

Результаты многолетних исследований полей мутности и концентрации взвешенного вещества в приустьевой зоне р. Мзымты на основе натуральных измерений и спутниковых данных

К. Р. Назирова, П. Д. Жаданова, Н. А. Князев

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: knazirova@cosmos.ru*

Представлены результаты многолетних исследований, посвящённых разработке методики восстановления полей мутности и концентрации взвешенного вещества на основе спутниковых оптических данных высокого пространственного разрешения в приустьевой зоне р. Мзымты в период с 2018 по 2024 г. Для верификации и комплексного анализа контактных и дистанционных методов исследования за указанный период было проведено шесть серий измерений *in situ* в условиях весенне-летнего паводка: со второй половины апреля по начало мая. Натурные подспутниковые квазисинхронные измерения включали в себя: STD-зондирование (*англ.* Conductivity, Temperature and Depth, проводимость, температура и глубина) прибором RBR-concerto канадской фирмы RBR Ltd, приповерхностные измерения мутности морской воды портативным турбидиметром TN400 фирмы Apera Instruments и отбор морских проб воды. В работе использовались спутниковые данные оптических сенсоров MSI (*англ.* MultiSpectral Instrument) Sentinel-2A/2B, OLI/TIRS (*англ.* Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) Landsat-8 и OLI-2/TIRS-2 Landsat-9. Анализ спутниковых изображений проводился с помощью программного комплекса ACOLITE и имплементированных в него алгоритмов, разработанных Б. Нечад (*англ.* B. Nechad) и А. И. Дольотти (*итал.* A. I. Dogliotti) с коллегами. Рассмотрены вопросы применимости стандартных алгоритмов для исследуемого района в широком спектре значений мутности и концентрации взвешенного вещества.

Ключевые слова: мутность воды, концентрация взвешенного вещества, натурные измерения, ACOLITE, MSI Sentinel-2A/2B, OLI/TIRS Landsat-8/9, Чёрное море, Мзымта

Одобрена к печати: 22.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-321-332

Введение

При проведении исследований физико-химических параметров морской среды прибрежных районов, подверженных влиянию речного стока, основное затруднение вызывает количественная оценка концентрации взвешенного вещества. С совершенствованием приборов дистанционного зондирования этот метод измерений всё чаще используется как основной инструмент исследований, вытесняя дорогостоящие прямые натурные измерения и позволяя проводить многолетний мониторинг различных научных полигонов. Поэтому вопросы верификации спутниковых данных, алгоритмов расчёта различных физических параметров морской среды и адекватной интерпретации спутниковых продуктов являются в наши дни наиболее актуальными. Особенно если речь идёт о восстановлении полей мутности и концентрации взвешенного вещества в пределах мелкомасштабных динамических структур, таких как речные плюмы.

Река Мзымта — самая крупная и полноводная река российского сектора черноморского побережья, оказывающая существенное влияние на гидрологический режим шельфовой зоны северо-восточной части Чёрного моря. Известно о вкладе её материального стока в водный баланс Чёрного моря, а уникальные географические особенности расположения р. Мзымты по соседству с одним из главных рекреационных регионов страны подчёркивают важность мониторинга исследуемого района.

Стоит отметить высокую степень изученности динамических и морфометрических особенностей плюма р. Мзымты на основе натуральных измерений и математического моделирования, хорошо описанных в работах (Завьялов и др., 2014; Осадчиев, 2021).

В предыдущих работах авторов (Жаданова, Назирова, 2023; Жаданова, Лаврова, 2024; Назирова и др., 2019; Nazirova et al., 2021) подробно рассмотрены особенности восстановления мутности морской воды и концентрации взвешенного вещества контактными и дистанционными методами, установлены зависимости между оптическими и гравиметрическими единицами измерения для исследуемого района, представлен подробный обзор используемых алгоритмов программного комплекса ACOLITE и дана оценка влияния выбора спутниковых данных на результаты определения мутности в приустьевых зонах рек.

В настоящей работе анализируются и обобщаются результаты многолетних (2018–2024) подспутниковых исследований особенностей восстановления количественных данных о концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды на основе современных стандартных спутниковых алгоритмов на примере плюма р. Мзымты.

Данные и методы

В рамках разработки методики восстановления полей мутности и концентрации взвешенного вещества по спутниковым данным в приустьевой зоне р. Мзымты в период с 2018 по 2024 г. сотрудниками Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) была выполнена серия подспутниковых натуральных измерений синхронно с измерениями спутниковых сенсоров над районом исследования. Всего за указанный период было проведено шесть серий измерений *in situ* в условиях весенне-летнего паводка: со второй половины апреля по начало мая. Основная информация о периодах измерений и количестве полученных данных представлена в табл. 1.

Таблица 1. Информация о спутниковых и натуральных данных, полученных в приустьевой зоне р. Мзымты за 2018–2024 гг.

| Номер измерения | Год | Период | Кол-во выходов в море | Дни <i>in situ</i> измерений | Кол-во CTD-станций | Общее количество спутниковых сцен за период измерений | Кол-во безоблачных сцен |
|-----------------|------|-------------|-----------------------|---|--------------------|---|-------------------------|
| 1 | 2018 | 21.04–28.04 | 5 | 21.04, 24.04, 25.04, 26.04, 28.04 | 70 | 8 | 4 |
| 2 | 2019 | 23.04–04.05 | 9 | 23.04, 24.04, 25.04, 26.04, 28.04, 01.05, 02.05, 03.05, 04.05 | 138 | 6 | 3 |
| 3 | 2021 | 22.04–02.05 | 4 | 22.04, 29.04, 30.04, 02.05 | 91 | 6 | 2 |
| 4 | 2022 | 25.04–03.05 | 5 | 25.04, 26.04, 27.04, 30.04, 03.05 | 106 | 6 | 1 |
| 5 | 2023 | 17.04–05.05 | 6 | 17.04, 25.04, 27.04, 03.05, 04.05, 05.05 | 106 | 10 | 2 |
| 6 | 2024 | 22.04–01.05 | 5 | 24.04, 26.04, 29.04, 30.04, 01.05 | 132 | 7 | 0 |

Единая методика проведения исследований с использованием высокоточных океанологических приборов и применением современных спутниковых алгоритмов к оптическим данным высокого пространственного разрешения позволила провести обобщённый анализ достоверных данных, полученных за весь период исследований.

Натурные подспутниковые измерения, выполнявшиеся с борта маломерного судна, включали в себя измерения на гидрологических станциях при помощи следующих приборов: гидрологического CTD-зонда (*англ.* Conductivity, Temperature and Depth, проводимость,

температура и глубина) RBR-concerto канадской фирмы Richard Brancker Reaserch Ltd, дополнительно оснащённого измерителями мутности (датчиком обратного рассеивания света) Seapoint Turbidity и флюоресценции Turner Design Cyclops-7 для определения концентрации хлорофилла *a* с частотой опроса датчиков до 6 Гц, и портативного турбидиметра TN400 фирмы Apera Instruments для измерения мутности проб воды, отобранных в приповерхностном слое одновременно с CTD-зондированием.

По пробам морской воды также проводилась оценка концентрации взвешенного вещества классическим весовым методом. Результаты этой оценки использовались для верификации количественных спутниковых данных и данных оптических датчиков мутности, использующих нефелометрические единицы измерения.

В работе использовались спутниковые данные оптических сенсоров MSI (англ. Multi-Spectral Instrument) Sentinel-2A/2B, доступные на платформе Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>), а также OLI/TIRS (англ. Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) Landsat-8 и OLI-2/TIRS-2 Landsat-9 уровня обработки Collection 2 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

По спутниковым данным строились следующие продукты: цветосинтезированное изображение в естественных цветах, температура поверхности моря, полное содержание взвешенного вещества, концентрация взвешенного вещества SPM (англ. Suspended Particulate Matter), мутность.

Для всех лет исследования, кроме 2018 г., спутниковые изображения обрабатывались с помощью программного комплекса ACOLITE. Эта программная среда является универсальной для обработки и анализа данных, полученных различными спутниковыми датчиками. Она включает алгоритмы, специально разработанные для морских, прибрежных и внутренних вод, и поддерживает обработку данных со спутников Landsat-5/7/8/9 и Sentinel-2A/2B, а также Pléiades и PlanetScope. Алгоритмы ACOLITE, используемые в данной работе, условно назовём Nechad и Dogliotti по фамилиям их главных создателей (Dogliotti et al., 2015; Nechad et al., 2009, 2015).

Атмосферная коррекция (Vanhellemont, 2020) была реализована с использованием методов DSF (англ. Dark-Spectrum Fitting) и EXP (англ. EXPonential Extrapolation). Для исследуемого региона выбрано пороговое значение отражательной способности (~1600 нм) $\rho_{TOA} \leq 0,05$ (англ. Top Of Atmosphere reflectance). Это обусловлено слишком низким пороговым значением, заданным по умолчанию, в условиях преимущественно небольших величинах мутности и концентрации взвешенного вещества в данном районе.

Оперативный спутниковый мониторинг района исследования проводился с помощью инструментария информационной системы Sea the Sea (STS) — составной части Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

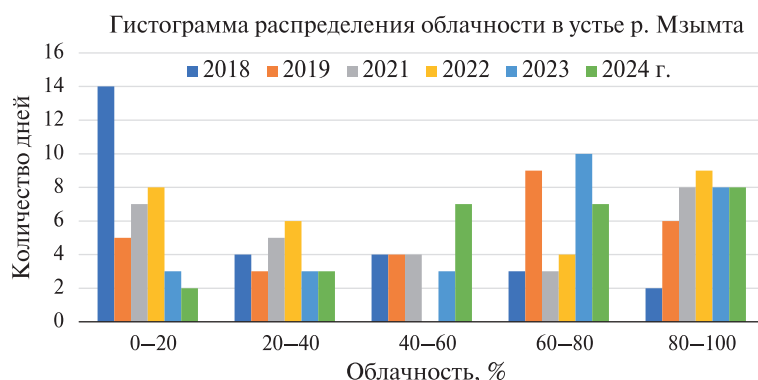


Рис. 1. Гистограмма распределения облачности по количеству дней за период с 11 апреля по 7 мая (27 дней)

Для получения метеорологической информации в работе использованы архивные данные реанализа NCEP/NCAR (англ. National Centers for Environmental Prediction/National Center for

Atmospheric Research) из интегрированной в систему STS базы метеорологических данных (Уваров и др., 2013). Для исследования характера распространения речного выноса были оценены такие параметры, как степень облачности над устьевым районом р. Мзымты, а также количество выпавших осадков и ветровая изменчивость в регионе. Основным периодом исследования метеоданных выбран интервал с 11 апреля по 7 мая 2018–2019 и 2021–2024 гг. (рис. 1, см. с. 323).

Из табл. 2 и 3 видно, что в 2022 г. зафиксировано максимальное суммарное количество осадков — 26,9 кг/м². Эту информацию подтверждают данные определения уровня воды, полученные по результатам измерений в районе гидропоста Казачий Брод (<https://ugovenvody.ru/gov/kazachij-brod.php>). За рассматриваемый период максимальный уровень воды наблюдался 20 апреля 2022 г. и составил 225 см (рис. 2, см. с. 324).

Таблица 2. Количество выпавших осадков с 11 апреля по 7 мая (27 дней) в устье р. Мзымты

| Год | Кол-во дней с осадками | Суммарное кол-во осадков, кг/м ² |
|------|------------------------|---|
| 2018 | 9 | 4,6 |
| 2019 | 11 | 13,0 |
| 2021 | 12 | 4,1 |
| 2022 | 12 | 26,9 |
| 2023 | 15 | 19,1 |
| 2024 | 10 | 3,7 |

Таблица 3. Скорость и направление ветра с 11 апреля по 7 мая (27 дней) в устье р. Мзымты

| Год | Преобладающее направление ветра | Средняя скорость ветра (м/с) |
|------|---------------------------------|------------------------------|
| 2018 | ЮЮВ | 2,24 |
| 2019 | ЮВВ | 3,30 |
| 2021 | ЮЮВ | 2,58 |
| 2022 | ЮВ | 2,98 |
| 2023 | З/ЮВВ | 3,01 |
| 2024 | ЮВ | 2,43 |

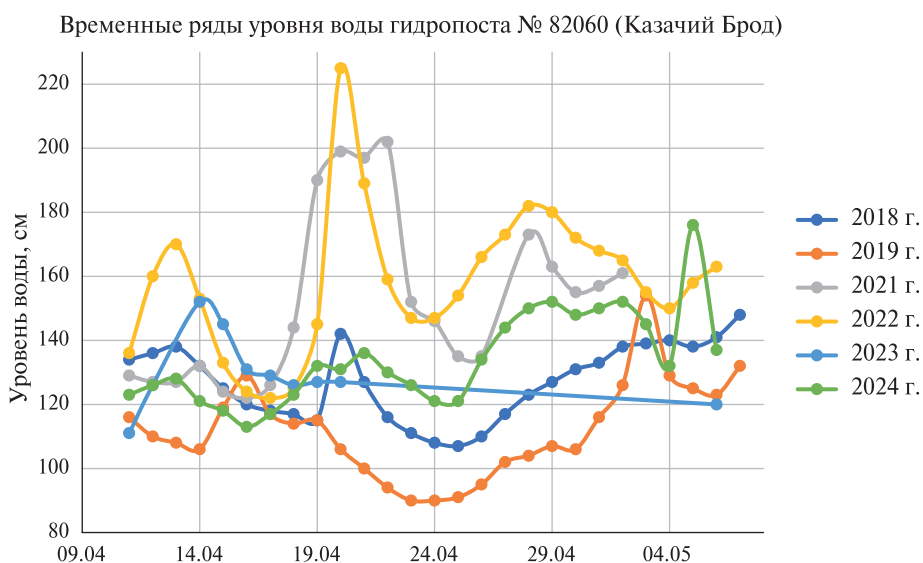


Рис. 2. График распределения уровня воды, построенный по результатам измерений с гидропоста Казачий Брод

Результаты

Рассмотрим сначала отдельно результаты каждого года подспутниковых измерений, затем подведём общие итоги за весь период работ.

В 2018 г. использовался отличный от последующих лет набор океанологического оборудования, а для получения карты полного содержания взвешенного вещества применялся алгоритм C2RCC (англ. Case 2 Regional Coast Colour) платформы SNAP (англ. Sentinel Application Platform). В последующие годы использовались иные алгоритмы расчёта параметров взвешенного вещества, поэтому сравнивать их результаты с результатами 2018 г. некорректно. Исследования 2018 г. подробно описаны в статье (Назирова и др., 2019).

В 2019 г. за время проведения экспедиционных работ в конце апреля – начале мая резко повышались значения уровня и мутности в реке, что было вызвано резким ростом температуры и осадками (рис. 3). Значения мутности к 4 мая достигли 288 NTU (англ. Nephelometric Turbidity Unit, нефелометрическая единица мутности).

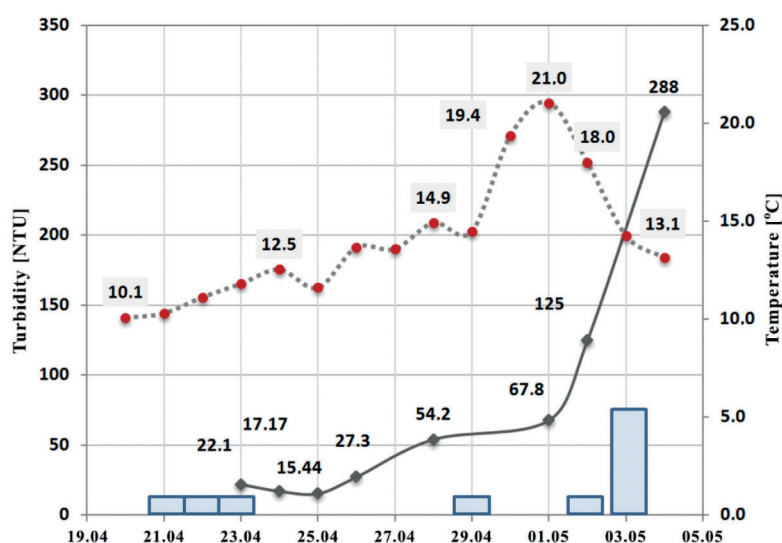


Рис. 3. Изменение максимальных значений мутности морской воды (чёрная линия), среднесуточной температуры воздуха (пунктирная линия) и количество выпавших осадков (синие столбцы) во время экспедиционных измерений 2019 г.

Из трёх оптических изображений, полученных в безоблачную погоду, наиболее информативным было изображение MSI Sentinel-2B, датированное 26 апреля 2019 г., когда мутность воды и, соответственно, концентрация взвешенного вещества по данным *in situ* были небольшими: мутность не превышала 30 NTU, а концентрация — 25 г/м³.

Для этого дня по данным MSI Sentinel-2B была определена мутность воды с использованием алгоритмов Dogliotti и Nechad и SPM. Концентрация взвешенного вещества определялась только по соответствующему алгоритму Nechad, алгоритм Dogliotti для этого не предназначен. Цветосинтезированное изображение в псевдоестественных цветах MSI Sentinel-2B и результаты сравнения мутности и концентрации взвешенного вещества по спутниковым данным и измерениям *in situ* представлены на рис. 4 (см. с. 326).

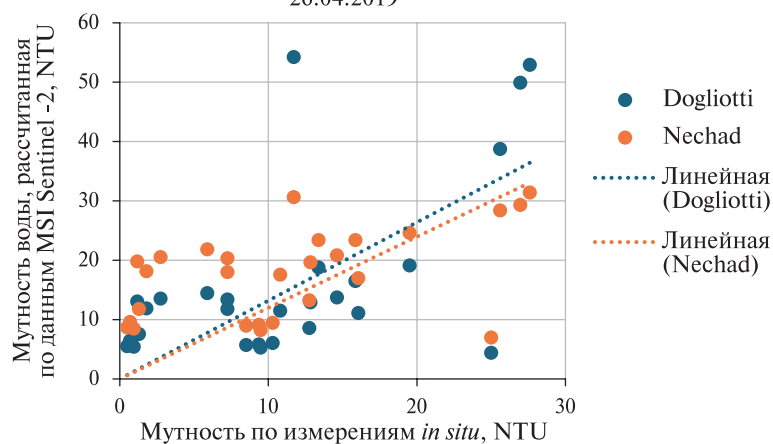
Как показал анализ полученных результатов, линейные тренды для двух алгоритмов (см. рис. 4б) практически идентичны, мутность по спутниковым данным несколько превышает мутность, измеренную *in situ*. Концентрация взвешенного вещества по спутниковым данным также превышает значения *in situ*.

В 2021 г. экспедиционные работы проводились в период, когда уровень воды в р. Мзымте, а, соответственно, и расход, были высокими (см. рис. 2). Мутность в течение всего периода натуральных измерений на ближайших к устью станциях превосходила 100 NTU.



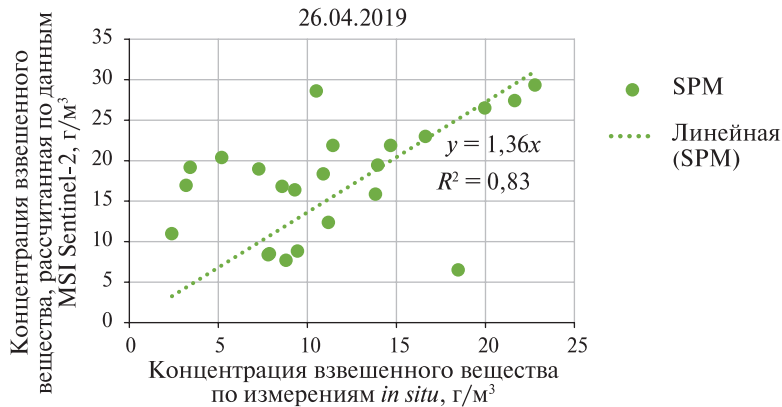
а

26.04.2019



б

26.04.2019



в

Рис. 4. Цветосинтезированное изображение в псевдоестественных цветах MSI Sentinel-2B от 26 апреля 2019 г. с нанесёнными станциями подспутниковых измерений (а); диаграммы рассеяния мутности (б) и концентрации взвешенного вещества (в) за 26 апреля 2019 г.

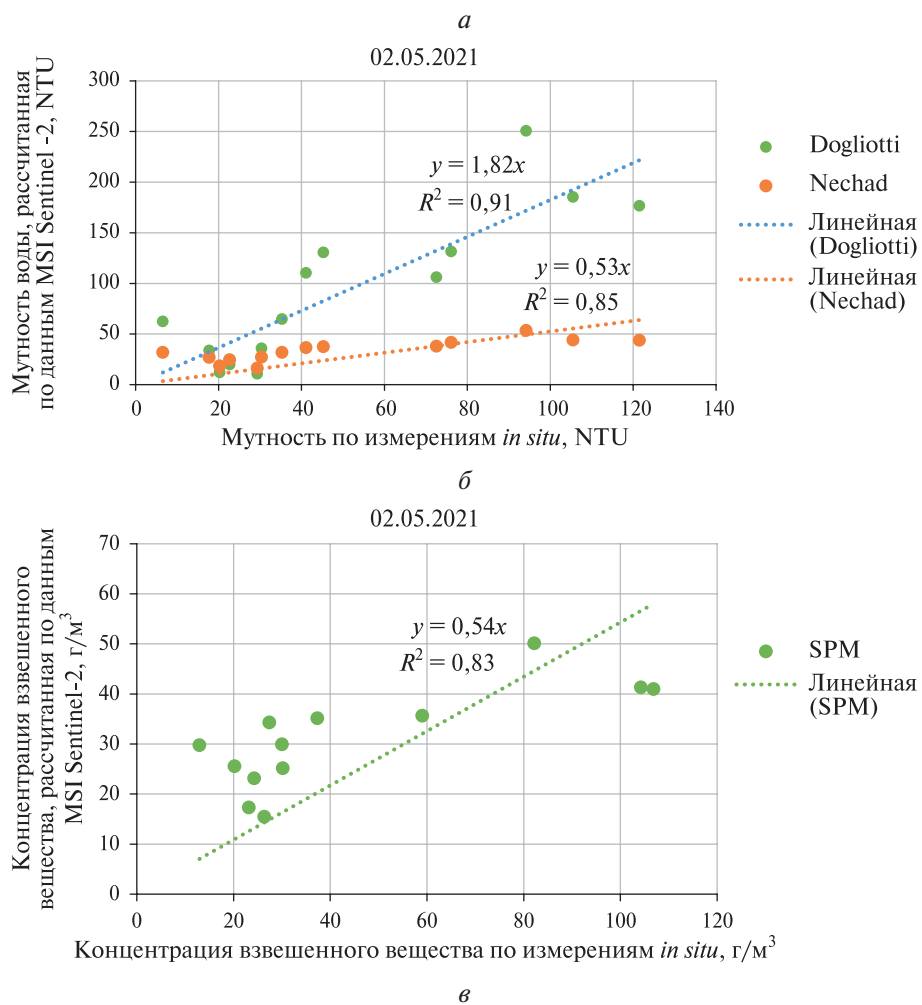


Рис. 5. Цветосинтезированное изображение в псевдоестественных цветах MSI Sentinel-2B от 2 мая 2021 г. с нанесёнными станциями подспутниковых измерений (а); диаграммы рассеяния мутности (б) и концентрации взвешенного вещества (в) за 2 мая 2021 г.

Большой разброс значений на разных участках выноса позволил протестировать разные алгоритмы определения мутности и SPM по спутниковым данным в широком диапазоне величин и определить наиболее подходящий для данного района и конкретных гидрологических условий. На *рис. 5* (см. с. 327) представлены цветосинтезированное изображение MSI Sentinel-2B и результаты сравнения мутности и концентрации взвешенного вещества по спутниковым данным и измерениям.

Анализ полученных результатов поля мутности (см. *рис. 5б*) показал, что, несмотря на линейную зависимость на диаграмме рассеяния и высокое значение коэффициента детерминации, алгоритм Nechad не пригоден для использования. Получаемые на его основе значения мутности в два раза меньше измеренных *in situ*. Алгоритм Dogliotti, наоборот, завышает мутность по сравнению с измеренной. В диапазоне до 50 NTU алгоритм Nechad демонстрирует высокую корреляцию с данными *in situ*. Поскольку расчёт SPM осуществлялся с помощью алгоритма Nechad, высокая корреляция между измеренными и вычисленными значениями наблюдалась только для диапазона до 50 NTU.

Возникает вопрос: как определить SPM для больших значений мутности по спутниковым данным, используя алгоритмы, входящие в ACOLITE? Можно воспользоваться следующим подходом. Если считать, что зависимость концентрации взвешенного вещества от мутности, измеренной *in situ*, должна сохраняться и для результатов, полученных по спутниковым данным, то эту зависимость можно применить для вычисления SPM, опираясь и на значения мутности, определённые при использовании алгоритма Dogliotti. Так, например, для измерений 2 мая 2021 г. наблюдается линейная зависимость концентрации взвешенного вещества от мутности Turb (*англ.* Turbidity) с коэффициентом детерминации 0,98 (*рис. 6*). Эту линейную зависимость $SPM = 0,90Turb$ можно в принципе использовать и для спутниковых данных.

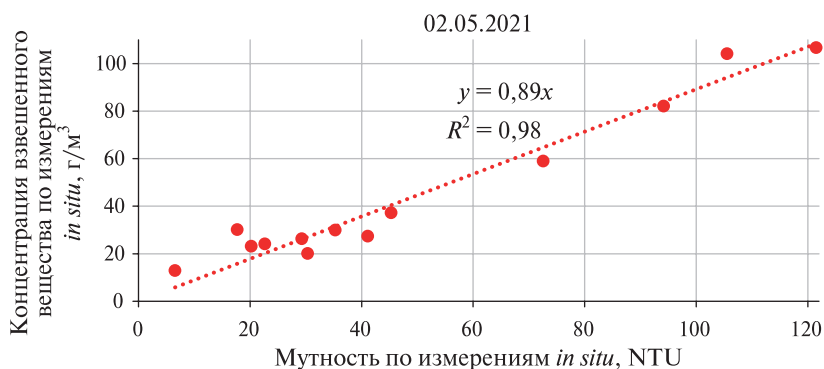


Рис. 6. Зависимость концентрации взвешенного вещества от мутности по данным измерений *in situ* 2 мая 2021 г.

В период проведения натуральных измерений в 2022–2024 гг. ситуация была схожа с той, которую мы рассмотрели выше. В 2022 г. мутность воды на станциях, ближайших к устью, в отдельные дни доходила до 100 NTU и алгоритм Dogliotti давал более реалистичные значения, чем Nechad. В 2023 и 2024 г. мутность не превышала 50 NTU.

Был проведён анализ результатов использования алгоритмов Nechad и Dogliotti для всех подспутниковых измерений в 2019–2024 гг. Следует отметить, что вследствие более высокой частоты пролёта спутников Sentinel-2A/2B по сравнению с пролётами Landsat-8/9 для анализа выбирались данные MSI Sentinel-2A/2B, к тому же, как отмечалось в статье (Жаданова, Лаврова, 2024), при применении одних и тех же алгоритмов данные Landsat и Sentinel дают разные результаты. Поэтому для того чтобы выбор спутникового аппарата не влиял на итог сравнения результатов за разные годы, выбирались данные Sentinel-2A/2B.

Учитывая, что в период наших подспутниковых измерений — середина апреля — начало мая — мутность в приустьевой зоне р. Мзымты в среднем составляла не более 40 NTU, кроме отдельных дней в 2021 и 2022 г., сравнение результатов использования разных алгоритмов проводилось для станций, где значения мутности не превышают этот порог.

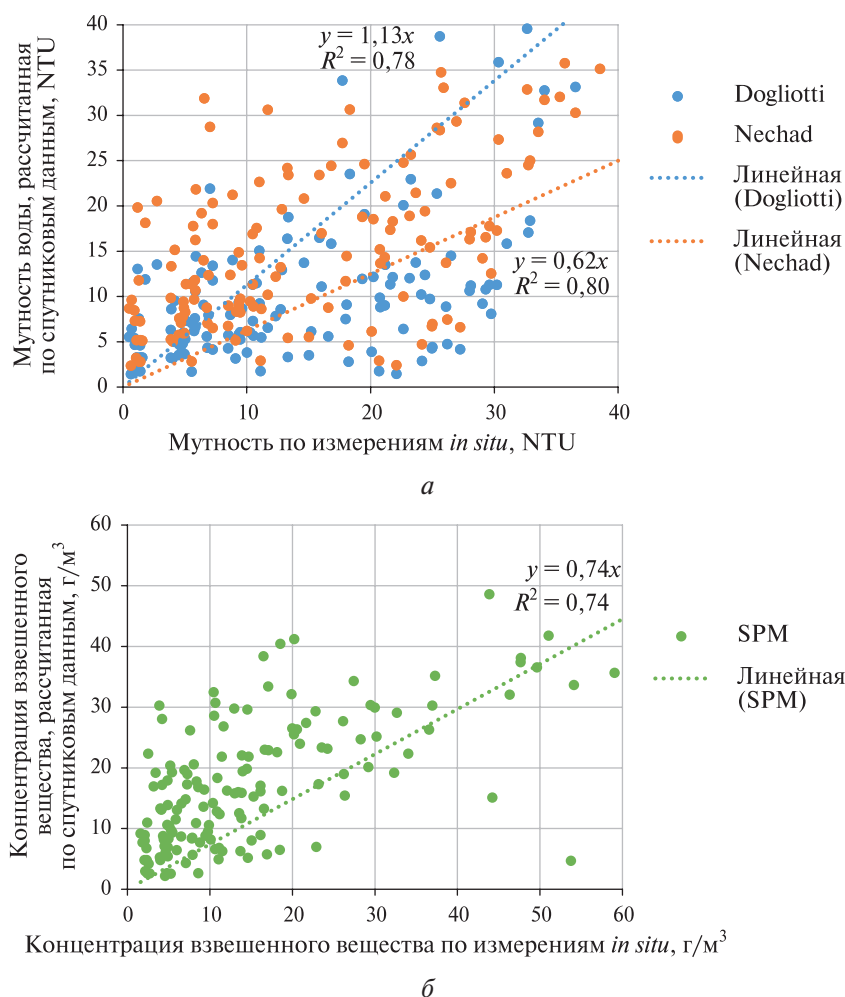


Рис. 7. Диаграммы рассеяния в приустьевой зоне р. Мзымты за 2019–2024 гг.: а — мутности воды, полученной на основе алгоритмов Dogliotti и Nechad; б — концентрации взвешенного вещества по алгоритму Nechad

На рис. 7 представлены диаграммы рассеяния мутности и концентрации взвешенного вещества, определённых *in situ* и в результате применения алгоритмов Dogliotti и Nechad. Оба алгоритма при определении мутности дают линейную зависимость с достаточно высоким коэффициентом детерминации, 0,78 и 0,80 соответственно (см. рис. 7а). Но разброс в обоих случаях существенный, особенно в областях с низкой мутностью. Он может достигать более 10 NTU для области с мутностью от 0 до 10 NTU. Однако такой существенный разброс соответствует заявленной точности алгоритмов, отмечаемой их создателями (Dogliotti et al., 2015; Nechad et al., 2015). Как можно видеть из графика, в диапазоне мутности от 0 до 40 NTU алгоритм Dogliotti даёт заниженные по сравнению с Nechad значения. Похожая картина наблюдается и при рассмотрении результатов расчёта SPM (см. рис. 7б). В пределах до 20 г/м³ виден достаточно сильный разброс значений, но для всего диапазона концентрации взвешенного вещества наблюдается линейная зависимость с коэффициентом детерминации 0,74.

Проведено сравнение двух алгоритмов расчёта мутности Nechad и Dogliotti для всего периода наблюдений. Была выявлена логарифмическая зависимость. Как показано на рис. 8, взаимозависимость этих алгоритмов соответствует ранее наблюдаемым закономерностям их поведения. На рис. 8 видно, что в диапазоне мутности от 0 до 40 NTU наблюдается значительное занижение значений со стороны алгоритма Dogliotti с устойчивой линейной зависимостью. В области высоких значений мутности алгоритм Dogliotti демонстрирует постепенное завышение значений, что соответствует логарифмической функции с коэффициентом детерминации 0,96.

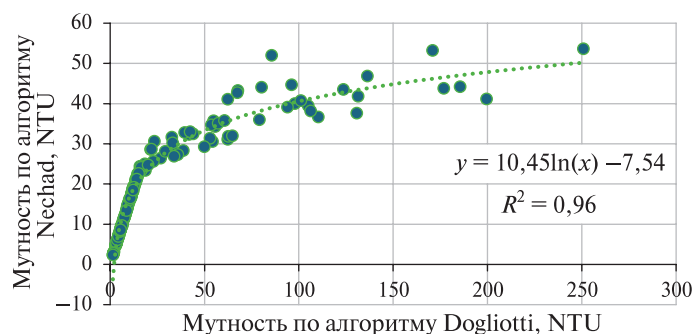


Рис. 8. Сравнение алгоритмов расчёта мутности воды Nechad и Dogliotti на основе данных за 2019–2024 гг.

Заключение

Выполнен анализ данных подспутниковых натуральных измерений в приустьевой зоне р. Мзытмы, которые проводились сотрудниками ИКИ РАН в апреле – мае 2018–2024 гг. Для каждого безоблачного дня были обработаны спутниковые изображения MSI Sentinel-2A/2B и OLI/TIRS Landsat-8/9. Для определения по спутниковым данным количественных характеристик мутности воды и концентрации взвешенного вещества (SPM) использовались алгоритмы Nechad и Dogliotti, входящие в программный комплекс ACOLITE. Для разных гидрологических условий исследована зависимость получаемых значений от используемого алгоритма. Количественные значения мутности и SPM, определённые по спутниковым данным, сравнивались с измерениями этих параметров *in situ*. Проанализированы результаты как для каждого дня натуральных измерений, так и для всего периода наблюдений.

При изучении данных по конкретным дням отмечена устойчивая линейная зависимость между результатами измерений *in situ* и расчётами по спутниковым данным как для мутности воды, так и для SPM. Получено, что результаты расчёта мутности по алгоритму Nechad демонстрируют высокую корреляцию с её измерениями *in situ* при мутности, не превышающей 40 NTU. Алгоритм Dogliotti занижает значения мутности примерно на 5–10 NTU, что может быть критично при низких значениях мутности. Однако в дни с интенсивным речным выносом, когда мутность по натурным измерениям превышала 150 NTU, алгоритм Dogliotti давал более точные результаты, чем алгоритм Nechad. Для мутности менее 10 NTU наблюдается сильный разброс получаемых значений, что согласуется с заявленной авторами алгоритмов точностью.

Для определения концентрации взвешенного вещества при больших значениях мутности, когда алгоритм Nechad не описывает реальную картину, предлагается аппроксимировать данные, используя полученную линейную зависимость между мутностью и концентрацией взвешенного вещества, измеренными *in situ*.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-27-00124, <https://rscf.ru/project/23-27-00124/>.

Литература

1. Жаданова П. Д., Лаврова О. Ю. Влияние выбора данных спутников Landsat-8/9 и Sentinel-2A/2B на результаты определения мутности воды в приустьевых зонах рек // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 244–265. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-244-265.
2. Жаданова П. Д., Назирова К. Р. Анализ и верификация алгоритмов определения мутности и концентрации взвешенного вещества, имплементированных в программный комплекс ACOLITE // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 50–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-50-68.

3. Завьялов П. О., Маккавеев П. Н., Коновалов Б. В. и др. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Чёрного моря // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308. DOI: 10.7868/S0030157414030150.
4. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. Назирова К. Р., Лаврова О. Ю., Краюшкин Е. В. и др. Особенности выявления параметров речного плюма контактными и дистанционными методами // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 2. С. 227–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
6. Осадчиев А. А. Речные плюмы М.: Науч. мир, 2021. 286 с.
7. Уваров И. А., Халикова О. А., Балашов И. В., Бурцев М. А., Лупян Е. А., Матвеев А. А., Платонов А. Е., Прошин А. А., Толпин В. А., Крашенинникова Ю. С. Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 2. С. 30–45.
8. Dogliotti A. I., Ruddick K. G., Nechad B. et al. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 156. P. 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>.
9. Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O. et al. Comparison of in situ and remote-sensing methods to determine turbidity and concentration of suspended matter in the estuary zone of the Mzymta River, Black Sea // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. No. 1. Article 143. 29 p. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.
10. Nechad B., Ruddick K. G., Neukermans G. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions*. 2009. V. 7473. P. 161–171. <https://doi.org/10.1117/12.830700>.
11. Nechad B., Ruddick K., Schroeder T. et al. Coastcolour round robin datasets: a database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters // *Earth System Science Data*. 2015. V. 7. No. 7 P. 319–348. <https://doi.org/10.5194/essd-7-319-2015>.
12. Vanhellemont Q. Sensitivity analysis of the dark spectrum fitting atmospheric correction for metre- and decametre-scale satellite imagery using autonomous hyperspectral radiometry // *Optics Express*. 2020. V. 28. P. 29948–29965. <https://doi.org/10.1364/OE.397456>.

Results of long-term investigations of turbidity and suspended solids concentration fields in the mouth zone of the Mzymta River based on *in situ* and satellite data

K. R. Nazirova, P. D. Zhadanova, N. A. Knyazev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: knazirova@cosmos.ru

The paper presents the results of a multi-year research devoted to the development of a methodology for the reconstruction of turbidity and suspended sediment concentration fields based on satellite optical data of high spatial resolution in the mouth zone of the Mzymta River in the period from 2018 to 2024. In order to verify and comprehensively analyze contact and remote sensing methods, 6 series of *in situ* measurements were conducted under spring-summer flood conditions during the specified time period: from mid-April to early May. *In situ* subsatellite quasi-synchronous measurements included: CTD measurements by the RBR-concerto instrument of the Canadian firm RBR Ltd, near-surface measurements of seawater turbidity by the TN400 portable turbidimeter of Apera Instruments and marine water sampling. Satellite data from MSI Sentinel-2A/2B, OLI/TIRS Landsat-8 and OLI-2/TIRS-2 Landsat-9 optical sensors were used. The satellite images were analyzed by applying the ACOLITE software package and implemented algorithms developed by B. Nechad and A. I. Dogliotti and colleagues. The applicability of the standard algorithms for the study area in a wide range of turbidity and suspended sediment concentrations was considered.

Keywords: water turbidity, suspended matter concentration, *in situ* measurements, ACOLITE, MSI Sentinel-2A/2B, OLI/TIRS Landsat-8/9, Black Sea, Mzymta

Accepted: 22.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-321-332

References

1. Zhadanova P. D., Lavrova O. Yu., Impact of Landsat-8/9 and Sentinel-2A/2B data selection on the results of water turbidity determination in coastal river zones, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 3, pp. 244–265 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-244-265.
2. Zhadanova P. D., Nazirova K. R., Analysis and verification of algorithms for turbidity and suspended solids concentration determination implanted in the ACOLITE program complex, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 50–68 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-50-68.
3. Zavialov P. O., Makkaveev P. N., Konovalov B. V. et al., Hydrophysical and hydrochemical characteristics of the sea areas adjacent to the estuaries of small rivers of the Russian coast of the Black Sea, *Oceanology*, 2014, Vol. 54, No. 3, pp. 265–280, DOI: 10.1134/S0001437014030151.
4. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V. et al., Features of river plume parameter determination by *in situ* and remote sensing methods, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 227–243 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
6. Osadchiev A. A., *Rechnye plyумы* (River plumes). Moscow: “Scientific World” Publ. House, 2021, 286 p. (in Russian).
7. Uvarov I. A., Khalikova O. A., Balashov I. V., Bourtsev M. A., Loupian E. A., Matveev A. A., Platonov A. E., Proshin A. A., Tolpin V. A., Krasheninnikova Yu. S., Meteorological data management in framework of the satellite monitoring information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 30–45 (in Russian).
8. Dogliotti A. I., Ruddick K. G., Nechad B. et al., A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 156, pp. 157–168, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>.
9. Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O. et al., Comparison of *in situ* and remote-sensing methods to determine turbidity and concentration of suspended matter in the estuary zone of the Mzymta river, Black Sea, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 1, Article 143, 29 p., <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.
10. Nechad B., Ruddick K. G., Neukermans G., Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions*, 2009, Vol. 7473, pp. 161–171, <https://doi.org/10.1117/12.830700>.
11. Nechad B., Ruddick K., Schroeder T. et al., Coastcolour round robin datasets: a database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters, *Earth System Science Data*, 2015, Vol. 7, No. 7, pp. 319–348, <https://doi.org/10.5194/essd-7-319-2015>.
12. Vanhellemont Q., Sensitivity analysis of the dark spectrum fitting atmospheric correction for metre- and decametre-scale satellite imagery using autonomous hyperspectral radiometry, *Optics Express*, 2020, Vol. 28, pp. 29948–29965, <https://doi.org/10.1364/OE.397456>.