

НОВЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО  
КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ МОРЯ НА ОСНОВАНИИ СПУТНИКОВЫХ  
ДАННЫХ OLCI ПЕРВОГО УРОВНЯ ОБРАБОТКИЕ. Б. Шибанов\* , А. С. Папкова 

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\* **Контакт:** Евгений Борисович Шибанов, e-shybanov@mail.ru

В работе предложен альтернативный метод атмосферной коррекции спутниковых данных о цвете моря на примере сканера OLCI для Черного моря. В настоящее время для задач дистанционного зондирования в большинстве случаев используется стандартный алгоритм атмосферной коррекции Гордона и Ванга (GW94). Однако при использовании этого алгоритма в коротковолновой части спектра часто наблюдаются отрицательные значения спектрального коэффициента яркости моря  $R_{rs}(\lambda)$ , которые не имеют физического смысла и искажают расчёты концентраций хлорофилла-*a* и жёлтого вещества. В данной работе предложен простой алгоритм, построенный исключительно на аналитических формулах, где концептуально реализуется одновременно две процедуры: интерполяции и экстраполяции – по двум спектральным каналам, интерполяции на основе постоянства соотношения индекса цвета ( $CI = R_{rs}(412)/R_{rs}(443) = 0,8$ ). На отдельных примерах данных сканера OLCI, установленного на спутниках Sentinel 3A/3B, была проверена работоспособность нового алгоритма при различном состоянии атмосферы и морской поверхности путем сопоставления результатов с натурными измерениями платформ AERONET-OC, с данными уровня 2 и с работой регионального метода дополнительной коррекции. Новый алгоритм был протестирован при следующих условиях: чистая атмосфера (присутствие фоновое аэрозоля), наличие пылевого аэрозоля, границы облачности, наличие солнечного блика, цветение кокколитофорид. При анализе ряда спутниковых снимков Sentinel 3A/3B получено, что новый простой алгоритм оказался в среднем лучше стандартного, что означает перспективу его совершенствования. Преимуществом данного подхода является его универсальность и возможность его реализации для других акваторий, при наличии закономерностей в изменчивости «синего» индекса цвета.

**Ключевые слова:** аэрозоль, атмосферная коррекция, коэффициент яркости моря, оптика моря, индекс цвета, интерполяция, Черное море.

**Цитирование:** Шибанов, Е. Б., А. С. Папкова Новый метод восстановления спектрального коэффициента яркости моря на основании спутниковых данных OLCI первого уровня обработки // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES3008. — DOI: 10.2205/2025es001014 — EDN: PQXEIY

### Введение

Спутниковые сканеры цвета, например, MODIS, VIIRS, HawkEYE, OLCI измеряют спектральные величины яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы ( $L_{TOA}$ ), которая включает в себя рассеянное аэрозольными частицами и молекулами воздуха излучение, а также излучение, отраженное как поверхностью воды, так и водной толщей. Величина  $L_{TOA}$  является продуктом первичного уровня спутниковой обработки (уровень 1). Для выделения составляющей  $L_w$ , характеризующую оптические свойства морской воды, необходима процедура «атмосферной коррекции», исключая вклад других составляющих в суммарную величину  $L_{TOA}$  [Gordon, 1978]. Стоит отметить, что атмосферная коррекция спутниковых измерений,

<https://elibrary.ru/PQXEIY>

Получено: 30 октября 2024 г.

Принято: 30 апреля 2025 г.

Опубликовано: 13 мая 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

особенно в прибрежной зоне, представляет собой сложную задачу из-за малого вклада величины  $L_w$  в суммарную яркость, а также вследствие совокупности других факторов – загрязнённой атмосферы, поверхностного волнения, засветки пикселей вблизи берега и др. [Копелевич и др., 2015; Шибанов и Папкина, 2022; Feng et al., 2018; Gordon, 2021; Hu et al., 2000, 2012; Ruddick et al., 2000]. Конечным продуктом атмосферной коррекции является спектральный коэффициент яркости моря  $R_{rs}(\lambda)$ , который, по определению, есть отношение восходящей яркости  $L_w$  к величине потока света, падающего на поверхность моря.

Gordon [1978] заложил основу алгоритмов атмосферной коррекции, предложив отдельно рассматривать аэрозольную и молекулярную составляющую рассеяния света в атмосфере, при этом, в ранних версиях алгоритмов атмосферной коррекции использовались простые аналитические формулы [Viollier et al., 1980]. Совершенствование алгоритмов коррекции требовало более точного определения эффектов многократного рассеяния с учетом модели аэрозоля [Carder et al., 1999; Gordon et al., 1988; Gould et al., 1999]. Были рассчитаны таблицы рассеяния света рэлеевской атмосферой с взволнованной поверхностью моря при заданных скоростях ветра [Gordon and Wang, 1992] и отдельно аэрозольной атмосферой для нескольких моделей аэрозоля [Gordon and Wang, 1994]. Второй принцип, предложенный Гордоном, заключался в определении вклада аэрозольной составляющей по значениям яркости в ближней инфракрасной (ИК) области спектра, где вклады яркости моря обычно невелики и могут быть точно оценены с помощью итеративного подхода к биооптическому моделированию, как описано в работе [Remote . . ., 2000]. Для описания спектральных свойств аэрозольного рассеяния, Гордон ввел величину  $\varepsilon(\lambda_i, \lambda_j)$ , где  $\lambda_i, \lambda_j$  произвольные длины волн. Согласно алгоритмам атмосферной коррекции величина  $\varepsilon(\lambda_{IR_1}, \lambda_{IR_2})$  равна отношению коэффициентов отражения аэрозольной атмосферы в ближней ИК-области спектра в линейном приближении и получена по данным спутниковых измерений. Выбирались две такие модели аэрозоля, чтобы величина  $\varepsilon(\lambda_{IR_1}, \lambda_{IR_2})$  была линейной комбинацией ближайших модельных величин  $\varepsilon_{\text{mod}}(\lambda_{IR_1}, \lambda_{IR_2})$ , где  $\lambda_{IR_1}, \lambda_{IR_2}$  – выбранные для атмосферной коррекции длины волн в ИК-области спектра.

Один из недостатков стандартного подхода, основанного на использовании исключительно ИК области, заключается в неустойчивости решения задачи оценки оптической модели аэрозоля, проявляющейся в наличие «точек бифуркации» при выборе линейной комбинации двух моделей аэрозоля. Например, ранее было выяснено, что в процессе работы алгоритма зачастую происходит «переключение» используемой комбинации моделей аэрозоля [Суетин и др., 2004]. В последствие этот недостаток удалось устранить, используя информацию об относительной влажности [Ahmad et al., 2010].

Более существенным мешающим фактором оказался поглощающий аэрозоль, характерный для прибрежных районов и для периодов пылевых выносов. В этом случае влияние поглощения становится сильнее в спектральной области больших оптических толщин, т.е. в коротковолновой области спектра [Суетин и др., 2008]. Как было отмечено, учет фактора поглощающего аэрозоля в рамках стандартных методов атмосферной коррекции возможен только с привлечением информации о вертикальном профиле поглощающих аэрозольных частиц, полученных в подспутниковых экспериментах [Antoine and Morel, 1999].

В связи с ограниченной точностью определения сигнала атмосферы в «синих» спектральных каналах исключительно по ИК-области, достоверность вычисления яркости моря в коротковолновой части спектра весьма низкая, что подтверждается отрицательными величинами коэффициента яркости моря [Копелевич и др., 2018; Папкина и др., 2024; Суетин и др., 2013; Korchemkina and Kalinskaya, 2022; Mélin, 2022; Moulin et al., 2001; Schollaert et al., 2003; Shybanov and Papkova, 2022; Wei et al., 2020]. По этой причине разработка принципиально других методов атмосферной коррекции представляет практический интерес. Заметим, что совершенствование оптических

моделей аэрозоля не решает проблему вследствие влияния стратификации аэрозоля на сигнал в коротковолновой области.

В настоящее время уже создан ряд альтернативных методов атмосферной коррекции, например, нейросетевые алгоритмы, такие как C2RCC (Case 2 Regional CoastColour). Основой для данных типов алгоритма является набор спектров коэффициента яркости моря (более 5 миллионов случаев), которые используются в качестве нижних граничных условий для расчета переноса излучения в атмосфере и является основой для обучения нейронных сетей [Brockmann et al., 2016]. Однако, валидация алгоритма C2RCC (OLCI), проведенная по данным северо-восточной части Черного моря за 2018 год, показала плохую корреляцию между спутниковыми и натурными данными [Вазюля и др., 2018].

Одним из способов улучшения эффективности процедуры атмосферной коррекции является использование коротковолновой области спектра. Впервые данная идея была высказана в [Паршиков и Ли, 1992]. По результатам спектрорадиометрии поверхности Черного моря с борта самолета-лаборатории АН-30 было установлено, что изменчивость измеряемого сигнала вдоль трассы (на постоянной высоте полета) в «синей» области спектра в значительной мере обусловлена влиянием атмосферы. Тем самым, предлагалось использовать процедуру интерполяции из ближней ИК и коротковолновой области спектра в середину видимого диапазона. В данной постановке задачи возникают два вопроса – как выбрать функцию интерполяции и как параметризовать коэффициент яркости моря в коротковолновой области. В работе [Корчелкина и др., 2009] было показано, что при максимальном вкладе атмосферы ошибка атмосферной коррекции описывается законом  $C_0 + C_1 \cdot \lambda^{-2}$ , а для оценки величины коэффициента яркости в коротковолновой области было предложено использовать упрощенную двухпараметрическую модель. Теоретические оценки показали, что неточная информация о профиле аэрозоля и его альбедо однократного рассеяния приводит к спектральной ошибке расчета рассеяния света в атмосфере  $\sim [1 - \Lambda(\lambda)] \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \lambda^{-4}$ , где  $\Lambda(\lambda)$ ,  $\tau_a(\lambda)$  – альбедо однократного рассеяния и оптическая толщина аэрозоля [Shybanov and Papkova, 2022]. Вид зависимости объясняется поглощением аэрозолем излучения, рассеянного молекулами воздуха. Зависимость ошибки коррекции, близкая к степенной с показателем степени  $-3,58$ , была обнаружена при сопоставлении спутниковых данных с данными AERONET-OC в период присутствия пыли [Шибанов и Папкова, 2021].

При анализе натурных данных было установлено, что наиболее устойчивой характеристикой спектрального коэффициента яркости моря в прибрежной зоне является его наклон в коротковолновой области спектра. На основе этой закономерности для вод Черного моря был предложен способ дополнительной коррекции спутниковых данных второго уровня [Shybanov and Papkova, 2022]. Предполагалось, что ошибка стандартного алгоритма NASA описывается законом  $C_0 + C_1 \cdot \lambda^{-4}$ , а величина «синего» индекса цвета  $R_{rs}(412)/R_{rs}(443) = 0.8$  [Shybanov et al., 2023]. Дополнительная коррекция, конечно, решает проблему отрицательных значений коэффициента яркости, но не влияет на выбор модели аэрозольного рассеяния и не устраняет соответствующую неустойчивость. Поскольку дополнительная коррекция, по сути, вводит еще один канал для проведения атмосферной коррекции, то естественно, изначально ставить задачу учета влияния атмосферы в прибрежной зоне по двум каналам в ближней ИК области и одному в коротковолновой. При этом может отпасть необходимость излишней детализации свойств аэрозоля, а также упроститься алгоритмы расчета. Мы начинаем с простого алгоритма с аналитическими формулами по теории переноса, ранее используемыми при обработке спутниковых данных [Viollier et al., 1980], чтобы выяснить в дальнейшем, что является принципиальным и что потребует совершенствования в этой новой постановке задачи. Следует заметить, что качество последующих алгоритмов определяется успешностью работы начального алгоритма.

## Инструменты и методы

В качестве спутниковых данных рассматривались данные сканера OLCI (Sentinel 3A/3B) первого ( $L_{TOA}$ ) и второго уровня обработки  $R_{rs}(\lambda)$ . Второй уровень спектрального коэффициента яркости моря и его синхронные натурные измерения необходимы для оценки эффективности нового метода атмосферной коррекции. Сканер был запущен в 2016 году и предназначен для измерения цвета океана и суши. Он является спектрометром, формирующим изображения среднего разрешения и по сравнению с MERIS имеет дополнительные спектральные каналы, другое расположение камер и упрощенную бортовую обработку. Все поле обзора смещено по трассе на  $12,6^\circ$  от Солнца, чтобы свести к минимуму воздействие солнечных бликов. Сканер OLCI оснащен бортовым оборудованием, работающим на основе солнцезащитных диффузоров для проведения калибровки полученных результатов измерений. Есть три солнечных рассеивателя: два «белых», предназначенных для радиометрической калибровки, и один, предназначенный для спектральной калибровки с характеристиками спектрального отражения. Собственное разрешение составляет примерно 300 м, что называется полным разрешением (FR). Режим обработки с уменьшенным разрешением (RR) предоставляет данные уровня 1B с частотой дискретизации, уменьшенной в четыре раза в обоих пространственных измерениях, что приводит к разрешению примерно 1,2 км [European Space Agency, 2025]. На данный момент OLCI является одним из самых современных, надежных и точных инструментов дистанционного зондирования, который прошел ряд репроцессингов и калибровок. Его преимуществом так же является доступность данных в прямом доступе на сайте <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>, где и были взяты данные первого и второго уровня обработки.

Источником натуральных измерений спектрального коэффициента яркости и параметров атмосферы (аэрозольная оптическая толщина (АОТ), параметр Ангстрема (AE)) для Черного моря служили результаты измерений с платформы AERONET-OC – Section-7 ( $44,5^\circ\text{N}$ ,  $29,4^\circ\text{E}$ ). Платформа Section-7 расположена примерно в 12 морских милях от побережья Румынии к югу от устья Дуная, где глубина воды составляет около 40 м. Платформа Galata AERONET-OC, созданная в 2014 году, расположена примерно в 13 морских милях от побережья Болгарии напротив города Варна. Глубина воды на этом участке 35 м.

Регулярно для западной части Черного моря предоставляются данные о яркости моря ( $L_w$ ), а также нормализованной яркости моря ( $L_{wn}$ ), рассчитанной по методу, предложенному Zibordi et al. [2009] для устранения зависимости  $L_w$  от геометрии наблюдения. Значения  $L_{wn}(\lambda)$  будут переведены в  $R_{rs}(\lambda)$  путем деления на солнечную постоянную  $F_0(\lambda)$  [Thuillier et al., 2003].

Для черноморских станций AERONET при анализе статистики Зиборди с соавторами была выявлена высокая эффективность и точность измерений сканерами OLCI [Zibordi et al., 2022].

Дополнительным информационным ресурсом об источнике зарождения атмосферного аэрозоля являлись обратные траектории, построенные при помощи открытого ПО HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model). Траекторные модели сопровождаются информацией об изменении метеопараметров вдоль движения воздушных масс и оптимальным образом удовлетворяют изменениям в поле ветра при задании расчетных параметров [Stein et al., 2015]. В контексте данного исследования мы используем данную модель как дополнение к спутниковым снимкам True Color для подтверждения, что аэрозоль зарождается в открытых источниках минеральной пыли (пустыни).

## Алгоритм

Предложен простой аналитический алгоритм, реализующий одновременно две процедуры: экстраполяции и интерполяции. Несмотря на некоторую схожесть с ранними аналитическими алгоритмами [Viollier et al., 1980], существует ряд принципиальных отличий. Аналитически учитывается только молекулярное рассеяние. Оставшаяся

часть рассеяния атмосферы представляется в виде функции с тремя неизвестными  $C_2 \cdot (\lambda_{\text{NIR}}^{-4} - \lambda^{-4}) + C_1 \cdot \lambda^{-2} + C_0$ , где  $\lambda_{\text{NIR}}$  – ближайший используемый канал в ИК области. Эта функция описывает эффекты рассеяния и поглощения аэрозольными частицами. Два параметра  $C_0 + C_1$  предназначены для оценки вклада аэрозольного рассеяния и определяются по ближнему ИК диапазону. Параметр  $C_2$ , в основном, служит для учета изменения молекулярной составляющей рассеянной радиации вследствие присутствия поглощающих частиц. Для нахождения параметра  $C_2$  дополнительно привлекается коротковолновая часть видимого диапазона, в котором наблюдается максимальная погрешность стандартной атмосферной коррекции. Условие в коротковолновой части предполагает, что «синий» индекс цвета  $CI = R_{rs}(412)/R_{rs}(443) = \text{const}$ . В Черном море величина  $CI$  по данным двух приборов принимает значения  $CI = 0,77 \pm 0,11$ ,  $CI = 0,84 \pm 0,08$  [Shybanov et al., 2023]. Также, параметр  $C_2$  учитывает особенности аэрозольного рассеяния, которые не проявляются в ближней ИК области, устраняет погрешности калибровки по абсолютной величине, компенсирует неточность аналитических выражений переноса излучения в молекулярной атмосфере.

По определению коэффициент яркости на верхней границе атмосферы равен:

$$\rho_{\text{TOA}} = \frac{\pi \cdot L_{\text{TOA}}}{\mu_0 \cdot F_0}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – косинус зенитного угла Солнца. С учетом пропускания озона  $T_{\text{OZ}}$ , коэффициент яркости моря находится из выражения:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{\rho_{\text{TOA}}(\lambda)/T_{\text{OZ}} - \rho_R(\lambda) - f_a(\lambda)}{\pi \cdot T_R \cdot T_a}, \quad (2)$$

где  $\rho_R(\lambda)$  – коэффициент яркости молекулярной атмосферы,  $T_R$ ,  $T_a$  – пропускание через молекулярную и аэрозольную атмосферы по двойному пути к поверхности моря и от поверхности,  $f_a(\lambda)$  – функция коррекции, близкая к коэффициенту яркости аэрозольной атмосферы  $\rho_a(\lambda)$ .

Коэффициент яркости молекулярной атмосферы определялся приближенной формулой, которая с высокой точностью описывает отражение и пропускание слоя малой оптической толщины ( $\tau < 0.4$ ) при изотропном консервативном рассеянии [Шибанов, 2020; Шибанов и Афонин, 1989].

$$\rho_R(\lambda) = x_R(\gamma) \frac{(1 - \exp[-\frac{\tau_R}{\mu}]) \cdot (1 - \exp[-\frac{\tau_R}{\mu_0}])}{2 - 4 \cdot E_3(\tau_R)}, \quad (3)$$

где  $\tau_R$ ,  $x_R$  – рэлеевская оптическая толщина и индикатриса, как функция угла рассеяния  $\gamma$ ,  $\cos \gamma = -\mu \cdot \mu_0 + \sqrt{1 - \mu^2} \sqrt{1 - \mu_0^2} \cos \phi$ ,  $\phi$  – азимут наблюдения относительно азимута Солнца;  $\mu$ ,  $\mu_0$  – косинусы зенитных углов;  $E_3(x) = \int_1^\infty y^{-3} \cdot \exp(-x \cdot y) \cdot dy \approx 0,5 - x + \frac{x^2}{2} [0,9228 - \ln(x)] + \frac{x^3}{6} - \frac{x^4}{48}$  – интегрально-показательная функция третьего порядка. Сравнение с приведенными в [Viollier et al., 1980] точными значениями коэффициента яркости молекулярной атмосферы показало, что максимальная относительная погрешность результатов расчетов по формуле (3) равна 7% для  $\lambda = 450$  нм,  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta_0 = 15^\circ$ , но уменьшается до 0,2% при  $\lambda = 450$  нм,  $\theta = 30^\circ$ ,  $\theta_0 = 60^\circ$ ,  $\phi = 90^\circ$ . В отличие от линейного приближения  $\rho_R = x_R(\gamma) \frac{\tau_R}{4\mu \cdot \mu_0}$  формула (3) описывает изменение спектральных свойств рассеяния с увеличением зенитных углов.

Пропускание молекулярной атмосферы и аэрозольной атмосферы задается формулами [Deschamps et al., 1983; Viollier et al., 1980]:

$$T_r(\lambda) = (1 + \exp[-\tau_R/\mu_0]) \cdot (1 + \exp[-\tau_R/\mu])/4, \quad (4)$$

$$T_a(\lambda) = (1 + B_a \cdot \tau_a/\mu)^{-1} \cdot (1 + B_a \cdot \tau_a/\mu_0)^{-1}, \quad (5)$$

где  $\tau_a$  – аэрозольная оптическая толщина,  $B_a$  – вероятность рассеяния назад частицами аэрозоля. Выражение (5) преобразуется к следующему виду:

$$T_a(\lambda) = (1 + 2\mu_0 \cdot \rho_a)^{-1} \cdot (1 + 2\mu \cdot \rho_a)^{-1} \tag{6}$$

с помощью соотношений  $x_a(\gamma) \approx 2 \cdot B_a$ ,  $\rho_a \approx x_a(\gamma) \cdot \tau_a / (4\mu \cdot \mu_0)$ , где  $x_a(\gamma)$  – индикатриса рассеяния частиц аэрозоля в задней полусфере,  $\rho_a = C_1 \cdot \lambda^{-2} + C_0$ .

Коэффициенты  $C_1$ ,  $C_0$  находились методом наименьших квадратов по значениям разности  $\rho_{TOA}(\lambda)/T_{OZ} - \rho_R(\lambda)$  в каналах 754, 779, 865, 885 нм, после чего можно определить остаток от сигнала  $\Delta\rho(\lambda) = \rho_{TOA}(\lambda)/T_{OZ} - \rho_R(\lambda) - C_1 \cdot \lambda^{-2} - C_0$ . Задавая величину «синего» индекса цвета  $CI = R_{rs}(412)/R_{rs}(443)$  и длину волны  $\lambda_{NIR} = 754$  нм получим:

$$C_2 = \frac{CI \cdot \eta \cdot \Delta\rho(443) - \Delta\rho(412)}{412^{-4} - 754^{-4} - CI \cdot \eta \cdot (443^{-4} - 754^{-4})}, \tag{7}$$

где  $\eta = T_R(412) \cdot T_a(412)/T_R(443)/T_a(443)$ . Коррекция по «синей» области не распространялась на ближнюю ИК область. В итоге коэффициент яркости моря в видимом диапазоне есть:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{\rho_{TOA}(\lambda)/T_{OZ} - \rho_R(\lambda) - C_1 \cdot \lambda^{-2} - C_0 + C_2 \cdot (\lambda^{-4} - 754^{-4})}{\pi \cdot T_R(\lambda) \cdot T_a(\lambda)}. \tag{8}$$

Поскольку суть метода состоит в компенсации ошибок, обусловленных выбором оптической модели аэрозоля и его вертикального распределения с дальнейшим расчетом распространения излучения, то принципиальными источниками погрешностей предложенного метода являются неточные значения индекса цвета и величина показателя степени. Ошибка экстраполяции, при правильных значениях  $CI$  и по  $n$ , оценивается формулой коррекции по коротковолновой области

$$\pi \cdot \Delta R_{rs}(\lambda) = A \cdot \left[ \frac{412}{\lambda} \right]^n, \tag{9}$$

$$A = \frac{CI \cdot \Delta\rho(443) - \Delta\rho(412)}{1 - CI \cdot \left[ \frac{412}{443} \right]^n}. \tag{10}$$

Дифференцируя выражение (10) по  $CI$  и по  $n$  получим:

$$\delta R_{rs}(\lambda) = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{412}{\lambda} \right]^n \cdot \frac{\Delta\rho(443) - \Delta\rho(412) \cdot [412/443]^n}{(1 - CI \cdot [412/443]^n)^2} \cdot \delta CI, \tag{11}$$

$$\delta R_{rs}(\lambda) = \frac{1}{\pi} A \cdot \left[ \frac{412}{\lambda} \right]^n \cdot \frac{\ln[412/\lambda]}{1 - CI \cdot [412/443]^n} \cdot \delta n. \tag{12}$$

Из (11) видно, что погрешность коррекции, обусловленная неточностью задания индекса цвета, увеличивается с ростом этого индекса. Приближенная оценка погрешности, если  $CI = 0,8 \pm 0,1$  и  $n = 4$  дает величину в 60% от значения числителя, зависящего от ошибок в предварительной оценке  $\rho_W(443)$ ,  $\rho_W(412)$ . Если же  $CI = 1$ , то погрешности увеличатся в 2,54 раза. И наоборот, более низкие значения  $CI$  приводят к уменьшению погрешности в случае неточного задания индекса цвета. Выражение (12) показывает, как соотносится ошибка в выборе  $n$  и ошибка экстраполяции. При  $n = 4$ ,  $CI = 0,8$  коэффициент пропорциональности на 443 нм равен  $\frac{\ln[412/443]}{1 - CI \cdot [412/443]^n} \approx -0,18$ . Если  $\delta n = 1$ , то ошибки становятся равными на 615 нм.

### Результаты и обсуждения

По новой методике было проанализировано несколько случайных спектров  $L_{TOA}$  (1 уровень), полученных OLCI (Sentinel 3A и Sentinel 3B) в окрестности черноморских платформ AERONET-OC (Section-7 или Galata\_Platform) при различных атмосфер-

ных условиях. Стоит отметить, что было собрано максимум необычных явлений на спутниковых снимках за близкий временной период, таким образом, наиболее подходящими являлись летние месяцы, так как именно летом отмечается пик цветения кокколитофорид, наличие спутникового блика (слишком высокая освещённость), а также наивысшая вероятность выявления пылевого переноса. Как было ранее показано в работе [Shybanov et al., 2023] в Черном море отношение коэффициентов яркости в синей области спектра удовлетворяет условию  $CI = R_{rs}(412)/R_{rs}(443) = 0.8$ . Именно слабая изменчивость синего индекса цвета позволяет реализовать предложенную методику для Черного моря. Для осуществления сравнительного анализа помимо выбора данных за случайные дни были отобраны специальные даты, при которых условия наблюдения не являлись оптимальными для работы спутника. Например, слабая облачность, облачность на границе снимка и засветка от солнечного блика. Также рассматривался случай сильного цветения кокколитофорид. В дополнение для каждой из выбранных дат анализировалась изменчивость параметров атмосферы (АОТ, АЕ(440–870)) для оценки реальной ситуации над исследуемым регионом. В табл. 1 приведены усредненные значения по черноморским станциям AERONET. Стоит отметить, что СКО вариации переменных составляла менее 10% от самой величины, что позволяет провести процедуру усреднения без потери качества данных (табл. 1).

Таблица 1. Усредненные значения параметров атмосферы по черноморским станциям AERONET за исследуемый период

Дата		АОТ	АЕ (440–870)
09.06.2024		0,0326	1,6
11.06.2024	Случайный набор дат за 2024 год	0,25	0,3
23.06.2024		0,19	0,24
27.07.2024		0,07	1,83
17.06.2022	Цветение кокколитофорид	0,045	1,658
22.06.2022		0,055	1,255
21.06.2022	Границы облачности	0,053	1,684
29.06.2022		0,062	1,292
02.06.2023	Спутниковая засветка	0,075	1,575

На рис. 1 представлены некоторые из изучаемых случаев за лето 2024 года для презентации полученного результата. Стоит отметить, что по натурным измерениям 09.06.2024 является днем с наиболее чистой атмосферой (малые значения АОТ и высокие значения АЕ (табл. 1)), 11.06.2024 и 23.06.2024 зарегистрированы пылевые переносы (желтая дымка) над исследуемой координатой. Наличие пыли подтверждается высокой замутненностью атмосферы и наличием крупнодисперсных частиц в атмосфере (высокие значения АОТ и низкие АЕ (табл. 1)). 27.07.2024 рассматривается днем с облачностью. Пылевые переносы были подтверждены не только визуально и по натурным измерениям параметров атмосферы, но и обратными 7-ми дневными траекториями модели HYSPLIT, характерными показательными размерного распределения частиц, альбеда однократного рассеяния, АОТ поглощения. Более детально методика идентификации пыли и определения ее оптических свойств над Черноморским регионом описана в [Kalinskaya and Papkova, 2022].

После применения алгоритма происходило сопоставление результатов нового алгоритма и стандартного алгоритма GW94 (уровень 2) атмосферной коррекции с натурными измерениями с платформы Section-7 (рис. 2). Для сравнения результатов, был применен также региональный алгоритм коррекции продуктов яркости уровень 2, детально описанный в работе [Shybanov and Papkova, 2022]

Из рис. 2 видно, что новый алгоритм работает лучше, чем стандартная атмосферная коррекция, которая в дни пылевых переносов 11.06.2024 и 23.06.2024 показала даже отрицательные величины спектрального коэффициента яркости на 412 нм. Хотя

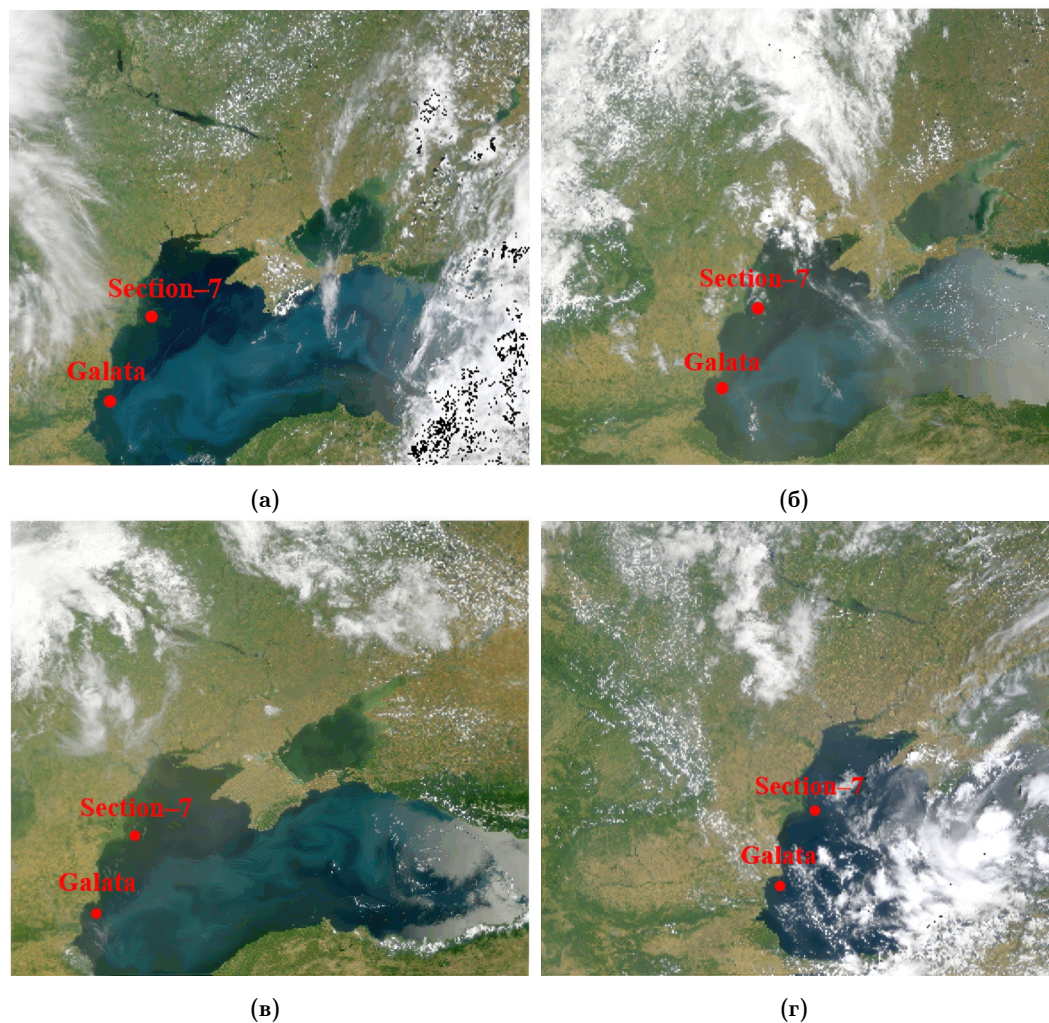


Рис. 1. Снимки со спутников Sentinel 3A и Sentinel 3B (True Color) за исследуемые даты. а) – 09.06.2024, чистая атмосфера; б) – 11.06.2024, пылевой аэрозоль; в) – 23.06.2024, пылевой аэрозоль; г) – 27.07.2024, границы облачности.

коррекция продуктов уровня 2 позволяет получить достаточно близкие к натурным значения коэффициента яркости, форма кривой в диапазоне от 412 до 490 нм остается выпуклой, в отличие от натурной данных и данных, рассчитанных по новой методике. Такого рода ошибка генерируется стандартной методикой и не может быть устранена с помощью дополнительной коррекции.

Для успешной работы алгоритмов атмосферной коррекции, основанных на точных расчетах, необходимо, чтобы выполнялся ряд требований, включая условие горизонтальной неоднородности атмосферы. Как следствие, пиксели вблизи границ облаков часто имеют искаженные  $R_{rs}(\lambda)$  и характеризуются завышенными значениями АОТ [Шибанов и Папкова, 2021]. Искажения в спектре  $R_{rs}(\lambda)$  также могут возникать из-за неоднородностей моря, поскольку световые контрасты сильнее размываются в коротковолновой области. В последние годы в западной части Черного моря наблюдается практически регулярное цветение кокколитофорид, развивающееся в конце мая, в июне и постепенно убывающее в течение июля [Kubryakov et al., 2019]. Цветение кокколитофорид сопровождается высокими значениями спектрального коэффициента яркости моря, но малыми изменениями формы спектра. Неравномерность развития фитопланктона хорошо видна на спутниковых снимках. Например, в июне 2022 года был зарегистрирован случай цветения, наглядно отражающий динамику поверхностных течений в море [EUMETSAT, 2022]. Были отобраны наиболее качественные снимки (без облачности или засветки) за 17.06.2022 и 22.06.2022, которые были проанализированы с применением



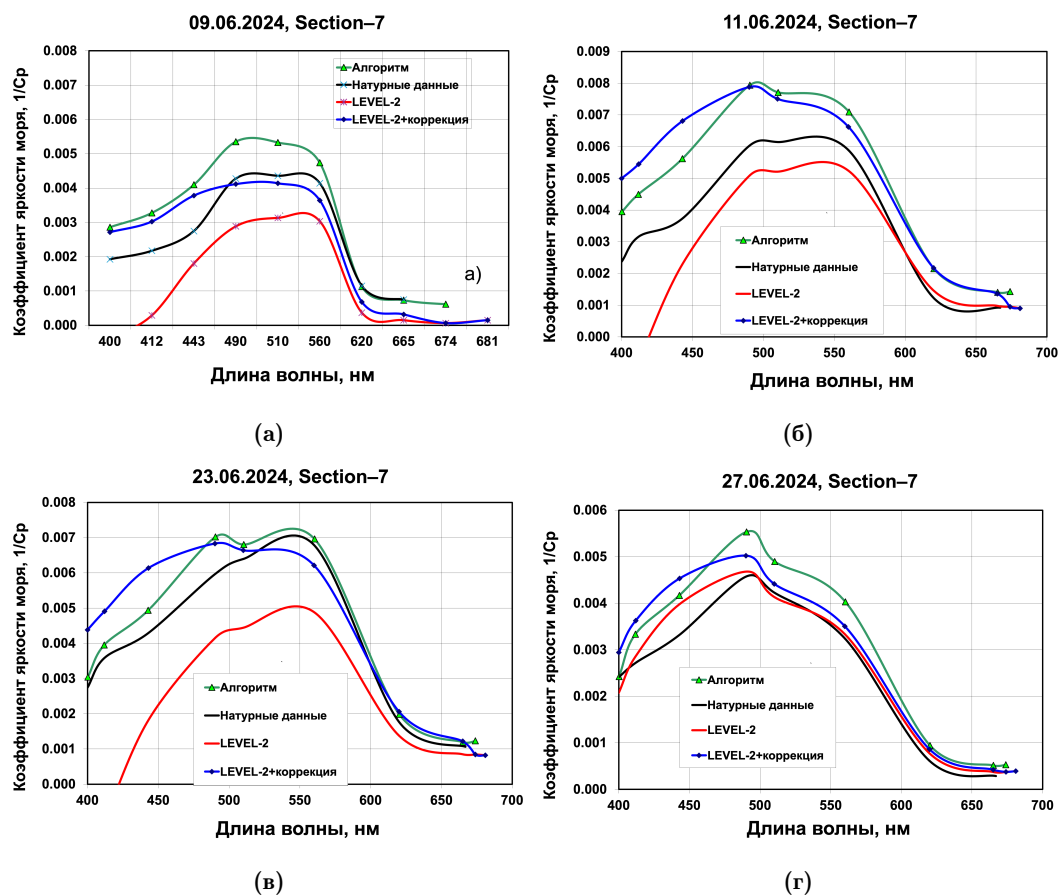


Рис. 2. Сравнение результатов работы нового алгоритма (зеленый) с данными  $R_{rs}(\lambda)$ , полученными: по стандартному алгоритму NASA (красный), по стандартному алгоритму с привлечением дополнительной коррекции синий) и с натурными данными AERONET-OC (желтый). а) – чистая атмосфера; б), в) – пылевой аэрозоль; г) – границы облачности.

алгоритмов коррекции в районах двух Черноморских станций AERONET-OC (рис. 3). По данным станций AERONET-OC величины AOT и AE свидетельствуют о слабо замутнённой атмосфере с преобладанием мелкодисперсной фракции аэрозоля (табл. 1).

Как видно из рис. 3, результаты расчетов по новому алгоритму за 17.06.2022 практически совпадают с натурными данными. Идеальное совпадение наблюдается для платформы Galata. За исключением длинноволновой части видимого диапазона данные уровня 2 ложатся заметно ниже кривой данных AERONET-OC. Аналогичный результат наблюдается и за 22.06.2022. Из приведенных графиков видно, что дополнительная коррекция данных уровня 2 слабо повлияла на улучшение результатов. Это еще раз доказывает целесообразность использования нового подхода.

Влияние на определение спектральной зависимости коэффициента яркости Черного моря также могут оказывать и границы облаков. Даже при качественной обработке данных, на границе облаков часто имеют искаженные  $R_{rs}(\lambda)$  с присутствием завышенных значений AOT [Шибанов и Папкова, 2021]. Рассмотрим совокупное действие двух факторов, цветения кокколитофорид и наличия границы облачности в атмосфере над наблюдаемой точкой. Этому критерию соответствовали данные за 21.06.2022 и за 29.06.2022. При их обработке были получены следующие результаты (рис. 4). За 21.06.2022 расчеты по алгоритму лучше согласуются с натурными данными. За 29.06.2022 для платформы Section-7 стандартный алгоритм искажает форму кривой в синей части спектра. Новый алгоритм лучше воспроизводит форму спектра, завышая значения. Для станции AERONET Galata наблюдаются самые близкие значения к in situ данным (рис. 3д). Стоит отметить, что даже при наличии слабой облачности зача-

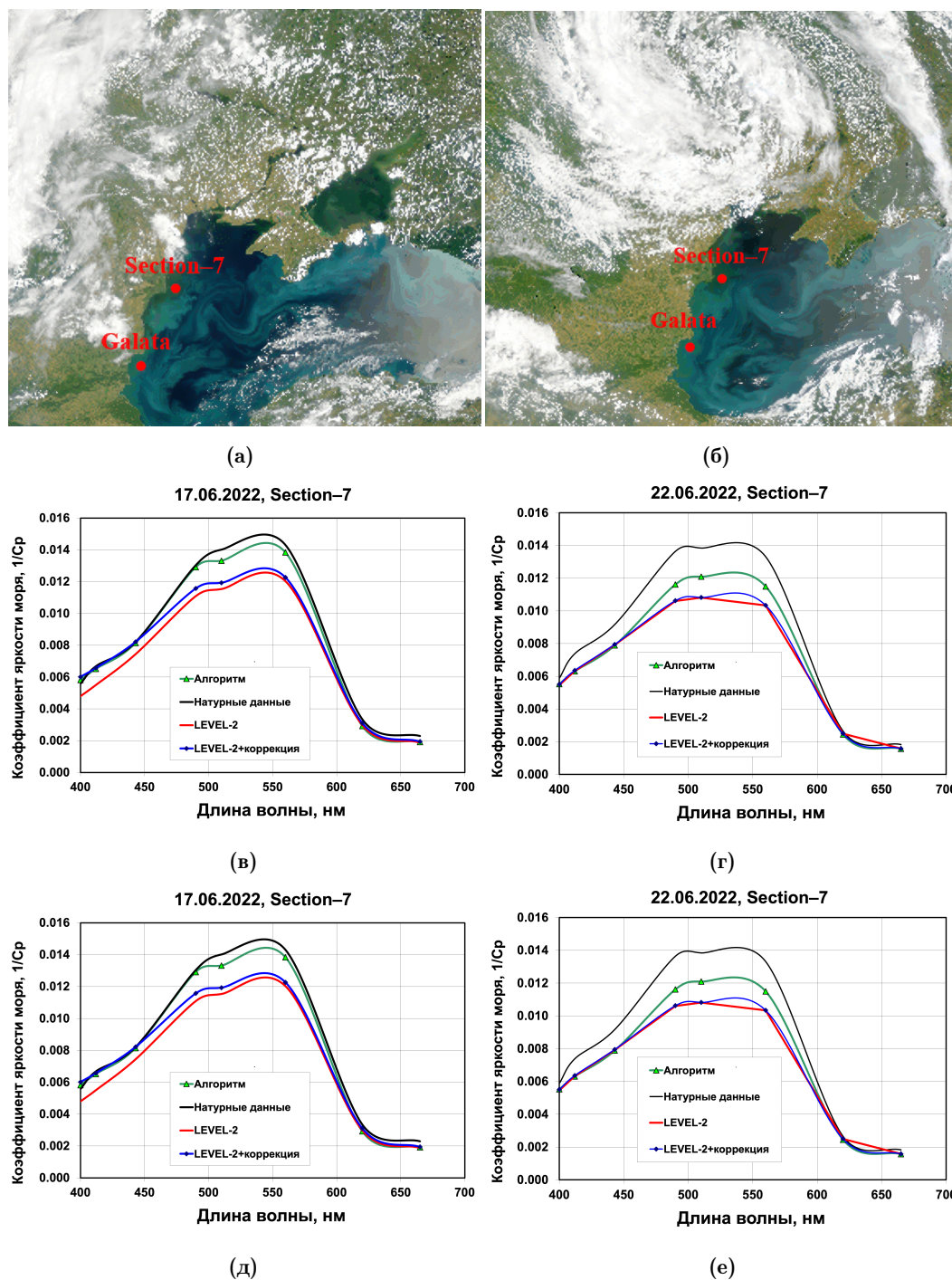


Рис. 3. Сравнение результатов работы нового алгоритма (зеленый) с данными  $R_{rs}(\lambda)$ , полученными: по стандартному алгоритму NASA (красный), по стандартному алгоритму с привлечением дополнительной коррекции (синий) с натурными данными AERONET-OC (желтый), измеренными с платформы Section-7 (v, г), с платформы Galata (д, е) и соответствующие спутниковые снимки за 17.06.2022 (а) и за 22.06.2022 (б).

стью происходит отбраковка данных по флагам ошибок и стандартный алгоритм не работает. Слабая облачность, похожая на белую дымку, наблюдалась над платформой Galata также за 07.06.2023, когда данных уровня 2 не предоставлялось, в то время как, новый алгоритм воспроизводит вполне приемлемый результат. По данным станций AERONET 21.06.2022 и 29.06.2022 АОТ является низкой (табл. 1), что не должно быть препятствием для наблюдений из Космоса.

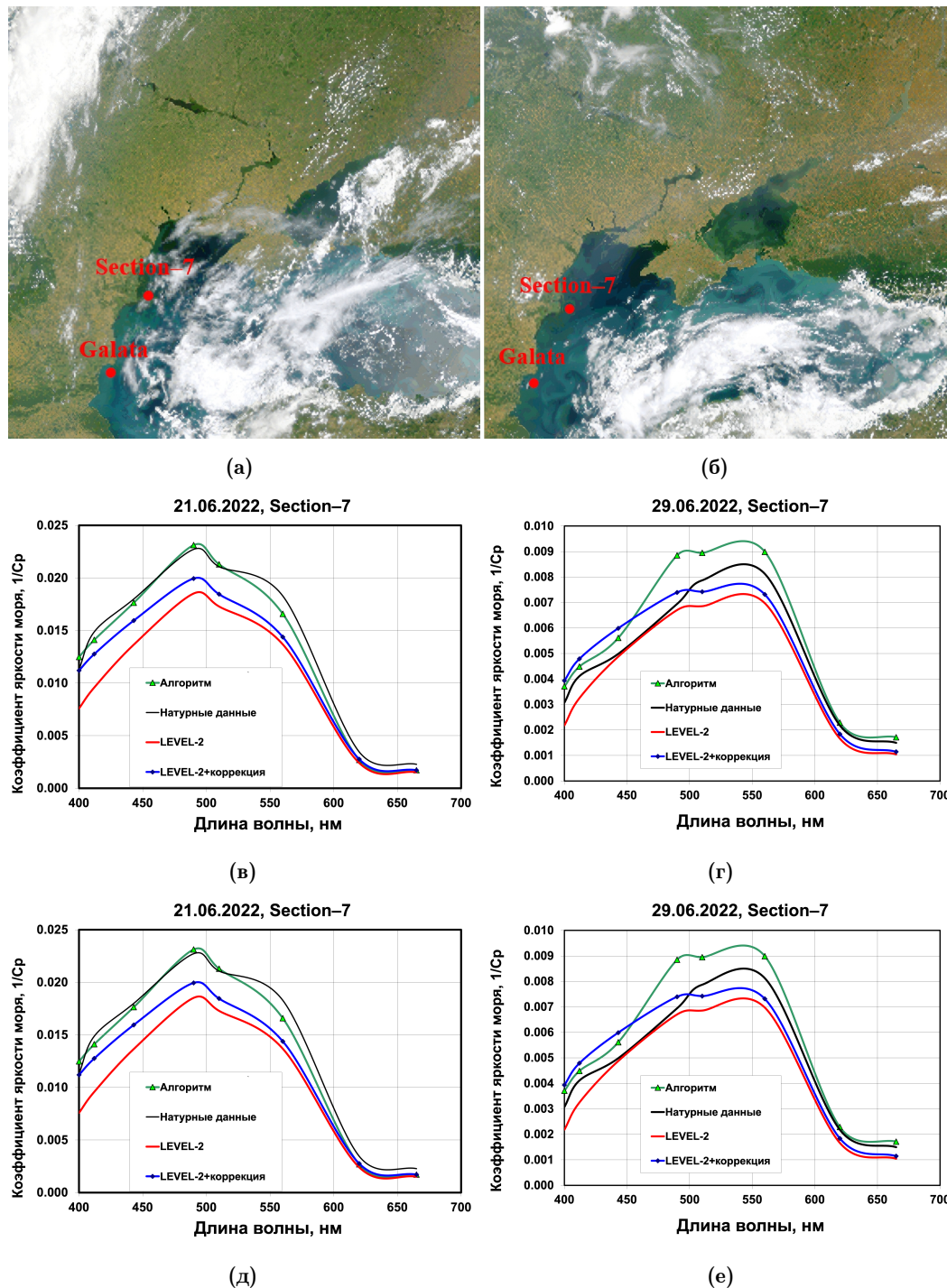


Рис. 4. Сравнение результатов работы нового алгоритма (зеленый) с данными  $R_{rs}(\lambda)$ , полученными: по стандартному алгоритму NASA (красный), по стандартному алгоритму с привлечением дополнительной коррекции (синий) с натурными данными AERONET-OC (желтый), измеренными с платформы Section-7 (v, г), с платформы Galata (д, е) и спутниковые снимки за 21.06.2022 (а) и за 29.06.2022 (б). 07.06.2022 спутниковые данные отсутствовали.

В дальнейшем анализе был отобран случай с ярко выраженной спутниковой за-светкой, причинами которой являются: солнечные блики и пена из-за поверхностного волнения, пылевые выносы [Kalinskaya and Parkova, 2022] или же аномально высокие значения спектрального коэффициента яркости [Суетин и др., 2016]. На рис. 5, пред-ставлен спутниковый снимок за 02.06.2023 и соответствующие спектры коэффициента

яркости для станции Section-7. Из табл. 1 следует, что атмосфера в этот день являлась ясной. На основании чего можно предположить, что источником засветки являлся солнечный блик.

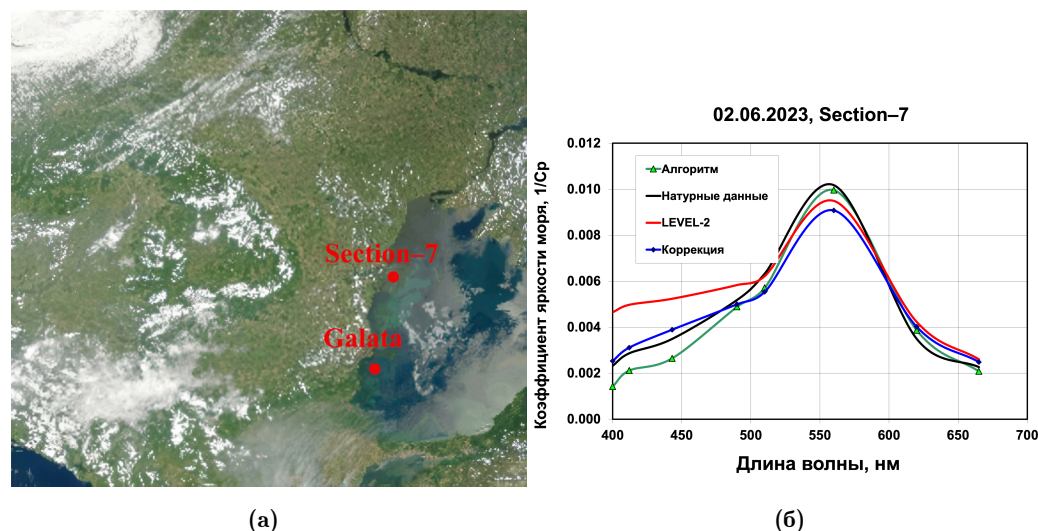


Рис. 5. Сравнительный анализ измерений  $R_{rs}(\lambda)$ , полученных в результате работы: нового алгоритма (зеленый), стандартной коррекции (красный), региональной коррекцией продуктов уровня 2 (синий), с натурными данными AERONET-OC (желтый) за 02.06.2023 в условиях засветки солнечным бликом (б), спутниковый снимок (а).

Как видно из рис. 5, в коротковолновой области стандартный алгоритм завышает значения, а новая модель занижает. Лучший результат дает алгоритм уровня 2 с дополнительной региональной коррекцией.

Для оценки эффективности нового алгоритма предлагается использование не только визуального сравнительного анализа спектров коэффициента яркости моря, но и расчет статистических метрик, таких как: среднее отклонение по спектру восстановленного  $R_{rs}(\lambda)$  от натуральных данных, среднеквадратичное отклонение в единицах  $R_{rs}(\lambda)$  и коэффициент детерминации линейной связи через начало координат двух спектров  $R_{rs}(\lambda)$  (табл. 2). Среднее отклонение показывает тенденцию к завышению или занижению  $R_{rs}(\lambda)$ .  $R_2$  – рассчитан для линейной регрессии через ноль и описывает точность воспроизведения формы спектра.

Из табл. 2 видно, что для исследуемых примеров авторский алгоритм, в большинстве случаев, показывает лучший результат, чем стандартный подход GW94 (СКО ниже,  $R^2$  выше). Минимальные отличия в работах различных алгоритмов отмечается лишь для цветения кокколитофорид, где корреляция всегда высокая. Наибольшие отличия заметны при наличии пылевого аэрозоля в атмосфере или присутствия спутниковой засветки. Низкие показатели  $R^2$  свидетельствуют о заметном искажении формы спектра  $R_{rs}(\lambda)$ .

### Заключение

В настоящей работе реализован подход к задаче атмосферной коррекции, когда процессы рассеяния и распространения излучения параметризуются совместно. К примеру, в формуле (8), параметр  $C_2$  одновременно учитывает: погрешности аналитических формул, поглощение аэрозолями части рассеянной радиации, горизонтальную неоднородность атмосферы, спектрально согласованный дрейф чувствительности сканера, эффект загрязнения иллюминатора. Параметр  $C_0$  учитывает, как спектральные свойства рассеяния аэрозолями, так и присутствие пены на взволнованной поверхности и бликов. При этом формула коррекции, являясь формальным разложением яркости (деленной на солнечную постоянную) по четным степеням волнового числа, учитывает атмосферную помеху с приемлемой точностью.

Таблица 2. Статистические метрики оценки эффективности нового алгоритма за исследуемые даты

Дата, станция	Состояние атмосферы	Стандартный алгоритм			Авторский алгоритм		
		Ср. Откл.	СКО	$R^2$	Ср. Откл.	СКО	$R^2$
09.06.2024, Section-7	Чистая атмосфера	$-1,3 \times 10^{-3}$	$5,8 \times 10^{-4}$	0,714	$7,5 \times 10^{-4}$	$5,2 \times 10^{-4}$	0,943
11.06.2024, Section-7	Пылевой аэрозоль	$-1,5 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-3}$	0,527	$1,4 \times 10^{-3}$	$4,9 \times 10^{-4}$	0,950
23.06.2024, Section-7	Пылевой аэрозоль	$-2,3 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-3}$	0,430	$4,1 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{-4}$	0,985
27.07.2024, Section-7	Граница облачности	$1,0 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-4}$	0,968	$5,6 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-4}$	0,983
17.06.2022, Section-7	Цветение	$-1,3 \times 10^{-3}$	$8,4 \times 10^{-4}$	0,996	$-2,6 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-4}$	0,996
17.06.2022, Galata	Цветение	$-3,4 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	0,979	$-2,3 \times 10^{-4}$	$3,4 \times 10^{-4}$	0,997
22.06.2022, Section-7	Цветение	$-1,5 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	0,984	$-1,1 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-4}$	0,998
22.06.2022, Galata	Цветение	$-1,7 \times 10^{-3}$	$9,5 \times 10^{-4}$	0,998	$7,4 \times 10^{-4}$	$9,3 \times 10^{-4}$	0,995
21.06.2022, Section-7	Границы облачности	$-3,5 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-3}$	0,975	$-3 \times 10^{-4}$	$8,8 \times 10^{-4}$	0,987
21.06.2022, Galata	Границы облачности	$-2,6 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	0,995	$-1,6 \times 10^{-3}$	$7,1 \times 10^{-4}$	0,997
29.06.2022, Section-7	Границы облачности	$-6,5 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-4}$	0,973	$7,3 \times 10^{-4}$	$5,8 \times 10^{-4}$	0,984
29.06.2022, Galata	Границы облачности	–	–	–	$3,0 \times 10^{-4}$	$4,6 \times 10^{-4}$	0,994
02.06.2023, Section-7	Спутниковая засветка	$8,9 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-3}$	0,523	$-4,3 \times 10^{-4}$	$4,3 \times 10^{-4}$	0,966

Исходя из полученных в данном исследовании результатов, предложенный алгоритм оказался точнее стандартного, основанного на моделировании аэрозоля и точных расчетов по теории переноса. Новый алгоритм атмосферной коррекции может работать и в случае пропусков данных по уровню 2, тем самым возмещая потерянную информацию, необходимую для оперативного прогноза. По предварительным прогнозам, около 20–30% данных OLCI не проходят отбор по критериям стандартной атмосферной коррекции GW94 и в результате, даже при наличии информации об  $L_{TOD}$ , теряются. В дальнейшем, помимо стандартного алгоритма GW94, планируется провести дополнительный сравнительный анализ результатов нового алгоритма с данными атмосферной коррекции C2RCC (OLCI).

Стандартный метод содержит ошибки определения атмосферной составляющей, которые можно разделить на два типа. Первый из них связан с переоценкой величины яркости атмосферы в фиолетовой части спектра, что приводит к отрицательным значениям  $R_{rs}(412)$ . Следует заметить, что наличие абсурдных (отрицательных) значений  $R_{rs}(\lambda)$  в коротковолновой области означает достаточное количество физически некорректных значений и еще большее количество сомнительных величин. Это обстоятельство сильно влияет на оценку таких величин как концентрация хлорофилла-*a* и желтого вещества. Наиболее существенные искажения спутниковых продуктов происходит при явлениях выносов пыли и поступления в атмосферу других светопоглощающих аэрозолей. Поглощение света аэрозолем требует добавления новых параметров к модели аэрозоля (включая вертикальный профиль) и проведение качественно новых подспутниковых измерений [Ahmad et al., 2010].

Как было показано, существует и второй тип ошибок. Это ошибки описания формы кривой атмосферной составляющей. В результате чего кривая восстановленного

коэффициента яркости в диапазоне 412–490 нм становится выпуклой. По причине наличия в стандартной процедуре такого рода ошибок дополнительная региональная коррекция готовых продуктов уровня 2 не исправляет форму спектра  $R_{rs}(\lambda)$ . По-видимому, основная причина появления такой ошибки связана с некорректностью поставленной задачи – попыткой определить весь спектр атмосферной помехи только по ИК области. В реальности количество факторов, влияющих на отраженное атмосферой излучение, слишком велико. Например, точного описания функций рассеяния света аэрозолем будет недостаточно, поскольку яркость на верхней границе атмосферы зависит также от вертикального распределения аэрозоля относительно молекул воздуха.

Мы рассмотрели работу данного алгоритма на множестве примеров при различных условиях атмосферы и состояния моря и получили, что новый простой алгоритм оказался в среднем лучше стандартного, что означает перспективу его совершенствования. Преимуществом данного подхода является то, что алгоритм обладает определенной универсальностью.

Несмотря на изначальную региональность алгоритма, которая в действительности содержится только в значении константы синего индекса цвета ( $CI(412/443) = 0,8$ ), общие принципы алгоритма остаются неизменными для многих прибрежных и внутренних водоемов. Как показали оценки, изменчивость синего индекса цвета в прибрежных районах невелика. Поэтому для части Мирового океана возможна реализация аналогичного алгоритма после некоторого уточнения значений «синего» индекса цвета, что возможно после обширного статистического анализа рейсовых натурных измерений и данных со станций AERONET-OC по всему миру.

Стоит отметить, что основным недостатком нового метода является ограниченность его применения водами типа CASE 2. Проблема его реализации возникает при увеличении индекса цвета до единицы и выше. Это, как правило, уже достаточно чистые воды, когда коэффициент яркости становится чувствительным к минимальным загрязнениям. Теоретически высокие индексы цвета возможны и при резком увеличении концентрации хлорофилла-*a*. Однако, по определению, такие воды относятся к типу CASE 1. На данный момент авторский алгоритм не учитывает ряд факторов, учтенных в стандартном алгоритме, таких как точный расчет рэлеевского рассеяния, влияние типа аэрозоля на индикатрису и на функции пропускания атмосферы. Поэтому следует ожидать дальнейшего повышения качества обработанных данных сканеров цвета при совершенствовании алгоритма.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках темы государственного задания Морского гидрофизического института РАН FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений» («Оперативная океанология»).

## Список литературы

- Вазюля С. В., Юшманова А. В., Глуховец Д. И. и др. Валидация алгоритмов оценки показателя поглощения окрашенного органического вещества по спутниковым данным в северо-восточной части черного моря // Сборник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — 2018. — С. 252. — EDN: [YSSQUH](#).
- Копелевич О. В., Вазюля С. В., Салинг И. В. и др. Электронный атлас «Биооптические характеристики морей России по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2014 гг.» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2015. — Т. 12, № 6. — С. 99–110. — EDN: [VBLWSB](#).
- Копелевич О. В., Салинг И. В., Вазюля С. В. и др. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2017 гг. — Москва : Ваш Формат, 2018. — 140 с. — EDN: [YOSZPV](#).
- Корчемкина Е. Н., Шибанов Е. Б., Ли М. Е. Усовершенствование методики атмосферной коррекции для дистанционных исследований прибрежных вод Черного моря // Исследование Земли из космоса. — 2009. — Т. 6. — С. 24–30. — EDN: [JVVGXQ](#).

- Папкина А. С., Шибанов Е. Б., Калинин Д. В. Влияние пылевого аэрозоля на спутниковые данные различных сканеров цвета // *Морской гидрофизический журнал*. — 2024. — Т. 40, 2(239). — С. 766–781. — EDN: [WUXIXB](#).
- Паршиков С. В., Ли М. Е. Дистанционное зондирование оптически активных примесей с применением коротковолнового участка спектра // *Автоматизированные системы контроля состояния морской среды: сборник научных трудов*. — Севастополь : МГИ НАН Украины, 1992. — С. 65–78.
- Суетин В. С., Королев С. Н., Кучерявый А. А. Проявление эффектов солнечного блика при определении оптических параметров воды в Черном море по спутниковым измерениям // *Морской гидрофизический журнал*. — 2016. — 3(189). — С. 52–62. — EDN: [WNAFTP](#).
- Суетин В. С., Королев С. Н., Суслин В. В. и др. Проявление особенностей оптических свойств атмосферного аэрозоля над Черным морем при интерпретации данных спутникового прибора SeaWiFS // *Морской гидрофизический журнал*. — 2004. — Т. 1. — С. 69–79. — EDN: [YXQYNV](#).
- Суетин В. С., Королев С. Н., Суслин В. В. и др. Проявления пылевого аэрозоля в результатах оптических наблюдений Черного моря из космоса // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. — 2008. — Т. 16. — С. 202–211. — EDN: [YUNNQD](#).
- Суетин В. С., Толкаченко Г. А., Королев С. Н. и др. Оптические свойства аэрозолей и атмосферная коррекция спутниковых наблюдений Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. — 2013. — № 1. — С. 34–44. — EDN: [TFYSDP](#).
- Шибанов Е. Б. Оптические неоднородности морской воды и атмосферы над морем: дисс...док. физ.-мат. наук. — Севастополь : Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», 2020.
- Шибанов Е. Б., Афонин Е. И. Физическая модель переноса излучения в плоскопараллельной атмосфере для задач дистанционного зондирования, приближение для изотропно и анизотропно рассеивающего слоя. — Москва : Деп. в ВИНТИ, № 1631-B89, 1989. — 41 с.
- Шибанов Е. Б., Папкина А. С. Влияние пылевого аэрозоля на результаты атмосферной коррекции спектрального коэффициента яркости Чёрного и Средиземного морей по спутниковым данным MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2021. — Т. 18, № 6. — С. 46–56. — DOI: [10.21046/2070-7401-2021-18-6-46-56](#).
- Шибанов Е. Б., Папкина А. С. Особенности работы алгоритмов атмосферной коррекции ocean color при расчёте спектрального коэффициента яркости моря для различных состояний атмосферы // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2022. — Т. 19, № 6. — С. 9–17. — DOI: [10.21046/2070-7401-2022-19-6-9-17](#).
- Ahmad Z., Franz B. A., McClain C. R., et al. New aerosol models for the retrieval of aerosol optical thickness and normalized water-leaving radiances from the SeaWiFS and MODIS sensors over coastal regions and open oceans // *Applied Optics*. — 2010. — Vol. 49, no. 29. — P. 5545. — DOI: [10.1364/ao.49.005545](#).
- Antoine D., Morel A. A multiple scattering algorithm for atmospheric correction of remotely sensed ocean colour (MERIS instrument): Principle and implementation for atmospheres carrying various aerosols including absorbing ones // *International Journal of Remote Sensing*. — 1999. — Vol. 20, no. 9. — P. 1875–1916. — DOI: [10.1080/014311699212533](#).
- Brockmann C., Doerffer R., Peters M., et al. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters // *Living Planet Symposium, Proceedings of the conference held 9-13 May 2016*. — Prague, Czech Republic, 2016.
- Carder K. L., Chen F. R., Lee Z. P., et al. Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1999. — Vol. 104, no. C3. — P. 5403–5421. — DOI: [10.1029/1998jc900082](#).
- Deschamps P. Y., Herman M., Tanre D. Modeling of the atmospheric effects and its application to the remote sensing of ocean color // *Applied Optics*. — 1983. — Vol. 22, no. 23. — P. 2068–2080. — DOI: [10.1364/ao.22.003751](#).
- EUMETSAT. Phytoplankton bloom in the Black Sea. — 2022. — <https://user.eumetsat.int/resources/case-studies/phytoplankton-bloom-in-the-black-sea>.
- European Space Agency. S3 OLCI Instrument. — 2025. — <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s3-olci-instrument>.
- Feng L., Hou X., Li J., et al. Exploring the potential of Rayleigh-corrected reflectance in coastal and inland water applications: A simple aerosol correction method and its merits // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. — 2018. — Vol. 146. — P. 52–64. — DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2018.08.020](#).
- Gordon H. R. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the ocean // *Applied Optics*. — 1978. — Vol. 17, no. 10. — P. 1631–1636. — DOI: [10.1364/AO.17.001631](#).

- Gordon H. R. Evolution of Ocean Color Atmospheric Correction: 1970-2005 // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13, no. 24. — P. 5051. — DOI: [10.3390/rs13245051](https://doi.org/10.3390/rs13245051).
- Gordon H. R., Brown O. B., Evans R. H., et al. A semianalytic radiance model of ocean color // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 1988. — Vol. 93, no. D9. — P. 10909–10924. — DOI: [10.1029/jd093id09p10909](https://doi.org/10.1029/jd093id09p10909).
- Gordon H. R., Wang M. Surface-roughness considerations for atmospheric correction of ocean color sensors 1: The Rayleigh-scattering component // *Applied Optics*. — 1992. — Vol. 31, no. 21. — P. 4247. — DOI: [10.1364/ao.31.004247](https://doi.org/10.1364/ao.31.004247).
- Gordon H. R., Wang M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm // *Applied Optics*. — 1994. — Vol. 33, no. 3. — P. 443. — DOI: [10.1364/ao.33.000443](https://doi.org/10.1364/ao.33.000443).
- Gould R. W., Arnone R. A., Martinolich P. M. Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and case 2 waters // *Applied Optics*. — 1999. — Vol. 38, no. 12. — P. 2377. — DOI: [10.1364/ao.38.002377](https://doi.org/10.1364/ao.38.002377).
- Hu C., Carder K. L., Muller-Karger F. E. Atmospheric Correction of SeaWiFS Imagery over Turbid Coastal Waters // *Remote Sensing of Environment*. — 2000. — Vol. 74, no. 2. — P. 195–206. — DOI: [10.1016/s0034-4257\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(00)00080-8).
- Hu C., Lee Z., Franz B. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2012. — Vol. 117, no. C1. — DOI: [10.1029/2011jc007395](https://doi.org/10.1029/2011jc007395).
- Kalinskaya D. V., Papkova A. S. Why Is It Important to Consider Dust Aerosol in the Sevastopol and Black Sea Region during Remote Sensing Tasks? A Case Study // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14, no. 8. — P. 1890. — DOI: [10.3390/rs14081890](https://doi.org/10.3390/rs14081890).
- Korchemkina E. N., Kalinskaya D. V. Algorithm of Additional Correction of Level 2 Remote Sensing Reflectance Data Using Modelling of the Optical Properties of the Black Sea Waters // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14, no. 4. — P. 831. — DOI: [10.3390/rs14040831](https://doi.org/10.3390/rs14040831).
- Kubryakov A. A., Mikaelyan A. S., Stanichny S. V. Summer and winter coccolithophore blooms in the Black Sea and their impact on production of dissolved organic matter from Bio-Argo data // *Journal of Marine Systems*. — 2019. — Vol. 199. — P. 103220. — DOI: [10.1016/j.jmarsys.2019.103220](https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103220).
- Mélin F. Validation of ocean color remote sensing reflectance data: Analysis of results at European coastal sites // *Remote Sensing of Environment*. — 2022. — Vol. 280. — P. 113153. — DOI: [10.1016/j.rse.2022.113153](https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113153).
- Moulin C., Gordon H. R., Chomko R. M., et al. Atmospheric correction of ocean color imagery through thick layers of Saharan dust // *Geophysical Research Letters*. — 2001. — Vol. 28, no. 1. — P. 5–8. — DOI: [10.1029/2000gl011803](https://doi.org/10.1029/2000gl011803).
- Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. No. 3 / ed. by S. Sathyendranath. — Dartmouth, Canada : IOCCG, 2000. — 140 p.
- Ruddick K. G., Ovidio F., Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters // *Applied Optics*. — 2000. — Vol. 39, no. 6. — P. 897. — DOI: [10.1364/ao.39.000897](https://doi.org/10.1364/ao.39.000897).
- Schollaert S. E., Yoder J. A., O'Reilly J. E., et al. Influence of dust and sulfate aerosols on ocean color spectra and chlorophyll a concentrations derived from SeaWiFS off the U.S. east coast // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2003. — Vol. 108, no. C6. — DOI: [10.1029/2000jc000555](https://doi.org/10.1029/2000jc000555).
- Shybanov E. B., Papkova A., Korchemkina E., et al. Blue Color Indices as a Reference for Remote Sensing of Black Sea Water // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15, no. 14. — P. 3658. — DOI: [10.3390/rs15143658](https://doi.org/10.3390/rs15143658).
- Shybanov E. B., Papkova A. S. Algorithm for Additional Correction of Remote Sensing Reflectance in the Presence of Absorbing Aerosol: Case Study // *Physical Oceanography*. — 2022. — Vol. 29, no. 6. — P. 688–706. — DOI: [10.22449/1573-160X-2022-6-688-706](https://doi.org/10.22449/1573-160X-2022-6-688-706).
- Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D., et al. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System // *Bulletin of the American Meteorological Society*. — 2015. — Vol. 96, no. 12. — P. 2059–2077. — DOI: [10.1175/bams-d-14-00110.1](https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00110.1).
- Thuillier G., Hersé M., Labs D., et al. The Solar Spectral Irradiance from 200 to 2400 nm as Measured by the SOLSPEC Spectrometer from the Atlas and Eureka Missions // *Solar Physics*. — 2003. — Vol. 214, no. 1. — P. 1–22. — DOI: [10.1023/a:1024048429145](https://doi.org/10.1023/a:1024048429145).
- Viollier M., Tanre D., Deschamps P. Y. An algorithm for remote sensing of water color from space // *Boundary-Layer Meteorology*. — 1980. — Vol. 18, no. 3. — P. 247–267. — DOI: [10.1007/bf00122023](https://doi.org/10.1007/bf00122023).
- Wei J., Yu X., Lee Z., et al. Improving low-quality satellite remote sensing reflectance at blue bands over coastal and inland waters // *Remote Sensing of Environment*. — 2020. — Vol. 250. — P. 112029. — DOI: [10.1016/j.rse.2020.112029](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112029).
- Zibordi G., Holben B., Slutsker I., et al. AERONET-OC: A Network for the Validation of Ocean Color Primary Products // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. — 2009. — Vol. 26, no. 8. — P. 1634–1651. — DOI: [10.1175/2009jtecho654.1](https://doi.org/10.1175/2009jtecho654.1).
- Zibordi J., Kwiatkowska E., Mélin F., et al. Assessment of OLCI-A and OLCI-B radiometric data products across European seas // *Remote Sensing of Environment*. — 2022. — Vol. 272. — DOI: [10.1016/j.rse.2022.112911](https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112911).



# A NEW METHOD FOR RETRIEVING REMOTE SENSING REFLECTANCE FROM FIRST-LEVEL OLCI SATELLITE DATA

E. B. Shybanov\* , A. S. Papkova 

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia

\*\*Correspondence to: Evgeniy Shybanov, e-shybanov@mail.ru.

The paper proposes an alternative method of atmospheric correction using the OLCI satellite data for the Black Sea as an example. Currently, for remote sensing problems, the standard Gordon and Wang atmospheric correction algorithm is used in most cases (GW94). Unfortunately, its operation is often accompanied by the appearance of negative values of the spectral radiance coefficient of the sea (remote sensing reflectance)  $R_{rs}(\lambda)$  in the shortwave region, which means a sufficient number of physically incorrect values and subsequent incorrect calculation of the concentration of chlorophyll-*a* and yellow matter. In this paper, a simple algorithm is proposed, built exclusively on analytical formulas, where two procedures of interpolation and extrapolation are conceptually implemented simultaneously, extrapolation – via two channels, interpolation based on the constancy of the color index ratio ( $CI = R_{rs}(412)/R_{rs}(443) = 0.8$ ). Using individual examples of OLCI scanner data, the performance GW94 of the new algorithm was tested for different states of the atmosphere and sea surface by comparing the results with in-kind measurements of the AERONET-OC platforms, with Level-2 data and with the operation of the regional method of additional correction. The new algorithm was tested under the following conditions: clear atmosphere (presence of background aerosol), presence of dust aerosol, cloud boundaries, presence of sun glare, coccolithophore bloom. When analyzing a number of Sentinel 3A/3B satellite images, it was found that the new simple algorithm was, on average, better than the standard one, which means that there is a prospect for its improvement. The advantage of this approach is its universality and the possibility of its implementation for other water areas, if there are patterns in the variability of the “blue” color index.

**Keywords:** aerosol, atmospheric correction, remote sensing reflectance, sea optics, color index, interpolation, Black Sea.

**Citation:** Shybanov, E. B., A. S. Papkova (2025), A New Method for Retrieving Remote Sensing Reflectance from First-Level OLCI Satellite Data, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES3008, <https://doi.org/10.2205/2025ES001014>, EDN: PQXEIY

Received: 30 October 2025

Accepted: 30 April 2025

Published: 13 May 2025



© 2025. The Authors.

## References

- Ahmad Z., Franz B. A., McClain C. R., et al. New aerosol models for the retrieval of aerosol optical thickness and normalized water-leaving radiances from the SeaWiFS and MODIS sensors over coastal regions and open oceans // *Applied Optics*. — 2010. — Vol. 49, no. 29. — P. 5545. — DOI: [10.1364/ao.49.005545](https://doi.org/10.1364/ao.49.005545).
- Antoine D., Morel A. A multiple scattering algorithm for atmospheric correction of remotely sensed ocean colour (MERIS instrument): Principle and implementation for atmospheres carrying various aerosols including absorbing ones // *International Journal of Remote Sensing*. — 1999. — Vol. 20, no. 9. — P. 1875–1916. — DOI: [10.1080/014311699212533](https://doi.org/10.1080/014311699212533).
- Brockmann C., Doerffer R., Peters M., et al. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters // *Living Planet Symposium, Proceedings of the conference held 9-13 May 2016*. — Prague, Czech Republic, 2016.
- Carder K. L., Chen F. R., Lee Z. P., et al. Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll *a* and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1999. — Vol. 104, no. C3. — P. 5403–5421. — DOI: [10.1029/1998jc900082](https://doi.org/10.1029/1998jc900082).



- Schollaert S. E., Yoder J. A., O'Reilly J. E., et al. Influence of dust and sulfate aerosols on ocean color spectra and chlorophyll a concentrations derived from SeaWiFS off the U.S. east coast // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2003. — Vol. 108, no. C6. — DOI: [10.1029/2000jc000555](https://doi.org/10.1029/2000jc000555).
- Shibanov E. B. Optical inhomogeneities of sea water and atmosphere over the sea: diss...doc. phys.-math. sciences. — Sevastopol : Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences", 2020. — (In Russian).
- Shibanov E. B., Afonin E. I. Physical model of radiation transfer in a plane-parallel atmosphere for remote sensing problems, approximation for isotropic and anisotropic scattering layer. — Moscow : Dep. in VINITI, No. 1631-B89, 1989. — P. 41. — (In Russian).
- Shybanov E. B., Papkova A., Korchemkina E., et al. Blue Color Indices as a Reference for Remote Sensing of Black Sea Water // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15, no. 14. — P. 3658. — DOI: [10.3390/rs15143658](https://doi.org/10.3390/rs15143658).
- Shybanov E. B., Papkova A. S. Influence of dust aerosol on the results of atmospheric correction of remote sensing reflection of the Black and Mediterranean Seas from MODIS satellite data // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. — 2021. — Vol. 18, no. 6. — P. 46–56. — DOI: [10.21046/2070-7401-2021-18-6-46-56](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-6-46-56). — (In Russian).
- Shybanov E. B., Papkova A. S. Algorithm for Additional Correction of Remote Sensing Reflectance in the Presence of Absorbing Aerosol: Case Study // *Physical Oceanography*. — 2022a. — Vol. 29, no. 6. — P. 688–706. — DOI: [10.22449/1573-160X-2022-6-688-706](https://doi.org/10.22449/1573-160X-2022-6-688-706).
- Shybanov E. B., Papkova A. S. Differences in the Ocean Color atmospheric correction algorithms for remote sensing reflectance retrievals for different atmospheric conditions // *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2022b. — Vol. 19, no. 6. — P. 9–17. — DOI: [10.21046/2070-7401-2022-19-6-9-17](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-6-9-17). — (In Russian).
- Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D., et al. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System // *Bulletin of the American Meteorological Society*. — 2015. — Vol. 96, no. 12. — P. 2059–2077. — DOI: [10.1175/bams-d-14-00110.1](https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00110.1).
- Suetin V. S., Korolev S. N., Kucheryavy A. A. Sun Glint Manifestation at Evaluating the Black Sea Water Optical Parameters using Satellite Measurements // *Physical Oceanography*. — 2016. — No. 3. — P. 47–56. — DOI: [10.22449/1573-160x-2016-3-47-56](https://doi.org/10.22449/1573-160x-2016-3-47-56).
- Suetin V. S., Korolev S. N., Suslin V. V., et al. Manifestation of Specific Features of the Optical Properties of Atmospheric Aerosol over the Black Sea in the Interpretation of SeaWiFS Data // *Physical Oceanography*. — 2004. — Vol. 14, no. 1. — P. 57–65. — DOI: [10.1023/B:POCE.0000025370.99460.88](https://doi.org/10.1023/B:POCE.0000025370.99460.88).
- Suetin V. S., Korolev S. N., Suslin V. V., et al. Manifestations of dust aerosol in the results of optical observations of the Black Sea from space // *Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*. — 2008. — Vol. 16. — P. 202–211. — EDN: [YUNNQD](https://www.edn.ru/yunnqd) ; (in Russian).
- Suetin V. S., Tolkachenko G. A., Korolev S. N., et al. Optical properties of aerosols and atmospheric correction of satellite observations of the Black Sea // *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*. — 2013. — No. 1. — P. 34–44. — EDN: [TFYSDP](https://www.edn.ru/TFYSDP) ; (in Russian).
- Thuillier G., Hersé M., Labs D., et al. The Solar Spectral Irradiance from 200 to 2400 nm as Measured by the SOLSPEC Spectrometer from the Atlas and Eureka Missions // *Solar Physics*. — 2003. — Vol. 214, no. 1. — P. 1–22. — DOI: [10.1023/a:1024048429145](https://doi.org/10.1023/a:1024048429145).
- Vazyulya S. V., Yushmanova A. V., Glukhovets D. I., et al. Validation of algorithms for estimating the absorption index of colored organic matter using satellite data in the north-eastern part of the Black Sea // *Collection of abstracts of reports of the sixteenth All-Russian open conference «Sovremennyye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa»*. — 2018. — P. 252. — EDN: [YSSQUH](https://www.edn.ru/yssquh) ; (in Russian).
- Viollier M., Tanre D., Deschamps P. Y. An algorithm for remote sensing of water color from space // *Boundary-Layer Meteorology*. — 1980. — Vol. 18, no. 3. — P. 247–267. — DOI: [10.1007/bf00122023](https://doi.org/10.1007/bf00122023).
- Wei J., Yu X., Lee Z., et al. Improving low-quality satellite remote sensing reflectance at blue bands over coastal and inland waters // *Remote Sensing of Environment*. — 2020. — Vol. 250. — P. 112029. — DOI: [10.1016/j.rse.2020.112029](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112029).
- Zibordi G., Holben B., Slutsker I., et al. AERONET-OC: A Network for the Validation of Ocean Color Primary Products // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. — 2009. — Vol. 26, no. 8. — P. 1634–1651. — DOI: [10.1175/2009jtecho654.1](https://doi.org/10.1175/2009jtecho654.1).
- Zibordi G., Kwiatkowska E., Mélin F., et al. Assessment of OLCI-A and OLCI-B radiometric data products across European seas // *Remote Sensing of Environment*. — 2022. — Vol. 272. — DOI: [10.1016/j.rse.2022.112911](https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112911).