

Верификация различных алгоритмов определения концентрации взвешенного вещества и мутности по данным MSI Sentinel-2 и OLI Landsat-8 во время подспутниковых измерений в приустьевых зонах рек Сулак и Мзымта

*Лаврова О.Ю. (1), Назирова К.Р. (1), Соловьев Д.М. (2),
Князев Н.А. (1), Алферьева Я.О. (3), Краюшкин Е.В. (1),
Жук Е.В. (2)*

¹Институт космических исследований РАН, Москва

²ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», Севастополь

³Московский государственный университет им. М.В.

Ломоносова, геологический факультет, Москва

[*olavrova@iki.rssi.ru*](mailto:olavrova@iki.rssi.ru)



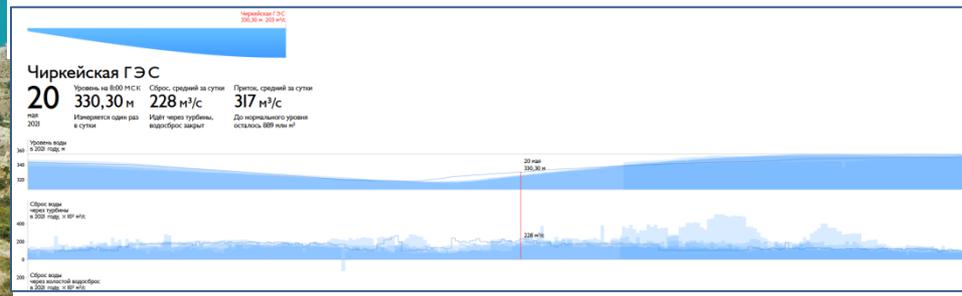
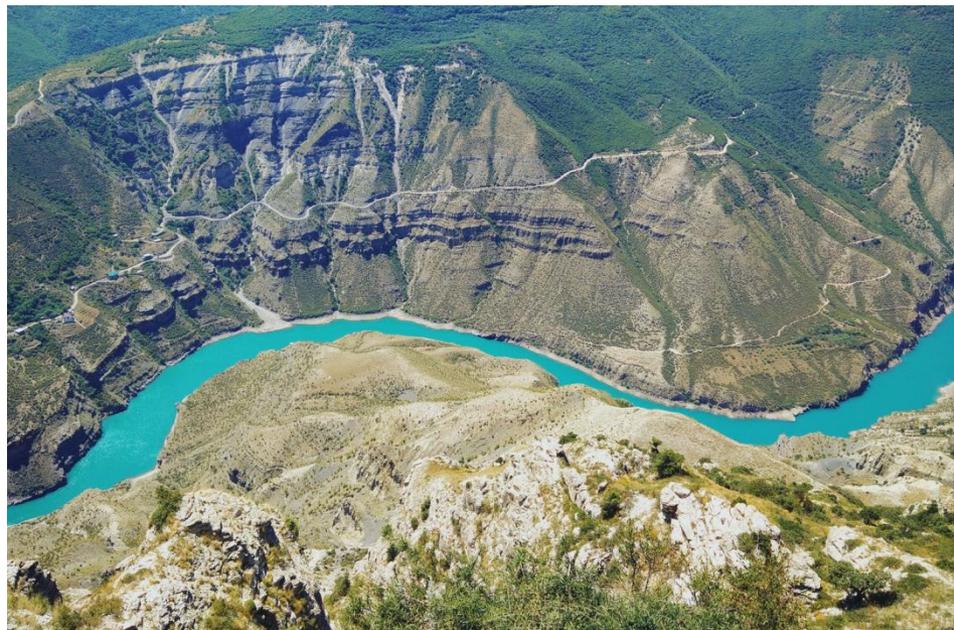
Мотивация

- Одна из основных задач при получении количественных характеристик на основе спутниковых данных – их верификация с помощью измерений in-situ. Это в частности справедливо для определения мутности и концентрации взвешенных твердых частиц в приустьевых областях рек в морях.
- Эти параметры определяются по данным оптических спутников с помощью специализированных алгоритмов. Наилучшие результаты достигаются при использовании региональных алгоритмов, разработанных для конкретных регионов, конкретных рек и даже разных сезонов. Такие алгоритмы, естественно, учитывают данные in-situ из тех регионов, для которых они разрабатываются.
- Не имея возможности заниматься разработкой региональных алгоритмов, нами была поставлена задача оценить эффективность некоторых стандартных алгоритмов определения мутности и концентрации взвешенного вещества для двух районов: в приустьевой зоне реки Сулак, впадающей в Каспийское море, и реки Мзымта, впадающей в Черное море.

Река Сулак



- Река Сулак образована слиянием рек Аварское Койсу и Андийское Койсу
- Впадает в Каспийское море
- Протекает по территории Республики Дагестан
- Длина - 169,0 км
- Площадь бассейна - 15 200 км²
- Площадь дельты - 44 км²
- Среднемноголетний расход воды - 149 м³/с
- Среднемноголетний речной сток - 4,7 км³/год
- Зарегулированный сток - регулируют два водохранилища: Чирюртское и **Чиркейское** (142 км от моря)
- Состав русловых отложений - валунно-галечный (до Миатлинского ущелья), песчаный (ниже по течению) до илистого (на устьевом участке реки).



Река Мзымта



1- Имеретинский порт; 2 - олимпийский парк;
3 - глубоководный выпуск сточных вод; 4 - пляжи



- Горная река
- Впадает в Черное море
- Длина - 89 км
- Площадь водосборного бассейна - 885 км²
- Среднегодовой расход воды - 45,6 м³/с
- Среднегодовой речной сток - 4,7 км³/год
- Питание смешанное



Тестируемые алгоритмы

1. The C2RCC (Case 2 Regional Coast Color) processor (<https://www.brockmann-consult.de/portfolio/water-quality-from-space/>), реализован в программном обеспечении SNAP ESA Sentinel Toolbox (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>), использует нейронные сети

2. Алгоритмы, входящие в the ACOLITE software (<http://odnature.naturalsciences.be/remsem/software-and-data/acolite>)

- Nechad 2009
- Nechad 2015 (2016)
- Dogliotti 2015

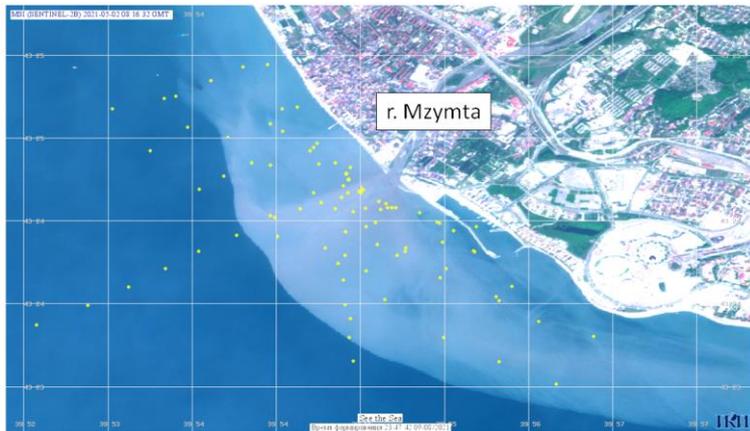
Данные алгоритмы позволяют определять мутность (turbidity) и концентрацию взвешенного вещества (SPM) по спутниковым данным, в частности OLI Landsat-8 и MSI Sentinel-2.

Проводилось сравнение результатов, полученных с помощью различных алгоритмов, с результатами синхронных натурных измерений

Измерения *in-situ*

Плюм р. Мзымты

- 2018 г.: апрель 20 – 29; 70 станций
- 2019 г.: апрель 23 - май 4; 138 станций
- 2021 г.: апрель 21 – май 3; 91 станция



Расположение всех станций в 2021 г

Плюм р. Сулак

2021 г.: май 20 - 23; 55 станций



Измерения проводились с маломерных судов



CTD-зонд «The RBR-concerto» с датчиком мутности

Фильтровальная вакуумная установка



Портативный мутномер «TN400 Portable Turbidity Meter»



Спутниковые данные

Основные используемые данные:

- MSI Sentinel-2
- OLI Landsat-8
- OLCI Sentinel-3
- PlanetScope (Сулак)

Спутниковая информация, доступная во время натурных измерений в приустьевой зоне р. Мзымты в 2019 г.

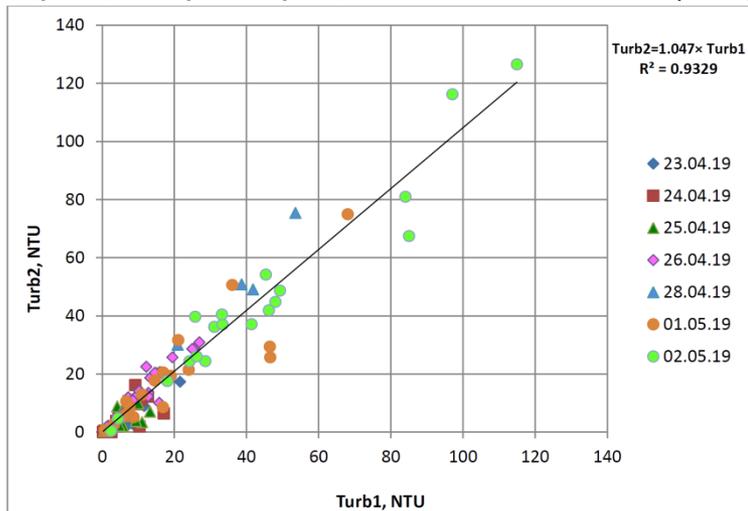
Дата	Время UTC	Прибор	Спутник	Пространственное разрешение, м	Продукты на основе спутниковых данных	Время проведения измерений с судна (UTC)
23.04.19	08:17	MSI	Sentinel-2B	10	TCI, SPM	7:42-10:38
24.04.19	07:59	ETM+	Landsat-7	30	TCI	7:33-11:41
25.04.19	08:01	OLI/TIRS	Landsat-8	30/60	TCI, SST, SPM, CHL	7:37-11:08
	07:56	OLCI	Sentinel-3B	300	SPM	
26.04.19	07:30	OLCI	Sentinel-3B	300	SPM	7:27-10:32
	08:27	MSI	Sentinel-2B	10	TCI, SPM	
	10:12	VIIRS	NPP	1000	SST, WLR, CHL	
28.04.19	08:17	MSI	Sentinel-2A	10	TCI (облачно)	7:37-9:17
30.04.19	07:26	OLCI	Sentinel-3B	300	SPM	Не было измерений
01.05.19	08:27	MSI	Sentinel-2A	10	TCI (облачно)	7:35-10:56
02.05.19	08:07	OLI/TIRS	Landsat-8	30	TCI (облачно)	7:30-11:07
04.05.19	08:02	OLCI	Sentinel-3A	300	SPM	Не было измерений

Методика

Основной вопрос: что с чем сравнивать?

Данные in-situ:

1. Значения мутности, измеряемые датчиком мутности по всей глубине и установленном на STD-зонде (NTU)
2. Значения мутности, измеряемые портативным мутномером в верхнем слое (NTU)
3. Значения концентрации взвешенного вещества, определяемые в результате отбора проб, их фильтрации и взвешивания ($\text{г}/\text{м}^3$)

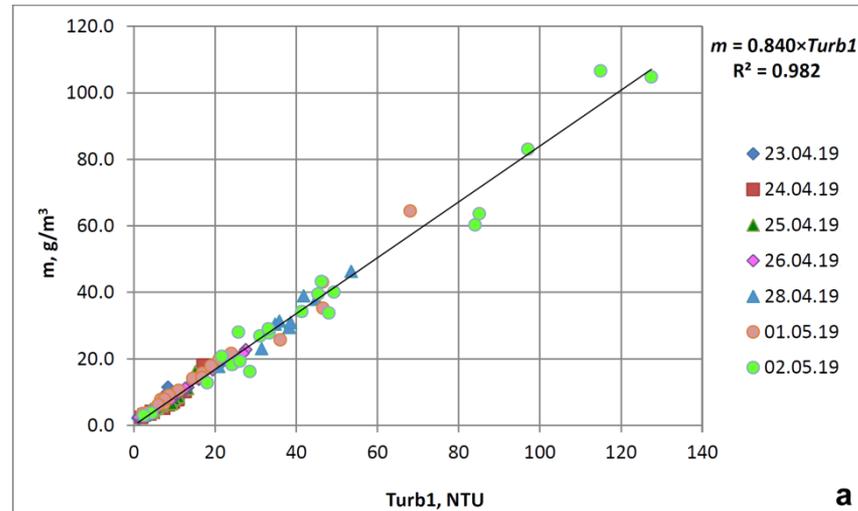


Сопоставление значений мутности приповерхностного слоя воды, полученных при помощи портативного мутномера ($Turb1$) и датчика мутности на STD зонде ($Turb2$)

Аналогичные зависимости получились и в 2021 г., практически с теми же коэффициентами

Спутниковые данные

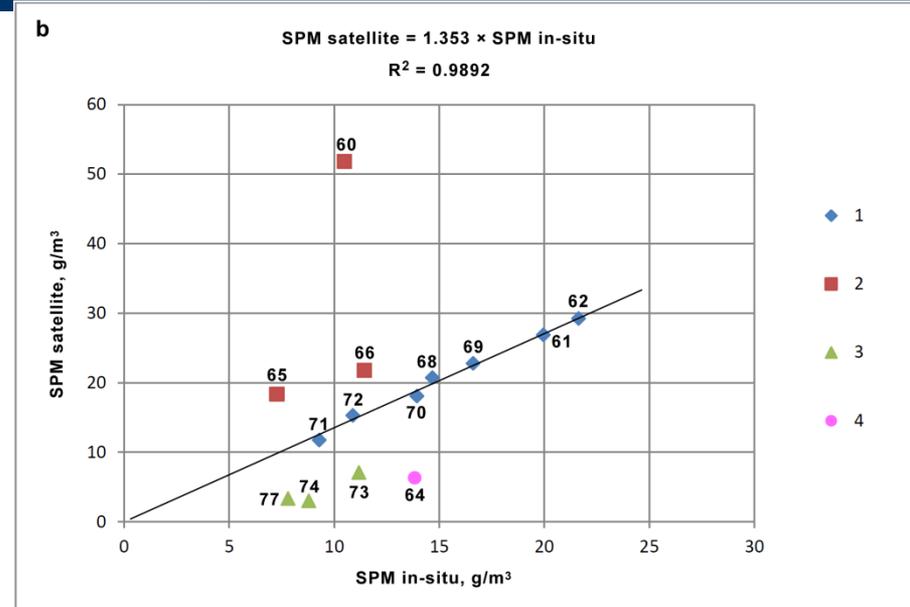
1. Turbidity, используя алгоритмы Nechad 2009, 2015, Dogliotti (FNU)
2. SPM (Suspended Particulate Matter concentration), TSM (Total Suspended Matter concentration), используя алгоритмы C2RCC, Nechad 2009, 2015, Dogliotti ($\text{г}/\text{м}^3$)



Сопоставление значений мутности, определенных портативным мутномером ($Turb1$), и концентрации взвеси в пробе воды (m)

Вывод: Можно использовать только один датчик для определения мутности и не брать пробы воды

Результаты применения алгоритмов (на примере Мзымты) – 2019 г.



Положения восточной границы пюма 26 апреля 2019 в 07:30 - 08:00 UTC (желтая линия); в 09:11 – 09:29 UTC (розовая линия) и в 10:30 – 11:00 UTC во время возвращения судна в порт (зеленая линия).
Съемка с помощью MSI Sentinel-2 в 08:27 UTC. Скорость смещения восточной границы пюма увеличивалась от 5 до 13 см/с.

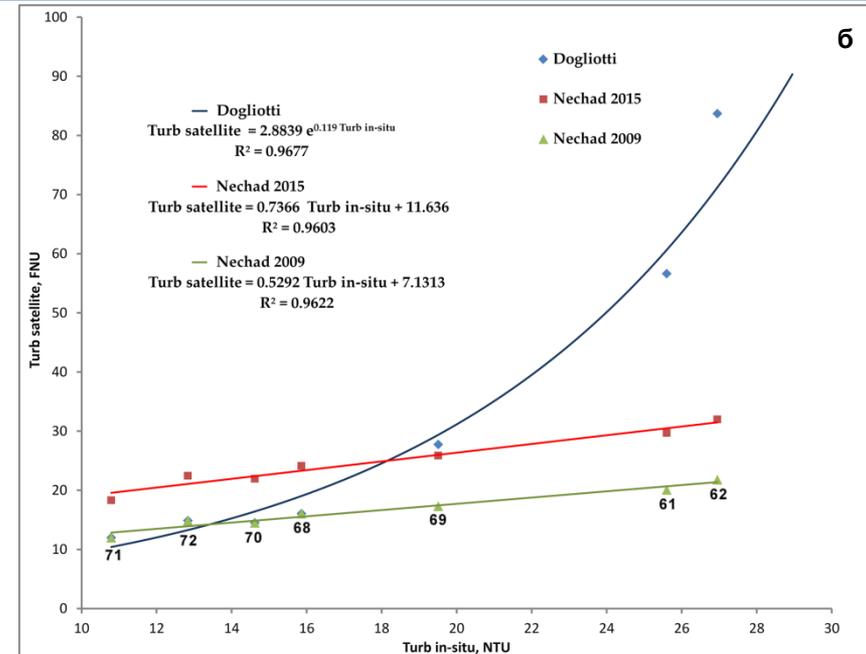
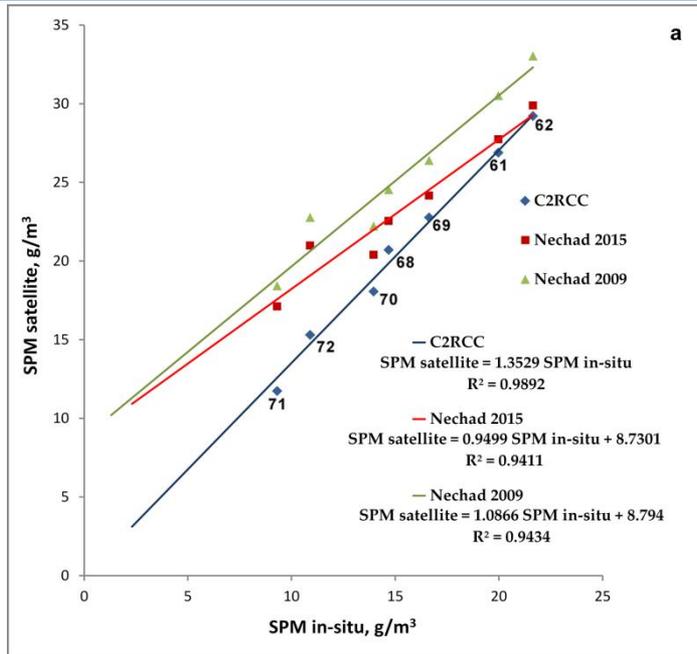
Вывод: для измерений, полученных на станциях, которые сохраняли свое положение относительно границы пюма, получилась линейная зависимость с $R^2 = 0,9892$. Значения SPM по «спутнику» превышают значения in-situ.

Юго-восточная граница пюма Мзымты меняет свое положение с достаточно большой скоростью, что очень важно учитывать при сравнении данных контактных и дистанционных измерений. Сравнить можно только данные для тех станций, которые в момент отбора проб находятся относительно границы пюма в том же положении, что и во время пролета спутника

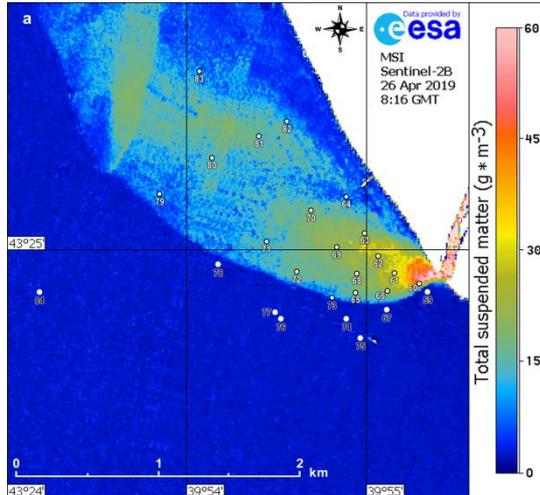
Сравнение значений концентрации взвешенного вещества полученных in-situ 26 апреля 2019 г. и определенных по данным MSI Sentinel-2B за тот же день с использованием C2RCC. Числа у маркеров – номера станций

1 - точки, которые не изменили своего положения относительно границы пюма за время между пролетом спутника и отбором проб; 2 - точки, которые были непосредственно на границе внутри пюма в момент отбора проб. На спутниковом снимке они также находятся внутри пюма, но на некотором удалении от границы; 3 - точки, которые были внутри пюма в момент отбора пробы, но по спутниковым данным оказались вне пюма; 4 - точка напротив пирса.

Результаты применения алгоритмов (на примере Мзымты) - 2019 г.



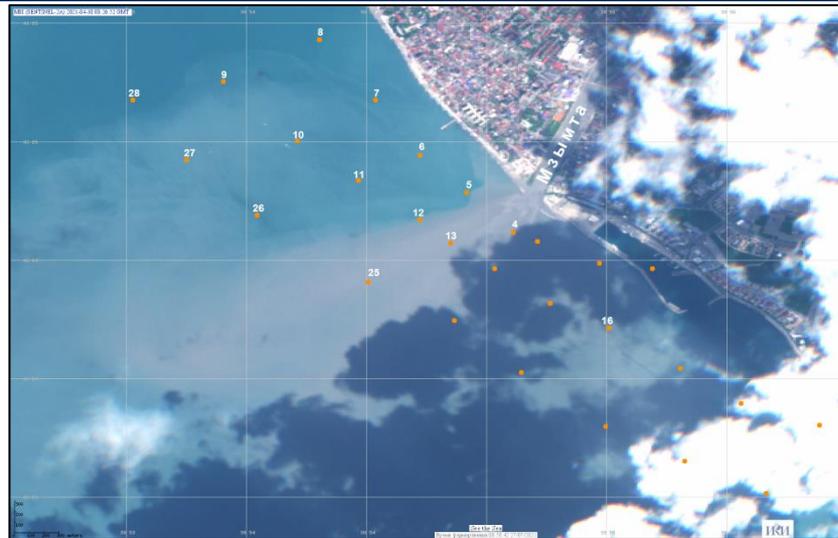
Сравнение значений концентрации взвешенного вещества (а) и мутности (б), полученных in-situ 26 апреля 2019 г. и определенных по данным MSI Sentinel-2B за тот же день с использованием разных алгоритмов. Числа у маркеров – номера станций



Вывод: в данном конкретном случае результаты, полученные с помощью алгоритма C2RCC лучше всего коррелируют с данными in-situ. Прямая линия тренда для этого алгоритма проходит через начало координат, и коэффициент достоверности аппроксимации R²= 0,989

Карта концентрации взвешенного вещества (TSM), полученная на основе данных MSI Sentinel-2B от 26 апреля 2019 с использованием алгоритма C2RCC с нанесенными номерами станций за тот же день

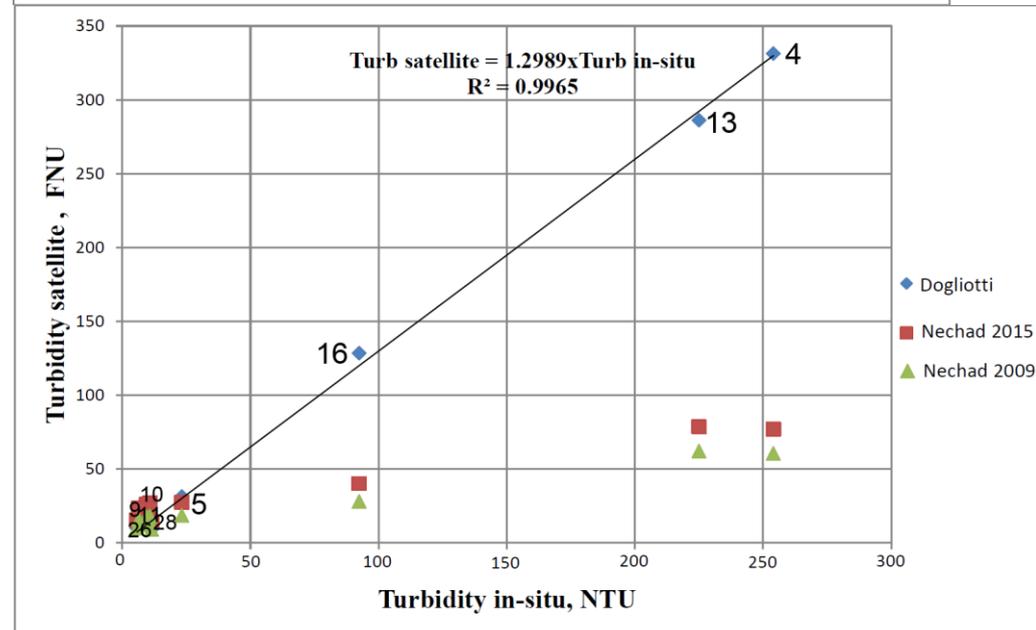
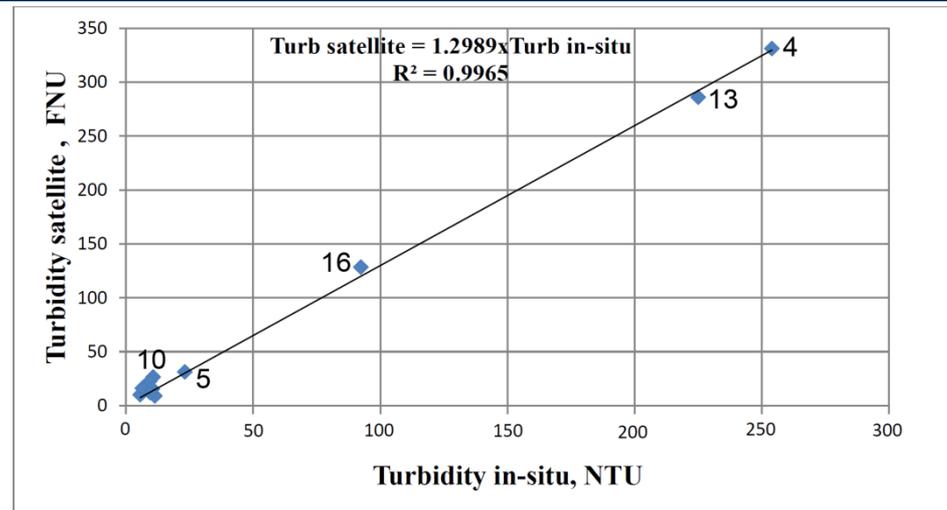
Результаты применения алгоритмов (на примере Мзымты) – 30.04.2021 г.



Расположение станций подспутниковых измерений 30 апреля 2021 г. на MSI-2A (4, 3, 2 каналы)

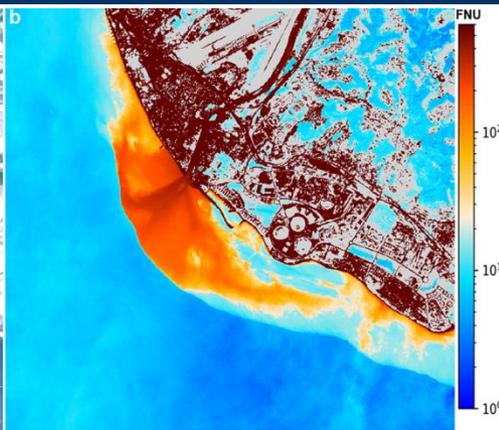
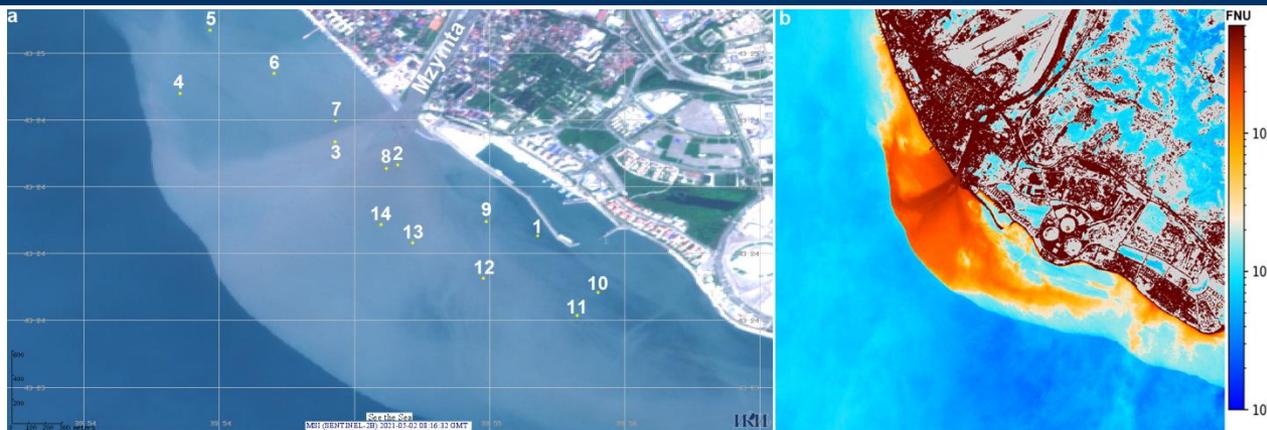
Вывод: при значениях мутности до 20 NTU все тестируемые алгоритмы достаточно хорошо коррелируют с данными in-situ. При больших значениях мутности, > 100 NTU, только результаты применения алгоритма Dogliotti хорошо коррелируют с натурными синхронными данными. Все остальные алгоритмы дают слишком заниженные значения.

Сравнение значений мутности, полученных in-situ 30 апреля 2021 г. и определенных по данным MSI Sentinel-2A за тот же день с использованием алгоритма Dogliotti (вверху) и трех разных алгоритмов (внизу). Числа у маркеров – номера станций



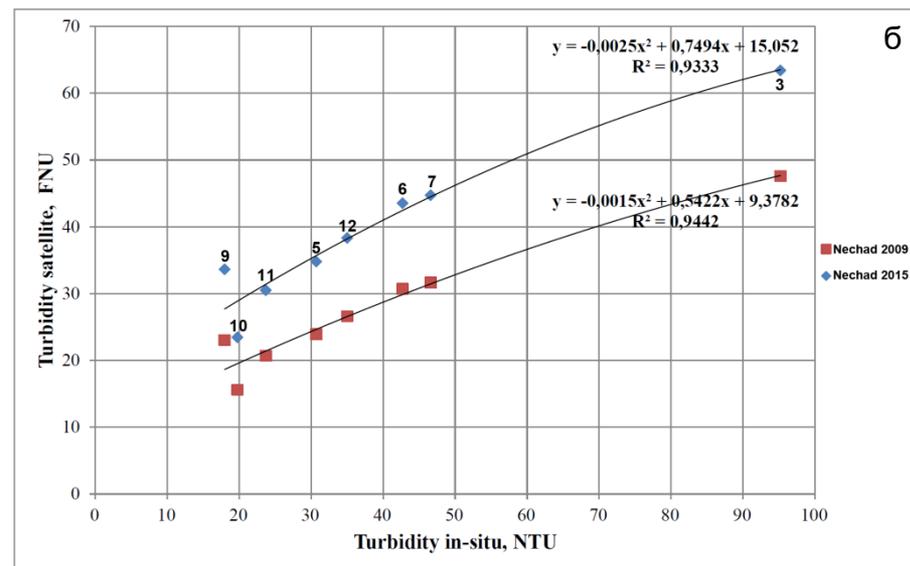
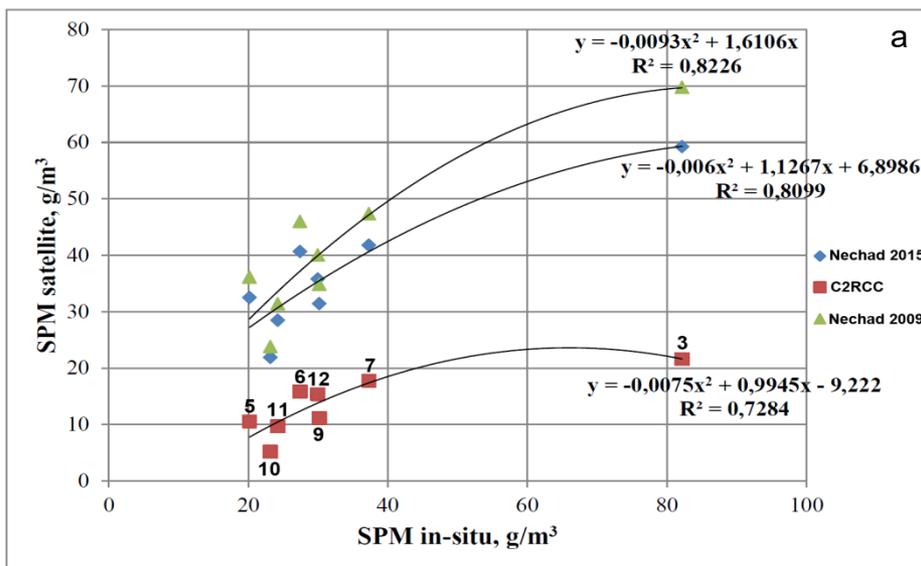
Для анализа использованы значения для 11 станций, не попавших в облако или в тень от облаков на спутниковом изображении

Результаты применения алгоритмов (на примере Мзымты) – 02.05.2021 г.



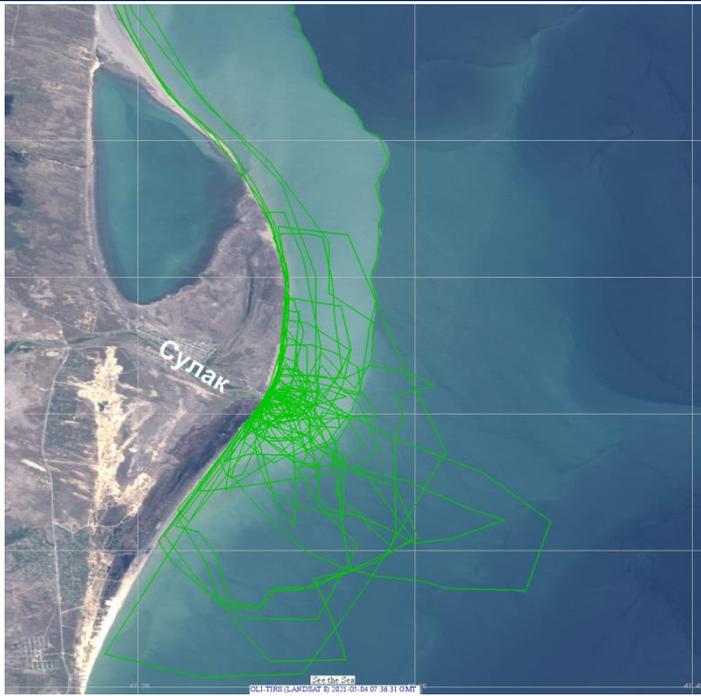
Вывод: при значениях мутности от 20 до 100 NTU нет линейной зависимости между данными in-situ и результатами применения различных алгоритмов, как для значений мутности, так и для концентрации взвешенного вещества (SPM). Для определения SPM наиболее адекватным оказалось применение алгоритма Nechad 2009, совершенно не правдоподобные результаты – при C2RCC. Для мутности – лучшие результаты при применении Nechad 2015. Алгоритм Dogliotti для значений БОльших 20-25 NTU дает значения мутности, завышенные в 3 раза

Расположение станций подспутниковых измерений 02 мая 2021 г. на MSI-2A (4, 3, 2 каналы) (слева); карта мутности, полученная на основе данных MSI Sentinel-2A от 02 мая 2021 с использованием алгоритма Dogliotti (справа)



Сравнение значений концентрации взвешенного вещества (а) и мутности (б), полученных in-situ 02 мая 2021 г. и определенных по данным MSI Sentinel-2A за тот же день с использованием разных алгоритмов. Числа у маркеров – номера станций

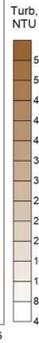
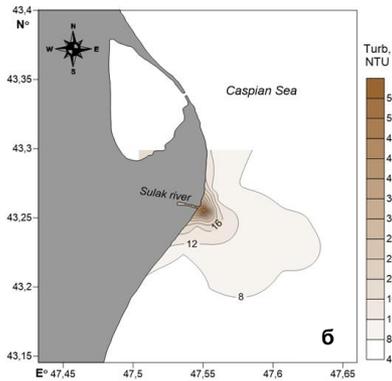
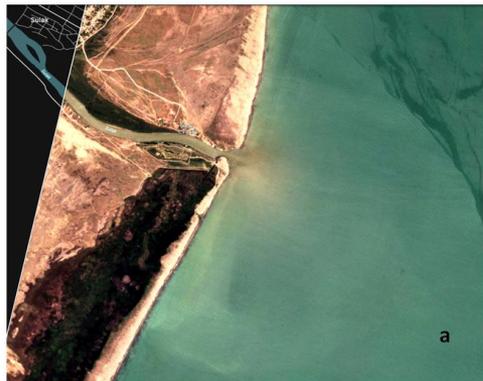
Натурные подспутниковые измерения на р. Сулак



Сводная карта поверхностных проявлений плумов р. Сулак составленная на основе спутниковых данных MSI Sentinel-1 и OLI Landsat-8 за 2020 – 2021 года

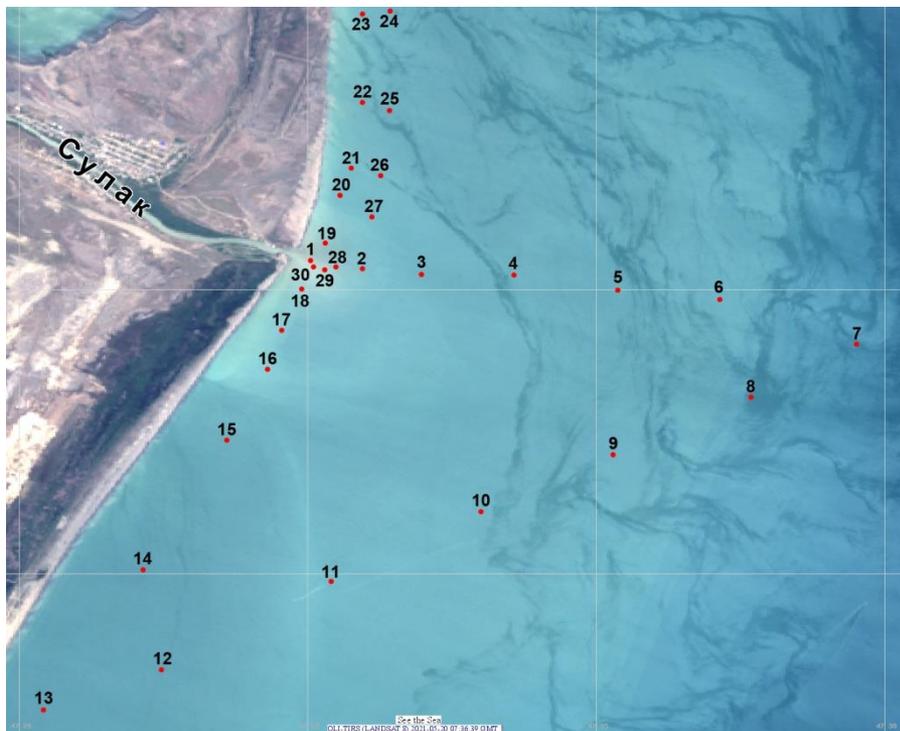


Подготовка к выходу в море 20 мая 2021 г.

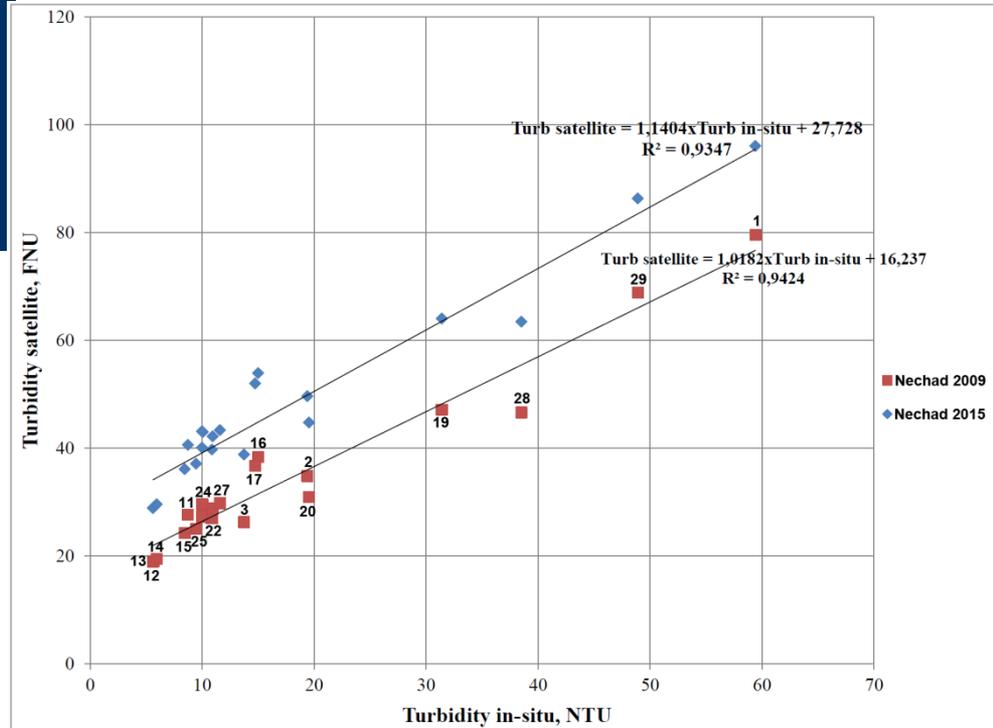


Фрагмент изображения OLI Landsat-8 за 20 мая 2021 г. (а); пространственное распределение мутности за то же число по данным портативного мутномера (б)

Результаты применения алгоритмов (на примере Сулака) – 20.05.2021 г.

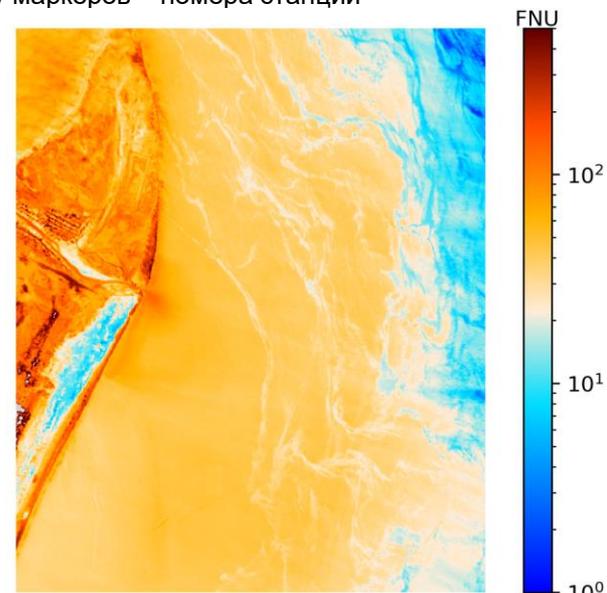


Расположение станций подспутниковых измерений 20 мая 2021 г. на цветосинтезированном изображении OLI Landsat-8 (4, 3, 2 каналы)



Сравнение значений мутности, полученных in-situ 20 мая 2021 г. и определенных по данным OLI Landsat-8 за тот же день с использованием разных алгоритмов. Числа у маркеров – номера станций

Карта мутности, полученная на основе данных OLI Landsat-8 от 20 мая 2021 с использованием алгоритма Nechad 2015



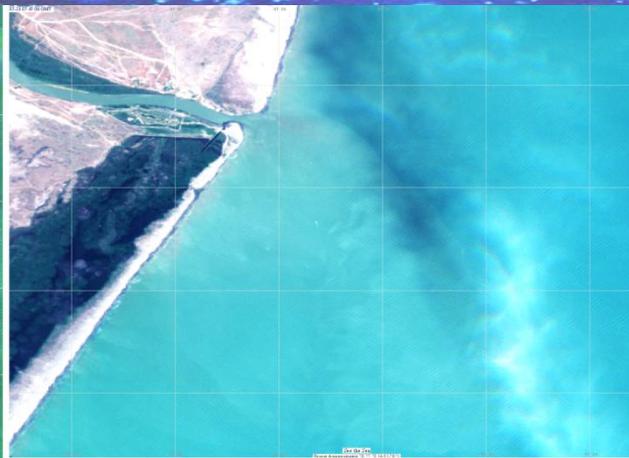
Вывод: при значениях мутности от 5 до 60 NTU для плюма р. Сулак наблюдалась линейная зависимость между данными in-situ и результатами применения алгоритмов определения мутности Nechad 2009 и Nechad 2015. Для мутности – лучшие результаты получены при применении алгоритма Nechad 2009. Оба эти алгоритма завышают значения мутности. Алгоритм Dogliotti дает неоправданно высокие значения.

Слики поверхностно-активных веществ сильно искажают картину и усложняют применение любых алгоритмов

Сдвиг границы плюма р. Сулак 23.05.2021



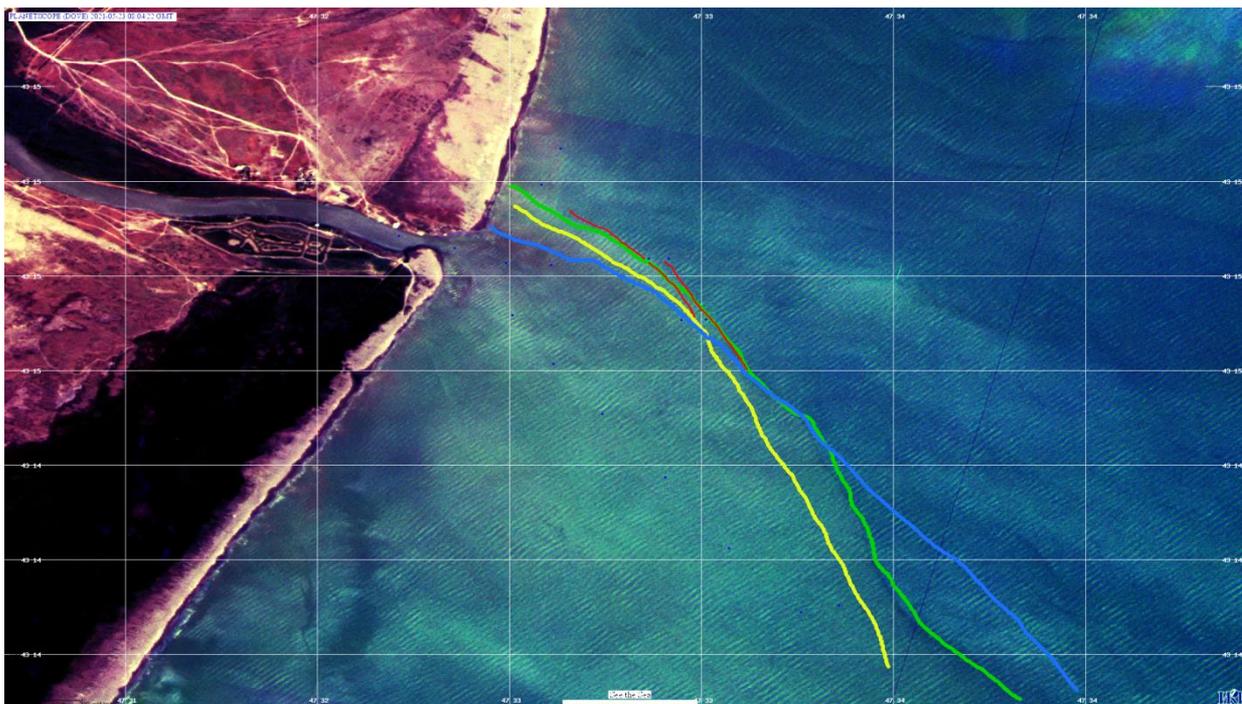
Фрагмент изображения PlanetScore 08:04 UTC



Фрагмент MSI Sentinel-2B 07:46 UTC



Фрагмент изображения PlanetScore 06:56 UTC



Северо-восточная граница плюма р Сулак 23.05.2021

- Голубая линия – 06:56 UTC
- Желтая линия – 07:46 UTC
- Зеленая линия – 08:04 UTC
- Красная линия – 07:45 – 09:15 UTC (судовые измерения)



Выводы

Натурные подспутниковые измерения мутности и концентрации взвешенного вещества, проведенные на 299 станциях при разных гидрометеоусловиях, в разные годы и в приустьевых зонах разных по своему типу рек, показали следующее:

- Количественные значения мутности и концентрации взвешенного вещества, получаемые по данным спутникового зондирования сенсорами MSI Sentinel-2 и OLI Landsat-8 с использованием 4 алгоритмов: C2RCC, Nechad 2009, Nechad 2015 и Dogliotti, достаточно хорошо коррелируют с измерениями этих величин in-situ.
- При невысокой мутности, не более 15-20 NTU, практически все алгоритмы дают достаточно близкие значения.
- При значениях мутности больших 100 NTU имеет смысл применять только алгоритм Dogliotti.
- Для значений мутности 25 – 90 NTU необходимо проведение дальнейших исследований.

- Анализ данных, полученных для приустьевой зоне р. Сулак, проводился при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 19-77-20060.
- Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» с помощью инструментария информационной системы See the Sea, развитие которой осуществляется в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).
- Авторы благодарят всех участников экспедиционных работ, а также капитанов маломерных судов, с которых проводились измерения.

Спасибо за внимание!