Анализ и верификация алгоритмов определения мутности и концентрации взвешенного вещества, имплементированных в программный комплекс ACOLITE

П.Д. Жаданова, К.Р. Назирова

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: zhadanova.polina@gmail.com

Получение количественной информации о физических и гидрооптических параметрах морской среды на основе данных дистанционного зондирования является одной из актуальных задач спутниковой океанологии. В работе представлен подробный обзор современных алгоритмов Nechad и Dogliotti после применения атмосферной коррекции ACOLITE DSF. Подробно изложена методика расчётов оптических параметров морской воды по упомянутым выше алгоритмам и описан опыт использования различных стандартных спутниковых алгоритмов в прибрежных зонах Каспийского и Чёрного морей. Приведены примеры расчётов концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды в тестовых приустьевых районах. Цель работы состояла в проведении верификации алгоритмов расчёта концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды в тестовых районах с помощью результатов квазисинхронных *in situ* измерений. Установлено, что применение стандартного алгоритма Nechad для расчёта мутности морской воды даёт высокую корреляцию с результатами подспутниковых измерений в приустьевых районах р. Мзымты при значениях мутности <50 NTU (англ. Nephelometric Turbidity Unit). Показана возможность использования алгоритма Dogliotti в различных географических районах при условии высокой степени замутнённости прибрежных вод (≥100 NTU). Полученные результаты могут служить методической рекомендацией к использованию рассматриваемых в работе алгоритмов в прибрежных районах Чёрного и Каспийского морей.

Ключевые слова: мутность воды, концентрация взвешенного вещества, измерения *in situ*, ACOLITE, MSI Sentinel-2, OLI/TIRS Landsat-8, -9, Каспийское море, Терек, Сулак, Чёрное море, Мзымта

Одобрена к печати: 14.10.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-50-68

Введение

Мониторинг эстуарных зон и исследование распространения речных выносов в шельфовых зонах с использованием данных дистанционного зондирования в оптическом диапазоне в настоящее время остаётся одной из наиболее приоритетных задач спутниковой океанологии (Завьялов и др., 2014; Лаврова и др., 2016; Doxaran et al., 2009). Традиционные натурные методы контактных измерений параметров морской воды представляются более точными, но имеют ряд недостатков. Проведение натурных экспедиционных измерений — дорогостоящее, трудоёмкое мероприятие, и, как правило, полученные данные носят фрагментарный характер из-за ограниченного пространственного и временного охвата. Кроме того, они не могут отразить высокую пространственно-временную изменчивость параметров в приустьевых и прибрежных зонах, где происходят сложные гидрологические и биогеохимические процессы. В то время как современные спутниковые системы позволяют получать информацию о распределении параметров морской среды с высоким пространственным разрешением и большим географическим охватом, предоставляя возможность для изучения гидрологических и биогеохимических процессов в прибрежных районах (Nazirova et al., 2021). Таким образом, одной из актуальных задач спутниковой океанологии становится восстановление количественных значений физических и биологических параметров морской воды на основе спутниковых данных.

В настоящее время разработаны различные алгоритмы, которые используют спектральные характеристики отражённого от поверхности воды излучения для определения оптических параметров морской среды в приповерхностном слое. Европейское космическое агентство (*англ*. European Space Agency — ESA) не даёт рекомендаций к использованию тех или иных спутниковых алгоритмов определения физических и биологических параметров в разных частях земного шара. Поэтому необходимо проводить сравнение и верификацию различных алгоритмов для конкретных регионов и условий.

На сегодняшний день проведено множество исследований, посвящённых оценке применимости алгоритмов расчёта количественных параметров морской воды. Например, в работе (Vanhellemont, 2019а) результаты расчёта значений мутности по алгоритму Nechad (Nechad et al., 2009) с использованием атмосферной коррекции DSF (*анел*. Dark Spectrum Fitting) (Vanhellemont, Ruddick, 2018) сопоставлялись с результатами измерений, проводимых на станциях в районах зал. Сан-Франциско и прибрежных вод вокруг Соединённого Королевства. Алгоритм Dogliotti (Dogliotti et al., 2015) для расчёта мутности также применялся для р. Миссисипи (Kuhn et al., 2019). В настоящем исследовании упомянутые алгоритмы были использованы после проведения атмосферной коррекции методами, представленными в программном продукте ACOLITE. Отмечалось высокое совпадение с результатами подспутниковых измерений.

Многие научные коллективы разрабатывают свои собственные, так называемые региональные алгоритмы, которые адаптированы для конкретных районов. Так, например, коллективом российских учёных из Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН под руководством профессора Копелевича Олега Викторовича были разработаны и апробированы для определённых условий региональные алгоритмы для многих морей России (Kopelevich et al., 2007).

Кроме того, присутствует необходимость разрабатывать новые или адаптировать существующие алгоритмы для учёта особенностей мелководных и высокозамутнённых приустьевых и прибрежных зон. В работе представлен подробный обзор современных алгоритмов Nechad и Dogliotti после применения атмосферной коррекции ACOLITE DSF. Приведены примеры расчётов концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды в тестовых приустьевых районах Чёрного и Каспийского морей. Подробно изложена методика расчётов и описан опыт использования различных спутниковых алгоритмов в прибрежных зонах внутренних морей России.

Цель работы заключалась в проведении верификации ряда существующих алгоритмов расчёта концентрации взвешенного вещества и мутности в приустьевых зонах исследуемых районов Чёрного и Каспийского морей с помощью результатов квазисинхронных *in situ* измерений.

Алгоритмы и методы

Программный комплекс ACOLITE представляет собой многофункциональный инструмент для обработки спутниковых данных, полученных с различных приборов. ACOLITE объединяет алгоритмы атмосферной коррекции и программное обеспечение для обработки спутниковых данных, разработанное в Королевском Бельгийском институте естественных наук (*англ.* Royal Belgian Institute of Natural Sciences — RBIN) для водных приложений метровых и декаметровых спутниковых данных, в том числе Landsat-5, -7...-9 и Sentinel-2A/2B, Pléiades и PlanetScope (Dogliotti et al., 2015; Nechad et al., 2015).

Этот программный пакет включает в себя методы атмосферной коррекции (Vanhellemont, 2020; Vanhellemont, Ruddick, 2014) с различными настраиваемыми дополнительными опциями, например коррекцией бликов, и набор алгоритмов восстановления физических параметров, таких как мутность, концентрация взвешенного вещества и хлорофилла *a*, вегетационный индекс и др.

Последняя версия ACOLITE представлена на языке Python3 и доступна на веб-сервисе GitHub (https://github.com/acolite/acolite). ACOLITE можно использовать через графический пользовательский интерфейс (*англ.* Graphic User Interface — GUI) и с помощью командной строки. GUI предлагает только ограниченную конфигурацию (ввод/вывод файла, выходные параметры и загрузка/сохранение файлов настроек).

Алгоритмы атмосферной коррекции

Важным этапом подготовки данных представляется проведение атмосферной коррекции. В программном комплексе ACOLITE реализованы два метода атмосферной коррекции: DSF и более ранний EXP (*англ*. Exponential extrapolation) (Vanhellemont, Ruddick, 2014–2016). В версиях ACOLITE от 2019 г. первый алгоритм атмосферной коррекции доступен для обработки данных аппаратов Landsat и Sentinel-2. Позднее, в 2021 г., алгоритм DSF был адаптирован и для данных аппарата Sentinel-3 спектрометра OLCI (*англ*. Ocean and Land Colour Instrument). Адаптация и применимость DSF к Landsat-8, -9 и Sentinel-2A/2B описаны в работах (Vanhellemont, 2019а, 2020). Инструкцию по применению метода DSF для изображений метрового масштаба можно найти в работах (Vanhellemont, 2019а, 2020; Vanhellemont, Ruddick, 2018).

Алгоритмы атмосферной коррекции, представленные в ACOLITE, сравнивались с другими существующими алгоритмами атмосферной коррекции различными научными коллективами для широкого круга акваторий (Barreneche et al., 2023; Maciel, Pedocchi, 2021; Vanhellemont, 2020; Wang et al., 2021). В ходе этих исследований алгоритмы ACOLITE давали неоднозначные результаты для разных акваторий: для некоторых они совпадали с подспутниковыми измерениями лучше, чем другие алгоритмы, для других — хуже. Преимуществом методов атмосферной коррекции в ACOLITE является их высокая производительность и независимость от выбора спутникового аппарата (Barreneche et al., 2023). Сохранение высокой производительности, при этом отсутствие необходимости задания дополнительной информации об исследуемом регионе делает этот программный комплекс предпочтительным вариантом при исследовании разнообразных районов. Поэтому в настоящей работе был выбран программный комплекс ACOLITE для оценки его применимости для исследуемых акваторий Чёрного и Каспийского морей.

В данном исследовании нас интересуют алгоритмы расчёта мутности и концентрации взвешенного вещества. К настоящему времени было проведено множество исследований, посвящённых оценке применимости алгоритмов расчёта количественных параметров морской воды. Например, в работе (Vanhellemont, 2019b) результаты расчёта значений мутности по алгоритму Nechad (Nechad et al., 2009) с использованием атмосферной коррекции DSF сопоставлялись с результатами измерений, проводимых на станциях в районах зал. Сан-Франциско и прибрежных вод вокруг Соединённого Королевства. Оценивались среднее квадратичное отклонение (*англ*. Root-Mean-Square Deviation — RMSD), среднее абсолютное отклонение (*англ*. Mean Absolute Relative Difference — MARD), коэффициент детерминации (R^2). По результатам исследования RMSD = 5,6 FNU (*англ*. Formazine Nephelometric Unit); MARD = 31 %; $R^2 = 0.81$ для рассматриваемых акваторий.

Алгоритмы Dogliotti (Dogliotti et al., 2015) для расчёта мутности и Ocean Color 3 (OC3) для расчёта концентрации хлорофилла *а* также применялись для р. Миссисипи (Kuhn et al., 2019). В данном исследовании упомянутые алгоритмы применялись после атмосферной коррекции методами, представленными в ACOLITE. Отмечалось высокое совпадение с результатами подспутниковых измерений (для OC3 MARD = 30 % и для Dogliotti MARD = 3 %).

Имплементация в ACOLITE и валидация метода экспоненциальной экстраполяции в применении к атмосферной коррекции описаны в статье (Vanhellemont et al., 2015). В последующих работах автором подробнее рассматриваются возможности, преимущества и недостатки этого метода (Vanhellemont, 2019). Данный метод атмосферной коррекции строится на предположении, что спектральный коэффициент яркости водной толщи, ρ_w , равен нулю в обоих коротковолновых инфракрасных диапазонах SWIR (*англ*. Short Wave Infrared) (1,560– 1,660 и 2,100–2,300 мкм):

$$\rho_w = 0$$
 и $\rho_{am} = \rho_{rc},$

где ρ_{rc} — коэффициент яркости, скорректированный с учётом рэлеевского рассеяния; ρ_{am} — коэффициент яркости, вносимый наличием аэрозолей в атмосфере. У этого предположения

есть две потенциальные проблемы (Maciel, Pedocchi, 2021; Vanhellemont, 2019a; Vanhellemont, Ruddick, 2018):

- в случае, когда солнечный блик присутствует, его можно рассматривать (и экстраполировать) как сигнал аэрозоля;
- 2) для очень мутных вод отражательная способность в SWIR-диапазоне может не быть пренебрежимо малой величиной.

С помощью экспоненциальной экстраполяции рассчитывается спектральная зависимость, ε, на длинах волн λ_i:

$$\varepsilon(\lambda_i, \text{SWIR2}) = \exp\left(\frac{\lambda(\text{SWIR2}) - \lambda_i}{\lambda(\text{SWIR2}) - \lambda(\text{SWIR1})}\right).$$

В итоге коэффициент яркости водной толщи, ρ_w, можно рассчитать во всех диапазонах, используя выражение:

$$\rho_{w}(\lambda_{i}) = \frac{1}{t_{Ray}(\lambda_{i})} \Big[\rho_{rc}(\lambda_{i}) - \varepsilon(\lambda_{i}, \text{SWIR 2}) \rho_{am}(\text{SWIR 2}) \Big],$$

где *t*_{*Rov} — двухсторонний рэлеевский коэффициент пропускания.*</sub>

Для второго доступного в ACOLITE метода атмосферной коррекции, DSF, используются модели континентального и морского аэрозоля (Vanhellemont, Ruddick, 2018). Эти аэрозольные модели не учитываются в алгоритме EXP. Метод DSF включает в себя расчёт оптической толщины аэрозолей (*англ*. aerosol correction) и коррекцию бликов (*англ*. glint correction).

Алгоритм DSF можно свести к следующим пяти шагам (Vanhellemont, 2020):

- Значение спектрального коэффициента яркости на верхней границе атмосферы, ρ_t, корректируется с учётом коэффициента пропускания атмосферного газа и коэффициента отражения неба.
- Строится ρ_{dark}, так называемый «тёмный спектр», который оценивается путём сортировки ρ_t по яркости и при помощи обычной регрессии с выбором набора наиболее низких коэффициентов отражения (например, берётся 1000 наиболее тёмных пикселей).
- Оптическая толщина аэрозоля, τ_a, оценивается с использованием ρ_{dark} в каждом диапазоне длин волн путём интерполяции коэффициента яркости для различных шагов τ_a в справочных таблицах (*англ*. look-up table — LUT).
- 4. Для каждой модели аэрозоля сохраняется диапазон длин волн, дающий наименьшее значение τ_α.
- Комбинация диапазона и модели аэрозоля, дающие в целом наименьшее значение т_a, используются в дальнейшей обработке (Vanhellemont, 2019а).

После выбора наилучшей аэрозольной модели и комбинации каналов рассчитанные значения τ_a используются для извлечения необходимых параметров с целью проведения атмосферной коррекции. Скорректированный с учётом атмосферного влияния коэффициент яркости вычисляется по формуле:

$$\rho_{pc} = \frac{\rho_t}{t_g} - \rho_{path} - \rho_{sky},$$

где *t_g* — коэффициент пропускания газа; ρ_{sky} — коэффициент яркости на границе раздела воздух/вода, который принимается нулевым для пикселей земли и аналитически оценивается для пикселей воды: ρ_{path} — коэффициент яркости атмосферного пути, расчётная из ρ_{dark} величина. Далее вычисляется коэффициент яркости поверхности, ρ_s (Vanhellemont, 2019а):

$$\rho_S = \frac{\rho_{pc}}{t_{du} + s_a \rho_{pc}},$$

где ρ_{pc} — скорректированный с учётом атмосферного влияния коэффициент яркости; *t*_{du} — двухсторонний диффузный атмосферный коэффициент пропускания; *s*_a — сферическое альбедо атмосферы.

Коррекция солнечных бликов не применяется к методу EXP, так как он уже учитывает пренебрежимо малое отражение от воды в SWIR-диапазонах. Однако следует отметить, что метод EXP может рассматривать сигнал блика как атмосферный вклад, что приведёт к неправильной коррекции с точки зрения физических процессов.

В версии ACOLITE 20221114.0 метод DSF включает поправку на границу раздела воздух/вода на основе скорости ветра (Vanhellemont, 2019a; Vanhellemont, Ruddick, 2021). Эта поправка чувствительна к скорости ветра и может давать искажённые результаты, когда используются довольно грубые вспомогательные данные о скорости ветра (Vanhellemont, 2019a). Реализация и оценка применимости обсуждаются в работе (Vanhellemont, 2019b).

Алгоритмы расчёта мутности морской воды

Программный комплекс ACOLITE включает в себя несколько алгоритмов определения мутности морской воды. В работе (Nechad et al., 2009) был предложен глобальный алгоритм расчёта мутности морской воды Nechad, основанный на коэффициенте отражения на длине волны 681 нм:

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

где C и A_T — калибровочные коэффициенты, значения которых приведены в публикациях (Dogliotti et al., 2015; Nechad et al., 2009). Позднее алгоритм был усовершенствован. Калибровочные коэффициенты были пересмотрены и внесены поправки, которые представлены в виде таблицы в работе (Nechad et al., 2015).

Алгоритм Dogliotti представляет собой улучшенный алгоритм Nechad и использует вместо одной полосы две: 645 и 859 нм (Dogliotti et al., 2015). Была введена линейная весовая функция (изменяющаяся 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, полоса 645 нм используется, когда $\rho_w(645) < 0,05$, а полоса 859 нм — когда $\rho_w(645) > 0,07$. И эти два диапазона «склеиваются», когда $0,05 < \rho_w(645) < 0,07$. В переходной зоне вес алгоритма (*w*) изменяется линейно от 0 при $\rho_w(645) = 0,05$ до 1 при $\rho_w(645) = 0,07$. Смешивание выполняется по следующей формуле (Dogliotti et al., 2015):

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

где T^{645} — мутность, рассчитанная с использованием полосы 645 нм по алгоритму Nechad, а T^{859} — мутность, рассчитанная с использованием полосы 859 нм по алгоритму Nechad.

Благодаря такому решению данный алгоритм показывает высокую корреляцию с результатами *in situ* в среднемутных и сильно мутных водах (Maciel, Pedocchi, 2021).

Алгоритмы расчёта концентрации взвешенного вещества

Для определения концентрации взвешенного вещества (*англ*. Suspended Particulate Matter — SPM) с помощью дистанционного зондирования используются специальные алгоритмы, которые связывают спектральные характеристики отражённого от поверхности воды излучения с содержанием взвеси. Алгоритм SPM Nechad для расчёта концентрации взвешенного вещества строится на ряде предположений и приближений относительно первичных оптических свойств морской воды, для того чтобы связать концентрацию взвешенного вещества, *S*, непосредственно с общим количеством взвешенного вещества, ω'_b (Nechad et al., 2010):

$$S = A \frac{\omega_b'}{1 - \omega_b'/C}$$

где калибровочные коэффициенты А и С определяются следующим образом:

$$A = \frac{a_{np}}{b_{bp}^*}, \quad C = \frac{b_{bp}^*}{a_p^*},$$

где b_{bp}^* — показатель рассеяния назад (вклад от частиц взвеси); a_p^* , a_{np} — показатели поглощения (вклад от взвеси и других оптически активных веществ соответственно) (Nechad et al., 2010).

В переходе от общего количества взвешенного вещества, ω'_b , к коэффициенту спектральной яркости воды, ρw , получается концентрация взвешенного вещества *S*:

$$\omega_b' = \frac{\rho_w}{\gamma - \rho_w}, \quad S = \frac{A^{\rho} \rho_w}{1 - \rho_w/C^{\rho}},$$

где C^{ρ} и A^{ρ} — калибровочные коэффициенты, значения которых приведены в публикации (Nechad et al., 2010).

В данной работе вышеупомянутые алгоритмы были применены для прибрежных вод Чёрного и Каспийского морей. В качестве тестовых районов с целью верификации алгоритмов расчёта мутности морской воды и концентрации взвешенного вещества были выбраны приустьевые зоны рек Мзымта, Терек и Сулак. Использование описанных выше алгоритмов для конкретных морских акваторий предусматривает проведение численных экспериментов в разных диапазонах измеренных величин и при разных гидрооптических и гидрологических условиях.

Районы исследования

Плюм Мзымты образуется в районе городов Адлер и Сириус, где река впадает в Чёрное море (*puc. 1*, см. с. 56). Исток Мзымты находится на склонах Главного Кавказского хребта. Её длина достигает 89 км, а водосборный бассейн — 885 км² (Джаошвили, 2002). В среднем за год выносится 488,2 тыс. т взвешенных наносов и 141 тыс. т влекомых наносов (Джаошвили, 2002). Среднегодовой расход реки составляет 45,6 м³/с (Дрожжина, 2013). Из-за инфраструктуры, размещённой по берегам Мзымты, её воды испытывают потенциально сильное антропогенное воздействие. Поэтому необходимо проводить регулярный мониторинг данного района для оценки степени влияния активной рекреационной деятельности на прибрежную экосистему (Nazirova et al., 2021).

Из-за развития внутреннего туризма в Республике Дагестан возросла необходимость экологического контроля курортной зоны в окрестностях г. Махачкалы (Лаврова и др., 2022), где преобладающее влияние оказывают выносы рек Сулак и Терек (*puc. 2*, см. с. 56). Бассейн р. Сулак охватывает часть предгорья и горных склонов Большого Кавказа, а также Прикаспийскую низменность. Сулак формируется из соединения рек Андское Койсу и Аварское Койсу. Протяжённость р. Сулак составляет 169 км. Сток реки регулируется двумя водохранилищами: Чирюртовым и Чиркейским, последнее расположено в 142 км от моря. Естественная концентрация взвеси в период паводков прежде была 40 кг·м⁻³ (при среднегодовом значении 3,09 кг·м⁻³) (Лаврова и др., 2022).

Река Терек (*рис. 3*, см. с. 56) берёт своё начало на склоне Главного Кавказского хребта в Трусовском ущелье, из ледника горы Зилга-Хох на высоте 2713 м н.у.м. (над уровнем моря). Река течёт по территориям Грузии, Северной Осетии, Кабардино-Балкарии, Ставропольского края, Чечни и Дагестана. Её протяжённость — 623 км, площадь бассейна — 43 200 км². Она впадает в Каспийское море, образуя широкую дельту (Лаврова и др., 2022).



Рис. 1. Район проведения подспутниковых измерений в приустьевой зоне р. Мзымты в апреле 2022 г.



Рис. 2. Район проведения подспутниковых измерений в приустьевой зоне р. Сулак в июне 2023 г.



Рис. 3. Район проведения подспутниковых измерений в приустьевой зоне р. Терек в июне 2023 г.

В описанных районах исследования был проведён ряд подспутниковых измерений в 2022 и 2023 гг. При измерениях с маломерного судна использовалось следующее оборудование: CTD-зонд (*англ*. Conductivity, Temperature and Depth) RBR Concerto канадской компании Richard Bransker Research Ltd. с дополнительными датчиками измерения мутности морской воды (*англ*. Seapoint Turbidity Sensor) и флюоресценции для определения концентрации хлорофилла *а (англ*. Turner Design Cyclops-7) и портативный турбидиметр TN400 фирмы Apera Instruments. Оптические датчики мутности морской воды измеряют в нефелометрических единицах NTU (*англ*. Nephelometric Turbidity Unit). Одновременно с CTD-зондированием на тех же станциях производился отбор проб морской воды в приповерхностном слое для измерения концентрации взвешенного вещества с помощью гравиметрического метода. Методика проведения измерений и обработки результатов подробно описывается в работах (*Лаврова* и др., 2022; Назирова и др., 2019). В дальнейшем результаты подспутниковых измерений использовались для верификации значений мутности и концентрации взвешенного вещества, восстановленных на основе спутниковых данных с применением алгоритмов Nechad и Dogliotti.

Спутниковые данные

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

Данные с аппаратов Landsat-8, -9 — это цифровые значения электромагнитного излучения в разных спектральных каналах, полученные со спутников. Данные проходят радиометрическую и геометрическую коррекцию и становятся данными первого уровня (L1C). ACOLITE поддерживает данные как из Collection1, так и из Collection2 (с разным качеством и набором каналов и метаданных). В настоящей работе использованы данные уровня Collection2, доступные на сайте https://earthexplorer.usgs.gov/.

Данные спутников Sentinel-2 являются результатом съёмки поверхности Земли с помощью мультиспектральных датчиков (MSI), установленных на двух спутниках: Sentinel-2A и Sentinel-2B. Эти данные предоставляются с уровнем обработки L1C, т.е. являются данными, представленными в виде альбедо на верхней границе атмосферы (*англ*. Top-Of-Atmosphere Reflectance — TOA) с выполненной радиометрической и геометрической коррекцией. Одна сцена L1C может содержать несколько гранул (*англ*. Granules), являющихся частями сцены размером 100×100 км, и потенциально может распространяться на две зоны (*англ*. zones), которые являются частями земной поверхности размером $10 \times 10^\circ$, разделёнными по широте и долготе. На данный момент ACOLITE поддерживает обработку полных сцен L1C и отдельных гранул. Данные Sentinel доступны на платформе https://scihub.copernicus.eu/.

К снимкам с аппаратов Landsat в метаданных приложен специальный канал оценки качества с маской облаков (Band 9), который содержит информацию о наличии или отсутствии облаков в каждом пикселе снимка (https://www.usgs.gov/). Для данных Sentinel-2 маска облаков автоматически создаётся при обработке с помощью алгоритма Sen2Cor, который определяет вероятность того, что пиксель снимка покрыт облаком или его тенью (https://sentinels. copernicus.eu/web/sentinel/).

Для сопоставления результатов подспутниковых измерений и количественных данных, полученных с помощью обработки спутниковой информации, используется библиотека netCDF Python (https://unidata.github.io/netcdf4-python/), которая позволяет работать с выходными файлами программного комплекса ACOLITE. С её помощью нами создаются трёхмерные массивы данных, содержащие информацию о местоположении станции и её номере. Затем для каждой станции подспутниковых измерений проводится поиск близких точек по трёхмерному массиву восстановленных спутниковых данных с точностью 10⁻³. Это позволяет учесть динамику района исследования и пространственное разрешение спутников (30 м). Усредняя значения этих точек, получаем соответствующие значения мутности и концентрации взвешенного вещества для каждой станции.

Результаты

В настоящей работе были исследованы алгоритмы расчёта мутности и концентрации взвешенного вещества в районе выносов рек Сулак, Терек и Мзымта. Результаты измерений *in situ*, выполненных в 2022 и 2023 гг. в районе устьев рек Мзымта, Терек и Сулак, были сопоставлены с результатами обработки изображений MSI Sentinel-2A/2B и OLI Landsat-8, -9 с помощью атмосферной коррекции DSF и с последующим применением алгоритмов Nechad и Dogliotti. Важно отметить, что алгоритм Nechad для значений мутности, превышающих определённый порог, даёт нечисловые значения. Для рассматриваемых районов исследования «порог насыщения» алгоритма составил примерно 60 NTU. Для тестового полигона в районе р. Мзымты пороговое значение коэффициента спектральной яркости, по умолчанию равное 0,0215, ввиду высоких значений мутности (80 NTU и выше) оказалось недостаточным, поэтому, чтобы замаскировать все пиксели, относящиеся к суше, порог был увеличен: $\rho_{TOA}(~1600 \text{ нм}) \leqslant 0,05.$

25 апреля 2022 г. были проведены квазисинхронные подспутниковые измерения *in situ* на 24 станциях. На *puc.* 4 представлены карты распределения мутности и концентрации взвешенного вещества по спутниковым данным OLI-2 Landsat-9 за 25.04.2022.



Рис. 4. Результаты обработки спутникового изображения OLI-2 Landsat-9 за 25.04.2022 приустьевой зоны р. Мзымты: *a* — распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Dogliotti; *б* — распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Nechad; *в* — распределение концентрации взвешенного вещества, рассчитанной по алгоритму Nechad2015

Результаты натурных измерений были сопоставлены с данными дистанционного зондирования (*puc. 5* и *6*). Применением метода атмосферной коррекции DSF и алгоритма расчёта концентрации взвешенного вещества SPM Nechad2015 была получена диаграмма рассеяния значений концентрации за 25.04.2022 (см. *puc. 5*).



Рис. 5. Диаграмма рассеяния значений SPM, полученных на основе алгоритма Nechad2015 с атмосферной коррекцией DSF по данным OLI-2 Landsat-9 за 25.04.2022



Рис. 6. Диаграмма рассеяния значений мутности, полученных на основе алгоритма Nechad и Dogliotti с атмосферной коррекцией DSF по данным OLI-2 Landsat-9 за 25.04.2022

Можно заметить, что в этом случае наблюдается высокое соответствие данных с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.95$. Как видно из представленных графиков (см. *puc. 6*), алгоритм Nechad для расчёта мутности даёт хорошее соответствие с данными *in situ* ($R^2 = 0.97$). Алгоритм Dogliotti, в свою очередь, сильно завышает значения мутности, имея $R^2 = 0.77$. При этом алгоритм Dogliotti даёт заниженные значения до порога в 50 NTU, после которого, наоборот, значения мутности превосходят натурные измерения более чем на 10 NTU.

Похожая картина наблюдается и для последующего года. В течение выхода 25.04.2023 были проведены квазисинхронные измерения *in situ* на 19 станциях. Получены карты распределения мутности и концентрации взвешенного вещества по спутниковым данным Sentinel-2B за 25.04.2023 (*puc.* 7, см. с. 60).

При проведении натурных измерений максимальное зарегистрированное значение мутности было в районе 65 NTU, что позволяет использовать алгоритмы Nechad и Dogliotti. Как видно из представленного на *puc. 8* (см. с. 60) графика, алгоритм Nechad имеет высокое соответствие с данными *in situ* ($R^2 = 0,90$). Алгоритм Dogliotti, в свою очередь, имеет $R^2 = 0,82$. Можно отметить, что оба алгоритма дают заниженные значения по сравнению с измерениями *in situ* для станций вблизи границ плюма.



Puc. 7. Результаты обработки спутникового изображения MSI Sentinel-2В за 25.04.2023 приустьевой зоны р. Мзымты: *a* — распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Dogliotti; *б* — распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Nechad; *в* — распределение концентрации взвешенного вещества, рассчитанной по алгоритму Nechad2015



Рис. 8. Диаграмма рассеяния значений мутности, полученных на основе алгоритма Nechad и Dogliotti с атмосферной коррекцией DSF по данным MSI Sentinel-2B за 25.04.2023

Другие районы исследования — устья рек Терек и Сулак — находятся в Каспийском море. Для рассматриваемых районов, где максимальное значение мутности по измерениям in situ превышает 200 NTU, алгоритм Nechad не был использован. Также из-за высокой мутности, наблюдаемой в исследуемом регионе, пороговое значение спектрального коэффициента яркости было изменено: р_{том}(~1600 нм) ≤ 0,085. При таком значении маскируются все пиксели, принадлежащие суше. В устье р. Сулак были проведены натурные измерения 04.06.2023, и для квазисинхронного изображения OLI Landsat-8 была выполнена атмосферная коррекция DSF с дальнейшим применением алгоритма Dogliotti (puc. 9). Как видно из представленного графика, диаграмма рассеяния значений мутности хорошо описывается линейной функцией с коэффициентом $R^2 = 0.95$ (*puc. 10a*, см. с. 62). Также был применён алгоритм SPM Nechad2015 для определения концентрации взвешенного вещества. При сравнении рассчитанных по спутниковым данным значений с подспутниковыми измерениями было выявлено, что значения, не превышающие 40–60 г·м⁻³, имеют практически линейную зависимость (*puc. 106*). Наблюдение подобной параболической зависимости обосновано тем, что алгоритм SPM Nechad2015 был создан на основе алгоритма Nechad для расчёта мутности воды, поэтому имеет те же ограничения. Таким образом, станции, соответствующие значениям SPM выше 40 г·м⁻³, требуют отдельного рассмотрения и, возможно, поиска другого алгоритма расчёта.



Рис. 9. Результаты обработки спутникового изображения OLI Landsat-8 за 04.06.2023 приустьевой зоны р. Сулак: *a* — распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Dogliotti; *б* — распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Nechad; *в* — распределение концентрации взвешенного вещества, рассчитанной по алгоритму Nechad2015



Puc. 10. Диаграмма рассеяния значений, полученных на основе алгоритма Nechad и Dogliotti с атмосферной коррекцией DSF по данным OLI Landsat-8 за 04.06.2023: *a* — мутность воды; *б* — концентрация взвешенного вещества

Для р. Терек 05.06.2023 наблюдается похожая картина (*puc. 11*, см. с. 63). Диаграмма рассеяния мутности достаточно точно описывается полиномиальной функцией со степенью 2 (*puc. 12*, см. с. 64). Как можно заметить на графике, до значений мутности, не превосходящих 300 NTU, наблюдается практически линейная зависимость с измерениями *in situ*. Алгоритм Dogliotti в данном случае даёт практически в два раза завышенные по сравнению с натурными измерениями значения. Для значений мутности выше этого порога требуется отдельное рассмотрение. Концентрация взвешенного вещества была рассчитана с помощью алгоритма SPM Nechad2015. Как видно из карт распределения концентрации взвешенного вещества высокие. Поэтому для станций вблизи устья данный алгоритм не был применён. Для оставшихся станций можно отметить практически линейную зависимость до значений 40−60 г·м⁻³. Подобная картина также наблюдалась и для р. Сулак и требует отдельного рассмотрения.

Заключение

В настоящей работе приведён анализ существующих алгоритмов расчёта параметров, характеризующих оптические свойства водной среды — мутности и концентрации взвешенного вещества, которые разработаны для спутниковых сенсоров оптического диапазона высокого пространственного разрешения.



Рис. 11. Результаты обработки спутникового изображения MSI Sentinel-2В за 05.06.2023 приустьевой зоны р. Терек: *a* — распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Dogliotti; *б* — распределение мутности, рассчитанной по алгоритму Nechad; *в* — распределение концентрации взвешенного вещества, рассчитанной по алгоритму Nechad2015

Представлены карты мутности и концентрации взвешенного вещества на основе применения различных алгоритмов и проведена валидация спутниковых алгоритмов квазисинхронными натурными измерениями в тестовых районах.

К спутниковым изображениям Landsat-8, -9 и Sentinel-2A/2B, полученным над исследуемыми районами Чёрного и Каспийского морей за 2022 и 2023 гг., была применена атмосферная коррекция DSF, учитывающая влияние солнечных бликов. В качестве основных алгоритмов для расчёта мутности и концентрации взвешенного вещества были использованы алгоритмы Nechad и Dogliotti.

В результате анализа полученных данных для выносов рек Терек и Сулак было установлено, что алгоритм Dogliotti для определения значений мутности морской воды имеет наибольшую корреляцию с квазисинхронными подспутниковыми измерениями. Алгоритм Dogliotti подходит для расчёта мутности морской воды в применении к прибрежным водам исследуемых районов Каспийского моря в диапазоне значений мутности, не превышающих 300 NTU.

Для тестовых полигонов Чёрного моря было получено, что алгоритм Nechad имеет лучшее соответствие с данными *in situ* для измерений в 2022 и 2023 гг. Можно отметить, что алгоритм Dogliotti для данных 2022 г. занижает значения мутности до порога в 50 NTU, после которого, наоборот, значения мутности превосходят натурные измерения более чем на 10 NTU. Нами получено, что алгоритм Nechad подходит для расчёта мутности морской воды в применении к прибрежным водам исследуемого района Чёрного моря в диапазоне невысоких значений мутности (до 60 NTU).



Puc. 12. Диаграмма рассеяния значений, полученных на основе алгоритмов Nechad и Dogliotti с атмосферной коррекцией DSF по данным MSI Sentinel-2B за 05.06.23: *a* — мутность; *δ* — концентрация взвешенного вещества

Также для рассматриваемых прибрежных вод был применён алгоритм SPM Nechad2015 для определения концентрации взвешенного вещества. При сравнении рассчитанных по спутниковым данным значений с подспутниковыми измерениями было выявлено, что при значениях, не превышающих 40–60 г·м⁻³, алгоритм даёт практически линейную зависимость с результатами натурных измерений. В случае если наблюдаются значения мутности, превышающие порог в 50 NTU, алгоритм даёт нечисловые значения, как, например, для области рядом с устьем р. Терек, и не может быть применён. Выяснено, что SPM Nechad2015 вполне применим к тем областям плюма, где наблюдается относительно невысокая мутность и малое количество взвешенного вещества ($R^2 = 0.95$, $R^2 = 0.99$, $R^2 = 0.99$ для рек Мзымта, Сулак и Терек соответственно).

Полученные результаты могут служить методической рекомендацией к использованию рассматриваемых в настоящей работе алгоритмов в прибрежных районах Чёрного и Каспийского морей.

Авторы выражают благодарность всем участникам подспутниковых измерений, проведённых в 2022—2023 гг. в приустьевых зонах рек Мзымта, Терек и Сулак.

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

Литература

- 1. Джаошвили Ш. Реки Черного моря: Технический отчет № 71. Европейское агентство по охране окружающей среды, 2002. 58 с.
- 2. Дрожжина К. В. Особенности природно-климатических условий бассейна реки Мзымта для целей рекреационной деятельности // Молодой ученый. 2013. № 5(52). С. 196–198.
- 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., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 334 с.
- 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. *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.
- 7. *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.
- 8. *Dogliotti A. I., Ruddick K. G., Nechad B. et al.* A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 156. P. 157–168. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020.
- 9. *Doxaran D., Froidefond J. M., Castaing P., Babin M.* Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2009. V. 81. No. 3. P. 321–332. DOI: 10.1016/j.ecss.2008.11.013.
- 10. *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 // Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters: Proc. SPIE. 2007. V. 6615. P. 56–66. https://doi.org/10.1117/12.740441.
- Kuhn C., de Matos Valerio A., Ward N. et al. Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 surface reflectance products for river remote sensing retrievals of chlorophyll-a and turbidity // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 224. P. 104–118. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.023.
- 12. *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. 2021. V. 43. P. 215–240. https://doi.org/10.1080/01431161.2021.2009149.
- 13. *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.
- 14. *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.
- 15. *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.
- 16. *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.
- 17. *Vanhellemont Q*. (2019a) Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 225. P. 175–192. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010.
- 18. *Vanhellemont Q.* (2019b) Daily metre-scale mapping of water turbidity using CubeSat imagery // Optics Express. 2019. V. 27. P. A1372–A1399. https://doi.org/10.1364/OE.27.0A1372.
- 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.
- 20. *Vanhellemont Q., Ruddick K.* Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8 // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 145. P. 105–115. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.009.

- 21. *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.
- 22. *Vanhellemont Q., Ruddick K.* Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery // Proc. 2016 ESA Living Planet Symp. Prague, Czech Republic, 2016. P. 9–13.
- 23. *Vanhellemont Q., Ruddick K.* Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 216. P. 586–597. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.015.
- 24. *Vanhellemont Q., Ruddick K.* Atmospheric correction of Sentinel-3/OLCI data for mapping of suspended particulate matter and chlorophyll-a concentration in Belgian turbid coastal waters // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 256. Article 112284. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112284.
- 25. *Wang J., Lee Z., Wang D. et al.* Atmospheric correction over coastal waters with aerosol properties constrained by multi-pixel observations // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 265. Article 112633. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112633.

Analysis and verification of turbidity and suspended solids concentration determination algorithms implemented in the ACOLITE software package

P. D. Zhadanova, K. R. Nazirova

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

Obtaining quantitative information on physical and hydro-optical parameters of the marine environment based on remotely sensed data is one of the urgent tasks of satellite oceanology. The paper presents a detailed review of modern Nechad and Dogliotti algorithms after application of ACOLITE DSF atmospheric correction. The methodology of calculations of seawater optical parameters using the above mentioned algorithms is detailed and the experience of using various standard satellite algorithms in the coastal zones of the Caspian and Black seas is described. Examples of calculations of suspended solids concentration and turbidity of seawater in test estuaries are given. The aim of the work was to verify the algorithms for calculating suspended sediment concentration and seawater turbidity in test areas using the results of quasi-synchronous *in situ* measurements. It was found that the use of the standard Nechad algorithm for calculating seawater turbidity gives high correlation with the results of sub-satellite measurements in the Mzymta river mouth areas at turbidity values <50 NTU. The possibility of using the Dogliotti algorithm in different geographical areas under the condition of high turbidity of coastal waters ≥ 100 NTU is shown. The results obtained can serve as a methodological recommendation for the use of the algorithms considered in this paper in the coastal areas of the Black and Caspian seas.

Keywords: water turbidity, suspended sediment concentration, *in situ* measurements, ACOLITE, Sentinel-2 MSI, Landsat-8, -9 OLI/TIRS, Caspian Sea, Terek, Sulak, Black Sea, Mzymta

Accepted: 14.10.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-50-68

References

- 1. Dzhaoshvili S., *Rivers of the Black Sea*, *Technical Report No.* 71, European Environment Agency, 2002, 58 p. (in Russian).
- 2. Drozhzhina K.V., Features of the climatic conditions of the Mzymta river basin for recreational activities, *Young Scientist*, 2013, Vol. 5, pp. 196–198 (in Russian).
- 3. 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.

- 4. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite Methods for Detecting and Monitoring Marine Zones of Ecological Risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 334 p. (in Russian).
- 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, Vol. 19, No. 5, pp. 264–283 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
- 6. 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.
- 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.
- 8. Dogliotti A. I., Ruddick K. G., Nechad B. et al., A single algorithm to retrieve turbidity from remotelysensed data in all coastal and estuarine waters, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 156, pp. 157–168, https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020.
- 9. Doxaran D., Froidefond J. M., Castaing P., Babin M., Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data, *Estuarine*, *Coastal and Shelf Science*, 2009, Vol. 81, No. 3, pp. 321–332, DOI: 10.1016/j.ecss.2008.11.013.
- 10. 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, *Current Research on Remote Sensing*, *Laser Probing*, *and Imagery in Natural Waters: Proc. SPIE*, 2007, Vol. 6615, pp. 56–66, https://doi.org/10.1117/12.740441.
- 11. Kuhn C., de Matos Valerio A., Ward N. et al., Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 surface reflectance products for river remote sensing retrievals of chlorophyll-a and turbidity, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 224, pp. 104–118, https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.023.
- 12. 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*, 2021, Vol. 43, pp. 215–240, https://doi.org/10.1080/01431161.2021.2009149.
- 13. 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.
- 14. 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.
- 15. 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.
- 16. 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.
- 17. Vanhellemont Q. (2019a), Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 225, pp. 75–192, https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010.
- 18. Vanhellemont Q. (2019b), Daily metre-scale mapping of water turbidity using CubeSat imagery, *Optics Express*, 2019, Vol. 27, pp. A1372–A1399, https://doi.org/10.1364/OE.27.0A1372.
- 19. Vanhellemont Q., Sensitivity analysis of the dark spectrum fitting atmospheric correction for metre- and decametre-scale satellite imagery using autonomous hyperspectral radiometry, *Optics Express*, 2020, Vol. 28, pp. 29948–29965, https://doi.org/10.1364/OE.397456.
- 20. Vanhellemont Q., Ruddick K., Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 145, pp. 105–115, https://doi.org/10.1016/j. rse.2014.01.009.
- 21. Vanhellemont 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.
- Vanhellemont Q., Ruddick K., Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery, *Proc. 2016 ESA Living Planet Symp.*, Prague, Czech Republic, 2016, pp. 9–13.
- 23. Vanhellemont Q., Ruddick K., Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 216, pp. 586–597, https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.015.

- 24. Vanhellemont Q., Ruddick K., Atmospheric correction of Sentinel-3/OLCI data for mapping of suspended particulate matter and chlorophyll-a concentration in Belgian turbid coastal waters, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 256, Article 112284, https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112284.
- 25. Wang J., Lee Z., Wang D. et al., Atmospheric correction over coastal waters with aerosol properties constrained by multi-pixel observations, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 265, https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112633.