

Влияние минеральной пыли на качество атмосферной коррекции измерений спутникового оптического радиометра OLCI над Японским морем

А. С. Папкина¹, П. А. Салюк², Д. М. Шукало¹

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mail: hanna.parkova@gmail.com

² Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия

Представлен анализ эпизода переноса минеральной пыли над акваторией Японского моря за период 13–21 апреля 2023 г. с точки зрения изменчивости оптических свойств атмосферы и гидрооптических характеристик по спутниковым и натурным данным. При статистической обработке спутниковых данных OLCI (*англ.* Ocean and Land Colour Instrument) для центральной и северо-восточной части Японского моря видно, что в дни прохождения пылевой бури концентрация хлорофилла *a* (Chl-*a*) резко (в 3–4 раза) возрастала до 4,47–5,23 мг·м⁻³, что является явным следствием ошибки, так как даже если минеральная пыль и влияет на повышение концентрации Chl-*a*, то данный эффект не может наступать мгновенно. Далее при изучении статистического распределения спектрального коэффициента яркости за исследуемые даты были найдены отрицательные или аномально низкие величины в коротковолновой области спектра, что с большой вероятностью и является причиной ошибки вычисления концентрации Chl-*a*. При дальнейшем анализе ошибки сравнения результатов атмосферной коррекции было найдено, что ход степенной ошибки атмосферной коррекции по сравнению с ближайшим чистым днём хорошо описывается функцией вида $\lambda^{-5.5}$, что в дальнейшем может быть использовано в качестве основы для нового регионального алгоритма атмосферной коррекции.

Ключевые слова: минеральная пыль, Японское море, концентрация Chl-*a*, атмосферная коррекция, спектральный коэффициент яркости моря, OLCI, AERONET

Одобрена к печати: 26.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-27-39

Введение

Каждую весну над Жёлтым, Восточно-Китайским и Японским морем спутниковыми оптическими радиометрами регистрируются видимые шлейфы минеральной пыли, переносимые на восток из пустынь Гоби и Такла-Макан (Song et al., 2016). Исследователи NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) отмечают некоторые изменения в пылевой активности в пустынях Гоби и Такла-Макан за последнее время. Несмотря на то, что ранее в работе (Yu et al., 2020) было показано, что пылевая загруженность данного региона снизилась в течение последних лет, её влияние остаётся ощутимым (Wang et al., 2011; Zhang, Zhou, 2023). Частое появление большого количества поглощающего пылевого аэрозоля над морской поверхностью существенно осложняет спутниковые измерения спектрального цвета моря в исследуемом регионе (Fukushima, Toratani, 1997; Park et al., 2022; Shanmugam, Ahn, 2007), особенно учитывая, что многие морские акватории дополнительно подвержены значительному стоку рек (Алексанин, Качур, 2016; Cui et al., 2014; Salyuk et al., 2024). Цель настоящего исследования состоит в анализе влияния минеральной пыли из континентальных районов Китая и Монголии на ошибку атмосферной коррекции спутниковых измерений OLCI (*англ.* Ocean and Land Colour Instrument) спектрального коэффициента яркости для Японского моря. Ранее было проведено аналогичное исследование для оценки влияния сахарской пыли на качество атмосферной коррекции для Черноморского региона (Kalinskaya, Parkova, 2022; Suetin et al., 2004). Полученные результаты показали, что стандартный подход, предложенный Г. Р. Гордоном и М. Ваном (Gordon, Wang, 1994), не работает и предоставляет

физически некорректные (отрицательные) величины спектрального коэффициента яркости моря $R_{rs}(\lambda)$ (*англ.* Remote sensing reflectance) и, как следствие, дальнейшие ошибки в расчёте концентрации хлорофилла *a* (*англ.* chlorophyll *a* — Chl-*a*) и жёлтого вещества (Suetin et al., 2004). В публикациях (Шибанов, Папкина, 2022; Papkova et al., 2024; Shybanov, Papkova, 2022) показано, что при поглощающем аэрозоле погрешность атмосферной коррекции выражается степенной функцией четвёртой или большей степени, т.е. чаще всего близка к λ^{-4} – λ^{-5} вне зависимости от используемого спутника. Исследованием акваторий Японского моря с применением спутниковых данных по цвету моря активно занимаются российские учёные из Тихоокеанского океанологического института Дальневосточного отделения РАН (ТОИ ДВО РАН). В работе (Звалинский и др., 2022) с использованием многолетнего анализа судовых измерений отмечается, что в начале весеннего периода максимальные величины Chl-*a* наблюдаются в поверхностном слое. В мае, после установления летней стратификации, основная масса Chl-*a* сосредоточена в слое 20–40 м. В работе (Букин и др., 2007) исследовано увеличение спутниковых оценок Chl-*a* после поступления аэрозольного вещества в верхний слой океана в Японском море в весенний период. Также можно отметить анализ спутниковых наблюдений Chl-*a* в заливе Петра Великого (Навроцкий и др., 2019), где рассмотрены различные физические факторы, формирующие пространственное распределение Chl-*a*; использование спутниковых мультиспектральных оптических данных для поиска наилучших контрастов оптических вихрей, переносящих воды реки Туманной (Lipinskaya et al., 2023); анализ биооптических характеристик в зимне-весенний период в заливе Петра Великого, полученных из спутниковых данных по цвету моря с помощью мультиспектральных квазианалитических алгоритмов (Штрайхерт и др., 2014). Во всех подобных исследованиях важно учитывать тот факт, что получаемые спутниковые оценки Chl-*a* могут быть искажены наличием поглощающего аэрозоля в атмосфере. Частично, но не полностью, это влияние может быть уменьшено за счёт применения эмпирических биооптических алгоритмов, не использующих спектральные каналы 412 и 443 нм (Salyuk et al., 2010). Однако в случае необходимости применения квазианалитических биооптических алгоритмов, использующих все каналы из диапазона 400–700 нм, возникают существенные ошибки при наличии поглощающего аэрозоля в атмосфере (Salyuk et al., 2010).

Выбранный исследуемый случай пылевого переноса был зарегистрирован спутниками NASA начиная с 11 апреля 2023 г. (https://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db_date=2023-04-17). После прохождения территории Китая и Японии минеральная пыль продолжила двигаться на северо-восток, перемещаясь над Японским морем 12–13 и 21–22 апреля соответственно. В работе (Filonchik et al., 2024) авторы уже рассматривали данный случай с точки зрения изменчивости параметров атмосферы и самого аэрозоля с использованием одной станции AERONET (*англ.* AErosol RObotic NETwork), а именно AOE_Baotou site. Дополнительные спутниковые снимки показывают наложение не только эффекта от пыли (жёлтый шлейф), но и облачности, что ещё больше снижает качество спутниковых продуктов.

В данной работе впервые для Японского моря и сканера OLCI вычисляется экспериментальная зависимость ошибки атмосферной коррекции от длины волны, которая в дальнейшем может стать основой для нового регионального алгоритма атмосферной коррекции, что является её актуальным прикладным значением.

Инструменты

Настоящая работа основана на сравнительном анализе спутниковых и натурных измерений. В качестве спутниковых данных рассматривались данные второго уровня обработки (*англ.* level 2) оптического радиометра OLCI, установленного на спутниках Sentinel-3A (S3A) и Sentinel-3B (S3B). Технические характеристики OLCI и этапы его калибровки детально описываются в источнике (<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s3-olci-instrument>). На данный момент сканер OLCI является одним из самых современных, надёжных и точных инстру-

ментов дистанционного зондирования. Одно из его очевидных преимуществ — хорошее пространственное разрешение и возможность простого доступа к данным с сайта Ocean Color (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Его большим достоинством можно считать хорошие результаты сравнительного анализа с натурными данными, а также учёт вклада солнечной засветки и, как следствие, её редкого появления на снимках (Ocean..., 2022). Наличие дополнительного спектрального канала с центром на 398 нм (Ocean..., 2022) позволяет улучшать алгоритмы атмосферной коррекции или предоставлять больше информации для последующей корректировки результирующих измерений $R_{rs}(\lambda)$. Данные второго уровня обработки были взяты с сайта Ocean Color. В качестве оценок Chl-*a* использовались значения, рассчитанные по стандартному алгоритму OC1 (Hu et al., 2012) в рамках репроцессинга (Ocean..., 2022).

Источником натуральных измерений параметров атмосферы (аэрозольная оптическая толщина (*англ.* aerosol optical thickness — AOT), параметр Ангстрема (AE)) для Японского моря служили результаты измерений на станциях AERONET: Hokkaido University (43,1° с.ш.; 141,3° в.д.) (Саппоро, Япония) и Niigata (37,8° с.ш.; 138,9° в.д.) (Ниигата, Япония). Большинство *in situ* данных, рассматриваемых в работе, имеют наивысший уровень качества, а именно level 2, так как он позволяет провести качественную очистку от влияния облачности и других внешних факторов. При его отсутствии использовался промежуточный результат обработки натуральных данных level 1,5 (поверхностная очистка данных от явных аномалий). Все данные находятся в открытом доступе на сайте <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>.

Дополнительно в работе использовались данные атмосферного инфракрасного зонда AIRS (*англ.* Atmospheric Infrared Sounder), установленного на спутнике Aqua. Зонд предоставляет данные, важные для мониторинга атмосферы Земли, которые также позволяют улучшать прогнозы погоды и способствуют пониманию изменений климата. Из измерений AIRS на основе нескольких тестов, сравнивающих яркость, вычисляется показатель пыли (*англ.* Dust Score) (DeSouza-Machado et al., 2010). Считается, что присутствие минеральной пыли в атмосфере вероятно, если значение показателя превышает 380.

Визуализация спутниковых снимков сканера OLCI, анализ флагов ошибок, выделение полигона исследования, а также статистический анализ для данных второго уровня обработки проводились в программе SeaDAS (<https://seadas.gsfc.nasa.gov/>).

Основные результаты и обсуждения

На *рис. 1* (см. с. 30) представлены карты пространственного распределения показателя пыли за апрель 2023 г. над исследуемым регионом. В рассматриваемый период было зарегистрировано два пылевых переноса: первый — с 8 по 13 апреля, а второй — с 17 по 21 апреля 2023 г. Из представленных данных подтверждается, что местом зарождения пылевого аэрозоля являются пустыни Гоби и Такла-Макан, где пылевая буря началась 8 апреля 2023 г. Первый пик концентрации пылевого аэрозоля над акваторией Японского моря по наблюдению AIRS зарегистрирован 12–13 апреля, а второй — 21 апреля 2023 г. Также на *рис. 1* для демонстрации масштаба и интенсивности пылевого переноса приведены спутниковые снимки OLCI (S3A/S3B) в истинном цвете за 13 и 21 апреля соответственно.

К сожалению, отследить по спутниковым снимкам точную траекторию переноса пылевого облака не удалось, так как над исследуемым регионом целый месяц наблюдалась сильная облачность. В работах (Li, Wang, 2024; Li et al., 2024) данный эпизод пылевого переноса над Японским морем был подтверждён обратными траекториями кинематической модели HYSPLIT (*англ.* Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) и данными стратификации и типизации атмосферного аэрозоля радиометра CALIPSO (*англ.* Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations), где по прогностическим данным перенос осуществлялся на высоте 2–5 км. Это совпадает с результатами натуральных лидарных измерений подобных пылевых выносов над Японским морем, где отмечается относительно устойчивый слой пыли в диапазоне 3–5 км, располагающийся на локальных температурных инверсиях (Букин и др., 2007).

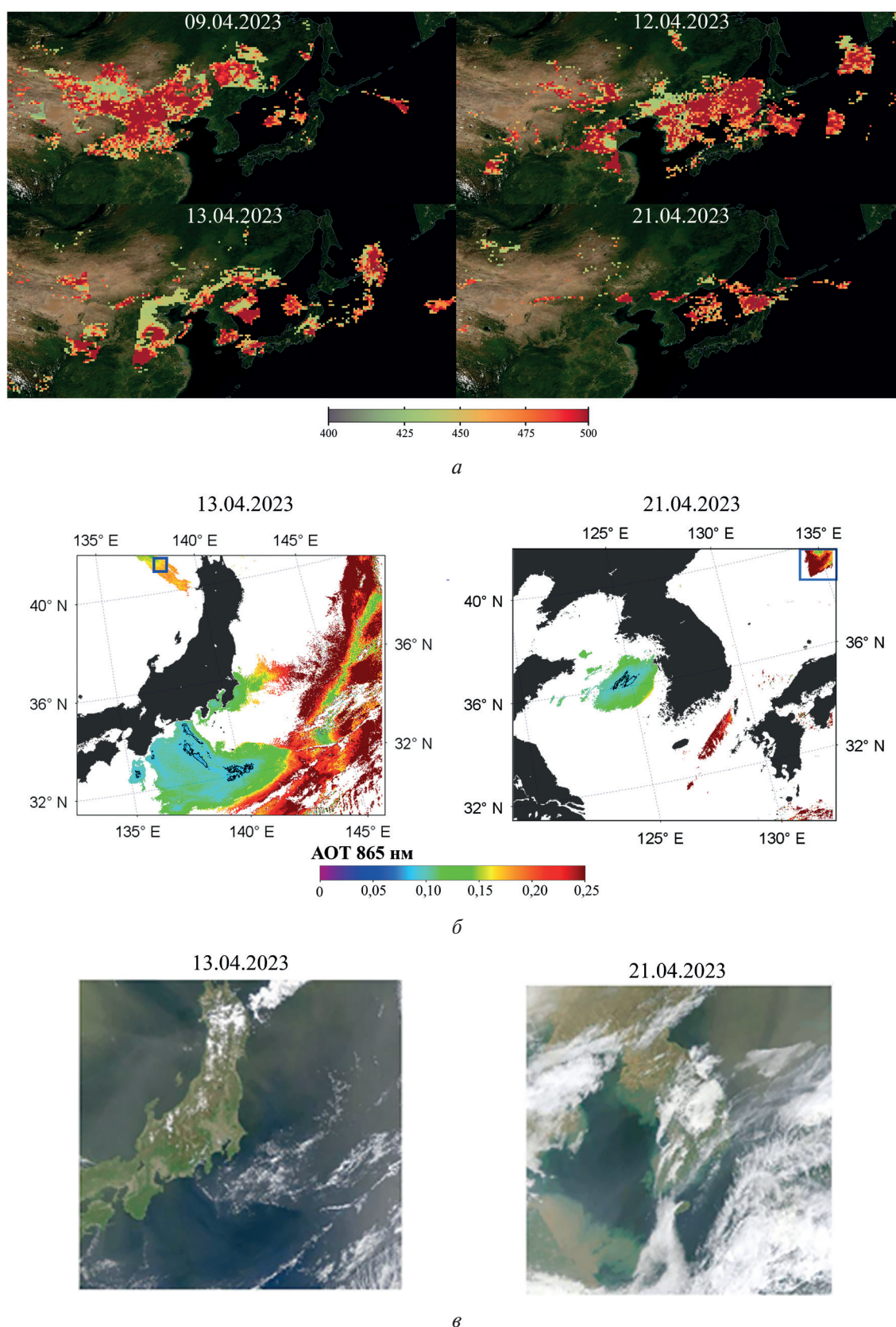


Рис. 1. Данные с инфракрасного зонда AIRS над Японским морем за апрель 2023 г. (а), карты распределения аэрозольной оптической толщины (AOT) на 865 нм в дни переноса (б) (источник: SeaDAS) и спутниковые снимки OLCI (S3A/S3B) в истинном цвете за исследуемый период (в) (<https://www.nasa.gov>)

В настоящей работе предлагается оценить изменчивость оптических свойств атмосферы (АОТ, АЕ, АОТ поглощения) и гидрооптических характеристик ($R_{rs}(\lambda)$) с использованием совокупности натурных и спутниковых данных. К сожалению, у расширенной сети для изучения цвета океана и измерения коэффициента яркости моря AERONET-OC нет станций в акватории Японского моря, поэтому спутниковые данные $R_{rs}(\lambda)$ будут сравниваться с аналогичными данными в ближайшие дни с чистой атмосферой. Максимумы концентрации пыли в атмосфере, по визуальному анализу спутниковых снимков OLCI за апрель 2023 г., над Японским морем наблюдаются 13 и 21 апреля. На основании этого были выбраны области исследования, а именно полигоны пикселей на северо-востоке Японского моря (границы полигона: 41,032–41,390° с. ш.; 138,033–138,403° в. д.) и в центральной части Японского моря (границы полигона: 38,106–39,901° с. ш.; 134,217–135,238° в. д.) (см. *рис. 1б*). Основные критерии для построения полигонов: визуальная однородность распределения Chl-*a* и АОТ, наличие поглощающего аэрозоля, отсутствие облачности для выбранного участка. Для сравнительного анализа были отобраны все безоблачные снимки для исследуемых полигонов за апрель 2023 г. для изучения временной изменчивости гидрооптических параметров. Всего для северо-восточной части Японского моря были выделены даты 01.04, 09.04, 13.04, 23.04 и 27.04, а для центральной части Японского моря — 02.04, 10.04, 21.04, 23.04 и 27.04.

В программе SeaDAS были построены карты распределения Chl-*a* и приведена статистика по пикселям для выбранных полигонов. Таким образом, карты распределения Chl-*a* для северо-восточной части представлены на *рис. 2*. Статистика распределения приведена в *табл. 1*.

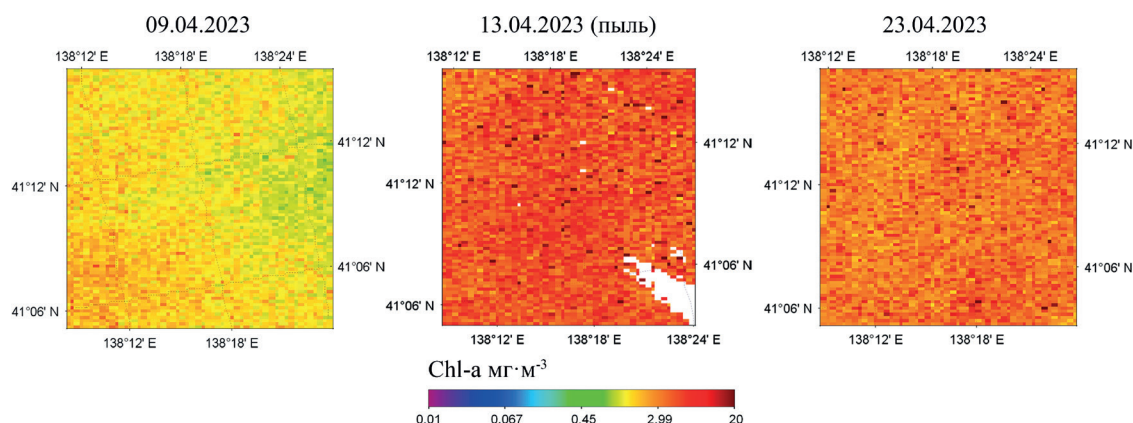


Рис. 2. Распределение Chl-*a* для выбранной области исследования в северо-восточной части Японского моря по снимкам сканера OLCI (SeaDAS)

Таблица 1. Усреднённые значения атмосферных параметров и Chl-*a* для исследуемой области в северо-восточной части Японского моря с учётом среднеквадратичного отклонения (СКО), где АОТ_865 — АОТ на 865 нм, АЕ — параметр Ангстрема в диапазоне 440–870 нм, Chl-*a* — концентрация хлорофилла *a*, Kd_490 — показатель диффузного ослабления света на 490 нм

	01.04 Чистая атмосфера	09.04 Смешанный тип	13.04 Наличие пыли	23.04 Смешанный тип	27.04 Чистая атмосфера
АОТ_865	0,055±0,020	0,098±0,001	0,169±0,006	0,115±0,006	0,049±0,001
АЕ	1,830±0,230	1,366±0,014	0,761±0,147	1,607±0,104	2,055±0,107
Chl- <i>a</i>	2,001±0,810	1,581±0,190	5,237±3,042	3,642±1,880	3,118±1,564
Kd_490	0,1340±0,0265	0,1220±0,0002	0,274±0,252	0,189±0,092	0,166±0,049

Из *табл. 1* следует, что самыми «чистыми днями» оказались 01.04, 09.04 и 27.04, в то время как при наличии пыли 13.04 АОТ на 865 нм сильно завышена, а АЕ (440–870 нм) пони-

жен, что напрямую свидетельствует о сильной замутнённости атмосферы и возможном превалировании крупнодисперсных пылевых частиц в атмосфере (Eck et al., 1999). Позже данное предположение подтвердилось с использованием продуктов инверсии V3 AERONET (Size Distribution) по станциям Niigata и Hokkaido University, на графиках размерного распределения аэрозольных частиц которых видно преобладание частиц радиусом от 1 до 10 мкм.

Ниже на *рис. 3* приведены усреднённые значения $Rrs(\lambda)$ для рассматриваемых случаев.

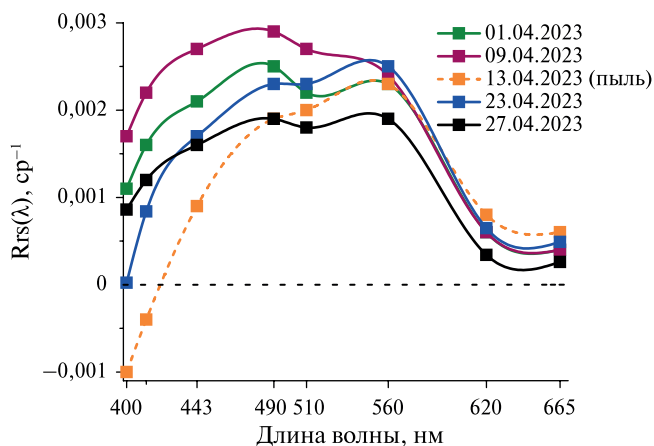


Рис. 3. Усреднённые по выбранной области в северо-восточной части Японского моря значения $Rrs(\lambda)$ за исследуемый период

Из него видно, что при наличии минеральной пыли за 13.04.2023 $Rrs(\lambda)$ имеет отрицательные значения в коротковолновой области спектра (400–412 нм), что свидетельствует о наличии ошибки атмосферной коррекции. При статистической обработке данных видно (*табл. 1*), что за 13.04 концентрация хлорофилла *a* резко возросла до $5,23 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, это является явным следствием ошибки, так как даже если минеральная пыль и влияет на возрастание концентрации Chl-*a*, то данный эффект не может наступать так быстро. В работе (Li, Wang, 2024) авторы с использованием спутника Himawari-8/9 получили похожий результат, просто проведя обобщённую статистику Chl-*a* в исследуемой области (37–42° с. ш. и 145–165° в. д.) в период 10–18 апреля 2023 г., и также установили пик возрастания Chl-*a* за 13–14 апреля 2023 г. Но при этом анализ спектрального коэффициента яркости не был проведён и очевидные ошибки атмосферной коррекции не были учтены.

Карты распределения Chl-*a* для центральной части Японского моря приведены на *рис. 4* (см. с. 33). Статистика распределения представлена в *табл. 2*.

Таблица 2. Усреднённые значения гидрооптических и атмосферных параметров для исследуемой области в центральной части Японского моря с учётом СКО

	02.04 Смешанный тип	10.04 Смешанный тип	21.04 Наличие пыли	23.04 Смешанный тип	27.04 Чистая атмосфера
AOT_865	$0,203 \pm 0,061$	$0,178 \pm 0,020$	$0,272 \pm 0,089$	$0,221 \pm 0,035$	$0,071 \pm 0,011$
AE	$1,279 \pm 0,228$	$0,965 \pm 0,156$	$0,243 \pm 0,202$	$0,731 \pm 0,153$	$1,392 \pm 0,261$
Chl- <i>a</i>	$0,7170 \pm 0,3202$	$1,1822 \pm 0,5560$	$4,4776 \pm 4,6321$	$1,4054 \pm 0,5035$	$1,1046 \pm 0,6658$
Kd_490	$0,0930 \pm 0,0154$	$0,1057 \pm 0,0213$	$0,2450 \pm 0,3141$	$0,1156 \pm 0,0180$	$0,1014 \pm 0,0254$

Из *рис. 4* следует, что пылевой перенос за 21.04 наблюдался в месте зарождения мезомасштабного вихря, что усиливает значимость ошибок атмосферной коррекции и осложняет нахождение причины резкого возрастания Chl-*a*. Статистика распределения расчётов гидрооптических параметров для полигона пикселей в центральной части Японского моря представлена в *табл. 2*. Дополнительно построены усреднённые значения $Rrs(\lambda)$ для рассматриваемых случаев в центральной части Японского моря (*рис. 5*, см. с. 33).

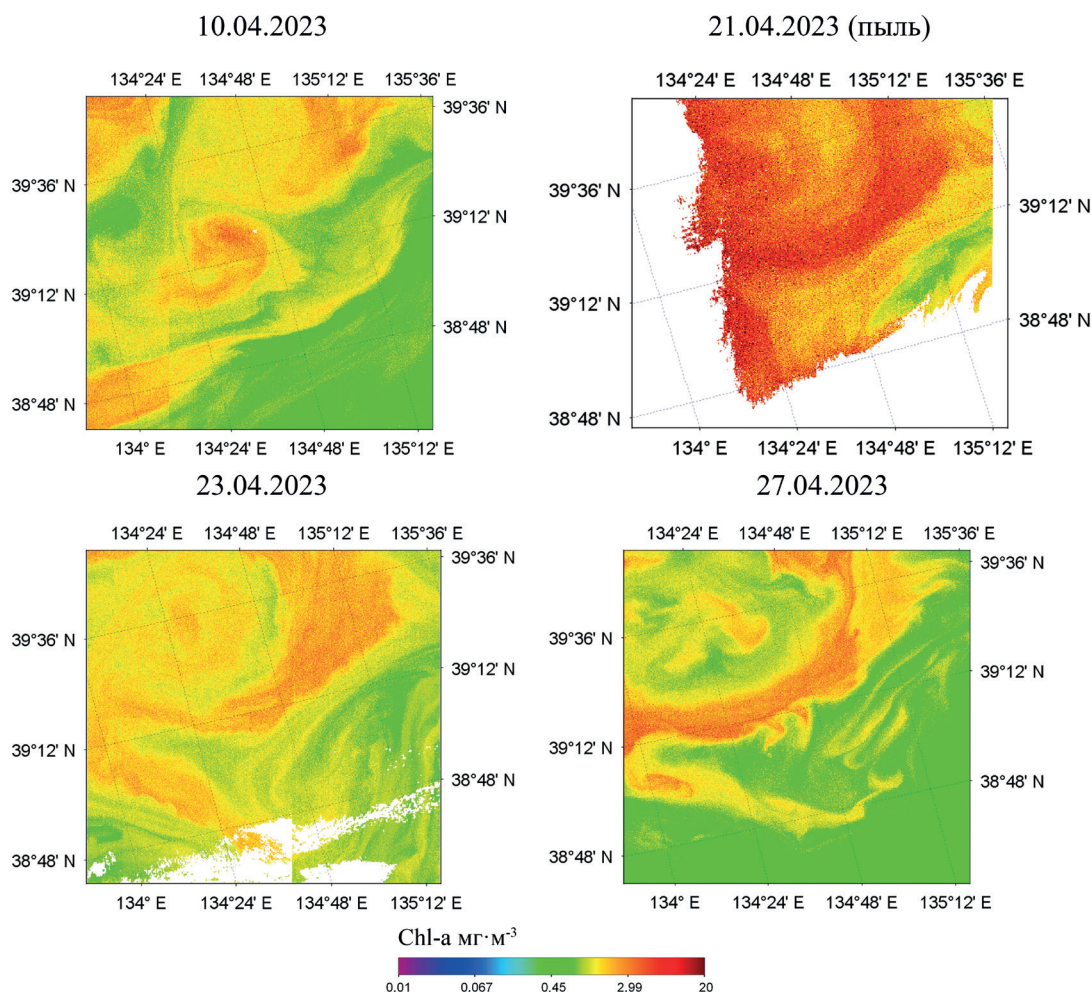
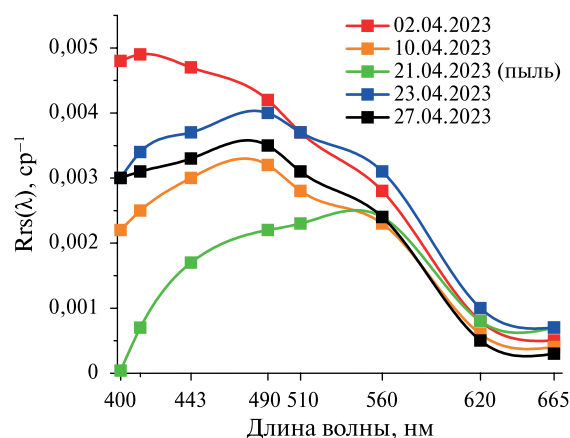


Рис. 4. Распределение Chl-*a* для выбранной области исследования в центральной части Японского моря, построенные на основании спутниковых снимков сканера OLCI

Данные из табл. 2 показывают, что на выбранном участке с 02.04 наблюдается замутнённая атмосфера. Из рис. 5 видно, что ошибки атмосферной коррекции за 21.04 не представляются очевидными и выражаются лишь заниженными значениями $R_{rs}(\lambda)$ в коротковолновой области. Спектральный ход $R_{rs}(\lambda)$ за 02.04 отличается от других рассматриваемых случаев, так как максимум спектра регистрируется на 412 нм и средние величины в коротковолновой области $R_{rs}(\lambda)$ являются сильно завышенными, что может свидетельствовать о неправильной подборке аэрозольной модели, наличии флагов ошибки или невозможности качественного статистического анализа $R_{rs}(\lambda)$ из-за большого разброса данных. Так же, как и для пылевого события 13.04 в северо-восточной части Японского моря, за 21.04 регистрируется самая высокая концентрация содержания Chl-*a* в центральной части Японского моря и наивысшее СКО (табл. 2), превышающее саму среднюю величину.

Рис. 5. Усреднённые по выбранной области в центральной части Японского моря значения $R_{rs}(\lambda)$ за исследуемый период



Оба фактора становятся дополнительными признаками ошибок атмосферной коррекции, так как за даты до переноса (2-го и 10-го) и после него (23-го и 27-го) средняя концентрация Chl-*a* в ~4 раза ниже, чем за 21.04, а СКО в дни с чистой атмосферой составляет 35–60 % от среднего значения. При этом повышение спутниковых оценок концентрации хлорофилла *a* произошло равномерно на всём спутниковом изображении, чего нельзя связать с действием мезомасштабного вихря, который перераспределяет пространственное распределение Chl-*a* внутри рассматриваемого района без смещения соответствующей вихревой структуры за пределы спутникового изображения. Влияние минеральной пыли на возрастание концентрации Chl-*a* за счёт развития клеток фитопланктона также не могло привести к настолько высокому росту средней концентрации Chl-*a* с 1,2 до 4,5 мг·м⁻³ в день прохождения пылевой бури, особенно учитывая тот факт, что через два дня после прохождения пылевой бури средняя концентрация понизилась до 1,4 мг·м⁻³.

В настоящем исследовании определяется ход степенной функции ошибки атмосферной коррекции посредством сравнения данных $Rrs(\lambda)$ в дни с наличием минеральной пыли в атмосфере и ближайшие дни с чистой атмосферой. Случай за 13 апреля 2023 г. будет сравниваться с 1 апреля 2023 г., а пылевой эпизод 21 апреля 2023 г. с днём с наиболее чистой атмосферой (наименьшие АОТ, наивысшие АЕ) за весь апрель 2023 г. — 27 апреля. Данные пары выбраны таким образом, чтобы разница в периоде измерений между загрязнённым пылью и чистым днём была минимальной. Исходя из данных табл. 1 и 2 была найдена ошибка сравнения результатов атмосферной коррекции как $\Delta Rrs = Rrs(\lambda)^{error} = Rrs(\lambda)^{clean} - Rrs(\lambda)^{dust}$. Следующая задача состояла в подборе функции аппроксимации, так как вид зависимости ΔRrs от λ явно имел вид степенной функции, мы использовали её. В работах (Шибанов, Папкина, 2022; Parkova et al., 2024; Shybanov, Parkova, 2022) было теоретически доказано и экспериментально показано на примере акваторий Чёрного и Средиземного моря, что вне зависимости от используемого спутника ошибка атмосферной коррекции объясняется суммарным вкладом молекулярной составляющей, пропорциональной рэлеевской составляющей (λ^{-4}), и сильного аэрозольного поглощения пылевым аэрозолем высокой концентрации (λ^{-2}). Для анализа второго компонента, а именно аэрозольного поглощения, был использован готовый продукт инверсии AERONET V3 (AOT absorption) по данным с ближайших станций AERONET (Hokkaido University и Niigata) и вычислены функции аппроксимации (см. рис. 4). К сожалению, станция Niigata за 21.04 не предоставила данные из-за чрезмерно высокой концентрации пыли над станцией. При аппроксимации АОТ поглощения от длины волны стандартной степенной функцией её ход был близок к виду $\lambda^{-1,5 \dots -1,8}$. После этого происходила аппроксимация ошибки ΔRrs степенной функцией вида $\lambda^{-5,5}$ и нахождение экспериментальных зависимостей (рис. 6). Вид функции $\lambda^{-5,5}$ был выбран из расчёта суммарного вклада молекулярной составляющей (λ^{-4}) и минимального аэрозольного поглощения для конкретного рассматриваемого эпизода пылевого переноса над Японским морем ($\lambda^{-1,5}$).

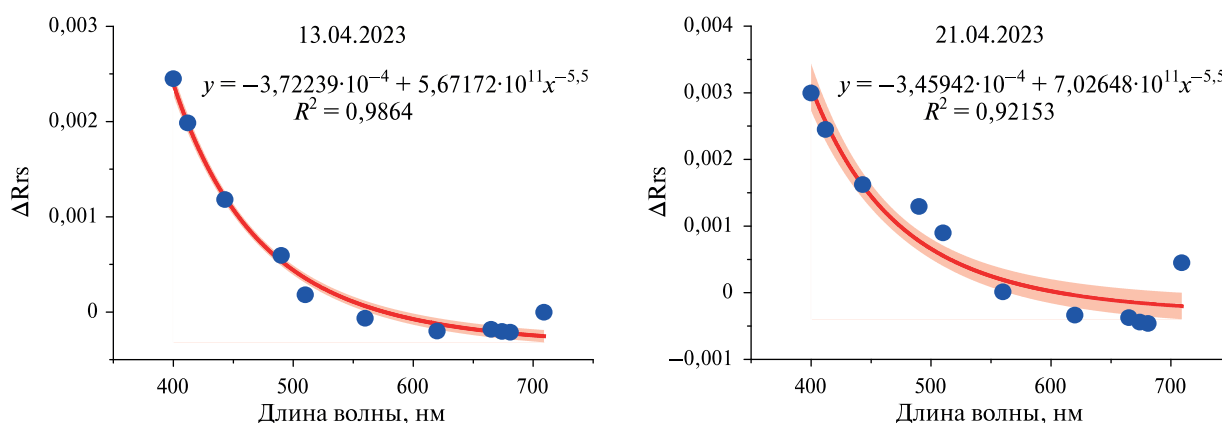


Рис. 6. Спектральный ход ΔRrs спутниковых данных сканера OLCI (ΔRrs) и её аппроксимация (выделена цветом) степенной функцией вида $A+B \cdot \lambda^{-5,5}$

Исходя из рис. 6, видно, что экспериментальная зависимость типа $\Delta Rrs = A + B\lambda^{-5,5}$ хорошо соответствует форме спектра ошибки сравнения результатов атмосферной коррекции, что подтверждает высокий коэффициент детерминации $R^2 > 0,9$. Аппроксимация функцией вида $\lambda^{-5,8}$ также показала хороший результат с высоким $R^2 > 0,85$.

Заключение

В настоящем исследовании рассматривается конкретный случай переноса минеральной пыли над акваторией Японского моря в период 13–21 апреля 2023 г. В ходе анализа влияния пылевого аэрозоля на гидрооптические параметры проведена оценка качества предоставляемых спутниковых данных оптических параметров атмосферы и приповерхностного слоя моря для исследуемого региона и степени влияния атмосферной пыли на ошибки вычисления $Rrs(\lambda)$ и $Chl-a$. При статистической обработке спутниковых данных OLCI видно, что за 13.04 и 21.04 в дни прохождения пылевой бури концентрация хлорофилла a резко (в 3–4 раза) возросла до $4,47–5,23 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, что является явным следствием ошибки, так как даже если минеральная пыль и влияет на возрастание концентрации $Chl-a$, то данный эффект не может наступать мгновенно. В настоящей работе предполагается, что данная ошибка связана с заниженными и даже отрицательными значениями спектрального коэффициента яркости моря. При дальнейшем анализе разницы между натурными и спутниковыми данными было найдено, что ход степенной ошибки атмосферной коррекции по сравнению с ближайшим чистым днём хорошо описывается функцией вида $\lambda^{-5,5}$, что в дальнейшем может быть использовано в качестве основы для нового регионального алгоритма атмосферной коррекции. Нужно иметь в виду, что на полученных оценках ошибок атмосферной коррекции могла сказаться естественная изменчивость спектров $Rrs(\lambda)$ за разные анализируемые дни. При этом для анализа изменчивости в северной части Японского моря влияние процессов адвекции оптически-активных веществ в приповерхностном слое моря было минимизировано за счёт выбора области сравнения в однородных областях наблюдаемых структур на спутниковых изображениях. Для этого района нельзя исключать, что увеличение $Chl-a$ в дни после прохождения пылевой бури (23.04 и 27.04) связано с поступлением питательных веществ на морскую поверхность вследствие прохождения пылевой бури, поскольку концентрация $Chl-a$ на однородных участках значимо возросла примерно в 1,5–2 раза относительно дней до пылевого события (01.04 и 09.04). В случае центральной части Японского моря подобный анализ провести сложнее в связи с тем, что в районе прохождения пылевой бури уже действовал мезомасштабный вихрь, который оказывал дополнительное воздействие на перераспределение концентрации $Chl-a$. Чтобы точнее ответить на вопрос о влиянии пылевой бури на повышение концентрации $Chl-a$, необходимо оценивать выпадение пылевого аэрозоля на морскую поверхность, а не просто рассматривать перенос в атмосфере. Кроме этого, важно иметь качественные спутниковые снимки непосредственно перед прохождением пылевой бури, а они отсутствовали по причине большого количества облачных дней.

Работа выполнена в рамках тем государственного задания МГИ 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»)» и государственного задания ТОИ ДВО РАН № 124022100080-0 «Комплексное использование методов дистанционного зондирования Земли, а также наземных и подводных измерительных систем в исследованиях морских погодных образований, гидродинамических и биогеохимических процессов в верхнем слое океана и морей».

Литература

1. *Алексанин А. И., Качур В. А.* Особенности атмосферной коррекции спутниковых данных цвета океана в Дальневосточном регионе // Исслед. Земли из космоса. 2016. Т. 3. №. 6. С. 56–67. DOI: 10.7868/S020596141605002X.
2. *Букин О. А., Павлов А. Н., Салюк П. А., Кульчин Ю. Н., Шмирко К. А., Столярчук С. Ю., Бубновский А. Ю.* Особенности высотного распределения аэрозоля во время прохождения пылевых бурь над заливом Петра Великого в 2006 г. и их воздействие на фитопланктонные сообщества Японского моря // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 4. С. 341–349.
3. *Звалинский В. И., Лобанова П. В., Тищенко П. Я. и др.* Оценки первичной продукции в северной части Японского моря в различные сезоны по судовым и спутниковым данным // Океанология. 2022. Т. 62. № 5. С. 726–742. DOI: 10.31857/S0030157422050215.
4. *Навроцкий В. В., Дубина В. А., Павлова Е. П., Храпченко Ф. Ф.* Анализ спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла в заливе Петра Великого (Японское море) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 158–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-158-170.
5. *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.
6. *Штрайхерт Е. А., Захарков С. П., Гордейчук Т. Н., Шамбарова Ю. В.* Концентрация хлорофилла-а и био-оптические характеристики в заливе Петра Великого (Японское море) во время зимне-весеннего цветения фитопланктона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 148–162.
7. *Cui T., Zhang J., Tang J. et al.* Assessment of satellite ocean color products of MERIS, MODIS and SeaWiFS along the East China Coast (in the Yellow Sea and East China Sea) // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. V. 87. P. 137–151. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.10.013.
8. *DeSouza-Machado S., Strow L., Imbiriba B. et al.* Infrared retrievals of dust using AIRS: Comparisons of optical depths and heights derived for a North African dust storm to other collocated EOS A-Train and surface observations // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2010. V. 115. No. D15. Article D15201. DOI: 10.1029/2009JD012842.
9. *Eck T. F., Holben B. N., Reid J. S. et al.* Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols // J. Geophysical Research: Atmospheres. 1999. V. 104. No. D24. P. 31333–31349. DOI: 10.1029/1999JD900923.
10. *Filonchik M., Peterson M. P., Zhang L., Yan H.* An analysis of air pollution associated with the 2023 sand and dust storms over China: Aerosol properties and PM10 variability // Geoscience Frontiers. 2024. V. 15. No. 2. Article 101762. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101762.
11. *Fukushima H., Toratani M.* Asian dust aerosol: Optical effect on satellite ocean color signal and a scheme of its correction // J. Geophysical Research: Atmospheres. 1997. V. 102. No. D14. P. 17119–17130. DOI: 10.1029/96JD03747.
12. *Gordon H. R., Wang W.* Influence of oceanic whitecaps on atmospheric correction of ocean-color sensors // Applied Optics. 1994. V. 33. P. 7754–7763. DOI: 10.1364/AO.33.007754.
13. *Hu C., Lee Z., Franz B.* Chlorophyll-a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference // J. Geophysical Research: Oceans. 2012. V. 117. No. C1. Article C01011. DOI: 10.1029/2011JC007395.
14. *Kalinskaya D. V., Papkina 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. V. 14. No. 8. Article 1890. DOI: 10.3390/rs14081890.
15. *Li Y., Wang W.* Long-range transport of a dust event and impact on marine chlorophyll-a concentration in April 2023 // Remote Sensing. 2024. V. 16. No. 11. Article 1883. DOI: 10.3390/rs16111883.
16. *Li J., Wong M. S., Shi G.* Multi-faceted analysis of dust storm from satellite imagery, ground station, and model simulations, a study in China // Atmospheric Research. 2024. V. 299. Article 107195. DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107195.
17. *Lipinskaya N. A., Salyuk P. A., Golik I. A.* Variations and depth of formation of submesoscale eddy structures in satellite ocean color data in the southwestern region of the Peter the Great Bay // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 23. Article 5600. DOI: 10.3390/rs15235600.
18. Ocean and Land Colour Imager (OLCI) Ocean Color Data; 2022 Reprocessing. NASA OB.DAAC. Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group, 2022. DOI: 10.5067/SENTINEL-3A/OLCI/L2/EFR/OC/2022.

19. Papkova A. S., Shybanov E. B., Kalinskaya D. V. The Effect of dust aerosol on satellite data from different color scanners // *Physical Oceanography*. 2024. V. 31. No. 5. P. 720–735.
20. Park M.-S., Lee S., Ahn J.-H. et al. Decadal measurements of the first geostationary ocean color satellite (GOCI) compared with MODIS and VIIRS data // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 1. Article 72. DOI: 10.3390/rs14010072.
21. Salyuk P., Bukin O., Alexanin A. et al. Optical properties of peter the great bay waters compared with satellite ocean colour data // *Intern. J. Remote Sensing*. 2010. V. 31. No. 17–18. P. 4651–4664. DOI: 10.1080/01431161.2010.485219.
22. Salyuk P. A., Stepochkin I. E., Shmirko K. A., Golik I. A. Using satellite multi-angle polarization measurements to characterize atmospheric aerosol above Bohai Bay // *Advances in Space Research*. 2024. V. 73. No. 1. P. 514–522. DOI: 10.1016/j.asr.2023.10.007.
23. Shanmugam P., Ahn Y.-H. New atmospheric correction technique to retrieve the ocean colour from SeaWiFS imagery in complex coastal waters // *J. Optics A: Pure and Applied Optics*. 2007. V. 9. No. 5. P. 511–530. DOI: 10.1088/1464-4258/9/5/016.
24. 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. V. 29. No. 6. P. 688–706. DOI: 10.22449/1573-160X-2022-6-688-706.
25. Song H., Zhang K., Piao S., Wan S. Spatial and temporal variations of spring dust emissions in northern China over the last 30 years // *Atmospheric Environment*. 2016. V. 126. P. 117–127. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.11.052.
26. Suetin V. S., Korolev S. N., Suslin V. V., Kucheryavyy A. A. Manifestation of specific features of the optical properties of atmospheric aerosol over the Black Sea in the interpretation of SeaWiFS data // *Physical Oceanography*. 2004. V. 14. P. 57–65. <https://doi.org/10.1023/B:POCE.0000025370.99460.88>.
27. Wang H., Zhao T., Zhang X., Gong S. Dust direct radiative effects on the earth-atmosphere system over East Asia: Early spring cooling and late spring warming // *Chinese Science Bull.* 2011. V. 56. No. 10. P. 1020–1030. DOI: 10.1007/s11434-011-4405-3.
28. Yu H., Yang Y., Wang H. et al. Interannual variability and trends of combustion aerosol and dust in major continental outflows revealed by MODIS retrievals and CAM5 simulations during 2003–2017 // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. V. 20. P. 139–161. DOI: 10.5194/acp-20-139-2020.
29. Zhang X., Zhou Y. Aerosol direct radiative forcing over China: A 40-year MERRA-2-based evaluation // *Atmospheric Environment*. 2023. V. 299. Article 119659. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.119659.

Mineral dust impact on atmospheric correction of OLCI satellite optical radiometer measurements over the Sea of Japan

A. S. Papkova¹, P. A. Salyuk², D. M. Shukalo¹

¹ *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*

E-mail: hanna.papkova@gmail.com

² *V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*

The study presents an analysis of variability of optical properties of the atmosphere and hydrooptical characteristics of the mineral dust transfer episode over the Sea of Japan in the period of April 13–21, 2023, according to satellite and *in situ* data. During statistical processing of OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) satellite data for the central and northeastern part of the Sea of Japan, it was found that on the days of the dust storm, the chlorophyll *a* (Chl-*a*) concentration increased sharply (3–4 times) to 4.47–5.23 mg·m⁻³, which was an obvious consequence of atmospheric correction error, since even if mineral dust does induce an increase in Chl-*a* concentration, this effect cannot occur instantly. Further, when analyzing the statistical distribution of remote sensing reflectance for the dates under study, negative or anomaly low values were found in the short-wave region of the spectrum. In an additional analysis of the results of atmospheric correction on the studied dates, it was found that the course of the power function of the atmospheric correction error compared to the nearest clear day is well described by a function of the form $\lambda^{-5.5}$, which in future can be used as a basis for a new regional algorithm of atmospheric correction.

Keywords: mineral dust, Sea of Japan, Chl-*a* concentration, atmospheric correction, sea spectral radiance coefficient, OLCI, AERONET

Accepted: 26.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-27-39

References

1. Aleksanin A. I., Kachur V. A., Specificity of atmospheric correction of satellite data on ocean color in the Far East, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 3, No. 6, pp. 56–67 (in Russian), DOI: 10.7868/S020596141605002X.
2. Bukin O. A., Pavlov A. N., Saluk P. A., Kulchin Y. N., Shmirko K. A., Stolyarchuk S. Y., Bubnovskii A. Y., Peculiarities of the aerosol vertical distribution during the passage of dust storms over the Peter the Great Bay in 2006 and their influence on phytoplankton communities in the Japan Sea, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2007, V. 20, No. 4, pp. 306–312.
3. Zvalinsky V. I., Lobanova P. V., Tishchenko P. Ya. et al., Estimation of primary production in the northern part of the Sea of Japan in various seasons by ship- and satellite-based observations, *Oceanology*, 2022, V. 62, No. 5, pp. 630–645, DOI: 10.1134/S0001437022050216.
4. Navrotsky V. V., Dubina V. A., Pavlova E. P., Chrapchenkov F. F., Analysis of satellite observations of chlorophyll concentration in the Peter the Great Gulf (Japan Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 1, pp. 158–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-158-170.
5. 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 distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 6, pp. 9–17 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-9-17.
6. Shtraikhert E. A., Zakharkov S. P., Gordeychuk T. N., Shambarova Ju. V., Chlorophyll-*a* concentration and bio-optical characteristics in the Peter the Great Bay (Sea of Japan) during winter-spring phytoplankton bloom, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, V. 11, No. 1, pp. 148–162 (in Russian).
7. Cui T., Zhang J., Tang J. et al., Assessment of satellite ocean color products of MERIS, MODIS and SeaWiFS along the East China Coast (in the Yellow Sea and East China Sea), *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, V. 87, pp. 137–151, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.10.013.
8. DeSouza-Machado S., Strow L., Imbiriba B. et al., Infrared retrievals of dust using AIRS: Comparisons of optical depths and heights derived for a North African dust storm to other collocated EOS A-Train and surface observations, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, V. 115, No. D15, Article D15201, DOI: 10.1029/2009JD012842.
9. Eck T. F., Holben B. N., Reid J. S. et al., Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, V. 104, No. D24, pp. 31333–31349, DOI: 10.1029/1999JD900923.
10. Filonchik M., Peterson M. P., Zhang L., Yan H., An analysis of air pollution associated with the 2023 sand and dust storms over China: Aerosol properties and PM10 variability, *Geoscience Frontiers*, 2024, V. 15, No. 2, Article 101762, DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101762.
11. Fukushima H., Toratani M., Asian dust aerosol: Optical effect on satellite ocean color signal and a scheme of its correction, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, V. 102, No. D14, pp. 17119–17130, DOI: 10.1029/96JD03747.
12. Gordon H. R., Wang W., Influence of oceanic whitecaps on atmospheric correction of ocean-color sensors, *Applied Optics*, 1994, V. 33, pp. 7754–7763, DOI: 10.1364/AO.33.007754.
13. Hu C., Lee Z., Franz B., Chlorophyll-*a* algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2012, V. 117, No. C1, Article C01011, DOI: 10.1029/2011JC007395.
14. 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, V. 14, No. 8, Article 1890, DOI: 10.3390/rs14081890.
15. Li Y., Wang W., Long-range transport of a dust event and impact on marine chlorophyll-*a* concentration in April 2023, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, No. 11, Article 1883, DOI: 10.3390/rs16111883.
16. Li J., Wong M. S., Shi G., Multi-faceted analysis of dust storm from satellite imagery, ground station, and model simulations, a study in China, *Atmospheric Research*, 2024, No. 299, Article 107195, DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107195.

17. Lipinskaya N. A., Salyuk P. A., Golik I. A., Variations and depth of formation of submesoscale eddy structures in satellite ocean color data in the southwestern region of the Peter the Great Bay, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 23, Article 5600, DOI: 10.3390/rs15235600.
18. *Ocean and Land Colour Imager (OLCI) Ocean Color Data; 2022 Reprocessing*, NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group, 2022, DOI: 10.5067/SENTINEL-3A/OLCI/L2/EFRR/OC/2022.
19. Papkova A. S., Shybanov E. B., Kalinskaya D. V., The effect of dust aerosol on satellite data from different color scanners, *Physical Oceanography*, 2024, V. 31, No. 5, pp. 720–735.
20. Park M.-S., Lee S., Ahn J.-H. et al., Decadal measurements of the first geostationary ocean color satellite (GOCI) compared with MODIS and VIIRS data, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 1, DOI: 10.3390/rs14010072.
21. Salyuk P., Bukin O., Alexanin A. et al., Optical properties of peter the great bay waters compared with satellite ocean colour data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2010, V. 31, No. 17, DOI: 10.1080/01431161.2010.485219.
22. Salyuk P. A., Stepochkin I. E., Shmirko K. A., Golik I. A., Using satellite multi-angle polarization measurements to characterize atmospheric aerosol above Bohai Bay, *Advances in Space Research*, 2024, V. 73, No. 1, pp. 514–522, DOI: 10.1016/j.asr.2023.10.007.
23. Shanmugam P., Ahn Y.-H., New atmospheric correction technique to retrieve the ocean colour from SeaWiFS imagery in complex coastal waters, *J. Optics A: Pure and Applied Optics*, 2007, V. 9, No. 5, pp. 511–530, DOI: 10.1088/1464-4258/9/5/016.
24. 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, V. 29, No. 6, pp. 688–706, DOI: 10.22449/1573-160X-2022-6-688-706.
25. Song H., Zhang K., Piao S., Wan S., Spatial and temporal variations of spring dust emissions in northern China over the last 30 years, *Atmospheric Environment*, 2016, V. 126, pp. 117–127, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.11.052.
26. Suetin V. S., Korolev S. N., Suslin V. V., Kucheryavyi A. A., Manifestation of specific features of the optical properties of atmospheric aerosol over the Black Sea in the interpretation of SeaWiFS data, *Physical Oceanography*, 2004, V. 14, pp. 57–65, <https://doi.org/10.1023/B:POCE.0000025370.99460.88>.
27. Wang H., Zhao T., Zhang X., Gong S., Dust direct radiative effects on the earth-atmosphere system over East Asia: Early spring cooling and late spring warming, *Chinese Science Bull.*, 2011, V. 56, No. 10, pp. 1020–1030, DOI: 10.1007/s11434-011-4405-3.
28. Yu H., Yang Y., Wang H. et al., Interannual variability and trends of combustion aerosol and dust in major continental outflows revealed by MODIS retrievals and CAM5 simulations during 2003–2017, *Atmospheric Chemistry Physics*, 2020, V. 20, pp. 139–161, DOI: 10.5194/acp-20-139-2020.
29. Zhang X., Zhou Y., Aerosol direct radiative forcing over China: A 40-year MERRA-2-based evaluation, *Atmospheric Environment*, 2023, V. 299, Article 119659, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.119659.