


Научная статья

УДК 504.3.054
EDN: WUXIXB

Влияние пылевого аэрозоля на спутниковые данные различных сканеров цвета

А. С. Папкина, Е. Б. Шибанов , Д. В. Калинин*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*
 *e-shibanov@mail.ru*Поступила в редакцию 01.04.2024; одобрена после рецензирования 09.04.2024;
принята к публикации 17.07.2024.

Аннотация

Цель. Оценены величины ошибки атмосферной коррекции спутниковых данных *MODIS-Aqua*, *MODIS-Terra*, *VIIRS-SNPP*, *VIIRS-JPSS*, *NASA HawkEye (SeaHawk)* и *OLCI-Sentinel-3A* за период 28–29 июля 2021 г., когда был зарегистрирован перенос пыли над Черноморским регионом.

Методы и результаты. Для оценки масштабов и интенсивности исследуемого интенсивного пылевого переноса проведен анализ результатов натуральных фотометрических измерений и спутниковых данных. Натурные данные измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) были получены на западных черноморских станциях *Galata Platform* и *Section 7* сети *AERONET (AErosol RObotic NETwork)*. Для анализа изменчивости величин спектрального коэффициента яркости моря за исследуемый период использовались данные дополнения *AERONET – Ocean Color (AERONET-OC)*. В качестве спутниковых данных были использованы измерения сканеров цвета, представленные в базе данных *Ocean Color (MODIS Aqua/Terra, VIIRS SNPP/JPSS, HawkEye и OLCI)*.

Выводы. В результате аппроксимации ошибок атмосферной коррекции спутниковых данных за 28.07.2021 были получены степенные зависимости, близкие к λ^{-5} . Это объясняется суммарным вкладом молекулярной составляющей (λ^{-4}) и аэрозольного поглощения (λ^{-1}). За 29.07.2021 наблюдается более ярко выраженная степенная зависимость функции, так как концентрация пылевого аэрозоля в этот день возрастает, а вклад аэрозольного поглощения становится близок к степенной зависимости λ^{-2} . Также за 29.07.2021 над исследуемым регионом по спутниковым данным *CALIPSO* было показано присутствие не только пылевого, но и дымового аэрозоля. По данным моделирования обратных траекторий воздушных потоков *HYSPLIT* показано, что аэрозольные массы в этот день двигались в направлении Черного моря со стороны юго-запада (острова Крит), что дополнительно подтверждается высокими значениями АОТ над восточной частью акватории Средиземного моря за 29.07.2021. Предполагается, что комбинация двух поглощающих типов аэрозолей вызвала еще большие неточности определения спектрального коэффициента яркости моря за исследуемый период.

Ключевые слова: *MODIS, VIIRS, HawkEye, Sentinel, SPM, AERONET, CALIPSO*, обратные траектории *HYSPLIT*, пылевой аэрозоль, аэрозоль дыма, спектральный коэффициент яркости моря, аэрозольная оптическая толщина, АОТ, поглощение, Черное море, атмосферный аэрозоль, спутниковый мониторинг, наземный мониторинг, оптические характеристики

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрхимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использо-


ванием данных дистанционных и контактных методов измерений. Авторы благодарят Тома Кучера (*Tom Kucsera*), Брента Холбена (*Brent Holben*), Джузеппе Зиборди (*Giuseppe Zibordi*) и группу Жене Фельдмана (*Gene Feldman*) из *NASA* за предоставление данных АОТ, расчеты данных *BTA*, обработку результатов измерений, полученных на севастопольской станции *AERONET*, и за возможность использования качественных данных фотометрических измерений.

Для цитирования: Папкина А. С., Шибанов Е. Б., Калинин Д. В. Влияние пылевого аэрозоля на спутниковые данные различных сканеров цвета // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 766–781. EDN WUXIXB.

Original article

The Effect of Dust Aerosol on Satellite Data from Different Color Scanners

A. S. Papkova, E. B. Shybanov , D. V. Kalinskaya

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
 *e-shybanov@mail.ru*

Abstract

Purpose. The work is purposed at evaluating the errors in atmospheric correction of the satellite (*MODIS Aqua*, *MODIS Terra*, *VIIRS SNPP*, *VIIRS JPSS*, *NASA HawkEye (SeaHawk)* and *OLCI (Sentinel-3A)*) data for July 28–29, 2021 when a dust transport over the Black Sea region was recorded.

Methods and Results. To assess the scale and intensity of the studied dust transfer, the results of *in situ* photometric measurements and satellite data were analyzed. The *in situ* measurement data on aerosol optical depth (AOD) were obtained at the western Black Sea stations *Galata_Platform* and *Section_7* of the *AERONET* network (*AErosol RObotic NETwork*). The variability of sea remote sensing reflectance values during the period under study was analyzed using the additional *AERONET – Ocean Color (AERONET-OC)* data. The color scanner (*MODIS Aqua/Terra*, *VIIRS SNPP/JPSS*, *HawkEye* and *OLCI*) measurements presented in the *Ocean Color* database were used as satellite data.

Conclusions. The approximation of errors in the atmospheric correction of satellite data for July 28–29, 2021 has resulted in obtaining the power-law dependencies close to λ^{-5} . This is explained by the total contribution of molecular component (λ^{-4}) and aerosol absorption (λ^{-1}). On July 29, 2021, a better pronounced power function is observed since the dust aerosol concentration increases on this day, whereas the contribution of aerosol absorption becomes close to the power dependence λ^{-2} . Also on the same day, the *CALIPSO* satellite data showed the presence of not only dust aerosol, but also the biomass burning over the region under study. Modeling the back trajectories of *HYSPLIT* air flows has shown that just on this day the aerosol masses moved towards the Black Sea from the southwest (Crete Island), that was additionally confirmed by high AOD values over the eastern Mediterranean Sea on July 29, 2021. The combination of two types of absorbing aerosols is assumed to induce even larger inaccuracies in determining the sea remote sensing reflectance for the period under study.

Keywords: *MODIS*, *VIIRS*, *HawkEye*, *Sentinel*, *SPM*, *AERONET*, *CALIPSO*, *HYSPLIT* back trajectories, dust aerosol, biomass burning, sea remote sensing reflectance, aerosol optical depth, AOD, absorption, Black Sea, atmospheric aerosol, satellite monitoring, ground monitoring, optical characteristics

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0012 on theme “Analysis, hindcast and operational forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine water areas based on numerical modeling using the data of remote and contact measurement methods”. The authors are thankful to Tom Kucsera, Brent Holben, Giuseppe Zibordi, as well as to the group of Gene Feldman from *NASA* for providing the AOD data, calculating the *BTA* data, processing the measurement results obtained at the Sevastopol *AERONET* station, and for the possibility of using high-quality photometric measurement data.

For citation: Papkova, A.S., Shybanov, E.B. and Kalinskaya, D.V., 2024. The Effect of Dust Aerosol on Satellite Data from Different Color Scanners. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 720-735.

Введение

При анализе антропогенных изменений климата часто пренебрегают минеральной пылью, рассматривая ее как часть естественного аэрозоля. Некоторые исследователи считают, что пыль может быть важным климатообразующим компонентом, особенно над определенными океаническими областями и регионами, где ее концентрации высоки [1, 2]. Несмотря на то что невозможно точно определить влияние минеральной пыли на глобальный климат, исследования по данной теме являются междисциплинарными и актуальными. Полную информацию о свойствах различных типов аэрозоля (включая поглощающий аэрозоль) можно получить при комплексном определении его концентрации, микроструктуры, химического состава, а также оптических характеристик [3–5].

Данное исследование является продолжением цикла работ, посвященных изучению оптических свойств пылевого аэрозоля над акваторией Черного моря и его влияния на продукты *Ocean Color*. Для исследуемого региона при анализе спутниковых данных во многих случаях получаемые результаты могут иметь большие ошибки вследствие некорректного учета оптических свойств аэрозоля [6–9]. Стоит отметить, что ежегодно над Черноморским регионом наблюдаются пылевые переносы как со стороны Африканского континента, так и со стороны Ближнего Востока, Азии [10]. Поскольку изучение данной темы учеными МГИ РАН проводится более 10 лет, на данный момент уже существует определенная методика идентификации различных типов аэрозолей (фоновый аэрозоль, дым, пыль), основанная на анализе изменчивости оптических характеристик, таких как аэрозольная оптическая толщина (АОТ), параметр Ангстрема (α), альбеда однократного рассеивания (SSA), размерное распределение и концентрация аэрозольных частиц (мелкодисперсные ($PM_{2,5}$) и крупнодисперсные (PM_{10}) частицы), параметр асимметрии и т. д. Метод идентификации пылевого аэрозоля сочетает в себе визуальный анализ спутниковых снимков, на которых хорошо виден шлейф пыли, и анализ натурных фотометрических измерений аэрозольных оптических характеристик. Для анализа аэрозоля над Черноморским регионом используются данные станций сети *AERONET (Galata Platform, Section 7)*, расположенные в западной части Черного моря, а также уникальные данные портативного спектрофотометра *SPM* и пылемера *ATMAC*, измерения которыми проводились ежедневно на территории МГИ РАН [11–13].

Стоит отметить, что пылевой аэрозоль имеет наибольшее влияние не только на изменчивость оптических характеристик атмосферы, но и на спутниковые продукты *Ocean Color*. Для объективной оценки состояния акваторий и процедуры атмосферной коррекции на основе данных дистанционного зондирования необходимо провести сравнительный анализ трех видов данных измерений: спутниковых, модельных и натурных. В работах [8, 14–28] показано, что при наличии пыли спектральный коэффициент яркости моря может иметь отрицательные значения в коротковолновой области (400–443 нм). Этот факт указывает на систематические ошибки в работе стандартных алгоритмов атмосферной коррекции, построенных на принципе экстраполяции свойств аэрозоля от ближней ИК области спектра в видимую его часть [27]. Ранее в работе [18] было аналитически доказано, что при наличии в атмосфере над регионом пылевого

поглощающего аэрозоля погрешность атмосферной коррекции выражается степенной функцией четвертой степени, т. е. близка к λ^{-4} . Это связано с поглощением излучения, рассеянного молекулами воздуха, аэрозолем. Аналитическое выражение, описывающее зависимость величины ошибки стандартной атмосферной коррекции от стратификации аэрозоля при малых величинах оптической толщины поглощения света аэрозолем $a_0(\lambda)$, имеет вид

$$r = \frac{P_m(\cos \gamma) \cdot \tau_m^0(\lambda)}{4\mu_0\mu} a_0(\lambda) \cdot \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu} \right) \int_0^1 \int_0^p g(x) dx \cdot dp, \quad (1)$$

$$a_0(\lambda) = (1 - \Lambda) \tau_a^0,$$

где τ_a^0 – аэрозольная оптическая толщина; Λ – альбеда однократного рассеивания; μ_0 – косинус зенитного угла Солнца; μ – косинус зенитного угла наблюдения; $\cos \gamma = -\mu_1 \cdot \mu_2 + \sqrt{1 - \mu_1^2} \sqrt{1 - \mu_2^2} \cos \varphi$ – косинус угла рассеяния; τ_m^0 – общая оптическая толщина молекулярной атмосферы; $g(x)$ – функция стратификации пылевого аэрозоля, показывающая зависимость относительной концентрации аэрозольных частиц от атмосферного давления на заданной высоте. Первая дробь в выражении (1) есть не что иное, как выражение для коэффициента яркости молекулярной атмосферы в линейном приближении Гордона. Следовательно, можно выделить три фактора, влияющие на величину ошибки атмосферной коррекции. Множитель $\frac{P_m(\cos \gamma)}{\mu_0\mu} \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu} \right)$ описывает

геометрию наблюдения, а двойной интеграл не зависит от длины волны и учитывает стратификацию поглощающего аэрозоля относительно молекул воздуха. Поэтому спектральные свойства ошибки атмосферной коррекции описываются множителями $\tau_m^0(\lambda)$ и a_0 . Известно, что по закону Рэлея $\tau_m^0 \approx \lambda^{-4}$. Спектральные свойства аэрозольного поглощения определяются микрофизикой аэрозоля, которая для пылевого аэрозоля зависит от источников пыли и от процессов ее трансформации в атмосфере. До настоящего момента оценка изменчивости спектральной зависимости a_0 не была проведена. В данной работе впервые предлагается оценить спектральный ход поглощающих свойств пылевого аэрозоля для случая переноса пыли над Черноморским регионом.

Экспериментальные закономерности ошибки атмосферной коррекции анализировались в [18]. Было показано, что наибольшая разница между спутниковыми и натурными измерениями коэффициента яркости моря регистрируется в случае наличия в атмосфере пылевого аэрозоля. Для отобранных 49 данных, полученных в дни пылевых переносов, был использован метод главных компонент с оценкой вклада первого вектора. В результате было показано, что 86 % дисперсии ошибки валидации *MODIS-Aqua* объясняются первым собственным вектором, который хорошо аппроксимируется степенным законом $\lambda^{-3,57 \pm 0,32}$. Тем самым подтвердилась достоверность аналитических оценок [18].

Целью данного исследования является оценка величины ошибки атмосферной коррекции спутниковых данных *MODIS-Aqua*, *MODIS-Terra*, *VIIRS-SNPP*, *VIIRS-JPSS*, *NASA HawkEye (SeaHawk)* и *OLCI-Sentinel-3A* за период 28–29 июля 2021 г., когда был зарегистрирован перенос пыли над Черноморским регионом.

Основной этап исследования состоит из анализа изменчивости оптических характеристик атмосферы в период с 28 по 29 июля 2021 г. над Черноморским регионом и доказательства (по спутниковым и модельным данным) того, что за исследуемый период над регионом регистрируется именно пылевой аэрозоль.

Второй этап посвящен оценке влияния поглощающего пылевого аэрозоля на величину ошибки атмосферной коррекции при вычислении спектрального коэффициента яркости за 28 и 29 июля 2021 г. Именно за эти даты было получено наибольшее количество различных спутниковых измерений, синхронизированных с натурными измерениями спектрального коэффициента яркости моря по данным сети *AERONET – Ocean Color (AERONET-OC)*. В данном исследовании проведен расчет величины ошибки валидации для *MODIS-Aqua/Terra*, *VIIRS-JPSS*, *Sentinel-3A* и *HawkEye (SeaHawk)*.

Приборы и материалы

В качестве источника натуральных измерений аэрозольной оптической толщины использовались фотометрические данные международной сети *AERONET (Aerosol RObotics NETwork)*. Для анализа данных о спектральном коэффициенте яркости моря использовались данные дополнения сети *AERONET-OC*, которое дает возможность измерения выходящего из-под воды излучения [29]. На данный момент две черноморские станции *Section_7* (29,45° в. д., 44,45° с. ш.) и *Galata_Platform* (28,19° в. д., 43,05° с. ш.) предоставляют информацию о цвете морской воды. В данной работе был проанализирован массив среднесуточных данных нормализованного излучения воды L_{WN} уровня 2 (более высокого качества). Массив данных уровня 1.5 отбирают с учетом облачности с использованием серии тестов качества, а массив данных уровня 2 состоит из полностью очищенных данных, полученных после калибровки и проверки программного обеспечения. В ходе исследований значения $L_{WN}(\lambda)$ были пересчитаны в значения $R_{rs}(\lambda)$ путем деления на солнечную постоянную $F_0(\lambda)$ [30].

Чтобы сопоставить спутниковые и натурные измерения за период 28–29 июля 2021 г. для корректировки неточностей, вызванных изменчивостью и аномалиями атмосферных параметров, были отобраны данные международной сети фотометров *AERONET*, находящиеся в свободном доступе на сайте <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>, и данные *MODIS-Aqua/Terra*, *VIIRS-SNPP/JPSS*, *HawkEye* и *OLCI*, находящиеся в свободном доступе на сайте <https://OceanColor.gsfc.nasa.gov>. Данные оптических характеристик *MODIS* – это результат комбинации измерений со спутников *Terra* и *Aqua*, информация с которых предоставляется в близком к реальному времени. При этом разрешение сенсора *MODIS* – 0,5°, разрешение снимков – 2 км, временное разрешение – точное.

Осложняющим фактором в исследовании является то, что длины волн, на которых предоставляются результаты измерений, полученные на станциях *AERONET-OC*, не полностью совпадают с каналами, измеряемыми спутниками, особенно в видимой области диапазона. Так, измерительные каналы *MODIS-Aqua/Terra* имеют длины волн 412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 667 и 678 нм; *VIIRS-JPSS* – длины волн 411, 445, 489, 556 и 667 нм. Для *HawkEye Rrs(λ)* измеряются на длинах волн 412, 488, 510, 556 и 670 нм. Проблема интерполяции величин коэффициента яркости, полученных на каналах фотометра *CIMEL-318*, в каналы спутника возникает вследствие сложной формы спектра поглощения морской воды. Рассеяние также влияет на форму $R_{rs}(\lambda)$. Однако соответствующие спектральные зависимости монотонные и более плавные, что позволяет применить полином второй степени при интерполяции. В спектре поглощения особое внимание уделяют поглощению чистой морской воды, так как она сильно влияет на изменчивость значений $R_{rs}(\lambda)$ в длинноволновой области спектра. Спектр поглощения чистой морской воды вносит наибольшие ошибки при интерполяции.

В данном исследовании был применен метод, заключающийся в умножении коэффициента яркости, полученного по натурным измерениям, на величину модельного поглощения морской воды:

$$a_w(\lambda_i) = a_{pw}(\lambda_i) + 0,1 \cdot C_y \cdot \exp[0,015 \cdot (400 - \lambda_i)], \quad (2)$$

где величина C_y оценивается по статистической связи с индексом цвета:

$$C_y = 2,3 \cdot CI(555 / 510)^{2,18}. \quad (3)$$

Выражение (3) получено на основе регрессионных зависимостей, приведенных в [31]. После умножения натурального спектрального коэффициента яркости моря на модельное поглощение применялась интерполяция полиномом второй степени в каналы спутника. Полученные значения затем делились на величину модельного поглощения на длинах волн спутника.

Для определения преимущественного типа аэрозоля за исследуемый период были проанализированы спутниковые данные *CALIPSO* – американо-французского исследовательского спутника, запущенного в рамках программы *NASA EOS (Earth Observing System)*, предназначенного для изучения облачного покрова Земли и вертикальной структуры атмосферного аэрозоля. Основным измерительным инструментом *CALIPSO* является трехканальный изображающий радиометр (8,65, 10,6 и 12,05 мкм). Типы аэрозолей определяют по величине интегрированного коэффициента обратного рассеяния и коэффициента деполяризации частиц. Типы аэрозолей, определяемые по расчетам алгоритмов *CALIPSO*: дым (от горения лесов), пыль, загрязненная пыль (смеси пыли и дыма), загрязненный континентальный и чистый континентальный аэрозоль [32]. Каждый тип аэрозоля характеризуется набором лидарных отношений на длинах волн 532 и 1064 нм [33].

Для получения информации об источнике дымового аэрозоля использовались результаты расчета обратных траекторий переноса воздушных масс, по-

лученные с помощью программного комплекса модели *HYSPLIT*. Анализ обратных траекторий позволяет отследить перемещение воздушных потоков на разных высотах и установить местоположение вероятных источников поступления примесей в атмосферу [34].

Результаты и обсуждение

В период с 28 по 29 июля 2021 г. по спутниковым данным над Черноморским регионом наблюдался интенсивный пылевой перенос со стороны Аравийского п-ова и Сахары. Как видно на спутниковых изображениях *VIIRS* в псевдоцветах, пылевой перенос регистрируется по обеим сторонам от области засветки, а значит, масштаб пылевого события более тысячи квадратных километров. На всех представленных спутниковых снимках также хорошо визуализируется область интенсивных пожаров на побережье Средиземного моря (территория Турции). Интенсивное поглощение, обусловленное присутствием дымового аэрозоля западнее о. Крит, подтверждается высокими значениями АОТ над восточной частью акватории Средиземного моря за 29.07.2021 (рис. 1). Следующим этапом подтверждения или опровержения события пылевого переноса над Черноморским регионом за исследуемый период был анализ обратных траекторий перемещения воздушных потоков по модели *HYSPLIT* [34] (рис. 1, *b, d*). Как видно из рис. 1, за все дни на высоте 3 км регистрируется пылевой перенос со стороны пустыни Сахара.

Т а б л и ц а 1

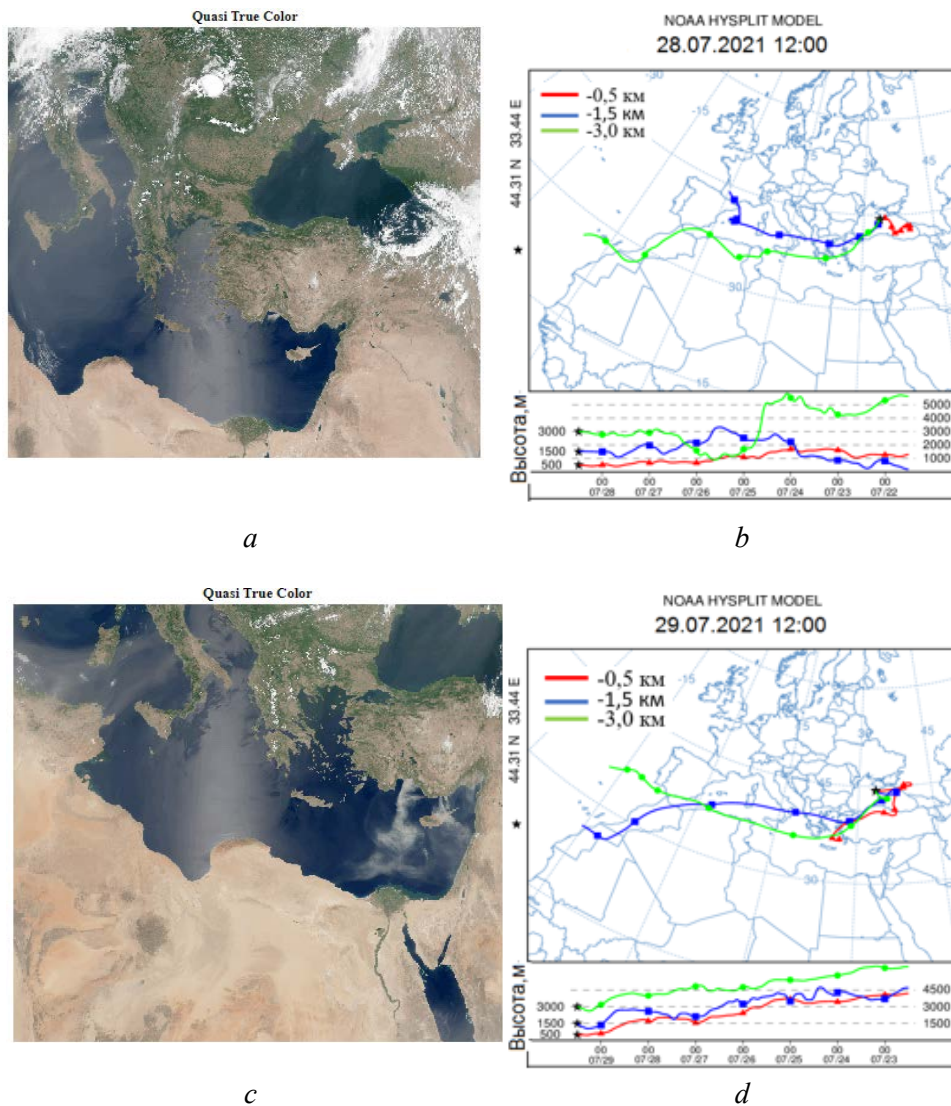
Table 1

Оптические характеристики атмосферного аэрозоля над станциями *AERONET-OC* в Черном море Optical characteristics of atmospheric aerosol over the *AERONET-OC* stations in the Black Sea

Параметры аэрозоля / Aerosol parameters	<i>Section-7 Platform</i>			<i>Galata Platform</i>		
	27.07.2021	28.07.2021	29.07.2021	27.07.2021	28.07.2021	29.07.2021
AOD 1020nm	0,1044	0,1594	0,15640	0,118754	0,153976	0,145702
AOD 865nm	0,1184	0,1774	0,17599	0,133570	0,169755	0,164323
AOD 779nm	0,1273	0,1888	0,18826	0,142891	0,179414	0,177168
AOD 667nm	0,1510	0,2150	0,21895	0,163671	0,200484	0,205612
AOD 620nm	0,1640	0,2299	0,23420	0,175332	0,211100	0,220486
AOD 560nm	0,1859	0,2543	0,26190	0,194556	0,230445	0,247066
AOD 510nm	0,2079	0,2793	0,29050	0,214621	0,251795	0,276285
AOD 490nm	0,2163	0,2880	0,30092	0,222911	0,259967	0,287855
AOD 443nm	0,2425	0,3173	0,33410	0,247029	0,284315	0,322171
AOD 412nm	0,2667	0,3432	0,36280	0,266241	0,303928	0,349083
AOD 400nm	0,2801	0,3569	0,37790	0,275084	0,313003	0,361403
$\alpha(440-870)$	1,1110	0,8871	0,98910	0,979185	0,782825	1,027634
$\alpha(440-675)$	1,1687	0,9532	1,06210	1,051961	0,867812	1,117899

В данной работе был проведен сравнительный анализ аэрозольных оптических характеристик на станциях *AERONET* (*Galata Platform* и *Section_7 Platform*)

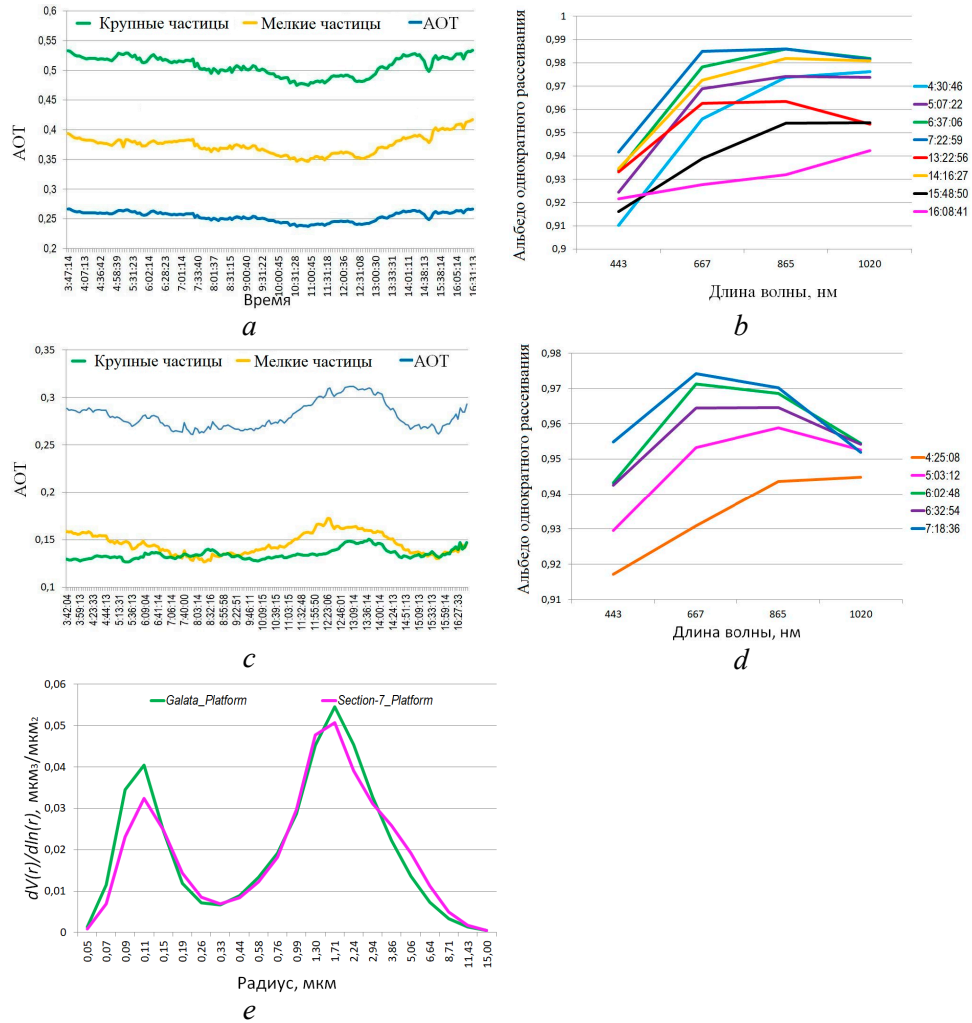
для случаев различной аэрозольной активности, а именно: за 28.07.2021 (день интенсивного пылевого переноса), 27.08.2021 (день до пылевого переноса при наличии фонового аэрозоля) и 29.08.2021 (последующий день после начала интенсивного пылевого переноса). Стоит отметить, что в июле 2021 г. над станциями *AERONET* часто наблюдалась облачность. Следовательно, изначально среднемесячные значения АОТ были завышенными, что характерно для летних месяцев [35] (табл. 1).



Р и с. 1. Спутниковые снимки *VIIRS-SNPP/JPSS* за 28.07.2021 (*a*) и 29.07.2021 (*c*) (источник: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), соответствующие им обратные траектории *HYSPLIT* (*b*, *d*) (источник: https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php)

F i g. 1. Satellite images of *VIIRS-SNPP/JPSS* from 07.28.2021 (*a*) and 07.29.2021 (*c*) (source: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), and corresponding *HYSPLIT* back trajectories (*b*, *d*) (source: https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php)

На обеих западных станциях *AERONET* Черноморского региона 28.07.2021 отмечалось большое количество (по сравнению с фоновыми значениями) крупнодисперсной фракции аэрозоля (более 2,5 мкм) и низкие ($SSA < 1$) значения показателя альbedo однократного рассеивания (SSA) (рис. 2). В целом 29.07.2021 наблюдалась аналогичная ситуация, не считая более высоких значений параметра Ангстрема.



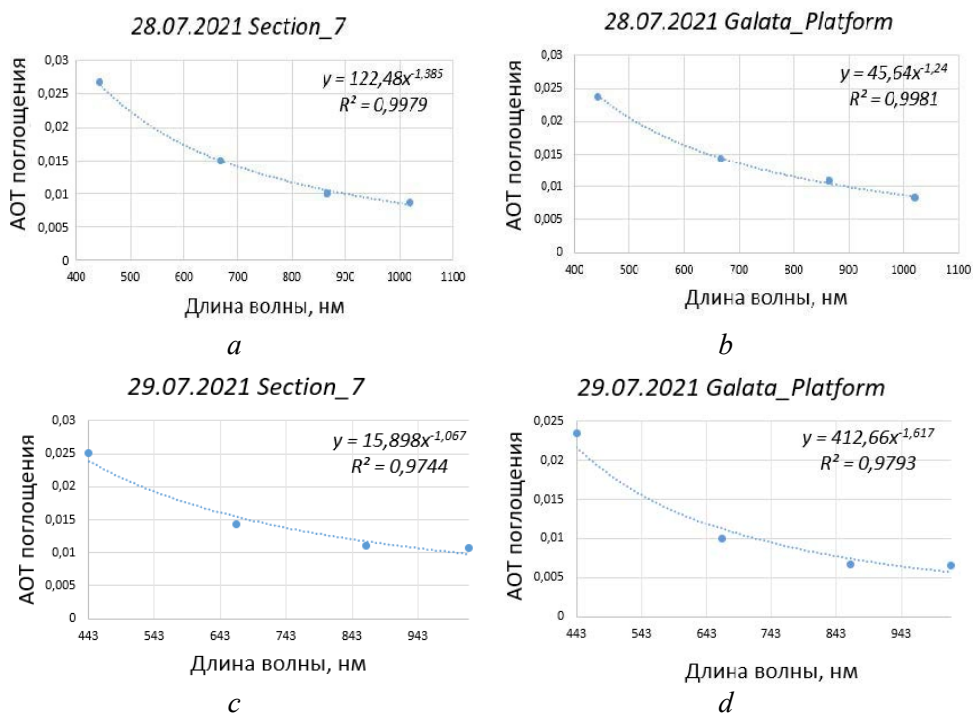
Р и с. 2. На станциях сети *AERONET* за 28.07.2021: вклад мелкодисперсных (менее 2,5 мкм) и крупнодисперсных частиц (2,5 мкм и более) в общее распределение AOT на *Galata_Platform* (a) и *Section_7* (c), альbedo однократного рассеивания на *Galata_Platform* (b) и *Section_7* (d), распределение частиц по размерам на двух станциях (e)

F i g. 2. At the *AERONET* network stations on 07.28.2021: contribution of fine (less than 2.5 μm) and coarse (2.5 μm and more) particles to the overall distribution of AOD at *Galata_Platform* (a) and *Section_7* (c), single scattering albedo at *Galata_Platform* (b) and *Section_7* (d), particle size distribution at two stations (e)

Для общей оценки поглощающих свойств пылевого аэрозоля впервые дана оценка оптической толщины аэрозольного поглощения:

$$a_0(\lambda) = (1 - \Lambda(\lambda))\tau_a^0(\lambda). \quad (4)$$

Следовательно, для синхронных пар измерений AOT и SSA на станциях AERONET был проанализирован среднечасовой ход степенной функции оптической толщины поглощения (рис. 3).



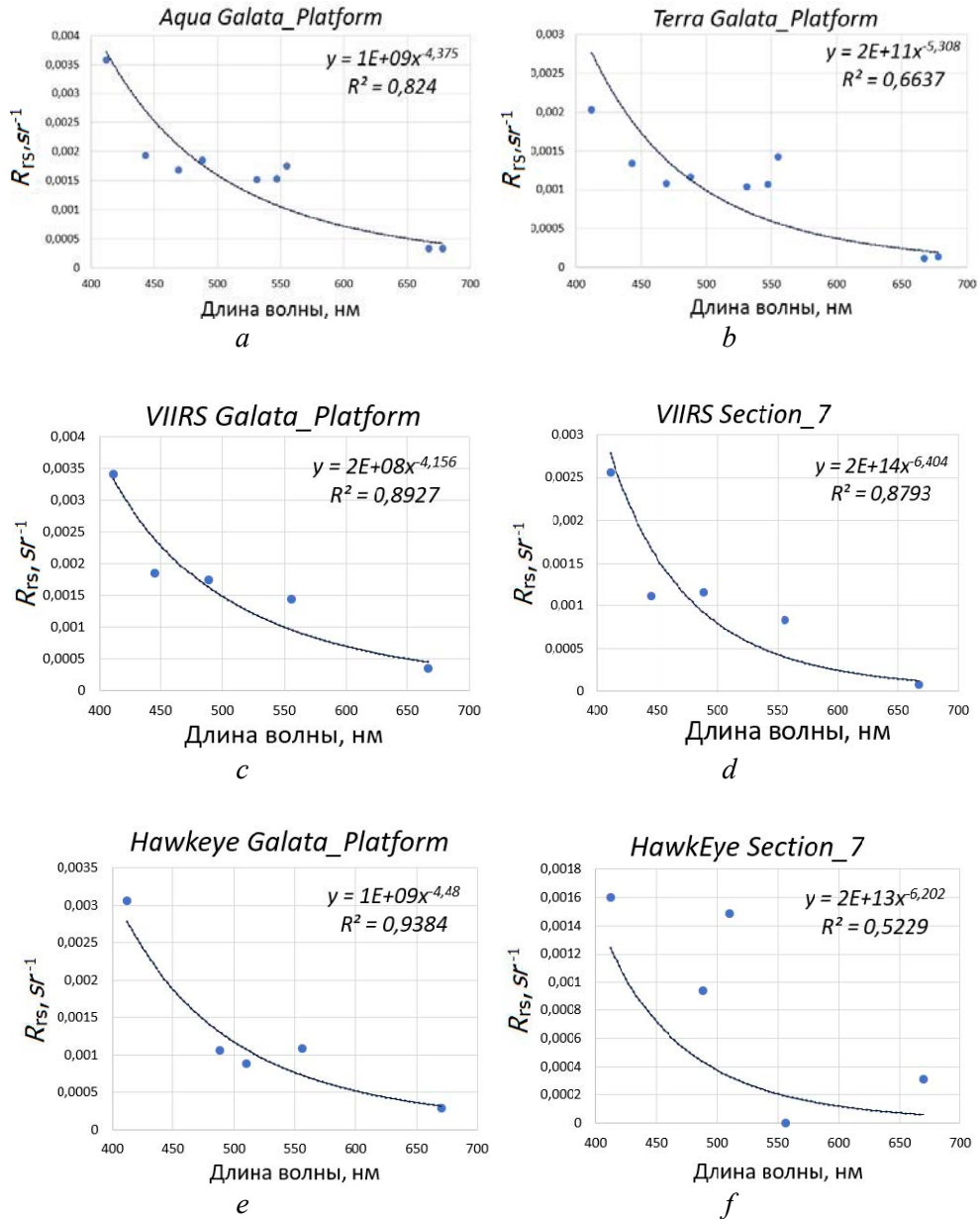
Р и с. 3. Ход степенной функции оптической толщины аэрозольного поглощения за 28.07.2021 на *Section_7* (a), *Galata_Platform* (b) и 29.07.2021 на *Section_7* (c), *Galata_Platform* (d)

F i g. 3. Mode of the power function of aerosol absorption optical depth at *Section_7* (a) and *Galata_Platform* (b) for 07.28.2021, and at *Section_7* (c) and *Galata_Platform* (d) for 07.29.2021

Из рис. 3 видно, что ход степенной функции близок к виду λ^{-1} . Следовательно, величина ошибки атмосферной коррекции зависит не только от множителя λ^{-4} , но и от поглощения света аэрозолем. В результате погрешность стандартной атмосферной коррекции будет более резко увеличиваться в сторону коротких длин волн. Следует отметить, что стандартная процедура атмосферной коррекции не в состоянии качественно оценить изменение спектральных свойств рассеяния аэрозолем под влиянием поглощения света в ближней ИК области вследствие малости данного эффекта в длинноволновой части спектра. По этой причине необходимо руководствоваться дополнительной информацией об оптических свойствах подстилающей поверхности в коротковолновой области. Таким образом, работа стандартных алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых данных в присутствии поглощающего пылевого

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 40 № 5 2024 775

аэрозоля требует проведения дополнительной региональной коррекции. В качестве функции интерполяции следует использовать произведение $a_0(\lambda) \cdot \lambda^{-4}$, причем коэффициент пропорциональности находится из условий, налагаемых на коэффициент яркости моря в коротковолновой области спектра.



Р и с. 4. Ошибки атмосферной коррекции и их аппроксимация степенной зависимостью за 28.07.2021

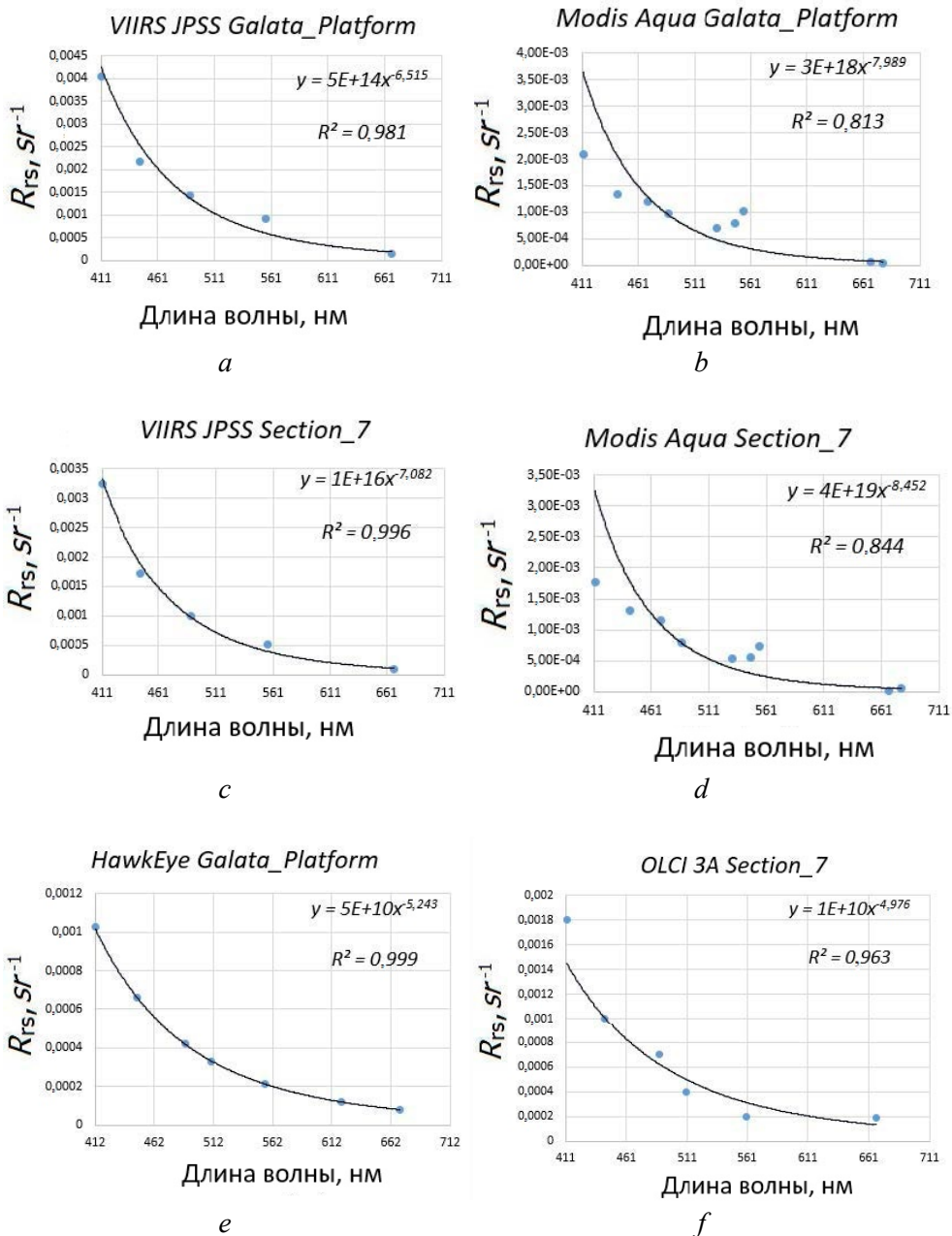
Fig. 4. Errors of atmospheric correction and their approximation by power dependence for 07.28.2021

Следующим этапом исследования является расчет ошибки атмосферной коррекции для спутников *MODIS-Aqua/Terra*, *VIIRS-SNPP/JPSS*, *HawkEye* и *Sentinel-3A* за исследуемые даты. Процедуру валидации спутниковых данных проводили аналогично процедуре валидации в базе *SeaBASS*: были отобраны синхронные пары измерений с наименьшей разницей по времени в радиусе 5 км от западных черноморских станций *AERONET-OC*. При помощи программного пакета *SeaDAS* аналогично исключались все пиксели, содержащие следующие флаги ошибок: *LAND* (земля), *STRAYLIGHT*, *HIGLINT*, *HILT*, *MODGLINT*, *ATMWAR* (засветка) и *NAVFAILE* (ошибки навигации) [36]. К сожалению, в дальнейшем анализе данные со спутника *VIIRS-SNPP* за 28.07.2021 были исключены из рассмотрения, так как все пиксели, находящиеся в радиусе 5 км от станций *AERONET-OC*, оказались в зоне спутниковой засветки. Синхронные натурные измерения $R_{rs}(\lambda)$ на западных черноморских станциях *AERONET-OC* в течение дня изменялись слабо, а именно: среднеквадратичное отклонение (СКО) составляло менее 10 % от величины, и это позволило использовать среднедневные значения. Результаты интерполяции, построенные по результатам измерений коэффициентов яркости спутниками *MODIS-Aqua*, *VIIRS-JPSS*, *Hawkeye* и *OLCI Sentinel-3A* за 28.07.2021, представлены на рис. 4.

Аналогично рассчитывалась ошибка атмосферной коррекции и для 29.07.2021, когда АОТ пылевого аэрозоля был выше, но параметр Ангстрема – ниже (рис. 5). К сожалению, данные *Modis-Terra* и *VIIRS-SNPP* имели сильные выбросы и после фильтрации флагов ошибок данных не осталось.

В результате аппроксимации ошибок атмосферной коррекции за 28.07.2021 были получены степенные зависимости, близкие к λ^{-5} . Это объясняется суммарным вкладом: 1) молекулярной составляющей (λ^{-4}) и 2) аэрозольного поглощения (λ^{-1}). Из рис. 4 следует, что ошибка атмосферной коррекции коэффициента яркости для станции *Galata Platform*, полученная по измерениям *VIIRS-JPSS* и *HawkEye*, близка к степенной зависимости $\lambda^{-4} - \lambda^{-5}$, а для станции *Section 7* она имеет более ярко выраженную степенную зависимость, а именно λ^{-7} . Ярko выраженный ход степенной функции наблюдается 29.07.2021, когда концентрация пылевого аэрозоля возрастает и его аэрозольное поглощение уже близко к λ^{-2} . Стоит отметить, что за 29.07.2021 по данным *MODIS-Aqua* найдены наибольшие ошибки атмосферной коррекции, функция интерполяции которых близка к виду λ^{-8} . Мы считаем, что это обусловлено заниженными данными измерений R_{rs} в длинноволновой области за этот день и, как следствие, большими погрешностями при стандартной аппроксимации степенным законом – методом логарифмирования с последующей линейной оптимизацией. При использовании нелинейной аппроксимации был получен ход степенной функции вида $\lambda^{-4} - \lambda^{-5}$, что также свидетельствует о больших ошибках в коротковолновой области спектра. Максимальные ошибки в синей области наблюдаются на рис. 4, *a, c*; 5, *a, c*.

Стоит отметить, что, несмотря на небольшой срок службы и малое количество репроцессингов и калибровок, новые спутники *HawkEye* и *Sentinel-3A* показывают более точные результаты. Возможно это связано с лучшим пространственным разрешением новых спутниковых инструментов.



Р и с. 5. Ошибки атмосферной коррекции по результатам измерений коэффициентов яркости спутниками *MODIS-Aqua*, *VIIRS-JPSS*, *Hawkeye* и *OLCI Sentinel-3A* за 29.07.2021 для черноморских станций *AERONET-OC*

F i g. 5. Errors of atmospheric correction based on the results of measurements of sea remote sensing reflectance by satellites *MODIS-Aqua*, *VIIRS-JPSS*, *Hawkeye* and *OLCI Sentinel-3A* for the Black Sea *AERONET-OC* stations for 07.29.2021

Анализ спутниковых данных *CALIPSO* о стратификации различных типов аэрозоля за 28 и 29 июля 2021 г. подтвердил наличие частиц пыли в приземном

атмосферном столбе высотой до 5 км над территорией Черного моря. Загрязненная пыль и дымовой аэрозоль, помимо пылевого аэрозоля, были зарегистрированы 29.07.2021, что также подтверждает пространственное распределение дыма, который визуализируется на рис. 1, с, в направлении Черноморского региона.

Заключение

В результате аппроксимации ошибок атмосферной коррекции спутниковых данных за 28.07.2021 были получены степенные зависимости, близкие к λ^{-5} . Это объясняется суммарным вкладом молекулярной составляющей (λ^{-4}) и аэрозольного поглощения (λ^{-1}). За 29.07.2021 наблюдается ярко выраженный ход степенной функции, так как концентрация пылевого аэрозоля в этот день возрастает, а вклад аэрозольного поглощения становится близок к степенной зависимости λ^{-2} . Также за 29.07.2021 над исследуемым регионом по спутниковым данным CALIPSO было показано присутствие не только пылевого, но и дымового аэрозоля. По данным моделирования обратных траекторий воздушных потоков HYSPLIT показано, что аэрозольные массы в этот день двигались в направлении Черного моря со стороны юго-запада (о. Крит), что дополнительно подтверждается высокими значениями АОТ над восточной частью акватории Средиземного моря за 29.07.2021. Предполагается, что комбинация двух поглощающих типов аэрозолей вызвала еще большие неточности определения спектрального коэффициента яркости моря за исследуемый период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Bodele depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest / I. Koren [et al.] // Environmental Research Letters. 2006. Vol. 1, no. 1. 014005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/1/1/014005>
2. Kubilay N., Cokacar T., Oguz T. Optical properties of mineral dust outbreaks over the north-eastern Mediterranean // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2003. Vol. 108, iss. D21. 4666. <https://doi.org/10.1029/2003JD003798>
3. Оптические свойства черноморского аэрозоля и верхнего слоя морской воды по данным прямых и спутниковых измерений / В. В. Суслин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 1. С. 20–32. EDN VTPCYX. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-1-20-32>
4. Суслин В. В., Чурилова Т. Я. Упрощенный метод расчета спектрального диффузного коэффициента ослабления света в верхнем слое Черного моря на основе спутниковых данных // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь, 2010. Вып. 22. С. 47–60. EDN WTBHRN.
5. Восстановление полного комплекса оптических характеристик для оценки теплосодержания в южной части Баренцева моря в июне 2021 г. / Д. И. Глуховец [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 214–225. EDN PUJNH. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-214-225>
6. 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. № 6. С. 24–30. EDN JVVGXQ.
7. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. / О. В. Копелевич [и др.]. М. : ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. 140 с. EDN YOSZPV.
8. Проявление особенностей оптических свойств атмосферного аэрозоля над Черным морем при интерпретации данных спутникового прибора SeaWiFS / В. С. Суетин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 1. С. 69–79. EDN YXQYNV.

9. Суетин В. С., Королев С. Н. Использование спутниковых данных для определения характеристик поглощения света в водах Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 2. С. 222–232. EDN YDISMQ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-222-232>
10. Localization of aerosol sources in East-European region by back-trajectory statistics / V. Kabashnikov [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 2014. Vol. 35, iss. 19. P. 6993–7006. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.960621>
11. AERONET-OC: A network for the validation of Ocean Color primary products / G. Zibordi [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2009. Vol. 26, iss. 8. P. 1634–1651. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHO654.1>
12. Калинин Д. В., Суслин В. В. Простой метод определения источников приземного аэрозоля на основе результатов анализа обратных траекторий // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2015. Т. 8, № 1. С. 59–67. EDN TPPRCB.
13. 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, iss. 8. 1890. <https://doi.org/10.3390/rs14081890>
14. Wang M., Son S., Harding Jr. L. W. Retrieval of diffuse attenuation coefficient in the Chesapeake Bay and turbid ocean regions for satellite ocean color applications // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2009. Vol. 114, iss. C10. C10011. <https://doi.org/10.1029/2009JC005286>
15. Schollaert S. E., Yoder J. A., O'Reilly J. E., Westpha D. L. 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, iss. C6. 3191. <https://doi.org/10.1029/2000JC000555>
16. Суетин В. С., Королев С. Н., Кучерявый А. А. Использование спутниковых наблюдений для определения спектральных зависимостей оптических характеристик вод Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 3. С. 77–86. EDN TEWSCT.
17. Калинин Д. В., Панкова А. С. Изменчивость коэффициента яркости в условиях пылевого переноса по данным спутника Sentinel-3 на примере Черного моря и Севастополя // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 3. С. 399–415. EDN MJXKNT. <https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-3-399-415>
18. Шибанов Е. Б., Панкова А. С. Особенности работы алгоритмов атмосферной коррекции Ocean Color при расчете спектрального коэффициента яркости моря для различных состояний атмосферы // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19, № 6. С. 9–17. EDN WWSIWZ. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-6-9-17>
19. Satellite remote sensing of aerosol optical depth: advances, challenges, and perspectives / X. Wei [et al.] // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2020. Vol. 50, iss. 16. P. 1640–1725. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1665944>
20. New methods for improving the remote sensing estimation of soil organic matter content (SOMC) in the Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve (ELWNNR) in northwest China / X. Wang [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 218. P. 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.020>
21. Gordon H. R. Evolution of Ocean Color atmospheric correction: 1970–2005 // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, iss. 24. 5051. <https://doi.org/10.3390/rs13245051>
22. Moulin S., Launay M., Guérif M. The crop growth monitoring at a regional scale based on the combination of remote sensing and process-based models // *Crop monitoring and prediction at regional scales*. Tsukuba, Japan, 2001. P. 187–195.
23. 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, iss. 4. 831. <https://doi.org/10.3390/rs14040831>
24. Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Т. 3, № 2. С. 99–105. EDN NDPPHL.

25. *Remer L. A., Kahn R. A., Koren I.* Aerosol indirect effects from satellite: Skeptics vs. Optimists // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. Vol. 73, iss. 13, supplement. A1088. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.014>
26. Оптические свойства черноморского аэрозоля и верхнего слоя морской воды по данным прямых и спутниковых измерений / В. В. Суслин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 20–32. EDN ВТРСУХ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-1-20-32>
27. *Gordon H. R., Wang M.* Influence of oceanic whitecaps on atmospheric correction of ocean-color sensors // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, iss. 33. P. 7754–7763. <https://doi.org/10.1364/AO.33.007754>
28. Trends in MODIS and AERONET derived aerosol optical thickness over Northern Europe / P. Glantz [et al.] // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2019. Vol. 71, iss. 1. 1445379. <https://doi.org/10.1080/16000889.2018.1554414>
29. In situ autonomous optical radiometry measurements for satellite ocean color validation in the Western Black Sea / G. Zibordi [et al.] // *Ocean Science*. 2015. Vol. 11, iss. 2. P. 275–286. <https://doi.org/10.5194/os-11-275-2015>
30. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the Atlas and Eureca missions / G. Thuillier [et al.] // *Solar Physics*. 2003. Vol. 214. P. 1–22. <https://doi.org/10.1023/A:1024048429145>
31. Концентрация пигментов фитопланктона в северо-западной части Черного моря по данным измерений спутниковым цветовым сканером SZCZ / В. С. Суевин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2000. № 2. С. 74–82.
32. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm / A. H. Omar [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2009. Vol. 26, iss. 10. P. 1994–2014. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1231.1>
33. *Omar A. H., Tackett J., Al-Dousari A.* CALIPSO observations of sand and dust storms and comparisons of source types near Kuwait City // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, iss. 12. 1946. <https://doi.org/10.3390/atmos13121946>
34. NOAA’s HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system / A. F. Stein [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. Vol. 96, iss. 12. P. 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
35. Сезонная и межгодовая изменчивость оптических характеристик атмосферы над Черным морем в районе Севастополя в период 2006–2008 года / Д. В. Яковлева [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2009. Вып. 18. С. 205–212. EDN УМІЈМТ.
36. *Werdell P. J., Bailey S. W.* The SeaWiFS bio-optical archive and storage system (SeaBASS): current architecture and implementation. Greenbelt, MD, USA : Goddard Space Flight Center, 2002. 45 p. (NASA/TM 2002–211617).

Об авторах:

Папкова Анна Станиславовна, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 1683-7685, Scopus Author ID: 57203015832**, hanna.papkova@gmail.com

Шибанов Евгений Борисович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 9906-9983, Scopus Author ID: 6507075380, WoS ResearcherID: ABB-9097-2021**, e-shibanov@mail.ru

Калинская Дарья Владимировна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 2622-1010, Scopus Author ID: 56380591500**, kalinskaya@mhi-ras.ru