

Изменчивость коэффициента яркости в условиях пылевого переноса по данным спутника *Sentinel-3* на примере Черного моря и Севастополя

Д. В. Калининская ✉, А. С. Папкова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
✉ kalinskaya_d_v@mail.ru

Поступила в редакцию 21.09.2022; одобрена после рецензирования 28.09.2022;
принята к публикации 09.03.2023.

Аннотация

Цель. В ноябре 2021 г. в результате сложившейся метеорологической ситуации были созданы условия для интенсивного переноса пылевого аэрозоля в Черноморский регион. Интенсивные осадки способствовали последующему осаждению частиц пыли на поверхностный слой Черного моря и его береговую зону. Цель работы – провести комплексное исследование случая аномально интенсивного выпадения осадков в г. Севастополе при штормовом ветре скоростью до 27 м/с за период 29–30 ноября 2021 г. с использованием средств спутникового и наземного мониторинга для оценки влияния пылевого аэрозоля на оптические характеристики моря и атмосферы для исследуемого региона.

Методы и результаты. За 29 и 30 ноября 2021 г. измерены счетные концентрации частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ пылемером Атмас в атмосфере над Севастополем. Для определения источника переноса аэрозоля посредством циклона проанализированы результаты расчета обратных траекторий переноса воздушных масс. Траектории были получены с помощью программного комплекса модели *HYSPLIT* и *AERONET* для Севастополя. В результате комплексного анализа спутниковых и натурных данных зарегистрирован пылевой перенос атмосферного аэрозоля. Сравнительный анализ данных о концентрации частиц PM_{10} , $PM_{2.5}$ и пыли по модели *SILAM* и натурных данных подтвердил перенос пылевого аэрозоля со стороны Африки в Черноморский регион. По данным моделирования *WRF* (*Weather and Research Forecasting*) для события переноса 29.11.2021, в западной части Черного моря концентрация пылевых частиц достигала $2000 \mu\text{g m}^{-3}$ (до пылевого переноса в той же части моря концентрация пыли не превышала $50 \mu\text{g m}^{-3}$). Пылевой шлейф сдвинулся 30.11.2021 в восточную область. Для оценки вклада поглощения в коэффициент яркости поверхностного слоя моря проанализированы данные оптических характеристик пылевого переноса (21.11.2021) и чистой атмосферы (02.12.2021). Проанализированы основные оптические и микрофизические характеристики атмосферного аэрозоля по данным портативных солнечных фотометров сети *AERONET* за исследуемый период. Основная информация о переносе аэрозоля и его типе получена по данным со спутниковых платформ *MODIS-Aqua*, *VIIRS*, *Sentinel* и *CALIPSO*. Для подтверждения переноса пыли со стороны Африки представлены результаты моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков, выполненного с помощью программного комплекса *HYSPLIT* и *AERONET* для черноморских станций *Section_7* (Румыния), *Galata_Platform* (Болгария) и *Sevastopol* (Россия).

Выводы. Исследование коэффициентов яркости по данным спутниковых и наземных измерений на длине волны 443 нм показало, что в присутствии поглощающего аэрозоля вклад яркости моря в общий сигнал становится меньше по сравнению с коэффициентами яркости для фонового дня и дня с чистой атмосферой (минимальным содержанием аэрозольных частиц). Процентное отношение яркости моря к общей яркости в день с чистой атмосферой составляет 5 %, в фоновый день – 2 %, в день с наличием в атмосфере поглощающего аэрозоля вклад яркости моря составляет 1 %.

© Калининская Д. В., Папкова А. С., 2023

Ключевые слова: *Sentinel*, *OLCI*, *MODIS*, *VIIRS*, *SPM*, *AERONET*, *CALIPSO*, обратные траектории *HYSPLIT*, *SILAM*, Черное море

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, научный проект № 19-05-50023 и № 19-35-90066, а также в рамках темы государственного задания МГИ РАН № 0827-2021-0002, государственного задания № 0555-2021-0003 «Разработка методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных измерений». Авторы благодарят Тома Кушера (Tom Kusera), Брента Холбена (Brent Holben), Джузеппе Зиборди (Giuseppe Zibordi) и группу Жене Фельдмана (Gene Feldman) из НАСА за предоставление данных АОТ, расчеты данных ВТА, обработку измерений, полученных на севастопольской станции *AERONET*, и за возможность использования качественных данных фотометрических измерений. Авторы также выражают признательность С. М. Сакерину и Д. М. Кабанову за предоставление фотометра *SPM* и программное обеспечение к нему.

Для цитирования: *Калинская Д. В., Папкова 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. doi:10.29039/0233-7584-2023-3-399-415

Original article

Variability of the Water-Leaving Radiance under the Conditions of Dust Transport by the Satellite *Sentinel-3* Data on the Example of the Black Sea and Sevastopol

D. V. Kalinskaya ✉, A. S. Papkova

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

Purpose. The meteorological situation in November 2021 has resulted in forming the conditions for intensive dust aerosol transfer to the Black Sea region. Intensive precipitation has contributed to the subsequent deposition of dust particles on the Black Sea surface layer and in its coastal zone. The work is purposed at comprehensive studying the case of abnormally intense precipitation in Sevastopol with a storm wind speed up to 27 m/s for November 29–30, 2021 using the satellite and ground-based monitoring means for assessing the aerosol impact on the sea and atmosphere optical characteristics in the region under study.

Methods and Results. For November 29 and 30, 2021, the calculated concentrations of *PM10* and *PM2.5* particles were measured in the atmosphere over Sevastopol by the Atmos dust meter. To determine the source of aerosol transport by means of a cyclone, the results of calculating the back trajectories of air mass transfer were analyzed. The trajectories were obtained using the *HYSPLIT* and *AERONET* models software package for Sevastopol. Comprehensive analysis of satellite and field data has resulted in recording the atmospheric aerosol transfer by dust. A comparative analysis of the data on concentrations of the *PM10*, *PM2.5* particles and dust based on the *SILAM* model and field data, confirmed the dust aerosol transfer from Africa to the Black Sea region. The data of the *WRF (Weather and Research Forecasting)* modeling of the transfer event on 29.11.2021 testify to the fact that in the western part of the Black Sea, the concentration of dust particles was up to 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (in the same part of the sea, before the dust transfer, the dust concentration did not exceed 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). On 30.11.2021, the dust plume shifted to the eastern region. To assess the absorption contribution to the value of water-leaving radiance of the sea surface layer, the data on the optical characteristics for the cases of dust transport (21.11.2021) and clear atmosphere (02.12.2021) were analyzed. The main optical and microphysical characteristics of the atmospheric aerosol during the period under study were analyzed using the data of portable solar photometers of the *AERONET* network. Basic information on the aerosol transfer and its type was obtained due to the data of the *MODIS-Aqua*, *VIIRS*, *Sentinel* and *CALIPSO*

satellite platforms. To confirm the dust transfer from Africa, presented were the results of modeling the reverse trajectories of air flow movement performed using the *HYSPLIT* and *AERONET* software package for the Black Sea stations *Section_7* (Romania), *Galata_Platform* (Bulgaria) and *Sevastopol* (Russia).

Conclusions. Study of the water-leaving radiance values based on the satellite and ground-based measurements performed at the wavelength 443 nm shows that in the presence of an absorbing aerosol, the contribution of sea brightness to the total signal becomes smaller as compared to the brightness coefficients for a background day and for a day with clear atmosphere (content of the aerosol particles is minimal). The sea water-leaving radiance constitutes 5% of the total radiance for a day with clear atmosphere, 2% – for a background day, and 1% – for a day with an absorbing aerosol in the atmosphere.

Keywords: *Sentinel*, *OLCI*, *MODIS*, *VIIRS*, *SPM*, *AERONET*, *CALIPSO*, back trajectories *HYSPLIT*, *SILAM*, Black Sea

Acknowledgments: The study was carried out with financial support of the Russian Foundation for Basic Research, scientific projects No. 19-05-50023 and No. 19-35-90066, as well as within the framework of the theme of state assignment of MHI, RAS No. 0827-2021-0002 and state assignment No. 0555-2021-0003 “Development of methods of operational oceanology based on interdisciplinary studies of the processes of formation and evolution of the marine environment and mathematical modeling using remote and contact measurements data”. The authors are thankful to Tom Kucsera, Brent Holben, Giuseppe Zibordi and to Gene Feldman's group from NASA for providing the AOD data, calculations of the BTA data, processing of measurements obtained at the Sevastopol *AERONET* station, and for the possibility of using high-quality photometric measurement data. The authors are also grateful S. M. Sakerin and D. M. Kabanov for providing the SPM photometer and its software.

For citation: Kalinskaya, D.V. and Papkova, A.S., 2023. Variability of the Water-Leaving Radiance under the Conditions of Dust Transport by the Satellite Sentinel-3 Data on the Example of the Black Sea and Sevastopol. *Physical Oceanography*, 30(3), pp. 369-383. doi:10.29039/1573-160X-2023-3-369-383

Введение

Дистанционное зондирование является основным методом, благодаря которому устанавливается количественная связь между электромагнитным спектром, полученным со спутников, и измерениями *in situ*. Количественные результаты дистанционного зондирования основаны на точной калибровке спутниковых датчиков и атмосферной коррекции полученных данных [1–3]. Атмосферная коррекция спутниковых измерений над внутренними водоемами является сложной задачей из-за многих факторов (например, загрязнения атмосферы, высокой мутности, плавающих объектов и эффектов засветки пикселей береговой зоны), для которых значительно завышена величина отражательной способности воды.

Информацию о биооптических характеристиках морской воды можно получить из анализа спектральной изменчивости яркости $L_w(\lambda)$ вышедшего из водной толщи излучения. Величина $L_w(\lambda)$ определяется из оптических свойств морской воды, которые, в свою очередь, зависят от количественного и качественного составов взвешенных и растворенных в ней веществ [4]. Чтобы минимизировать влияние геометрии наблюдения и оптических свойств атмосферы на величину сигнала яркости, в [5] Г. Гордон ввел в качестве характеристики восходящего от морской поверхности излучения понятие нормализованной яркости L_{wn} . На данный момент величина $L_{wn}(\lambda)$ до сих пор используется в качестве стандартного продукта обработки данных. Спутниковые сканеры цвета, например *MODIS-Aqua*, *VIIRS*, *OLCI*, измеряют спектральную яркость восходящего излучения на верхней границе атмосферы (L_{toa}),

включающую в себя рассеянное аэрозольными частицами и молекулами воздуха излучение, а также излучение, отраженное поверхностью воды. Таким образом, для корректной оценки L_w необходима процедура «атмосферной коррекции», исключающая вклад этих составляющих в величину L_{TOA} .

Атмосферная коррекция, основанная на модели передачи излучения, включает в себя моделирование распространения электромагнитных волн в условиях изменчивости: 1) параметров атмосферы; 2) атмосферных режимов (связанных с параметрами атмосферного газа); 3) высоты поверхности и геометрии спутниковых наблюдений (зенитный угол спутника, зенитный угол солнца и относительный азимут). С использованием результатов моделирования создается справочная таблица параметров атмосферного излучения с соответствующими функциями спектрального отклика спутникового датчика. Метод атмосферной коррекции переноса излучения включает в себя также определение взаимосвязи между атмосферными параметрами по спутниковым данным и отражательной способностью поверхности путем моделирования процесса передачи излучения от удаленного датчика (на границе атмосферы) и датчика, расположенного непосредственно на подстилающей поверхности. Полученные результаты используются для количественного определения характеристик и параметров подстилающей поверхности.

Трудности решения задач атмосферной коррекции определяются прежде всего тем, что даже в открытой части Мирового океана $L_w(\lambda)$ в «синей» части спектра составляет всего около 10–15 % от общей яркости, в которой преобладает рассеянное атмосферой излучение. В прибрежных районах в «синей» области спектра вклад $L_w(\lambda)$ в яркость на верхней границе атмосферы становится меньше 5 % из-за роста поглощения сигнала примесями, содержащимися в морской воде, а также вследствие увеличения изменчивости аэрозольного рассеяния [6].

При наличии пылевого аэрозоля над исследуемой акваторией ошибки атмосферной коррекции при спутниковом зондировании становятся более очевидными, а именно: появляются отрицательные значения нормализованной яркости моря [7]. Качество спутниковых продуктов усугубляется нелинейной зависимостью яркости рассеянной радиации от оптических толщин (молекулярной и аэрозольной компонент АОТ). Стоит отметить, что при наличии пылевого аэрозоля в атмосфере среднедневные величины АОТ резко возрастают, особенно в коротковолновой области спектра. Следовательно, с уменьшением длины волны количество ошибок возрастает.

В работе [8] показано, что дополнительная коррекция спутниковых данных, предоставляемых *MODIS-Aqua*, *MODIS-Terra*, с учетом пылевого аэрозоля значительно уменьшает расхождение между отражательной способностью *in situ* и данными дистанционного зондирования, особенно в коротковолновых спектральных диапазонах.

Цель работы – провести комплексное исследование случая аномально интенсивного выпадения осадков в г. Севастополе при штормовом ветре скоростью до 27 м/с за период 29–30 ноября 2021 г. с использованием средств спутникового и наземного мониторинга для оценки влияния аэрозоля на оптические характеристики моря и атмосферы для исследуемого региона.

Приборы и материалы

Для анализа спутниковых изображений в период 21.11.2021–02.12.2021 для региона г. Севастополя были проанализированы снимки *OLCI Sentinel-3b* и *MODIS* (рис. 1, *a*, *b*). Для западной части Черного моря за тот же период был проведен анализ снимков только *OLCI Sentinel-3b*, так как другие инструменты дистанционного зондирования (*MODIS*, *VIIRS*), несмотря на отсутствие облачности в данном регионе, не зафиксировали желтый шлейф пыли.

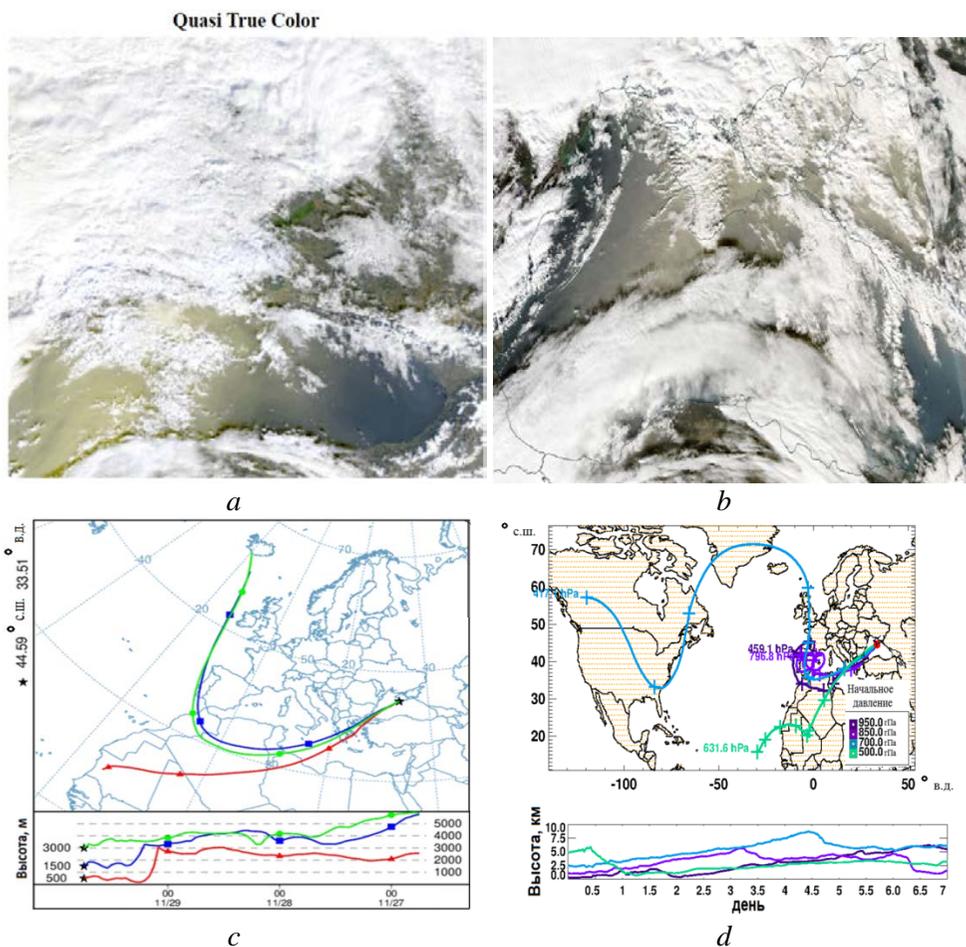


Рис. 1. Спутниковый снимок со сканера *OLCI* (*a*), *MODIS-Aqua* (*b*); обратные траектории перемещения воздушных масс по данным моделирования *HYSPLIT* (*c*), *AERONET* (*d*) за 29.11.2021 для станции Севастополь (URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>; URL: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/BAMGOMAS/index.html>)

Fig. 1. Satellite image from the *OLCI* (*a*) and *MODIS-Aqua* (*b*) scanners; back trajectories of air masses movement based on the *HYSPLIT* (*c*) and *AERONET* (*d*) simulation data for 29.11.21 for the Sevastopol station (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>; <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/BAMGOMAS/index.html>)

Прибор для измерения цвета океана и земли (*OLCI*) является преемником спектрометра формирования изображения среднего разрешения *ENVISAT* (*MERIS*), имеющего дополнительные спектральные каналы, другое

расположение камер и упрощенную бортовую обработку. *OLCI* представляет собой прибор, оснащенный пятью модулями камер, разделяющими поле обзора. Поле обзора пяти камер расположено веерообразно в вертикальной плоскости, перпендикулярной скорости движения платформы. Каждая камера имеет индивидуальное поле обзора $14,2^\circ$ и перекрытие $0,6^\circ$ с соседними камерами. Все поле обзора смещено по трассе на $12,6^\circ$ от солнца, чтобы свести к минимуму воздействие солнечных бликов. *OLCI* оснащен бортовым оборудованием, работающим на основе солнцезащитных диффузоров для проведения калибровки полученных результатов измерений. Есть три солнечных рассеивателя: два «белых», предназначенных для радиометрической калибровки, и один, предназначенный для спектральной калибровки, с характеристиками спектрального отражения. Собственное разрешение составляет примерно 300 м, что называется полным разрешением (*FR*). Режим обработки с уменьшенным разрешением (*RR*) предоставляет данные уровня *1B* с частотой дискретизации, уменьшенной в четыре раза в обоих пространственных измерениях, что приводит к разрешению $\sim 1,2$ км.

В алгоритмах *Ocean Color* для вычисления отражательной способности в верхней части атмосферы предполагается, что излучение *TOA* (*Total Optical Aerosol*) линейно разделено на различные физические вклады, как показано ниже:

$$L_{\text{TOA}}(\lambda) = [L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + t_{\text{dv}}(\lambda)L_f(\lambda) + t_{\text{dv}}(\lambda)L_w(\lambda)]t_{\text{gv}}(\lambda)t_{\text{gs}}(\lambda)fp(\lambda), \quad (1)$$

где $L_r(\lambda)$ – вклад яркости вследствие рэлеевского рассеяния на молекулах воздуха; $L_a(\lambda)$ – вклад яркости за счет рассеяния аэрозолями, включая многократное взаимодействие рассеяния с молекулами воздуха; $L_f(\lambda)$ – вклад морской пены; $L_w(\lambda)$ – яркость моря; $t_{\text{dv}}(\lambda)$ – коэффициент пропускания рассеянного излучения через атмосферу на пути обзора от поверхности к датчику; $t_{\text{ds}}(\lambda)$ – коэффициент пропускания рассеянного излучения через атмосферу на пути обзора от Солнца к поверхности; $t_{\text{gv}}(\lambda)$ – потери на пропускание излучения из-за поглощающих газов для всего восходящего излучения, проходящего вдоль траектории обзора датчика; $t_{\text{gs}}(\lambda)$ – коэффициент пропускания рассеянного излучения через атмосферу на пути обзора от Солнца к поверхности; $fp(\lambda)$ – поправка на эффекты поляризации.

Таким образом, важно учитывать соотношения данных компонент и их изменчивость в зависимости от аномальных условий, например пылевого аэрозоля, когда $L_a(\lambda)$ становится многократно выше, а $L_w(\lambda)$ – ниже.

Так как спутник *Sentinel* предоставляет данные о L_{TOA} (формула (1)), стоит задача нормировки значений по формуле

$$R_{\text{TOA}}(\lambda) = \frac{\pi L_{\text{TOA}}(\lambda)}{E_0(\lambda)\cos(\theta)},$$

где E_0 – солнечная постоянная [9]; $\cos(\theta)$ – косинус зенитного угла солнца.

Отражательная способность в верхней части атмосферы представляет собой безразмерную величину, которая определяет отношение отраженного излучения к падающему на данную поверхность солнечному излучению. Ее

можно рассчитать на основе спутниковых измерений спектральной освещенности с использованием средней солнечной спектральной освещенности и зенитного угла Солнца.

Для анализа концентраций пыли над Черноморским регионом была использована модель *WRF (Weather and Research Forecasting)*, которая была разработана специально для решения задач атмосферной коррекции и оперативного прогнозирования. В [10] дано подробное описание модели *WRF*. Наряду с расчетной моделью динамики погоды, модель *WRF* можно использовать для оценки наличия пылевых частиц в атмосфере. Физические параметры обнаружения пыли в модели *WRF-Chem* аналогичны модели *GOCART*. Разработка и поддержка кода *WRF-Chem* осуществляются в *NOAA/ESRL/GSD* совместно с другими исследовательскими группами в *NCAR (National Center for Atmospheric Research)*, *PNNL (Pacific Northwest National Laboratory)*, *NASA (National Academy of science of America)*, *ERDC (Engineer Research and Development Center)* и многих других институтах.

Загрязнение атмосферы рассчитывается с использованием системы компьютерного моделирования рассеивания загрязняющих веществ *SILAM (System for Integrated modeLLing of Atmospheric cOMposition)*, разработанной Финским метеорологическим институтом (URL: <http://silam.fmi.fi>). *SILAM* представляет собой современный мощный инструмент для моделирования рассеивающих свойств аэрозолей, газовых составляющих, частиц пыли, радионуклидов и природных аллергенов в атмосфере и широко используется для изучения воздействия лесных пожаров, извержений вулканов, переноса пыли, а также других природных и техногенных катастроф на загрязнение атмосферы в целом. Схема расчета данного воздействия основана на модели Лагранжа – Эйлера. Дисперсные свойства аэрозольных частиц могут варьироваться в широком диапазоне. *SILAM* позволяет моделировать дисперсию многих химических соединений и их смесей с различными типами взаимодействия между ними. Одним из параметров, который можно получить посредством *SILAM*, является содержание взвешенных частиц размером 2,5 и 10 мкм (*PM2.5* и *PM10*). Еще один параметр – индекс качества воздуха (обозначается как *AQI*), который разработан Агентством по охране окружающей среды. Значения выше 300 означают «опасное качество воздуха», в диапазоне 200–300 – «очень вредно для здоровья», 150–200 – «вредно для здоровья», 100–150 – «вредно для чувствительных групп», а ниже 100 или, скорее, ниже 50 – «качество воздуха хорошее». Классификация источников загрязнения по *SILAM* включает определение точечных и обширных источников, таких как морская соль, пыль, природная пыльца, природные летучие органические соединения.

SILAM также предоставляет карты пространственного распределения концентрации озона на высоте 10 м над землей (приземный озон). Озон (O_3) образуется в результате реакции солнечного света на входящие в состав воздуха химические элементы и соединения. Так, содержащийся в воздухе углеводород и оксиды азота вступают в реакцию с образованием озона непосредственно в источнике загрязнения или на расстоянии десятков и сотен километров с подветренной стороны.

Для получения информации об источнике дымового аэрозоля использовались результаты расчета обратных траекторий, полученные с помощью программного

комплекса модели *HYSPLIT* (URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.) Анализ обратных траекторий позволяет отследить перемещение воздушных потоков на разных высотах и установить местоположение вероятных источников поступления примесей в атмосферу [11, 12].

Результаты

На станции Севастополь 29 и 30 ноября 2021 г. был зарегистрирован штормовой ветер (22–27 м/с) с аномально интенсивными осадками. В эти дни были произведены измерения счетной концентрации частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ пылемером Атмас в атмосфере над Севастополем и проанализированы результаты расчета обратных траекторий переноса воздушных масс. Траектории были получены с помощью программного комплекса модели *HYSPLIT* и *AERONET* для Севастополя.

Для Севастополя самые большие концентрации за 29.11.2021 были получены на 22:00 ($PM_{10} = 0,07 + 0,01$, что превышает значение ПДК ($PM_{10} = 0,06 + 0$), при этом значение концентрации $PM_{2.5} = 0,03 + 0,01$). По данным обратных траекторий *HYSPLIT* (рис. 1, с) видно, что на всех высотах наблюдался перенос со стороны пустыни Сахара. Из анализа обратных траекторий следует, что на протяжении двух дней (29 и 30 ноября) регистрируется перенос воздушных масс со стороны Африканского континента на какой-либо из трех (500 м, 1,5 км и 3 км) анализируемых высот. При этом на всех высотах наблюдается перемещение аэрозоля преимущественно в юго-западном направлении. Это объясняет кирпично-оранжевый слой загрязнений после выпадения осадков на машинах, стеклах и других поверхностях, находившихся под открытым небом.

Аналогичные результаты были получены и путем анализа обратных 7-дневных траекторий аэрозоля, предоставляемых сетью *AERONET* (рис. 1, d). Над Черноморским регионом 29.11.2021 был зарегистрирован интенсивный пылевой перенос со стороны Сахары как по спутниковым, так и по натурным измерениям.

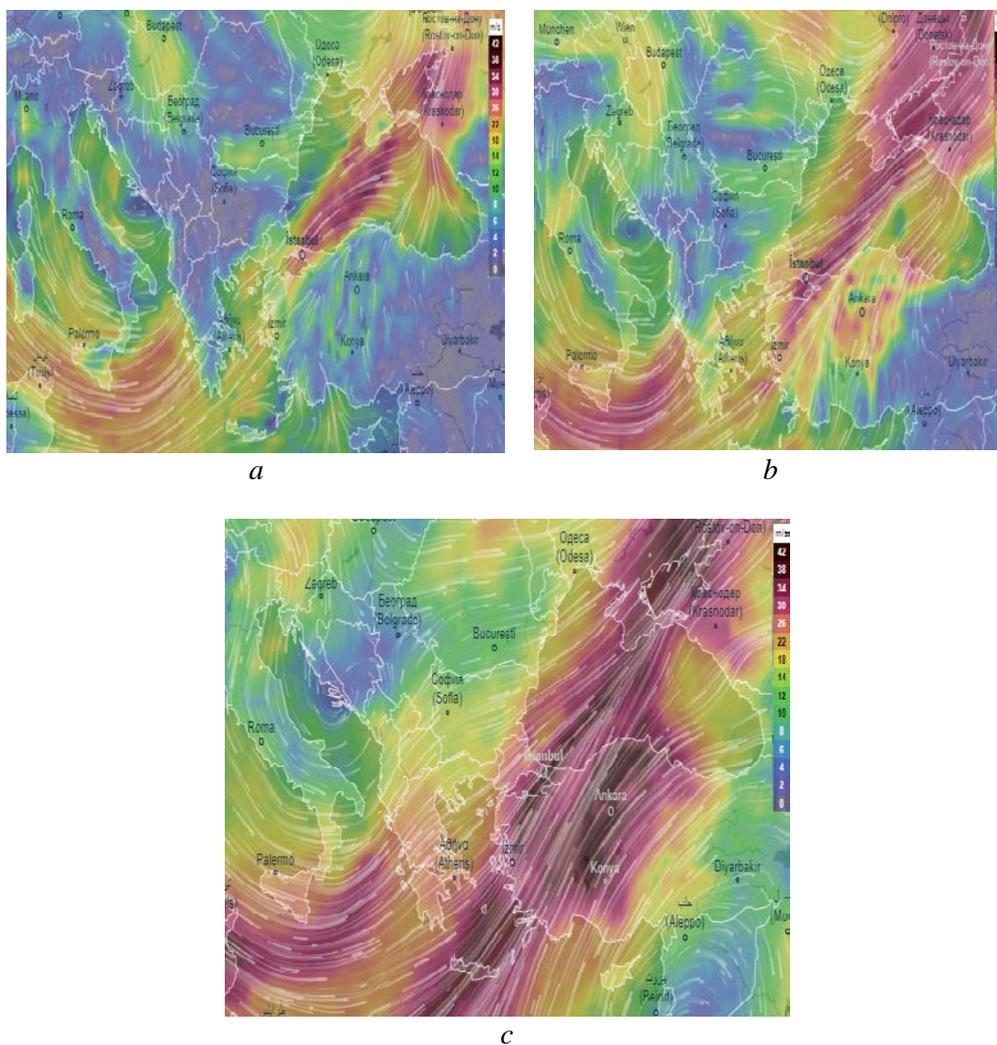
Данные семидневных обратных траекторий *AERONET* за 29.11.2021 также подтвердили наличие воздушных потоков со стороны пустыни Сахара на всех представленных высотах (500 м, 1500 м и 3 км) для Черноморской станции *Section_7* (Румыния).

Данные о скорости и направлении ветра по модели *SILAM* на высотах, используемых для анализа обратных траекторий *HYSPLIT* и *AERONET* за 29.11.2021, представлены на рис. 2. По результатам моделирования видно, что на всех высотах наблюдается одинаковое направление воздушных потоков, интенсивность которых увеличивается с высотой.

Повышенные (относительно среднемесячных) значения концентрации частиц PM_{10} , $PM_{2.5}$ и частиц пыли по данным моделирования *SILAM* для региона Севастополя и в целом для Черноморского региона подтвердили перенос пылевого аэрозоля со стороны Африки (рис. 3). Анализ значений параметра *AQI* и содержания озона не показал высоких значений, а значит, угрозы здоровью человека за этот период выявлено не было.

29 ноября 2021 г. во время переноса пылевых воздушных масс над Севастополем было зарегистрировано выпадение обильных кратковременных осадков. В работе [13] был приведен анализ проб осадков на содержание фосфора

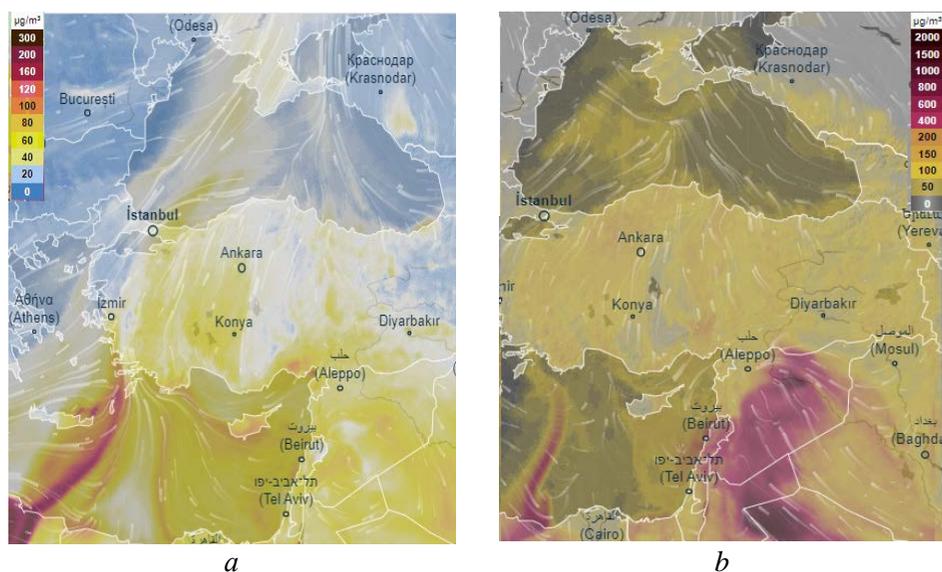
и кремния за исследуемые даты. В результате анализа было получено, что концентрация силикатов в атмосферных осадках, собранных с помощью открытого осадкосборника, более чем в семь раз превышала концентрацию этого элемента в 2021 г. по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и была в 38 раз выше, чем концентрация ВОЗ для закрытого осадкосборника, на который не влияют сухие осадки [13]. Поскольку перенос пылевого аэрозоля за 29–30 ноября был интенсивным, на всех поверхностях можно было наблюдать коричнево-оранжевый налет, характерный для пылевого переноса аэрозоля со стороны Сахары [14].



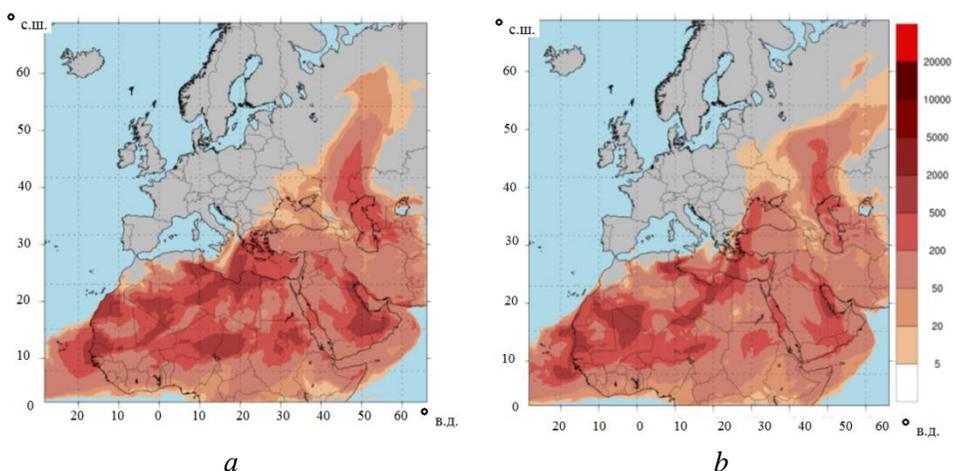
Р и с. 2. Сила и направление ветра, полученные 29.11.21 на высоте 500 м (a), 1,5 км (b), 3 км (c), по данным модели *SILAM* (URL: <https://silam.fmi.fi>)

F i g. 2. Strength and direction of wind at the heights 500 m (a), 1.5 (b) and 3 km (c) based on to the *SILAM* model data for 29.11.21 (<https://silam.fmi.fi>)

По данным моделирования *WRF-Chem* [9], в этот день над Севастополем и западной частью Черного моря концентрация пылевых частиц достигала $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (рис. 4, *b*), что в несколько раз превышает среднемесячные значения концентраций для исследуемого региона. До пылевого переноса в западной части Черного моря концентрация пыли составляла до $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (рис. 4, *a*), тогда как после 30.11.2021 пылевой шлейф сдвинулся в восточную область.



Р и с. 3. Результаты моделирования по данным *SILAM* за 29.11.2021 на 22:00 концентрации: *a* – частиц *PM10*; *b* – пыли в атмосфере (URL: <https://silam.fmi.fi>)
F i g. 3. Results of simulating the concentrations of *a* – *PM10* particles and *b* – dust in the atmosphere based on the *SILAM* data on 29.11.21, 10:00 p. m. (<https://silam.fmi.fi>)



Р и с. 4. Результаты моделирования изменчивости концентрации пыли в приземном слое атмосферы по данным кинематической модели *WRF-Chem* за 28.11.2021 (*a*) и 29.11.2021 (*b*) (URL: <https://ruc.noaa.gov/wrf/wrf-chem>)
F i g. 4. Results of modeling the dust concentration variability in the atmosphere surface layer based on the *WRF-Chem* kinematic model data for 28.11.2021 (*a*) and 29.11.2021 (*b*) (<https://ruc.noaa.gov/wrf/wrf-chem>)

Данный перенос был также зарегистрирован по натурным фотометрическим измерениям на черноморских станциях *AERONET Section_7* (Румыния) и *Galata_Platform* (Болгария). Станция *Section_7* расположена ближе к берегу и находилась в районе облачности в исследуемый период времени, поэтому значения аэрозольной оптической толщины (АОТ) по ней были ожидаемо выше. Так, среднеедневное значение АОТ на длине волны 500 нм (АОТ(500)) за 29.11.2021 на станции *Galata_Platform* составляло 0,35 при среднемесечном значении 0,09 (данные *level 1.5*), а на станции *Section_7* АОТ(500) = 0,67 при среднемесечной АОТ(500), равной 0,11. Результаты оценки вклада крупнодисперсных (τ^c) и мелкодисперсных (τ^f) частиц в общее распределение АОТ(500) также подтвердили преобладание крупнодисперсных частиц в атмосфере над обеими станциями: вклад τ^c в четыре раза больше, чем τ^f , для станции *Galata_Platform*, и в пять раз для станции *Section_7*.

В табл. 1 представлены среднеедневные измерения АОТ и параметра Ангстрема (α) за 29.11.2021 и ближайшую к этому дню дату с чистой атмосферой для станций *AERONET Galata_Platform* и *Section_7* (без облачности, дымки и т. д.) по результатам обработки измерений фотометра *CIMEL* (уровень данных *level 1.5*). Так как над Севастополем 29.11.2021 была сплошная облачность, измерений фотометром *SPM* нет.

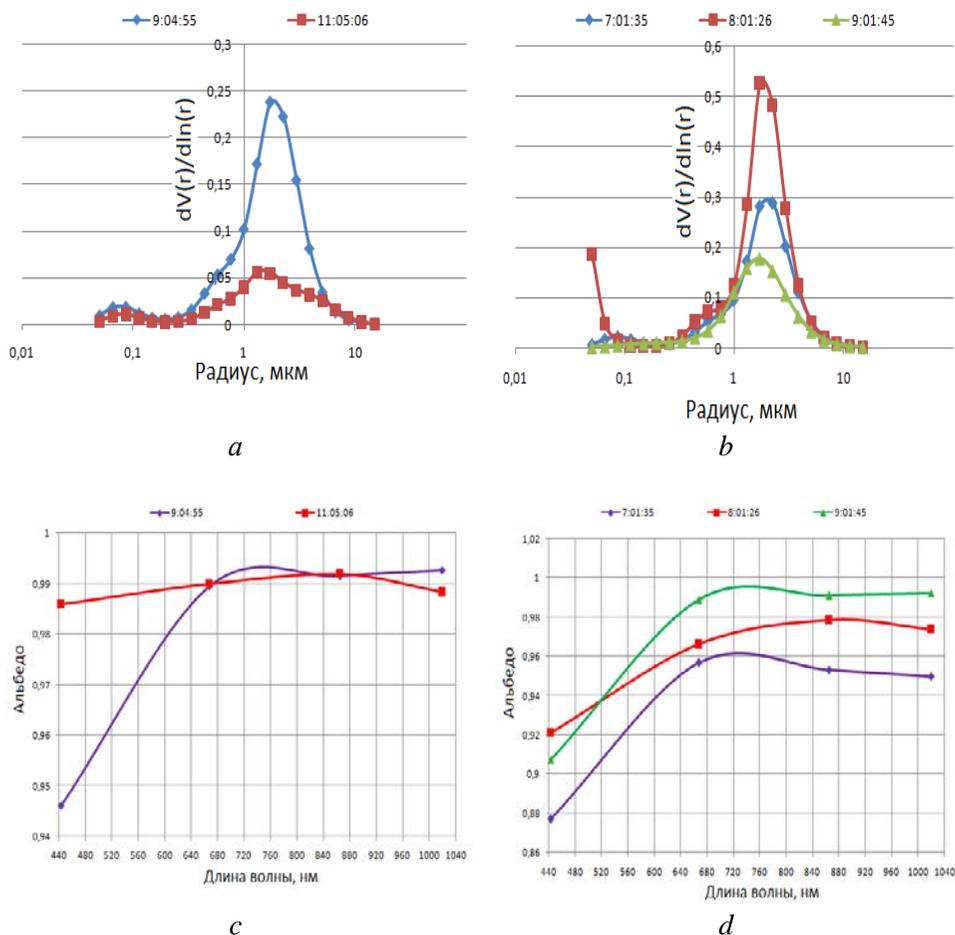
Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Среднеедневные значения аэрозольных оптических характеристик в дни с чистой атмосферой (25.11.2021 и 28.11.2021) и в день пылевого переноса (29.11.2021) для черноморских станций сети AERONET
Daily average values of aerosol optical characteristics on the days with clear atmosphere (25.11.2021 and 28.11.2021) and on the day of dust transfer (29.11.2021) for the Black Sea stations of the AERONET network

Параметр / Parameter	<i>Galata_Platform</i>		<i>Section_7</i>	
	25.11.2021	29.11.2021	28.11.2021	29.11.2021
АОТ(400)	0,099	0,367	0,183	0,684
АОТ(412)	0,095	0,365	0,175	0,679
АОТ(443)	0,087	0,361	0,162	0,674
АОТ(490)	0,074	0,354	0,145	0,667
АОТ(510)	0,069	0,353	0,140	0,665
АОТ(560)	0,064	0,350	0,126	0,657
АОТ(620)	0,053	0,343	0,112	0,651
АОТ(667)	0,044	0,340	0,100	0,646
АОТ(779)	0,034	0,334	0,082	0,636
АОТ(865)	0,029	0,329	0,073	0,627
АОТ(1020)	0,023	0,320	0,062	0,611
α (440-870)	1,660	0,153	1,210	0,111

По данным из табл. 1, в день пылевого переноса наблюдается резкое возрастание АОТ и резкое уменьшение α , по сравнению с днем с чистой атмосферой, что является индикатором присутствия поглощающего аэрозоля в атмосфере.

По данным продуктов инверсии *AERONET* были проанализированы распределение аэрозольных частиц по размерам за 29.11.2021 и спектральный ход альбеда однократного рассеяния для черноморских станций *AERONET* (рис. 5).



Р и с. 5. Распределение частиц по размерам на станциях *Galata_Platform* (a) и *Section_7* (b); альбеда однократного рассеяния на станциях *Galata_Platform* (c) и *Section_7* (d) по данным сети *AERONET* за 29.11.2021

F i g. 5. Particle size distribution at stations *Galata_Platform* (a) and *Section_7* (b); single scattering albedo at stations *Galata_Platform* (c) and *Section_7* (d) based on the *AERONET* network data for 29.11.2021

Ocean Color предоставляет данные уровня 1B (откалиброванные значения яркости), поэтому было принято решение проанализировать вклад пыли в значения общего L_{TOA} по данным *Sentinel (OLCI)*, а также вычислить вклад яркости моря $L_{wp}(\lambda)$ в тот же параметр. Сложность анализа методами дистанционного зондирования оптических характеристик за 29.11.2021 обусловлена облачностью над исследуемым регионом за этот день. Спутники *MODIS* и *VIIRS* не зафиксировали пылевой шлейф над Черноморским регионом, однако спутником *Sentinel-3* был зафиксирован момент образования пылевого шлейфа

(облако характерного оранжево-кирпичного цвета), который был зарегистрирован над западной станцией *AERONET – Galata_Platform* (табл. 2). Готовые спутниковые продукты цвета океана уровня 2 по измерениям *Sentinel-3* за 29.11.2021 не были использованы, так как содержали отрицательные значения нормализованной яркости моря в коротковолновой области на длине волны 412 и 443 нм, что свидетельствует об ошибках атмосферной коррекции и согласуется с работами [7, 8].

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

**Оптические характеристики моря, полученные
по спутниковым и наземным измерениям за 29.11.2021**
**Optical characteristics of the sea derived from the satellite
and ground-based measurements on 29.11.2021**

Длина волны, нм / Wave length, nm	<i>Sentinel-3</i>			<i>AERONET</i>		$\frac{R_{rs}}{R_{TOA}}$
	L_{TOA} , мВт·см ⁻² × ×ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ / L_{TOA} , mW·cm ⁻² × ×av ⁻¹ ·μkm ⁻¹	Спектральная яркость солнца мВт·см ⁻² × ×ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ / Spectral brightness of sun, mW·cm ⁻² × ×av ⁻¹ ·μkm ⁻¹	R_{TOA} , ср ⁻¹ / R_{TOA} , av ⁻¹	L_{wn} , мВт·см ⁻² × ×ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ / L_{wn} , mW·cm ⁻² × ×av ⁻¹ ·μkm ⁻¹	R_{rs} , ср ⁻¹ / R_{rs} , av ⁻¹	
400	7,491018	153,4781	0,42524	0,034	0,000695	0,001635772
412	7,916132	170,9230	0,40351	0,089	0,001635	0,004051929
443	7,809903	189,0350	0,35995	0,253	0,004202	0,011675075
490	6,689618	193,4653	0,30126	0,516	0,008374	0,027799256
510	6,071697	192,0841	0,27539	0,523	0,008549	0,031043910
560	4,705927	179,7491	0,22809	0,493	0,008610	0,003577000
620	3,768011	164,9287	0,19904	0,110	0,002090	0,010521201
779	2,444002	117,4262	0,18133	0,004	0,000100	0,000589852
865	1,862145	95,9636	0,16906	0,005	0,000160	0,000967701
1020	1,268153	69,9810	0,15788	0,009	0,000400	0,002557735

П р и м е ч а н и е. За 29.11.2021 зенитный угол солнца составлял 68,87396°
(cos(68,8739°) = 0,3604).

N o t e. On 29.11.2021, the sun zenith angle was 68.87396°(cos(68,8739°) = 0.3604).

Данные *AERONET* о $L_{wn}(\lambda)$ были также нормированы на солнечную постоянную. Затем был оценен вклад поглощения в величину яркости поверхностного слоя моря для дня пылевого переноса и для дня с чистой атмосферой (21.11.2021 и 02.12.2021) (табл. 3). В ходе исследования использовался программный пакет *SeaDAS*, в котором производилась обработка спутниковых снимков с сохранением высокого качества данных (выбранные пиксели, соответствующие координатам станции *Galata_Platform*, не имеют флагов ошибок).

Сравнивая результаты табл. 2 и 3, видно, что максимум вклада L_{wn} в общее распределение яркости находится в видимом диапазоне на длине волны 560 нм. Для дня с чистой атмосферой (02.12.2021) максимум вклада L_{wn}

составляет 17 %. Для фонового дня (21.11.2021) при наличии на снимках небольшой дымки и более высоких значениях АОТ по спутниковым данным, чем за 02.12.2021, вклад яркости моря составляет 9 %. Во время пылевого переноса над Черноморским регионом 29.11.2021 из-за мутной атмосферы море почти не видно, и его вклад составляет 3,7 %, что в 4,5 раза меньше, чем за 02.12.2021.

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

**Оптические характеристики моря, полученные
по спутниковым и наземным измерениям за 21.11.2021 и 02.12.2021**
**Optical characteristics of the sea derived from
the satellite and ground-based measurements on 21.11.2021 and 02.12.2021**

Длина волны, нм / Wave length, nm	Sentinel-3			AERONET		$\frac{R_{rs}}{R_{TOA}}$
	L_{TOA} , мВт·см ⁻² × ×ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ / L_{TOA} , мW·cm ⁻² × ×ав ⁻¹ ·μkm ⁻¹	Спектральная яркость солнца, мВт·см ⁻² × ×ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ / Spectral brightness of sun, мW·cm ⁻² × ×ав ⁻¹ ·μkm ⁻¹	R_{TOA} , ср ⁻¹ / R_{TOA} , ав ⁻¹	L_{TOA} , мВт·см ⁻² × ×ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹ / L_{wb} , мW·cm ⁻² × ×ав ⁻¹ ·μkm ⁻¹	R_{rs} , ср ⁻¹ / R_{rs} , ав ⁻¹	
<i>21.11.2021</i>						
400	6,566571	153,4781	0,357681	0,161	0,0032939	0,009209
412	6,795762	170,9230	0,332385	0,238	0,0043723	0,013154
443	6,119268	189,0350	0,270621	0,397	0,0065944	0,024368
490	4,592702	193,4653	0,198458	0,634	0,0102900	0,051850
510	3,929536	192,0841	0,171023	0,646	0,0105602	0,061747
560	2,535659	179,7491	0,117931	0,617	0,0107782	0,091394
620	1,477196	164,9287	0,074877	0,153	0,0029129	0,038903
779	0,561470	117,4262	0,039973	0,005	0,0001337	0,003345
865	0,331855	95,9636	0,028910	0	0	0
1020	0,143767	69,981	0,017174	-0,003	-0,0001346	-0,00784
<i>02.12.2021</i>						
400	4,901749	153,4781	0,278878	0,196	0,00400995	0,014379
412	4,980188	170,923	0,254422	0,313	0,00575007	0,022601
443	4,461363	189,035	0,20608	0,571	0,00948470	0,046024
490	3,304922	193,4653	0,149165	1,052	0,01707428	0,114465
510	2,788113	192,0841	0,126744	1,014	0,01657586	0,130782
560	1,773757	179,7491	0,086166	0,870	0,01519785	0,176378
620	1,079895	164,9287	0,057174	0,184	0,00350309	0,061271
779	0,372644	117,4262	0,027710	0,005	0,00013370	0,004825
865	0,213768	95,9636	0,019451	0	0	0
1020	0,102138	69,981	0,012744	-0,001	-0,00004500	-0,003520

П р и м е ч а н и е. За 21.11.2021 зенитный угол солнца составлял 67,9379° (cos(67,9379°) = 0,3756), а за 02.12.2021 – 68,92097° (cos(68,92097°) = 0,3596).

N o t e. On 21.11.2021, the sun zenith angle was 67.9379° (cos(67.9379°) = 0.3756), on 02.12.2021 – 68.92097° (cos(68.92097°) = 0.3596).

По данным *SPM*, полученным в Севастополе, аналогичным образом были проанализированы даты: 1) 21.11.2021 – фоновый день с умеренно мутной атмосферой, когда значения АОТ были близки к среднемесячным значениям ($AOT(500) = 0,086$ при среднемесячном $AOT(500) = 0,098$); и 2) 02.12.2021 с чистой атмосферой, для которой $AOT(500) = 0,042$, что в три раза меньше среднемесячного значения $AOT(500)$ (0,127). Для этих же дат были проанализированы значения АОТ по данным фотометрических измерений в рамках работы сети *AERONET* для станции *Galata_Platform*. Так же, как и для Севастополя, данные, полученные фотометром *CIMEL* для западного побережья Черного моря, показали близкие к среднемесячным значения за 21.11.2021 и в два раза меньше среднемесячного значения данные АОТ за 02.12.2021.

Стоит отметить, что в данной работе не были использованы результаты измерений других инструментов спутникового зондирования.

Заключение

В исследовании приведены результаты анализа натуральных значений нормализованной яркости моря, полученных на прибрежных станциях северо-западной части Черного моря, а именно *Galata_Platform* и *Section_7*, а также результаты измерений и моделирования коэффициента яркости для Севастополя. Был проведен расчет процентного вклада величины $L_{wn}(\lambda)$ в общую величину коэффициента яркости для трех случаев: в условиях чистой атмосферы, присутствия слабопоглощающего фонового аэрозоля и при переносе поглощающего пылевого аэрозоля. Чтобы исключить влияние цветения фитопланктона, для анализа коэффициентов яркости были выбраны три даты в осенний период, для которых проанализированы спутниковые изображения (*Level 1*) в программном пакете *SeaDas*.

Сравнительный анализ натуральных и спутниковых данных показал, что максимум вклада $L_{wn}(\lambda)$ в общее распределение яркости находится в видимом диапазоне на длине волны 560 нм. Для даты с чистой атмосферой (02.12.2021) максимум вклада $L_{wn}(\lambda)$ составляет 17 %. Для фонового дня (21.11.2021) при наличии на снимках небольшой дымки и более высоких спутниковых значениях АОТ, чем за 02.12.2021, вклад яркости моря составляет 9 %.

Во время пылевого переноса над Черноморским регионом (29.11.2021) из-за мутной атмосферы и высокого поглощения крупнодисперсными частицами море почти не видно и его вклад составляет 3,7 %, что в 4,5 раза меньше, чем за 02.12.2021. Чем меньше вклад яркости моря в общую яркость, тем больше вероятность ошибок атмосферной коррекции.

Случаи пылевых выносов характеризуются тем, что средняя высота расположения поглощающих частиц заметно больше, чем у аэрозолей промышленного и континентального типа. Над поверхностью аэрозоль стратифицирован в соответствии с интенсивностью турбулентного обмена, которая, как правило, значительно больше над сушей. Соответственно при переносе пылевого аэрозоля в сторону акватории моря континентальный аэрозоль располагается выше океанического.

В данном исследовании показано, что на длине волны 443 нм процентное отношение яркости моря к общей яркости $\frac{R_{rs}}{R_{TOA}}$ в день с чистой атмосферой составляет 5 %, в фоновый день – 2 %, а в присутствии поглощающего аэрозоля вклад яркости моря становится еще меньше, а именно 1 %. Следовательно, разработка алгоритма атмосферной коррекции для прибрежных вод, для которых круглогодично регистрируются события пылевых выносов, является актуальной задачей. Результаты восстановления значений показателей яркости моря в подобных условиях посредством существующих алгоритмов с большой вероятностью будут недостоверны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савиных В. П., Цветков В. Я.* Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования. Москва : Картгеоцентр – Геодезиздат, 2001. 228 с.
2. *Чандра А. М., Гош С. К.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Москва : Техносфера, 2008. 307 с.
3. *Wilson R.* Advanced remote sensing: terrestrial information extraction and applications, by Shunlin Liang, Xiaowen Li and Jindi Wang // *International Journal of Remote Sensing*. 2013. Vol. 34, iss. 14. P. 5262–5263.
4. Электронный атлас «Биооптические характеристики морей России по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2014 гг.» / О. В. Копелевич [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 6. С. 99–110.
5. *Gordon H. R.* Can the Lambert-Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? // *Limnology and Oceanography*. 1989. Vol. 34, iss. 8. P. 1389.
6. *Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Вазюля С. В.* Подводное световое поле в поверхностном слое Баренцева моря и спектральный коэффициент яркости водной толщи при различных океанологических условиях // *Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. Москва, 2020. С. 216. EDN SEBHMT. doi:10.21046/18DZZconf-2020a
7. *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. Т. 14, iss. 8. 1890. <https://doi.org/10.3390/rs14081890>
8. Solar Irradiance Reference Spectra for Two Solar Active Levels / G. Thuillier [et al.] // *Advances in Space Research*. 2004. Vol. 34, iss. 2. P. 256–261. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2002.12.004>
9. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, system efforts, and future directions / J. G. Powers [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017. Vol. 98, iss. 8. P. 1717–1737. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
10. 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>
11. *Kalinskaya D. V., Kudinov O. B.* Methodology of ground aerosol sources determination based on AERONET and HYSPLIT models data results // *Proceedings of SPIE*. SPIE, 2017. Vol. 10466 : 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 104663R. doi:10.1117/12.2287744
12. *Varenik A. V.* The characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ and elemental carbon air pollution in Sevastopol, Crimean Peninsula // *Applied Sciences*. 2022. Т. 12, iss. 15. 7758. <https://doi.org/10.3390/app12157758>
13. *Калинская Д. В.* Исследование особенностей оптических характеристик пылевого аэрозоля над Черным морем // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2012. Вып. 26, т. 2. С. 151–162. EDN VWSEGX.

14. Устранение аэрозольных искажений при анализе данных наблюдений Черного моря цветовым сканером CZCS со спутника *Nimbus-7* / В. С. Суетин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 1997. № 4. С. 71–79.

Об авторах:

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

Папкина Анна Станиславовна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 57203015832**, hanna.papkova@gmail.com