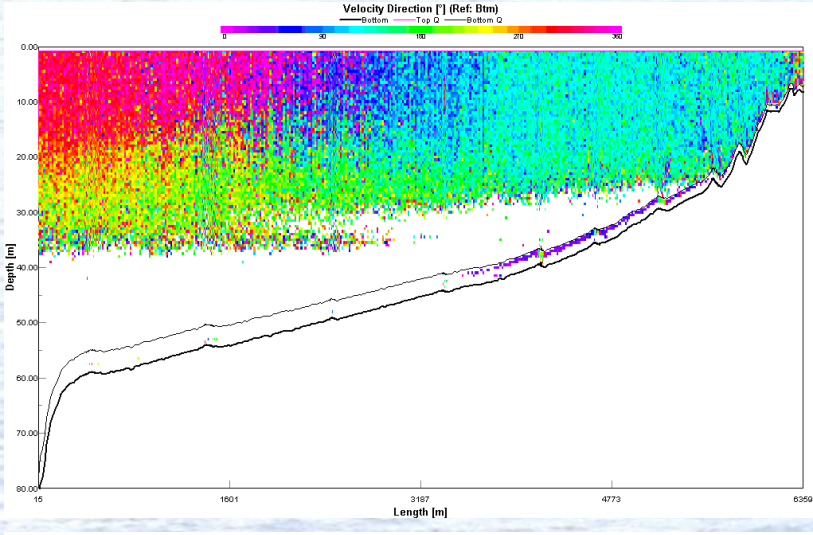




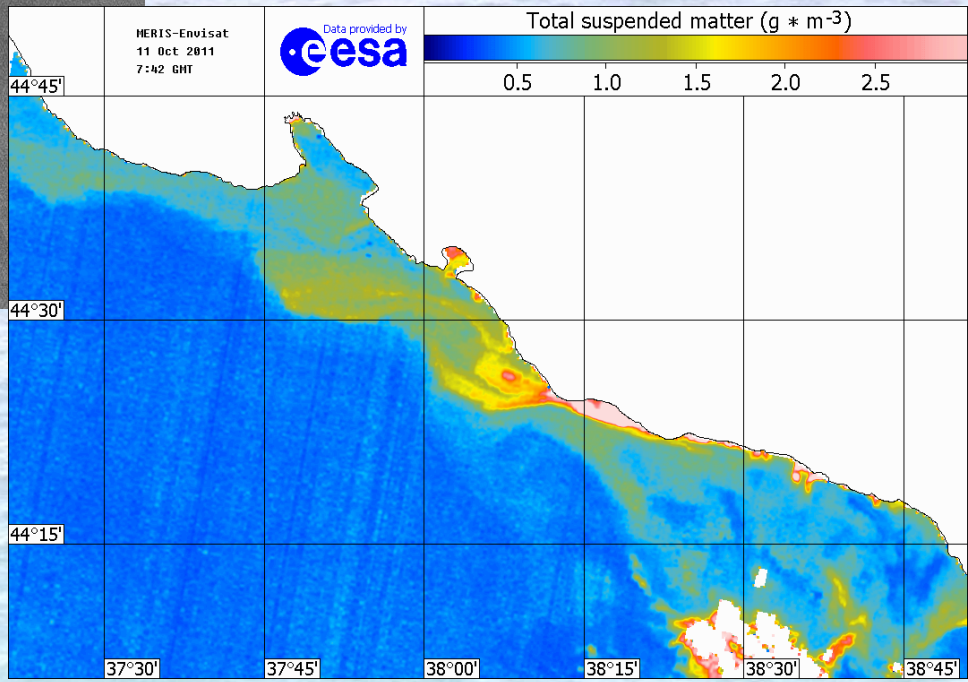
Фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 08.10.11 в 07:51 UTC с разрешением в точке 75 м. Темная область вдоль берега не является ветровой тенью. Справа - фото с высокого берега: Верхнее фото – в сторону выглаженной ПАВами воды, нижнее фото содержит проявления мелкомасшабной ряби и вихрей

11 октября 2011 г.

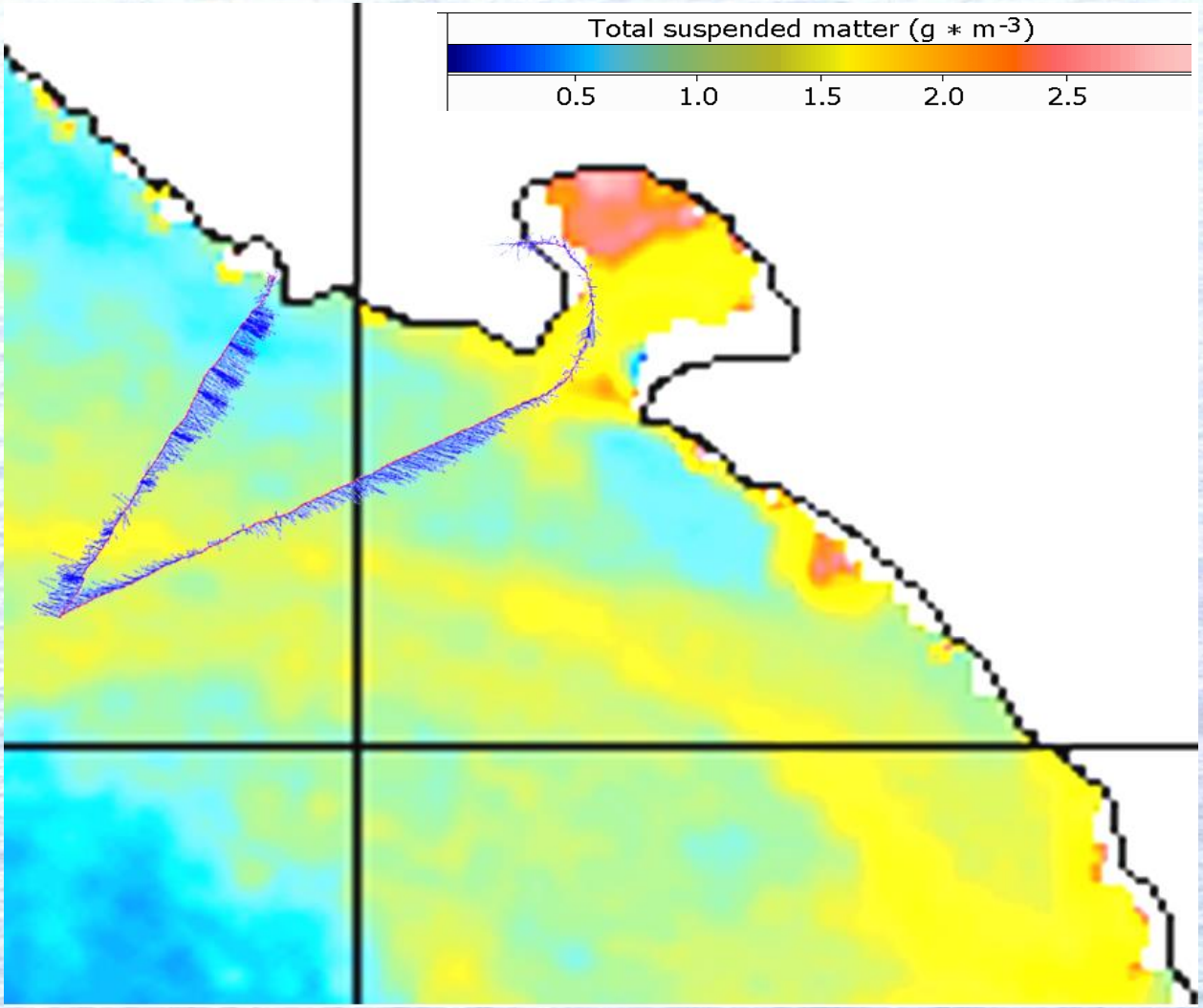




Направление течения на втором разрезе



Фрагмент RADARSAT-2 изображения, полученное 11.10.11 в 03:37 UTC с разрешением в точке 2 м.
Синим отмечена скорость и направление течения, измеренные с помощью ADCP в период спутниковой съемки



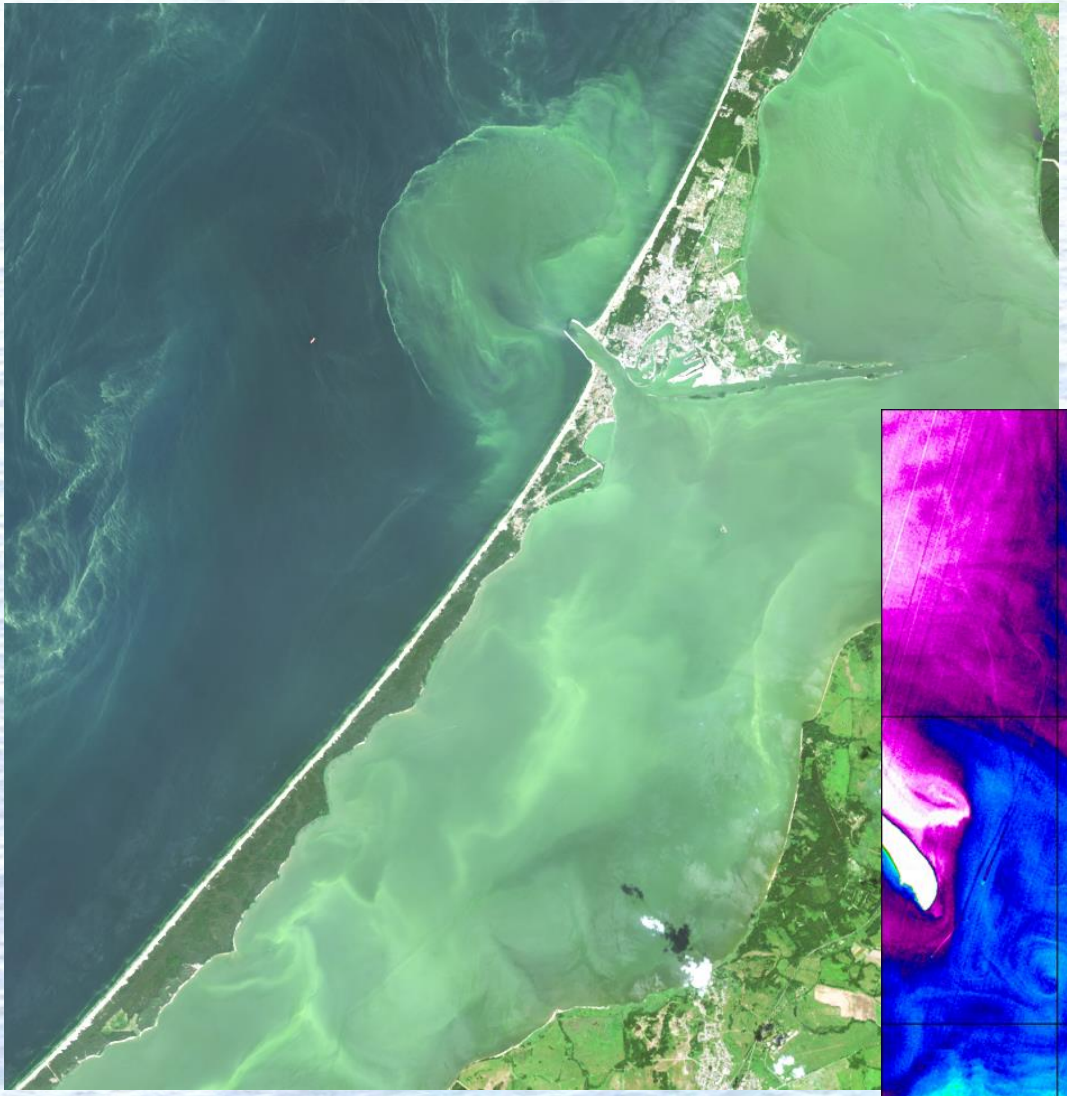
Предварительный анализ показывает, что юго-восточное течение совпадает с областью «чистой» воды, а северо-западное течение– с областью более загрязненных вод.

Фрагмент предыдущей карты с наложением данных ADCP

Задача 2

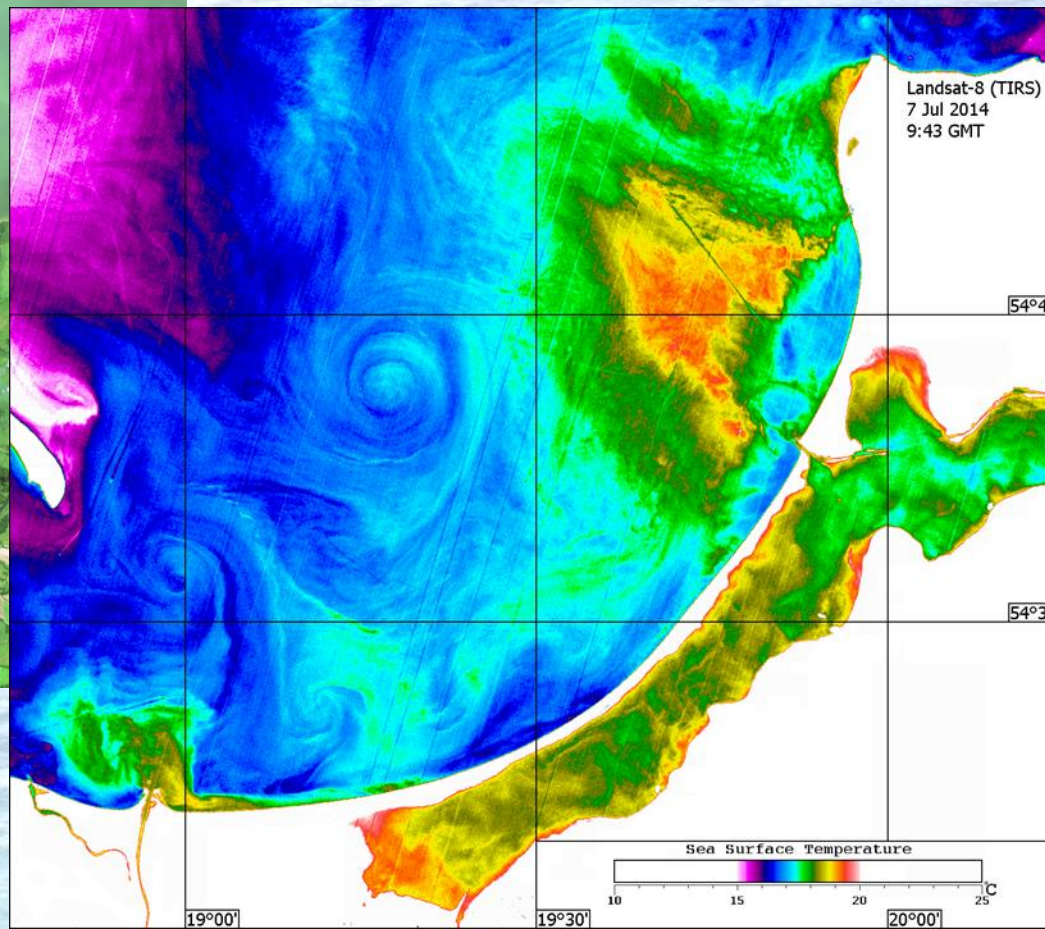
Влияние гидрометеорологических процессов на распространение выноса из Калининградского залива

Вынос из Калининградского залива



Фрагмент изображения OLI Landsat-8 (14 х 13 км) от 07.07.2014 (4-3-2 каналы)

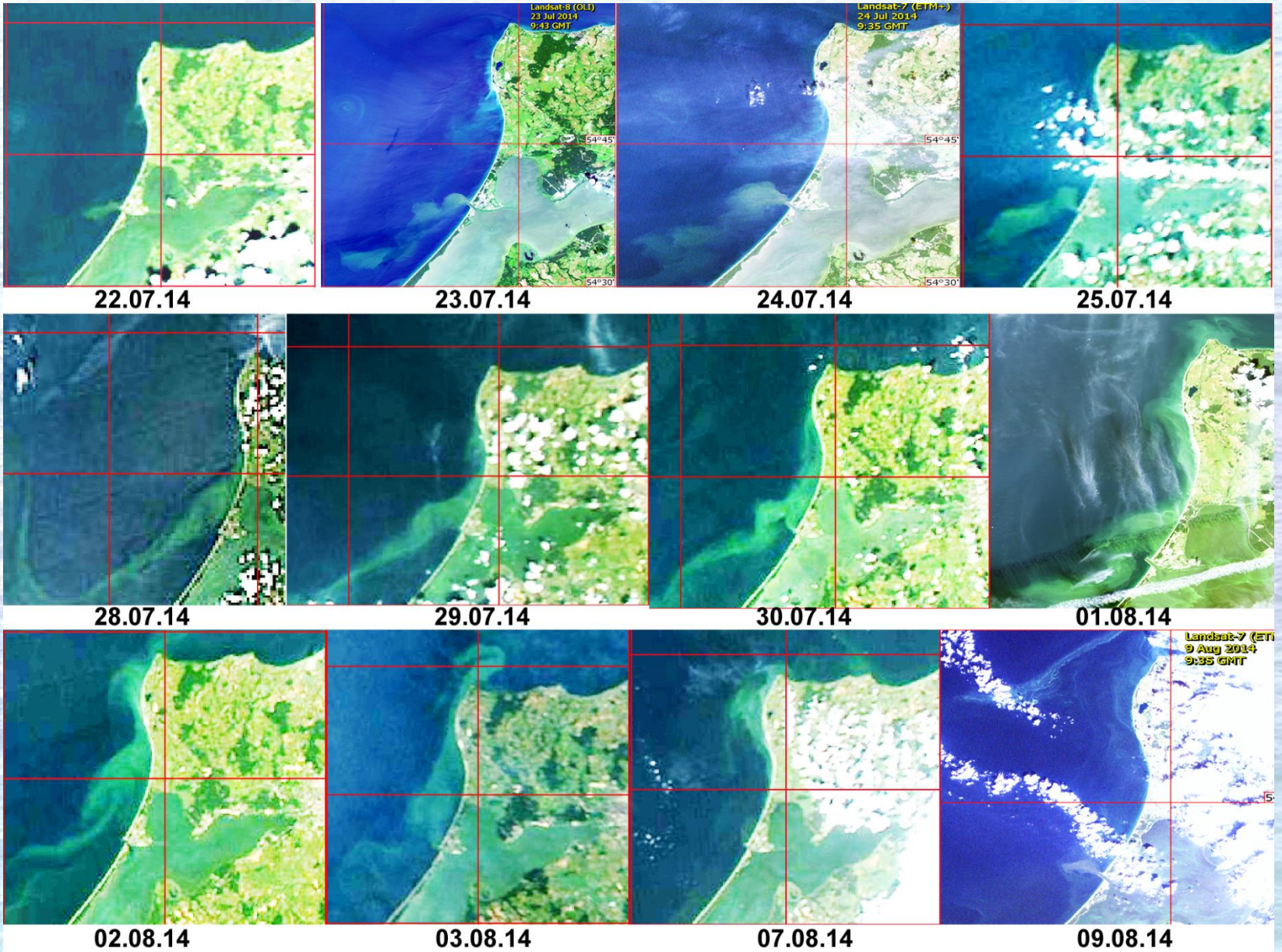
ИК-изображение юго-восточной части Балтийского моря, полученное TIRS Landsat - 8



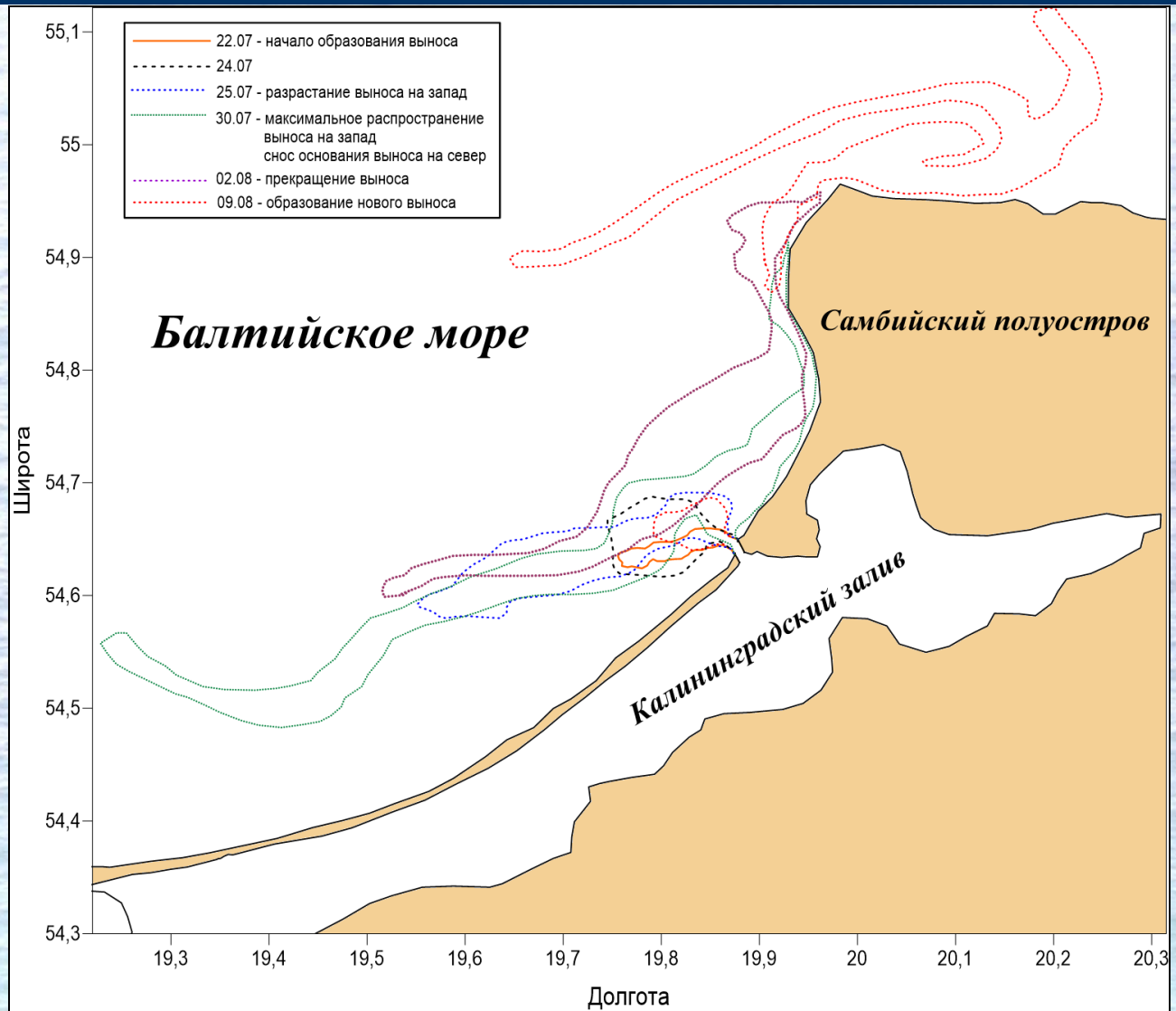
Вихревые структуры в Гданьском заливе

Фрагмент изображения OLI Landsat-8 от 07.07.2014 (4-3-2 каналы)

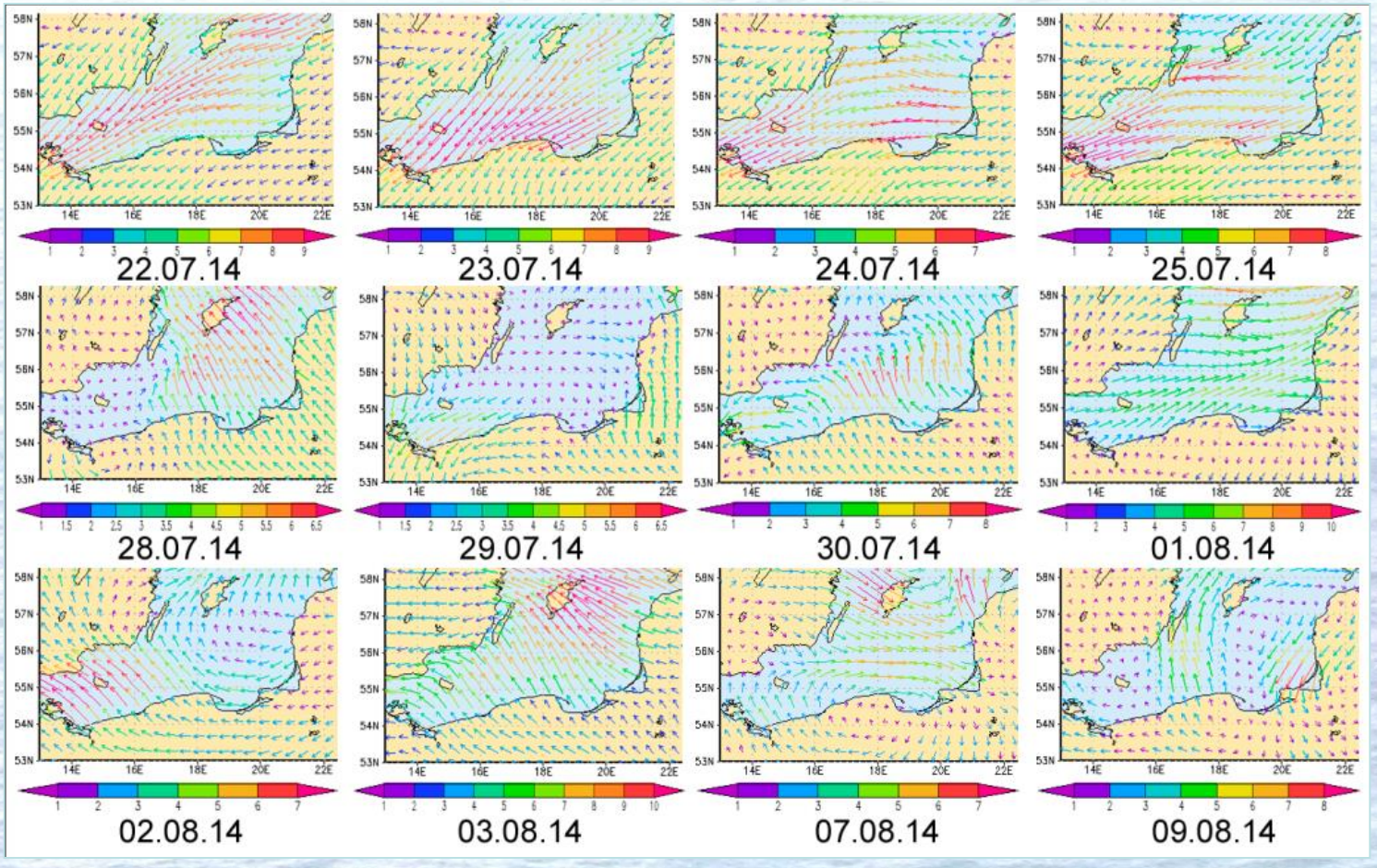
Серия спутниковых изображений, содержащих поверхностные проявления выноса из Калининградского залива



Карта-схема проявлений выноса из Калининградского залива на спутниковых изображениях



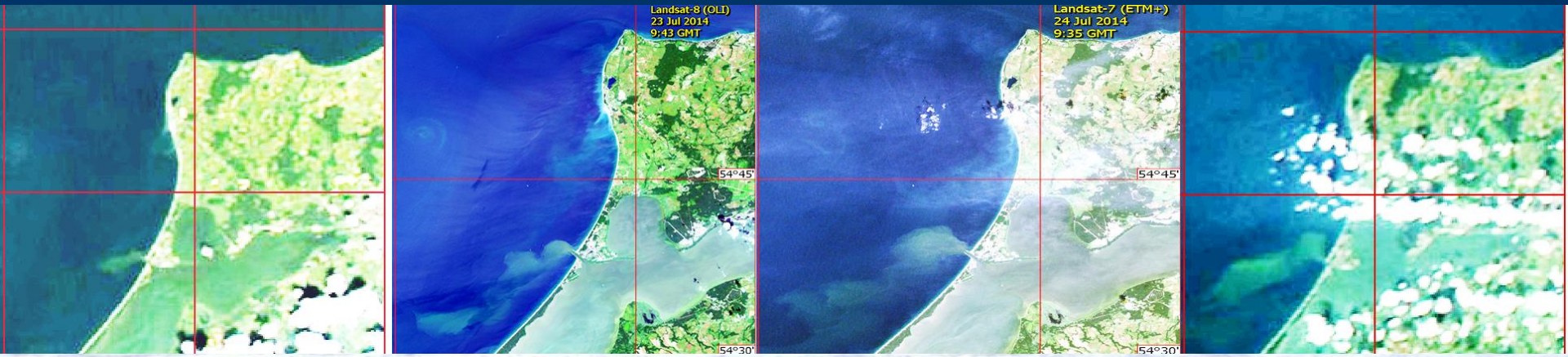
Ветровые условия во время спутниковой съемки



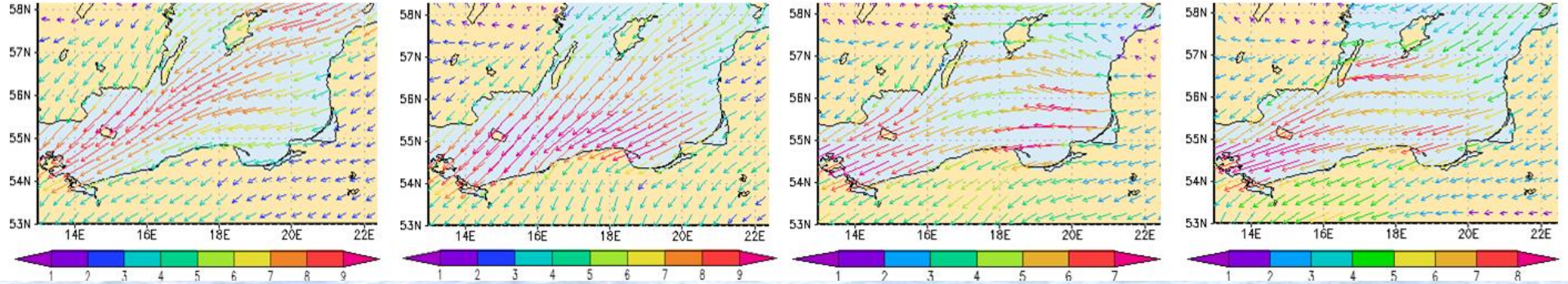
На карте представлены векторы скорости ветра (м/с) на высоте 10 м. Величина скорости характеризуется цветом и длиной стрелок. Карта построена в Гидрометцентре России по данным прогноза, выпускаемого метеоцентром NCEP/NOAA.

© ГУ "Гидрометцентр России" Росгидромета, NCEP/NOAA

Влияние ветровых условий на распространение выноса



22.07.14 23.07.14 24.07.14 25.07.14



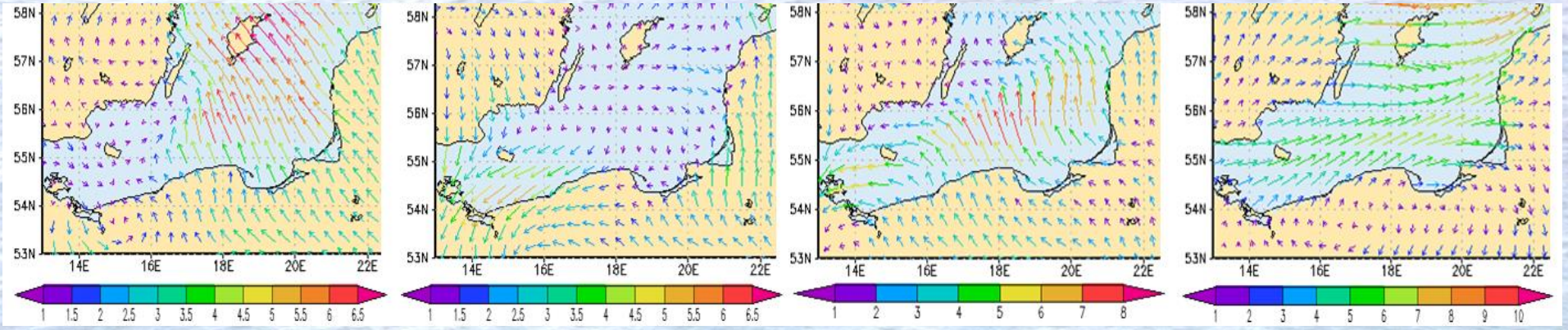
Течения в данном районе Балтики целиком формируются полем ветра, в отличие, например, от Черного моря, где есть постоянное Основное черноморское течение. При этом, поскольку западные ветра преобладают, то в данном районе даунвеллинговые струи также формируются чаще. В этом смысле даунвеллинговая струя в есть приближенный аналог Основное Черноморское течения .

Течение откликается на изменение ветра за инерционный период Tiner =1/ f = 14 ч

За период 2-3 Tiner практически полностью формируются квазигеострофические течения, которые при достаточно сильном ветре (~ 8 м/с) приобретают вид струй.

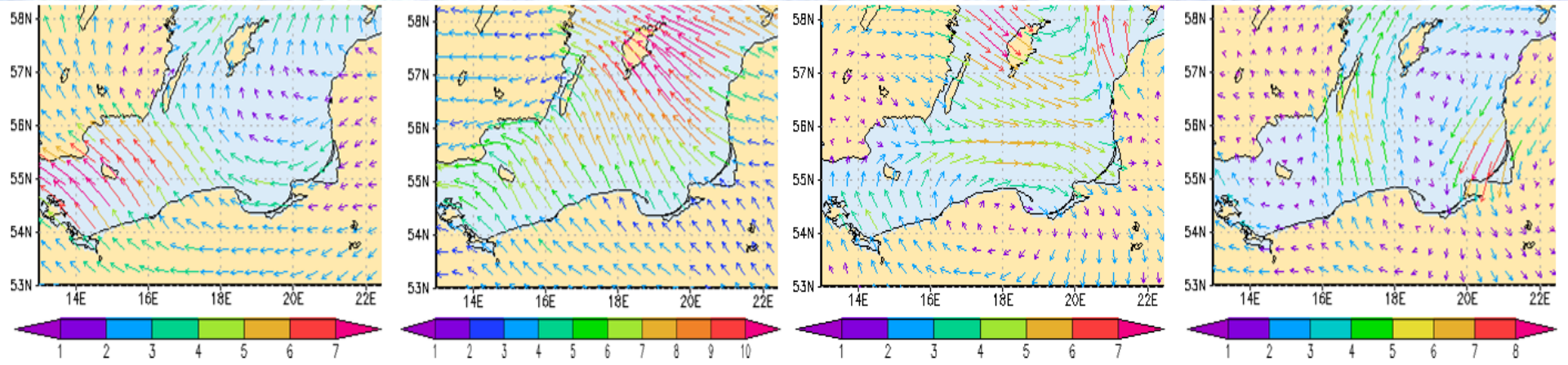
Влияние ветровых условий на распространение выноса

28.07.14 29.07.14 30.07.14 01.08.14



Влияние ветровых условий на распространение выноса

02.08.14 03.08.14 07.08.14 09.08.14

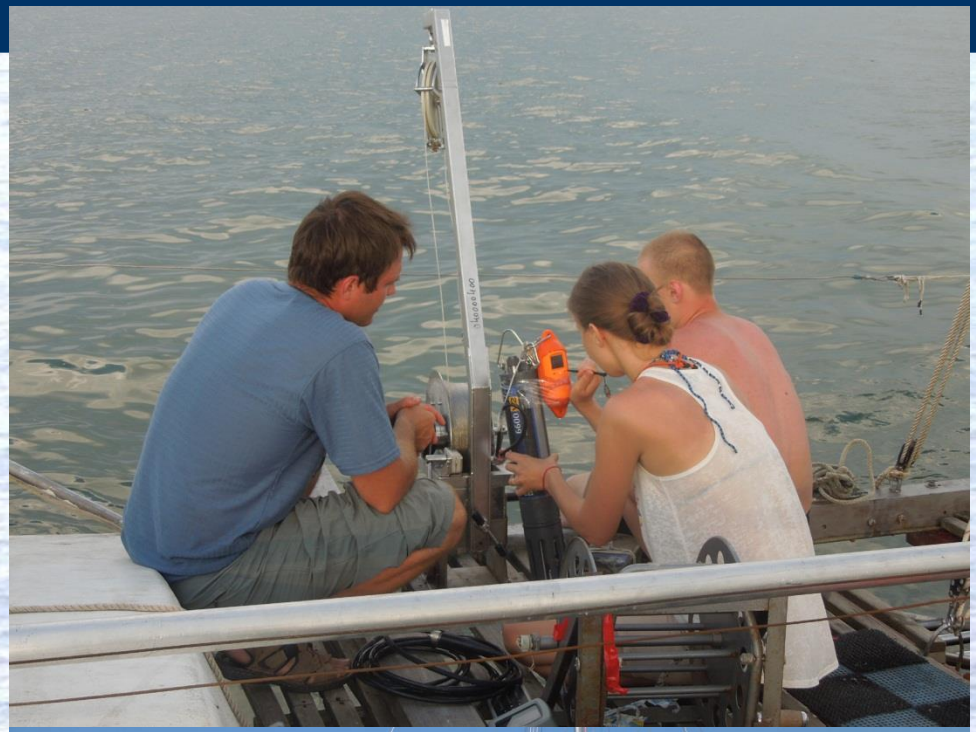


Подспутниковые измерения 29.07 - 08.08 2014

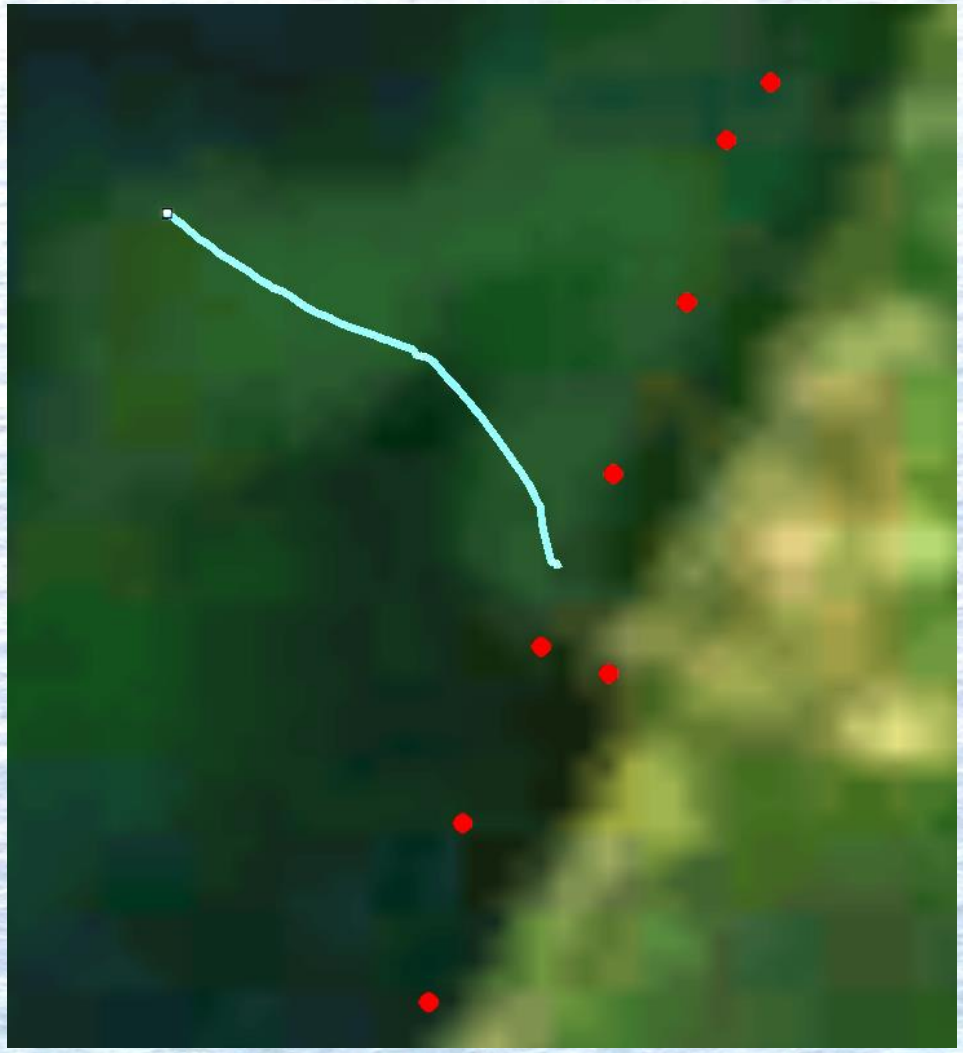
С целью верификации спутниковой информации был проведен ряд подспутниковых измерений гидрологической структуры вод Балтийского моря вблизи Самбийского полуострова.

В ходе экспедиции было выполнено 6 комплексных гидрологических разрезов с максимальным удалением 20 миль, а также проведен ряд исследований вод Калининградского залива.

Измерения в области выноса вод из Калининградского залива проводились при помощи CTD-зондирования и съемки судовым ADCP. В экспедиции участвовали аспиранты преподаватели и студенты кафедры океанологии МГУ имени М.В. Ломоносова, БФУ, МФТИ и ИКИ РАН

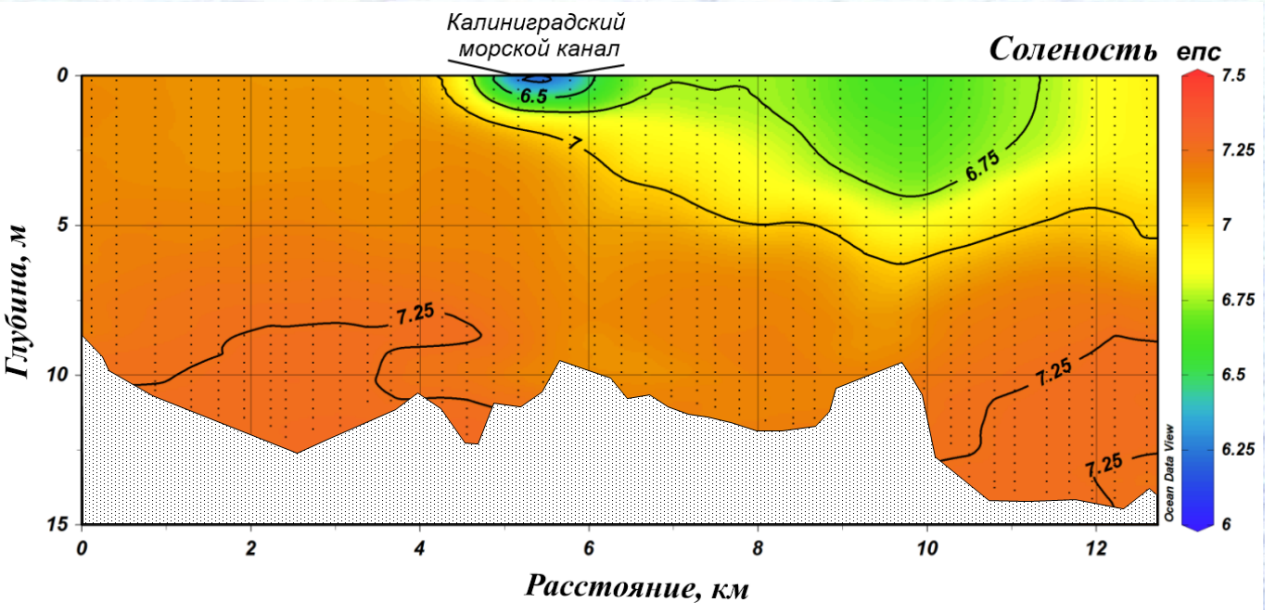


Подспутниковые измерения 30.07.2014

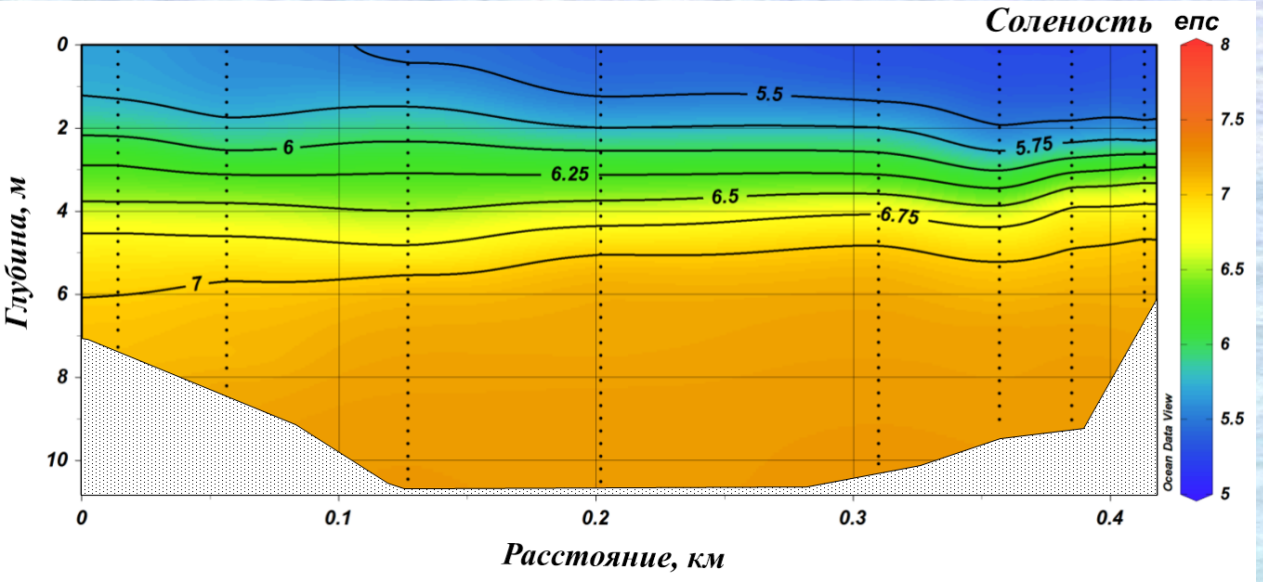


красные точки – станции CTD зондирования;
голубая линия – трек буксировки ADCP;
фон – фрагмент MODIS Aqua изображения

Подспутниковые измерения солености 30.07.2014

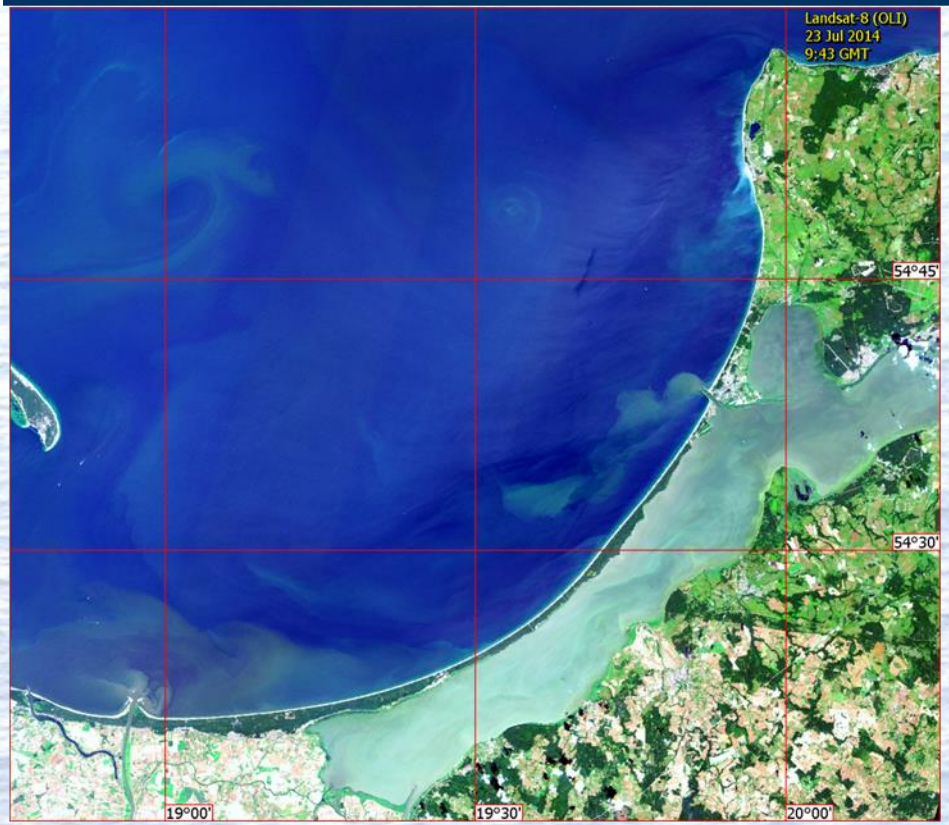


Распределение солености в прибрежной зоне (на разрезе из 42 станций)

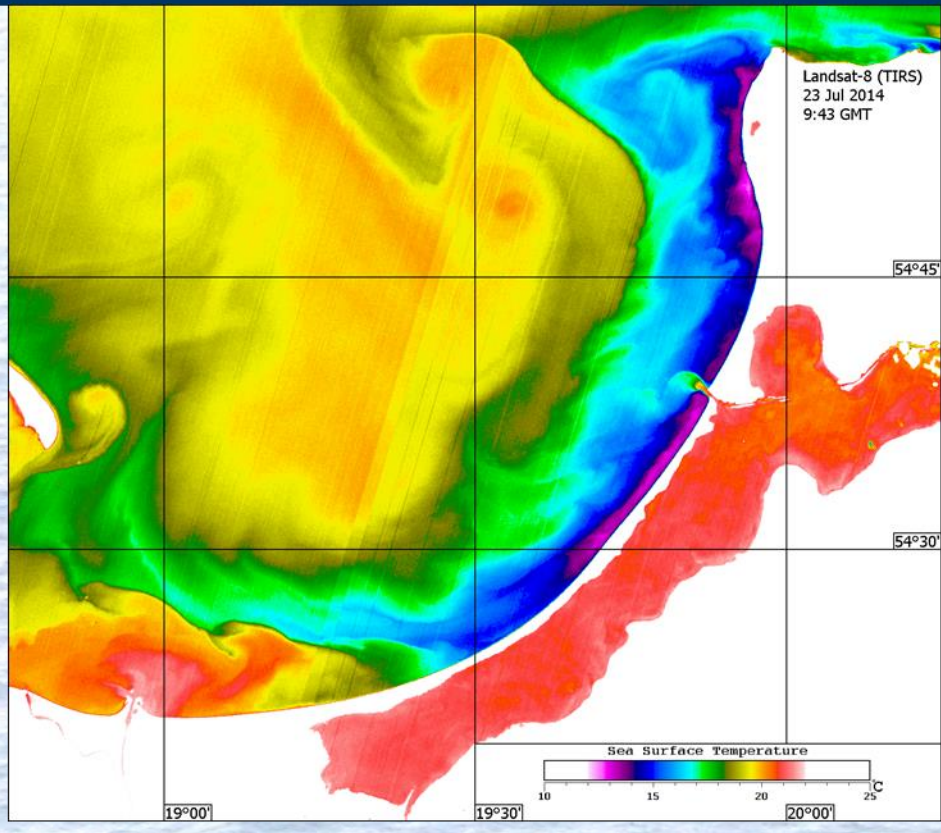


Распределение солености в Калининградском канале (на разрезе из 8 станций)

Проявление выноса в данных Landsat-8 (2)



Фрагмент изображения OLI Landsat-8 от 23.07.2014 (4-3-2 каналы)



ИК-изображение юго-восточной части Балтийского моря, полученное TIRS Landsat - 8

Подспутниковые измерения температуры воды 30.07.2014

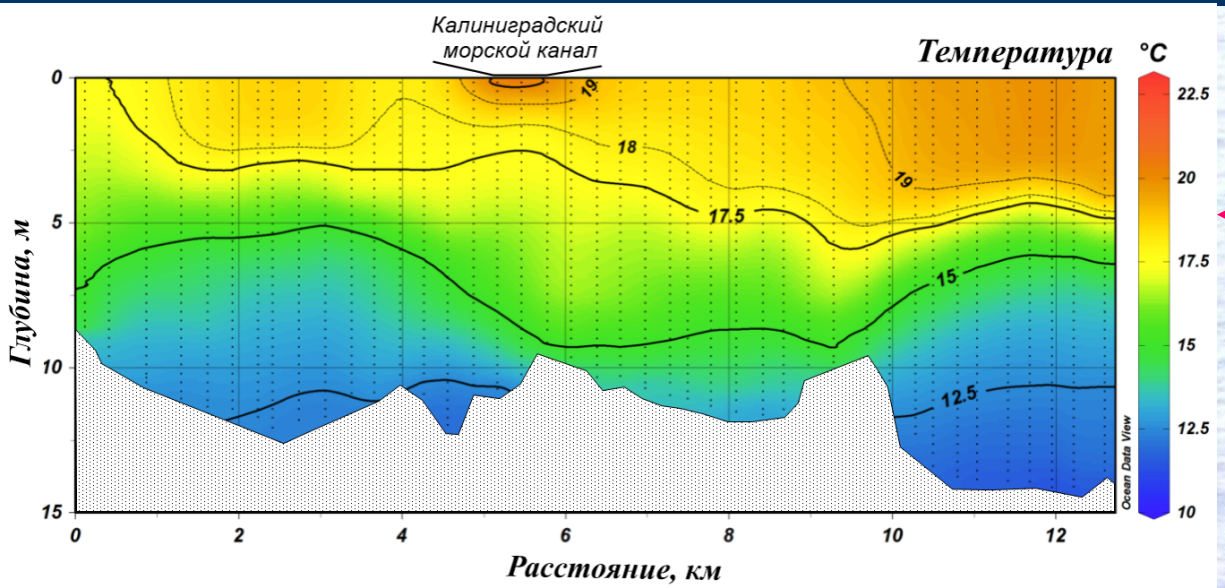
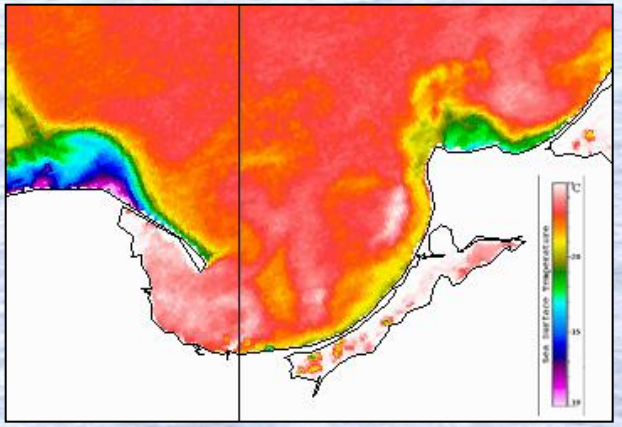


График распределения температуры в прибрежной зоне



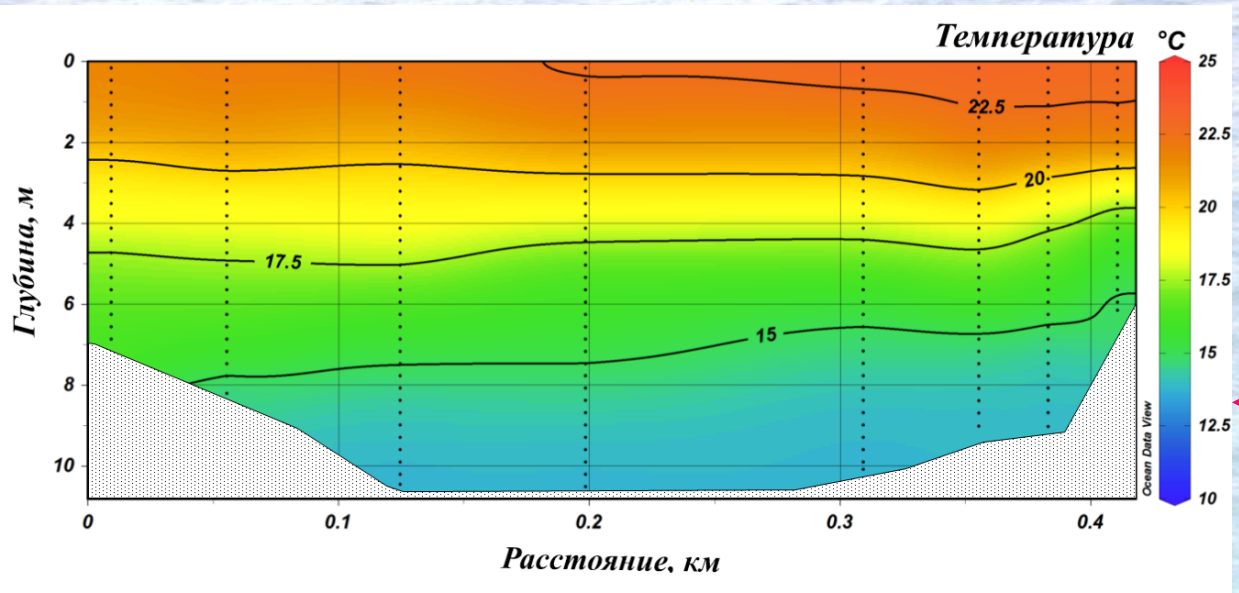
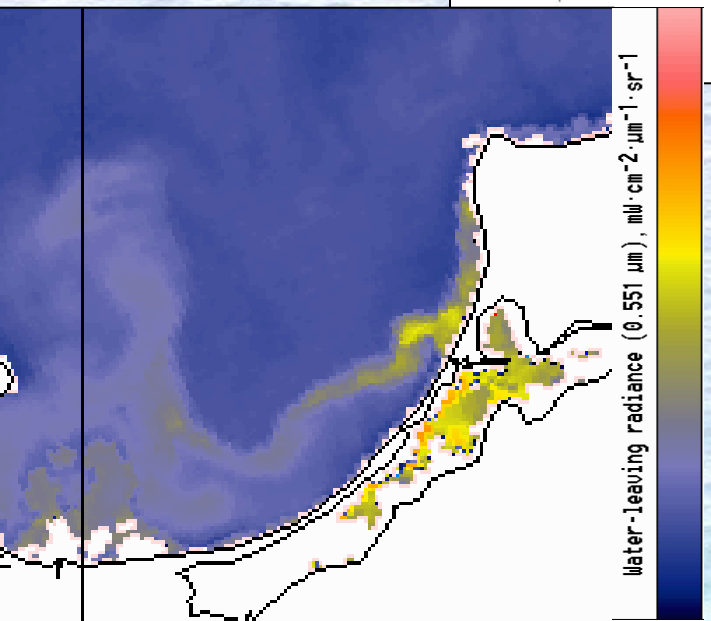
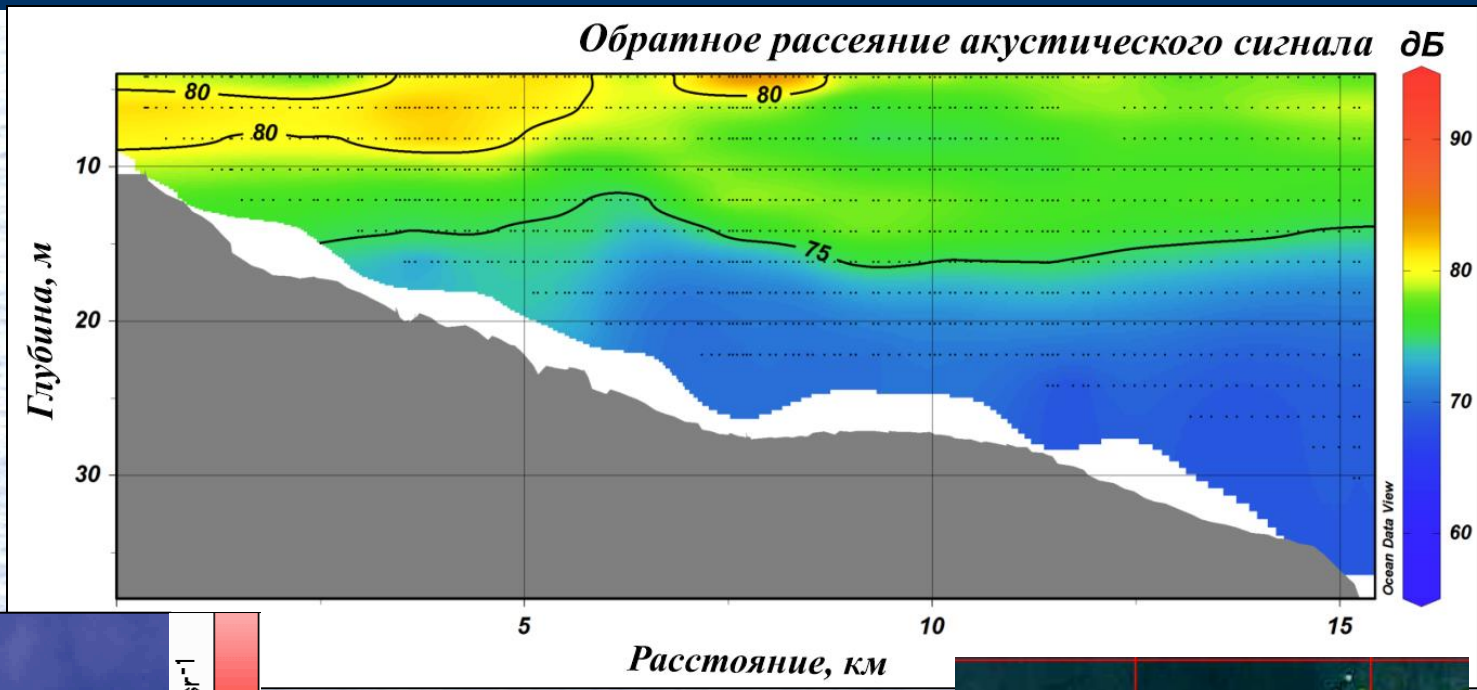


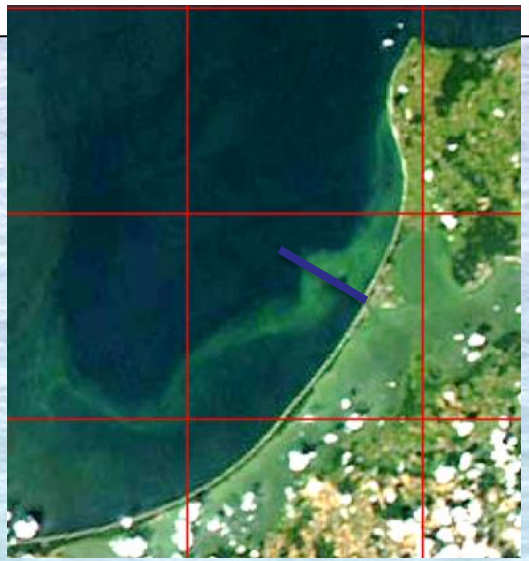
График распределения температуры Калининградском канале

Подспутниковые измерения обратного рассеяния акустического сигнала 30.07.2014

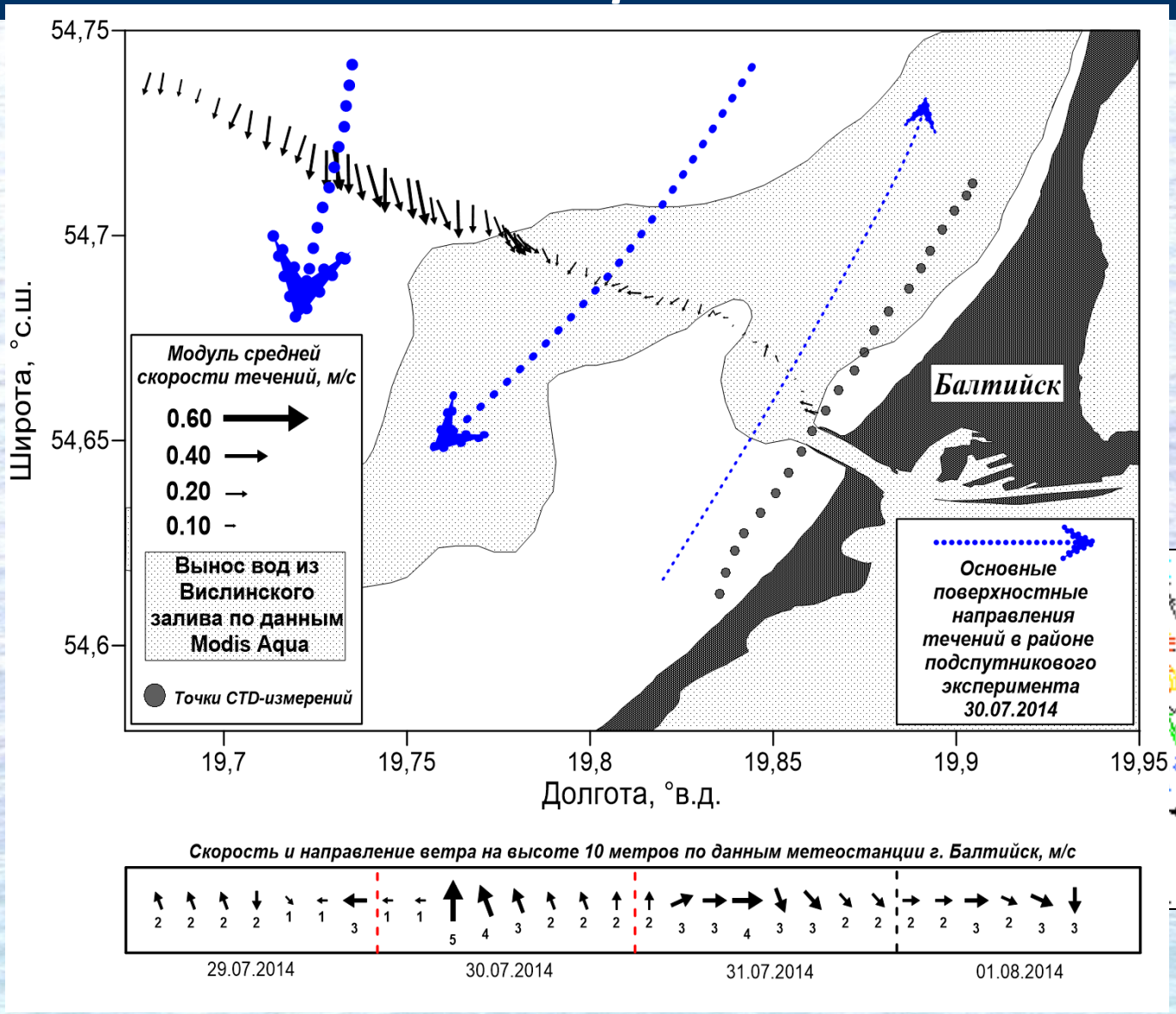
Карта распределения Water-leaving radiance по данным Aqua Modis от 30.07.14

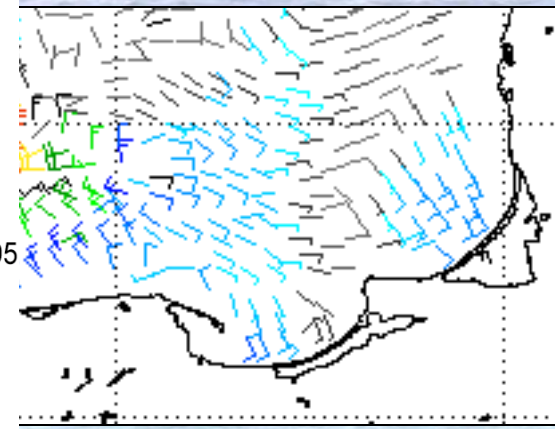






Подспутниковые измерения течений с помощью ADCP 30.07.2014



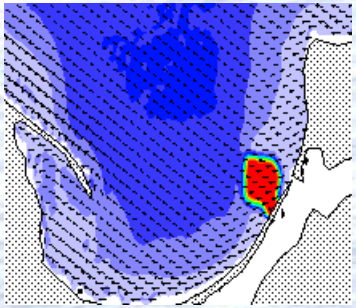
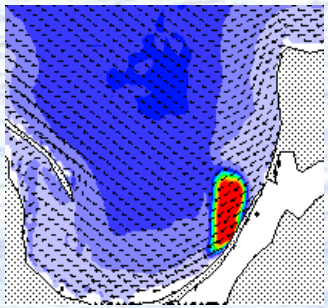
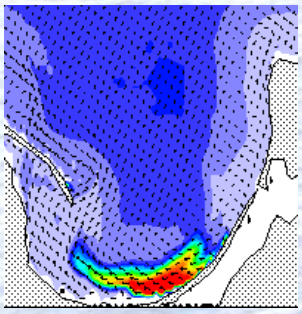
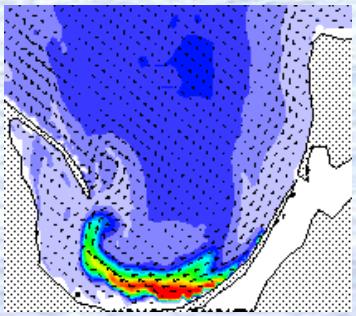
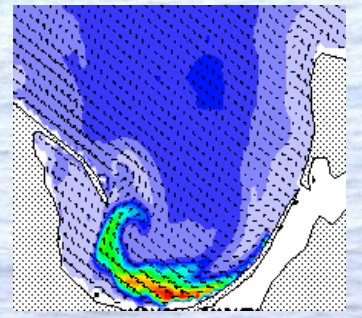


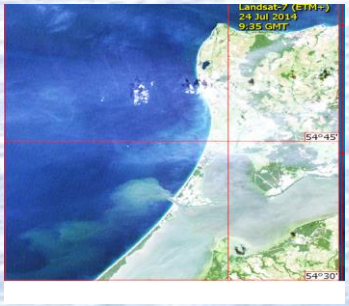
Численное моделирование дрейфа взвешенного вещества

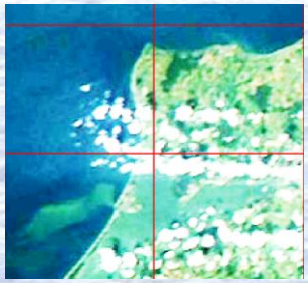
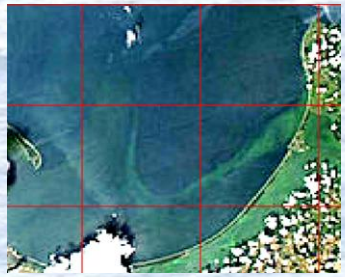
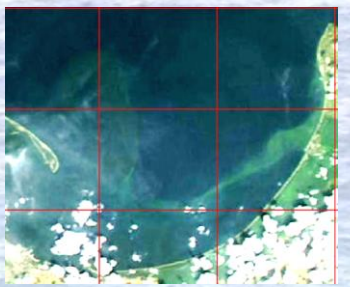
- Моделирование проводилось на основе гидродинамической модели Принстонского университета POM (Princeton Ocean Model).
- Эта модель является трёхмерной, нестационарной, в её основе лежат уравнения гидродинамики в приближениях гидростатики и свободной поверхности.
- В основе цифровой модели рельефа дна юго-восточной Балтики лежат данные, предоставленные лабораторией геоэкологии АО ИО РАН.
- Пространственное разрешение в плоскости XY, заданное в модели, составляло около 1 км по долготе и широте. По вертикали было задано 36 слоёв. С боков были заданы граничные условия открытого типа (условия излучения).
- Моделирование начиналось из состояния покоя при невозмущенной свободной поверхности. В качестве возмущающей силы задавался ветер, величина и направление которого были взяты с карт, построенных в Гидрометцентре России по данным прогноза, выпускаемого метеоцентром NCEP/NOAA.
- Период модельных расчетов – с 24.07.2014г. по 30.07.2014г.
- Начальные стратификации полей температуры и солёности были взяты однородными по горизонтали, при их задании использовались натурные данные по термохалинной структуре, характерные для юго-восточной Балтики в летний период.
- Начальное распределение пассивного трассера приблизительно соответствует его распределению 24.07.2014г, идентифицированному на спутниковых изображениях.
- Характеристика трассера как пассивного означает, что его распределение не влияет на поле плотности.

Сравнение спутниковых данных с результатами численного моделирования

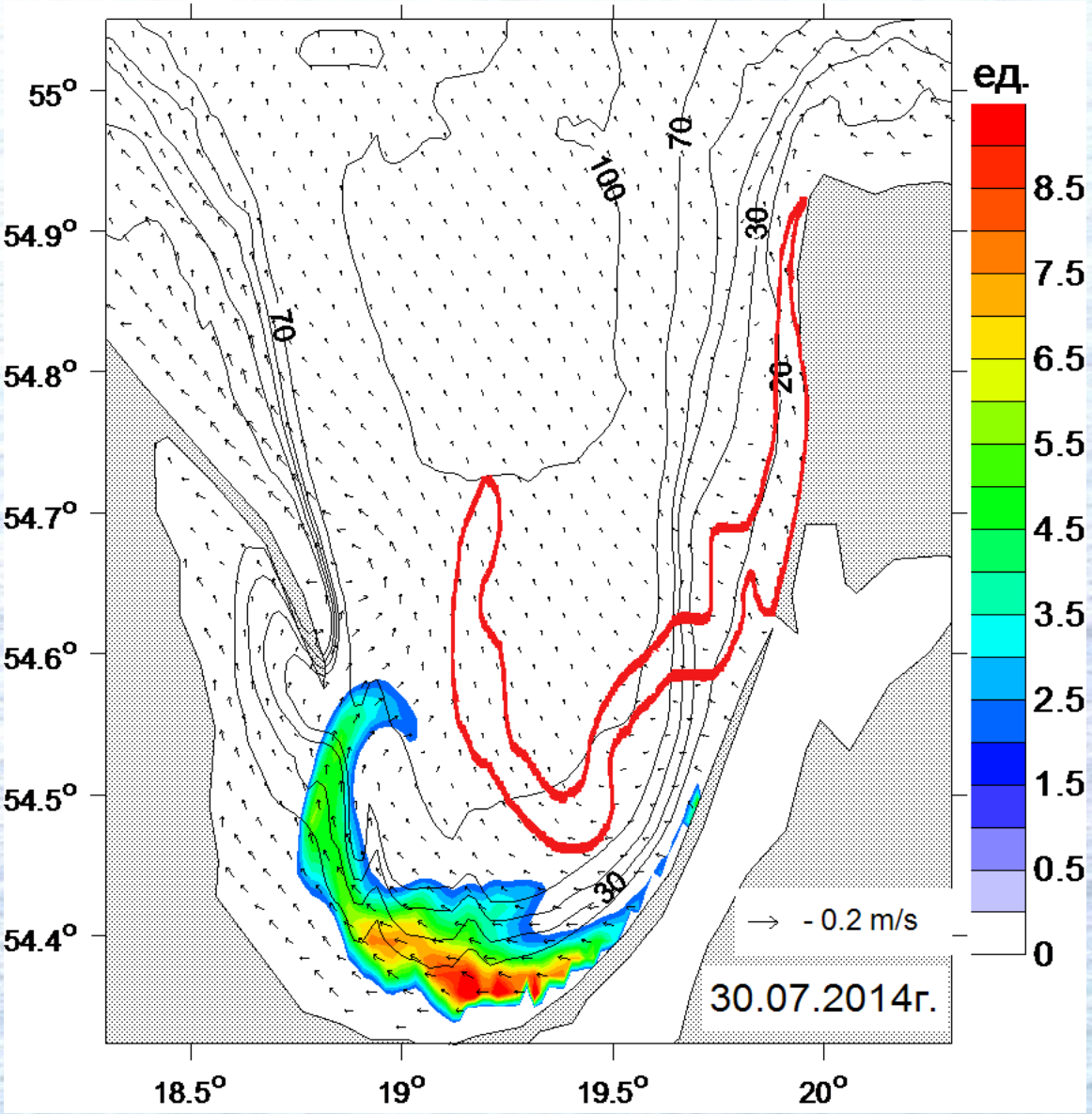
Численное моделирование дрейфа взвеси проведено Голенко М.Н.



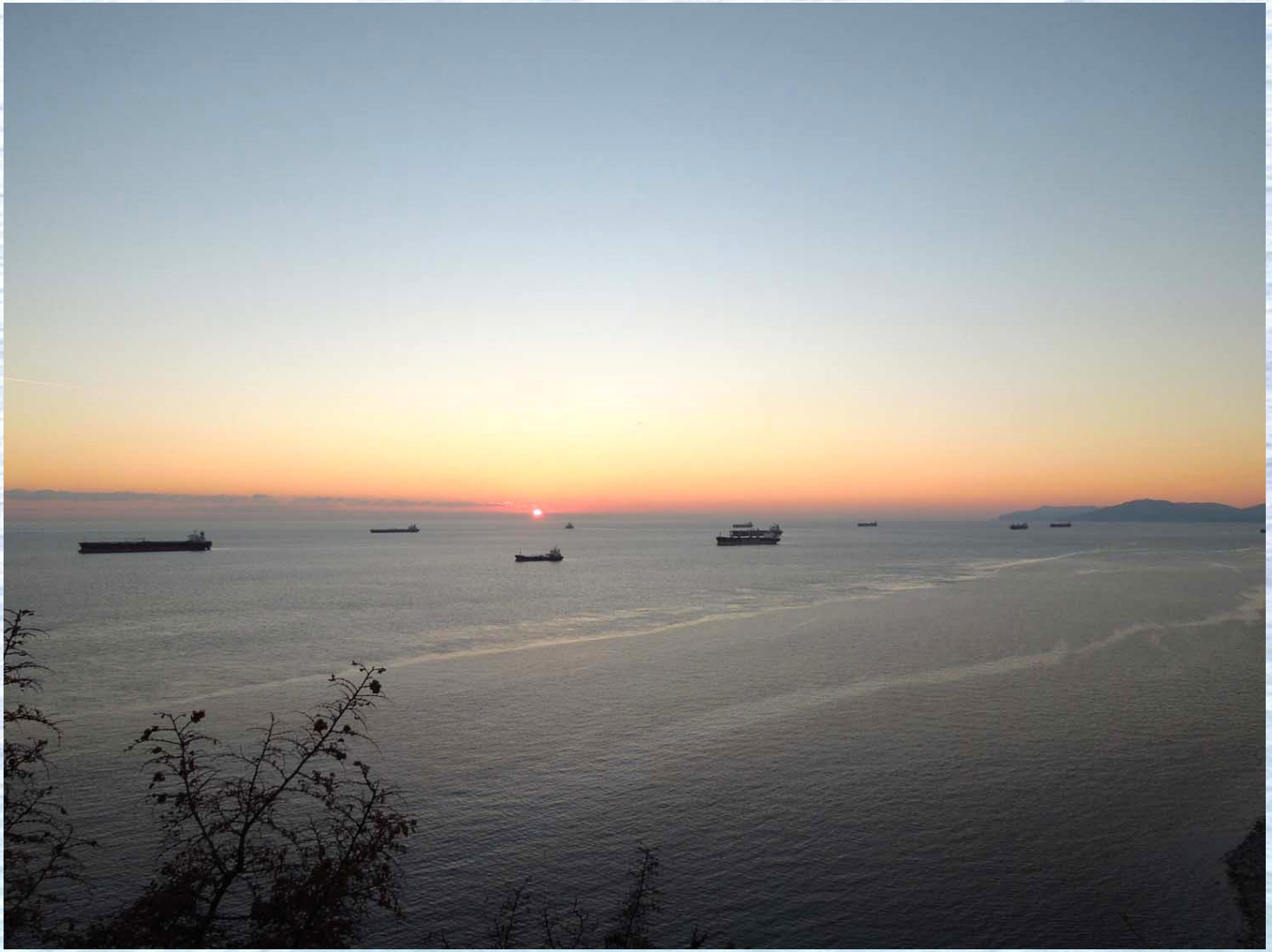
24.07.14 25.07.14 28.07.14 29.07.14 30.07.14



Результат численного моделирования дрейфа взвешенного вещества. Красная линия соответствует положению контура выноса, определенного по спутниковому изображению MODIS Aqua за 30.07.2014

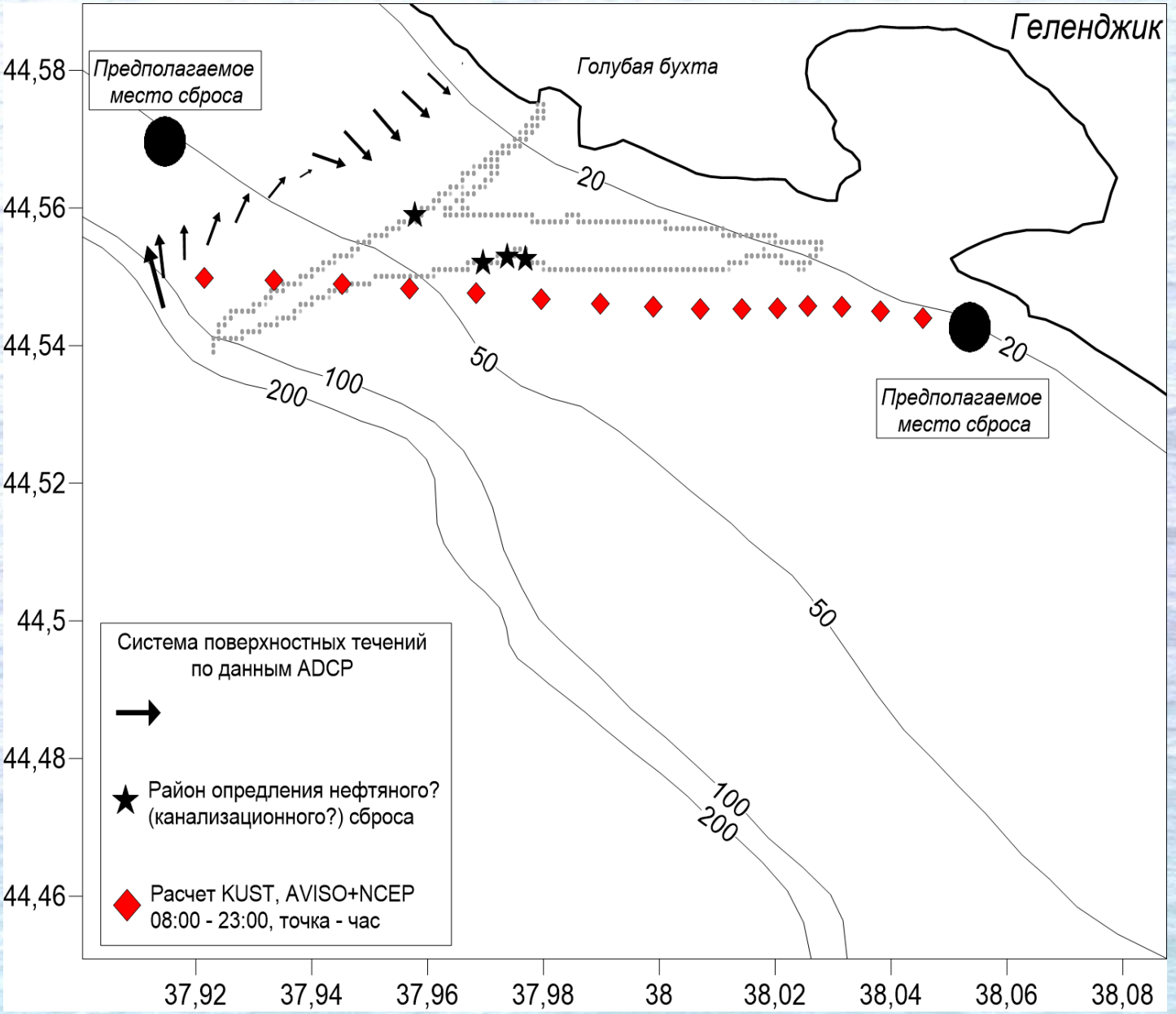
Распространение загрязнений морской поверхности, связанных со сбросами с судов или глубоководных выпусков

Задача 3

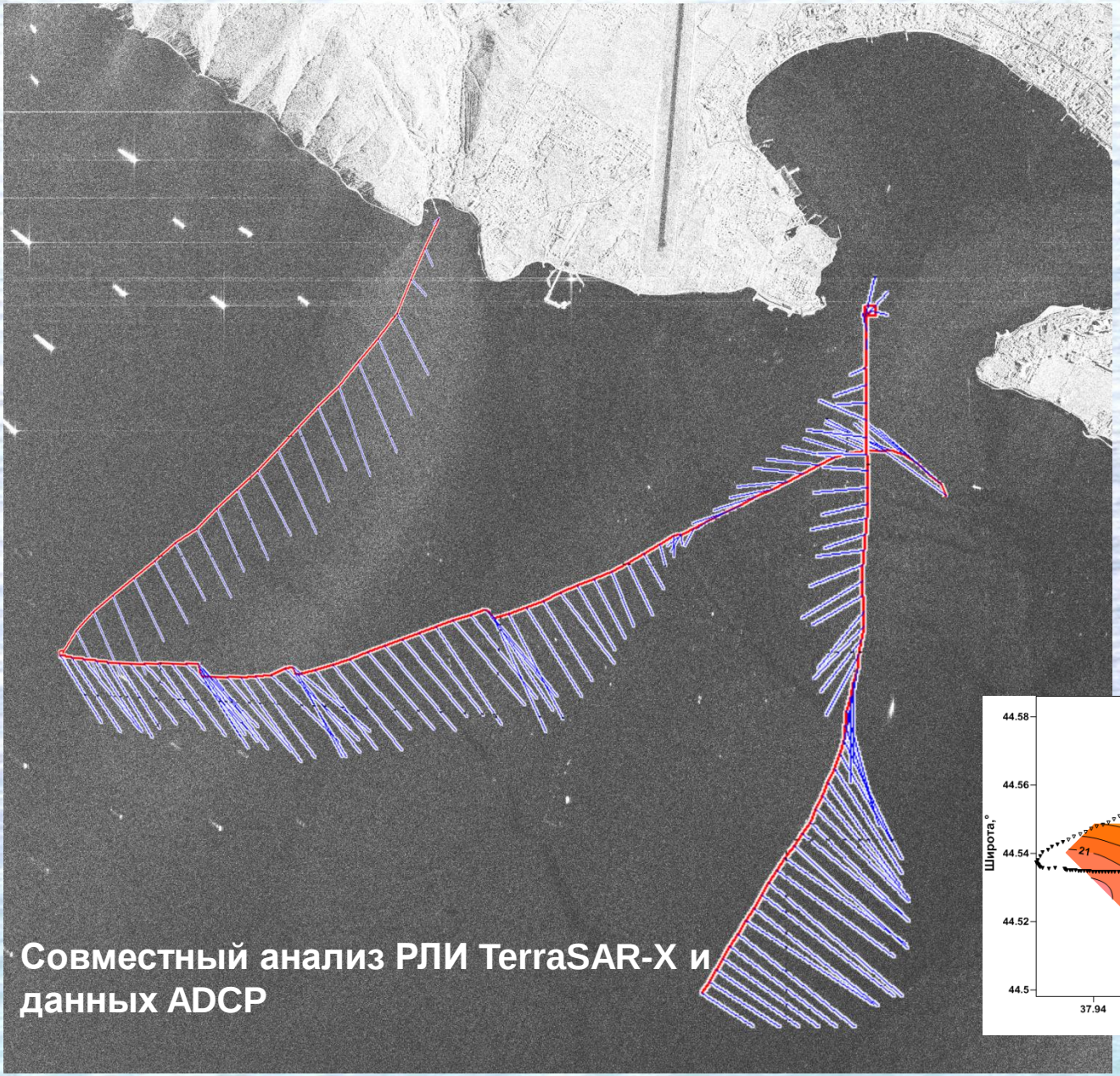


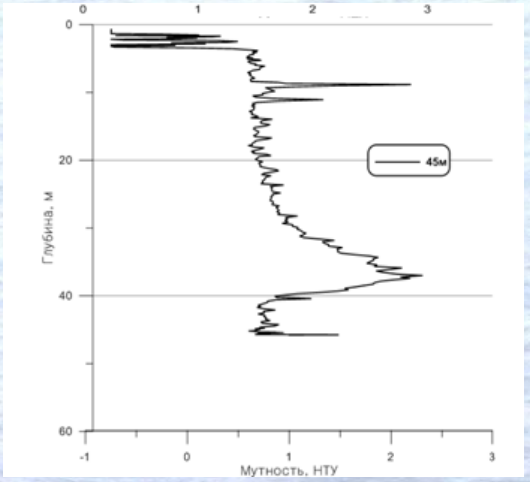
Обширные загрязнения, выявленные 08 октября 2013 г. Полоса загрязнений была вытянута вдоль берега. Измеренная нами протяженность составляла более 5 км. След тянулся к судну Vinga

Сравнение результатов численного моделирования с измерениями течений с помощью ADCP

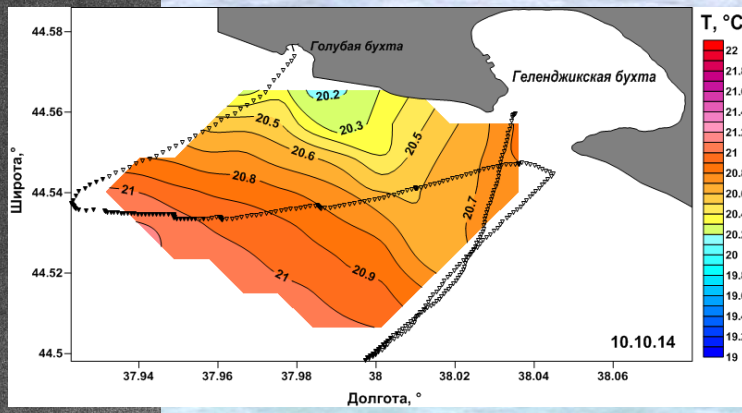


Подспутниковые измерения 10 октября 2014

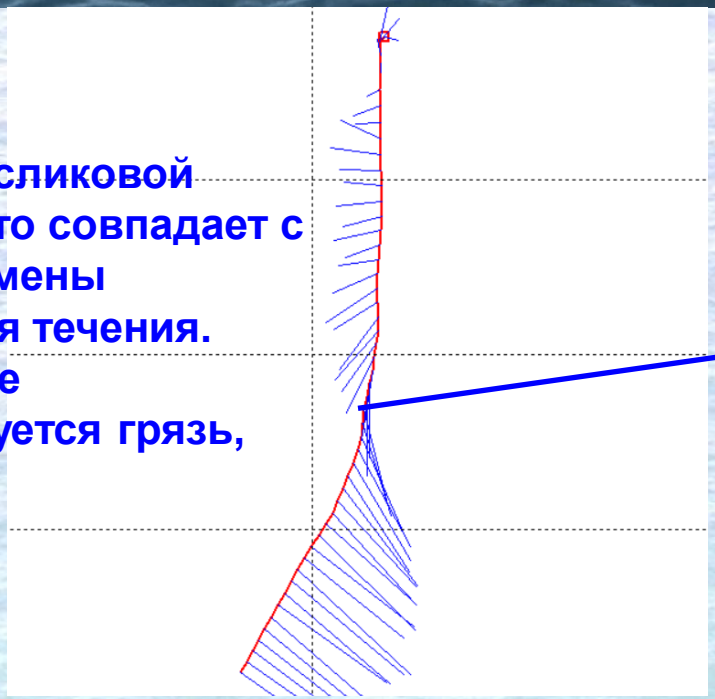




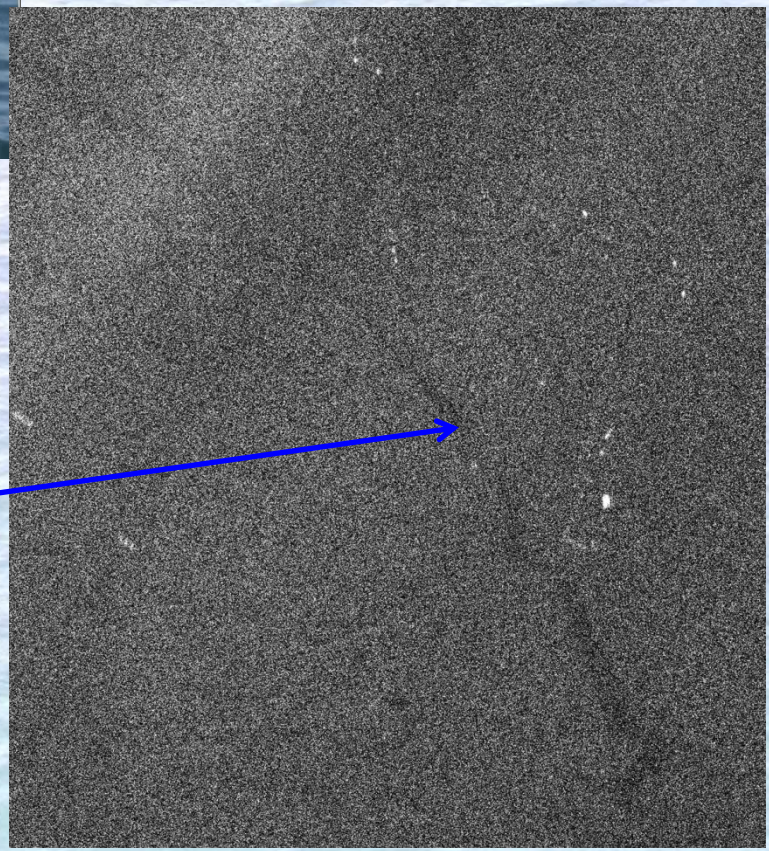
Измерения мутности на станции с глубиной 45 м



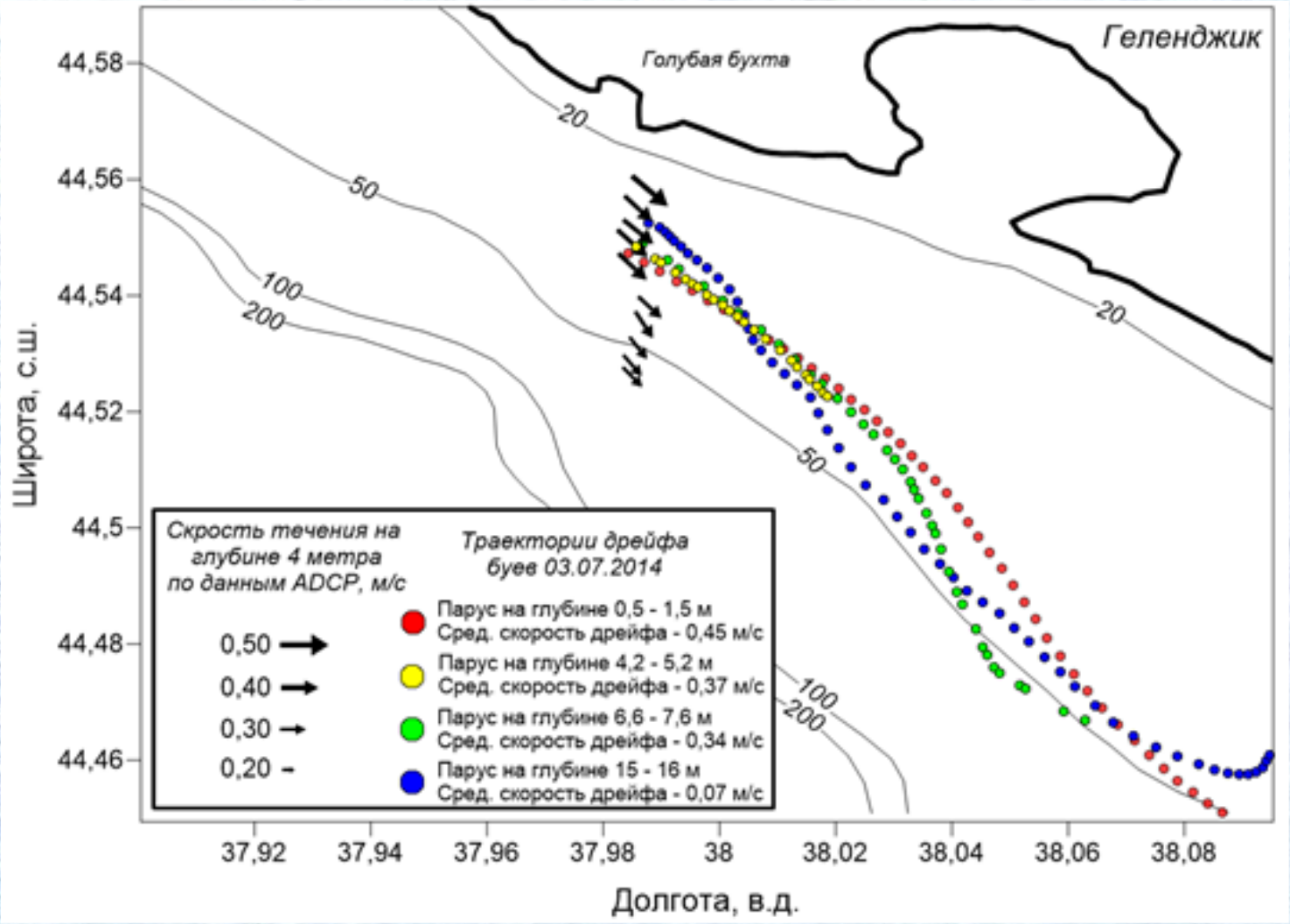
Слики



Положение сликовой полосы часто совпадает с областью смены направления течения.
В этом месте концентрируется грязь, пена, мусор

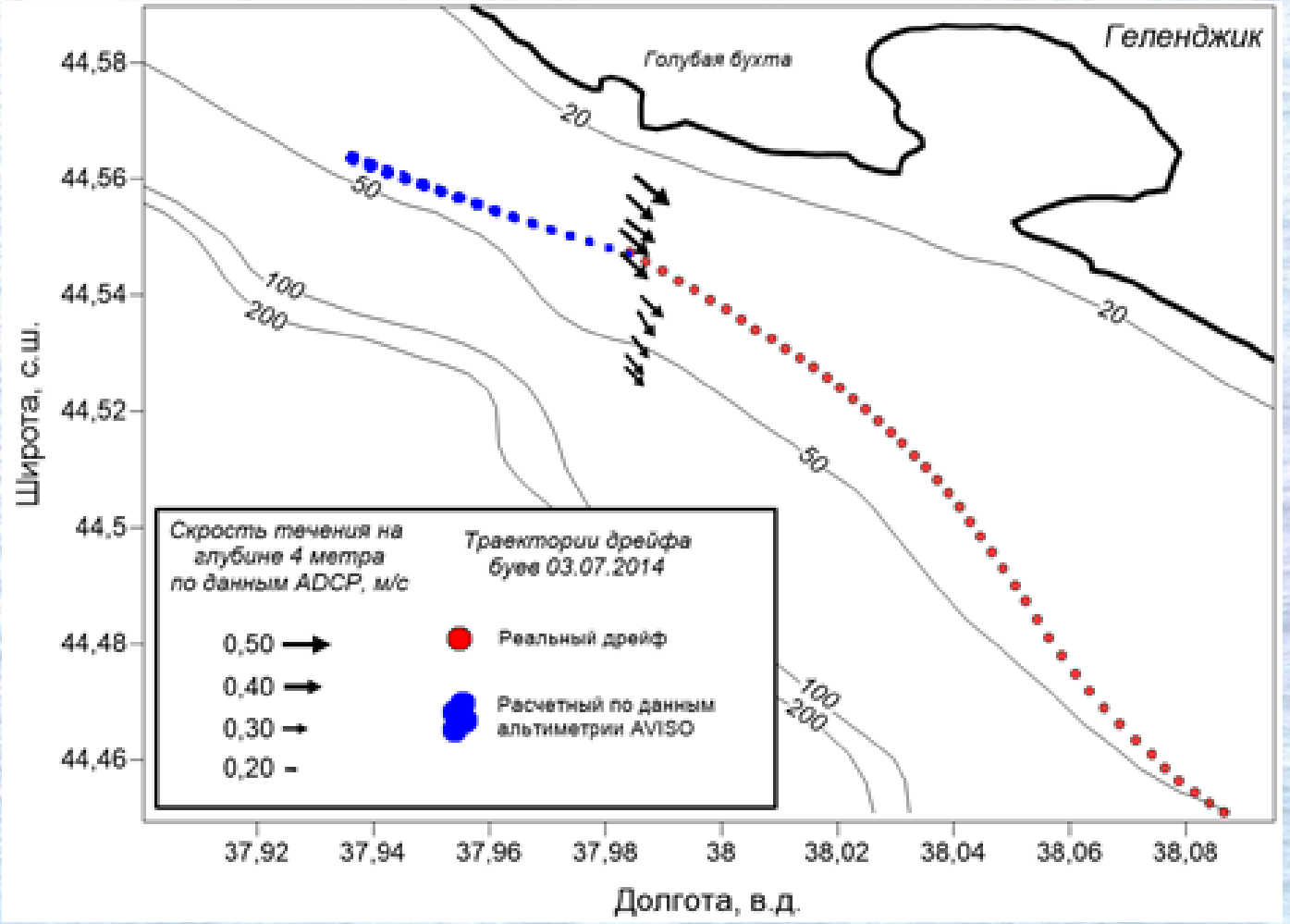


Сравнение результатов измерений морских течений в шельфовой зоне Черного моря при помощи дрейфующих буев и буксируемого акустического профилографа течений

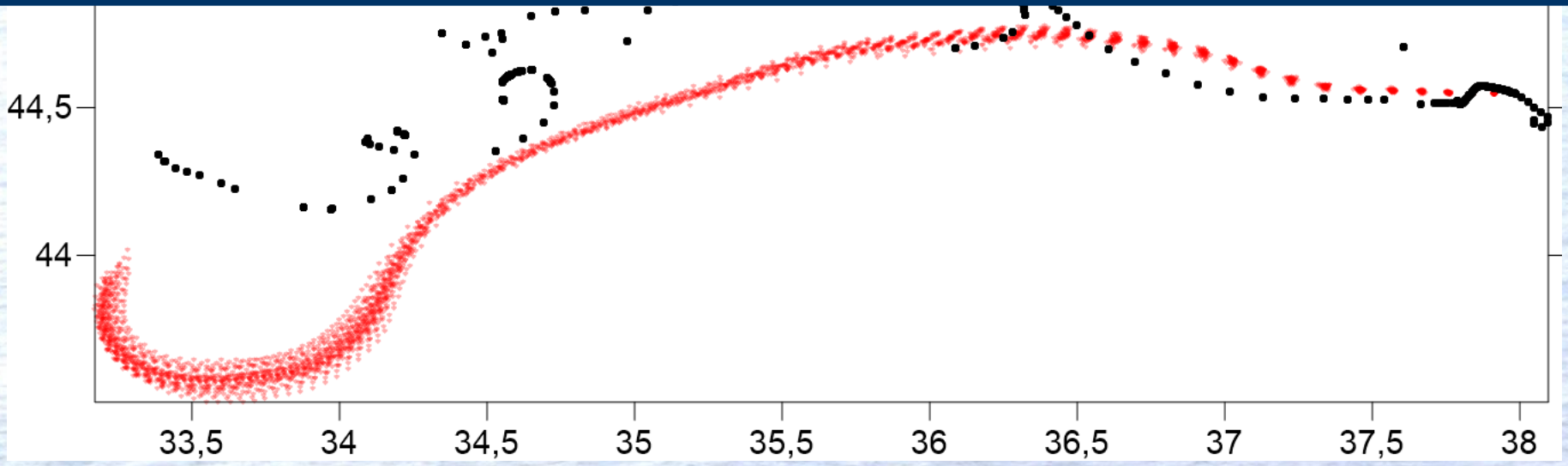


Дрифтерный эксперимент 3-4 июля 2014. Траектории движения дрейфующих буев, скорость и направление течений по данным ADCP в поверхностном слое на горизонте 4 м

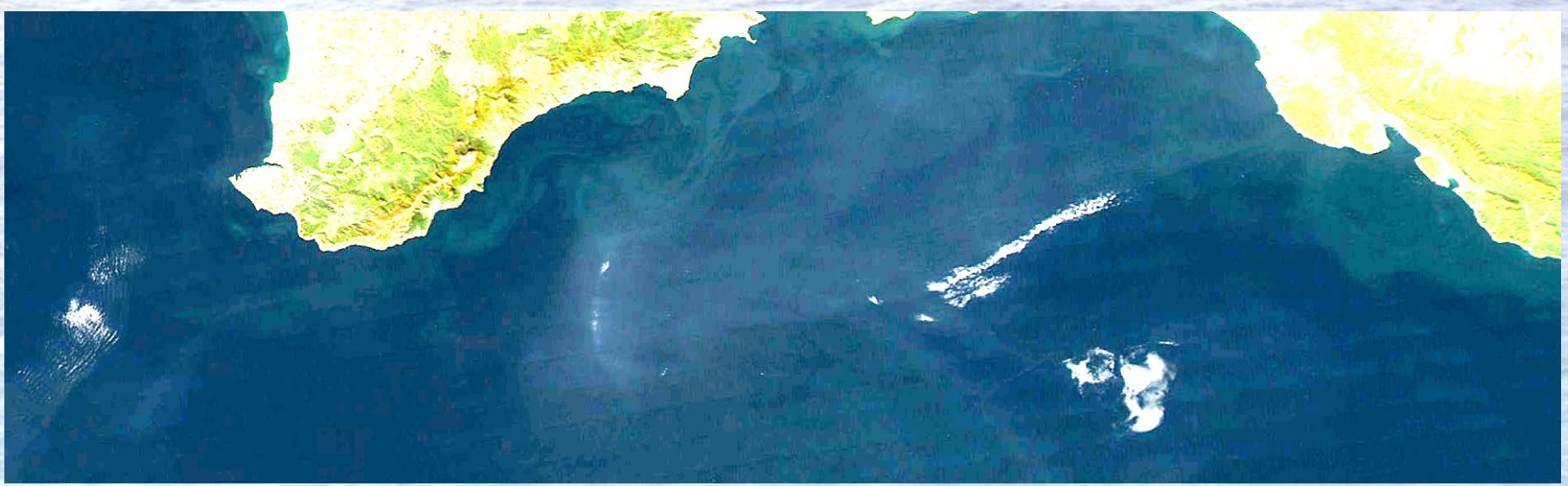
Сравнение реального дрейфа буя и расчетного течения



Сравнение спутниковых данных с результатами численного моделирования и траекториями буев



Красная линия – результат моделирования. Черные точки – положение буев



Фрагмент изображения MODIS Aqua за 11.10.2014

Заключение

- Подспутниковые измерения с яхты с помощью ADCP, проведенные в сентябре-октябре 2011 г. в северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджик в период до, во время и после сильных ливневых дождей, позволили оценить влияние динамических процессов, в первую очередь субмезомасштабных вихрей на распространение загрязнений в прибрежной зоне.

- Данные дистанционного зондирования из космоса в микроволновом и видимом диапазонах электромагнитного спектра позволили не только выявить акватории, загрязненные мутными речными водами и аварийными сбросами коммунальных очистных сооружений по радиолокационным данным ASAR Envisat, TerraSAR-X RADARSAT-2, но и оценить количественно концентрацию взвешенных веществ по данным сенсора MERIS Envisat.

- Во время проведения экспериментальных работ удалось пронаблюдать формирование и перемещение прибрежного антициклонического вихря диаметром 20 км и субмезомасштабных вихрей диаметрами 5-7 км и измерены инициированные им течения в шельфовой зоне. Загрязненные воды под действием этих вихрей распространялись более чем на 30 км.

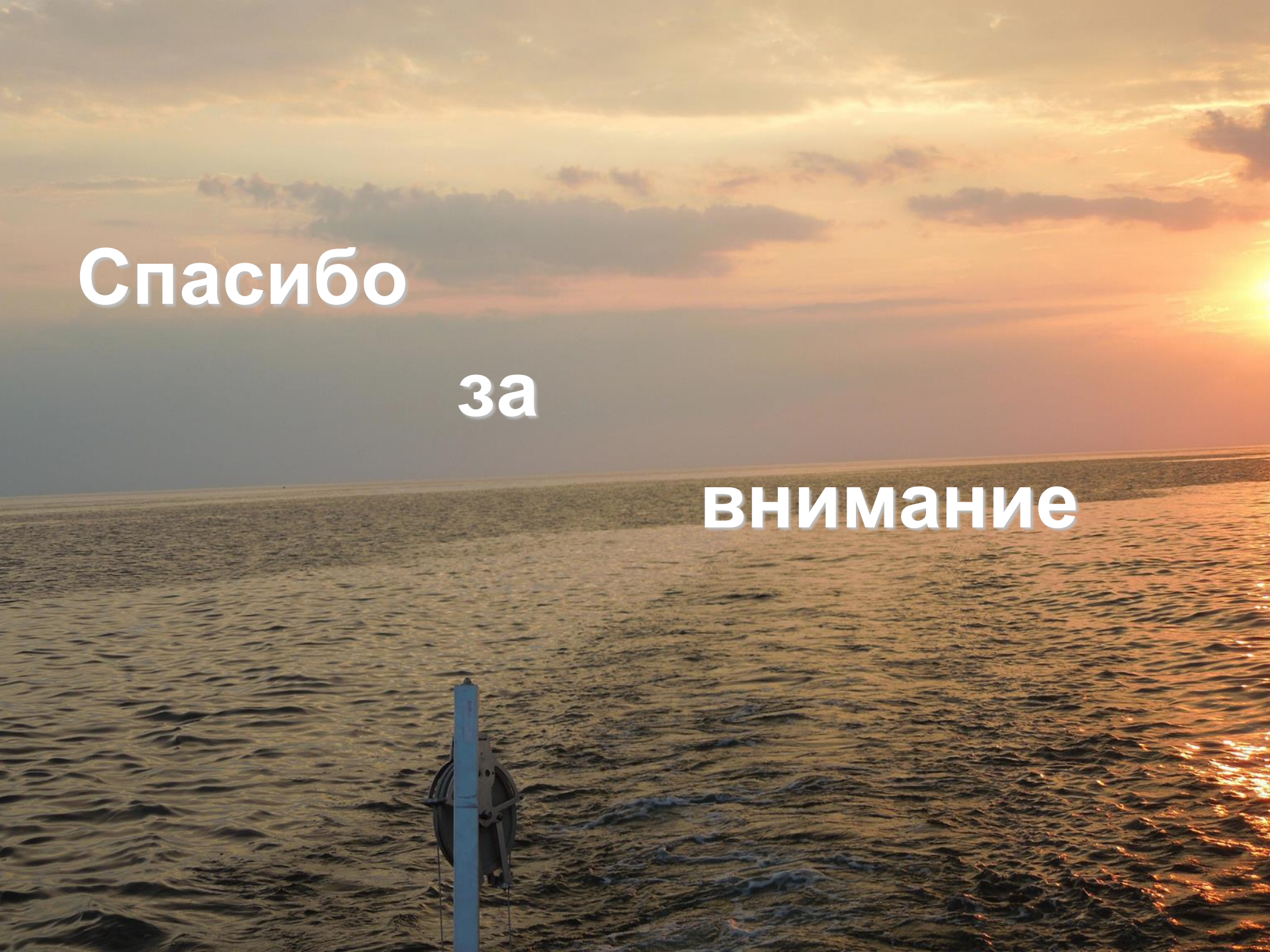
- Сравнение результатов численного моделирования со спутниковой информацией еще доказало, что при прогнозе распространения дрейфа взвеси необходимо учитывать не только параметры поля ветра, но и гидродинамических процессов, в частности вихревую активность в регионе.

Благодарности

➢Работа выполняется в рамках проекта Российского научного фонда грант № 14 - 17- 00555

Радиолокационные данные RADARSAT-2 и TerraSAR-X получены в рамках международного проекта "SOAR RADARSAT-2/TerraSAR-X Project #5074".

➢Спутниковые изображения ASAR и MERIS Envisat предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проекта C1P.6342.


Спасибо
за
внимание