

Научная статья

УДК 504.3.054
EDN: VRHCCI

Оценка погрешности спутниковых измерений оптических характеристик атмосферы и спектрального коэффициента яркости вод Японского моря за весенний период 2023 года

Д. В. Калининская ✉, А. С. Папкова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия✉ *kalinskaya_d_v@mail.ru*Поступила в редакцию 18.07.2025; одобрена после рецензирования 16.09.2025;
принята к публикации 10.11.2025.

Аннотация

Цель. Оценка погрешности спутниковых измерений оптических характеристик атмосферы и спектрального коэффициента яркости вод Японского моря при наличии в атмосфере пылевого аэрозоля – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Для сравнительного анализа и оценки погрешности спутниковых измерений оптических характеристик атмосферы и спектрального коэффициента яркости были использованы: фотометрические данные измерений со станций международной сети аэрозольного мониторинга *AERONET*, спектрорадиометра *MODIS/Aqua*, радиометра *VIIRS* со спутника *Suomi NPP*; данные *NOAA-20* и *NOAA-21* о концентрации взвешенных частиц *PM2.5* и *PM10*, полученные по результатам моделирования динамики атмосферы (данные моделей *HYSPLIT* и *SILAM*). Сравнительный анализ спутниковых и натуральных данных позволил выявить даты аномального пылевого воздействия на определяемые дистанционно оптические характеристики воды. Также за один и тот же день были получены различные оценки области, покрытой полностью и частично пылью. Это подтверждает различную аэрозольную загрузку в атмосфере над Японским морем и пространственную изменчивость основных оптических характеристик аэрозоля при регистрации пылевого переноса со стороны азиатских пустынь.

Выводы. В результате сравнительного анализа спутниковых и фотометрических натуральных данных подтверждено, что погрешность стандартной атмосферной коррекции резко увеличивается в ультрафиолетовой области спектра при наличии пылевых переносов. Расчет и аппроксимация полученных значений степенной функции показали, что для всего региона Японского моря ошибка атмосферной коррекции имеет вид λ^{-7} . Аналитическая оценка погрешности спутниковых измерений *VIIRS/NOAA* спектрального коэффициента яркости моря для данного пылевого эпизода в коротковолновой области спектра приблизительно равна 70 %, в видимой области спектра – до 47 %, в длинноволновой области – 24 % относительно натуральных значений данной характеристики.

Ключевые слова: *AERONET*, Японское море, пылевой аэрозоль, оптические характеристики, спектральный коэффициент яркости моря, атмосферная коррекция спектрального коэффициента яркости моря

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ 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». Авторы выражают признательность С. М. Сакерину и Д. М. Кабанову за предоставление фотометра *SPM* и программного обеспечения к нему. 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 и расчеты данных ВТА.

Для цитирования: Калинин Д. В., Папкова А. С. Оценка погрешности спутниковых измерений оптических характеристик атмосферы и спектрального коэффициента яркости вод Японского моря за весенний период 2023 года // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 1. С. 144–161. EDN VRHCCI.

Original article

Assessment of the Error in Satellite Measurements of Atmosphere Optical Characteristics and Remote Sensing Reflectance of the Sea of Japan for Spring Period, 2023

D. V. Kalinskaya ✉, A. S. Papkova

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
✉ kalinskaya_d_v@mail.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to assess the errors in satellite measurements of the atmosphere optical characteristics and the remote sensing reflectance of the Sea of Japan in the presence of dust aerosol in the atmosphere.

Methods and Results. To perform a comparative analysis and to assess the error in satellite measurements of the atmosphere optical characteristics and the remote sensing reflectance, the following information was used: photometric measurement data from the *AERONET* international aerosol monitoring network, the *MODIS/Aqua* spectroradiometer, and the *VIIRS* radiometer at the *Suomi NPP* satellite; the *NOAA-20* and *NOAA-21* data on the concentration of suspended particles *PM2.5* and *PM10* resulted from modeling the atmospheric dynamics (data of the *HYSPLIT* and *SILAM* models). A comparative analysis of satellite and *in situ* data made it possible to identify the dates of anomalous dust impact on the remotely determined optical characteristics of water. Besides, on one and the same day, different estimates were obtained for the area completely and partially covered with dust. Record of dust transport from the Asian deserts confirms different aerosol loading in the atmosphere over the Sea of Japan, as well as the spatial variability of aerosol main optical characteristics.

Conclusions. Comparative analysis of satellite and photometric *in situ* data has supported the fact that in the presence of dust transfer, the error of standard atmospheric correction increases sharply in the spectrum UV part. Calculation and approximation of the obtained values of power function show that for the entire region of the Sea of Japan, the value of atmospheric correction error is of the λ^{-7} form. As for the given dust episode, the analytically assessed error in the *VIIRS/NOAA* satellite measurements of the sea remote sensing reflectance constitutes approximately 70 % in the spectrum shortwave part, up to 47 % – in the spectrum visible part, and 24 % – in the long-wave spectrum part relative to the *in situ*-measured values of this characteristic.

Keywords: *AERONET*, Sea of Japan, dust aerosol, optical characteristics, remote sensing reflectance, atmospheric correction of remote sensing reflectance

Acknowledgements: The study was carried within the framework of theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0012 “Analysis, nowcast and forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine water areas based on mathematical modeling using the data of remote and contact measurement methods”. The author is grateful to S. M. Sakerin and D. M. Kabanov for providing the *SPM* photometer and its software, as well as to Tom Kucsera, Brent Holben, Giuseppe

Zibordi and the group of Gene Feldman (NASA) for providing the AOT data, and calculating the BTA data.

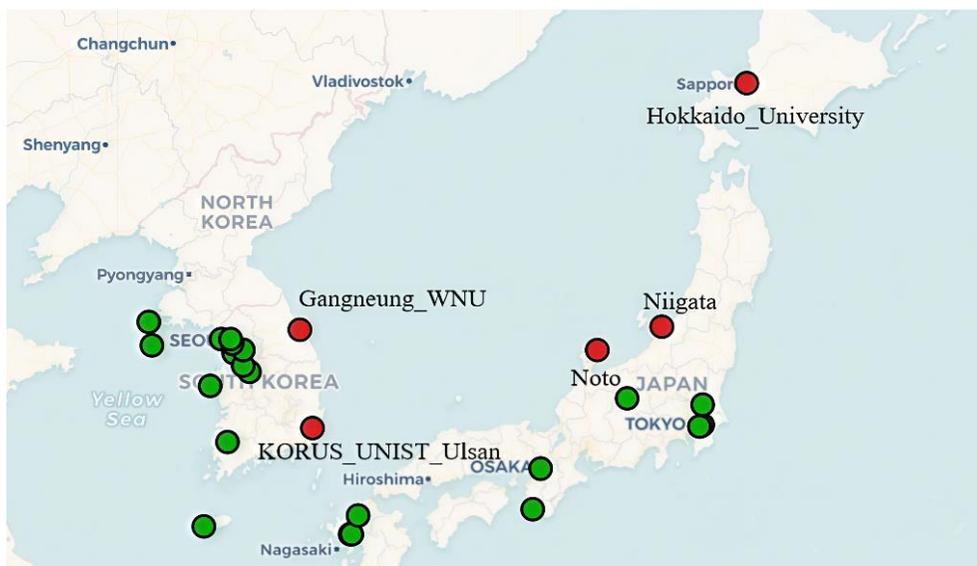
For citation: Kalinskaya, D.V. and Papkova, A.S., 2026. Assessment of the Error in Satellite Measurements of Atmosphere Optical Characteristics and Remote Sensing Reflectance of the Sea of Japan for Spring Period, 2023. *Physical Oceanography*, 33(1), pp. 185-200.

Введение

По данным, представленным в интернете и прессе, с 10.03.2023 сильные пылевые бури из пустыни Гоби накрывали Восточную Азию как минимум четыре раза за весенний период указанного года. Одно из таких событий выносов пыли, сопровождающееся сильными ветрами, было зарегистрировано 8–13 апреля 2023 г. В этот период в результате влияния активного циклона в Монголии, возникшего из-за образовавшейся южнее высотной фронтальной зоны, произошел интенсивный вынос пылепесчаной фракции, который затронул большую часть бассейна р. Янцзы в Китае, Корейский п-ов, Японию и другие районы. Облако пыли переместилось в направлении Китая и Южной Кореи 11 апреля, что подтверждалось аномально высокими значениями индексов качества воздуха, которые соответствовали чрезвычайно вредному для здоровья уровню взвешенных частиц (*PM10* и *PM2.5*). Далее пыльная буря была отмечена в японском городе Фукуока утром 12 апреля. По данным Регионального специализированного метеорологического центра Всемирной метеорологической организации пылепесчаных бурь *Air Self-Defense Force (ASDF)*, максимальная концентрация частиц *PM10* превысила 2000 мкг/м^3 во многих частях Северного Китая, при этом в Пекине она достигла 1500 мкг/м^3 (<https://meteoinfo.ru/novosti/99-pogoda-v-mire/19174-pylnaya-burya-v-azii>). Массивное облако пыли было зарегистрировано по спутниковым данным в атмосфере в направлении о. Хоккайдо, а также о. Сахалин. Желто-коричневая пыль также была зарегистрирована над Курильскими о-вами.

Стоит отметить, что ранее уже был проведен ряд исследований, где рассматривалось влияние пылевого аэрозоля на экосистему данного региона [1–4], тем не менее аналитическая оценка этого влияния на ошибку атмосферной коррекции не была дана. Частое появление большого количества поглощающего пылевого аэрозоля над морской поверхностью существенно осложняет спутниковые измерения спектрального цвета моря в исследуемом регионе, что делает поставленную задачу актуальной для исследования [5, 6]. Изучением акватории Японского моря с применением спутниковых и натурных (судовых) измерений его оптических характеристик активно занимаются российские ученые из Тихоокеанского океанологического института имени В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения РАН. В исследованиях [7–10], в которых представлен ряд квазианалитических биооптических региональных алгоритмов, с использованием многолетнего анализа судовых измерений отмечается, что в начале весеннего периода максимальные значения концентрации хлорофилла *a* наблюдаются в поверхностном слое. В работе [9] говорится о возникновении существенных ошибок при наличии поглощающего аэрозоля в атмосфере. Завышение спутниковых оценок концентрации хлорофилла *a* после поступления аэрозольного вещества в поверхностный слой Японского моря в весенний период описано в [10].

В качестве натуральных измерений для параметров атмосферы использовались данные со станций международной сети аэрозольного мониторинга *AERONET* (*level 1.5* и *level 2*) [11]. В апреле 2023 г. вблизи побережья Японского моря функционировали станции *AERONET*, показанные на рис. 1. Для комплексной оценки воздействия пылевого аэрозоля на воды Японского моря были отобраны спутниковые данные с наивысшим уровнем качества *level 2*, так как только по ним можно провести качественную коррекцию (отбраковку пикселей) влияния облачности. Для сопоставления спутниковых и натуральных измерений были выбраны данные *MODIS/Aqua* [12], *VIIRS* [13, 14] и *AERONET*. В итоге для оценки пылевых переносов над Японским морем за исследуемый период в данной работе приводится анализ оптических характеристик следующих станций *AERONET*: *Gangneung_WNU* (37,8° с. ш., 128,9° в. д.) [*Gangneung, Korea*], *KORUS_UNIST_Ulsan* (35,6° с. ш., 129,2° в. д.) [*Ulsan, Korea*], *Noto* (37,3° с. ш., 137,1° в. д.) [*Noto, Japan*], *Niigata* (37,8° с. ш., 138,9° в. д.) [*Niigata, Japan*], *Hokkaido_University* (43,1° с. ш., 141,3° в. д.) [*Sapporo, Japan*]. Для наглядности станции *AERONET* с уровнем обработки данных *level 2* на рис. 1 выделены красным цветом.



Р и с. 1. Станции *AERONET* в регионе Японского моря, апрель 2023 г. (URL: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)

F i g. 1. *AERONET* stations map for the Sea of Japan region, April 2023. (URL: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)

Целью данной работы является оценка погрешности спутниковых измерений оптических характеристик атмосферы и спектрального коэффициента яркости вод Японского моря при наличии в атмосфере пылевого аэрозоля.

Методы исследования и приборы

В работе использованы следующие типы данных: фотометрические измерения со станций международной сети *AERONET*, спектрорадиометра

MODIS/Aqua, радиометра *VIIRS/Suomi NPP*, *NOAA-20* и *NOAA-21* [15, 16]; данные кинематических моделей *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)* и *System for Integrated Modeling of Atmospheric Composition (SILAM)*. Взвешенные частицы относятся к загрязнителям атмосферы, которые чаще всего анализируют по массовым концентрациям.

В работе [17] показан расчет ошибки (r) стандартной атмосферной коррекции спутниковых данных, возникающей в результате неоднородного распределения аэрозоля (стратификации) при слабом поглощении света. Важно отметить, что спектральные свойства аэрозольного поглощения напрямую связаны с его микрофизикой, которая, в свою очередь, зависит от источников пыли и атмосферных процессов.

Для расчета аэрозольной оптической толщины (АОТ) в настоящем исследовании используются измерения фотометра *CIMEL* в спектральном диапазоне 340–1020 нм. Важно отметить, что канал на 936 нм не задействован в расчете АОТ, а служит для определения содержания водяного пара в атмосфере [11, 18].

В качестве источника спутниковых данных выступает набор радиометров *VIIRS* в составе системы *Joint Polar Satellite System (JPSS)*. *VIIRS* предоставляет аэрозольные продукты *Deep Blue NASA Standard Level-2 (L2)*, включая ежедневные спутниковые измерения АОТ и аэрозольных характеристик над сушей и океаном с 6-минутным шагом. Для получения значений АОТ с 17 февраля 2018 г. применяется алгоритм *VIIRS Deep Blue Aerosol* [16]. Результатом его работы является массив данных *L2DeepBlue*, содержащий информацию о 55 слоях и являющийся эталонным на длине волны 550 нм [14–16]. Применение этого алгоритма позволяет идентифицировать тип атмосферного аэрозоля в дневные часы при отсутствии облачности и снега.

Программный комплекс *SILAM*, разработанный Финским метеорологическим институтом, является современным инструментом моделирования атмосферных загрязнений. Он успешно применяется для анализа влияния лесных пожаров, вулканических извержений, переноса пыли и других природных и антропогенных катастроф на состояние атмосферы в целом. В основе расчетов лежит комбинированная модель Лагранжа – Эйлера, позволяющая моделировать рассеивание различных загрязняющих веществ, включая аэрозоли, газы, пыль, радионуклиды и аллергены. *SILAM* генерирует карты концентраций мелкодисперсных (*PM_{2.5}*) и крупнодисперсных (*PM₁₀*) частиц на высоте от 10 м над поверхностью земли, эффективно визуализируя глобальные загрязнения. Диапазон измерений для *PM_{2.5}* и *PM₁₀* составляет 0–2500 мкг/м³ [19–22]. Качество воздуха по модели *SILAM* предоставляется по параметрам *TVOC* и *AQI*.

Параметр *TVOC* позволяет анализировать воздух на наличие в нем летучих органических соединений, в том числе бензола и стирола. Диапазон измерений *TVOC* находится в пределах 0–2,5 мг/м³ [19, 23, 24].

Индекс качества воздуха (*AQI*) – интегрированный показатель, характеризующий общее состояние атмосферного воздуха. Он представляет собой кусочно-линейную функцию концентраций диоксида серы (*SO₂*), диоксида азота (*NO₂*), *PM₁₀*, *PM_{2.5}*, угарного газа (*CO*) и озона (*O₃*). Национальные стандарты качества воздуха для каждого из этих загрязнителей установлены Агентством

США по охране окружающей среды (EPA). Расчет *AQI* базируется на соотношении измеренной усредненной концентрации загрязнителя и его нормативного (допустимого) уровня [19–21].

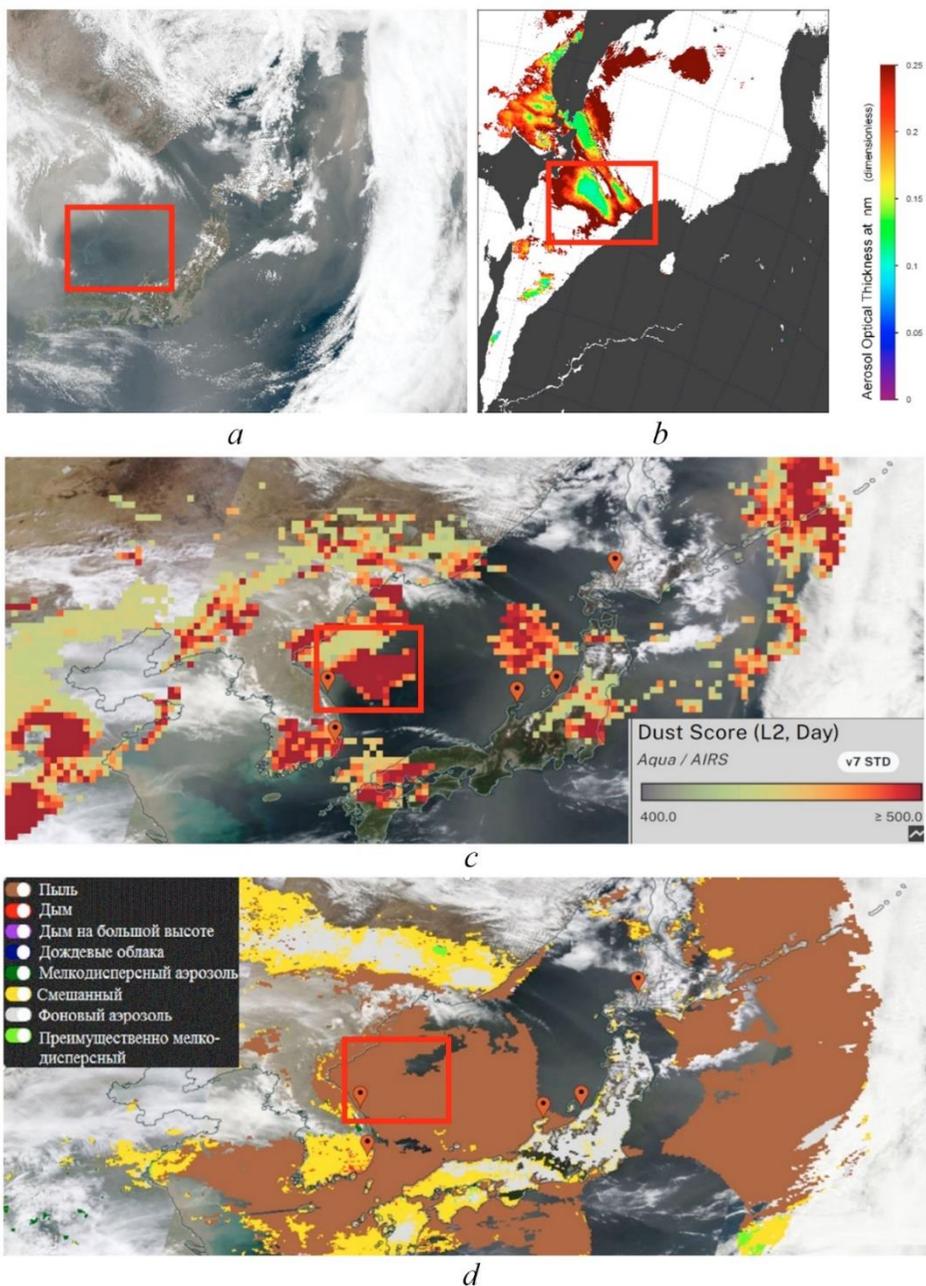
Для нахождения источников различных типов аэрозолей над Японским морем в данной работе используется программный комплекс моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков *HYSPLIT*¹.

Результаты

Для определения оптических характеристик пылевого аэрозоля над Японским морем за апрель 2023 г. использовались спутниковые инструменты *VIIRS/NOAA* с разрешением 750 м и *MODIS/Aqua* с разрешением 1 км. На рис. 2, *a* представлено спутниковое изображение с *VIIRS/NOAA*, полученное 13 апреля, где красной рамкой выделена область анализа эффектов влияния поглощения вследствие присутствия в атмосфере пылевого аэрозоля. На рисунке между пылевыми облаками визуализируется область с более чистой относительно покрытой пылью атмосферой. Благодаря одинаковым условиям наблюдения было принято решение сравнить «чистую» часть изображения (при доминировании фонового аэрозоля в атмосфере) и пыль, которая находится на периферии выделенной рамкой области. Видно, что облачность не перекрывает выделенную область, что позволяет оценить именно влияние пылевого аэрозоля на восстановление коэффициентов яркости воды ($Rrs(\lambda)$, где λ – длина волны, нм). Статистический анализ данных АОТ, параметра Ангстрема (α) и спектрального коэффициента яркости моря проводился с использованием программы *SeaDAS* (рис. 2, *b*). На рис. 2, *c, d* представлен результат обработки спутниковых данных по алгоритму *MODIS/AIRS*, который показывает загрузку пылевым аэрозолем, и по алгоритму *VIIRS Deep Blue* для определения типа атмосферного аэрозоля над выделенной областью; маркерами показано расположение станций *AERONET*. По представленным данным видно, что 13 апреля пылевой шлейф накрыл несколько сотен километров суши и моря.

Для выделенной области по спутниковым данным были получены следующие оптические характеристики на длине волны 870: $AOT = 0,110 \pm 0,009$, $\alpha = 1,046 \pm 0,075$ для умеренно «чистой» атмосферы с доминированием фонового аэрозоля, $AOT = 0,34 \pm 0,034$, $\alpha = 0,587 \pm 0,04$ – для атмосферы, загрязненной пылевым аэрозолем. По данным станций *AERONET* от 13 апреля, среднее значение $AOT(870 \text{ нм})$ изменялось от $0,22 \pm 0,02$ (ст. *Hokkaido_University*) до $0,44 \pm 0,03$ (ст. *Gangneung_WNU* и *KORUS_UNIST_Ulsan*). Натурные данные ближайших к пылевому выносу станций *AERONET* показали изменчивость значений α от 0,118 до 0,555. Диапазоны значений AOT и α доказывают преимущество крупнодисперсных частиц пылевого аэрозоля в атмосфере над исследуемым регионом [17, 22, 25].

¹ *Draxler R. R., Rolph G. D.* HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model access via NOAA ARL READY Website. Silver Spring, MD : NOAA Air Resources Laboratory, 2013.



Р и с. 2. Спутниковое изображение от 13 апреля: область исследования по данным VIIRS/NOAA (a); распределение AOT по данным SeaDAS (b); распределение пыли по алгоритму MODIS/AIRS (c); различные типы аэрозоля по данным VIIRS Deep Blue (d) (URL: https://doi.org/10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20.002)

F i g. 2. Satellite image for April 13, 2023: study area from the VIIRS/NOAA data (a); AOD distribution based on the SeaDAS data (b); dust distribution from the MODIS/AIRS algorithm (c); different types of aerosol from the VIIRS Deep Blue data (d) (URL: https://doi.org/10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20.002)

В табл. 1 приведены средние значения спектрального коэффициента яркости и его среднеквадратического отклонения (СКО) для исследуемого региона по данным VIIRS/NOAA. Из представленных данных видно, что среднеквадратические отклонения значений $Rrs(\lambda)$ для «чистой» области с фоновым аэрозолем минимальны во всем диапазоне спектра, в то время как для пыли в коротковолновой области спектра они в три раза выше. Тем не менее СКО не превышает 25 % от $Rrs(\lambda)$ даже для пыли, и это позволяет в дальнейшем рассматривать средние значения коэффициентов спектральной яркости при анализе ошибок атмосферной коррекции. Для пыли результаты вычисления представлены за два периода, 12–13 и 21–22 апреля.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

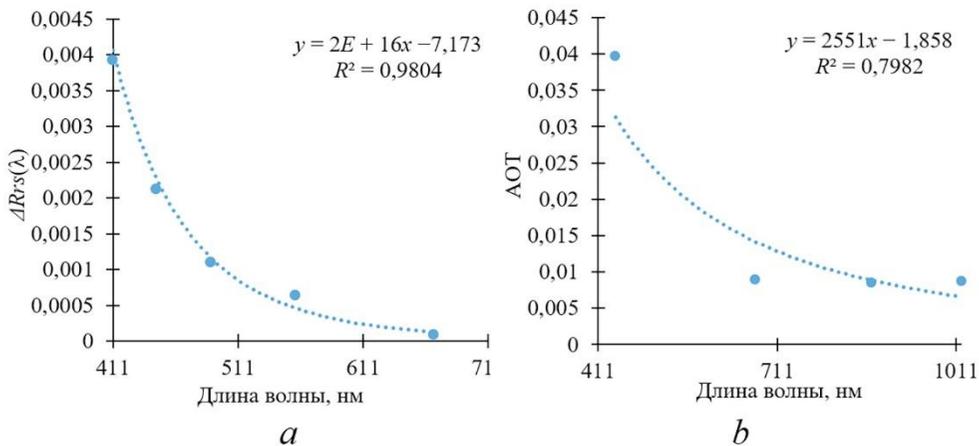
Спектральный коэффициент яркости для акватории Японского моря на разных длинах волн (нм) с учетом СКО по данным VIIRS/NOAA за 13 апреля 2023 г.
Remote sensing reflectance for the Sea of Japan at different wavelengths (nm) allowing for standard deviation, based on the VIIRS/NOAA data for April 13, 2023

Тип аэрозоля / Type of aerosol	$Rrs(\lambda) \pm \text{СКО} / Rrs(\lambda) \pm \text{standard deviation}$				
	411	445	489	556	667
Фоновый / Background	0,0016 $\pm 0,0002$	0,00235 $\pm 0,0002$	0,0028 $\pm 0,0002$	0,0022 $\pm 0,0001$	0,00054 $\pm 0,0001$
Пыль / Dust	-0,0023 $\pm 0,0006$	0,00022 $\pm 0,0004$	0,0017 $\pm 0,0003$	0,0015 $\pm 0,0001$	0,00043 $\pm 0,0001$

При таком расчете и аппроксимации полученных значений степенной функцией для всего региона Японского моря была получена ошибка атмосферной коррекции вида λ^{-7} (рис. 3). Ошибка атмосферной коррекции ($\Delta Rrs(\lambda)$) равна разности значений $Rrs(\lambda)$ при умеренно «чистой» атмосфере и $Rrs(\lambda)$ при наличии пылевого аэрозоля. Дополнительным этапом исследования для более точной оценки поглощающих свойств пылевого аэрозоля был расчет степенного хода $Rrs(\lambda)$ от 13 апреля для ст. AERONET Gangneung_WNU.

Из рис. 3 видно, что ход степенной функции аэрозольного поглощения для ст. Gangneung_WNU близок к виду λ^{-2} . Следовательно, на ошибку атмосферной коррекции (помимо λ^{-4}) влияет поглощение света аэрозолем, вследствие чего погрешность стандартной атмосферной коррекции будет резко увеличиваться в ультрафиолетовой области спектра. Таким образом, стандартный алгоритм обработки спутниковых данных для случаев пылевых переносов требует проведения дополнительной атмосферной коррекции, где в качестве функции интерполяции следует использовать величину, пропорциональную произведению аэрозольной толщины поглощения на λ^{-4} . Коэффициент пропорциональности находился из условий определения значений коэффициента

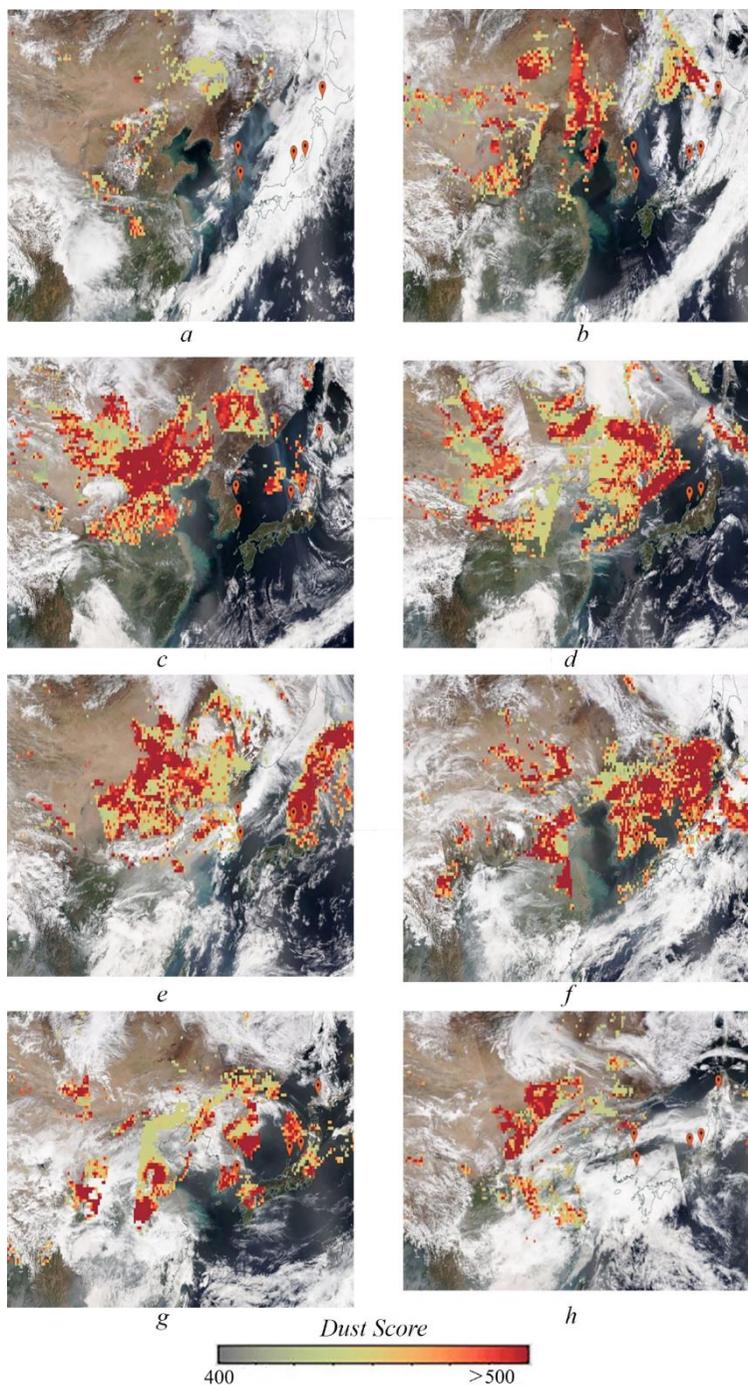
яркости моря в коротковолновой области спектра. Дополнительная погрешность в виде λ^{-1} может объясняться неблагоприятными метеорологическими условиями для спутникового сканирования.



Р и с. 3. Ход степенной функции аэрозольного поглощения за 13 апреля по спутниковым данным VIIRS/NOAA (a) и по данным международной сети AERONET (b) для ст. *Gangneung_WNU*
Fig. 3. Variation of the aerosol absorption power function on April 13, 2023 based on the VIIRS/NOAA satellite data (a) and the international AERONET network data (b) for the *Gangneung_WNU* station

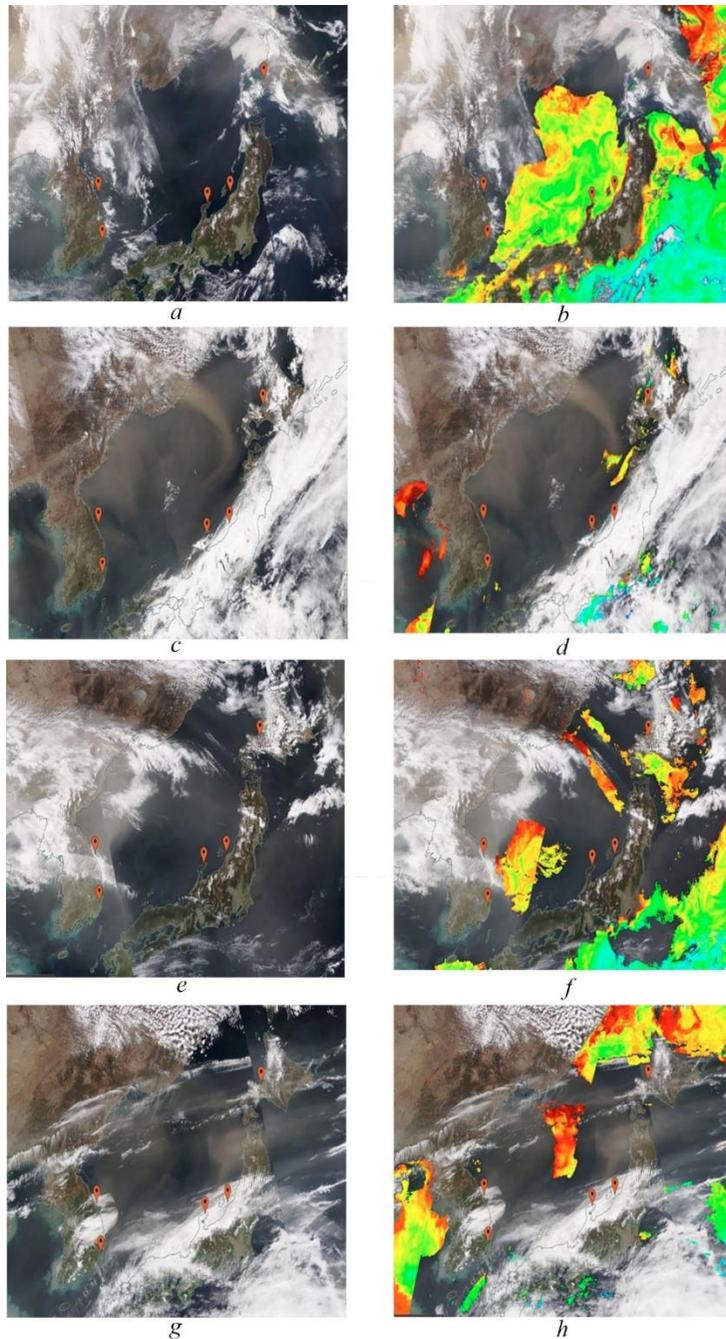
Над Японским морем со стороны пустыни Гоби было зарегистрировано два пылевых переноса, 8–13 и 17–22 апреля. Максимальные концентрации пылевого аэрозоля по спутниковым данным наблюдались в период 12–13 и 21–22 апреля. Следующим этапом исследования является анализ перемещения массы пылевого аэрозоля по данным уникального 2378-канального инфракрасного зонда AIRS. По картам загрузки атмосферы пылевыми частицами аэрозоля подтверждается, что местом зарождения пылевого аэрозоля являются пустыни Гоби и Такла-Макан (рис. 4). Анализ загрузки аэрозолем показал, что пылевая буря началась 8 апреля в пустыне Гоби. Пик концентрации частиц пылевого аэрозоля (*Dust Score*) по данным MODIS/AIRS наблюдался в Японском море 11 апреля над восточными станциями AERONET *Noto*, *Niigata* и *Hokkaido_University* (выделены маркерами), а над всей акваторией – 12 апреля (рис. 4).

Для оценки масштабов воздействия пыли на поверхностный слой Японского моря были проанализированы находящиеся в открытом доступе на платформе EOSDIS спутниковые изображения в псевдоцветах, а также коэффициент яркости моря (рис. 5). Концентрация пыли над акваторией настолько велика, что алгоритмы обработки спутниковых данных за все представленные дни не могут восстановить яркость моря для всей акватории даже при отсутствии облачности, распознавая области пыли как плотные слои облаков. Особенно показательным это эффект отражен на спутниковом изображении от 12 апреля, когда при практически полностью чистом от облаков Японском море коэффициенты яркости, определяемые по спутниковым алгоритмам, отсутствуют для всей акватории (рис. 5, c, d).



Р и с. 4. Загрузка пылевым аэрозолем по данным *MODIS/AIRS*: *a* – 7 апреля; *b* – 8 апреля; *c* – 9 апреля; *d* – 10 апреля; *e* – 11 апреля; *f* – 12 апреля; *g* – 13 апреля; *h* – 14 апреля (URL: <https://aqua.nasa.gov/modisonet.gsfc.nasa.gov/>)

Fig. 4. Dust aerosol loading based on the *MODIS/AIRS* data on: *a* – April 7, *b* – April 8, *c* – April 9, *d* – April 10, *e* – April 11, *f* – April 12, *g* – April 13, and *h* – April 14, 2023 (URL: <https://aqua.nasa.gov/modisonet.gsfc.nasa.gov/>)



Р и с. 5. Район съемок Японского моря со спутника *VIIRS/NOAA*. Акватории моря в псевдо-цветах (колонки слева) и коэффициенты яркости (колонки справа) в различные даты: *a, b* – 10 апреля; *c, d* – 12 апреля; *e, f* – 13 апреля; *g, h* – 21 апреля (URL: https://doi.org/10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT.002)

Fig. 5. Survey area in the Sea of Japan derived from the *VIIRS/NOAA* satellite imagery. Sea areas in pseudo-colors (columns on the left) and remote sensing reflectance (columns on the right) on various dates: *a, b* – April 10; *c, d* – April 12; *e, f* – April 13; *g, h* – April 21 (URL: https://doi.org/10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT.002)

Для определения высоты перемещения пылевого аэрозоля был проведен анализ данных обратных траекторий перемещения воздушных потоков по модели *HYSPPLIT* за исследуемый период (рис. 6). Отметим, что перенос пыли осуществлялся на всех высотах от 500 до 3000 м (красным цветом показана высота 500 м, синим – 1500 м, зеленым – 3000 м). Видно, что практически во все исследуемые даты перемещения аэрозоля над акваторией Японского моря регистрируется перенос со стороны пустынь Гоби и Такла-Макан.

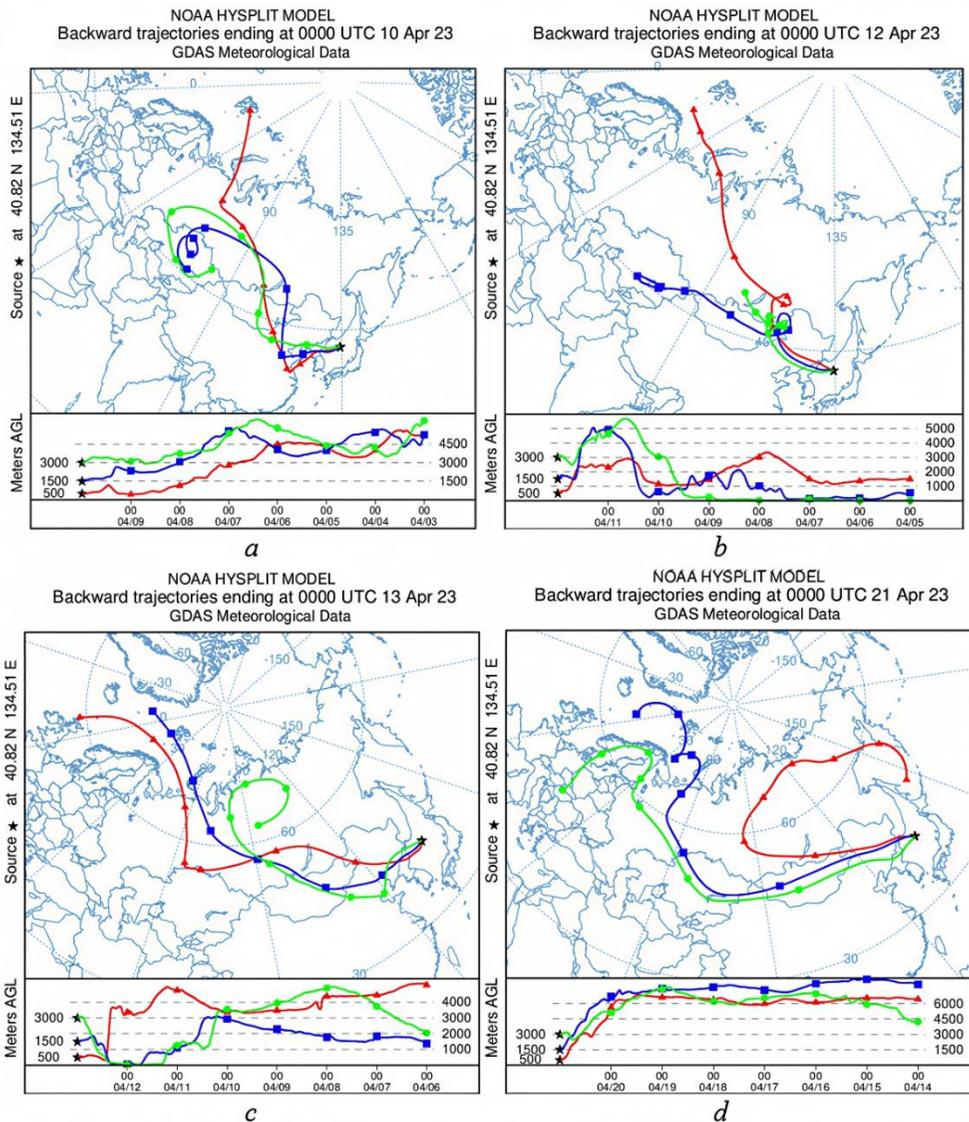
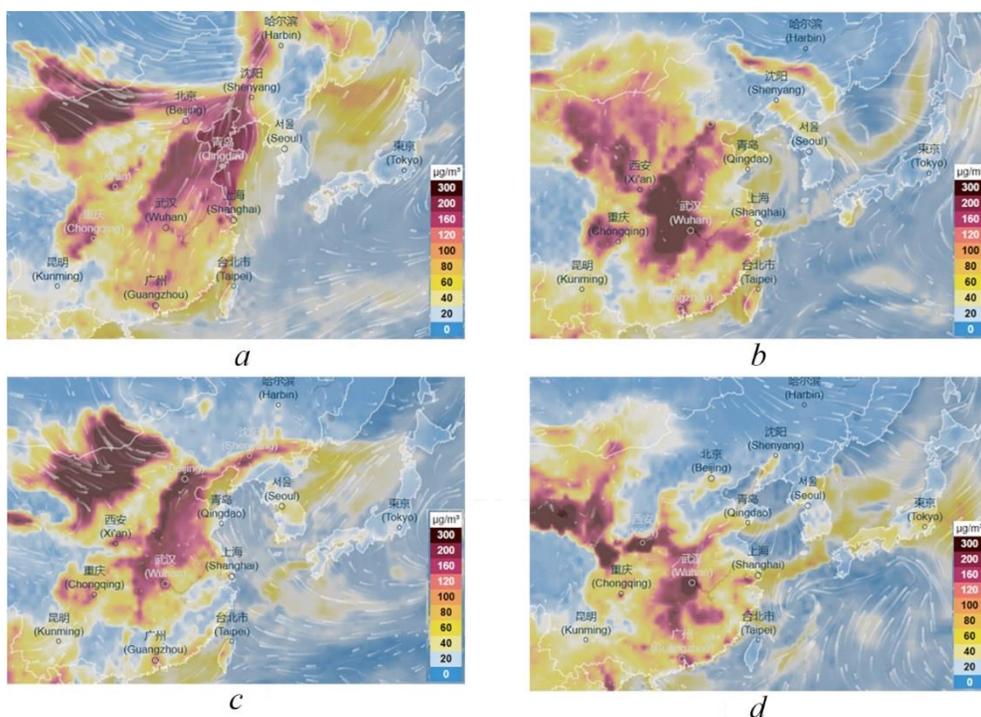


Рис. 6. Обратные траектории перемещения воздушных потоков по результатам моделирования *HYSPPLIT*: *a* – 10 апреля; *b* – 12 апреля; *c* – 13 апреля; *d* – 21 апреля (URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>)

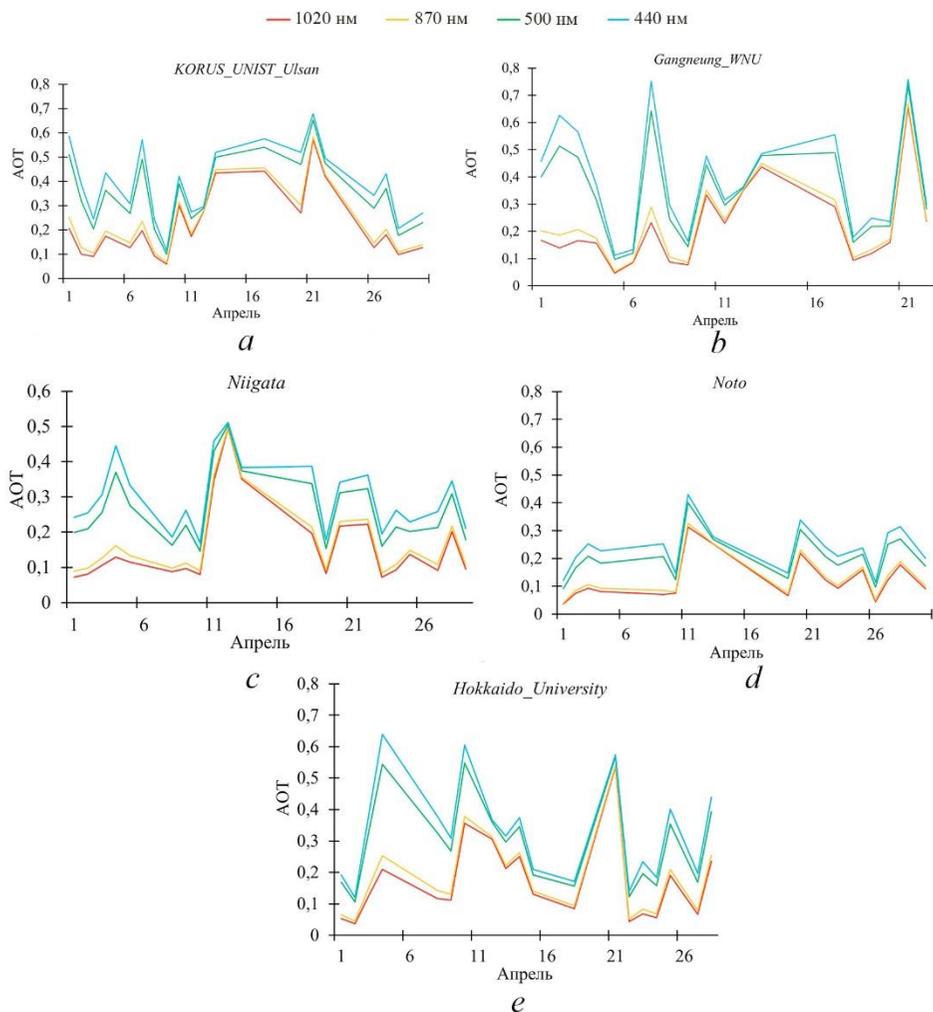
Fig. 6. Back trajectories of air flow transfer based on the *HYSPPLIT* modeling results: *a* – April 10, *b* – April 12, *c* – April 13 and *d* – April 21, 2023 (URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>)

Данные о концентрации взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ по модели *SILAM* показали повышенные (относительно среднемесячных) значения для региона Японского моря (рис. 7). Согласно анализу характеристик параметра *AQI*, высокие значения ($AQI = 175$) были зарегистрированы 10 апреля над ст. *Hokkaido_University* и 11 апреля – над ст. *Gangneung_WNU*. Однако это были локальные максимумы, и над большей частью акватории и побережья значения $AQI = 100 \pm 10$ соответствовали удовлетворительному уровню загрязнения воздуха.



Р и с. 7. Концентрация частиц PM_{10} в атмосфере по данным модели *SILAM*: *a* – 10 апреля; *b* – 12 апреля; *c* – 13 апреля; *d* – 21 апреля (URL: <https://thredds.silam.fmi.fi/thredds/catalog/catalog.html>)
Fig. 7. Concentration of PM_{10} particles in the atmosphere based on the *SILAM* model data: *a* – April 10, *b* – April 12, *c* – April 13 and *d* – April 21, 2023 (URL: <https://thredds.silam.fmi.fi/thredds/catalog/catalog.html>)

На основе массива натуральных оптических характеристик, полученных на станциях *AERONET*, было показано, что максимальные значения АОТ за апрель на всех длинах волн совпали с датами переноса пылевого аэрозоля, а именно 13 и 21 апреля. Наибольшее влияние пылевой аэрозоль имеет на длинноволновую часть спектра. На графиках рис. 8 по пикам значений АОТ на длинах волн 870 и 1020 нм видно, что весь период с 10 по 26 апреля характеризуется замутненной атмосферой. В дни пылевого переноса 12–13 и 21–22 апреля АОТ(870) и АОТ(1020) достигали значений 0,5–0,6, что более чем в 5 раз превышает значения АОТ, наблюдаемые в этом же месяце в дни с чистой атмосферой.



Р и с. 8. Спектральная изменчивость значений AOT за апрель по данным станций AERONET: *KORUS_UNIST_Ulsan* – *a*; *Gangneung_WNU* – *b*; *Noto* – *c*; *Niigata* – *d*; *Hokkaido_University* – *e*
F i g. 8. Spectral variability of AOD values for April 2023 based on the AERONET stations data: *KORUS_UNIST_Ulsan* – *a*; *Gangneung_WNU* – *b*; *Noto* – *c*; *Niigata* – *d*; *Hokkaido_University* – *e*

Также по измерениям сети AERONET, согласно данным о параметре Ангстрема, можно сделать вывод о размерном распределении частиц по соотношению различных длин волн (табл. 2). Как видно, наименьшая разница в значениях между фоновым и пылевым аэрозолем в атмосфере наблюдается при $\alpha(440-675)$ на ст. *Noto*. Наибольшая разница в значениях (в 4 раза) наблюдается при $\alpha(500-870)$ на ст. *Gangneung_WNU*. Все спектральные значения параметра Ангстрема подтверждают преимущество крупных аэрозольных частиц во время апрельского пылевого переноса над Японским морем.

Таблица 2
Table 2

Спектральные значения параметра Ангстрема (α) на станциях сети AERONET для акватории Японского моря при наличии фонового и пылевого аэрозоля в атмосфере
Spectral values of the Angstrom parameter (α) at the AERONET network stations for the Sea of Japan in the presence of background and dust aerosol in the atmosphere

Станции AERONET / AERONET stations	Тип аэрозоля / Type of aerosol					
	фоновый / background	пыль / dust	фоновый / background	пыль / dust	фоновый / background	пыль / dust
	$\alpha(440-675)$		$\alpha(500-870)$		$\alpha(340-440)$	
<i>Hokkaido_University</i>	1,12	0,62	1,07	0,58	0,92	0,55
<i>Noto</i>	1,04	0,70	0,92	0,60	0,90	0,53
<i>Niigata</i>	1,25	0,58	1,12	0,48	1,11	0,60
<i>Gangneung_WNU</i>	1,18	0,33	1,12	0,28	0,94	0,31
<i>KORUS_UNIST_Ulsan</i>	1,17	0,41	1,07	0,34	1,04	0,46

Продукты инверсии V3, представленные на платформе сети AERONET, содержат данные об изменчивости альbedo однократного рассеивания (Λ). Согласно анализу значений альbedo, преимущественно поглощающими или рассеивающими свойствами обладает пылевой аэрозоль. Совокупность высоких (больше фоновых в 1,5–2 раза) значений AOT и низких (более 0,7) значений α и Λ (особенно в коротковолновой области) является индикатором присутствия в атмосфере поглощающего пылевого аэрозоля. В дни с наибольшей концентрацией пыли над исследуемыми станциями значение Λ на длине волны 440 нм снизилось до 0,85.

Заклучение

Сравнительный анализ значений оптических характеристик на станциях AERONET, расположенных на побережье Японского моря, позволил выявить за апрель 2023 г. даты, в которые пылевой аэрозоль оказал максимальное влияние на дистанционно определяемые параметры вод исследуемого региона. Натурные, спутниковые и модельные данные подтвердили различную аэрозольную загрузку над «чистой» (присутствие фонового аэрозоля) и полностью запыленной областью акватории Японского моря, а также пространственную изменчивость основных оптических характеристик аэрозоля при регистрации пылевого переноса со стороны пустынь Гоби и Такла-Макан. Согласно спутниковым данным, на длине волны 870 нм для области с фоновой атмосферой $AOT = 0,110 \pm 0,009$, $\alpha = 1,046 \pm 0,075$, для сильно запыленной области $AOT = 0,34 \pm 0,034$, $\alpha = 0,587 \pm 0,04$. Натурные данные ближайших к пылевому выносу станций AERONET показали изменчивость значений параметра Ангстрема в диапазоне 0,118–0,555.

Было показано, что в дни с аномально интенсивным переносом со стороны Азии концентрация пыли над акваторией настолько велика, что с использованием алгоритма обработки спутниковых данных невозможно восстановить коэффициенты яркости моря для всей акватории даже при отсутствии облачности, области пыли распознаются как плотные слои облаков.

В результате сравнительного анализа спутниковых и фотометрических натуральных данных подтверждено, что погрешность стандартной атмосферной коррекции резко увеличивается в ультрафиолетовой области спектра во время пылевых переносов. Аппроксимация полученных значений степенной функцией показала для всего региона Японского моря ошибку атмосферной коррекции вида λ^{-7} . Аналитическая оценка погрешности спутниковых измерений спектрального коэффициента яркости моря по данным VIIRS/NOAA за исследованный период в коротковолновой области спектра составила 70 %, в видимой области спектра – до 47 %, в длинноволновой – 24 % по сравнению с натурными данными.

В последующих исследованиях планируется изучение бóльшего количества пылевых переносов со стороны Азии и их влияния на гидрооптические характеристики Японского моря с использованием не только натуральных измерений параметров атмосферы, но и спутниковых данных спектрального коэффициента яркости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spatial and temporal variations of spring dust emissions in northern China over the last 30 years / H. Song [et al.] // Atmospheric Environment. 2016. Vol. 126. P. 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.052>
2. Dust direct radiative effects on the earth-atmosphere system over east Asia: Early spring cooling and late spring warming / H. Wang [et al.] // Chinese Science Bulletin. 2011. Vol. 56, iss. 10. P. 1020–1030. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4405-3>
3. Interannual variability and trends of combustion aerosol and dust in major continental outflows revealed by MODIS retrievals and CAM5 simulations during 2003–2017 / H. Yu [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. 2020. Vol. 20. P. 139–161. <https://doi.org/10.5194/acp-20-139-2020>
4. Li Y., Wang W. Long-Range Transport of a Dust Event and Impact on Marine Chlorophyll-*a* Concentration in April 2023 // Remote Sensing. 2024. Vol. 16, iss. 11. 1883. EDN JETPJO. <https://doi.org/10.3390/rs16111883>
5. Shanmugam P., Ahn Y.-H. New atmospheric correction technique to retrieve the ocean colour from SeaWiFS imagery in complex coastal waters // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2007. Vol. 9, iss. 5. P. 511–530. EDN MMEJOX. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/9/5/016>
6. Fukushima H., Toratani M. Asian dust aerosol: Optical effect on satellite ocean color signal and a scheme of its correction // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 1997. Vol. 102, iss. D14. P. 17119–17130. <https://doi.org/10.1029/96JD03747>
7. Оценки первичной продукции в северной части Японского моря в различные сезоны по судовым и спутниковым данным / В. И. Звалинский [и др.] // Океанология. 2022. Т. 62, № 5. С. 726–742. EDN EJGKVV. <https://doi.org/10.31857/S0030157422050215>
8. Концентрация хлорофилла-*a* и био-оптические характеристики в заливе Петра Великого (Японское море) во время зимне-весеннего цветения фитопланктона / Е. А. Штрайхерт [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 1. С. 148–162. EDN THXXIJ.

9. Using satellite multi-angle polarization measurements to characterize atmospheric aerosol above Bohai Bay / P. A. Salyuk [et al.] // *Advances in Space Research*. 2024. Vol. 73, iss. 1. P. 514–522. EDN SUIGIP. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.10.007>
10. Особенности высотного распределения аэрозоля во время прохождения пылевых бурь над заливом Петра Великого в 2006 г. и их воздействие на фитопланктонные сообщества Японского моря / О. А. Букин [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20, № 4. С. 341–349. EDN HZQVTV.
11. *Dubovik O., King M. D.* A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2000. Vol. 105, iss. D16. P. 20673–20696. EDN AWHOLC. <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>
12. *Barnes W. L., Xiong X., Salomonson V. V.* Status of terra MODIS and aqua modis // *Advances in Space Research*. 2003. Vol. 32, iss. 11. P. 2099–2106. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)90529-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)90529-1)
13. Suomi NPP VIIRS sensor data record verification, validation, and long-term performance monitoring / C. Cao [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. Vol. 118, iss. 20. P. 11664–11678. <https://doi.org/10.1002/2013JD020418>
14. Validation of VIIRS AOD through a Comparison with a Sun Photometer and MODIS AODs over Wuhan / W. Wang [et al.] // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, iss. 5. 403. <https://doi.org/10.3390/rs9050403>
15. NOAA-20 VIIRS On-orbit Reflective Solar Band Radiometric Calibration Five-Year Update / T. Choi [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2024. Vol. 62. 1000610. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3363661>
16. VIIRS Version 2 Deep Blue Aerosol Products / J. Lee [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2024. Vol. 129, iss. 6. e2023JD040082. EDN OPGDOS. <https://doi.org/10.1029/2023JD040082>
17. *Паткова 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.
18. Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations / O. Dubovik [et al.] // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2002. Vol. 59, iss. 3. P. 590–608. EDN WTPOZP. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<0590:voaaop>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0590:voaaop>2.0.co;2)
19. Pre-Operational Validation of Air Quality Forecasting Model SILAM for India / A. Tiwari [et al.] // *Journal of Pollution Effects & Control*. 2022. Vol. 10, iss. 4. 343. EDN MYMAKL. <https://doi.org/10.35248/2375-4397.22.10.343>
20. Variability of aerosol concentrations of fractions PM₁₀ and PM_{2.5} in the atmosphere surface layer at the reference monitoring station Boyarsky / A. L. Dementeva [et al.] // *Proc. SPIE, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 127805X. (17 october 2023). EDN PWQZFD. <https://doi.org/10.1117/12.2690736>
21. *Griffin D. W., Kellogg C. A.* Dust Storms and Their Impact on Ocean and Human Health: Dust in Earth's Atmosphere // *EcoHealth*. 2004. Vol. 1, iss. 3. P. 284–295. EDN NXWJQH. <https://doi.org/10.1007/s10393-004-0120-8>
22. *Middleton N., Kang U.* Sand and Dust Storms: Impact Mitigation // *Sustainability*. 2017. Vol. 9, iss. 6. 1053. EDN YICTXM. <https://doi.org/10.3390/su9061053>
23. A dispersion modelling system SILAM and its evaluation against ETEX data / M. Sofiev [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2006. Vol. 40, iss. 4. P. 674–685. EDN MYMAKL. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.069>
24. Evaluation of multidecadal high-resolution atmospheric chemistry-transport modelling for exposure assessments in the continental Nordic countries / L. M. Frohn [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2022. Vol. 290. 119334. EDN PWQZFD. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119334>

25. *Калинская Д. В., Папкина 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>

Об авторах:

Калинская Дарья Владимировна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 56380591500**, **SPIN-код: 2622-1010**, **WoS ResearcherID: G-2959-2017**, kalinskaya@mhi-ras.ru

Папкина Анна Станиславовна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 57203015832**, **SPIN-код: 1683-7685**, **WoS ResearcherID: AAP-3248-2020**, hanna.papkova@gmail.com