

Сравнение результатов определения полей мутности и концентрации взвешенного вещества для рек Мзымта, Сулак и Терек по спутниковым данным и натурным измерениям

Н. А. Князев, П. Д. Жаданова

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: nkkniazev@cosmos.ru

В работе представлено сравнение результатов применения алгоритмов для определения полей мутности и концентрации взвешенного вещества (*англ.* SPM - Suspended particulate matter) на примере речных выносов по оптическим спутниковым изображениям серии Sentinel-2 (MSI), Landsat-8/9 (OLI-TIRS/OLI-2-TIRS-2). В качестве районов исследования были выбраны р. Мзымта Черноморского побережья, являющаяся давним объектом научного интереса, а также р. Сулак и Терек, впадающие в Каспийское море, на которых только начинают появляться значимые результаты. Для оценки параметров взвешенного вещества в приустьевых границах речных выносов были использованы алгоритмы Nechad и Dogliotti, реализуемые в программном комплексе ACOLITE. Полученные по алгоритмам значения мутности и SPM сравнивались с подспутниковыми измерениями в поверхностном слое. Полученные результаты сравнения спутниковых и натурных данных выявили высокие корреляционные зависимости при применении алгоритма Nechad на разных регионах при различных метеоусловиях. Однако данный инструмент ограничен возможностью исследований своим порогом насыщения в 70 NTU. Алгоритм Dogliotti хорошо зарекомендовал себя для р. Мзымты и Терек, но наилучшее соответствие было достигнуто при больших значениях мутности более 1000 NTU, что наблюдалось только для р. Терек.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, MSI Sentinel-2, OLI/OLI-2 Landsat-8/9, натурные измерения, мутность воды, концентрация взвешенного вещества (SPM), ACOLITE, Мзымта, Сулак, Терек

Введение

Исследование экологического состояния морских акваторий является одной из наиболее важных задач в области океанологии. Особое внимание уделяется прибрежным зонам, где наблюдается повышенный уровень загрязнения ввиду многочисленных источников естественного и антропогенного характера, что негативно сказывается на флоре и фауне окружающей среды, и приводит к снижению качества жизни человека. Именно поэтому так важно проводить постоянной мониторинг и контроль за районами, подверженными наибольшей экологической опасности. Среди возможных источников загрязнения прибрежных зон морских акваторий являются речные выносы, которые аккумулируют большое количество взвешенного вещества и переносят его потоком в открытое море. Для анализа распространения речных вод успешно используются данные дистанционного зондирования Земли. По спутниковым изображениям возможно с большой точностью оценить форму и площадь речного выноса, а также скорость и направление его распространения с течением времени. Работы по изучению речных выносов по

спутниковым данным ведутся уже много лет, примеры исследований отражены в работах (Dzwonkowski, Yan, 2005; Johnson et al., 2001; Lavrova et al., 2016; Osadchiev, Sedakov, 2019). Благодаря получаемым оптическим спутниковым изображениям возможно построить цветосинтезированное изображение в различных каналах электромагнитного спектра, которые несут в себе информацию о физических характеристиках поверхностного слоя воды. Поскольку в сравнении с морской водой речные воды, как правило, отличаются пониженной соленостью, а также повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворенной органики (Завьялов и др., 2014), детектирование речного выноса по физическим параметрам водной среды представляется весьма решаемой задачей. На сегодняшний день активно разрабатываются и используются алгоритмы обработки спутниковых изображений, которые предоставляют с допустимой точностью информацию о параметрах содержания взвеси в водных массах. Однако большинство алгоритмов, которые проходят испытание временем и позволяют верно определять степень мутности и концентрацию взвешенного вещества, приспособлены к исследованиям локальных регионов, характеризующихся уникальными географическими и климатическими особенностями. Таким региональным алгоритмам требуется постоянная верификация и валидация на новых подготавливаемых наборах данных.

За последние 6 лет в работах нашего коллектива (Жаданова, Назирова, 2023; Лаврова и др., 2022; Назирова и др., 2019, 2023; Nazirova et al., 2021) уже были выполнены исследования по применению различных алгоритмов, входящих в программный комплекс ACOLITE, предназначенный прежде всего для обработки спутниковых изображений серии Sentinel-2, Landsat-8/9. За весь период исследований подготавливались и обрабатывались изображения оптического диапазона в районах выносов р. Мзымта, впадающей в Черное море и р. Сулак и Терек, которые впадают в Каспийское море. Задаче сравнения результатов верификации алгоритмов для определения поля мутности и концентрации взвешенного вещества (SPM – Suspended particulate matter) за период 2019 – 2024 гг. для перечисленных районов Черного и Каспийского морей посвящена данная статья.

Районы исследования

Для сравнения результатов обработки данных спутникового мониторинга с натурными измерениями были выбраны районы трех рек – приустьевая область р. Мзымта, впадающей в Черное море, и устьевые зоны р. Сулак и Терек, впадающие в Каспийское

море. Каждая из рек отличается географическим расположением, действующими сезонными метеоусловиями, а также влиянием климатических факторов – все это сказывается на основных источниках питания рек (дождевые воды, талые воды, подземные грунтовые воды), что напрямую влияет на содержание взвешенного вещества, попадающего в морскую среду. Далее представлена информация по каждому из регионов исследований.

Р. Мзымта является регионом особого интереса в научном сообществе. Среди имеющихся публикаций многие работы посвящены именно характерным особенностям выноса реки в Черное море. (Завьялов и др., 2014). Река впадает в Черное море в районе Адлера (*рис. 1*), а ее начало исходит с Главного Кавказского хребта. Протяженность реки достигает 89 км, а площадь водосборного бассейна 885 кв.км. (Джаошвили, 2002).

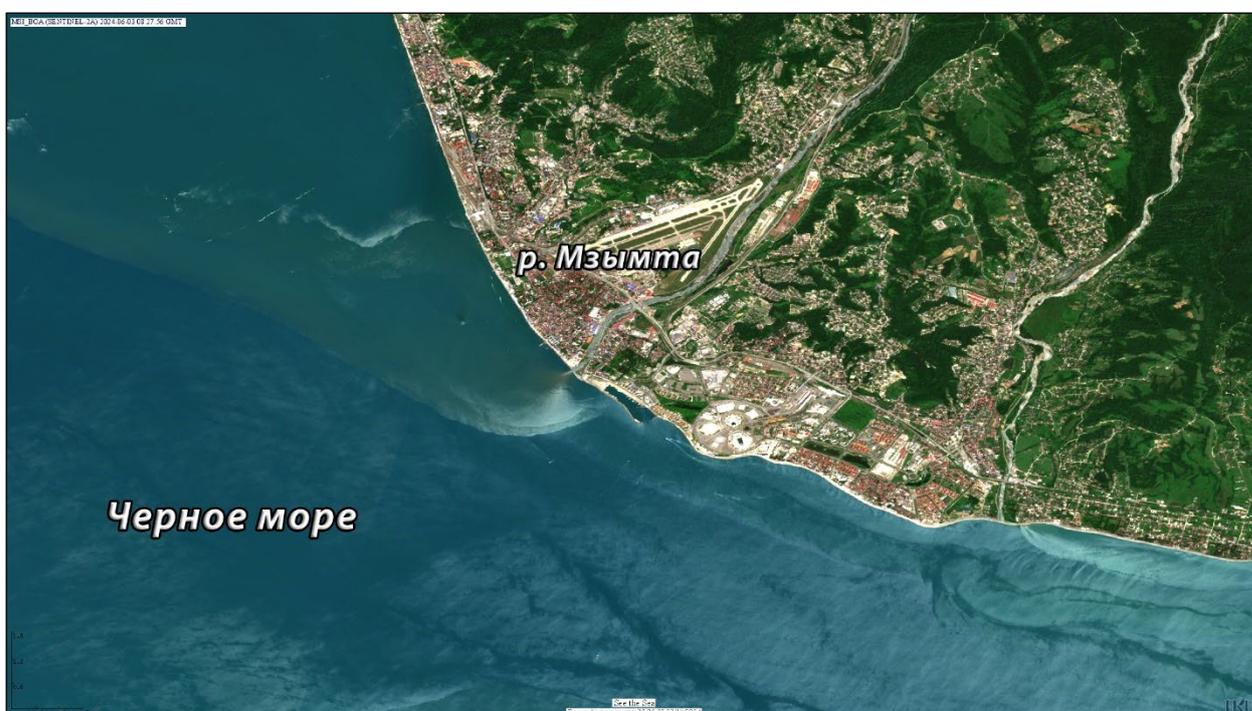


Рис. 1. Приустьевая зона р. Мзымта. Фрагмент изображения MSI Sentinel-2A от 3 июня 2024 г.

Северо-западная часть Среднего Каспия характеризуется шельфовой зоной с малыми глубинами, не превышающие 20 м. Здесь расположена одна из впадающих в море р. Сулак. Р. Сулак берет свое начало на горных склонах Большого Кавказа, в месте слияния рек Андское Койсу и Аварское Койсу. Проходя через горные массивы и предгорья, река попадает в Каспийскую низменность. Протяженность горной реки составляет 169 км, в устьевой зоне она образует дельту площадью около 44 кв.км (*рис. 2*). На р. Сулак

расположены Чирюртское и Чиркейское водохранилища, которые за счет периодического водосброса также влияют на объем речного выноса.



Рис. 2. Приустьевая зона р. Сулак. Фрагмент изображения MSI Sentinel-2A от 24 июня 2024 г.

Р. Терек также берет свое начало на склоне Главного Кавказского хребта из ледника горы Зилга-Хок на высоте 2713 м над уровнем моря. Длина реки – 623 км, площадь водосборного бассейна – 43 200 кв. км. В районе устья р. Терек также образует широкую дельту (рис. 3).



Рис. 3. Приустьевая зона р. Терек. Фрагмент изображения MSI Sentinel-2A от 24 июня 2024 г.

Данные и методы

Для анализа и обработки спутниковых данных в работе использовалась система спутникового мониторинга «See the Sea» (STS), разработанная в ИКИ РАН и поддерживаемая Центром коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лаврова и др., 2019; Лупян и др., 2012). Для получения данных о полях мутности и концентрации взвешенного вещества к анализируемым спутниковым изображениям применялись алгоритмы, являющиеся частью программного комплекса ACOLITE, интегрированные в STS. Программная среда ACOLITE является универсальной для обработки и анализа данных, полученных различными спутниковыми датчиками. В то же время, программный комплекс ACOLITE 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, входящие в ACOLITE и используемые в данной работе, известны как Nechad 2009, Nechad 2015 и Dogliotti 2015 (Dogliotti et al. 2015; Nechad et al., 2009, 2015). В состав входят инструменты атмосферной коррекции (Vanhellemont, 2020). В рамках данной работы использовался метод атмосферной коррекции Dark Spectrum Fitting (DSF), который также входит в программный комплекс

ACOLITE (Barreneche et al., 2023; Maciel, Pedocchi, 2022; Vanhellemont, 2020). Поле мутности воды и концентрация взвешенного вещества определялись по тем изображениям, где речной вынос однозначно выявлялся на спутниковых данных. В том случае, если из-за облачности или при слабых оптических контрастах речной вынос не идентифицировался, были выбраны изображения ближайших дней. Проведение подспутниковых измерений было выполнено в 2019 – 2024 гг. для р. Мзымта за исключением 2020 г., 2021 – 2024 гг. для р. Сулак и 2022 – 2024 гг. для р. Терек. Натурные измерения выполнялись с борта маломерного судна и включали в себя измерения на гидрологических станциях при помощи приборов CTD-зонда (*англ.* Conductivity, Temperature and Depth, проводимость, температура и глубина), дополнительно оснащённого измерителями мутности и флюоресценции для определения концентрации хлорофилла *a* с частотой опроса датчиков до 6 Гц, и портативного турбидиметра TN400 для измерения мутности проб воды, отобранных в приповерхностном слое одновременно с CTD-зондированием. По отобранным пробам морской воды выполнялась оценка содержания взвешенного вещества классическим весовым методом. Методика подспутниковых измерений подробно описана в (Назирова и др., 2023, 2024) Эти данные легли в основу количественных значений *in situ* измерений, описываемых далее.

В табл. 1-3 продемонстрированы периоды проведения подспутниковых измерений синхронно со спутниковой съемкой. К сожалению, на большей части оптических изображений преобладала повышенная облачность (более 40%), что не давало возможности применять алгоритмы ACOLITE.

Таблица 1. Экспедиционные работы с 2019 по 2024 года на выносе р. Мзымта

Дата	Спутник (синхрон)	Облачность, %	Ветер, направление	Ветер, скорость (м/с)	Обнаружение выноса
23.04.19	Sentinel-2	27%	ЮВ	2-3	Да
24.04.19	Landsat-7	13%	ЮЮЗ	2-3	Нет
25.04.19	Landsat-8	8%	ЮЮЗ	2-3	Да
28.04.19	Sentinel-2	19%	ЮВ	4-6	Да (частично)
01.05.19	Sentinel-2	93%	ЮВВ	4-6	Нет
02.05.19	Landsat-8	49%	ЮВ	4-6	Нет
22.04.21	Sentinel-2	90%	З	2-3	Нет
29.04.21	нет данных	-	Штиль	0	-
30.04.21	Sentinel-2	29%	ЮВ	2-3	Да (частично)
	Landsat-8	24%			Нет
02.05.21	Sentinel-2	17%	Ю	2-3	Да
25.04.22	Sentinel-2	23%	Ю	2-3	Да
	Landsat-9	16%			Да

26.04.22	нет данных	-	ЮЮЗ	2-3	-
27.04.22	Sentinel-2	19%	Ю	2-3	Нет
30.04.22	Sentinel-2	84%	ЮЗ	2-3	Нет
03.05.22	Landsat-8	43%	З	2-3	Нет
17.04.23	Sentinel-2	38%	ЮВ	2-3	Да (частично)
25.04.23	Sentinel-2	40%	ЮВ	4-6	Да
27.04.23	Sentinel-2	84%	ЮВ	2-3	Нет
	Landsat-8	68%			Нет
03.05.23	нет данных	-	Штиль	0	-
04.05.23	нет данных	-	ЮЮЗ	2-3	-
05.05.23	Sentinel-2	53%	ЮЮЗ	2-3	Нет
	Landsat-9	30%			Нет
24.04.24	нет данных	-	ЮВВ	2-3	-
26.04.24	Sentinel-2	38%	ЮВ	4-6	Нет
29.04.24	Sentinel-2	48%	ЮЗЗ	2-3	Нет
	Landsat-8	71%			Нет
30.04.24	Landsat-9	54%	ЮЗЗ	2-3	Нет
01.05.24	Sentinel-2	69%	ЮЗ	2-3	Нет

Из табл. 1 видно, что за 2019 и 2021 года по р. Мзымта накоплено наибольшее количество данных, при которых спутниковые изображения были получены в момент проведения подспутниковых измерений. В 2023 и 2024 года, к сожалению, на спутниковых изображениях присутствовала повышенная облачность, которая, несмотря на атмосферную коррекцию, не позволяла верно интерпретировать речной вынос.

Таблица 2. Экспедиционные работы с 2021 по 2024 года на выносе р. Сулак

Дата	Спутник (синхрон)	Облачность, %	Ветер, направление	Ветер, скорость (м/с)	Обнаружение выноса
20.05.2021	Landsat-8	0%	В	2-3	Да
23.05.2021	Sentinel-2	37%	СЗ	2-3	Да (частично)
06.06.2022	нет данных	-	СЗ	0-2	-
09.06.2022	нет данных	-	СВВ	2-3	-
02.06.2023	Sentinel-2	19%	В	2-3	Нет
04.06.2023	Landsat-8	40%	В	2-3	Да
05.06.2023	Sentinel-2	52%	СЗ	4-6	Да (частично)
07.06.2023	Sentinel-2	74%	СЗ	4-6	Нет
29.06.2024	Sentinel-2	51%	СЗ	4-6	Да
	Landsat-8	36%			Да
30.06.2024	Landsat-9	16%	СЗ	2-3	Да
04.07.2024	Sentinel-2	3%	ЮВ	4-6	Да

Качественные синхронные измерения были выполнены по р. Сулак в 2023 и 2024 годах (табл.2). С учетом сезонности проведения измерения в регионе с засушливом

климатом, где редко наблюдается повышенная облачность, были обработаны спутниковые данные практически для каждого из дней проведения натуральных измерений.

Таблица 3. Экспедиционные работы с 2022 по 2024 года на выносе р. Терек

Дата	Спутник (синхрон)	Облачность, %	Ветер, направление	Ветер, скорость (м/с)	Обнаружение выноса
06.06.2022	нет данных	-	З	2-3	-
02.06.2023	Sentinel-2	15%	СВВ	2-3	Да
05.06.2023	Sentinel-2	17%	СЗ	4-6	Да
29.06.2024	Sentinel-2	22%	СЗ	4-6	Нет
	Landsat-8	36%			Нет
30.06.2024	Landsat-9	16%	СЗЗ	4-6	Да (частично)

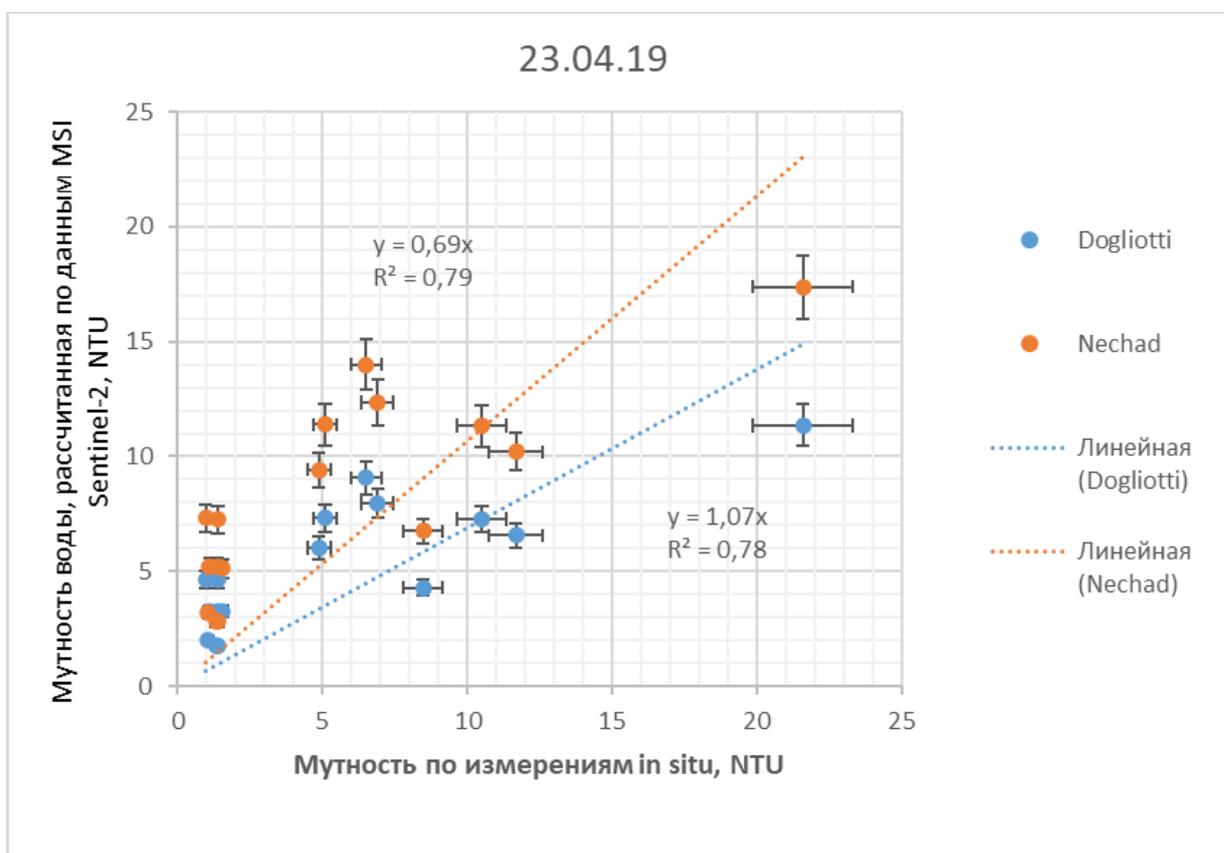
Для р. Терек исследования начались позже всего, с 2022 года (табл. 3). Как и на реке Сулак с преобладанием минимальной облачности в 15-30% наиболее достоверное сравнение подспутниковых измерений со спутниковыми изображениями было выполнено для 2023 года.

Результаты

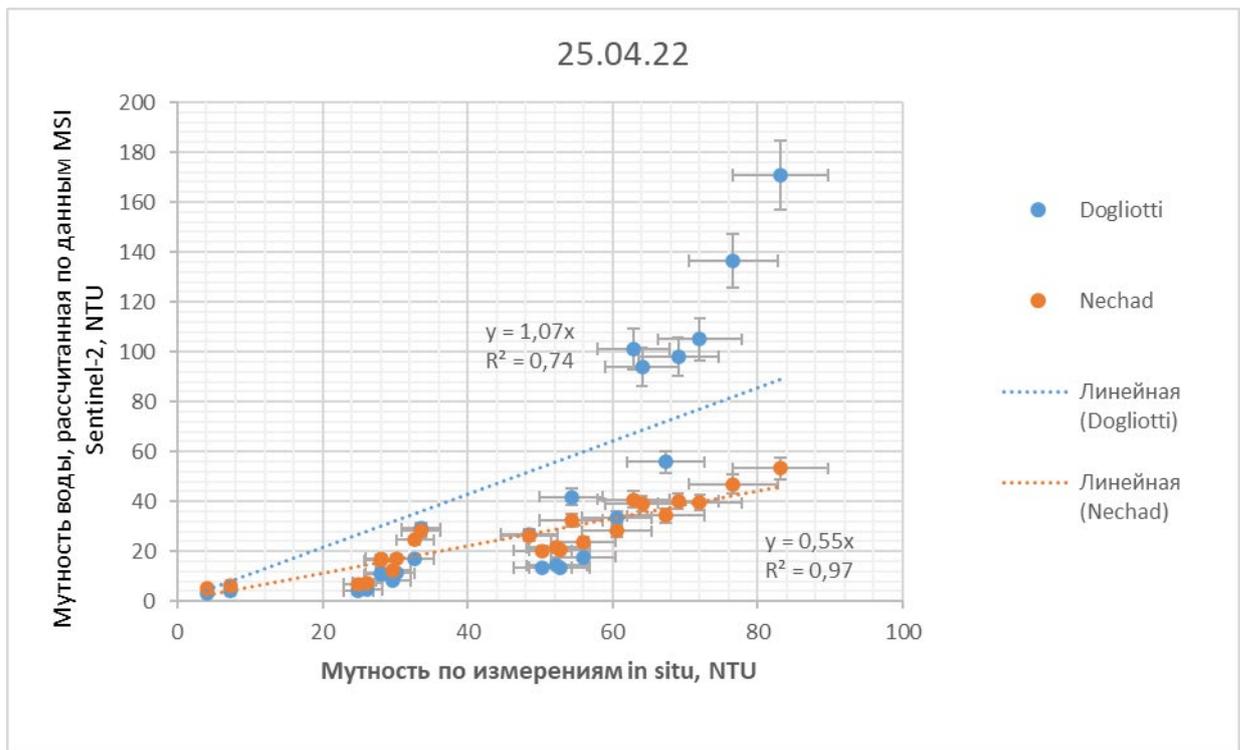
Для исследуемых р. Мзымта, Сулак и Терек подготовлены карты распределения полей мутности на основе данных спутников Sentinel-2A/2B и Landsat-8/9 за все дни проведения натуральных измерений (табл. 1-3). В предыдущих исследованиях (Жаданова, Назирова, 2023; Nazirova et al., 2021) установлено, что алгоритм Nechad демонстрирует высокую корреляцию с *in situ* измерениями мутности, не превышающими 40 NTU (Nephelometric Turbidity Unit, нефелометрическая единица мутности).

По полученной диаграмме рассеяния значений мутности в р Мзымта (рис. 4) за 2019 и 2022 гг. определяется следующая зависимость: в диапазоне мутности от 0 до 40 NTU алгоритм Dogliotti демонстрирует заниженные результаты по сравнению с алгоритмом Nechad. За пределами этого диапазона алгоритм Dogliotti значительно завышает значения мутности. При этом при использовании обоих алгоритмов формируются выбросы при низких значениях NTU. Также важно отметить, что результаты применения алгоритмов Nechad и Dogliotti варьируются в зависимости от дня наблюдений и на них влияют сопутствующие метеоусловия. Ветер способствует охлаждению приповерхностного слоя

воды, вызывая перемещение более тёплых и менее мутных слоёв ближе к поверхности. Кроме того, ветер влияет на направление распространения речного выноса, что может привести к следующим неточностям: станции измерений, которые были выполнены на визуальной с борта судна границе выноса во время натурных измерений, оказываются за его пределами к моменту пролета спутника. Например, 23 апреля 2019 года наблюдается значительный разброс данных относительно линии тренда (рис. 4а), в то время как 25 апреля 2022 года наблюдается почти идеальная линейная зависимость (рис. 4б). Это может быть связано с различиями в гидрометеорологических условиях: скорость ветра достигала 4 м/с в 2019 г. тогда как в 2022 года она составляла 1,5 - 2 м/с. Таким образом, увеличение разброса значений мутности на диаграмме распределения наблюдается при скорости ветра выше 2 м/с.



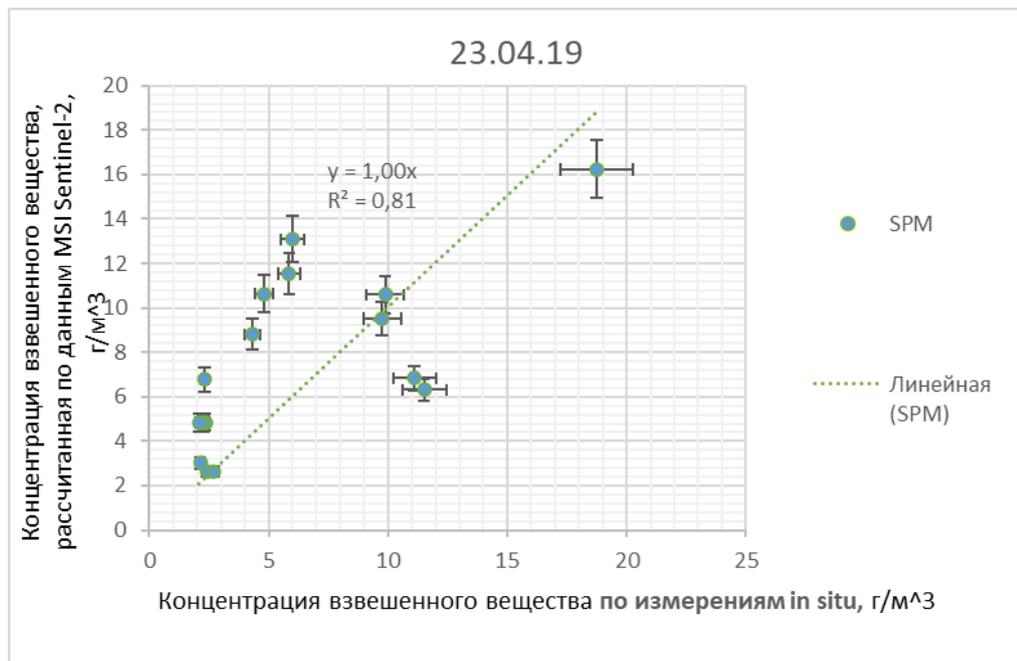
a)



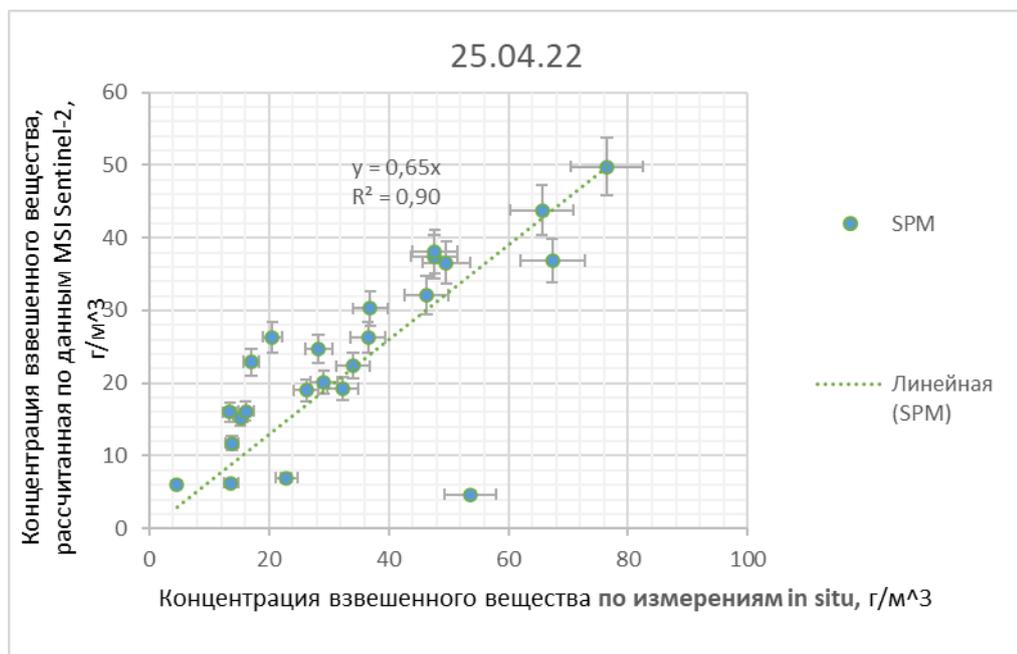
б)

Рис. 4. Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных на основе алгоритмов: Dogliotti и Nechad в приустьевой зоне р. Мзымта за (а) 23.04.19; (б) 25.04.22

Аналогичная тенденция выявляется и при анализе результатов определения концентрации взвешенного вещества по спутниковым данным. При существенной разнице в скорости ветра получают разные значения SPM. Например, для 23.04.2019 года (рис. 5а), при скорости ветра 4 м/с наблюдается значительное рассеивание значений относительно линии тренда. Напротив, для 25.04.2022 года, при скорости ветра вдвое ниже, прослеживается явная линейная зависимость (рис. 5б). Присутствующие выбросы могут быть обусловлены погрешностями при определении концентрации взвешенного вещества или изменчивостью речного выноса.



а)



б)

Рис. 5. Диаграмма рассеяния значений концентрации взвешенного вещества, полученных на основе алгоритма Nechad2015 в приустьевой зоне р. Мзымта за (а) 23.04.19; (б) 25.04.22.

При анализе всех накопленных измерений было обнаружено, что результаты, полученные с применением алгоритмов Nechad и Dogliotti, существенно отклоняются от *in situ* измерений (рис. б). Поскольку набор данных включает все доступные наблюдения, выявление четких зависимостей затруднено из-за различных гидрометеорологических факторов, меняющихся ежедневно. Однозначно можно утверждать, что алгоритм Nechad

является наиболее точным для выноса р. Мзымта при малой скорости ветра (до 2 м/с). В то время как для алгоритма Dogliotti, независимо от метеорологических условий, выявлено явное несоответствие с *in situ* измерениями: в диапазоне 0-40 NTU – наблюдается занижение значений; в диапазоне 40-100 NTU – завышение значений на 40-60 NTU.

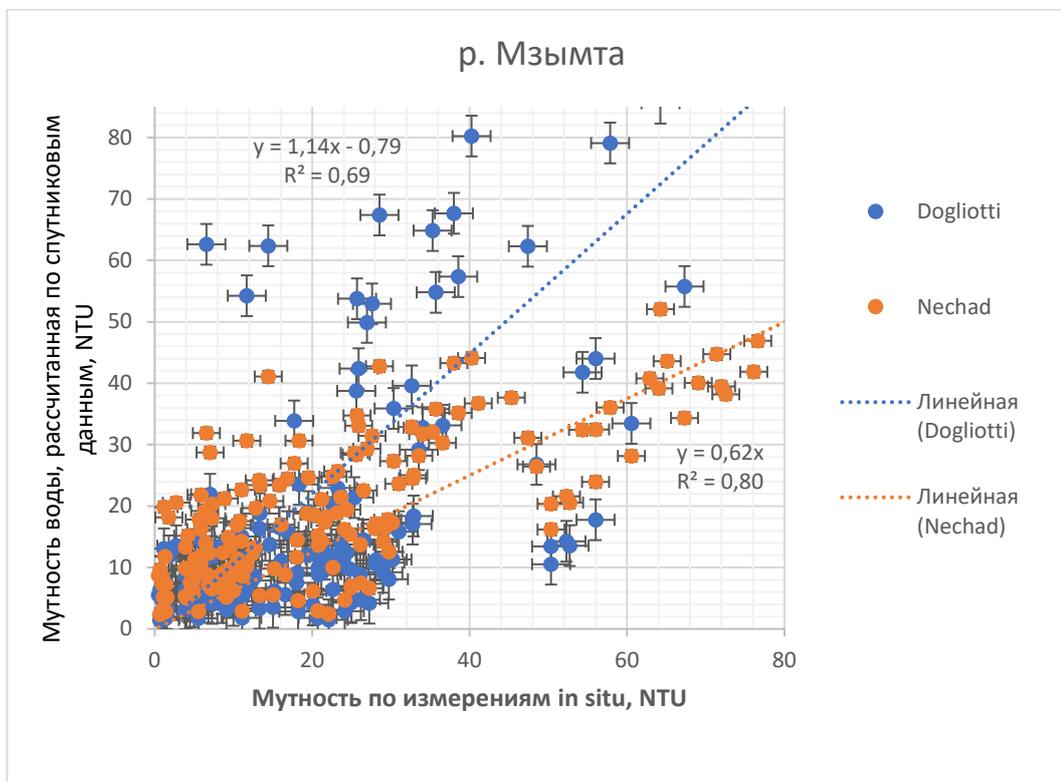


Рис. 6. Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных на основе алгоритмов: Dogliotti и Nechad в приустьевой зоне р. Мзымта за весь период наблюдений (2019-2024 гг.)

Для следующего региона исследования — р. Терек наблюдается обратная ситуация. Алгоритм Nechad не рекомендуется к применению для данного региона из-за его низкого порога насыщения, что четко показано на рис. 7а. При значениях мутности выше 40 NTU алгоритм Nechad достигает своего порога насыщения и не рассчитывает пропорциональные коэффициенты. На том же рисунке алгоритм Dogliotti определяет значения мутности с ошибкой примерно в 1,5 раза (среднее абсолютное отклонение ~30). В то же время, при высоких значениях мутности до 1500 NTU (рис. 7б), алгоритм Dogliotti демонстрирует практически линейную зависимость с данными *in situ*, несмотря на значительную погрешность.

Результаты анализа в приустьевой зоне р. Терек за 2022 – 2024 гг. показывают, что алгоритм Dogliotti является предпочтительным при высоких значениях мутности, несмотря

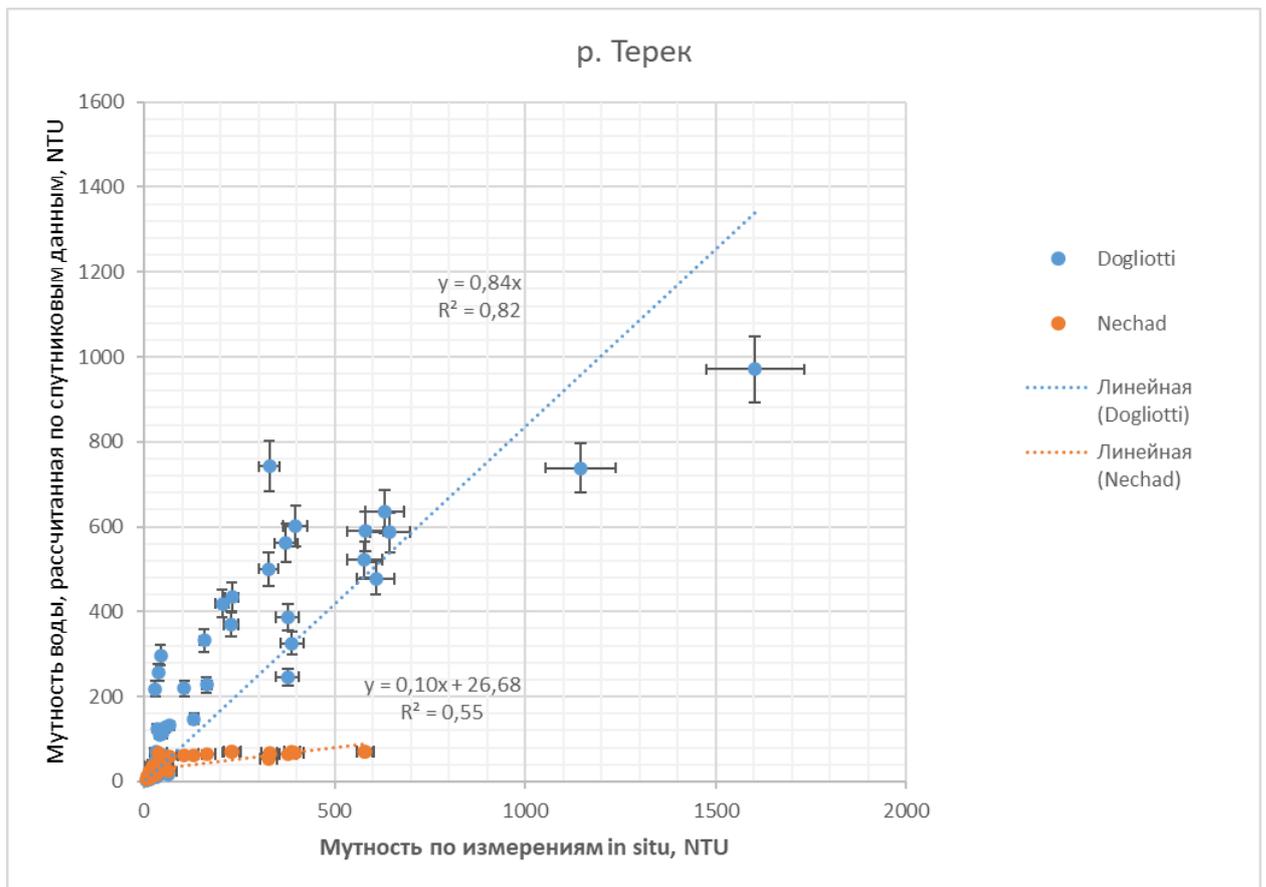
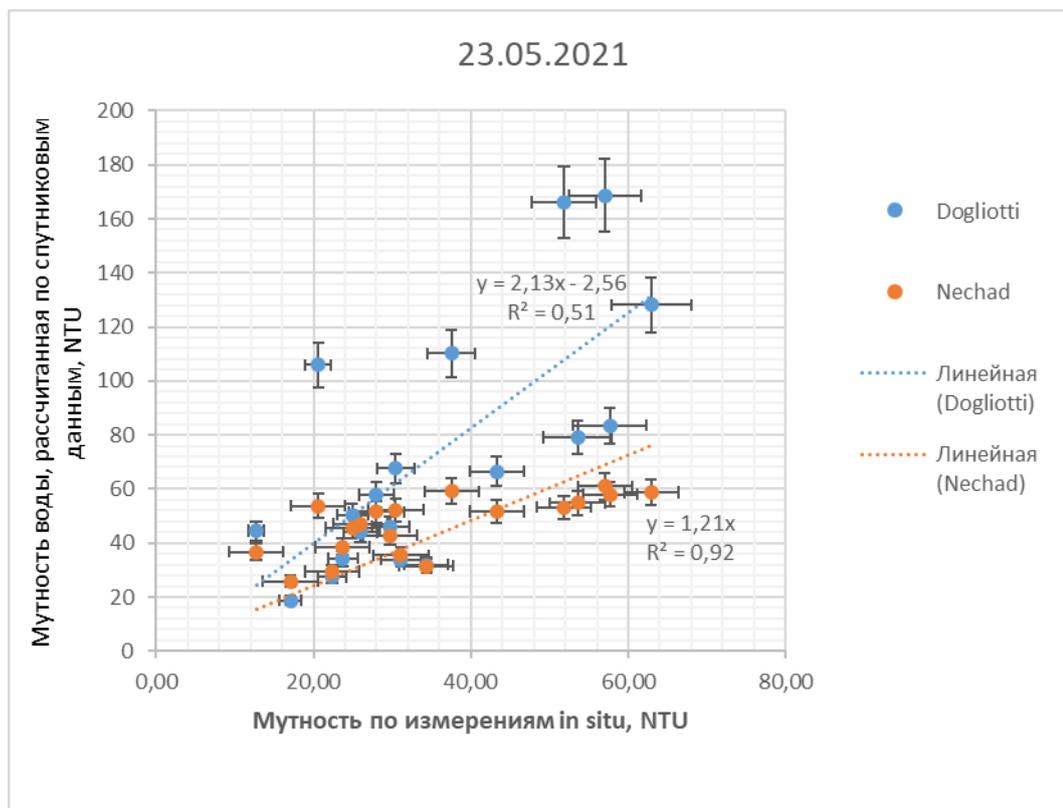


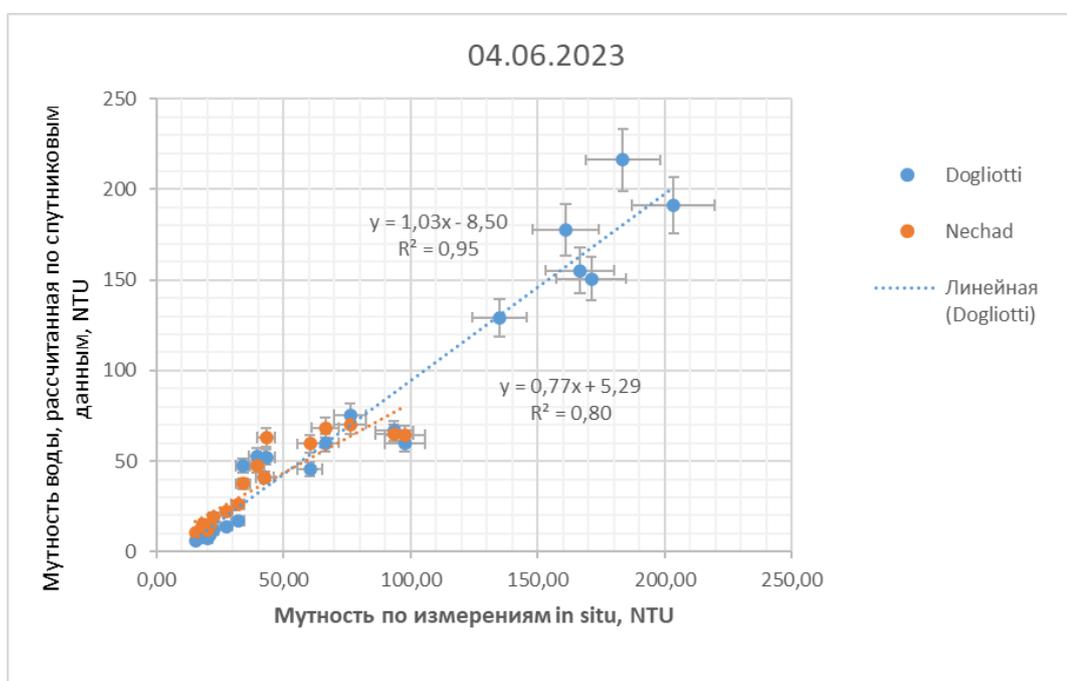
Рис. 8. Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных на основе алгоритмов: Dogliotti и Nechad в приустьевой зоне р. Терек за весь период наблюдений (2022-2024 гг.)

Полученные результаты исследования приустьевого района р. Сулак дают неоднозначные результаты по распределению значений мутности. И на первый взгляд, делается вывод, что для данного региона не подходит ни один из используемых алгоритмов. Все дело в том, что р. Сулак характеризуется значительной изменчивостью выноса, где параметры мутности сильно варьируются в пределах от 100 до 1000 NTU. На ранее рассматриваемых исследуемых участках подобная изменчивость в максимальных значениях мутности не была зафиксирована. На рис. 9 представлены примеры полученных значений мутности по алгоритмам Nechad и Dogliotti. В дни измерений, где зафиксированы небольшие значения мутности в устье р. Сулак алгоритм Nechad достаточно хорошо коррелирует с подспутниковыми измерениями (рис. 9а). Разброс значений вокруг линии тренда может свидетельствовать о влиянии различных внешних условий. В дни с высокой мутностью вблизи устья реки алгоритм Nechad, достигнув порога насыщения, не рассчитывает результаты, в то время как алгоритм Dogliotti показывает практически линейную зависимость с подспутниковыми *in situ* данными (рис. 9б). Кроме того, зафиксированы дни, когда вблизи устья мутность достигает около 250 NTU (рис. 9б). В

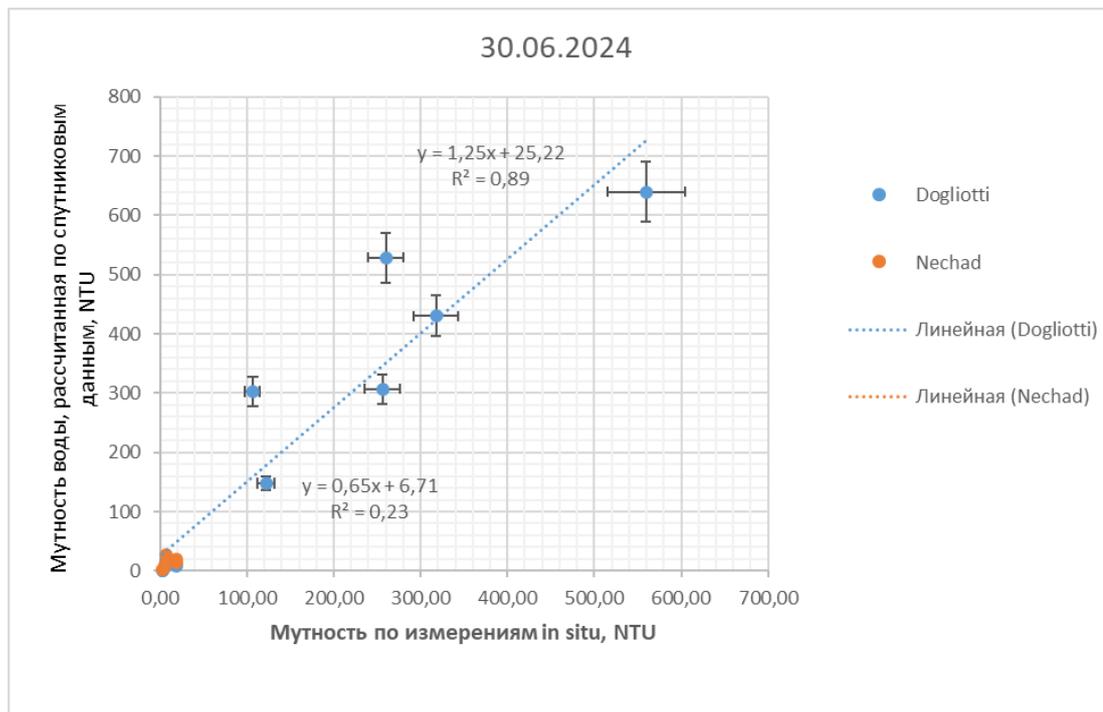
последнем случае оба алгоритма, Dogliotti и Nechad, демонстрируют высокую корреляцию с подспутниковыми измерениями.



a)



б)



в)

Рис. 9. Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных на основе алгоритмов: Dogliotti и Nechad в приустьевой зоне р. Сулак за (а) 23.05.21; (б) 04.06.23; (в) 30.06.24.

Анализ данных за весь период проведения подспутниковых измерений показывает отсутствие единой зависимости (рис. 10), что указывает на необходимость учета внешних факторов и невозможность полагаться на конкретный алгоритм для расчета мутности воды в данном регионе.

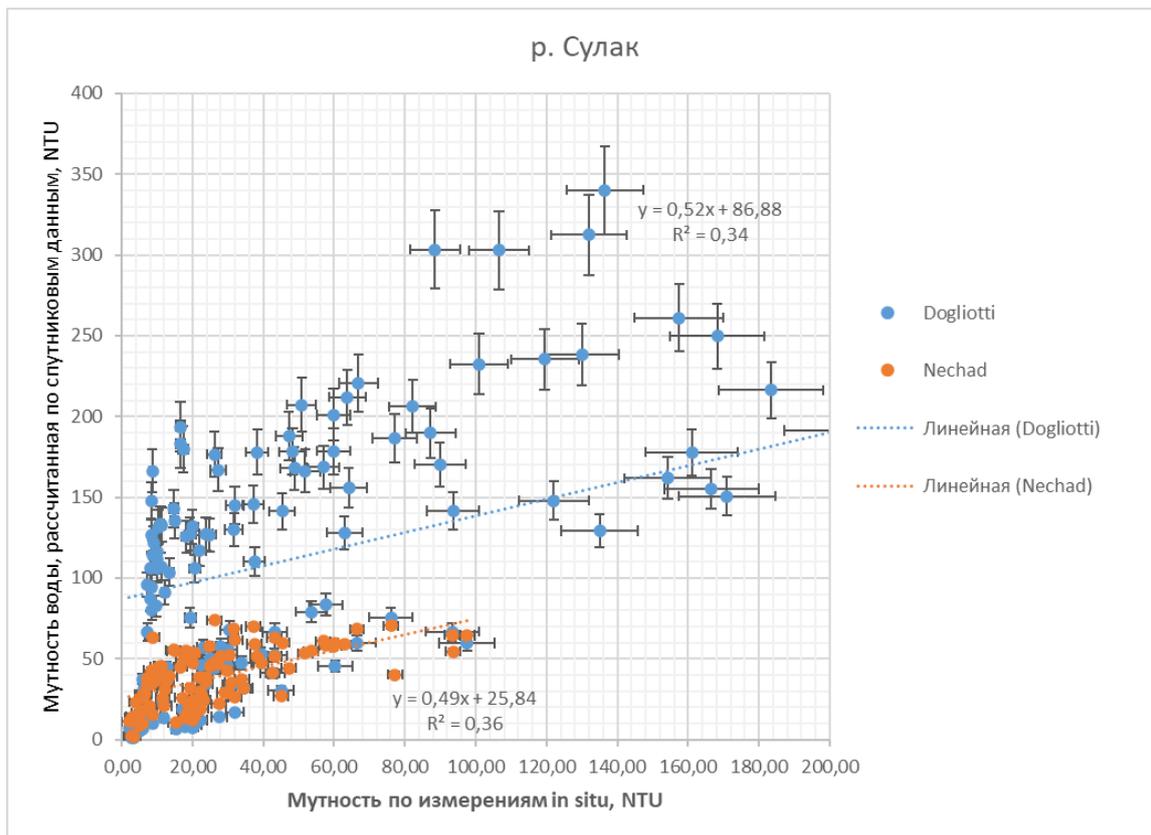
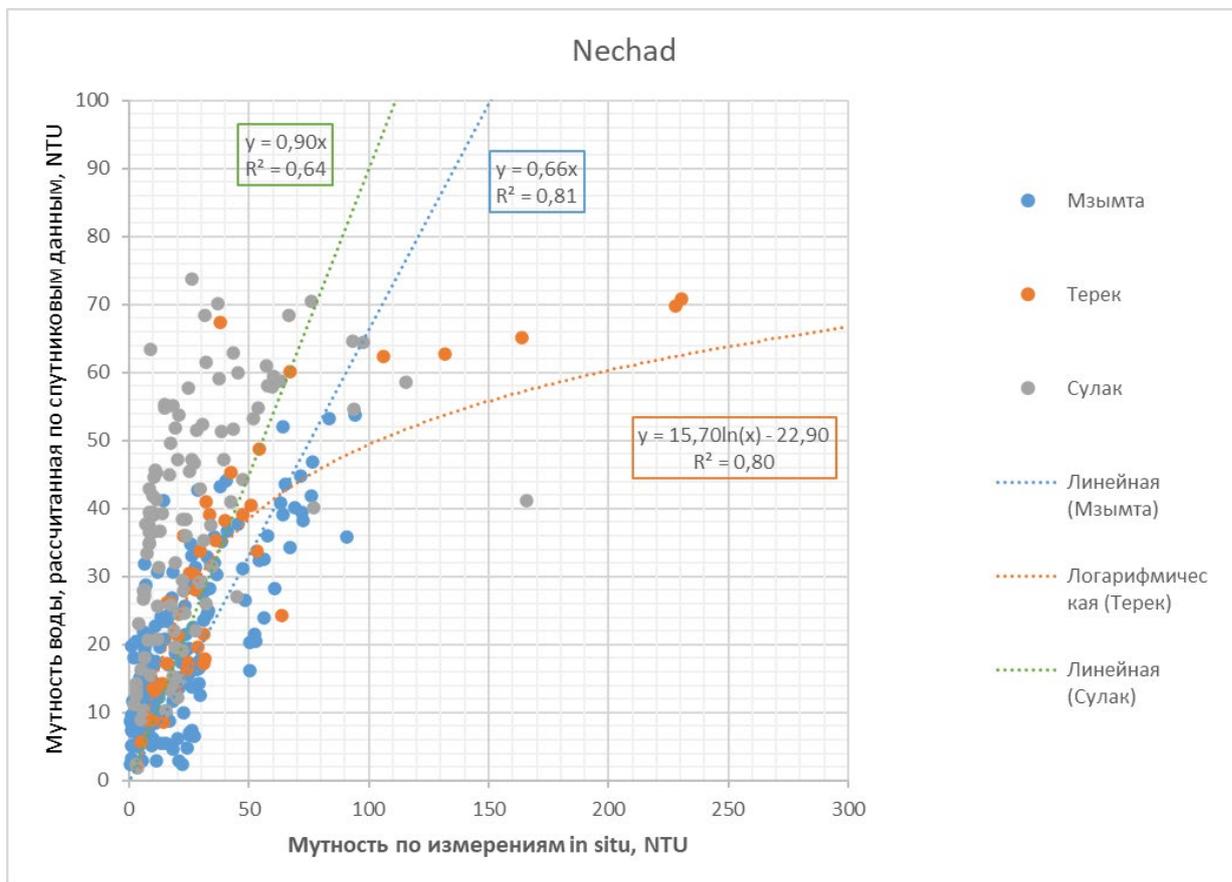


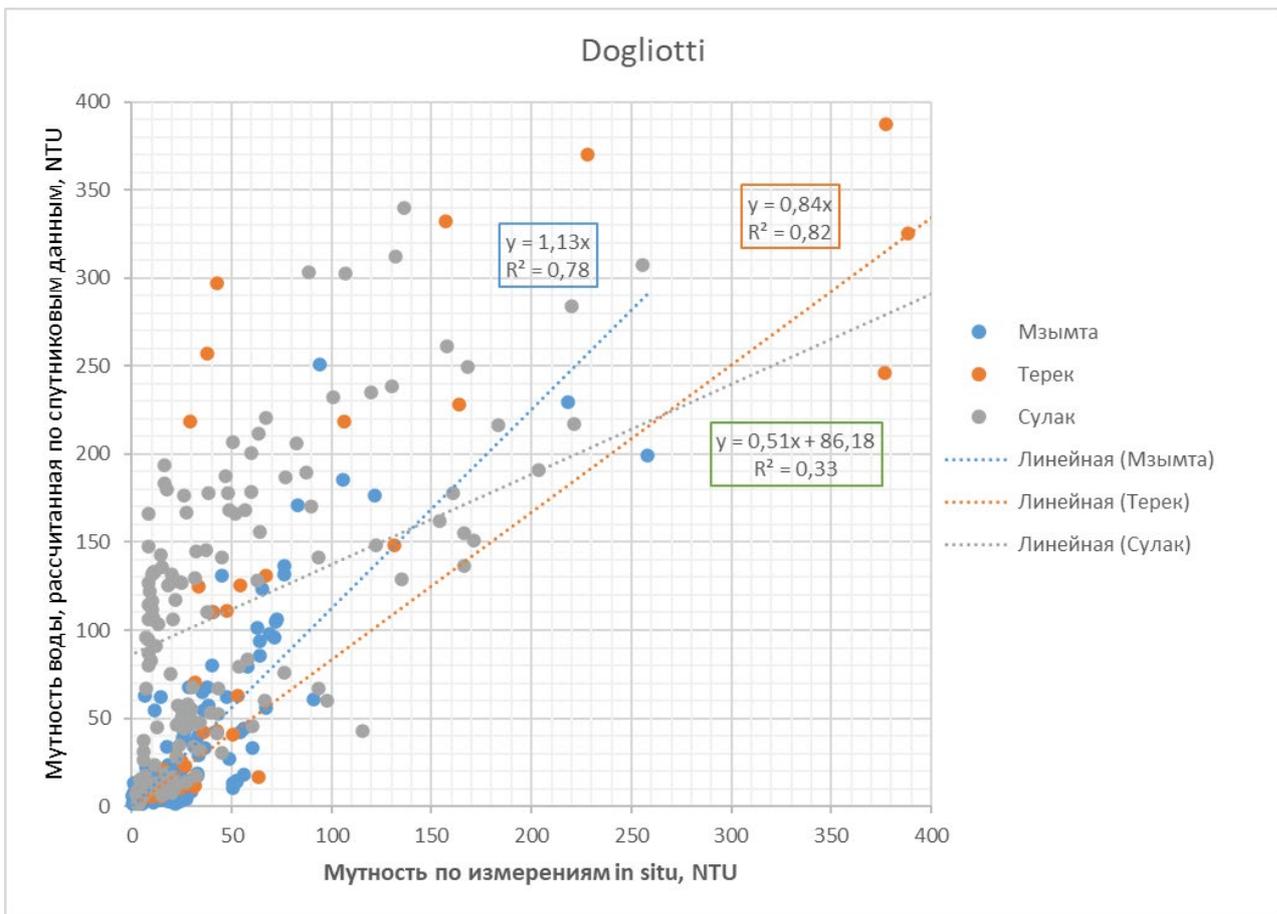
Рис. 10. Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных на основе алгоритмов: Dogliotti и Nechad в приустьевой зоне р. Сулак за весь период наблюдений (2021-2024 гг.)

При сравнении результатов применения алгоритмов определения поля мутности и концентрации взвешенного вещества для исследуемых регионов было отмечено, что алгоритм Nechad обрабатывает эффективно для каждого речного выноса, при условии, что мутность не превышает 70 NTU (рис. 11а). В то же время наблюдается некритический разброс значений при пониженном содержании мутности до 20 NTU, завышая полученные коэффициенты в сравнении с *in situ* измерениями. Для р. Терек определяется нелинейная зависимость, описываемая логарифмической функцией, так как алгоритм достигает порога насыщения при 70 NTU. В свою очередь, алгоритм Dogliotti демонстрирует положительные результаты для р. Мзымта и Терек (рис. 11б). Но в этом случае наблюдается явный разброс значений для показаний ниже 100 NTU, аналогичный алгоритму Nechad. Наилучшее соответствие обработанных данных алгоритмом Dogliotti с *in situ* измерениями определяется для р. Терек, что объясняется высокими показателями мутности вблизи устья, и возможностью определять содержание взвеси при мутности выше 1000 NTU. Алгоритм расчета концентрации взвешенного вещества описывает схожую статистику с алгоритмом Nechad для определения поля мутности (рис. 11в). Для р. Терек оптимальная аппроксимация достигается с использованием логарифмической зависимости, тогда как для остальных рек

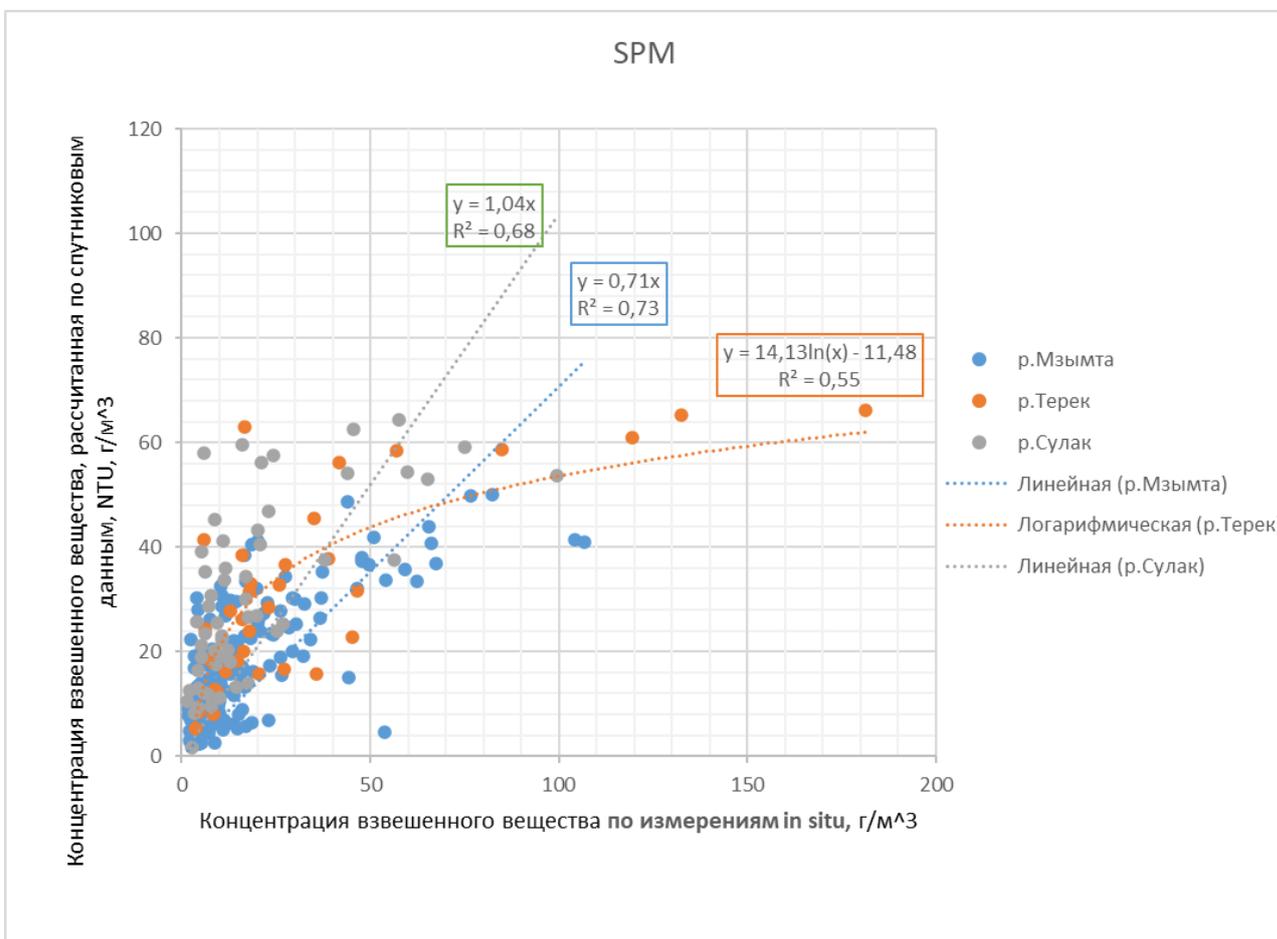
применима линейная функция. Таким образом, выбор алгоритмов зависит от конкретных условий и характеристик исследуемых акваторий, а логарифмические функции могут быть полезны при описании нелинейных зависимостей для р. Терек.



a)



б)



в)

Рис. 11. Диаграмма рассеяния значений мутности воды и концентрации взвешенного вещества, полученных на основе алгоритмов: (а) Nechad; (б) Dogliotti (в) NechadSPM в приустьевых зонах р. Мзымта, Терек и Сулак за весь период наблюдений

Заключение

В настоящей работе выполнено сравнение результатов применения алгоритмов по определению полей мутности и SPM по спутниковым данным систем Sentinel-2, Landsat-8,9 с данными натурных измерений для оценки распространения речного выноса в открытое море. На примере сравнения данных на Черноморском и Каспийском побережьях удалось проверить применимость алгоритмов, входящих в состав ACOLITE, и отобрать наиболее результативные для каждого региона в отдельности. Проверено, что отдельные алгоритмы с разной степени точности определяют состав взвести в выносе, а фактические измерения сильно зависят от конкретных климатических условий регионов.

Алгоритм Nechad зарекомендовал себя наилучшим образом для районов с небольшими порывами ветра, однако его применение в районах с высокой мутностью ограничено из-за низкого порога насыщения. Алгоритм Dogliotti, несмотря на значительное рассеивание значений, продемонстрировал лучшую корреляцию с *in situ* данными при высоких уровнях мутности. Для рек с изменчивыми гидрометеорологическими условиями, таких как р. Сулак, необходим комплексный подход, учитывающий множество факторов для точного определения мутности воды. Следовательно, применение алгоритмов Nechad и Dogliotti должно выполняться опционально в зависимости от конкретных параметров и условий каждого исследуемого региона.

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

Литература

1. *Джаошвили Ш.* Реки Черного моря: Технический отчёт / Европейское агентство по охране окружающей среды. 2002. 58 с. http://www.eea.europa.eu/ru/publications/technical_report_2002_71/at_download/file.
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.
3. *Завьялов П. О., Маккавеев П. Н., Коновалов Б. В. и др.* Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308. DOI: 10.7868/S0030157414030150.
4. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Уваров И.А. и др.* Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
5. *Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Алферьева Я. О. и др.* 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.
6. *Лулян Е. А., Матвеев А. А., Уваров И. А., Бочарова Т. Ю., Лаврова О. Ю., Митягина М. И.* Спутниковый сервис See The Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
7. *Назирова К. Р., Жаданова П. Д., Князев Н.А.* Результаты многолетних исследований полей мутности и концентрации взвешенного вещества в приустьевой зоне р. Мзымты на основе натуральных измерений и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 321–332.
8. *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.
9. *Назирова К. Р., Лаврова О. Ю., Алферьева Я. О. и др.* Пространственно-временная изменчивость плюмов рек Терек и Сулак по спутниковым данным и синхронным натурным измерениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 285–303. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303.
10. *Barreneche J. M., Guigou B., Gallego F. et al.* Monitoring Uruguay's freshwaters from space: An assessment of different satellite image processing schemes for chlorophyll-a estimation // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2023. V. 29. Article 100891. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100891>.
11. *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>.
12. *Dzwonkowski B., Yan X-H.* Tracking of a Chesapeake Bay estuarine outflow plume with satellite-based ocean color data // Continental Shelf Research. 2005. V. 25. P. 1942–1958. DOI: 10.1016/j.csr.2005.06.011.
13. *Johnson D. R., Weidemann A., Arnone R. et al.* Chesapeake Bay outflow plume and coastal upwelling events: physical and optical properties // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 11613–11622. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.015>.

14. 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. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.
15. Lavrova O. Y., Soloviev D. M., Strochkov M. A. *et al.* River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // *Proc. SPIE*. 2016. V. 9999. Article 99990G. <https://doi.org/10.1117/12.2241312>.
16. Maciel F. P., Pedocchi F. Evaluation of ACOLITE atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 in the Río de la Plata turbid coastal waters // *Intern. J. Remote Sensing*. 2022. V. 43. P. 215–240. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.2009149>
17. Nechad B., Ruddick K. G., Park Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114(4). P. 854– 866. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>.
18. 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>.
19. Osadchiev A., Sedakov R. Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat-8 and Sentinel-2 // *Remote Sensing Environment*. 2019. V. 221. P. 522–533. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
20. Vanhellemont Q., Ruddick K. Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8 // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 161. P. 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.007>.
21. Vanhellemont Q., Ruddick K. Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery // *Proc. 2016 ESA Living Planet Symp*. 2016. P. 9–13.
22. 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>.

Comparison of results of turbidity and suspended solids concentration fields determination for the Mzymta, Sulak and Terek rivers based on satellite data and in-situ measurements

N.A. Knyazev, P.D. Zhadanova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: nkniyazev@cosmos.ru

The paper presents a comparison of the results of algorithms for determining turbidity and suspended particulate matter (SPM) concentration fields using Sentinel-2 (MSI), Landsat-8/9 (OLI-TIRS/OLI-2-TIRS-2) optical satellite images as an example of river discharge. The Mzymta River on the Black Sea coast, a long-standing object of scientific interest, and the Sulak and Terek Rivers flowing into the Caspian Sea, where significant results are just beginning to appear, were selected as study areas. The Nechad and Dogliotti algorithms, implemented in the ACOLITE software package, were used to estimate suspended matter parameters at the mouths of river outlets. The turbidity and SPM values obtained by the algorithms were compared with sub-satellite measurements in the surface layer. The results obtained by comparing satellite and in-situ data revealed high correlation dependencies when applying the Nechad algorithm on different regions under different meteorological conditions. However, this tool is limited in research capability by its saturation threshold of 70 NTU. The Dogliotti algorithm performed well for the Mzymta and Terek rivers, but the best fit was achieved at high turbidity values of more than 1000 NTU, which was only observed for the Terek River.

Keywords: satellite monitoring, MSI Sentinel-2, OLI/OLI-2 Landsat-8/9, *in situ* measurements, water turbidity, suspended particulate matter (SPM), ACOLITE, Mzymta, Sulak, Terek

References

1. Dzhaoshvili S., *Reki Chernogo morya: Tekhnicheskii otchet* (Rivers of the Black Sea, Technical Report), European Environment Agency, 2002, Vol. 71, 58 p. (in Russian).
2. Zav'yalov 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.
3. Zhadanova P. D., Nazirova K. R., Analysis and verification of turbidity and suspended solids concentration determination algorithms implemented in the ACOLITE software package, *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.
4. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A. et al. (2019), Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
5. Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Alfer'eva Ya. O. et al., Comparison of plume parameters of the Sulak and Terek rivers based on satellite data and in situ measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 264–283 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
6. Loupian E. A., Matveev A. A., Uvarov I. A., Bocharova T. Yu., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., The Satellite Service See the Sea – a tool for the study of oceanic phenomena and processes, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 5, pp. 321–332.
7. Nazirova K. R., Zhadanova P. D., Knyazev N.A. 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, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–261.
8. 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.
9. Nazirova K. R., Lavrova O. Y., Alferieva Ya. O. et al., Spatiotemporal plume variability of Terek and Sulak rivers from satellite data and concurrent *in situ* measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 285–303 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303.
10. Barreneche J. M., Guigou B., Gallego F. et al. Monitoring Uruguay's freshwaters from space: An assessment of different satellite image processing schemes for chlorophyll-a estimation // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2023. V. 29. Article 100891. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100891>.
11. 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>.
12. Dzwonkowski B., Yan X-H. Tracking of a Chesapeake Bay estuarine outflow plume with satellite-based ocean color data // *Continental Shelf Research*. 2005. V. 25. P. 1942–1958. DOI: 10.1016/j.csr.2005.06.011.
13. Johnson D. R., Weidemann A., Arnone R. et al. Chesapeake Bay outflow plume and coastal upwelling events: physical and optical properties // *J. Geophysical Research*. 2001. V. 106. P. 11613–11622. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.015>.

14. 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. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.
15. Lavrova O. Y., Soloviev D. M., Strochkov M. A. et al. River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // *Proc. SPIE*. 2016. V. 9999. Article 99990G. <https://doi.org/10.1117/12.2241312>.
16. Maciel F. P., Pedocchi F. Evaluation of ACOLITE atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 in the Río de la Plata turbid coastal waters // *Intern. J. Remote Sensing*. 2022. V. 43. P. 215–240. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.2009149>
17. Nechad B., Ruddick K. G., Park Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114(4). P. 854– 866. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>.
18. 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>.
19. Osadchiv A., Sedakov R. Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat-8 and Sentinel-2 // *Remote Sensing Environment*. 2019. V. 221. P. 522–533. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
20. Vanhellemont Q., Ruddick K. Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8 // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 161. P. 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.007>.
21. Vanhellemont Q., Ruddick K. Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery // *Proc. 2016 ESA Living Planet Symp*. 2016. P. 9–13.
22. 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>.