

Сравнение результатов определения полей мутности и концентрации взвешенного вещества для рек Мзымты, 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*

Представлено сравнение результатов применения алгоритмов для определения полей мутности и концентрации взвешенного вещества речных выносов, исследуемых по оптическим изображениям спутниковых систем Sentinel-2, Landsat-8, -9. В качестве районов исследования были выбраны р. Мзымта Черноморского побережья, а также реки Сулак и Терек, впадающие в Каспийское море. 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 концентрации взвешенного вещества сравнивались с натурными измерениями. Итоговые результаты сравнения выявили высокие корреляционные зависимости при применении алгоритма Nechad для разных регионов при небольших скоростях ветра (до 2 м/с). При работе с акваториями с мутностью выше 70 NTU (*англ.* Nephelometric Turbidity Unit) или при большой скорости ветра выявился сильный разброс измеряемых алгоритмом значений с натурными измерениями. Алгоритм Dogliotti хорошо зарекомендовал себя для рек Мзымты и Терек, но наилучшее соответствие было достигнуто при больших значениях мутности, >1000 NTU, что наблюдалось только для р. Терек.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, Sentinel, Landsat, натурные измерения, мутность воды, концентрация взвешенного вещества, ACOLITE, Мзымта, Сулак, Терек

Одобрена к печати: 03.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-244-258

Введение

Исследование экологического состояния морских акваторий — одна 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 неблагоприятно отражается на качестве жизни человека. Именно поэтому так важно проводить постоянный мониторинг и контроль над районами, подверженными наибольшей экологической опасности. Одним из основных источников загрязнения прибрежных зон морских акваторий представляются речные выносы, которые несут в себе большое количество взмученного взвешенного вещества, переносимого 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). По получаемым спутниковым снимкам возможно построить цветосинтезированные изображения в различных каналах электромагнитного спектра, которые позволяют дополнять информацию о физических характеристиках поверхностного слоя воды. Поскольку в сравнении с морской водой речные воды, как правило, отличаются пониженной солёностью, а также повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворённой 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 шесть лет в работах нашего коллектива (Жаданова, Назирова, 2023; Лаврова и др., 2022; Назирова и др., 2019, 2023; Nazirova et al., 2021) уже были описаны 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 были подготовлены и обработаны изображения оптического диапазона в районах выносов р. Мзымты, впадающей в Чёрное море, и рек Сулак и Терек, которые впадают в Каспийское море. Настоящая статья посвящена задаче сравнения результатов верификации алгоритмов для определения полей мутности и концентрации взвешенного вещества за период 2019–2024 гг. для перечисленных районов Чёрного и Каспийского морей.

Районы исследования

Для сравнения результатов обработки данных спутникового мониторинга с натурными измерениями были выбраны районы трёх рек — приустьевая область Мзымты, впадающей в Чёрное море, и устьевые зоны рек Сулак и Терек, впадающих в Каспийское море. Каждая из рек отличается географическим расположением, действующими сезонными метеоусловиями, а также влиянием климатических факторов — всё 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 районов исследований.

Река Мзымта входит в число регионов особого интереса в научном сообществе. Среди имеющихся публикаций многие работы посвящены именно характерным особенностям выноса реки в Чёрное море (Завьялов и др., 2014). Река впадает в Чёрное море в районе Адлера (рис. 1), а своё начало берёт на южном склоне Главного Кавказского хр. Протяжённость реки достигает 89 км, а площадь водосборного бассейна — 885 км² (Джаошвили, 2002).

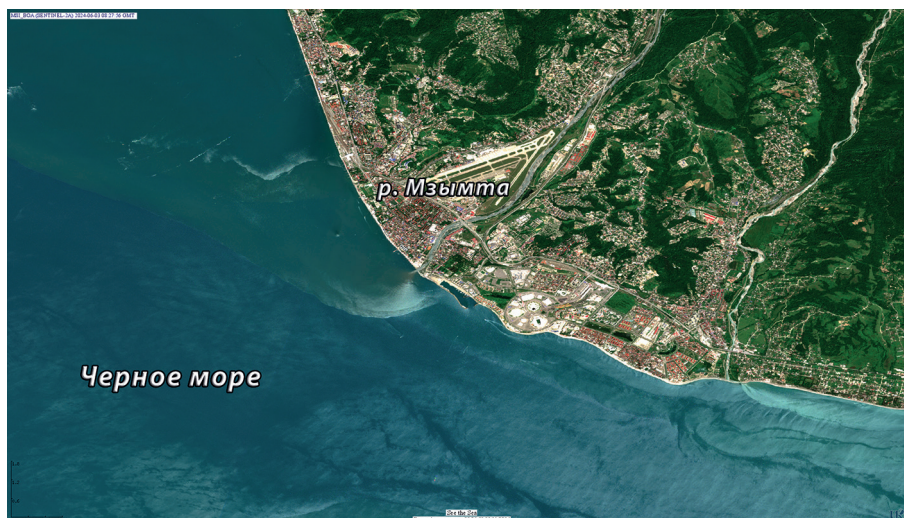


Рис. 1. Приустьевая зона р. Мзымты. Фрагмент изображения MSI (англ. Multispectral Instrument) Sentinel-2A от 3 июня 2024 г.

Северо-западная часть Среднего Каспия характеризуется шельфовой зоной с малыми глубинами, не превышающими 20 м. Здесь расположена одна из впадающих в море рек — Сулак, которая берёт своё начало на горных склонах Большого Кавказа, в месте слияния рек Андийское Койсу и Аварское Койсу. Проходя через горные массивы и предгорья, река попадает в Каспийскую низменность. Протяжённость горной реки составляет 169 км, в устьевой зоне она образует дельту площадью около 44 км² (рис. 2). На р. Сулак расположены Чирюртское и Чиркейское вдхр., которые за счёт периодического водосброса также влияют на объём речного выноса.



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

Река Терек также берёт своё начало на склоне Главного Кавказского хр. из ледника горы Зилга-Хок на высоте 2713 м над уровнем моря. Длина реки — 623 км, площадь водосборного бассейна — 43 200 км². 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 STS (*англ.* See the Sea), 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 представляется 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 (далее Nechad) и Dogliotti 2015 (далее Dogliotti) (Dogliotti et al., 2015; Nechad et al., 2010, 2015). Также в программный комплекс ACOLITE входят инструменты атмосферной коррекции. В рамках настоящей работы использовался метод атмосферной коррекции DSF (*англ.* Dark Spectrum Fitting) (Barreneche et al., 2023; Maciel, Pedocchi, 2022; Vanhellemont, 2020). Поля мутности воды и концентрации взвешенного вещества устанавливались по изображениям, на которых однозначно определялся речной вынос. Если из-за облачности или при слабых оптических контрастах речной вынос не идентифицировался, то тогда отбирались «чистые» изображения ближайших дней.

Проведение подспутниковых измерений было выполнено в 2019–2024 гг. для р. Мзымты, за исключением 2020 г., в 2021–2024 гг. для р. Сулак и в 2022–2024 гг. для р. Терек. Натурные измерения выполнялись с борта маломерного судна и включали в себя измерения на гидрологических станциях, получаемые при помощи STD-зонда (*англ.* Conductivity, Temperature and Depth, проводимость, температура и глубина), дополнительно оснащённого измерителями мутности и флуоресценции 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 STD-зондированием. По взятым пробам морской воды выполнялась оценка содержания взвешенного вещества классическим весовым методом. Методика подспутниковых измерений подробно описана в работах (Назирова и др., 2023, 2024). Эти данные легли в основу количественных значений *in situ* измерений, рассматриваемых далее.

В табл. 1–3 продемонстрированы периоды проведения подспутниковых измерений синхронно со спутниковой съёмкой. 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 г. на выносе р. Мзымты

Дата	Спутник (синхрон)	Облачность, %	Ветер, направление	Ветер, скорость, м/с	Обнаружение выноса
23.04.2019	Sentinel-2	27	ЮВ	2–3	Да
24.04.2019	Landsat-7	13	ЮЮЗ	2–3	Нет
25.04.2019	Landsat-8	8	ЮЮЗ	2–3	Да
28.04.2019	Sentinel-2	19	ЮВ	4–6	Да (частично)
01.05.2019	Sentinel-2	93	ЮВВ	4–6	Нет
02.05.2019	Landsat-8	49	ЮВ	4–6	Нет
22.04.2021	Sentinel-2	90	З	2–3	Нет
29.04.2021	Нет данных	–	Штиль	0	–
30.04.2021	Sentinel-2	29	ЮВ	2–3	Да (частично)
	Landsat-8	24			Нет

Окончание табл. 1

Дата	Спутник (синхрон)	Облачность, %	Ветер, направление	Ветер, скорость, м/с	Обнаружение выноса
02.05.2021	Sentinel-2	17	Ю	2–3	Да
25.04.2022	Sentinel-2	23	Ю	2–3	Да
	Landsat-9	16			Да
26.04.2022	Нет данных	–	ЮЮЗ	2–3	–
27.04.2022	Sentinel-2	19	Ю	2–3	Нет
30.04.2022	Sentinel-2	84	ЮЗ	2–3	Нет
03.05.2022	Landsat-8	43	З	2–3	Нет
17.04.2023	Sentinel-2	38	ЮВ	2–3	Да (частично)
25.04.2023	Sentinel-2	40	ЮВ	4–6	Да
27.04.2023	Sentinel-2	84	ЮВ	2–3	Нет
	Landsat-8	68			Нет
03.05.2023	Нет данных	–	Штиль	0	–
04.05.2023	Нет данных	–	ЮЮЗ	2–3	–
05.05.2023	Sentinel-2	53	ЮЮЗ	2–3	Нет
	Landsat-9	30			Нет
24.04.2024	Нет данных	–	ЮВВ	2–3	–
26.04.2024	Sentinel-2	38	ЮВ	4–6	Нет
29.04.2024	Sentinel-2	48	ЮЗЗ	2–3	Нет
	Landsat-8	71			Нет
30.04.2024	Landsat-9	54	ЮЗЗ	2–3	Нет
01.05.2024	Sentinel-2	69	ЮЗ	2–3	Нет

Из табл. 1 видно, что за 2019 и 2021 гг. по р. Мзымте накоплено наибольшее количество данных, при которых спутниковые изображения были получены в момент проведения подспутниковых измерений. В 2023 и 2024 гг., 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 г. 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 гг. (см. табл. 2). С учётом выбранной сезонности проведения измерений в регионе с засушливым климатом, где редко наблюдается повышенная облачность, обработаны спутниковые данные практически для каждого из дней проведения натурных измерений.

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

Дата	Спутник (синхрон)	Облачность, %	Ветер, направление	Ветер, скорость (в 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 г. (см. табл. 3). Как и на р. Сулак, с преобладанием минимальной облачности в 15–30 % наиболее достоверное сравнение подспутниковых измерений со спутниковыми изображениями было выполнено для 2023 г.

Результаты

Для исследуемых рек Мзымты, Сулак и Терек подготовлены карты распределения полей мутности на основе данных спутников Sentinel-2A, -2B и Landsat-8, -9 за все дни проведения натурных измерений (см. табл. 1–3). В предыдущих исследованиях (Жаданова, Назирова, 2023; Nazirova et al., 2021) было установлено, что полученные по алгоритму Nechad данные хорошо коррелируют с *in situ* измерениями мутности, не превышающими 40 NTU (англ. Nephelometric Turbidity Unit, нефелометрическая единица мутности).

По полученной диаграмме рассеяния мутности в р. Мзымте (рис. 4, см. с. 250) за 2019 и 2022 гг. определяется следующая зависимость: в диапазоне мутности от 0 до 40 NTU алгоритм Dogliotti показывает 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 зависят от действующих метеоусловий. Ветер способствует охлаждению приповерхностного слоя воды, вызывая перемещение более тёплых и менее мутных слоёв ближе к поверхности. Кроме того, ветер влияет на распространение речного выноса, изменяя его площадь с течением времени, поэтому зачастую расположение границ выноса на спутниковых изображениях отличается от границ, описываемых при *in situ* измерениях. Например, для измерений, полученных 23 апреля 2019 г., наблюдается значительный разброс данных относительно линии тренда (см. рис. 4а), в то время как для измерений за 25 апреля 2022 г. отмечается почти идеальная линейная зависимость (см. рис. 4б). Это может быть связано с различиями в гидрометеорологических условиях: скорость ветра достигала 4 м/с в 2019 г., тогда как в 2022 г. она составляла 1,5–2 м/с. Таким образом, увеличение разброса значений мутности на диаграмме распределения наблюдается при скорости ветра выше 2 м/с.

Похожая зависимость выявляется и при определении концентрации взвешенного вещества по спутниковым данным. При существенной разнице в скорости ветра получаются разные значения содержания твёрдых взвешенных частиц SPM (англ. Suspended Particulate Matter). Например, для 23.04.2019 (рис. 5а, см. с. 250) при скорости ветра 4 м/с наблюдается значительное рассеивание значений относительно линии тренда. Напротив, для измерений, полученных 25.04.2022 при пониженной в два раза скорости ветра, прослеживается

явная линейная зависимость (см. рис. 5б). Присутствующие выбросы могут быть обусловлены погрешностями при определении концентрации взвешенного вещества или изменчивостью речного выноса.

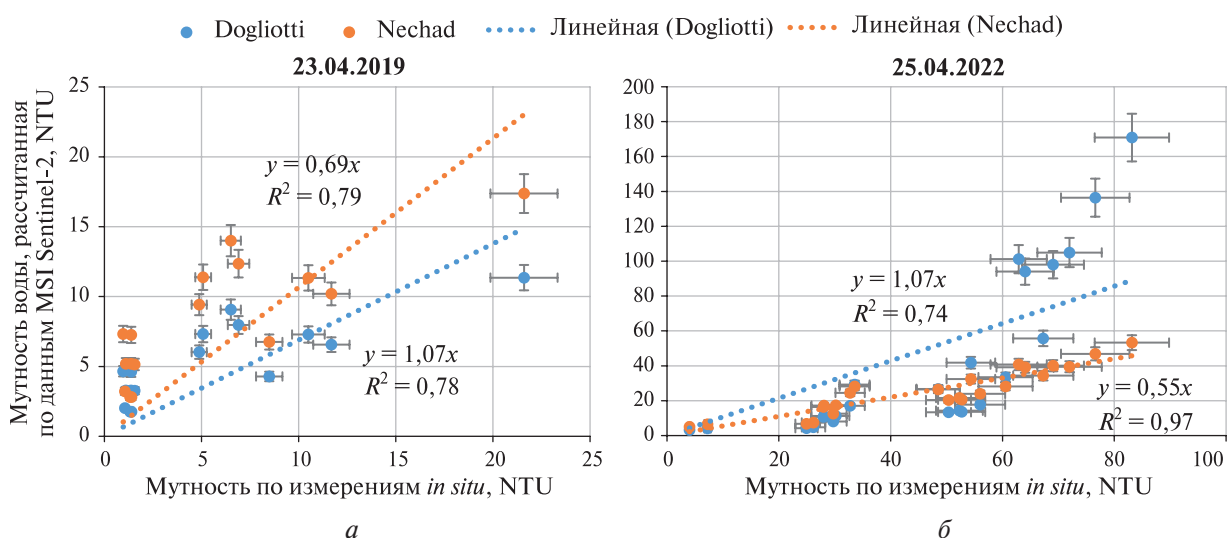


Рис. 4. Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных на основе алгоритмов Dogliotti и Nechad в приустьевой зоне р. Мзымты: а — 23.04.2019; б — 25.04.2022

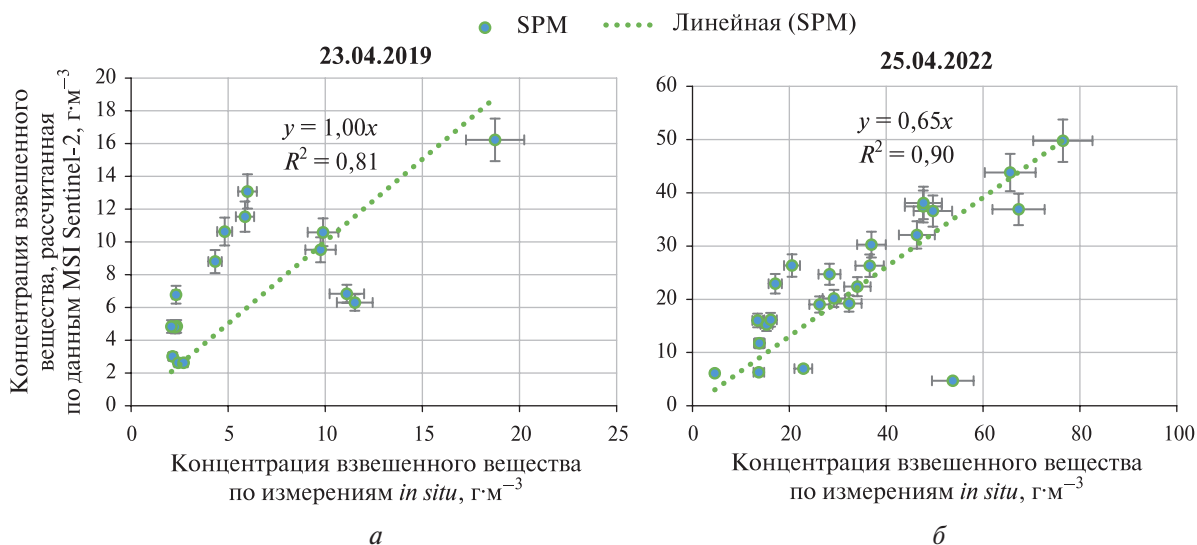


Рис. 5. Диаграмма рассеяния значений концентрации взвешенного вещества, полученных на основе алгоритма Nechad 2015 в приустьевой зоне р. Мзымты: а — 23.04.2019; б — 25.04.2022

При анализе всех накопленных измерений по р. Мзымте было обнаружено, что результаты, полученные с применением алгоритмов Nechad и Dogliotti, существенно отклоняются от *in situ* измерений (рис. 6, см. с. 251). Однако было показано, что алгоритм Nechad является наиболее точным для выноса р. Мзымты при малых скоростях ветра (до 2 м/с). Для алгоритма Dogliotti независимо от метеорологических условий выявлено явное несоответствие получаемых результатов с *in situ* измерениями: в диапазоне 0–40 NTU наблюдается занижение значений; в диапазоне 40–100 NTU — завышение значений на 40–60 NTU.

Для следующего региона исследования — р. Терек, алгоритм Nechad не рекомендуется к применению из-за его низкого порога насыщения, что хорошо показано на рис. 7а (см. с. 251). 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 высокой мутности до 1500 NTU (см. рис. 7б) алгоритм Dogliotti демонстрирует практически линейную зависимость с данными *in situ*, несмотря на значительную погрешность.

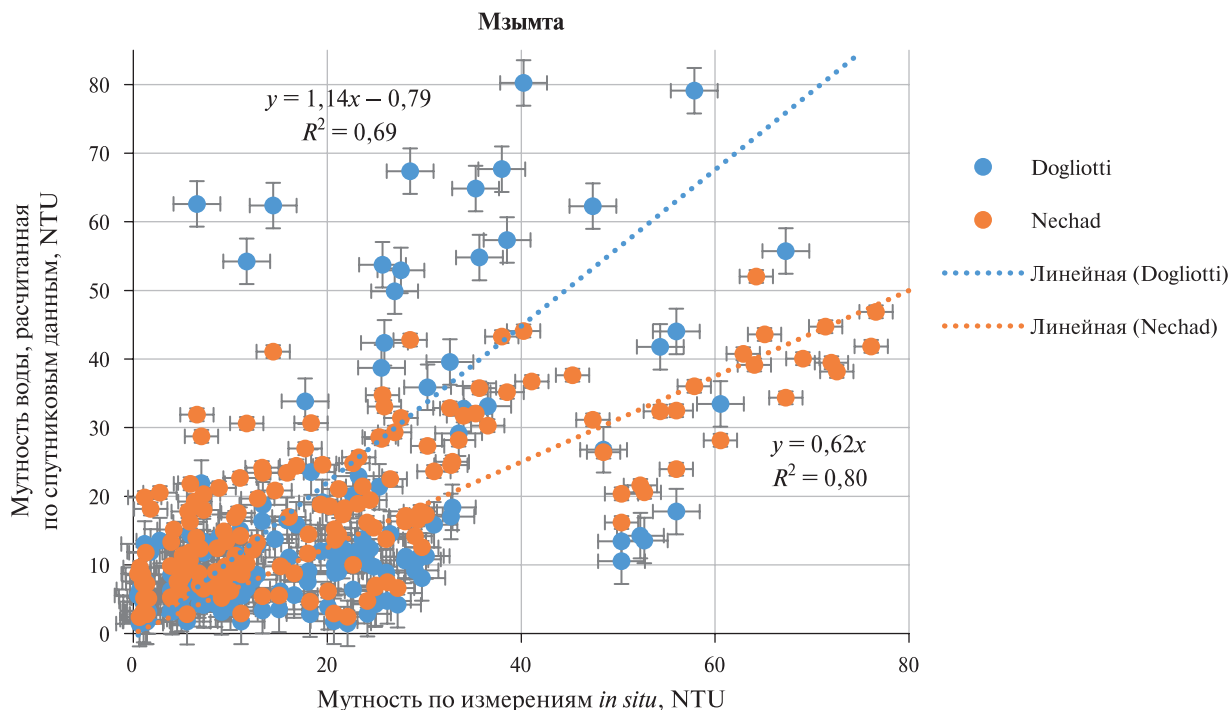


Рис. 6. Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных на основе алгоритмов Dogliotti и Nechad в приустьевой зоне р. Мзымты за весь период наблюдений (2019–2024)

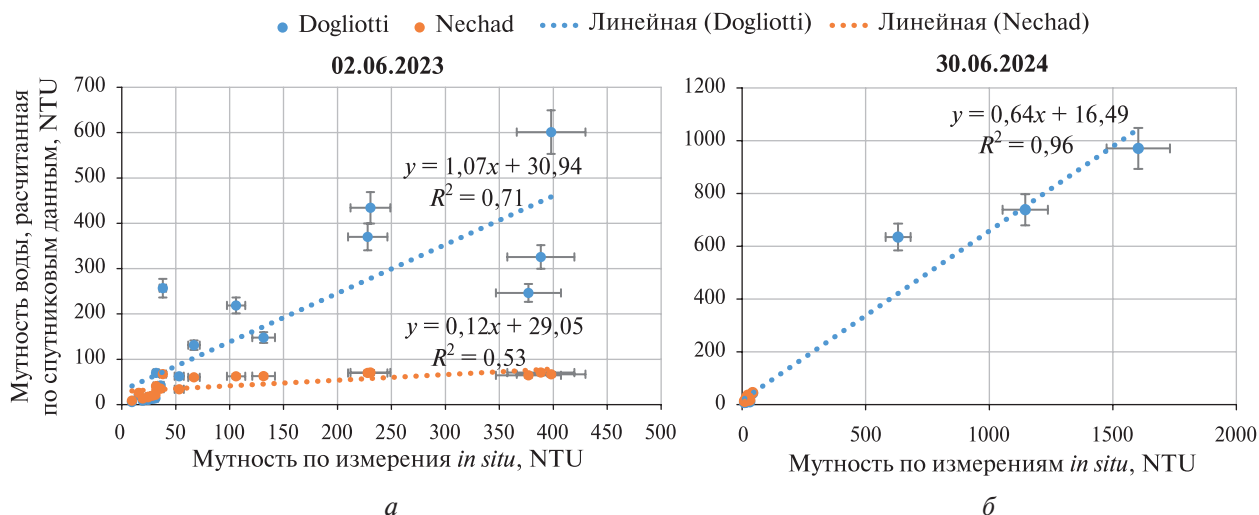


Рис. 7. Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных на основе алгоритмов Dogliotti и Nechad в приустьевой зоне р. Терек: а — 02.06.2023; б — 30.06.2024

Результаты анализа в приустьевой зоне р. Терек за 2022–2024 гг. дополнительно подтвердили, что алгоритм Dogliotti оказывается более предпочтительным для использования при больших значениях мутности, несмотря на его высокую погрешность. При коэффициенте детерминации (R^2) 0,82 наблюдается практически линейная зависимость (рис. 8, см. с. 252).

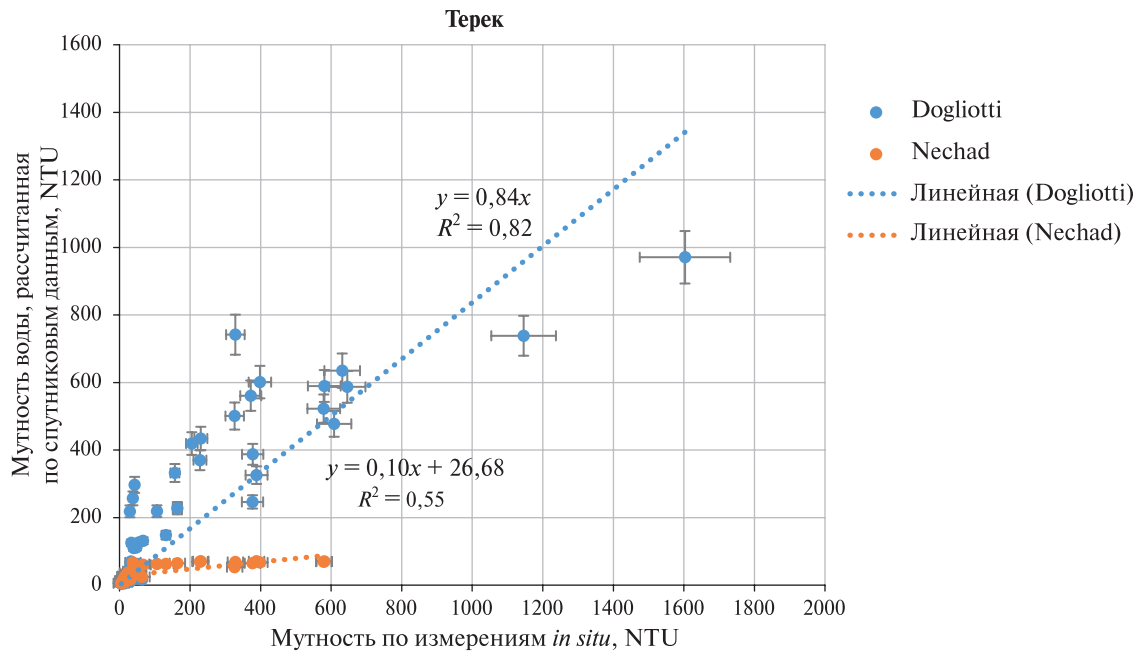


Рис. 8. Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных на основе алгоритмов Dogliotti и Nechad в приустьевой зоне р. Терек за весь период наблюдений (2022–2024)

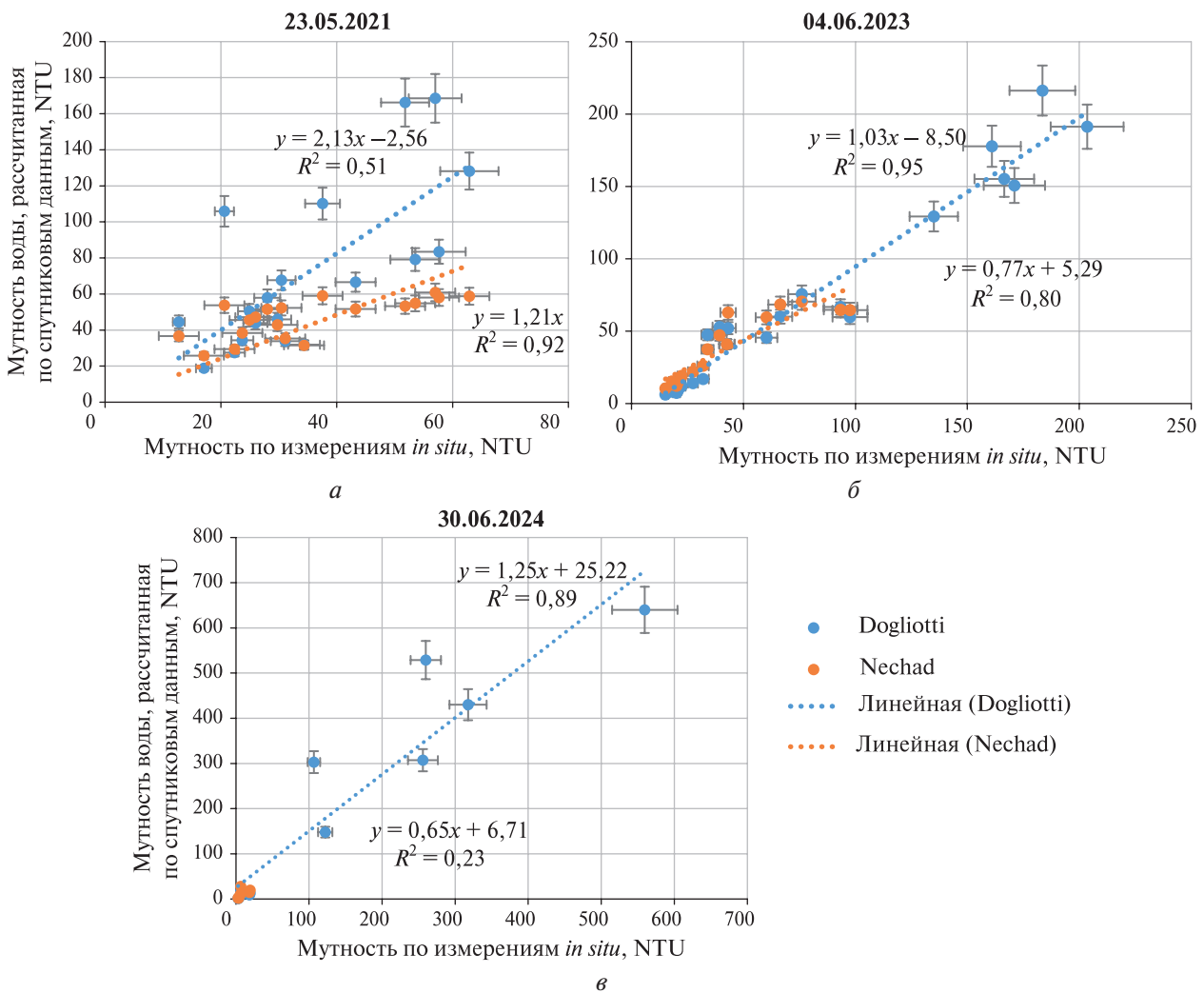


Рис. 9. Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных на основе алгоритмов Dogliotti и Nechad в приустьевой зоне р. Сулак: а — 23.05.2021; б — 04.06.2023; в — 30.06.2024

Полученные результаты исследования приустьевого района р. Сулак дают неоднозначные результаты по распределению мутности. На первый взгляд для данного региона не подходит ни один из используемых алгоритмов. Всё 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 участках подобная изменчивость мутности не была зафиксирована. На *рис. 9* (см. с. 252) представлены примеры полученных значений мутности по алгоритмам Nechad и Dogliotti. В дни измерений, где зафиксирована небольшая мутность в устье р. Сулак, алгоритм Nechad достаточно хорошо коррелирует с подспутниковыми измерениями (см. *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 (см. *рис. 9в*). Кроме того, зафиксированы дни, когда вблизи устья мутность достигает ~250 NTU (см. *рис. 9б*). В последнем случае оба алгоритма, Dogliotti и Nechad, демонстрируют высокую корреляцию с подспутниковыми измерениями.

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

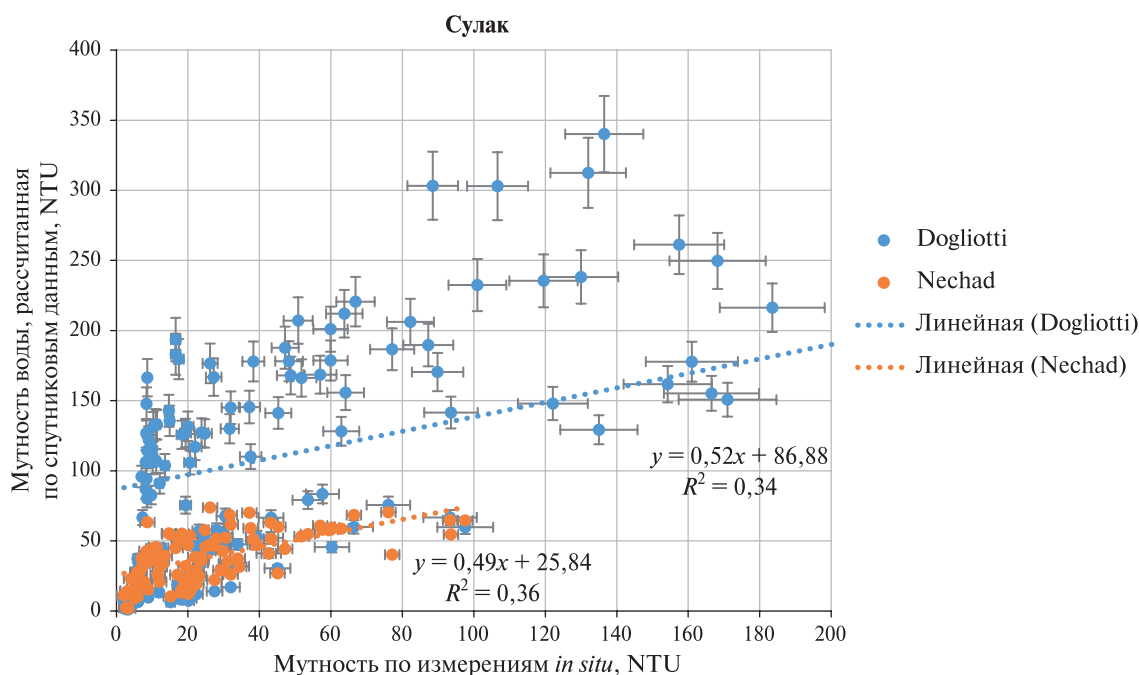


Рис. 10. Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных на основе алгоритмов Dogliotti и Nechad в приустьевой зоне р. Сулак за весь период наблюдений (2021–2024)

При сравнении результатов применения алгоритмов определения поля мутности и концентрации взвешенного вещества для исследуемых областей было отмечено, что алгоритм Nechad обрабатывает эффективно для каждого речного выноса при условии, что мутность не превышает 70 NTU (*рис. 11а*, см. с. 254). В то же время наблюдается некритический разброс значений при пониженном содержании мутности до 20 NTU, который завышает 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 рек Мзымты и Терек (см. *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 возможностью устанавливать содержание взвеси при мутности вблизи устья выше 1000 NTU. Алгоритм расчёта концентрации взвешенного вещества описывает схожую статистику с алгоритмом Nechad для определения поля мутности (см. 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 эффективны при описании нелинейных зависимостей для р. Терек.

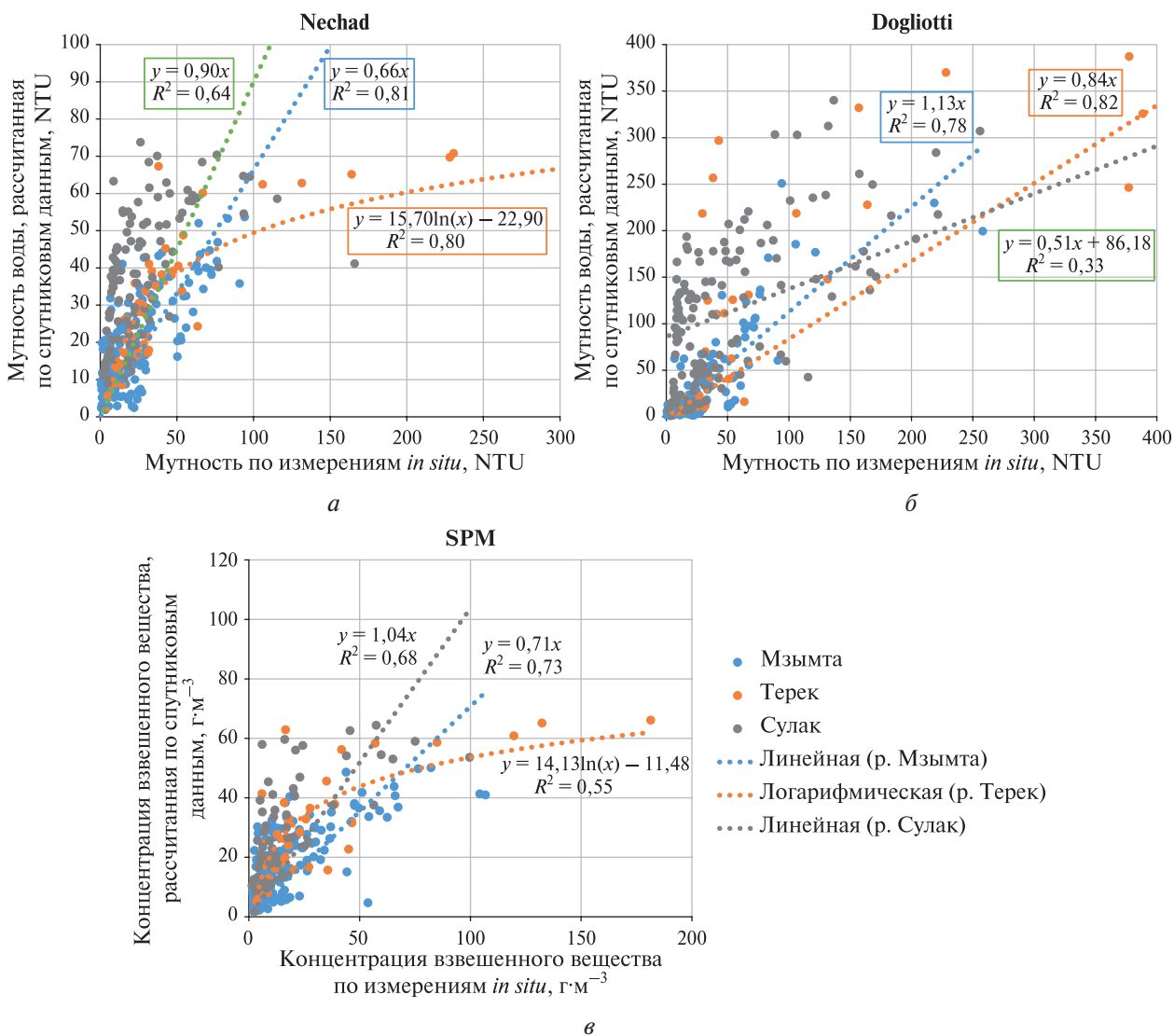


Рис. 11. Диаграмма рассеяния мутности воды (а, б) и концентрации взвешенного вещества (в), полученных в приустьевых зонах р. Мзымты, Терек и Сулак за весь период наблюдений на основе алгоритмов: а — Nechad; б — Dogliotti; в — Nechad SPM

Заключение

В настоящей работе выполнено сравнение результатов применения алгоритмов по определению полей мутности и концентрации взвешенного вещества по спутниковым данным систем Sentinel-2, Landsat-8, -9 с данными натурных измерений. Для оценки распространения реч-

ных выносов на примере Черноморского и Каспийского побережья удалось проверить применимость алгоритмов, входящих в состав ACOLITE, и отобрать наиболее результативные для каждого региона в отдельности. Проверено, что различные алгоритмы с разной степенью точности определяют содержание взвеси в выносе, а натурные измерения сильно зависят от конкретных климатических условий регионов.

Алгоритм Nechad зарекомендовал себя наилучшим образом для районов с небольшой скоростью ветра, однако его применение в областях с высокой мутностью ограничено из-за низкого порога насыщения. Алгоритм Dogliotti, несмотря на значительное рассеивание значений, продемонстрировал наилучшую корреляцию с *in situ* данными при высоких уровнях мутности. Для рек с изменчивыми гидрометеорологическими условиями, таких как Сулак, необходим комплексный подход, учитывающий множество факторов для точного определения мутности воды. Таким образом, алгоритмы Nechad и Dogliotti должны применяться опционально в зависимости от геологических и климатических 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. № 71. 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 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 Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308. DOI: 10.7868/S0030157414030150.
4. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А., Лупян Е. А.* 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. *Лупян 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., 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.
8. *Назирова К. Р., Лаврова О. Ю., Алферьева Я. О., Князев Н. А.* 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.
9. *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 натурных измерений и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 321–332. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-321-332.
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. Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Stochkov 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>.
 15. 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>.
 16. 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>.
 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. 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. 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 matter 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: nkkniazev@cosmos.ru

The paper presents a performance comparison of algorithms for determination of turbidity field and suspended matter concentration of river outflows from optical images of the Sentinel-2 and Landsat-8, -9 satellites. The Mzymta River on the Black Sea coast and the Sulak and Terek rivers flowing into the Caspian Sea were selected as the study areas. The Nechad and Dogliotti algorithms implemented in the ACOLITE software package were used to estimate the parameters of suspended matter in the estuary boundaries of river outflows. The values of turbidity and suspended matter concentration obtained by the algorithms were compared with *in situ* measurements. High correlations were found for different regions when applying the Nechad algorithm at wind speeds of less than 2 m/s. For turbidities above 70 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) or high wind speeds, the algorithm produced values strongly varying from the field measurements. The Dogliotti algorithm performed well for the Mzymta and Terek rivers, but the best fit was achieved at a high turbidity of more than 1000 NTU that was observed only for the Terek River.

Keywords: satellite monitoring, Sentinel, Landsat, *in situ* measurements, water turbidity, suspended matter concentration, ACOLITE, Mzymta, Sulak, Terek

Accepted: 03.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-244-258

References

1. Dzhaoshvili S., *Rivers of the Black Sea, Technical Report, No. 71*, European Environment Agency, 2002, 58 p.
2. 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, V. 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, V. 54, No. 3, pp. 265–280 (in Russian), DOI: 10.1134/S0001437014030151.
4. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Loupian E. A., 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, V. 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., Alferyeva 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, V. 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*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 251–261 (in Russian).
7. 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, V. 16, No. 2, pp. 227–243 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
8. Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Alferyeva Ya. O., Knyazev N. A., Spatiotemporal plume variability of Terek and Sulak rivers from satellite data and concurrent *in situ* measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 285–303 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303.
9. 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*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 321–332 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-321-332.
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, pp. 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, pp. 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, pp. 11613–11622, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.015>.
14. Lavrova O. Yu., 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>.
15. 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, pp. 215–240, <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.2009149>.
16. 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>.

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, pp. 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, pp. 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, pp. 522–533, DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
20. 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, pp. 29948–29965, <https://doi.org/10.1364/OE.397456>.