

Влияние выбора данных спутников Landsat-8/9 и Sentinel-2A/2B на результаты определения мутности воды в приустьевых зонах рек

П. Д. Жаданова, О. Ю. Лаврова

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: zhadanova.polina@gmail.com

Изучение количественных характеристик физических и оптических свойств моря с использованием спутникового дистанционного зондирования стоит в ряду приоритетных направлений в области океанологических исследований. Особое внимание уделяется анализу влияния данных, получаемых разными спутниковыми системами, на точность и достоверность количественных характеристик. В рамках нашего исследования проведено сопоставление результатов определения мутности воды на основе синхронно полученных данных приборами OLI/OLI-2 (*англ.* Operational Land Imager), установленными на спутниках Landsat-8/9, и MSI (*англ.* MultiSpectral Instrument) спутников Sentinel-2A/2B. Для определения значений мутности применялись алгоритмы Dogliotti 2015 и Nechad 2016, входящие в программный комплекс ACOLITE. В качестве тестовых районов были выбраны приустьевые зоны рек Мзымта и Риони, впадающих в Чёрное море, и Терек и Сулак, впадающих в Каспийское море. Выборка дней с синхронными пролётами спутников Landsat-8/9 (OLI/OLI-2) и Sentinel-2A/2B (MSI) в различные периоды позволила охватить широкий спектр значений мутности воды и оценить, как выбор спутниковых данных влияет на итоговые результаты обработки. Анализ диаграмм рассеяния значений мутности воды, полученных по одним и тем же алгоритмам, но по данным с различных спутников, показал, что имеется линейная зависимость с коэффициентами детерминации выше, чем 0,95. Наблюдаемая высокая корреляционная зависимость между результатами для двух спутниковых аппаратов показывает, что для данных районов выбор спутника не даёт значительных различий в окончательных результатах. Следует отметить, что в среднем, если значения мутности не превышают 100 NTU, результаты, получаемые по данным OLI/OLI-2 Landsat-8/9, несколько выше, чем по данным MSI Sentinel-2A/2B. При мутности выше 100 NTU наблюдается обратная картина: завышение значений, полученных при использовании данных с MSI, по сравнению с результатами с OLI/OLI-2. Сделанный вывод необходимо учитывать в дальнейших исследованиях при работе с данными различных сенсоров.

Ключевые слова: мутность воды, приустьевые зоны, ACOLITE, MSI Sentinel-2, OLI/OLI-2 Landsat-8/9, Каспийское море, Терек, Сулак, Чёрное море, Мзымта, Риони

Одобрена к печати: 17.06.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-244-265

Введение

Контроль экологического состояния прибрежных акваторий входит в число приоритетных задач океанологии. Поступление речных вод в морские акватории играет важную роль в физических, химических и биологических процессах в океане, особенно в шельфовых районах, будучи основным источником взвешенных и растворённых терригенных и биогенных веществ, а также антропогенного загрязнения. Области распространения распреснённых вод в море успешно выявляются на спутниковых изображениях, полученных сенсорами оптического диапазона (Dzwonkowski, Yan, 2005; Johnson et al., 2001; Lavrova et al., 2016; Osadchiev, Sedakov, 2019). Список подобных работ может быть существенно продолжен. На основе анализа этих изображений возможно восстановление информации о форме плюма, его площади, направлении распространения, наличии/отсутствии фронтальной границы и пр. Под термином плюм подразумеваются мезомасштабные или субмезомасштабные структуры, которые образуются при попадании материковых вод в море, они выделяются пониженной солёностью и отличной от окружающей воды температурой, а также, как правило, повышенной мут-

ностью, высоким содержанием взвеси и растворённой органики (Завьялов и др., 2014). Эта информация может быть в дальнейшем валидирована сравнением с результатами подспутниковых экспериментов, а также положена в основу гипотез для описания динамики процесса распространения речных вод в море и использована для численного моделирования и уточнения моделей (Завьялов и др., 2014; Falcieri et al., 2013; Reul et al., 2014). Существует ряд исследований по верификации результатов спутниковых наблюдений с помощью результатов квазисинхронных натуральных измерений (Лаврова и др. 2022; Abascal-Zorrilla et al., 2020; Nazirova et al., 2021; Ouillon et al., 1997). Этот далеко не полный перечень показывает, что подобные работы ведутся в различных регионах мира и свидетельствует об их важности. Сложность заключается в отсутствии единой методики исследования. Совместный сравнительный анализ комплексных методов (данных дистанционного зондирования и натуральных измерений) восстановления количественных характеристик поля мутности морской воды и концентрации взвешенных веществ особенно актуален в эпоху развития методов спутникового зондирования, направленных на получение не только качественной информации (что успешно достигалось в последние годы), но и точных количественных значений. Ранее количественные значения определялись по данным оптических сенсоров, предоставляющих информацию с разрешением в несколько сотен метров. Такая точность неприемлема для прибрежных зон, особенно для плуомов рек, в которых резкие изменения происходят на малых пространственных масштабах. Количественные оценки мутности морской воды и концентрации взвешенного вещества могут быть получены по данным спутникового дистанционного зондирования с использованием различных алгоритмов, которые, строго говоря, должны учитывать множество факторов, в том числе меняющийся химический состав морской воды, прибрежных шельфовых вод, поступление распреснённых вод из эстуариев и рек, геометрические характеристики параметров спутникового зондирования в данный момент, свойства орбитальной аппаратуры, текущие климатические условия в районе исследований и многое другое (García Verdeal et al., 2002; Kopelevich et al., 2007; Lavrova et al., 2016; Ou et al., 2009). Поэтому необходимо проводить сравнение и верификацию различных алгоритмов для конкретных регионов и условий. Отдельными научными группами разрабатываются региональные алгоритмы, которые учитывают большинство региональных особенностей. В нашей стране успешной разработкой региональных алгоритмов занимаются в Лаборатории оптики океана Института океанологии им. П. П. Шишова РАН (ИО РАН) (Копелевич и др., 2006).

В предыдущих работах нашего коллектива (Жаданова, Назирова, 2023; Лаврова и др., 2022; Назирова и др., 2019; 2023; Nazirova et al., 2021) проводились сравнение и верификация различных алгоритмов, входящих в программный комплекс ACOLITE (см. разд. «Данные и методы») для плуомов рек Мзымта, Сулак и Терек. Алгоритмы, входящие в ACOLITE, предназначены, в частности, для использования данных спутников Landsat-8/-9 и Sentinel-2B. Цель данной статьи — провести сравнение значений мутности воды, получаемых в одно и то же время по одним и тем же алгоритмам для одних и тех же районов, но по данным с разных спутников.

Районы исследования

Для проведения исследования было выбрано четыре района, два из которых располагаются в прибрежных зонах Чёрного моря, два — Каспийского моря. Первый район — приустьевая зона р. Мзымты, которая впадает в Чёрное море в районе Адлера (рис. 1, см. с. 246), а её исток находится на склонах Главного Кавказского хребта. Длина р. Мзымты достигает 89 км, а водосборный бассейн составляет 885 км² (Джаошвили, 2002). Из-за развитой инфраструктуры, размещённой по берегам р. Мзымты, её воды испытывают потенциально сильное антропогенное воздействие. В то же время устье реки находится в одной из самых популярных российских рекреационных зон на берегу Чёрного моря. Поэтому необходимо проводить регулярный мониторинг данного района для оценки степени влияния активной рекреационной деятельности на прибрежную экосистему (Nazirova et al. 2021).



Рис. 1. Приустьевая зона р. Мзымты. Фрагмент изображения MSI Sentinel-2B от 15 апреля 2023 г.



Рис. 2. Приустьевая зона р. Сулак. Фрагмент изображения MSI Sentinel-2A от 12 июня 2022 г.

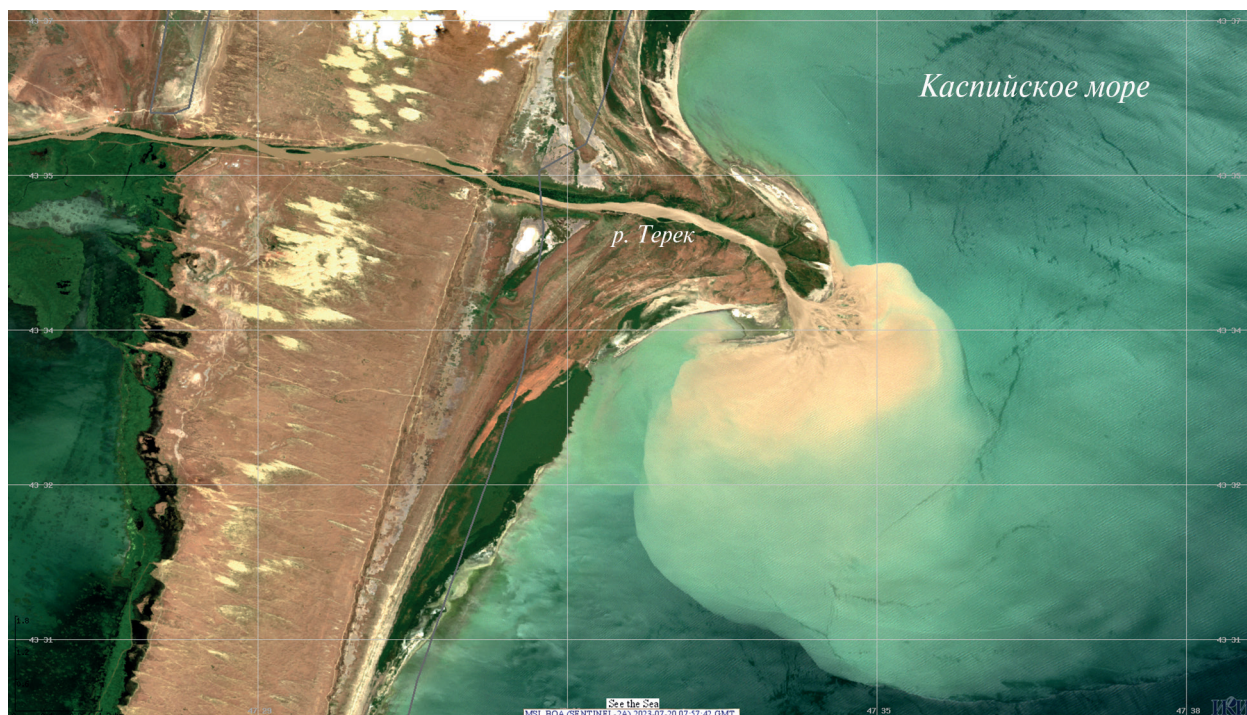


Рис. 3. Приустьевая зона р. Терек. Фрагмент изображения MSI Sentinel-2A от 20 июля 2023 г.

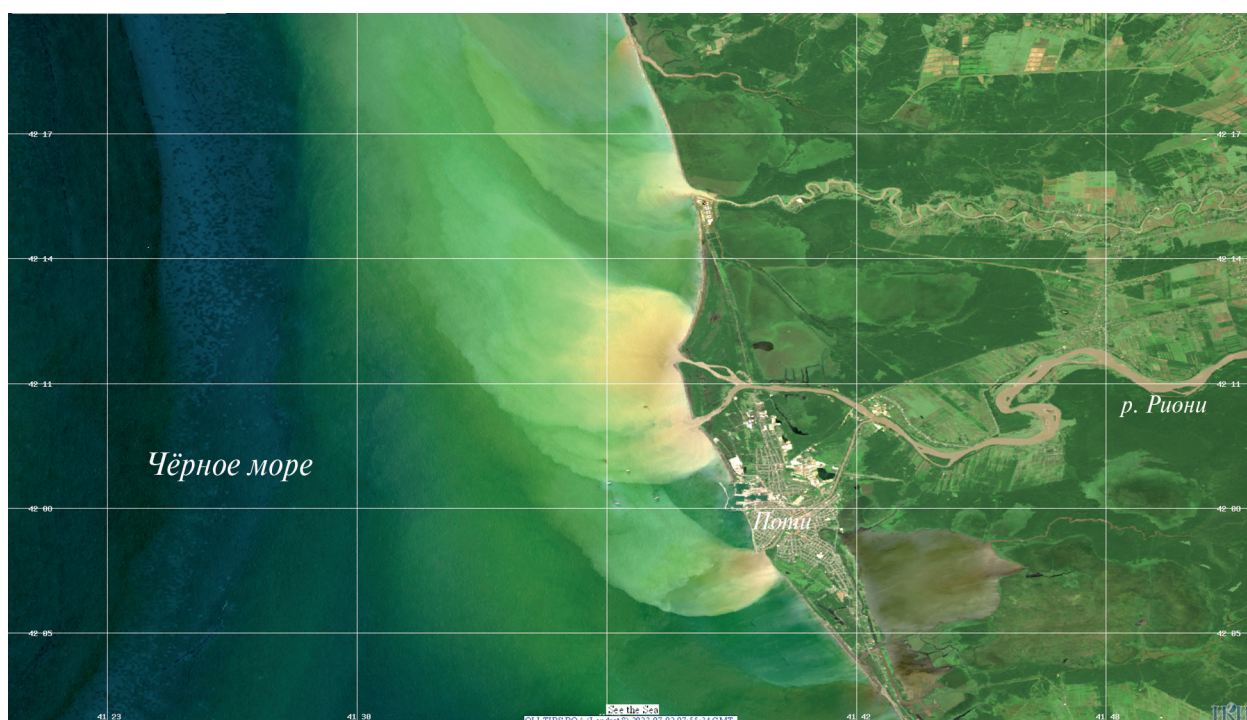


Рис. 4. Приустьевая зона р. Риони. Фрагмент изображения OLI Landsat-8 от 2 июля 2023 г.

Следует отметить, что в районе устья р. Мзымты много лет проводились исследования сотрудниками ИО РАН (Завьялов и др., 2014; Хлебников и др., 2017), а нами ежегодно, начиная с 2018 г. проводятся подспутниковые измерения, направленные, в частности, на определение мутности и концентрации взвешенного вещества в зоне влияния речных вод (Назирова и др., 2019; Lavrova et al., 2021; Nazirova et al. 2021).

Реки Сулак и Терек, впадающие в Каспийское море в Республике Дагестан, берут начало в горах Большого Кавказа и протекают по Прикаспийской низменности (рис. 2, см. с. 246; рис. 3, см. с. 247). Протяжённость р. Сулак — 169 км (336 км с р. Андийское Койсу), площадь водосборного бассейна — 15 200 км² (<http://textual.ru/gvg/index.php?card=173686>). На р. Сулак расположен каскад ГЭС: Миатлинская, Чирюртские и самая большая из них Чиркейская. Протяжённость р. Терек — 623 км, площадь бассейна — 43 200 км² (<https://textual.ru/gvg/index.php?card=173165&bo=7&rb=83&subb=0&her=0&wot=21&name=&loc=>). Она впадает в Каспийское море, образуя широкую дельту. Из-за развития внутреннего туризма в Республике Дагестан возросла необходимость экологического контроля выносов этих двух рек. Начиная с 2021 г. нами ежегодно проводились подспутниковые измерения в приустьевых зонах рек Терек и Сулак, чего до нас ещё никто не делал (Лаврова и др., 2022; 2023; Назирова и др., 2023).

Для расширения территории проводимого исследования был выбран также район, в котором ранее не проводились подспутниковые измерения, но осуществлялся спутниковый мониторинг (Лаврова и др., 2016; Lavrova et al., 2016). Это район дельты р. Риони (рис. 4, см. с. 247). Риони — одна из крупнейших рек западной Грузии. Её протяжённость составляет 327 км, площадь бассейна достигает 13 400 км². Река берёт начало на южном склоне Кавказского хребта, течёт по Колхидской низменности и впадает в Чёрное море у г. Поты. При впадении в Чёрное море Риони образует дельту. Основная часть стока (до 90 %) сбрасывается в море по каналу, сооружённому в 1939 г. в целях предохранения г. Поты от затопления во время больших паводков. Средний годовой сток Риони составляет: через северную дельту — 9,62 км³ и через южный рукав — 3,75 км³. Сток наносов в Чёрное море достигает 6,9 млн м³ в год. Из-за смешанного питания реки — ледникового и дождевого (Колхидская низменность, через которую протекает Риони, знаменита повышенной влажностью и обильными осадками круглый год, в среднем до 1500 мм) — уровень воды в реке повышается несколько раз в году. Средний расход воды в устье 405 м³/с. Воды Риони отличаются большой мутностью, весной до 2650 г/м³ (Джаошвили, 2002).

Данные и методы

Спутниковые данные

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

Данные с аппаратов Landsat-8/9 — это цифровые значения электромагнитного излучения в разных спектральных каналах. Данные проходят радиометрическую и геометрическую коррекцию. В настоящей работе использованы данные уровня Collection2, доступные на сайте <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Спутник Landsat-9 был запущен 27 сентября 2021 г. На его борту установлены два прибора: OLI-2 и TIRS-2. Конструкция OLI-2 — копия сенсора OLI спутника Landsat-8: прибор обеспечивает получение изображений, соответствующих спектральным, пространственным, радиометрическим и геометрическим характеристикам предыдущих спутников Landsat. Инструмент OLI-2 предоставляет также данные в девяти спектральных диапазонах (1–9, табл. 1) с максимальным разрешением на местности 30 м как по траектории, так и в поперечном направлении для всех диапазонов кроме панхроматического, пространственное разрешение которого составляет 15 м. Сенсор OLI-2 имеет как внутренние источники калибровки для обеспечения радиометрической точности и стабильности, так и возможность проведения солнечной и лунной калибровки. Тепловой инфракрасный датчик TIRS-2 спутника Landsat-9 принимает тепловое излучение, испускаемое поверхностью Земли, в двух тепловых инфракрасных диапазонах (10-й и 11-й спектральные каналы, табл. 1), используя ту же технологию, что и TIRS спутника Landsat-8, однако TIRS-2 является улучшенной версией TIRS как в отношении класса риска прибора, так и в отноше-

нии конструкции для минимизации паразитного света. Пространственное разрешение данных прибора TIRS-2 как по траектории, так и в поперечном направлении составляет 100 м для обоих диапазонов. Прибор TIRS-2 имеет внутренний источник калибровки по чёрному телу.

Основные параметры приборов, установленных на спутниках Landsat-8/9 и Sentinel-2, представлены в *табл. 1*.

Таблица 1. Основные параметры приборов, установленных на спутниках Landsat-8/9 и Sentinel-2

OLI/OLI-2, TIRS/TIRS-2 Landsat-8/9			MSI Sentinel-2		
Каналы	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Каналы	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м
1	0,43–0,45	30	1	0,43–0,45	60
2	0,45–0,51		2	0,46–0,52	10
3	0,53–0,59		3	0,54–0,58	20
4	0,64–0,67		4	0,65–0,68	
5	0,85–0,88		5	0,70–0,71	
6	1,57–1,65		6	0,73–0,75	
7	2,11–2,29		7	0,77–0,93	
8*	0,50–0,68	15	8	0,79–0,90	10
9	1,36–1,38	30	8A	0,86–0,88	20
10	10,6–11,19	100	9	0,94–0,96	60
11	11,50–12,51		10	1,37–1,40	20
			11	1,57–1,66	
		12	2,10–2,28		

* Панхроматический канал.

Таблица 2. Синхронные спутниковые данные, используемые в исследовании

Район исследования	Дата	Спутник, время пролёта (UTC)	
Мзымта	25.04.2022	Landsat-9, 08:01:29	Sentinel-2A, 08:27:36
	16.07.2023	Landsat-8, 08:07:37	Sentinel-2A, 08:18:07
	27.09.2023	Landsat-8, 08:01:51	Sentinel-2A, 08:27:43
Риони	18.07.2023	Landsat-8, 07:55:39	Sentinel-2B, 08:07:35
	27.08.2023	Landsat-9, 07:55:51	Sentinel-2B, 08:08:19
	14.10.2023	Landsat-9, 07:56:10	Sentinel-2A, 08:17:58
Терек	31.05.2022	Landsat-9, 07:36:32	Sentinel-2B, 07:57:25
	22.07.2023	Landsat-8, 07:30:33	Sentinel-2B, 07:47:53
	06.08.2023	Landsat-9, 07:36:46	Sentinel-2A, 07:47:42
Сулак	31.05.2022	Landsat-9, 07:36:32	Sentinel-2B, 07:57:53
	22.07.2023	Landsat-8, 07:30:33	Sentinel-2B, 07:47:53
	06.08.2023	Landsat-9, 07:36:46	Sentinel-2A, 07:47:53

Примечание: UTC — *англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время.

Данные спутников Sentinel-2 — результат съёмки поверхности Земли мультиспектральными датчиками MSI, установленными на двух спутниках Sentinel-2A и Sentinel-2B. Данные предоставляются в 13 спектральных каналах с уровнем обработки L1C, т.е. являются данными, представленными в виде альbedo на верхней границе атмосферы (*англ.* Top-Of-

Atmosphere Reflectance) с выполненной радиометрической и геометрической коррекцией. Информация с Sentinel-2 доступна на платформе <https://scihub.copernicus.eu/>.

Для сопоставления результатов количественных данных, полученных с помощью обработки спутниковых данных, используется библиотека netCDF Python (<https://unidata.github.io/netcdf4-python/>), которая позволяет работать с выходными файлами программного комплекса ACOLITE. С её помощью проводилось попиксельное сравнение результатов обработки синхронных изображений, полученных со спутников OLI/OLI-2 Landsat-8/9 и MSI Sentinel-2A/2B. Алгоритмы расчёта мутности воды используют следующие каналы: 4-й и 5-й для Landsat-8/9 и 4-й и 8-й для Sentinel-2A/2B. Поскольку разрешение данных этих каналов различается: OLI/OLI-2 Landsat-8/9 имеет разрешение 30 м, а MSI Sentinel-2A/2B — 10–20 м, то данные MSI Sentinel-2A/2B были усреднены и приведены к разрешению в 30 м.

Для сравнения результатов, получаемых по одним и тем же алгоритмам, были отобраны данные для следующих дат синхронных пролётов спутников (табл. 2).

Алгоритмы

Программная среда ACOLITE является универсальной для обработки и анализа спутниковых данных, полученных различными датчиками. Она разработана в Королевском бельгийском институте естественных наук (*англ.* Royal Belgian Institute of Natural Sciences — RBINS), основана на работах группы исследователей во главе с доктором Бушрой Нечад (*англ.* Bouchra Nechad) и подробно описана в публикации (Nechad et al., 2010). По фамилиям их создателей и годам публикаций можно назвать входящие в ACOLITE алгоритмы Nechad 2009, Nechad 2016 и Dogliotti 2015 (Nechad et al., 2009, 2015; Dogliotti et al., 2015), которые использовались в данной работе. Алгоритмы, входящие в программный комплекс ACOLITE специально разработаны для морских, прибрежных и внутренних вод и поддерживают обработку данных со спутников Landsat-5/7/8/9 и Sentinel-2A/2B, а также Pléiades и PlanetScope (Dogliotti et al., 2015; Nechad et al., 2015).

Важный этап подготовки данных для получения количественных характеристик — проведение атмосферной коррекции. В состав комплекса ACOLITE входят инструменты для атмосферной коррекции (Vanhellemont, 2020), которые могут быть настроены для выполнения различных задач, включая устранение бликов. Для более правдоподобной оценки получаемых результатов обработки было решено использовать спутниковые данные уровня L1 — откалиброванные цифровые значения с выполненным устранением искажений сенсора и геометрической коррекцией искажений перспективы и неровностей рельефа. Выбор данных уровня L1 был сделан с целью исключить влияние различных результатов, так как стандартные алгоритмы атмосферной коррекции для сенсоров OLI/OLI-2 Landsat-8/9 и MSI Sentinel-2A/2B различаются и могут оказывать существенное влияние на получаемые результаты. Поэтому были отобраны данные первого уровня перечисленных сенсоров и к ним был применён единый метод учёта влияния атмосферы. В программном комплексе ACOLITE реализованы два метода атмосферной коррекции: Dark Spectrum Fitting (DSF) и более ранний Exponential extrapolation (EXP) (Vanhellemont et al., 2015, 2016). Поскольку во многих зарубежных исследованиях (Varreneche et al., 2023; Maciel, Pedocchi, 2022; Vanhellemont, 2020) утверждается, что метод DSF даёт результаты на порядок лучше алгоритма EXP, то в рамках данной работы был использован именно он.

В программный комплекс ACOLITE также включён набор алгоритмов для определения различных физических параметров, таких как мутность воды, концентрация взвешенных веществ, содержание хлорофилла *a*, вегетационный индекс и другие показатели.

В представленных в данной статье исследованиях по определению мутности воды были использованы алгоритмы Nechad 2016 и Dogliotti 2015. В предыдущих наших статьях (Жаданова, Назирова, 2023; Lavrova et al., 2021), посвящённых валидации вышеупомянутых алгоритмов на основе измерений *in situ*, было выявлено, что они дают неплохие результаты для вод в рассматриваемых нами районах.

Алгоритм Nechad 2016 (Nechad et al., 2009) является универсальным для расчёта мутности морской воды. Этот алгоритм строится на основе расчёта мутности с использованием коэффициента спектральной яркости воды на длине волны ~ 681 нм (4-й канал для Landsat-8/9, 4-й канал для Sentinel-2A/2B), что позволяет ему достаточно точно определять мутность в слабо- и среднезамутнённых водах:

$$T = \frac{A_T \rho_w}{1 - \rho_w / C},$$

где C и A_T — калибровочные коэффициенты, значения которых приведены в работах (Nechad et al., 2009; Dogliotti et al., 2015); ρ_w — коэффициент спектральной яркости поверхности; T — мутность воды.

У этого алгоритма есть существенный недостаток. Он не подходит для использования в сильно замутнённых водах, так как при высоких значениях спектрального коэффициента яркости достигает своего порога насыщения и даёт нечисловые значения. Поэтому в водах с высоким значением мутности был использован алгоритм Dogliotti 2015, он представляет собой улучшенный алгоритм Nechad 2016 и использует вместо одного канала два: 645 и 859 нм (4-й и 5-й каналы для Landsat-8/9, 4-й и 8-й каналы для Sentinel-2A/2B) (Dogliotti et al., 2015). Это позволяет сдвинуть порог насыщения и получать результаты для сильно замутнённых вод. Данный алгоритм работает следующим образом. Вычисляется мутность по алгоритму Nechad 2016 для двух длин волн отдельно. Далее результаты «склеиваются» с помощью линейной весовой функции (изменяющейся в пределах от 0 до 1), которая применялась к смоделированному показателю мутности для $\rho_w(645)$ в диапазоне от 0,05 до 0,07. Таким образом, значения спектральной полосы 645 нм используются, когда $\rho_w(645) < 0,05$, а полосы 859 нм — когда $\rho_w(645) > 0,07$:

$$T = (1 - w)T^{645} + wT^{859},$$

где T^{645} — мутность, рассчитанная с использованием канала, соответствующего длине волны ~ 645 нм, по алгоритму Nechad 2016; T^{859} — мутность, рассчитанная с использованием канала, соответствующего длине волны ~ 859 нм, по алгоритму Nechad 2016; w — весовая функция.

Благодаря такому решению, данный алгоритм показывает высокую корреляцию с результатами *in situ* в средне и сильно мутных водах (Лаврова и др., 2022; Жаданова, Назирова, 2023; Maciel, Pedocchi, 2022).

Методика обработки спутниковых данных

В данном исследовании перед нами стояла задача сравнить результаты обработки спутниковых изображений, полученных с разных аппаратов. Для каждого исследуемого региона было выбрано несколько дней, различающихся интенсивностью выноса, с целью получить картину для разных диапазонов значений мутности. Важно было сравнить значения мутности, полученные по данным Landsat и Sentinel в водах с различной мутностью, и оценить корреляционную картину. Для достижения поставленных задач было выделено несколько полигонов (ячеек) на каждом из спутниковых изображений таким образом, чтобы в пределах каждой ячейки значения мутности воды были сопоставимы. Площадь каждого полигона составляла 180 м^2 , что соответствует зоне размером 6×6 пикселей при разрешении одного пикселя 30 м. В каждом исследуемом районе в зависимости от интенсивности выноса реки было отобрано от трёх до пяти ячеек, охватывающих участки с высокой степенью мутности у устьев, воды в шлейфе и относительно чистые воды за пределами плюма (рис. 5, см. с. 252). Для каждого полигона были применены алгоритмы Nechad 2016 и Dogliotti 2015 для синхронных данных Landsat-8/9 и Sentinel-2. Это позволило не только сравнивать полученные значения мутности в пределах каждой отдельной ячейки для различных диапазонов мутности, но и провести комплексное сравнение по всем ячейкам, чтобы выявить корреляционные характеристики результатов, полученных на основе данных с разных спутников по всему спектру наблюдаемой мутности воды.

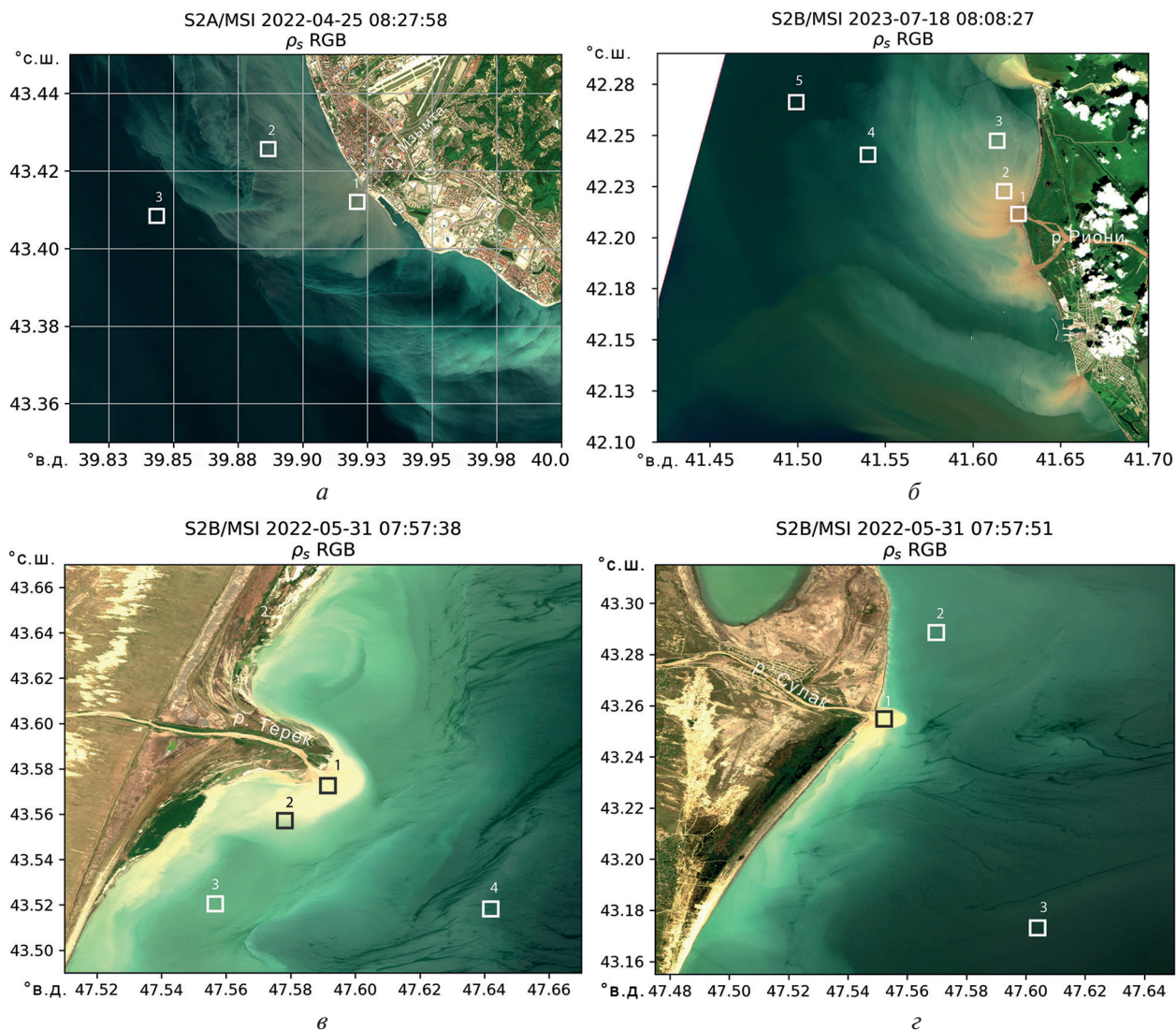


Рис. 5. Расположение полигонов в каждом исследуемом районе:
 а — р. Мзымта; б — р. Риони; в — р. Терек; г — р. Сулак

Результаты

Для каждого исследуемого района во все изучаемые дни были построены карты мутности, диаграммы рассеяния, отражающие корреляционные связи между показаниями спутников Landsat-8/9 и Sentinel-2 (как для отдельных ячеек, так и для всего диапазона мутности воды). Были рассчитаны следующие статистические характеристики: среднее абсолютное отклонение (англ. Mean Average Difference — MAD), среднее абсолютное относительное отклонение (англ. Mean Absolute Relative Difference — MARD), среднее квадратичное отклонение (англ. Root Mean Squared Difference — RMSD), которые являются критериями оценки качества расчёта мутности для разных сенсоров.

Учитывая, что для каждого исследуемого района была обнаружена схожая закономерность, в данной статье представлены результаты для одного характерного дня для каждого района.

Плюм реки Мзымты

Для р. Мзымты были построены карты распределения мутности по данным спутников Sentinel-2A и Landsat-8/9 (табл. 2). В качестве примера приведены результаты обработки

изображений за 25.04.2022 для данного исследуемого района (рис. 6), где максимальное значение мутности по алгоритмам Nechad 2016 и Dogliotti 2015 достигает 45 и 100 NTU (англ. Nephelometric Turbidity Unit, нефелометрическая единица мутности) соответственно. По данным измерений *in situ* на ближайшей к устью станции значение мутности в приповерхностном слое составило 84 NTU. Было выбрано по три ячейки на каждое изображение: зона чистой воды, зона со средней мутностью и зона вблизи устья реки (см. рис. 5а). Как было выявлено в результате наших предыдущих исследований (Жаданова, Назирова, 2023; Nazirova et al., 2021), в случаях высоких значений мутности (более 50–60 NTU) наилучшие результаты даёт применение алгоритма Dogliotti 2015. При небольших значениях мутности (~40 NTU и ниже) следует использовать алгоритм Nechad 2016 независимо от того, каким сенсором получены спутниковые данные. Анализ полученных карт мутности (см. рис. 6) показывает, что качественная картина для каждого алгоритма, но для разных спутниковых данных идентична. Но результаты, полученные для разных алгоритмов для одних и тех же спутников, сильно разнятся.

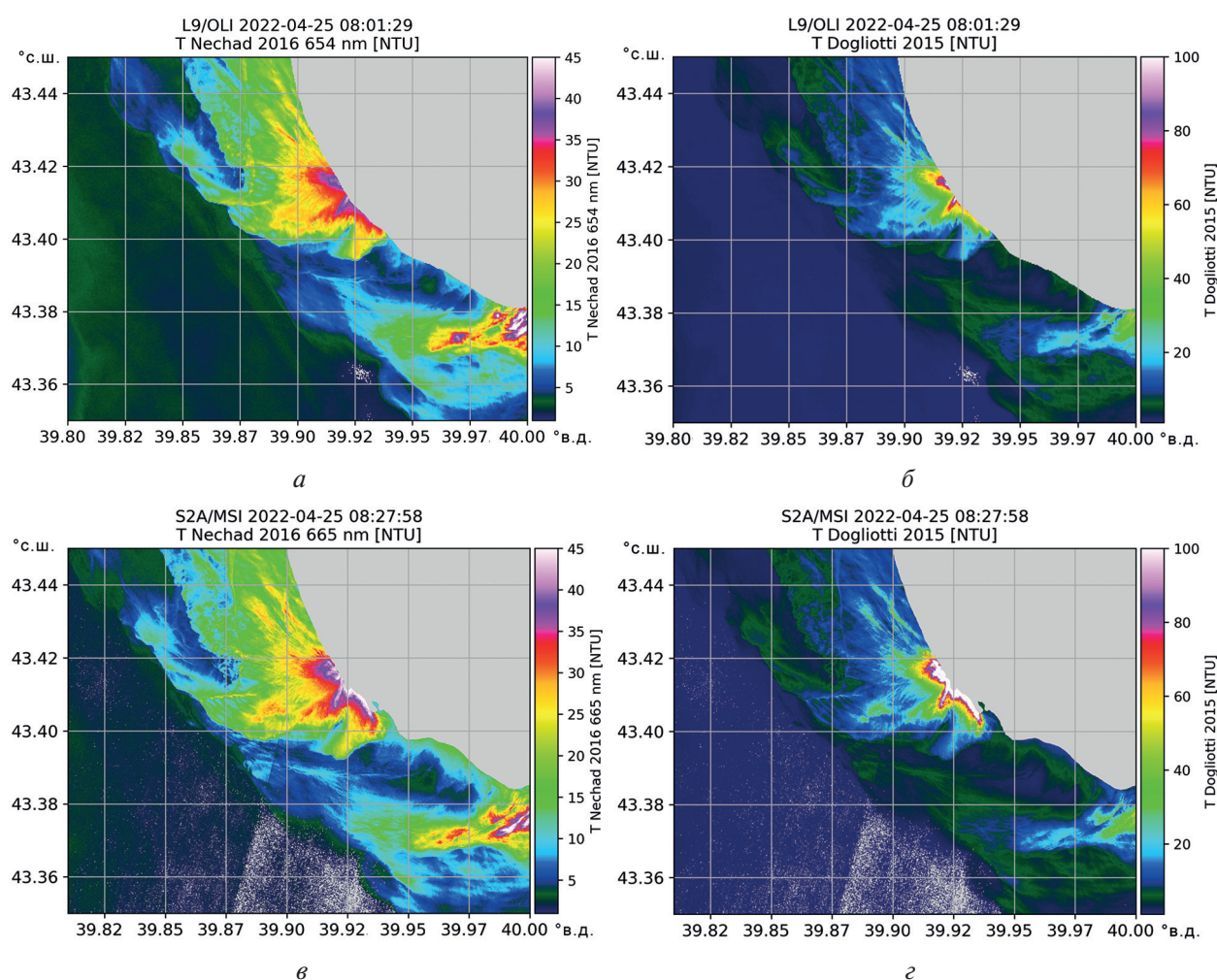


Рис. 6. Карты мутности воды в приустьевой зоне р. Мзымты, полученные на основе применения алгоритмов Nechad 2016 (а, в) и Dogliotti 2015 (б, г) к данным OLI-2 Landsat-9 (а, б) и MSI Sentinel-2A (в, г) за 25.04.2022

При рассмотрении диаграмм рассеяния по всему диапазону мутностей (рис. 7), т.е. для всех ячеек, наблюдается линейная зависимость между результатами для двух спутниковых сенсоров с коэффициентом детерминации R^2 равном 0,95 и 0,98 для алгоритмов Nechad 2016 и Dogliotti 2015 соответственно. По данным сенсора OLI-2 мутность воды оказалась выше,

чем по данным сенсора MSI, что особенно заметно при низких значениях мутности (см. рис. 7). Подобный факт должен приниматься во внимание при использовании данных, полученных приборами, установленными на Landsat-8/9 и Sentinel-2.

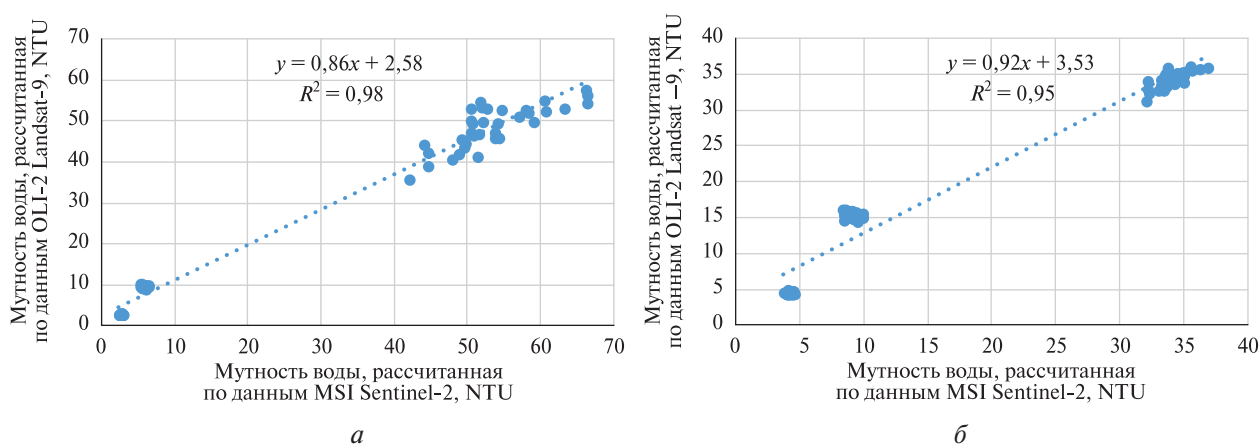


Рис. 7. Диаграмма рассеяния значений мутности воды в приустьевой зоне р. Мзымты, полученных на основе алгоритмов Dogliotti 2015 (а) и Nechad 2016 (б) по данным MSI Sentinel-2A и OLI-2 Landsat-9 за 25.04.2022

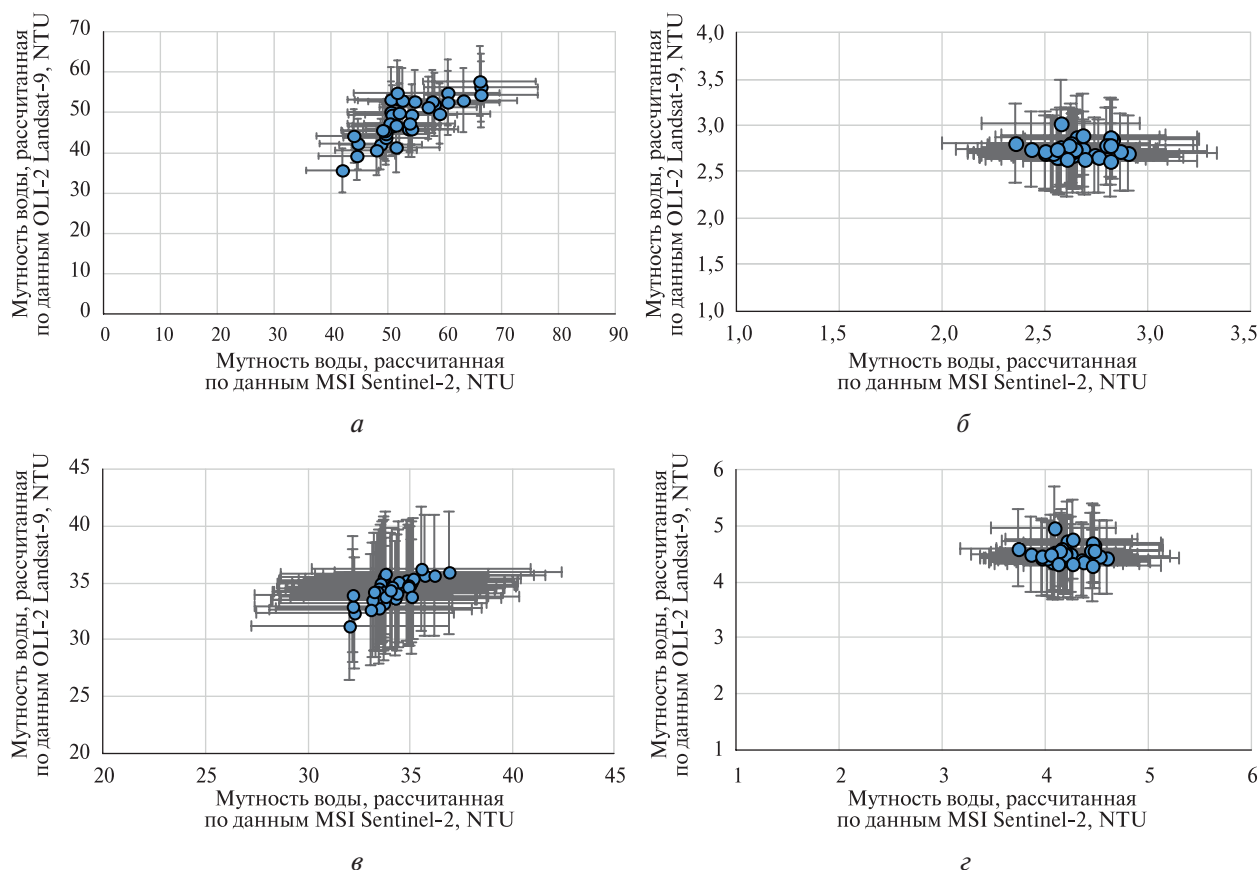


Рис. 8. Диаграммы рассеяния значений мутности воды в приустьевой зоне р. Мзымты в ячейках 1 и 3, полученных на основе алгоритмов: Dogliotti — ячейка 1 (а), ячейка 3 (б); Nechad — ячейка 1 (в), ячейка 3 (г). Данные OLI-2 Landsat-9 и MSI Sentinel-2A за 25.04.2022

Если рассматривать каждую ячейку в отдельности, то при сравнительно невысоком RMSD (табл. 3) на диаграммах наблюдается облако рассеянных значений (рис. 8). Такая кар-

тина является иллюстрацией погрешности используемых алгоритмов атмосферной коррекции и алгоритмов расчёта параметров воды, которая по данным исследований (Dogliotti et al., 2015; Nechad et al., 2015) варьируется от 8 до 15 % для обоих алгоритмов расчёта.

Таблица 3. Критерии оценки качества расчёта мутности для приустьевой зоны р. Мзымты по данным сенсоров OLI-2 Landsat-9 и MSI Sentinel-2A за 25.04.2022

Номер ячейки	Мутность, NTU	MAD, NTU		RMSD, NTU		MARD, %	
		алгоритм Dogliotti 2015	алгоритм Nechad 2016	алгоритм Dogliotti 2015	алгоритм Nechad 2016	алгоритм Dogliotti 2015	алгоритм Nechad 2016
1	40–60	2,70	0,53	3,1	0,50	5,2	1,8
2	5–10	1,90	3,80	1,9	3,92	18,4	20,1
3	0–5	0,10	0,15	0,1	1,18	2,7	3,7
1–3	0–60	1,56	1,20	2,1	1,80	11,0	10,1

Все рассчитанные статистические характеристики приведены в табл. 3. Анализ полученных результатов показал, что по всем ячейкам среднее квадратичное отклонение (RMSD) составляло 1,8 и 2,1 NTU для алгоритмов Nechad 2015 и Dogliotti 2015 соответственно.

Как можно заметить, для обоих алгоритмов MARD составляет менее 8 %, за исключением одной ячейки (ячейка 2, где поле мутности сильно неоднородно), что является меньше нижнего порога погрешности используемых алгоритмов. По совокупности всех ячеек MARD равно 10 и 11 % для алгоритмов Nechad и Dogliotti соответственно.

Плюм реки Терек

Как показывают наши подспутниковые измерения (Лаврова и др. 2022), мутность воды в плюме р. Терек в период половодья достигает 2000 NTU. Алгоритм Nechad 2016 для данного района не применялся, так как ввиду высоких значений мутности воды этот алгоритм быстро достигает порога насыщения, тем самым давая нечисловые значения для сильно замутнённых вод у устья реки и в шлейфовой зоне, т. е. части плюма, где мутность резко снижается по сравнению с областью, непосредственно примыкающей к устью.

Для данного района было выбрано по четыре ячейки на каждое изображение: зона чистой воды, зона со средней мутностью, сильной мутностью и экстремальной мутностью (вблизи устья реки) (см. рис. 5б).

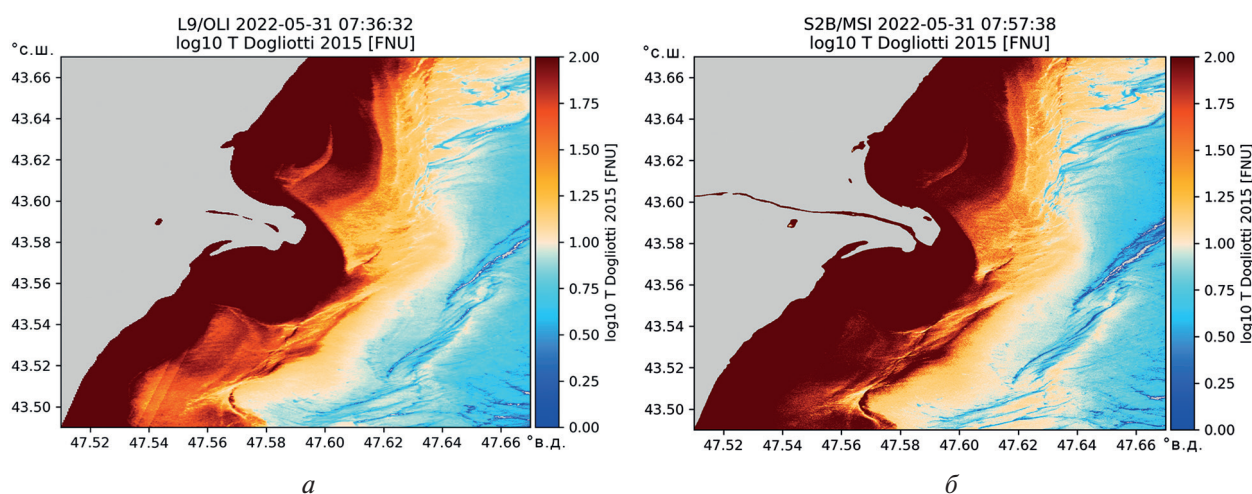


Рис. 9. Карты мутности воды в приустьевой зоне р. Терек, полученные на основе применения алгоритмов Dogliotti 2015 к данным OLI-2 Landsat-9 (а) и MSI Sentinel-2B (б) за 31.05.2022

В рассматриваемую в данной статье дату, 31 мая 2022 г., максимальная мутность вблизи устья по алгоритму Dogliotti 2015 составляла порядка 1500 NTU для обоих спутников (рис. 9, см. с. 255).

На диаграмме рассеяния значений мутности для всех ячеек, построенной по синхронным данным OLI-2 Landsat-9 и MSI Sentinel-2B, при линейной интерполяции коэффициент детерминации R^2 равен 0,99 (рис. 10). Но в данном случае при высоких значениях мутности результаты, полученные по данным MSI, выше по сравнению с OLI-2.

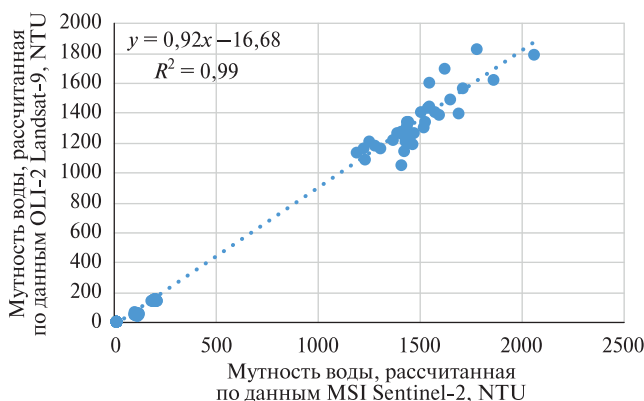


Рис. 10. Диаграмма рассеяния значений мутности воды в приустьевой зоне р. Терек, полученных на основе алгоритма Dogliotti 2015 по данным OLI-2 Landsat-9 и MSI Sentinel-2B за 31.05.2022

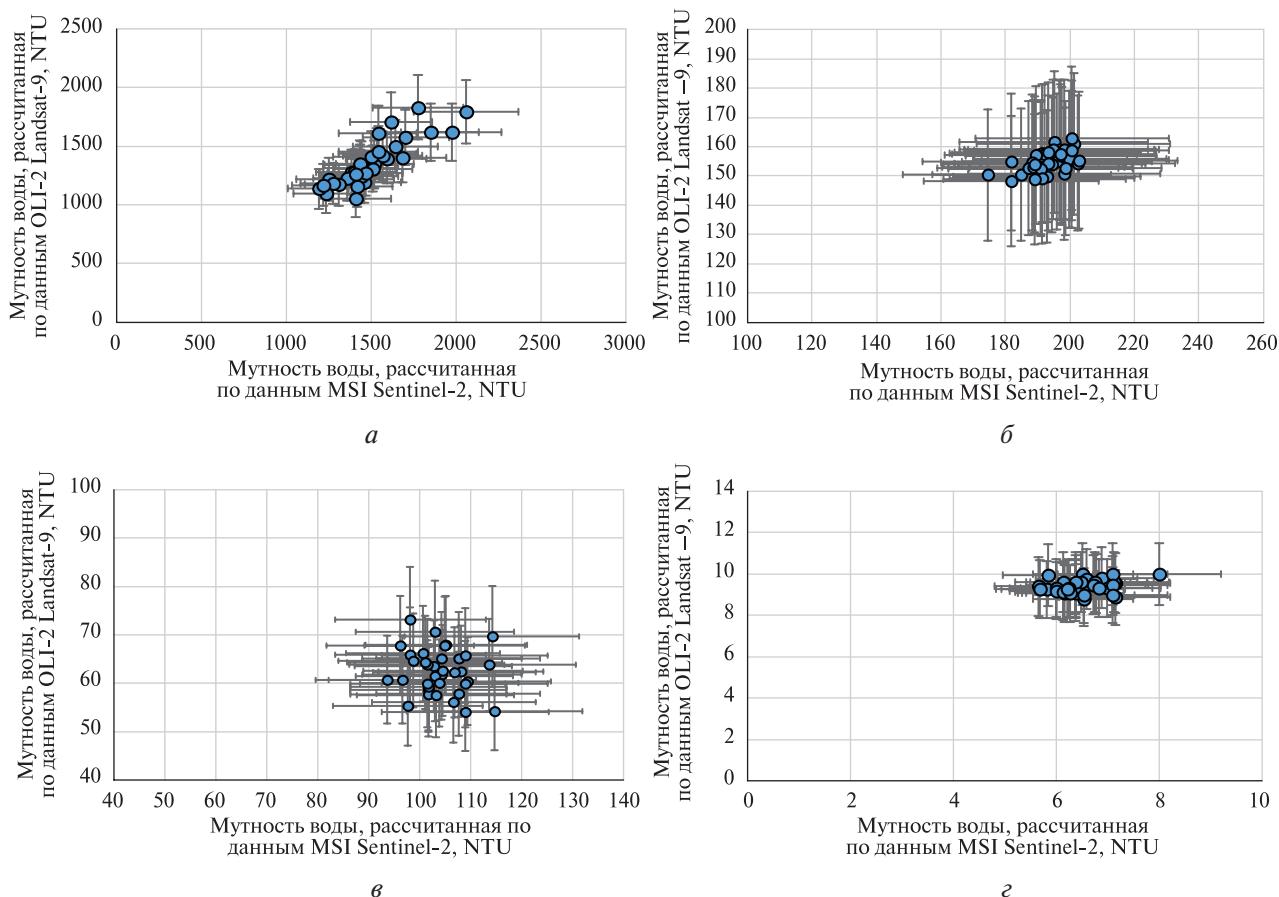


Рис. 11. Диаграммы рассеяния значений мутности воды в приустьевой зоне р. Терек, полученных на основе алгоритма Dogliotti 2015: а — ячейка 1; б — ячейка 2; в — ячейка 3; г — ячейка 4. Данные OLI-2 Landsat-9 и MSI Sentinel-2B за 31.05.2022

В каждой отдельной ячейке на диаграммах рассеяния мутности наблюдалось облако значений, подобно тому, как это было для р. Мзымты (рис. 11, см. с. 256). Рассчитанные статистические метрики приведены в табл. 4.

Таблица 4. Критерии оценки качества расчёта мутности по алгоритму Dogliotti 2015 для приустьевой зоны р. Терек по данным сенсоров OLI-2 Landsat-9 и MSI Sentinel-2B за 31.05.2022

Номер ячейки	Диапазон значений мутности, NTU	MAD, NTU	RMSD, NTU	MARD, %
1	1000–2000	76,86	86,90	5,38
2	150–200	19,10	19,30	10,95
3	80–150	20,78	21,10	25,00
4	0–10	1,43	1,45	18,15
1–4	0–2000	28,33	43,30	14,8

Плюм реки Сулак

Проведённые нами измерения *in situ* показали (Лаврова и др., 2022), что значения мутности воды в плюме р. Сулак во время половодья может превышать 200 NTU (рис. 12). Поэтому так же, как и для р. Терек, для данного района не использовался алгоритм Nechad 2016.

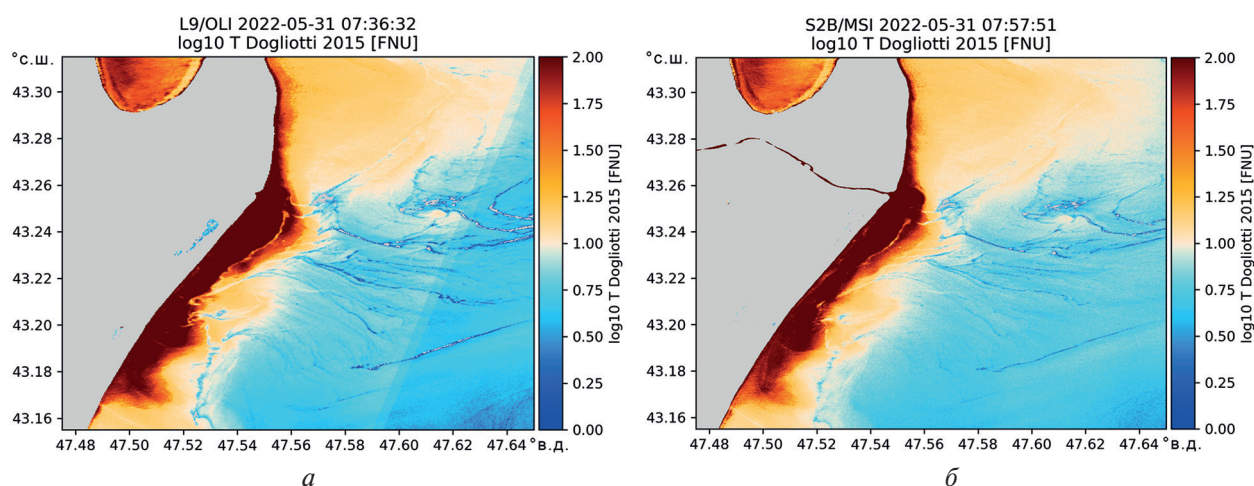


Рис. 12. Карты мутности воды в приустьевой зоне р. Сулак, полученные на основе применения алгоритма и Dogliotti-2015 к данным OLI-2 Landsat-9 (а) и MSI Sentinel-2B (б) за 31.05.2022

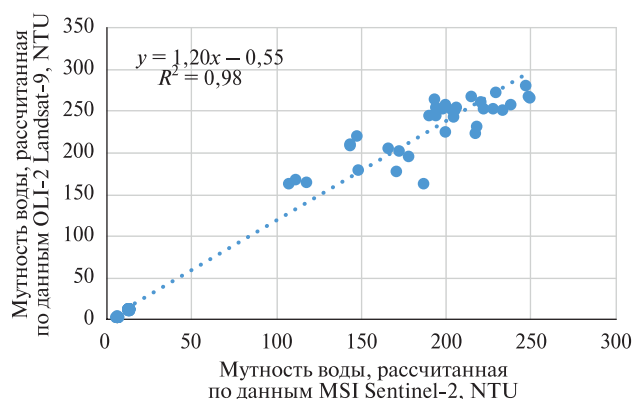


Рис. 13. Диаграмма рассеяния значений мутности воды в приустьевой зоне р. Сулак, полученных на основе алгоритма Dogliotti 2015 по данным OLI-2 Landsat-9 и MSI Sentinel-2B за 31.05.2022

Для данного района было выбрано по три ячейки на каждое изображение: одна для области чистой воды, а две другие для зон средней и высокой мутности, соответственно (см. рис. 5в). На 31 мая 2022 г., по данным алгоритма Dogliotti 2015, максимальная мутность вблизи устья реки составляла примерно 250 NTU для обоих спутников, как показано на рис. 9.

На диаграмме распределения мутности, созданной на основе синхронных данных OLI-2 Landsat-9 и MSI Sentinel-2B, коэффициент детерминации R^2 линейной интерполяции составляет 0,98 (рис. 13, см. с. 257). Результаты, полученные для данных OLI-2, имеют более высокие значения мутности по сравнению с данными MSI. Такая же ситуация наблюдалась и для плуа р. Мзымты.

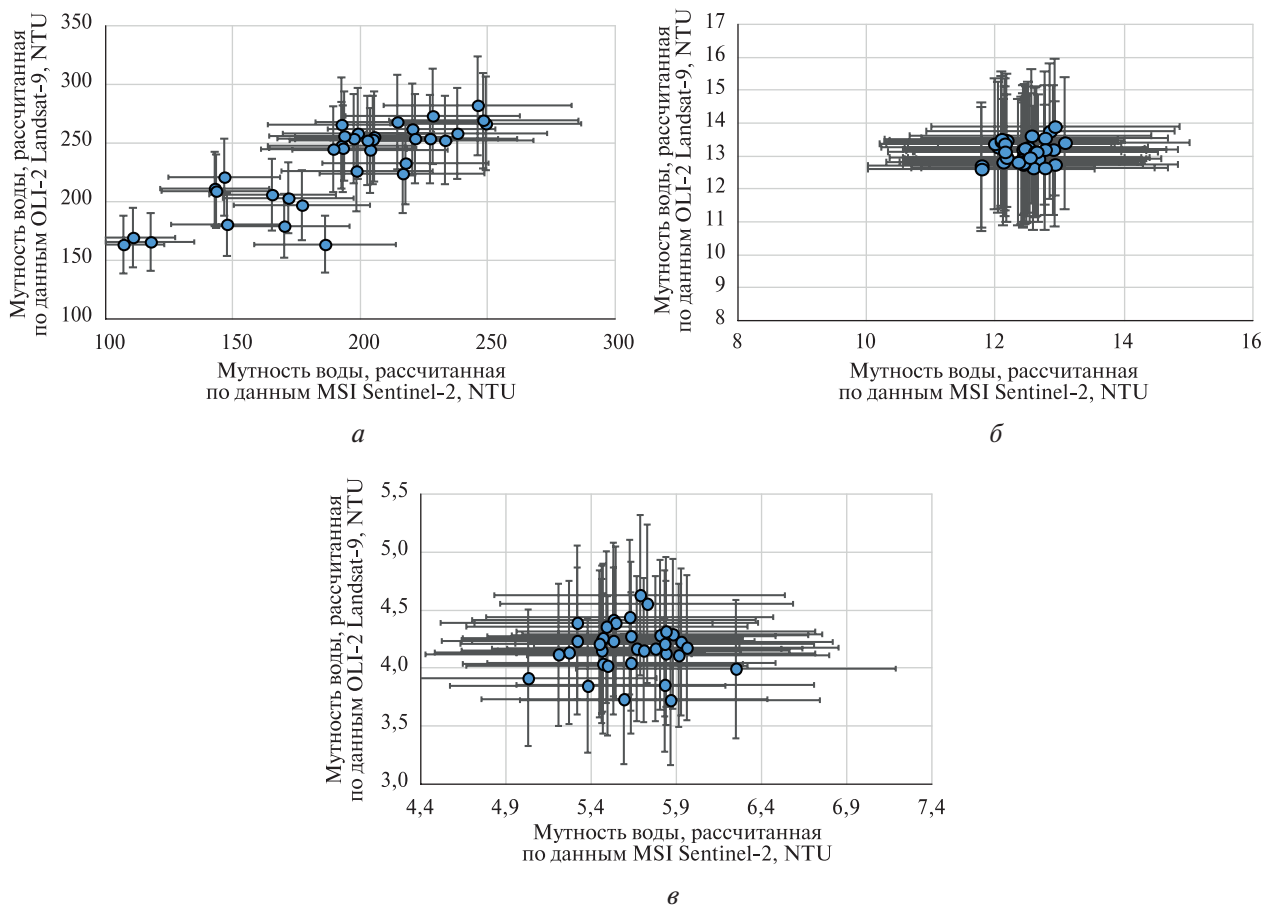


Рис. 14. Диаграммы рассеяния значений мутности воды в приустьевой зоне р. Сулак, полученных на основе алгоритма Dogliotti 2015: а — ячейка 1; б — ячейка 2; в — ячейка 3. Данные OLI-2 Landsat-9 и MSI Sentinel-2B за 31.05.2022

Таблица 5. Критерии оценки качества расчёта мутности по алгоритму Dogliotti 2015 для приустьевой зоны р. Сулак по данным сенсоров OLI-2 Landsat-9 и MSI Sentinel-2B за 31.05.2022

Номер ячейки	Диапазон значений мутности, NTU	MAD, NTU	RMSD, NTU	MARD, %
1	100–300	20,00	22,0	10,0
2	20–40	0,77	0,8	3,9
3	0–10	1,00	1,0	12,8
1–3	0–300	7,00	13,0	9,0

При анализе отдельных ячеек с относительно низким значением RMSD (согласно табл. 5) на диаграммах наблюдается облако рассеянных значений (рис. 14), что схоже с ранее

упомянутыми данными для других рек. Как уже было сказано ранее, это указывает на неточности, связанные с применяемыми методами атмосферной коррекции и алгоритмами вычисления мутности воды.

Плюм реки Риони

Район выноса р. Риони характеризовался значительной площадью, что обеспечило возможность увеличения количества ячеек для анализа до пяти (см. *рис. 5з*). Вблизи устья реки максимальная мутность воды, определённая по алгоритму Dogliotti 2015, составляла приблизительно 200 NTU. Высокая мутность воды в устьевой зоне привела к тому, что алгоритм Nechad 2016 не мог предоставить числовые значения для первой ячейки. Карты мутности, рассчитанные по двум алгоритмам для синхронных данных за 18.07.2023, представлены на *рис. 15*.

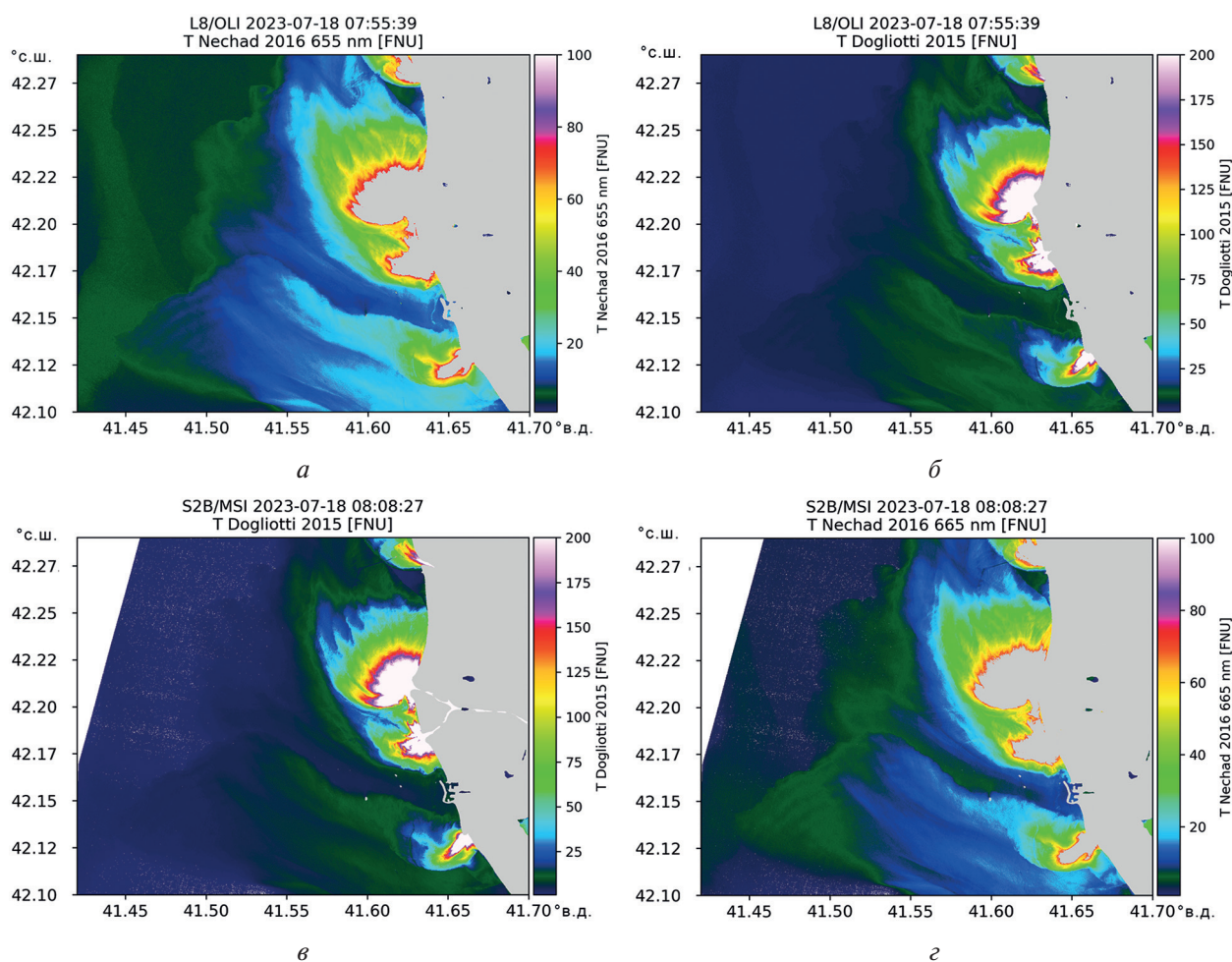


Рис. 15. Карты мутности воды в приустьевой зоне р. Риони, полученные на основе применения алгоритмов Dogliotti 2015 (*а, в*) и Nechad 2016 (*б, г*) к данным OLI Landsat-8 (*а, б*) и MSI Sentinel-2B (*в, г*) за 18.07.2023

На диаграммах рассеяния значений мутности по всему диапазону, созданных на основе синхронных данных OLI Landsat-8 и MSI Sentinel-2B, коэффициенты детерминации R^2 линейных интерполяций составляют 1,00 и 0,99 для алгоритмов Dogliotti 2015 и Nechad 2016 соответственно (*рис. 16*, см. с. 260). Важно отметить, что при сравнительно небольших значениях мутности данные, полученные по сенсору OLI, превышают значения по сравнению с данными по MSI. Однако с другой стороны, при значениях мутности, превышающих 100 NTU, можно увидеть обратную картину: завышение значений со стороны MSI.

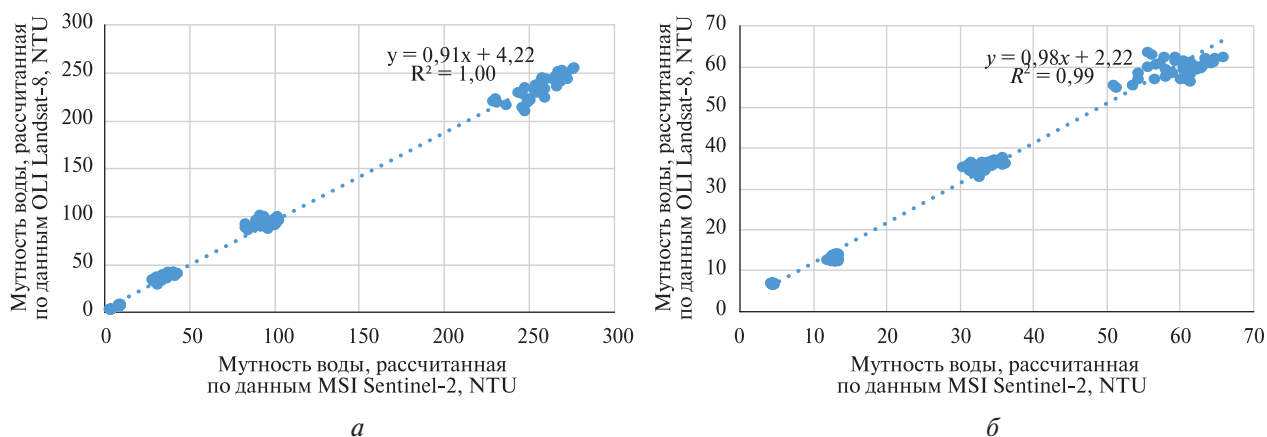


Рис. 16. Диаграммы рассеяния значений мутности воды в приустьевой зоне р. Риони, полученных на основе алгоритмов Dogliotti 2015 (а) и Nechad 2016 (б) по данным OLI Landsat-8 и Sentinel-2B за 18.07.2023

Так же, как и в ранее описанных случаях, при рассмотрении каждой ячейки в отдельности при сравнительно невысоком RMSD (табл. б) на диаграммах наблюдается облако рассеянных значений (рис. 17).

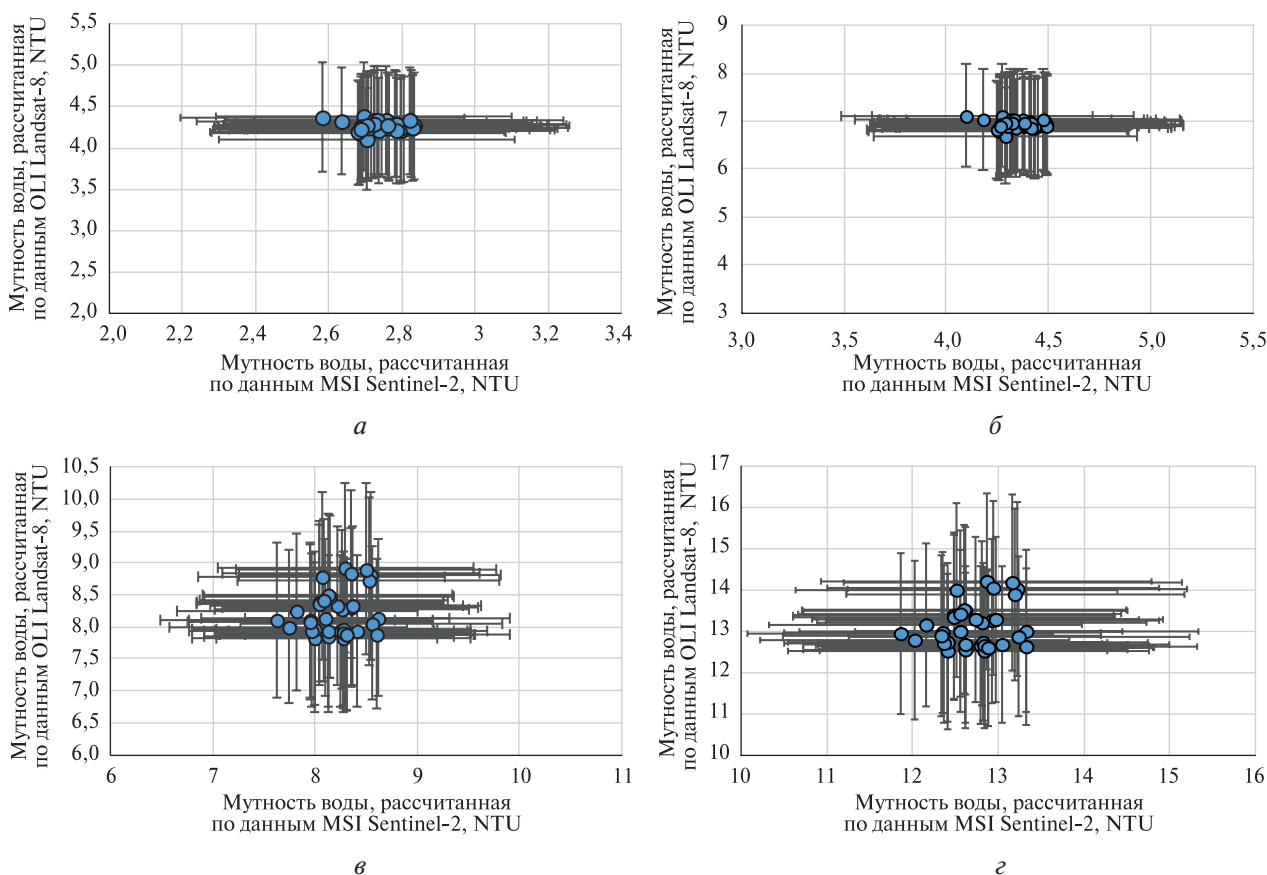


Рис. 17. Диаграммы рассеяния значений мутности воды в приустьевой зоне р. Риони в ячейках 3 и 4, полученных на основе алгоритмов: Dogliotti 2015 — ячейка 4 (а), ячейка 3 (б); Nechad 2016 — ячейка 4 (б), ячейка 3 (г). Данные OLI Landsat-8 и Sentinel-2B за 18.07.2023

Таблица 6. Критерии оценки качества расчёта мутности для приустьевой зоны р. Риони по данным сенсоров OLI Landsat-8 и Sentinel-2B за 18.07.2023

Номер ячейки	Мутность, NTU	MAD, NTU		RMSD, NTU		MARD, %	
		алгоритм Dogliotti 2015	алгоритм Nechad 2016	алгоритм Dogliotti 2015	алгоритм Nechad 2016	алгоритм Dogliotti 2015	алгоритм Nechad 2016
1	100–200	10,00	—	0,40	—	4,00	—
2	80–100	2,50	1,48	0,30	0,03	2,80	2,45
3	20–40	2,00	1,40	0,10	0,40	5,80	4,00
4	5–10	0,15	0,27	0,02	0,02	1,86	2,10
5	0–5	0,76	1,30	0,22	0,23	21,00	23,00
1–5	0–200	3,10	3,10	4,90	4,90	8,00	8,00

Заключение

Проведён анализ результатов применения алгоритмов Nechad 2016 и Dogliotti 2015 для синхронно полученных данных сенсорами OLI/OLI-2 спутников Landsat-8/9 и MSI спутников Sentinel-2A/2B. Данные алгоритмы, входящие в программный комплекс ACOLITE, были применены для определения мутности воды в различных районах Чёрного и Каспийского морей в приустьевых зонах рек Мзымта, Риони, Терек и Сулак в различные месяцы 2022 и 2023 гг. Плюмы этих рек различаются по значениям мутности, что позволяет сравнивать результаты измерений в достаточно широком диапазоне. Основная задача данного исследования заключалась в определении влияния выбора данных с различных приборов, установленных на разных спутниках, на результаты определения значений мутности воды, получаемые в одно и то же время по одним и тем же алгоритмам для одних и тех же районов, но по данным с разных спутников.

Анализ полученных результатов показал, что наблюдалась высокая корреляционная зависимость между значениями мутности в четырёх разных районах в разные месяцы для двух спутниковых аппаратов. Особенно важным представляется определение линейной зависимости между результатами расчёта мутности воды, что свидетельствует о согласованности данных, получаемых с обеих спутниковых систем. Таким образом, показано, что для районов исследования выбор спутника не даёт значительных различий в окончательных результатах. Об этом свидетельствуют рассчитанные статистические характеристики, такие как MAD, MARD и RMSD, которые обеспечивают надёжную оценку и сравнение результатов, полученных с разных спутников. Выявлено, что для слабо замутнённых вод MAD составляет ~1–5 NTU, MARD ~10–15 %, RMSD ~1–5 NTU. Для сильно замутнённых вод показатели качества несколько отличаются: MAD составляет ~10–20 NTU, MARD ~15–30 %, RMSD ~15–40 NTU. Следует отметить, что в среднем, если значения мутности не превышают 100 NTU, результаты, получаемые по данным OLI/OLI-2 Landsat-8/9, несколько выше, чем по данным MSI Sentinel-2A/2B. При значениях мутности, превышающих 100 NTU, наблюдается обратная картина: завышение значений, полученных при использовании данных с MSI по сравнению с результатами с OLI/OLI-2. Данный вывод необходимо учитывать в дальнейших исследованиях при работе с данными различных сенсоров.

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. 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.
3. 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.
4. Копелевич О. В., Вазюля С. В., Шеберстов С. В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Т. 2. № 3. С. 99–105.
5. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 335 с.
6. 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.
7. Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Алферьева Я. О. и др. Изменение параметров плюма реки Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 3. С. 323–329. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329.
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. Хлебников Д. В., Иванов А. Ю., Коновалов Б. В., Терлеева Н. В. Исследование выноса реки Мзымта в Черном море дистанционными (оптическими и радиолокационными) и спектрофотометрическими лабораторными методами // *Современные проблемы оптики естественных вод*. 2017. Т. 9. С. 152–156.
11. Abascal-Zorrilla N., Vantrepotte V., Huybrechts N. et al. Dynamics of the Estuarine Turbidity Maximum Zone from Landsat-8 Data: The Case of the Maroni River Estuary, French Guiana // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Article 2173. <https://doi.org/10.3390/rs12132173>.
12. 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>.
13. 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>.
14. 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.
15. Falcieri F., Benetazzo A., Sclavo M. et al. Po River plume pattern variability investigated from model data // *Continental Shelf Research*. 2013. V. 87. DOI: 10.1016/j.csr.2013.11.001.
16. García Berdeal I., Hickey B. M., Kawase M. Influence of wind stress and ambient flow on a high discharge river plume // *J. Geophysical Research*. 2002. V. 107. No. C9. Article 3130. DOI: 10.1029/2001JC000932.
17. 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>.
18. Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Burenkov V. I. et al. Assessment of underwater irradiance and absorption of solar radiation at water column from satellite data // *Proc. SPIE*. 2007. V. 6615. P. 56–66. <https://doi.org/10.1117/12.740441>.
19. 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>.
20. Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Soloviev D. M. et al. Remote sensing of suspended particulate matter: case studies of the Sulak (Caspian Sea) and the Mzymta (Black Sea) mouth areas // *Proc. SPIE*. 2021. V. 11857. Article 1185705. <https://doi.org/10.1117/12.2599809>.
21. 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>.

22. 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>.
23. 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>.
24. 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>.
25. 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>.
26. Ou S., Zhang H., Wang D. Dynamics of the buoyant plume off the Pearl River estuary in summer // *Environmental Fluid Mechanics*. 2009. V. 9(5). P. 471–492. DOI: 10.1007/S10652-009-9146-3.
27. Ouillon S., Forget P., Froidefond J.-M., Naudin J.-J. Estimating suspended matter concentrations from SPOT data and from field measurements in the Rhone River plume // *Marine Technology Society J.* 1997. V. 31(2). P. 15–20.
28. 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.
29. Reul N., Quilfen Y., Chapron B. et al. Multisensor observations of the Amazon-Orinoco river plume interactions with hurricanes // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2014. V. 119. P. 8271–8295. <https://doi.org/10.1002/2014JC010107>.
30. 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>.
31. Vanhellemont Q., Ruddick K. Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery // *Proc. 2016 ESA Living Planet Symp.* 2016. P. 9–13.
32. 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>.

Impact of Landsat-8/9 and Sentinel-2A/2B data selection on the results of water turbidity determination in coastal river zones

P. D. Zhadanova, O. Yu. Lavrova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: zhadanova.polina@gmail.com

The study of quantitative characteristics of physical and optical properties of the sea using satellite remote sensing is among the priority areas in the field of oceanological research. Special attention is paid to analyzing the influence of data obtained by different satellite systems on the accuracy and reliability of quantitative characteristics. In the framework of our study, we compared the results of water turbidity determination based on synchronously acquired data from OLI/OLI-2 instruments installed on Landsat-8/9 and MSI of Sentinel-2A/2B satellites. The Dogliotti 2015 and Nechad 2016 algorithms included in the ACOLITE software package were used to determine turbidity values. The estuarine areas of the rivers Mzymta and Rioni flowing into the Black Sea and Terek and Sulak flowing into the Caspian Sea were selected as test areas. The sampling of days with synchronous overflights of Landsat-8/9 and Sentinel-2A/2B satellites in different periods allowed us to cover a wide range of water turbidity values and evaluate how the choice of satellite data affects the final processing results. Analysis of scatter diagrams of water turbidity values obtained by the same algorithms but using data from different satellites showed that there is a linear dependence with coefficients of determination higher than 0.95. The observed high correlation between the results for the two satellites demonstrates that for these areas the choice of either satellite does not give significant differences in the final results. It should be noted that on average, if turbidity values do not exceed 100 NTU, the results obtained

from Landsat-8/9 OLI/OLI-2 are slightly higher than Sentinel-2A/2B MSI. For turbidity values greater than 100 NTU, the opposite pattern is observed: higher values obtained using data from MSI compared to the results from OLI/OLI-2. This finding should be taken into account in future studies when using data from different sensors.

Keywords: water turbidity, estuarine zones, ACOLITE, Sentinel-2 MSI, Landsat-8/9, OLI/TIRS, Caspian Sea, Terek, Sulak, Black Sea, Mzymta, Rioni

Accepted: 17.06.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-244-265

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. Kopelevich O. V., Vazyulya S. V., Sheberstov S. V., Development and use of regional algorithms for calculation of bio-optical characteristics of Russian seas from satellite colour scanner data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 2, No. 3, pp. 99–105 (in Russian).
5. Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovyie metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 335 p. (in Russian).
6. 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.
7. Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Alferyeva Y. O. et al., Changes in Sulak River plume parameters after mudflows in the mountains of Dagestan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 323–329 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329.
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. Khlebnikov D. V., Ivanov A. Y., Konovalov B. V., Terleeva N. V., Research of the Mzymta river plume in the black sea by means of remote sensing (optical and radar) and spectrophotometry laboratory methods, *Sovremennye problemy optiki i estestvennykh vod*, 2017, Vol. 9, pp. 152–156 (in Russian).
11. Abascal-Zorrilla N., Vantrepotte V., Huybrechts N. et al., Dynamics of the Estuarine Turbidity Maximum Zone from Landsat-8 Data: The Case of the Maroni River Estuary, French Guiana, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 2173, <https://doi.org/10.3390/rs12132173>.
12. 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, Vol. 29, Article 100891, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100891>.
13. 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>.
14. Dzwonkowski B., Yan X.-H., Tracking of a Chesapeake Bay estuarine outflow plume with satellite-based ocean color data, *Continental Shelf Research*, 2005, Vol. 25, pp. 1942–1958, DOI: 10.1016/j.csr.2005.06.011.
15. Falcieri F., Benetazzo A., Sclavo M. et al., Po River plume pattern variability investigated from model data, *Continental Shelf Research*, 2013, Vol. 87, DOI: 10.1016/j.csr.2013.11.001.

16. García Berdeal I., Hickey B. M., Kawase M., Influence of wind stress and ambient flow on a high discharge river plume, *J. Geophysical Research*, 2002, Vol. 107, No. C9, Article 3130, DOI: 10.1029/2001JC000932.
17. 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, Vol. 106, pp. 11613–11622, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.015>.
18. Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Burenkov V. I. et al., Assessment of underwater irradiance and absorption of solar radiation at water column from satellite data, *Proc. SPIE*, 2007, Vol. 6615, pp. 56–66, <https://doi.org/10.1117/12.740441>.
19. 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, Vol. 9999, Article 99990G, <https://doi.org/10.1117/12.2241312>.
20. Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Soloviev D. M. et al., Remote sensing of suspended particulate matter: case studies of the Sulak (Caspian Sea) and the Mzymta (Black Sea) mouth areas, *Proc. SPIE*, 2021, Vol. 11857, Article 1185705, <https://doi.org/10.1117/12.2599809>.
21. 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, Vol. 43, pp. 215–240, <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.2009149>.
22. 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, <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.
23. 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>.
24. 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, Vol. 114(4), pp. 854–866, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>.
25. 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>.
26. Ou S., Zhang H., Wang D., Dynamics of the buoyant plume off the Pearl River estuary in summer, *Environmental Fluid Mechanics*, 2009, Vol. 9(5), pp. 471–492, DOI: 10.1007/S10652-009-9146-3.
27. Ouillon S., Forget P., Froidefond J.-M., Naudin J.-J., Estimating suspended matter concentrations from SPOT data and from field measurements in the Rhone River plume, *Marine Technology Society J.*, 1997, Vol. 31(2), pp. 15–20.
28. 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, pp. 522–533, DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
29. Reul N., Quilfen Y., Chapron B. et al., Multisensor observations of the Amazon-Orinoco river plume interactions with hurricanes, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2014, Vol. 119, pp. 8271–8295, <https://doi.org/10.1002/2014JC010107>.
30. Vanhellefont Q., Ruddick K., Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 161, pp. 89–106, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.007>.
31. Vanhellefont Q., Ruddick K., Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery, *Proc. 2016 ESA Living Planet Symp.*, 2016, pp. 9–13.
32. Vanhellefont 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>.