

Определение мутности и концентрации взвешенного вещества с помощью алгоритмов, встроенных в программный комплекс ASCOLITE: анализ и верификация

Жаданова П.Д.¹, Назирова К.Р.¹

(1) Институт космических
исследований РАН, Москва,
Россия

Прибрежные воды подвержены серьезному антропогенному загрязнению. Для России наиболее сильно антропогенное влияние сказывается на водах прибрежных зон Черного, Азовского, Балтийского и Каспийского морей. Одной из основных причин антропогенных и естественных загрязнений прибрежной зоны является речной сток, поскольку он является основным источником поступления в море взвешенных и растворенных терригенных и биогенных веществ. Эти вещества оказывают значительное и, во многих случаях, негативное воздействие на прибрежную экосистему.

Поэтому мониторинг эстуарных зон и понимание динамики распределения речных вод по морским шельфам являются важными научными и практическими задачами. Для того, чтобы продвинуться в решение проблемы необходимо проводить эффективный мониторинг основных параметров, таких как мутность вод, концентрация взвешенного вещества и хлорофилла-а и другие. Этого можно достичь только с помощью спутниковых методов дистанционного зондирования, которые дают уникальную возможность наблюдать практически одновременно весь район исследования на протяжении многих лет

Новизна

Представленные в работе результаты базируются на использовании алгоритмов программного комплекса ACOLITE, которые раньше никем не применялись для российских акваторий. Они предназначены для спутниковых сканеров цвета последнего поколения высокого пространственного разрешения. В этом заключается новизна исследования. Российские ученые в основном используют алгоритмы, разработанные для сенсоров предыдущего поколения (SeaWiFS, MODIS, MERIS), либо разрабатывают свои собственные региональные алгоритмы.

Анализ и валидация различных алгоритмов расчета концентрации взвешенного вещества и мутности воды в приустьевых зонах морей по оптическим спутниковым данным высокого пространственного разрешения с помощью квазисинхронных подспутниковых измерений in-situ

Задачи

1. Анализ существующих алгоритмов, разработанных для спутниковых сенсоров оптического диапазона, предоставляющих данные высокого пространственного разрешения.
2. Проведение тестовых расчетов по выбранным алгоритмам с различными входными параметрами.
3. Построение карт мутности и концентрации взвешенного вещества и хлорофилла-а на основе применения различных алгоритмов.
4. Сравнение результатов, полученных по спутниковым данным с результатами квазисинхронных подспутниковых измерений.
5. Выбор алгоритмов, наиболее подходящих для тестовых районов в зависимости от параметров речного выноса.
6. Разработка методических рекомендаций по применению различных алгоритмов для тестовых районов.



а



б



в

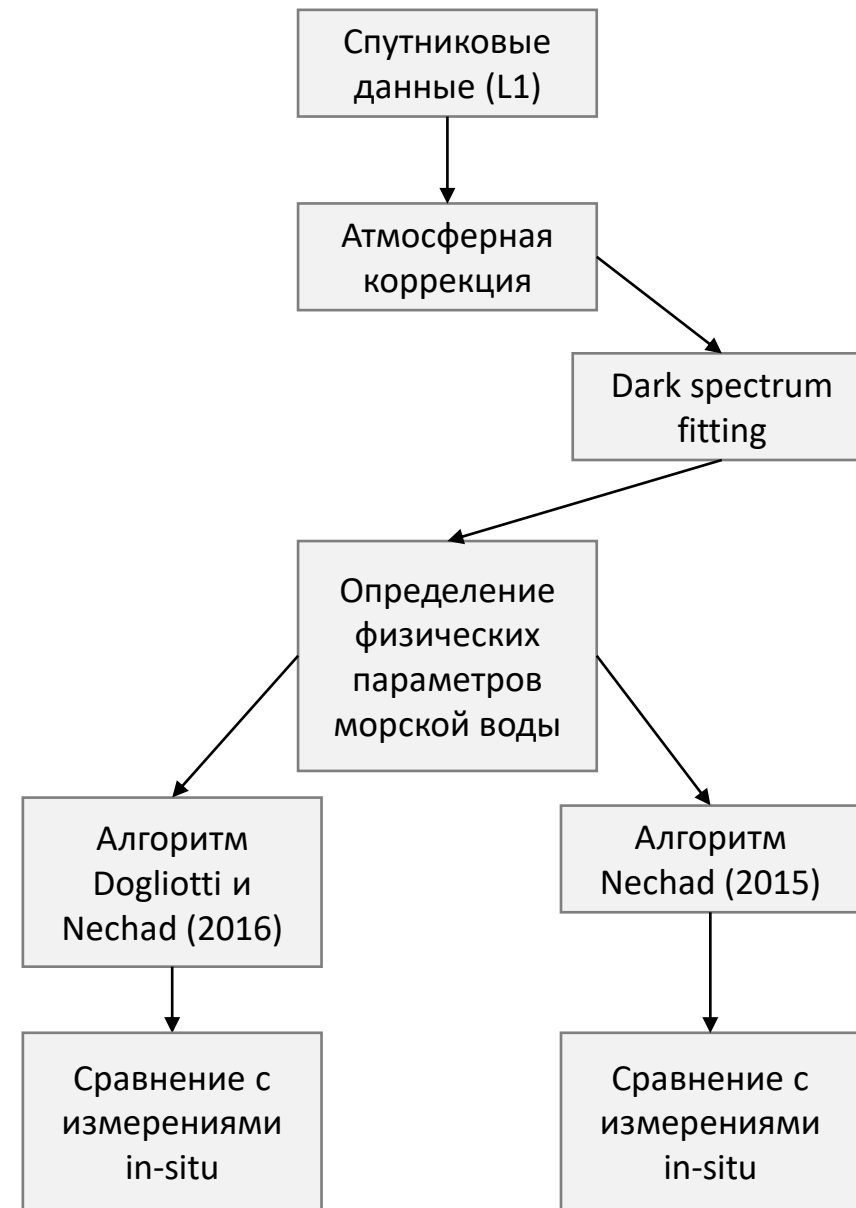
Район проведения подспутниковых измерений в приустьевой зоне:
а) реки Мзымта в апреле 2022 г;
б) реки Сулак в июне 2023 г;
в) реки Терек в июне 2023 г.

1. Алгоритм атмосферной коррекции
 1. Dark spectrum fitting (DSF)
 2. Алгоритмы расчета физических параметров морской воды
 1. Nechad (2016)
 2. Dogliotti (2015)
 3. Nechad (2015)
- } Расчет мутности воды
— Расчет концентрации взвешенного вещества

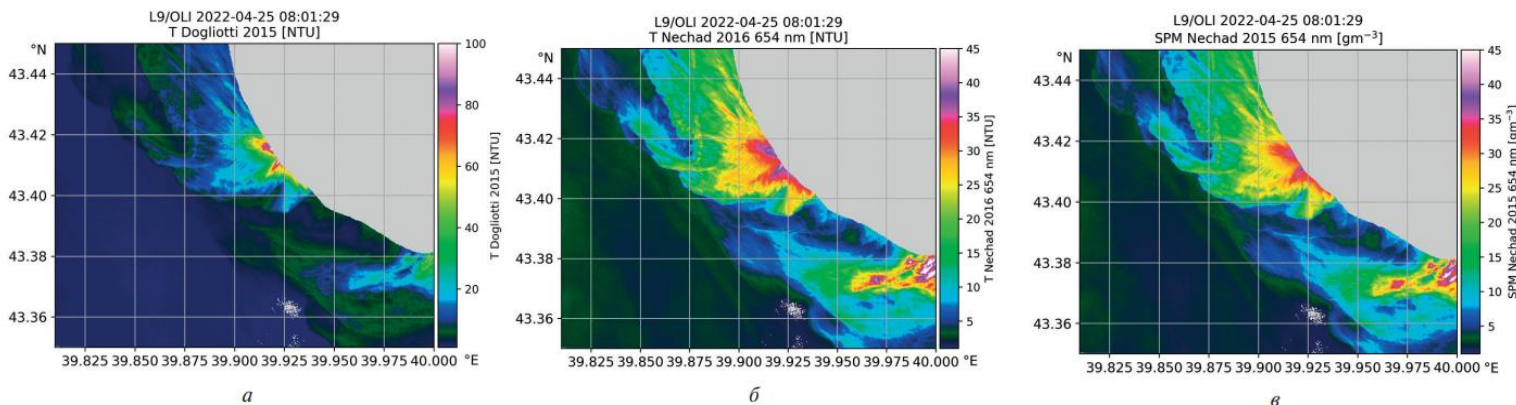
Данные

В работе были использованы спутниковые данные следующих сенсоров: OLI/TIRS (англ. Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) спутника Landsat-8; OLI-2/TIRS-2 Landsat-9; MSI (англ. Multispectral Instrument) спутника Sentinel-2A/2B.

В упомянутых ранее районах исследования был получен ряд подспутниковых измерений, проводимых с маломерного судна, в 2022 и 2023 гг.



- Для плуа р. Мзымта наблюдается высокое соответствие значений концентрации взвешенного вещества с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,95$.
- Также алгоритм Nechad для расчёта мутности даёт хорошее соответствие с данными in-situ ($R^2 = 0,97$).
- Алгоритм Dogliotti сильно завышает значения мутности, имея $R^2 = 0,77$. При этом алгоритм даёт заниженные значения до порога в 50 NTU, после которого, наоборот, значения мутности превосходят измерения in-situ более чем на 10 NTU.



Результаты обработки спутникового изображения OLI-2 Landsat - 9 за 25.04.22 приустьевой зоны р. Мзымта: а) распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Dogliotti; б) распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Nechad; в) распределение концентрации взвешенного вещества, рассчитанной по алгоритму Nechad2015

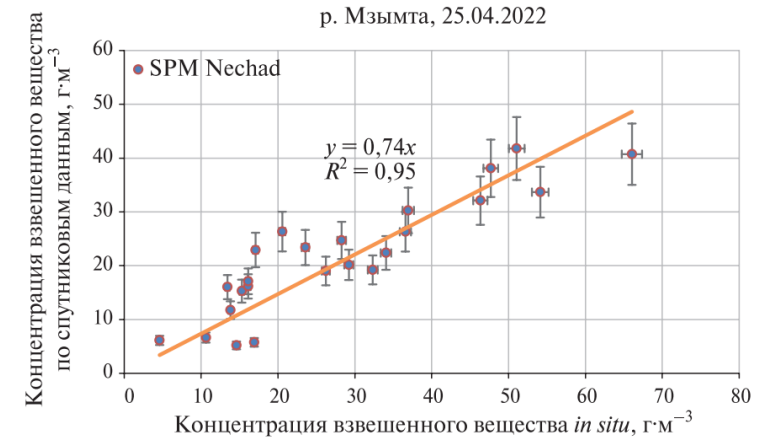


Диаграмма рассеяния значений SPM, полученных на основе алгоритма Nechad 2015 по данным OLI-2 Landsat - 9 за 25.04.22

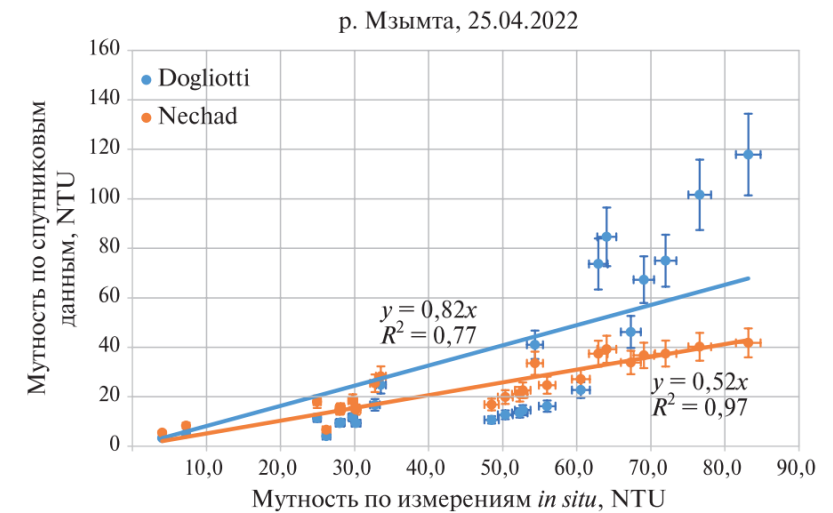


Диаграмма рассеяния значений мутности, полученных на основе алгоритма Nechad и Dogliotti по данным OLI-2 Landsat - 9 за 25.04.22

В устье р. Мзымта в 2023г. максимальное зарегистрированное значение мутности было в районе 65 NTU.

- Алгоритм Nechad имеет высокое соответствие с данными in-situ ($R^2 = 0,90$).
- Алгоритм Dogliotti, в свою очередь, имеет $R^2 = 0,82$.
- Можно отметить, что оба алгоритма дают заниженные значения по сравнению с измерениями in situ для станций вблизи границ плюма.

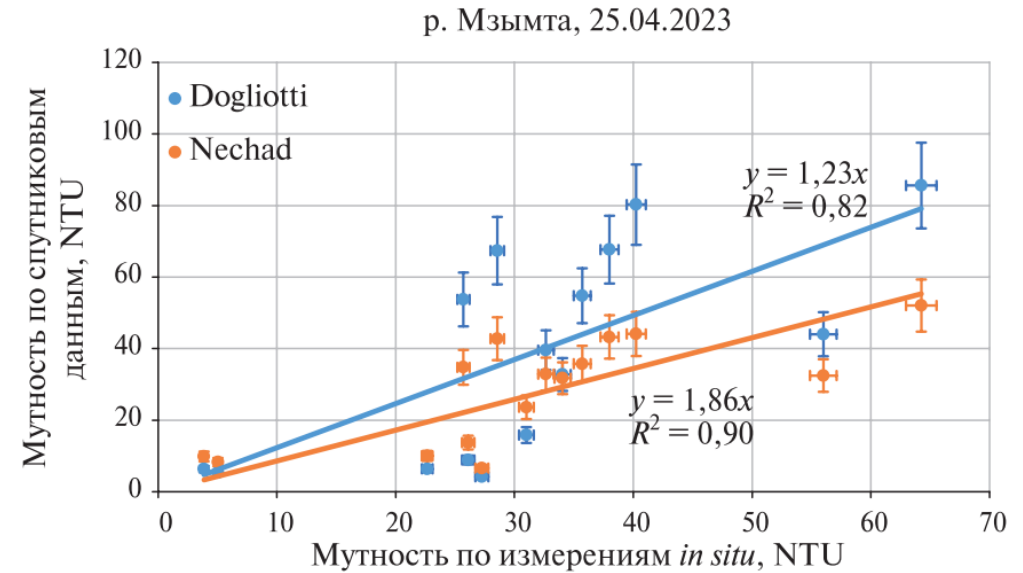
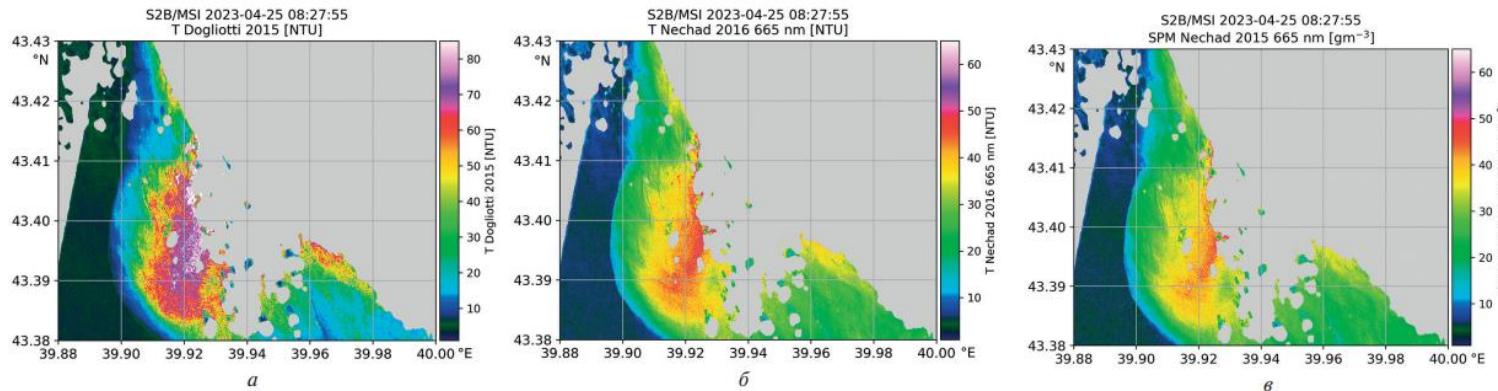
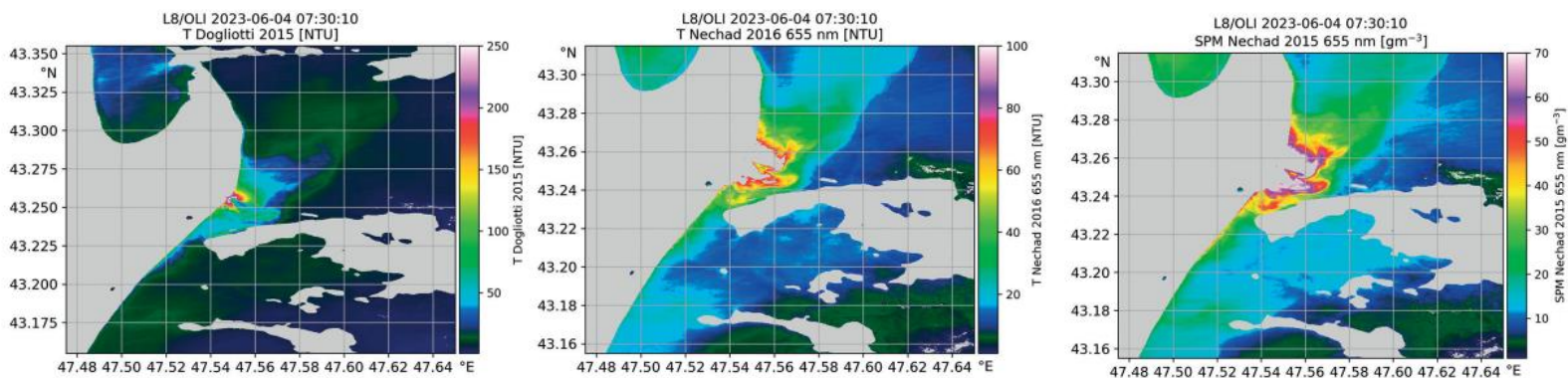


Диаграмма рассеяния значений мутности, полученных на основе алгоритма Nechad и Dogliotti по данным MSI Sentinel – 2В за 25.04.23

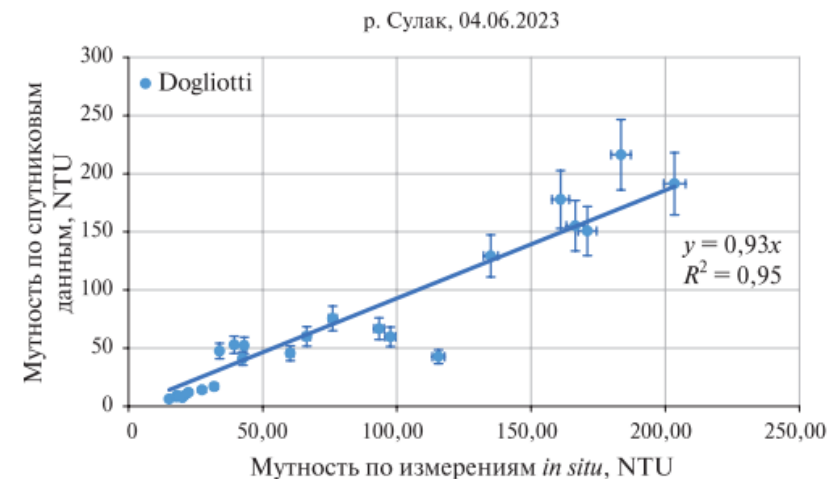


Результаты обработки спутникового изображения MSI Sentinel – 2В за 25.04.23 приустьевой зоны р. Мзымта: а) распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Dogliotti; б) распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Nechad; в) распределение концентрации взвешенного вещества, рассчитанной по алгоритму Nechad2015

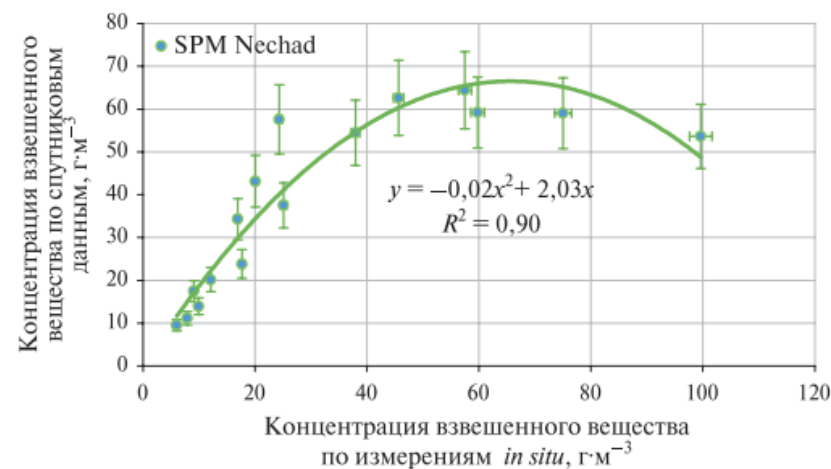
- Значения мутности in-situ плюма р. Сулак хорошо описываются алгоритмом Dogliotti линейной функцией с коэффициентом $R^2 = 0,95$.
- Для алгоритма SPM Nechad2015 для определения концентрации взвешенного вещества было выявлено, что значения, не превышающие $40-60 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$, имеют практически линейную зависимость.



Результаты обработки спутникового изображения OLI Landsat - 8 за 04.06.23 приустьевой зоны р. Сулак: а) распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Dogliotti; б) распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Nechad; в) распределение концентрации взвешенного вещества, рассчитанной по алгоритму Nechad2015



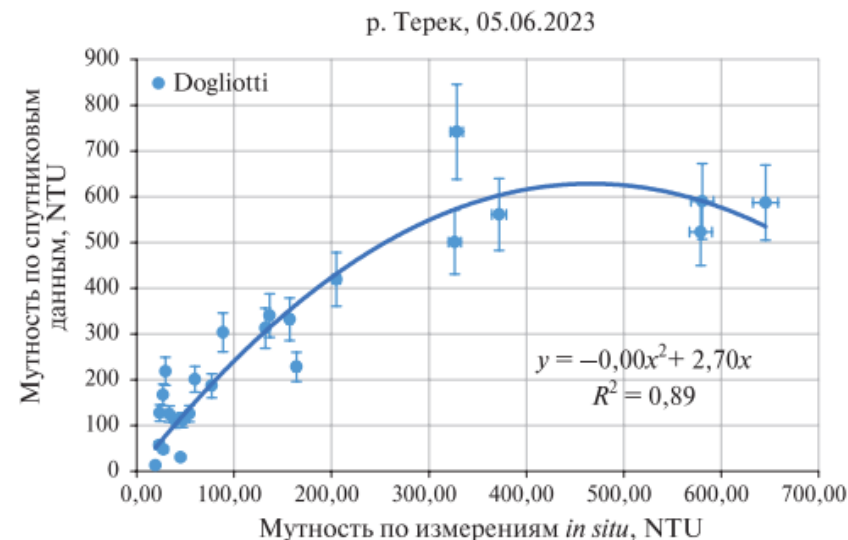
а



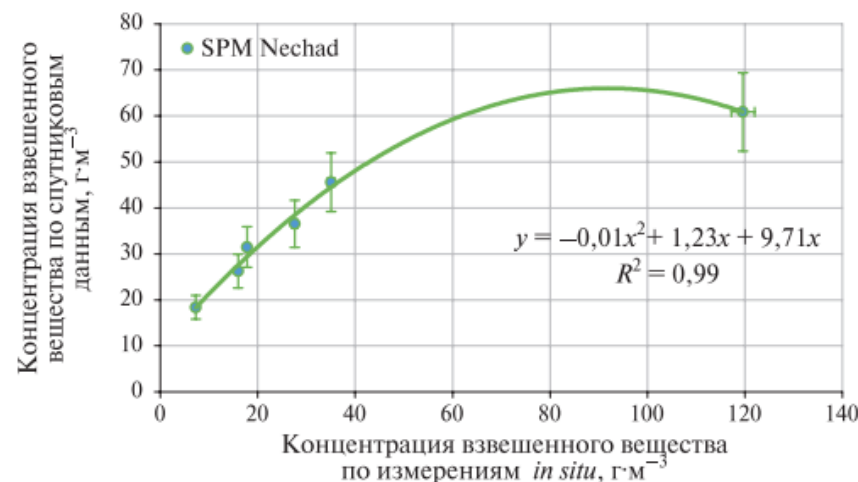
б

Диаграмма рассеяния значений, полученных на основе алгоритма Nechad и Dogliotti с атмосферной коррекцией DSF по данным OLI Landsat – 8 за 04.06.2023: а) мутность воды; б) концентрация взвешенного вещества

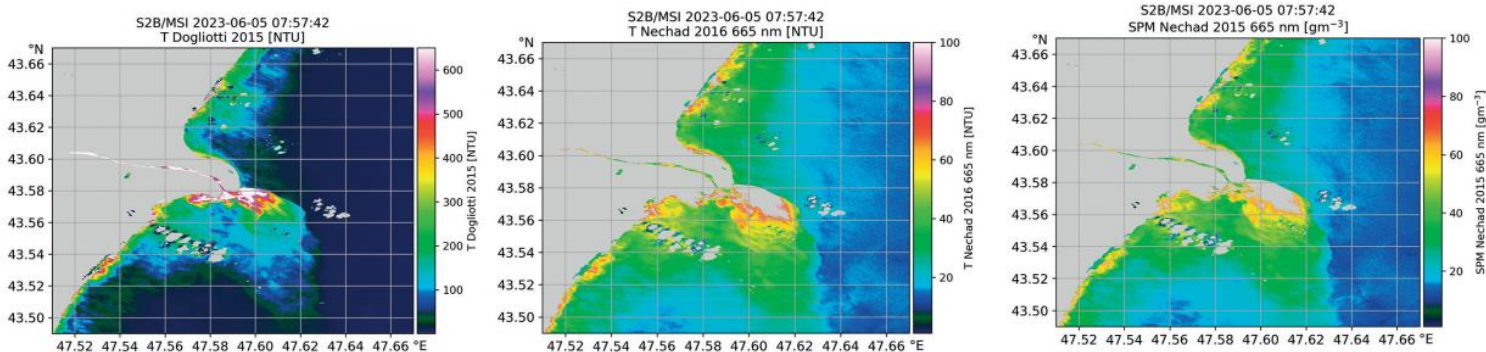
- Для р. Терек диаграмма рассеяния мутности по алгоритму Dogliotti описывается полиномиальной функцией со степенью 2. До значений мутности, не превосходящих 300 NTU, наблюдается практически линейная зависимость с измерениями in-situ. Алгоритм даёт практически в два раза завышенные по сравнению с натурными измерениями значения.
- Для станций вблизи устья ввиду высоких показателей мутности и концентрации взвешенного вещества данный алгоритм алгоритма SPM Nechad2015 не был применён. Для оставшихся станций отмечается практически линейная зависимость до значений 40–60 $г \cdot м^{-3}$.



а



б



Результаты обработки спутникового изображения MSI Sentinel – 2В за 05.06.23 приустьевой зоны р. Терек: а) распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Dogliotti; б) распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Nechad; в) распределение концентрации взвешенного вещества, рассчитанной по алгоритму Nechad2015

Диаграмма рассеяния значений, полученных на основе алгоритмов Nechad и Dogliotti по данным MSI Sentinel – 2В за 05.06.23: а) мутность; б) концентрация взвешенного вещества. 8

1. К спутниковым изображениям Landsat-8, -9 и Sentinel-2A/2B, полученным над исследуемыми районами Чёрного и Каспийского морей за 2022 и 2023 гг., была применена атмосферная коррекция DSF, учитывающая влияние солнечных бликов. В качестве основных алгоритмов для расчёта мутности и концентрации взвешенного вещества были использованы алгоритмы Nechad и Dogliotti.
2. Сравнение полученных результатов с подспутниковыми измерениями показали, что:
 1. В результате анализа полученных данных для выносов рек Терек и Сулак было установлено, что алгоритм Dogliotti для определения значений мутности морской воды имеет наибольшую корреляцию с квазисинхронными подспутниковыми измерениями. Алгоритм Dogliotti подходит для расчёта мутности морской воды в применении к прибрежным водам исследуемых районов Каспийского моря в диапазоне значений мутности, не превышающих 300 NTU.
 2. Для тестовых полигонов Чёрного моря было получено, что алгоритм Nechad имеет лучшее соответствие с данными in-situ для измерений в 2022 и 2023 гг. Можно отметить, что алгоритм Dogliotti для данных 2022 г. занижает значения мутности до порога в 50 NTU, после которого, наоборот, значения мутности превосходят натурные измерения более чем на 10 NTU.
 3. Алгоритм SPM Nechad2015 вполне применим к тем областям пюма, где наблюдается относительно невысокая мутность и малое количество взвешенного вещества ($R^2 = 0,95$, $R^2 = 0,9$, $R^2 = 0,99$ для рек Мзымта, Сулак и Терек соответственно).
3. Полученные результаты могут служить методической рекомендацией к использованию рассматриваемых в настоящей работе алгоритмов в прибрежных районах Чёрного и Каспийского морей.

1. Лаврова О.Ю. , Назирова К.Р. , Алферьева Я.О. , Жаданова П.Д. , Строчков А.Я. Сопоставление параметров плюмов рек Сулак и Терек на основе спутниковых данных и измерений in situ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. №5. С. 264–283. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283
2. Жаданова П.Д., Назирова К.Р. Анализ и верификация алгоритмов определения мутности и концентрации взвешенного вещества, имплементированных в программный комплекс ASCOLITE // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 50–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-50-68