

Влияние метеорологических и гидродинамических факторов на распространение речных плюмов

*Лаврова О.Ю.¹, Соловьев Д.М.²,
Строчков А.Я.¹*

¹Институт космических исследований РАН, Москва

²Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

olavrova@iki.rssi.ru



Содержание

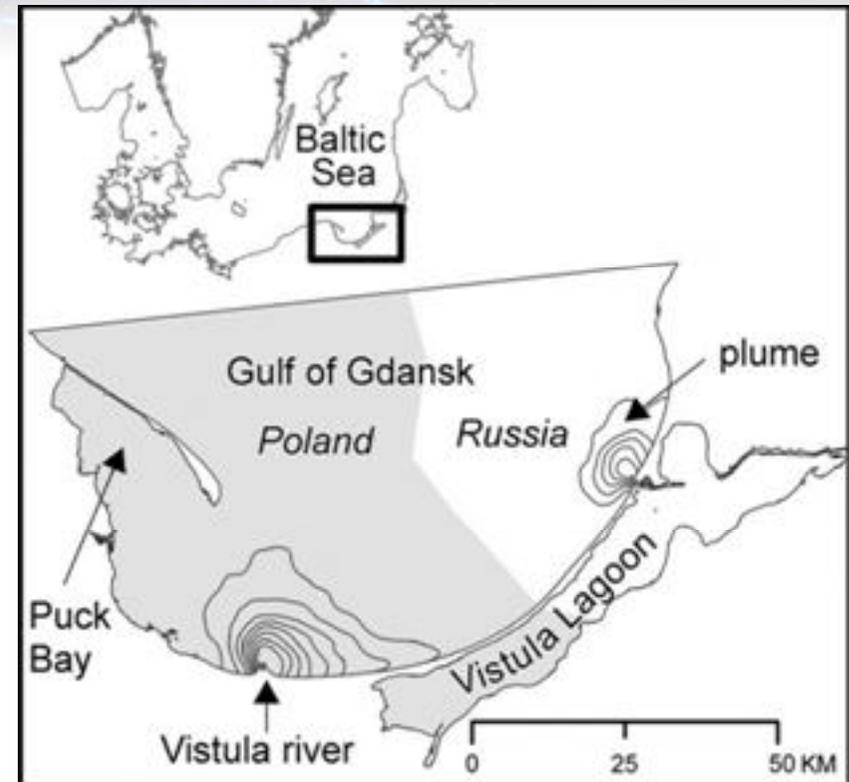
- **Мотивация**
- **Районы исследования**
- **Данные и методы анализа**
- **Результаты:**
 - **Распространение взвешенного вещества в Гданьском заливе после наводнения на Висле**
 - **Факторы, влияющие на концентрацию и распространение взвешенного вещества в восточной части Черного моря**
- **Выводы**

Мотивация

- Повышение концентрации взвешенного вещества в шельфовой зоне определяется в первую очередь речным выносом, а именно стоком наносов в море.
- С речными наносами связаны такие актуальные прикладные вопросы, как размыв берегов, искусственное пляжеобразование, антропогенное загрязнение моря и т. д.
- Поступление в море взвешенных и растворенных терригенных веществ, их распространение в прибрежной зоне является сложным и многогранным процессом, при исследовании которого нужно учитывать множество факторов.
- Первоочередную роль в подобных исследованиях играет численное моделирование процессов выноса и распространения взвешенного вещества в прибрежной зоне.
- Любое моделирование требует верификации его результатов.
- Развитие спутниковых средств и доступность данных дистанционного зондирования из космоса уже за более чем десятилетний период позволяет изучать влияние различных факторов на пространственное распространение взвешенного вещества по большим акваториям в различные периоды наблюдений.

Районы исследования: Гданьский залив

- Гданьский залив расположен в южной части Балтийского моря.
- Средняя глубина в собственно заливе 70 м.
- Воды залива испытывают существенное влияние выноса Вислы.
- Средний годовой расход воды Вислы $1081 \text{ м}^3/\text{с}$. В зависимости от ветра и течений две водные массы могут быстро перемешиваться, образуя гидрологический фронт, или пресные воды Вислы могут распространяться в заливе в виде плюма.
- Направление и интенсивность течений в заливе существенно зависят от скорости и направления ветра и орографии береговой черты.



Гданьский залив. Серым цветом отмечена польская часть. Изолинии показывают проявления характерных плюмов

Районы исследования: восточная часть Черного моря

Более 10 больших горных рек впадает в море.
Самые большие – Риони и Чорохи

Чорохи – впадает в Черное море рядом с Батуми, Грузия;

- годовой сток – 8,71 км³,
- сток наносов – 8,44 млн м³,
- примерно 85% общего годового выноса приходится на май-июль.

Риони – берет начало в кавказских горах, протекает в Колхидской низменности и впадает в Черное море в районе Поти, образуя дельту;

- годовой сток – 13,37 км³,
- сток наносов - 6,9 млн м³.
- уровень воды повышается весной из-за таяния ледников, максимум в июне. Осенью уровень повышается из-за обильных дождей.



Донная топография восточной части Черного моря характеризуется узким шельфом и большим количеством подводных каньонов. Считается, что они играют существенную роль в распространении наносов

Используемые спутниковые данные

➤ *Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, Landsat-8 OLI/TIRS*

Данные скачивались в автоматическом режиме в системе See the Sea из открытого архива <http://glovis.usgs.gov/>

➤ *Envisat MERIS/ASAR*

Данные спутника Envisat были предоставлены Европейским космическим агентством в рамках нескольких научных проектов

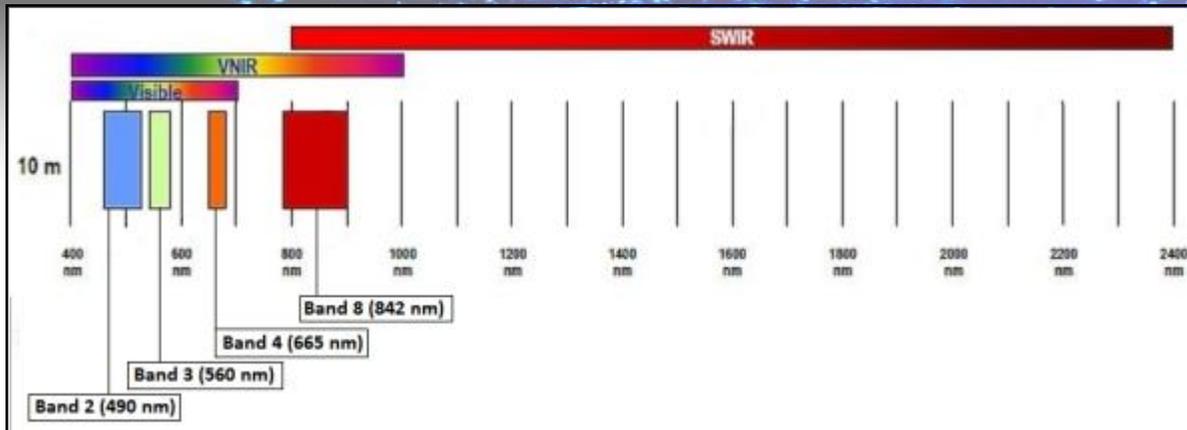
➤ *Terra/Aqua MODIS*

Данные прибора MODIS скачивались в автоматическом режиме в системе See the Sea из открытого архива <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>

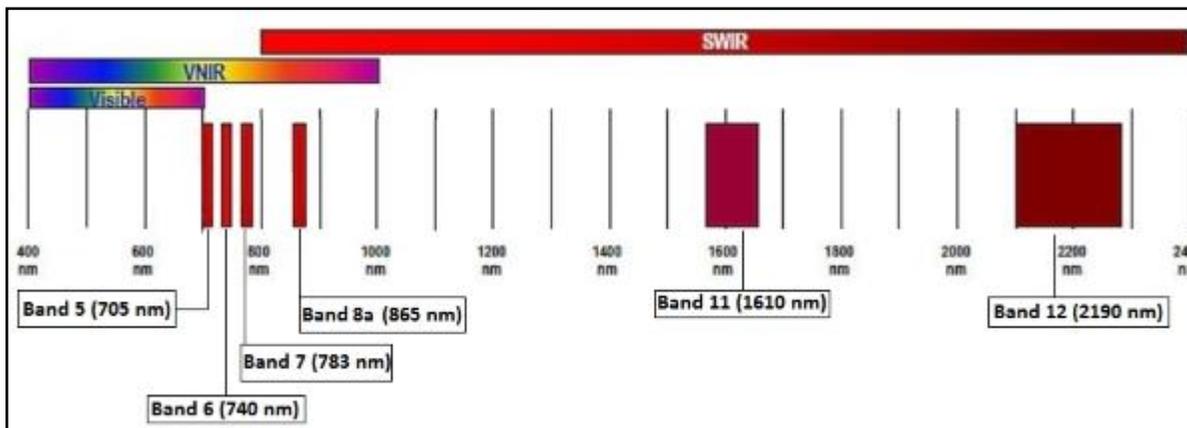
➤ *SAR C Sentinel-1 A, MSI Sentinel-2 A*

Данные скачивались из открытого архива <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>

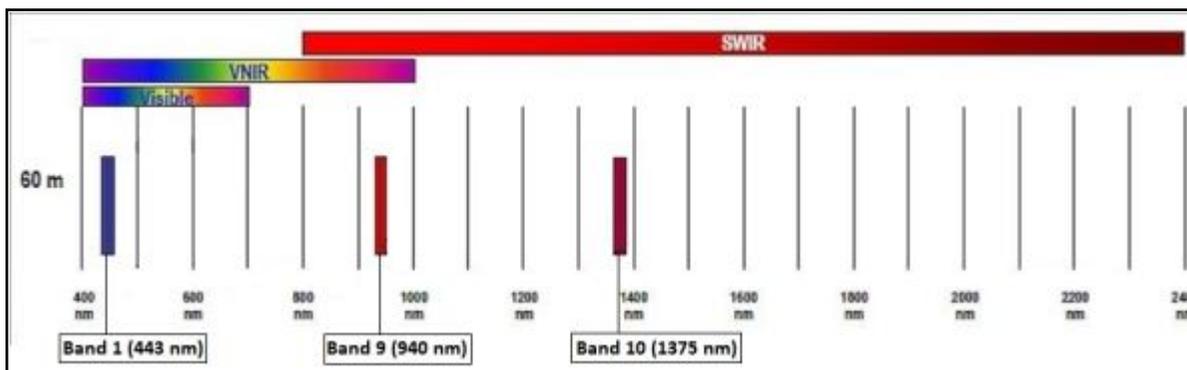
SENTINEL-2 Multi Spectral Instrument (MSI)



10 m spatial resolution bands:
B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) and B8 (842 nm)



20 m spatial resolution bands:
B5 (705 nm), B6 (740 nm), B7 (783 nm), B8a (865 nm), B11 (1610 nm) and B12 (2190 nm)

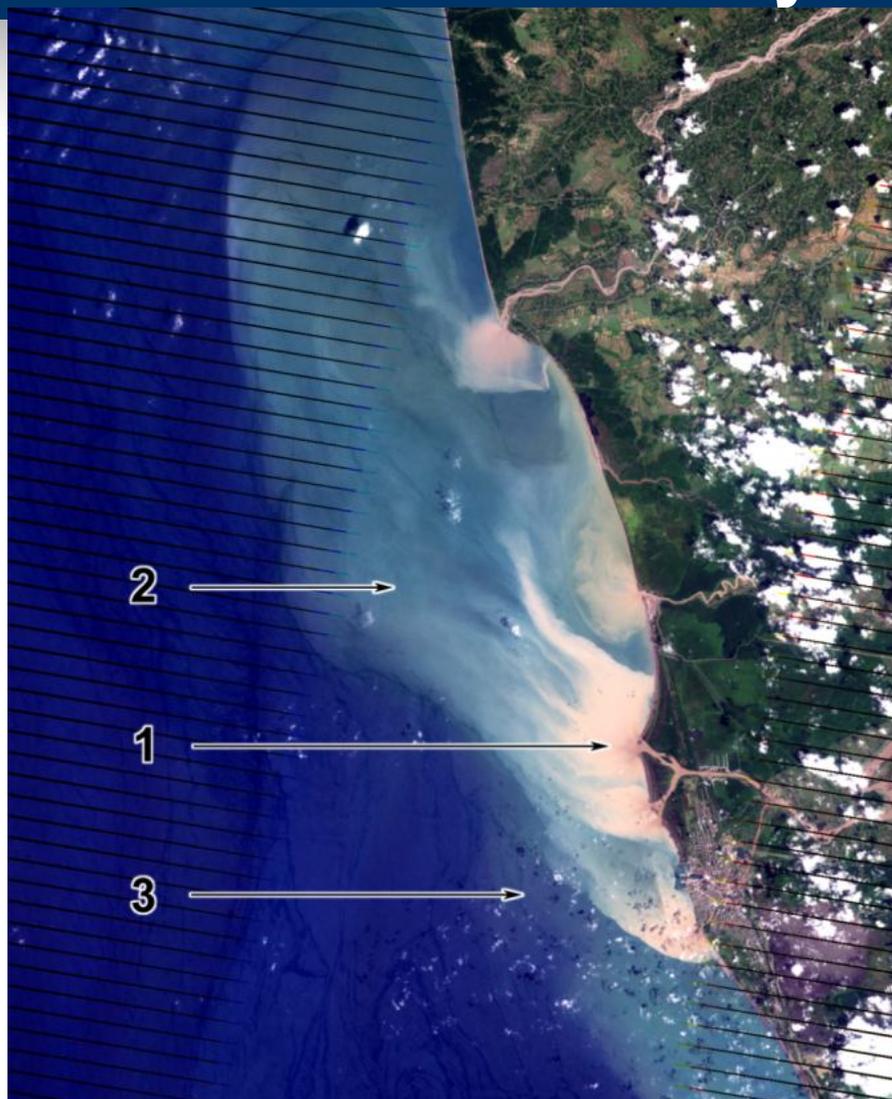


60 m spatial resolution bands:
B1 (443 nm), B9 (940 nm) and B10 (1375 nm)

SENTINEL-2 Multi Spectral Instrument (MSI)

Band number	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Spatial resolution (m)
1	443	20	60
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8	842	115	10
8a	865	20	20
9	945	20	60
10	1380	30	60
11	1610	90	20
12	2190	180	20

Методы: Выделение областей с различной мутностью



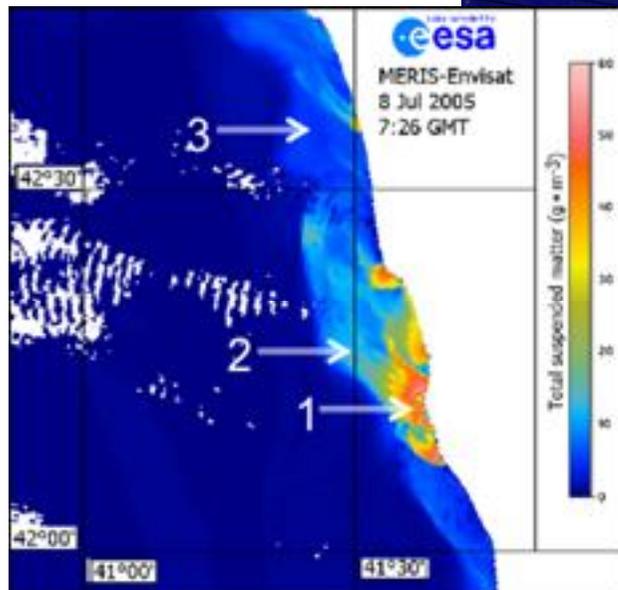
Landsat-7 ETM+ (3, 2, 1 каналы) от 08.07.05 07:45 GMT. Стрелки указывают на 3 области, существенно различающиеся по мутности

Три основных области речного выноса:

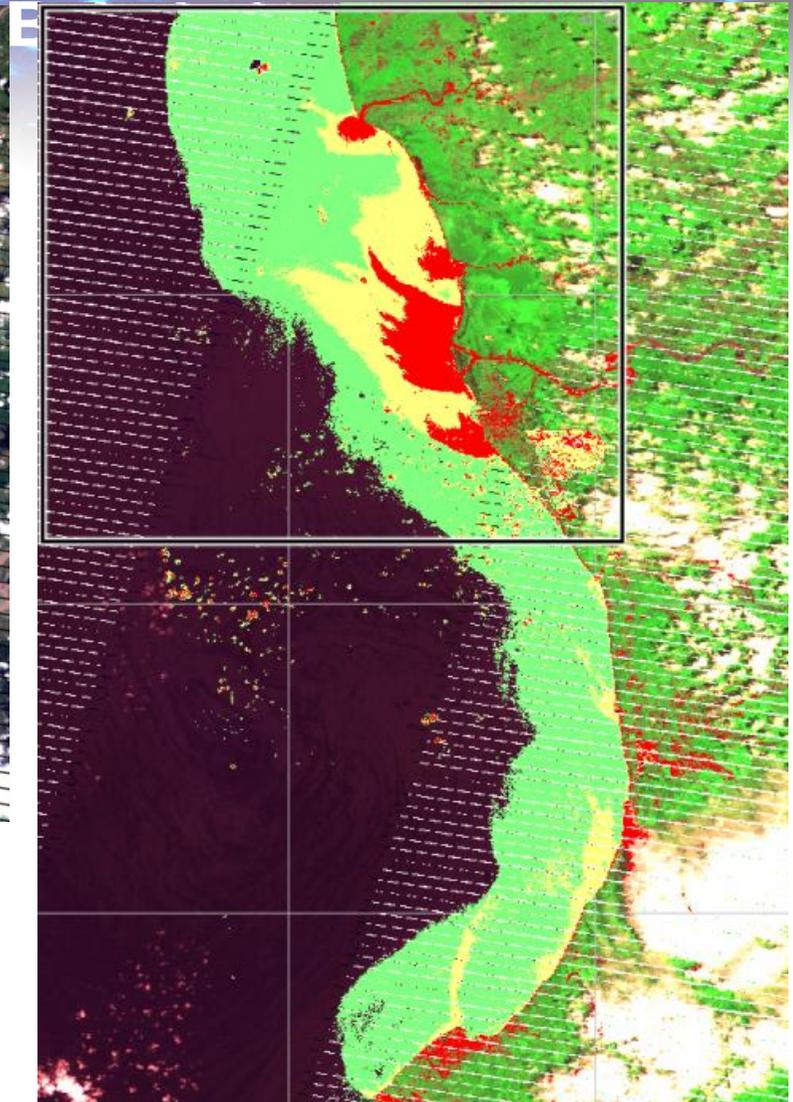
- **Первая** - непосредственно примыкает к устью реки, содержит основное количество речных наносов, состоящих из песка, пылеватых и илистых частиц. Основная часть взвешенных наносов выпадает из речной струи в виде «песчаного дождя». На цветосинтезированных изображениях проявляется различными оттенками от серого и бежевого до тёмно-коричневого
- **Вторая** – окаймляет первую, содержит мелкодисперсные алевритовые и пелитовые непляжеобразующие фракции. Проявляется оттенками от желто-зеленого, до светло-зеленного.
- **Третья** - может распространяться на большие расстояния и не имеет ярко выраженной границы.

Совместный анализ различных

Landsat-7 ETM+
08.07.05 07:45 GMT
3-2-1 каналы



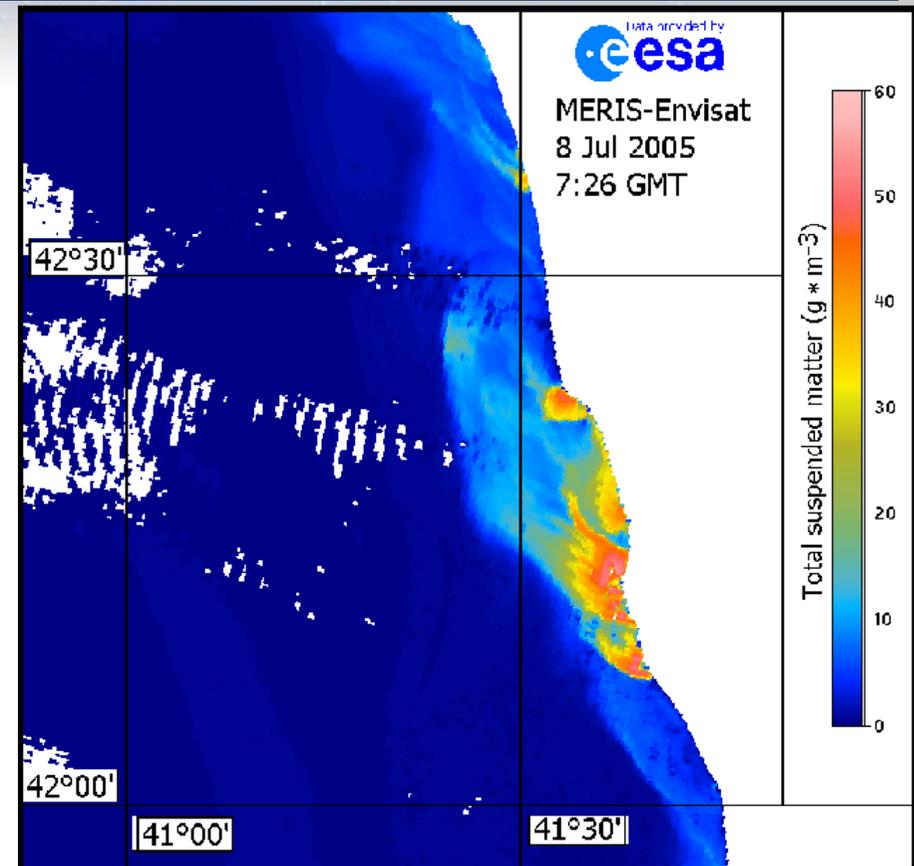
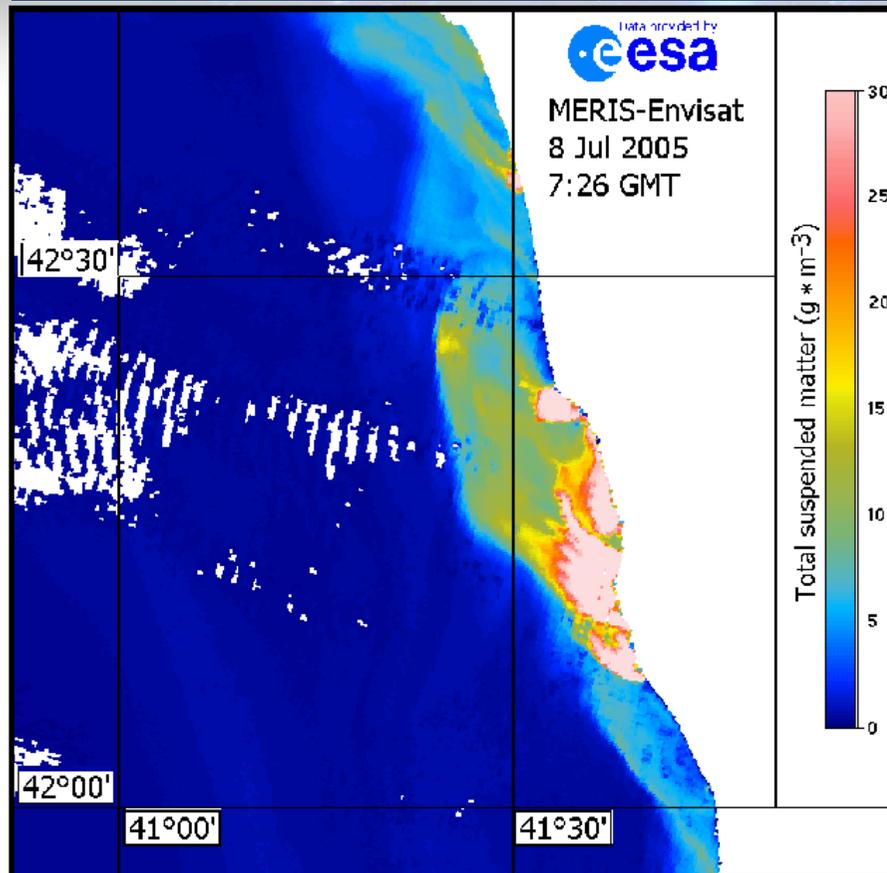
MERIS Envisat
ETM+ 08.07.05
07:26 GMT
TSM



Классификация по
заданной области
без обучения



Уточнение значений TSM по данным MERIS Envisat



Для определения более точных максимальных и минимальных значений TSM строились карты двух типов: более детальные со шкалой от 0 до 30 g/m^3 (слева) и менее детальные, но позволяющие более точно определить максимальные значения, со шкалой от 0 до 60 g/m^3 (справа)

Факторы, влияющие на распространение взвешенного вещества

Основные факторы, влияющие на распространение в прибрежной зоне взвешенного вещества, выносимого реками:

- сток рек;
- прилив (для Черного и Балтийского морей не играет роли);
- прибрежные течения;
- донная топография;
- ветровое воздействие



Результаты

Гигантский вынос вод Вислы в Гданьский залив вследствие наводнения

Самое большое и разрушительное наводнение на реке Висла за последние 100 лет произошло в мае 2010.

Наводнение продолжалось несколько недель и достигло устья 25/26 мая.

Максимальный расход составил 6838 м³/с.

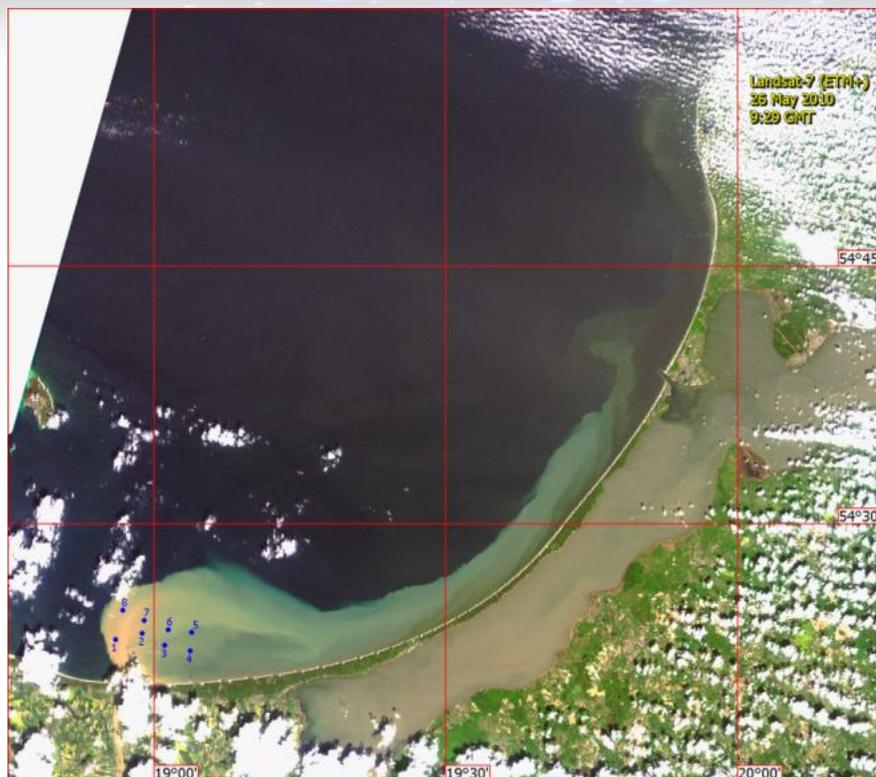
Измерения in situ были проведены 26 мая 2010 с польского исследовательского судна «Oceania».

26 мая 2010 съемка Гданьского залива была осуществлена следующими приборами:

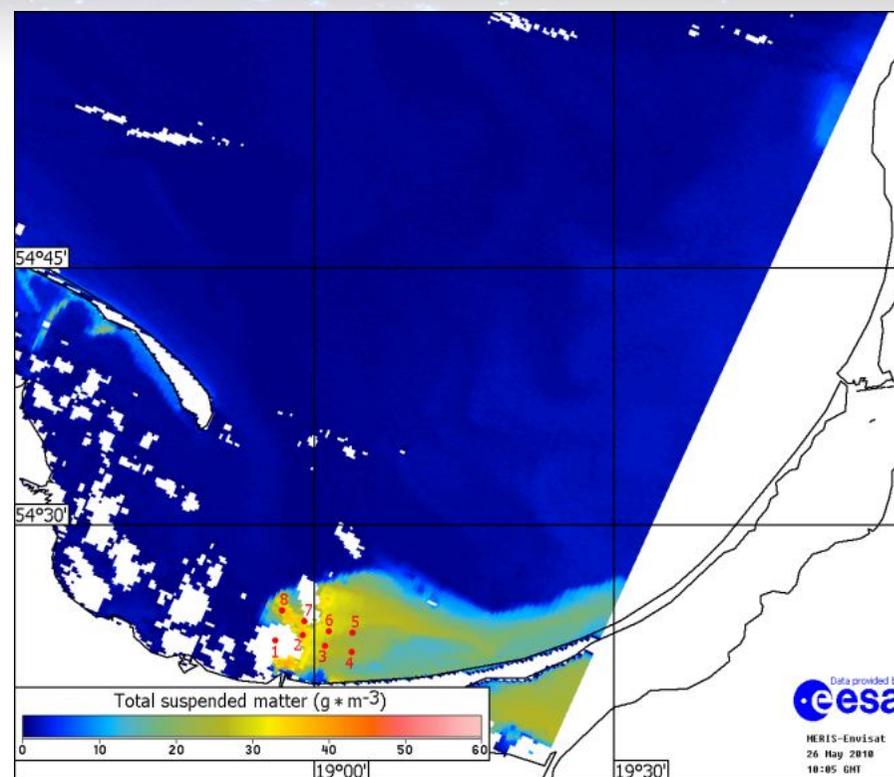
- Envisat MERIS и ASAR,
- Landsat-7 ETM+,
- Terra/Aqua MODIS.

Последствия гигантского выноса наблюдались еще в по крайней мере течение двух недель.

Распространение взвешенного вещества в Гданьском заливе 26 мая 2010 г.



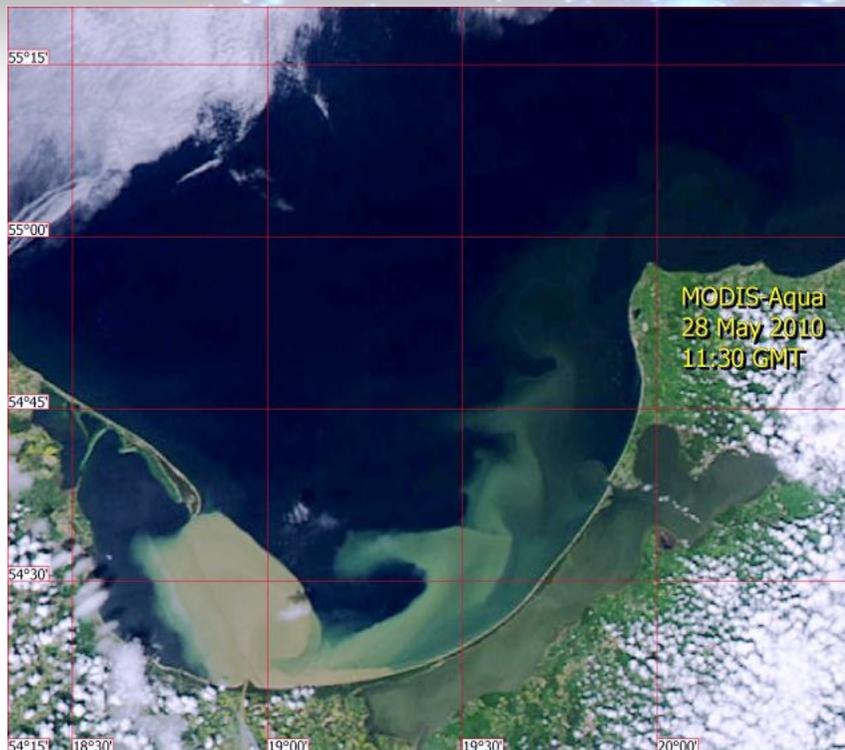
Landsat-7 ETM+ true-color composite of May 26, 2010, 09:29 GMT



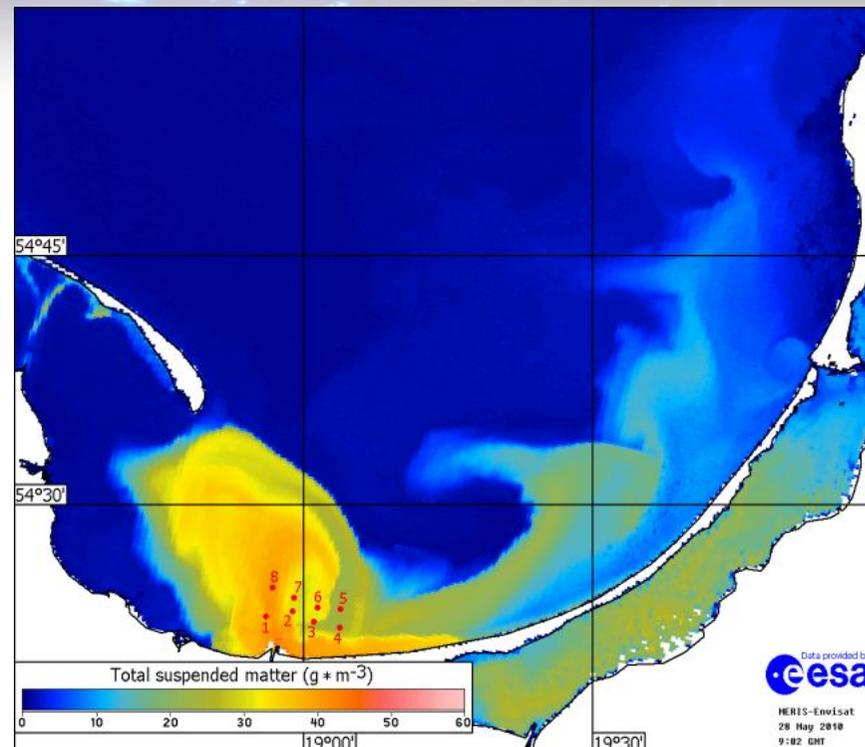
TSM concentration map from Envisat MERIS image of May 26, 2010, 10:05 GMT

Цифры обозначают положения станций измерений in-situ

Suspended matter distribution on May 28, 2010



Fragment of MODIS Aqua true color composite of May 28, 2010, 11:30 GMT

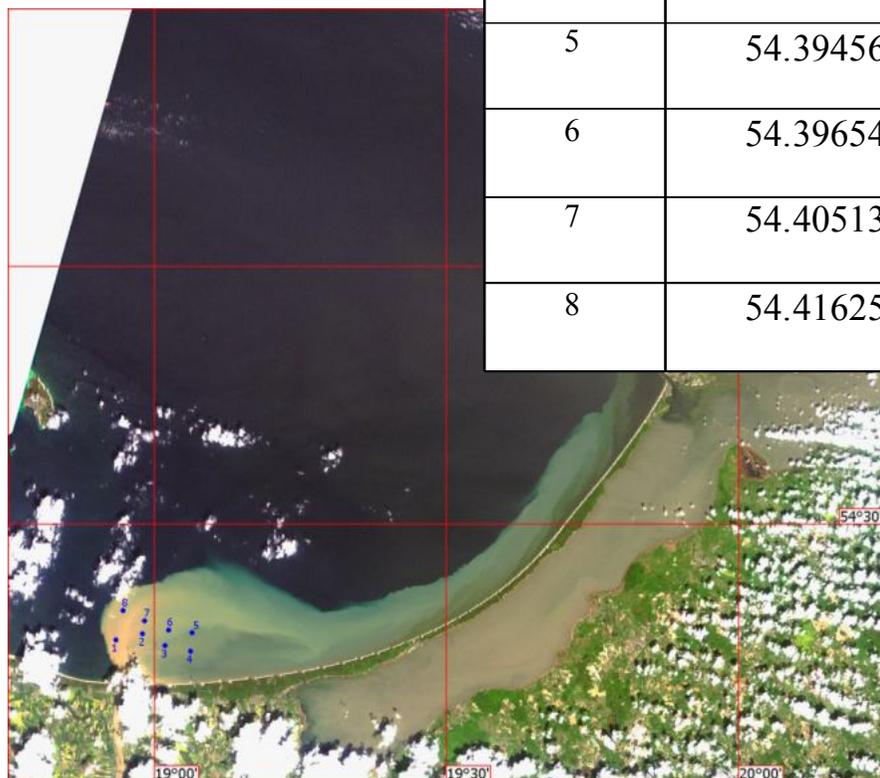


TSM concentration map from Envisat MERIS image of May 28, 2010, 09:02 GMT

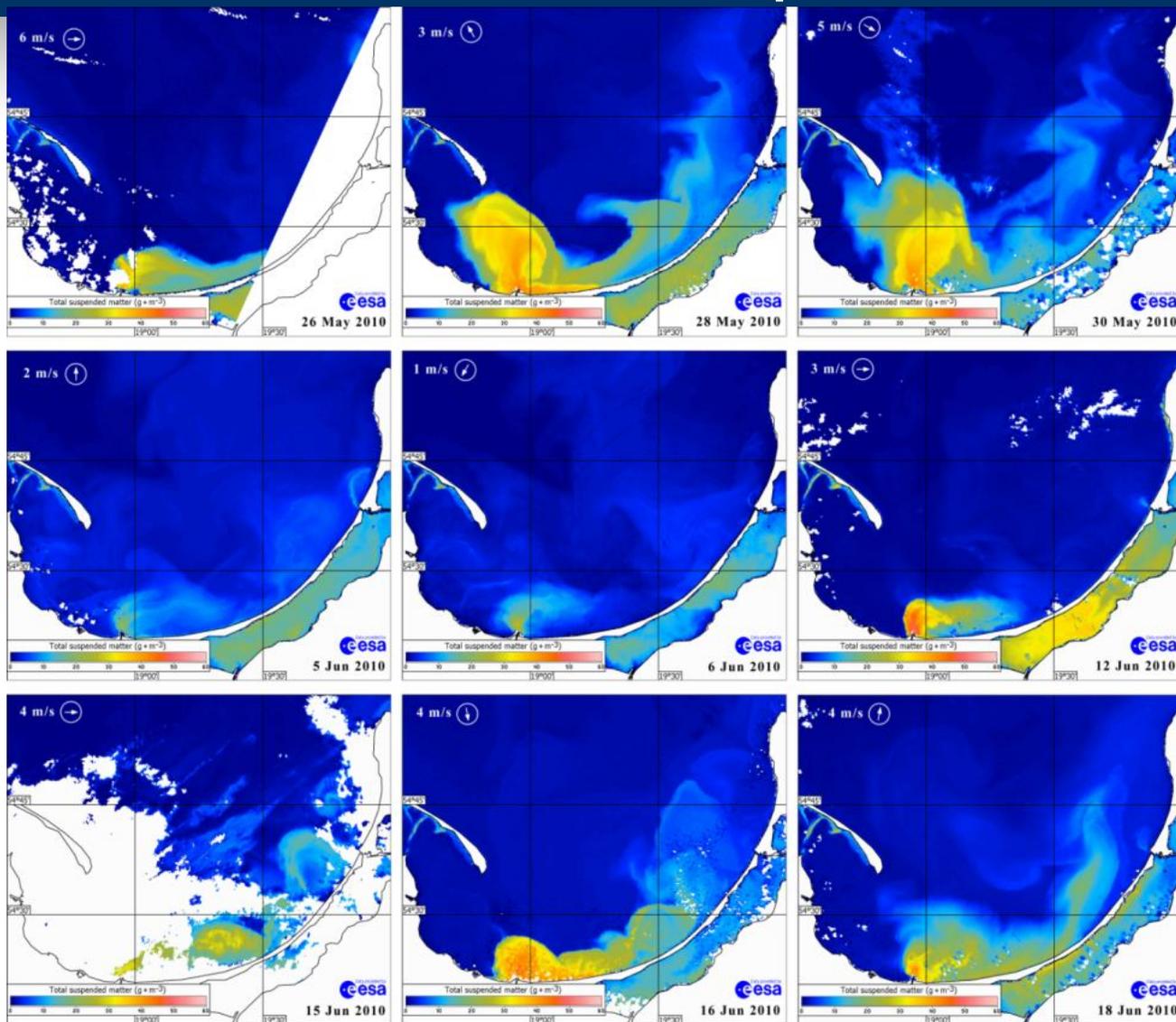
Цифры обозначают положения станций измерений in-situ

Сравнение спутниковых и in-situ измерений

Станция	Широта	Долгота	Мутность (FNU)	
			In-situ	MERIS Envisat
1	54.38738	18.93551	51.4	45.8
2	54.39286	18.98064	43.1	38.8
3	54.38189	19.01998	37.7	33.7
4	54.37634	19.06360	11.0	24.3
5	54.39456	19.06545	29.0	23.9
6	54.39654	19.02673	38.6	35.3
7	54.40513	18.98758	55.3	32.8
8	54.41625	18.94738	61.0	54.4



Влияние ветра на распространение взвешенного вещества



Направление распространения вод с высоким содержанием взвешенного вещества (классы 1 и 2) совпадает с направлением ветра.

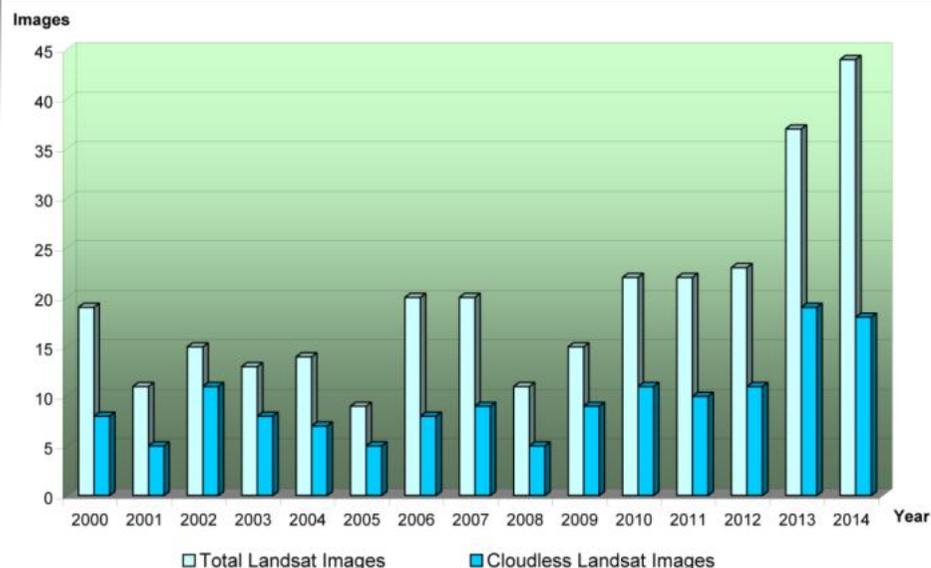
Воды 3-го класса всегда распространяются параллельно берегу в циклоническом направлении (по направлению вдольберегового течения).

Серия TSM concentration maps, полученных на основе данных в период с 26 мая по 18 июня 2010. Направление ветра отмечено стрелками.

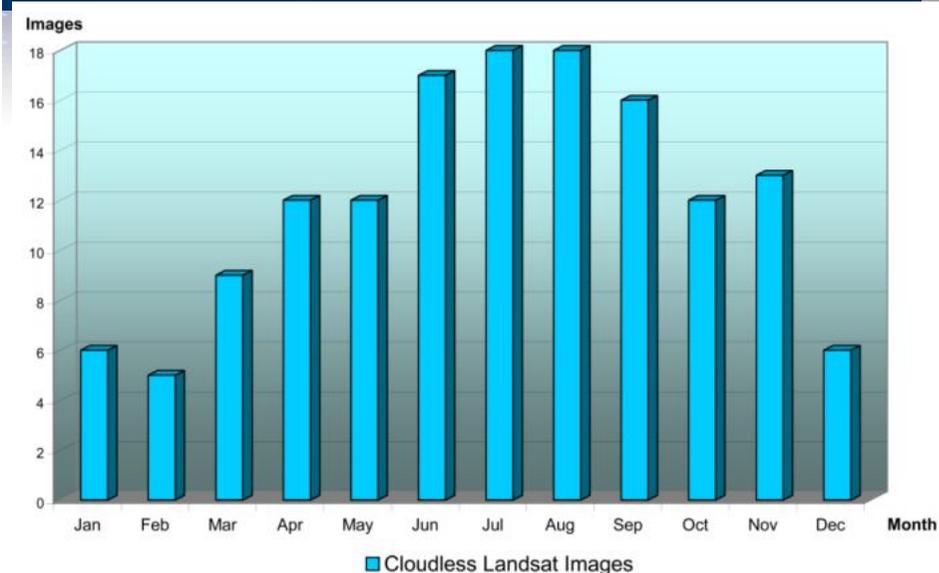


Выносы рек в восточной части Черного моря

Изображения сенсоров спутников Landsat восточной части Черного моря 2000-2014



распределение по годам



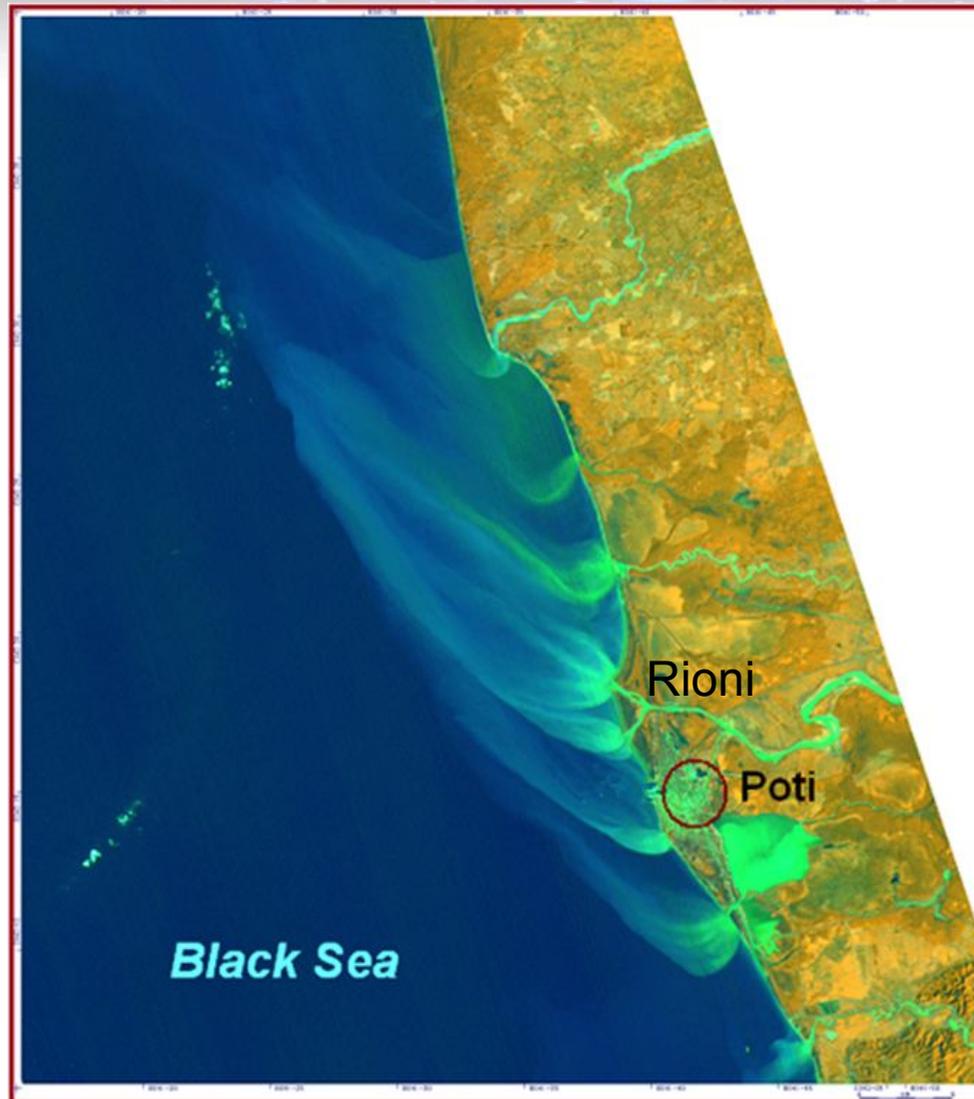
распределение по месяцам

Всего было отснято 295 изображений восточной части Черного моря. Примерно половина – безоблачные или малооблачные. В информационной системе «See the Sea» для всех 144 изображений были построены цветосинтезированные композиты и проведена классификация.

Проявления выносов рек содержались на изображениях каждого месяца каждого года



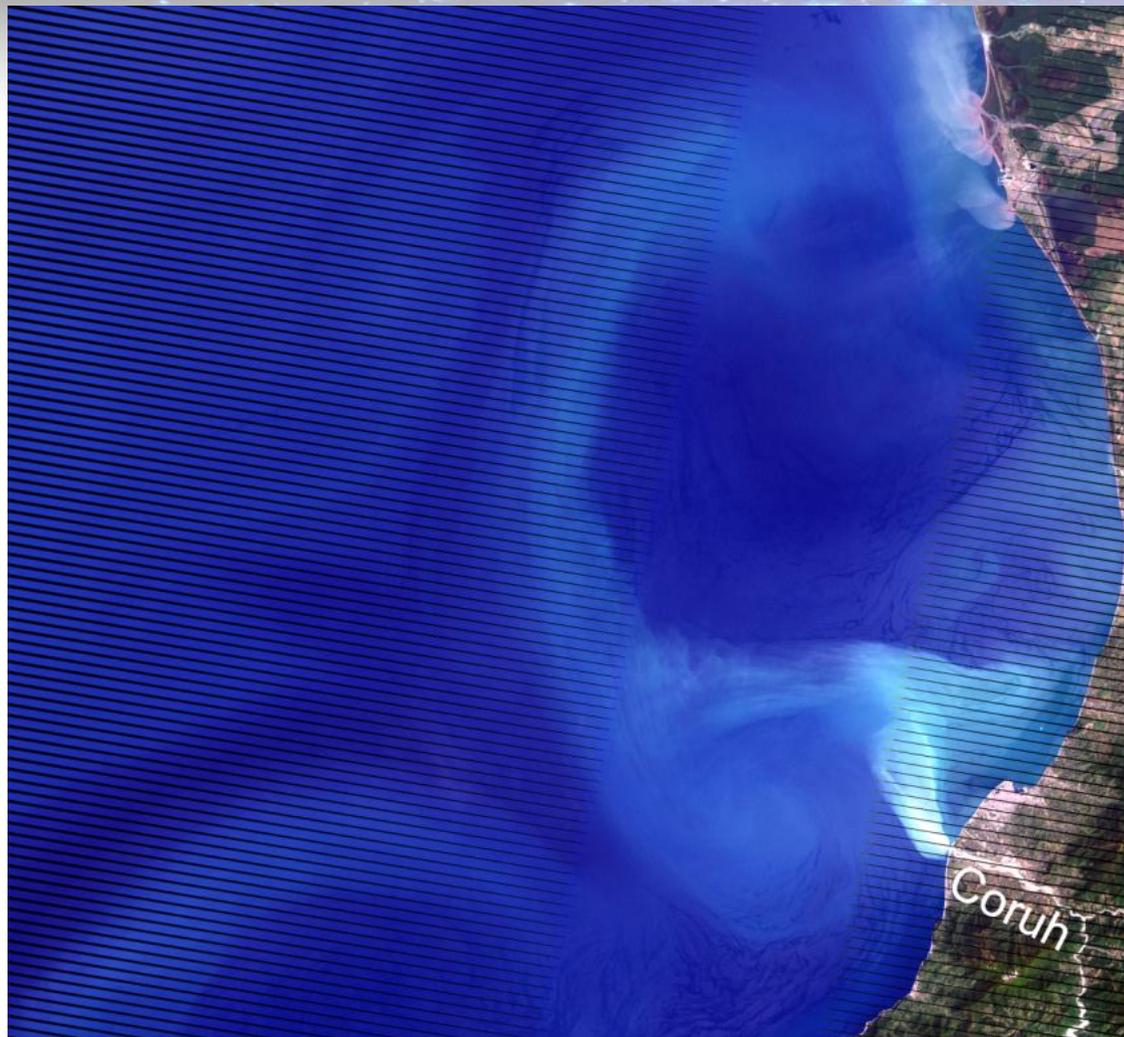
Вынос Риони



- Выносы рек Риони, Хоби и Супса проявляются на всех спутниковых изображениях видимого диапазона независимо от времени года.
- Объясняется смешанным питанием этих рек: дождевого и ледникового.
- Сезонное различие наблюдается в количестве взвешенного вещества в акватории, непосредственно примыкающей к устью. По данным MERIS Envisat средняя величина TSM составила 40 г/м^3 , в пиковый период - 60 г/м^3 в июле и октябре.

MSU METEOR-3M

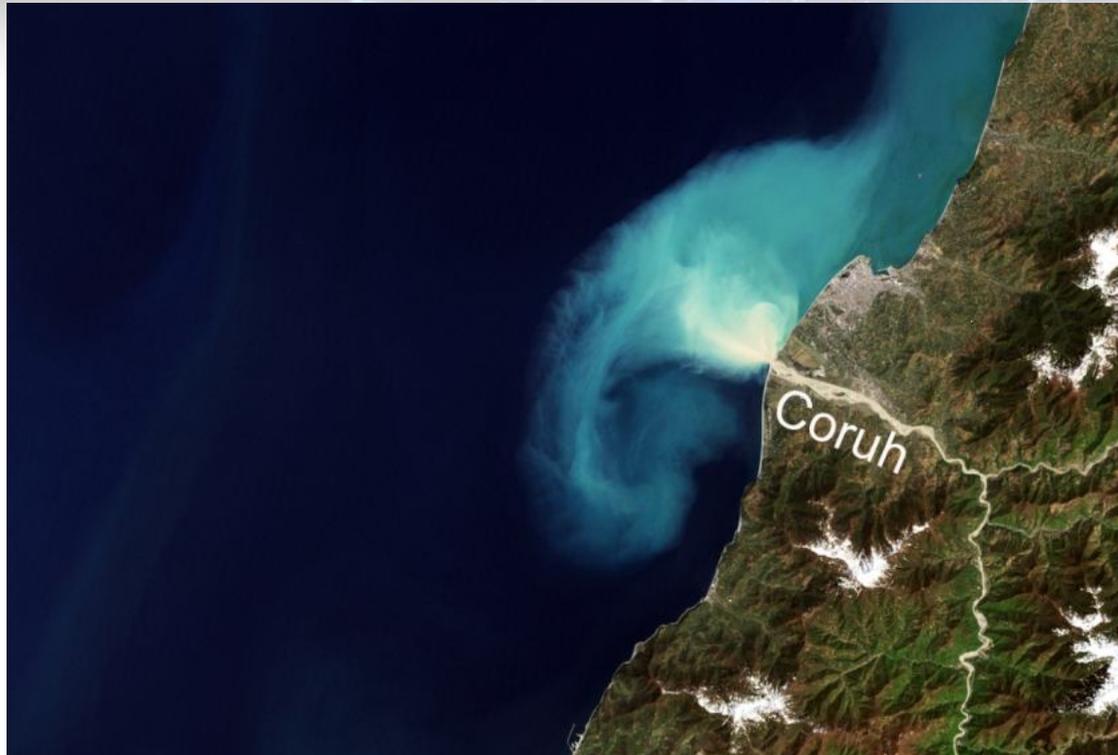
Сезонные вариации проявления выноса реки Чорохи



Landsat-7 ETM+ цветосинтезированное изображение (3-2-1 каналы) от 16 мая 2009

- Вынос реки Чорохи имеет ярко выраженный сезонный характер.
- В период снеготаяния в горах с марта по июнь наблюдается вынос с повышенным содержанием взвешенного вещества, достигающим 35-40 г/м³.
- Повторное увеличение концентрации взвешенного вещества наблюдается в ноябре и декабре, которое связано с повышенными осадками.
- В остальные месяцы плем реки Чорохи либо совсем не проявляется на спутниковых изображениях, либо в виде области соответствующей области 3. Содержание взвешенного вещества не превосходит 8-10 г/м³.

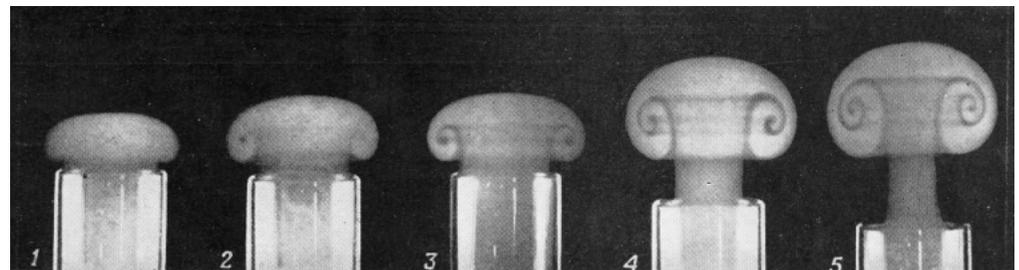
Образование вихревых диполей выносом реки Чорохи



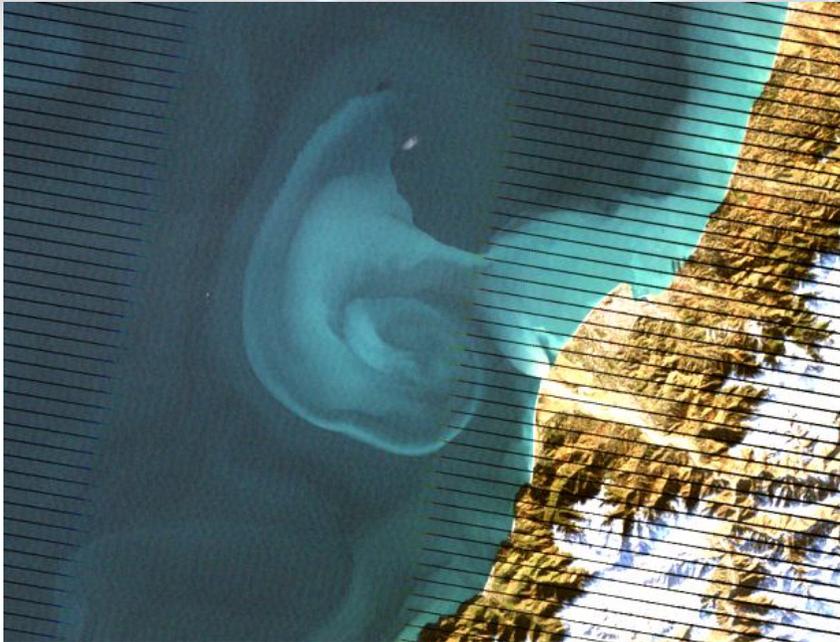
Фрагмент цветосинтезированного изображения Landsat-7 ETM+ (3-2-1- каналы) от 30 апреля 2003 г.

Физика этого явления в общих чертах объяснена в монографии Batchelor "Introduction to fluid dynamics", как истечение нестационарного потока жидкости из трубы с открытым концом, через которое «выстреливается» некоторое количество жидкости

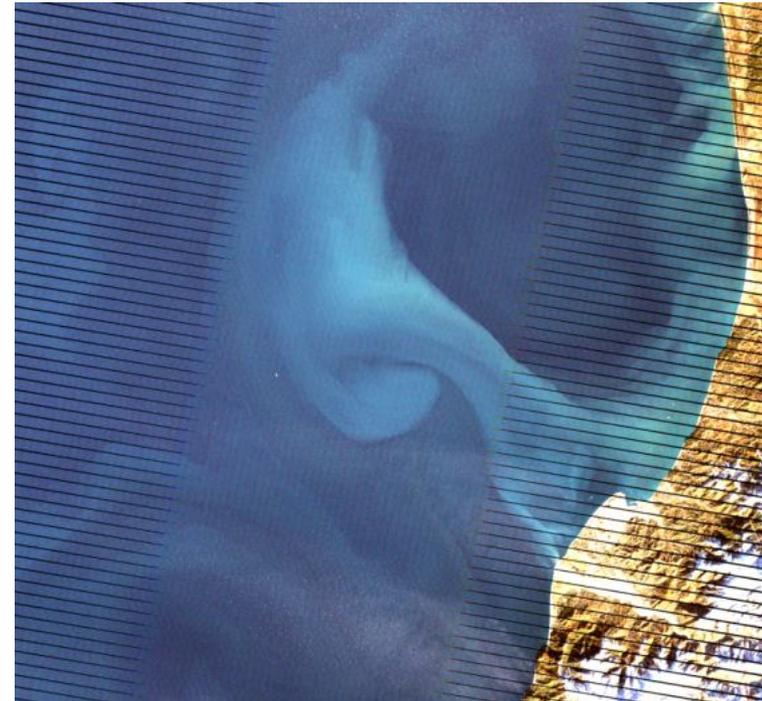
- Вихревые диполи наблюдаются в апреле-мае и ноябре-январе.
- Как правило они асимметричны с четкой циклонической частью диаметром 8-10 км и «размытой» антициклонической частью большего размера, достигающего 40 км в диаметре.
- Увеличение антициклонической части можно объяснить генеральным распространением плюма направо от устья



Образование вихревых диполей выносом реки Чорохи



Фрагмент цветосинтезированного изображения Landsat-7 ETM+ (3-2-1- каналы) от 13 января 2005 г.



Фрагмент цветосинтезированного изображения Landsat-7 ETM+ (3-2-1- каналы) от 05 декабря 2007 г.

«Зимние» вихри – антициклоническая часть практически не выражена

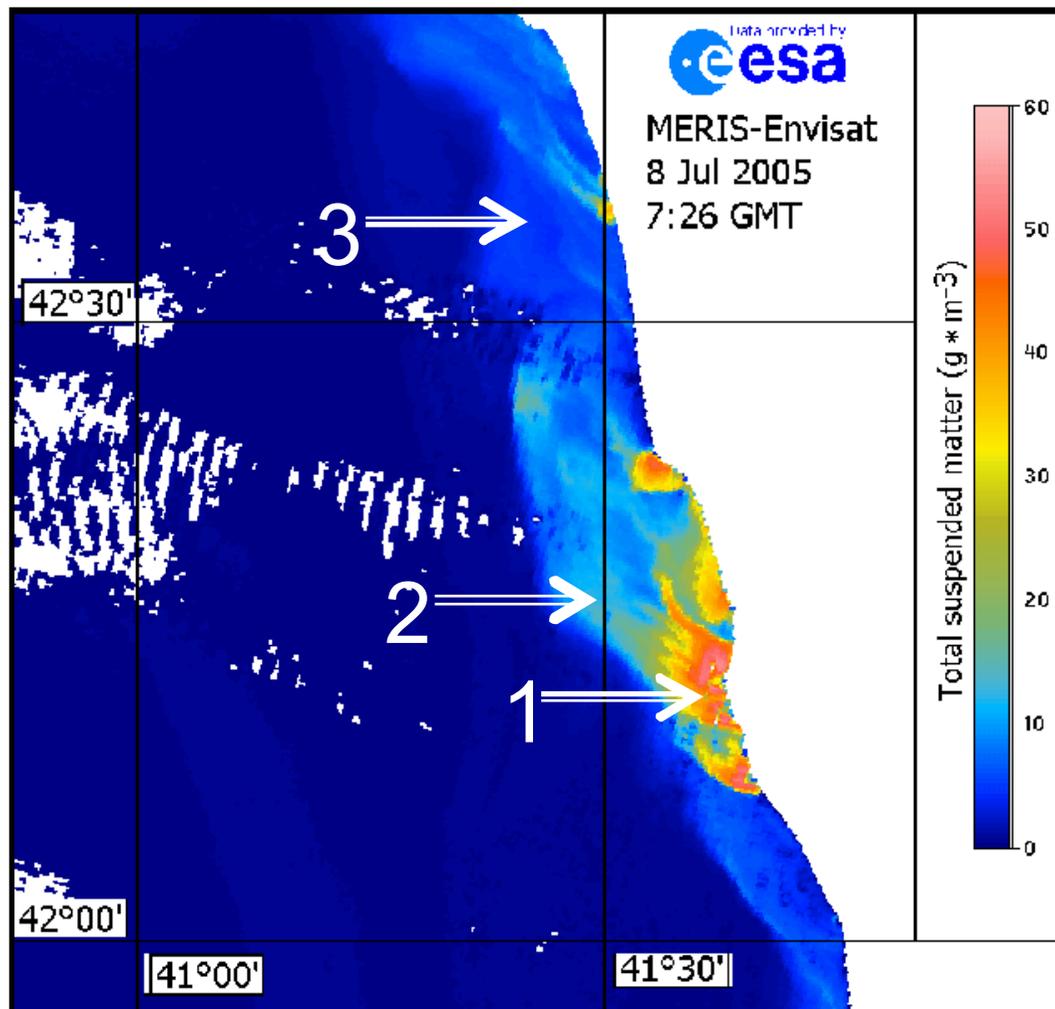
Влияние различных факторов на распространение взвеси в восточной части Черного моря



Вынос в виде 50-км струи. Фрагмент изображения Landsat-7 ETM+ от 15 ноября 2000 г.

- В прибрежной зоне восточной части Черного моря, плюмы распространяются преимущественно вправо от устьев рек вдоль берега параллельно изобатам.
- Вдольбереговое распространение взвеси наблюдается при западных ветрах, которые преобладают в данном районе.
- Под влиянием сильных восточных ветров, взвесь распространяется перпендикулярно берегу на расстояние до 30-50 км

Оценка концентрации взвешенного вещества по данным MERIS Envisat



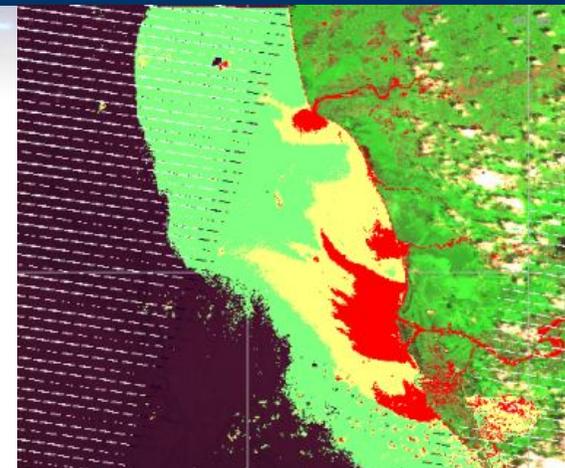
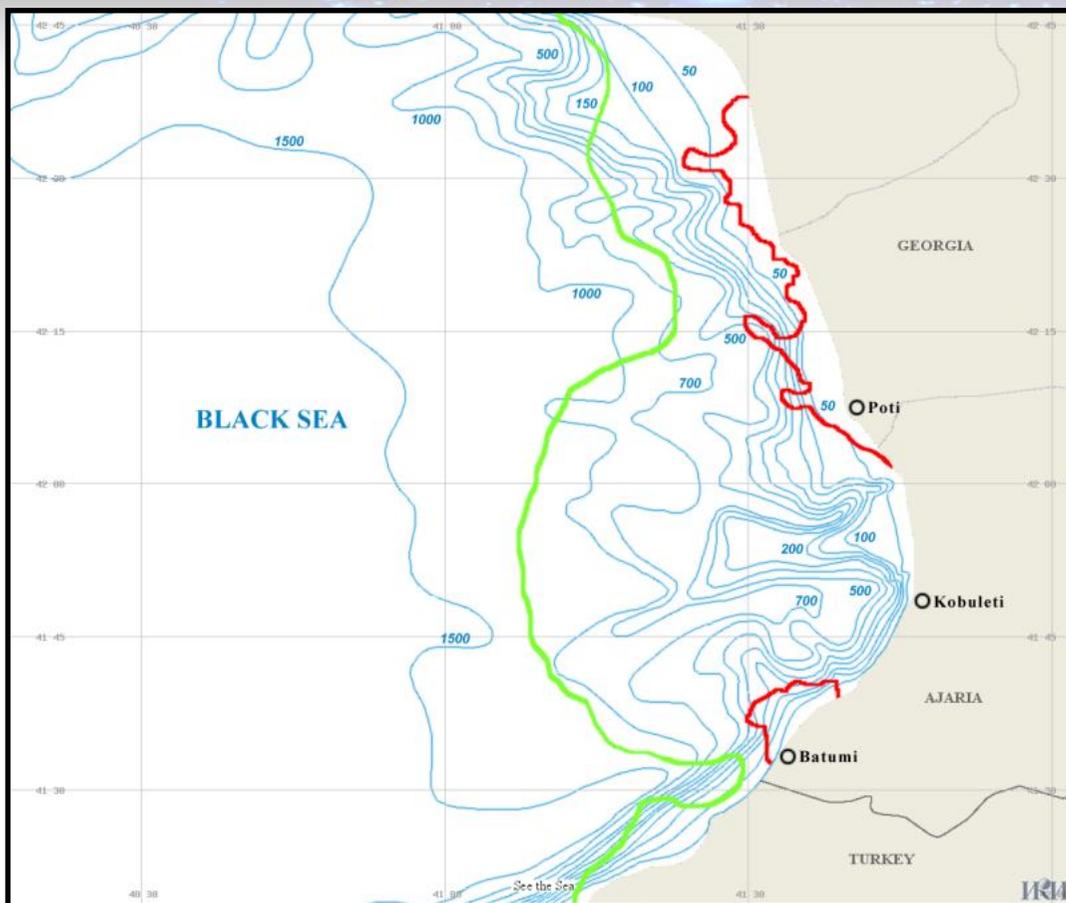
Для восточной части Черного моря характерные значения концентрации взвешенного вещества определенные по данным MERIS Envisat составляют:

1-я область - 30 - 50 г/м³

2-я область - 13 - 18 г/м³

3-я область - 5 - 12 г/м³

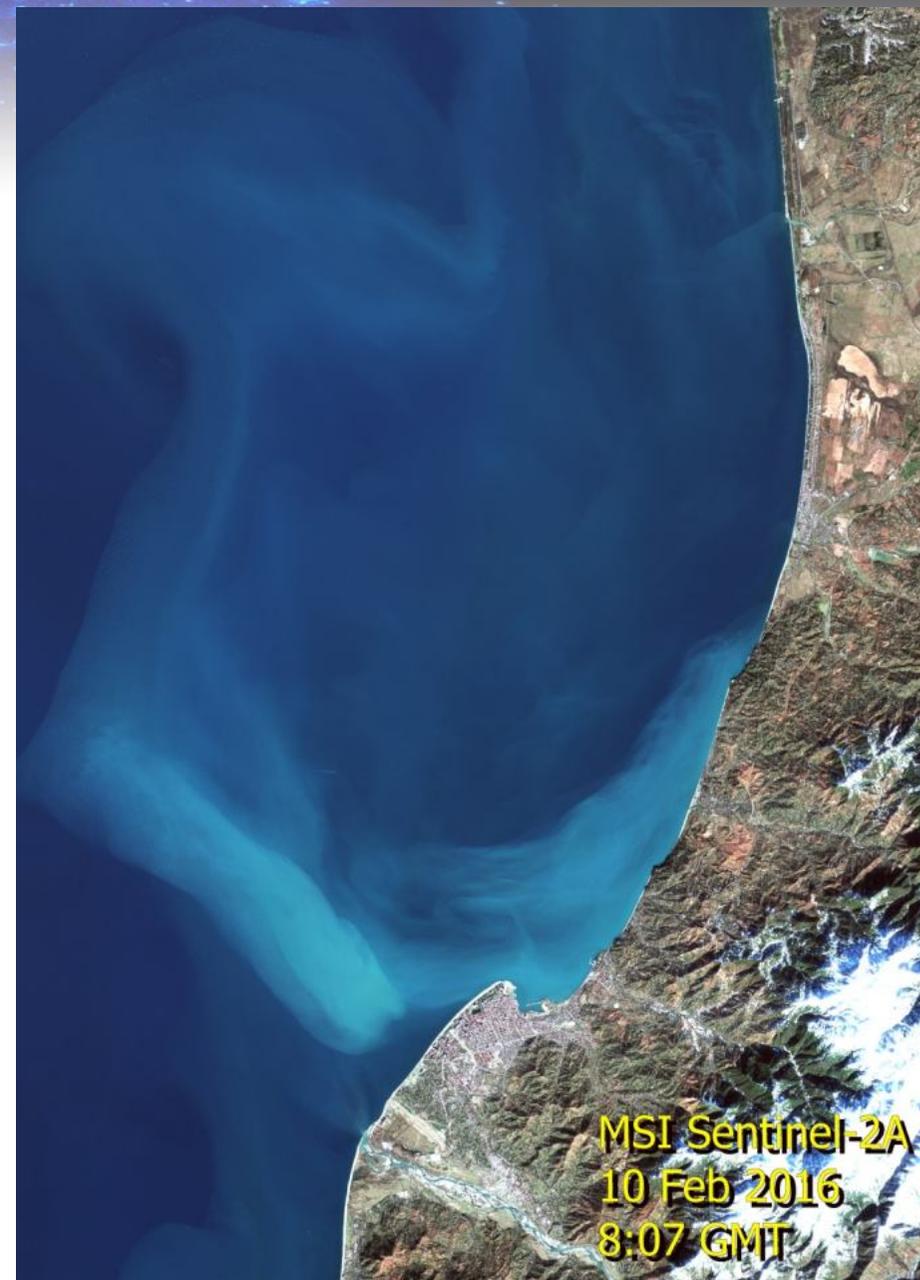
Область распространения взвешенного вещества

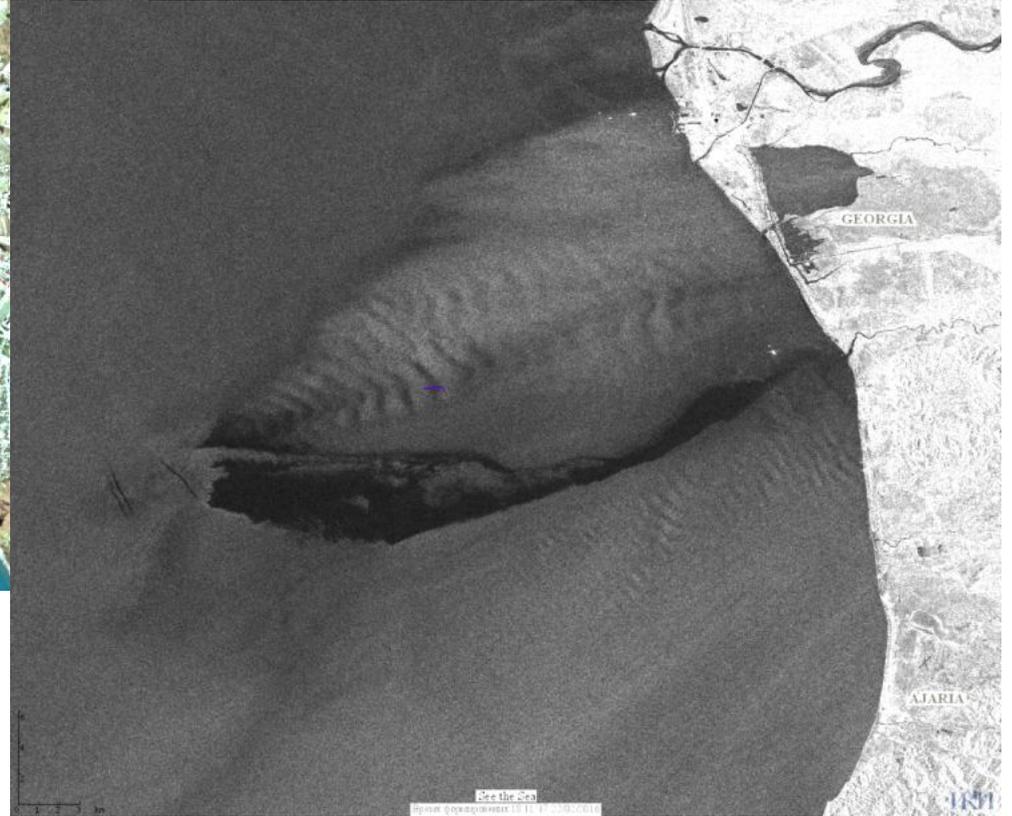


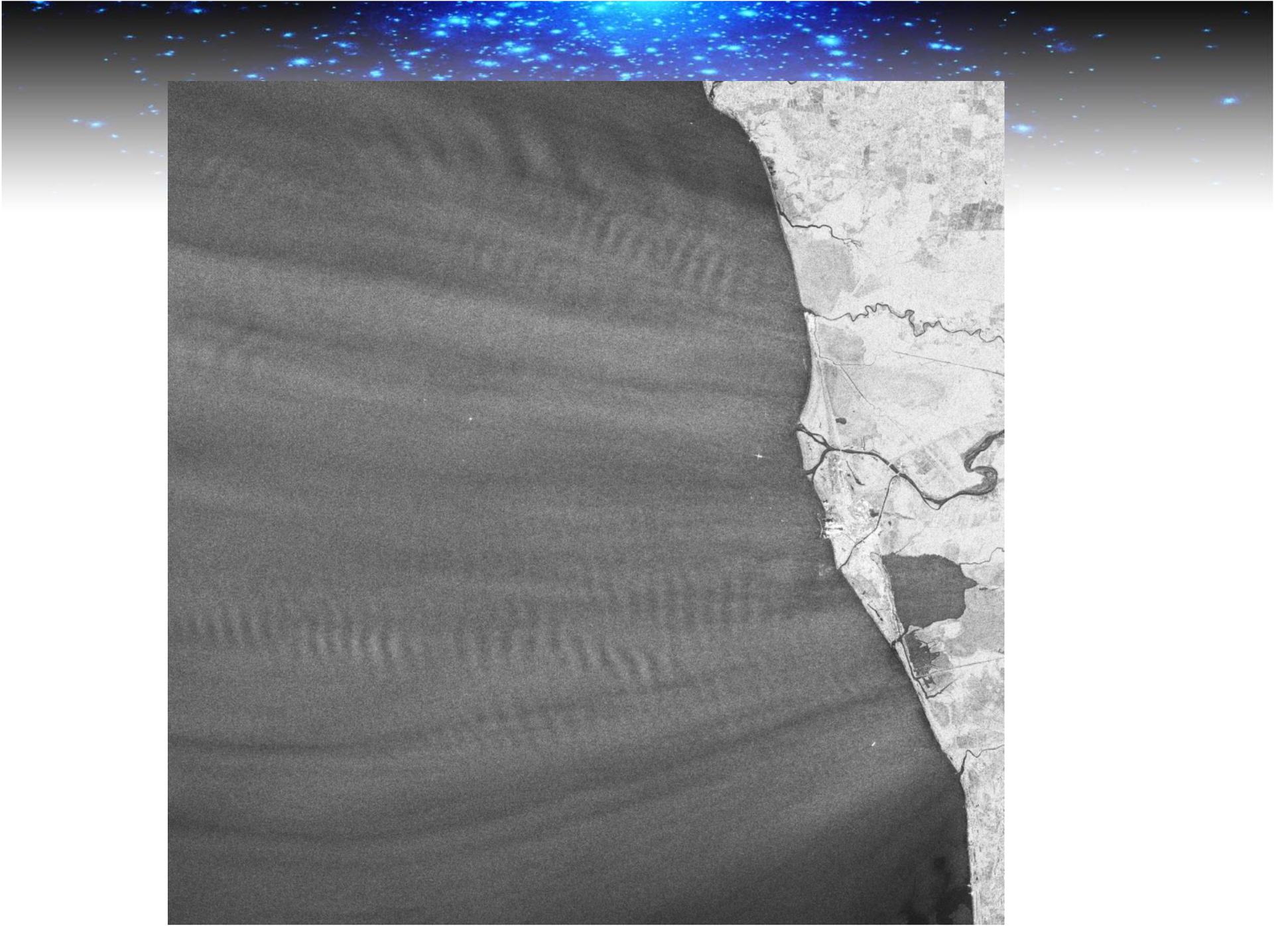
Области максимального распространения взвешенного вещества в восточной части Черного моря:

- зеленая линия – граница области 3;
- красная линия – граница области 1.

Максимальная площадь области 1 - 175 км². Типична для периода март-апрель и некоторых дней в ноябре. Максимальная площадь распространения взвешенного вещества, выносимого всеми реками, наблюдается в апреле-мае, составляет - 2200 км²







Выводы (1)

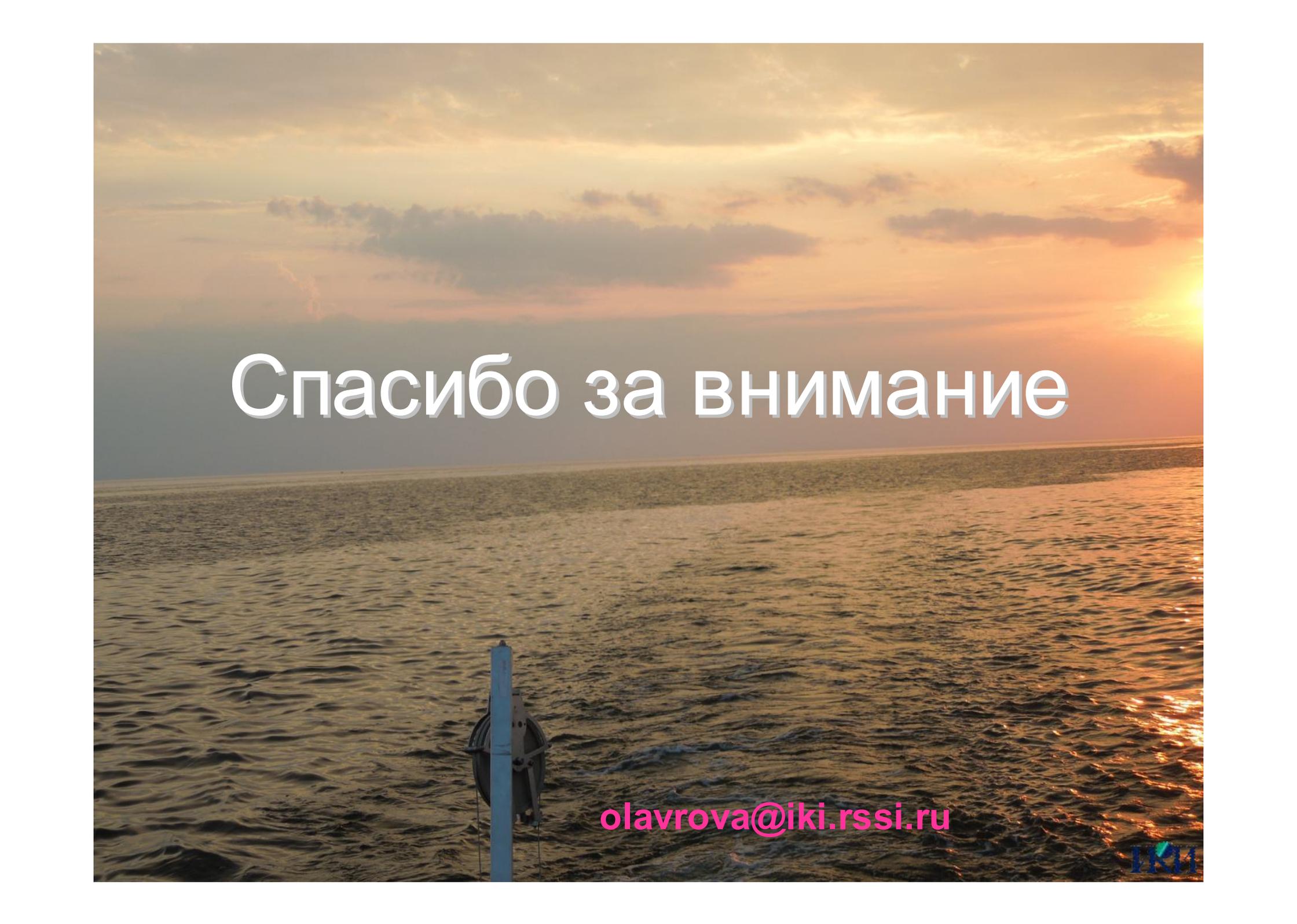
- Влияние различных факторов на концентрацию и распространение в море взвешенного вещества, выносимого реками, рассмотрено для районов с сильно различающимися характеристиками.
- Вынос равнинной реки Вислы с повышенной концентрацией взвешенного вещества распространяется по направлению ветра. Воды с низкой концентрацией движутся по направлению, совпадающему с вдольбереговым циклоническим течением.
- Для горных рек Грузии наибольшее влияние на концентрацию и распространение взвешенного вещества в восточной части Черного моря оказывает сток рек. Его интенсивность влияет как на форму выноса (например в виде вихревых диполей), так и на размер области распространения взвешенного вещества.

Выводы (2)

- **Сильный восточный ветер способствует образованию выноса в виде далеко распространяющихся струй. Эффект сильного влияния Основного черноморского течения по спутниковым данным не прослеживается.**
- **Сравнение количественных оценок концентрации взвешенного вещества по спутниковым данным и измерениям in-situ свидетельствует о необходимости дальнейшего развития региональных алгоритмов. Имеющие алгоритмы дают значения мутности меньше, чем измеренные**

Благодарности

- Данные ASAR и MERIS Envisat были получены в рамках научных проектов Европейского космического агентства
- Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 14-17-00555
- Информационная система See the Sea усовершенствована при финансовой поддержке РФФИ, грант № 13-07-12017

A photograph of a sunset over the ocean. The sun is low on the horizon, casting a golden glow across the sky and reflecting on the water. A blue buoy is visible in the foreground on the left side. The text "Спасибо за внимание" is overlaid in the center of the image.

Спасибо за внимание

olavrova@iki.rssi.ru

