

Научная статья

УДК 504.3.054
EDN: HGJNLZ

Особенности изменчивости параметра Ангстрема над Черным морем

Д. В. Калининская*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*
✉ *kalinskaya_d_v@mail.ru*Поступила в редакцию 27.04.2024; одобрена после рецензирования 09.09.2024;
принята к публикации 20.11.2024.

Аннотация

Цель. Выявлены особенности изменчивости значений параметра Ангстрема, полученных на черноморских станциях Севастополь и *Section_7* сети *AERONET* с весны 2019 г. по весну 2024 г. по данным спутникового и наземного мониторинга, а также результатов моделирования динамики атмосферы.

Методы и результаты. Для сравнительного анализа и оценки значений параметра Ангстрема использовались: результаты измерений портативным фотометром *SPM*, фотометрами со станций международной сети аэрозольного мониторинга *AERONET*, радиометром *VIIRS* со спутника *Suomi NPP*, данные о концентрации взвешенных частиц *PM2.5* и *PM10*, полученные посредством измерений детектором *Espada M3*, а также результаты моделирования динамики атмосферы (данные моделей *HYSPLIT* и *SILAM*). Сравнительный анализ позволил выявить даты, в которые на одной из двух указанных станций были зарегистрированы оптические характеристики, соответствующие пылевому аэрозолю, а на второй аэрозоль такого типа не был обнаружен. Это подтверждает различную аэрозольную загрузку в атмосфере над западной и центральной частями Черного моря и пространственную изменчивость основных оптических характеристик аэрозоля при регистрации пылевого переноса со стороны пустыни Сахара. Измерения концентрации частиц *PM2.5* и *PM10*, проведенные в дни с фоновыми оптическими характеристиками атмосферного аэрозоля, позволили получить значения фоновых характеристик взвешенных частиц: $PM2.5 = 7 \text{ мкг/м}^3$, $PM10 = 8 \text{ мкг/м}^3$.

Выводы. Низкие значения параметра Ангстрема (ниже 0,8) сами по себе не являются показателем наличия в атмосфере такого аэрозоля, как пыль или дым. Однако в комплексе с высокими (превышающими фоновые более чем в 1,5 раза) значениями аэрозольной оптической толщины и концентрациями частиц *PM2.5* и *PM10*, превышающими фоновые значения более чем в три раза, набор данных является доказательством присутствия в атмосфере аэрозоля этого типа. Отмечено, что такой аэрозоль может быть обнаружен по измерениям концентрации частиц *PM 2.5* и *PM10* только в том случае, когда он находится в приземном слое атмосферы, поэтому сделанные лишь на основании измерений счетных концентраций выводы о присутствии аэрозоля этого типа в атмосфере не являются достоверными.

Ключевые слова: *SPM*, *AERONET*, *VIIRS*, *SILAM*, обратные траектории, *HYSPLIT*, параметр Ангстрема, пылевой аэрозоль, аэрозоль, дым, спектральный коэффициент яркости моря, аэрозольная оптическая толщина, АОТ, 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 гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений». Автор выражает признательность С. М. Сакерину и Д. М. Кабанову за предоставление фотометра *SPM* и программное обеспечение к нему. Автор благодарит Тома Кушера (*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: Калинин Д. В. Особенности изменчивости параметра Ангрстрема над Черным морем // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 1. С. 101–118. EDN HGJNLZ.

Original article

Research of the Angstrom Parameter Variability over the Black Sea Region

D. V. Kalinskaya

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

Abstract

Purpose. The study is purposed at identifying the variability features of the Angstrom parameter values obtained at the Black Sea stations Sevastopol and *Section_7* of the *AERONET* network from spring, 2019 to spring, 2024 based on the satellite and ground monitoring data, as well as the results of atmospheric dynamics modeling.

Methods and Results. Comparative analysis and assessment of the Angstrom parameter values involved application of the following information on atmospheric aerosol: the data of ground-based measurements derived by a portable *SPM* photometer, the photometer at the stations of the *AERONET* international aerosol monitoring network, the *VIIRS* radiometer platform from the *Suomi NPP* satellite, the data on concentrations of suspended particles of *PM2.5* and *PM10* resulted from the *Espada M3* detector measurements, as well as the results of atmosphere dynamics modeling (data of the *HYSPLIT* and *SILAM* models). The comparative analysis made it possible to reveal the dates on which the optical characteristics corresponding to dust aerosol were recorded at one of two indicated stations in the Black Sea, whereas at the other one, no aerosol of this type (i.e. optical characteristics corresponded to a clean atmosphere) was detected. This fact confirms the different aerosol loading in the atmosphere over the western and central parts of the Black Sea, and also the spatial variability of aerosol basic optical characteristics during dust transport from the Sahara Desert. The measurements of the *PM2.5* and *PM10* particle concentrations performed on the days with the background optical characteristics of atmospheric aerosol permitted to obtain the values of background characteristics of suspended particles: $PM2.5 = 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $PM10 = 8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Conclusions. Low values of the Angstrom parameter (less than 0.8) do not by themselves indicate the presence of an aerosol, such as dust or smoke, in the atmosphere. However, being combined with high (exceeding the background values by more than 1.5 times) values of aerosol optical thickness and concentrations of *PM2.5* and *PM10* particles (exceeding the background values by more than 3 times), the data set is an evidence of the presence of aerosol – dust or smoke – in the atmosphere. It is noted that the aerosols of such types can be detected by the measurements of *PM2.5* and *PM10* particle concentrations only when they are in the atmosphere surface layer. Therefore, the conclusions on presence of these types of aerosols in the atmosphere, being based only on the measurements of calculated concentrations, are not reliable.

Keywords: *SPM*, *AERONET*, *VIIRS*, *SILAM*, reverse trajectories, *HYSPLIT*, Angstrom parameter, dust aerosol, aerosol, smoke, spectral coefficient of sea brightness, aerosol optical thickness, AOD, Black Sea, atmospheric aerosol, satellite monitoring, ground monitoring, optical characteristics

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of theme of state assignment of Marine Hydrophysical Institute, RAS 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. The author thanks Tom Kucsera, Brent Holben, Giuseppe Zibordi and 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, as well as for the opportunity to use high-quality photometric measurement data.

For citation: Kalinskaya, D.V., 2025. Research of the Angstrom Parameter Variability over the Black Sea Region. *Physical Oceanography*, 32(1), pp. 133-149.

Введение

Необходимость исследования различных типов аэрозоля обусловлена целым рядом факторов его влияния на верхний слой вод акваторий. Во-первых, аэрозоль может переноситься на значительные расстояния от их источников, тем самым влияя на изменение химического состава атмосферы над регионами [1, 2].

Во-вторых, аэрозоль различного происхождения влияет на точность восстановления спектрального хода коэффициента яркости восходящего излучения [2–4]. Поскольку биооптические характеристики водоемов анализируют по спутниковым данным, для корректной оценки этих характеристик необходимо учитывать, какой аэрозоль находится в атмосфере над исследуемым регионом [5–9]. Аэрозоль (такой, как пыль и дым) не дает возможность получить объективные оценки, поскольку стандартный алгоритм атмосферной коррекции, используемый в *NASA*, не предполагает учет стратификации такого аэрозоля [1, 10].

В-третьих, аэрозоль содержит микроэлементы, в частности азот, фосфор и кремний, которые при осаждении на верхний слой водоемов могут служить дополнительными источниками питания фитопланктона [11, 12]. В зависимости от того, какого типа аэрозоль выявлен в атмосфере над исследуемым регионом в результате переноса, определяют, какие именно микроэлементы окажутся в верхнем слое вод после выпадения осадков.

В настоящее время широко исследуются различные аэрозольные фракции, т. е. распределение аэрозольных частиц в зависимости от их размера. Крупнодисперсная фракция (0,6–10 мкм) попадает в диапазон околонулевых значений показателей Ангстрема. Сложнее обстоит дело с субмикронной фракцией аэрозоля (0,1–0,6 мкм), поскольку параметр Ангстрема будет варьироваться при сдвиге максимума функции распределения по размерам внутри этого интервала.

В период развития пыльной бури процессы теплообмена и изменение динамики микрофизических процессов сопровождаются сильными ветрами и вторжением холодного воздушного фронта. Это приводит к переносу большого количества пылевой фракции аэрозоля с частицами размером более 2 мкм и к уменьшению содержания мелкодисперсной (субмикронной) фракции, что объясняется следующими причинами:

1) вторжением более плотных воздушных масс с большим содержанием пыли, которое может привести к механическому вытеснению взвешенных частиц субмикронной фракции в более высокие слои воздуха;

2) слипанием частиц субмикронной фракции аэрозоля с частицами крупнодисперсной пылевой фракции;

3) выталкиванием мелкодисперсных отрицательно заряженных частиц пыли отрицательным электростатическим полем земной поверхности.

Частицы фоновой субмикронной фракции, сталкиваясь с более крупными частицами пылевой бури и отнимая у них электроны, оказываются заряженными отрицательно, а крупнодисперсные частицы – положительно. Затем субмикронные частицы поднимаются выше под воздействием электростатического поля Земли. Развитие пылевой бури способствует процессам, которые включают приобретение в результате столкновений между мелкодисперсными частицами отрицательного заряда, а между крупными – положительного, что способствует расслоению пылевого облака. Именно поэтому пылевую дымку можно наблюдать полосами [13]. Вследствие этого усиливается выброс частиц почвы электростатическими силами. Измерения концентрации ионов дисперсной фазы воздуха на уровне 500 и 6000 м при чистой и запыленной атмосфере [14–16] указывают на повышение концентрации отрицательно заряженных ионов и одновременно уменьшение количества положительно заряженных ионов в период пылевой бури, что также подтверждает электростатическую гипотезу.

Зачастую после сильных пылевых бурь даже летом проходят продолжительные ливневые дожди. При этом наиболее устойчивым от вымывания компонентом атмосферного аэрозоля является субмикронная фракция, которая после интенсивных дождей сохраняется в атмосфере, а грубодисперсная фракция уменьшается почти до 0. После дождя крупнодисперсная фракция аэрозоля полностью восстанавливается в атмосфере только через несколько дней. В спектре появляется дополнительная полоса в области 1300 см^{-1} , связанная с увеличением содержания нитратов в аэрозоле. Уменьшение полосы в области 1400 см^{-1} , по сравнению с областью 1300 см^{-1} , связано с уменьшением неорганических карбонатов. Уменьшается содержание силикатов в субмикронной фракции аэрозоля.

Исследования основных оптических характеристик над Черным морем являются актуальными и востребованными еще с начала XX в., однако подробный анализ пространственно-временной изменчивости параметра Ангстрема для данного региона все еще малоизученная задача оптики моря и атмосферы.

Цель исследования – проведение сравнительного анализа и оценки значений параметра Ангстрема, полученных на черноморских станциях Севастополь и *Section_7* сети *AERONET* с весны 2019 г. по весну 2024 г. с использованием данных спутникового и наземного мониторинга, а также результатов моделирования динамики атмосферы.

Методы исследования и приборы

В работе использованы следующие типы данных об атмосферном аэрозоле: данные результатов измерений портативным фотометром *SPM* [17], фотометрами со станций международной сети аэрозольного мониторинга *AERONET*, радиометром *VIIRS* со спутника *Suomi NPP* [18–20]; данные моделей *HYSPLIT* и *SILAM*, а также концентрации частиц *PM2.5* и *PM10*, полученные с помощью измерений детектором *Espada M3*. Взвешенные частицы (англ.

particulate matter, PM) относятся к загрязнителям атмосферы, которые чаще всего анализируют по массовым концентрациям частиц.

Параметр Ангстрема (α) – название показателя степени в формуле зависимости оптической толщины аэрозоля от длины волны

$$\tau(\lambda)/\tau(\lambda_0) = (\lambda/\lambda_0)^{-\alpha}, \quad (1)$$

где $\tau(\lambda)$ – оптическая толщина на определенной длине волны; λ ; λ_0 – стандартная (опорная) длина волны ¹.

Аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы чаще всего вычисляется, согласно закону Бугера, по спектральному ослаблению прямого солнечного излучения. В этом случае для определения АОТ рассчитывается ослабление света вследствие молекулярного рассеяния Рэлея и поглощения газообразными составляющими атмосферы, которое затем вычитается из общей оптической толщины атмосферы [21]. АОТ является индикатором изменчивости оптических свойств атмосферы вследствие корреляции между концентрациями аэрозольных частиц и коэффициентами ослабления света, данные о которых получают благодаря широкому использованию методов спутникового дистанционного зондирования [22, 23]. В настоящее время широко исследуются различные аэрозольные фракции, т. е. распределение аэрозольных частиц в зависимости от их размера. Крупнодисперсная фракция (0,6–10 мкм) попадает в диапазон околонулевых значений показателей Ангстрема. Сложнее обстоит дело с субмикронной фракцией аэрозоля (0,1–0,6 мкм), поскольку параметр Ангстрема будет варьироваться при сдвиге максимума функции распределения по размерам внутри этого интервала.

В настоящей работе для расчета АОТ используются измерения фотометров (*SPM* и *CIMEL*) на длинах волн λ в диапазоне 340–2134 нм, за исключением канала 936 нм, по измерениям на котором определяют содержание паров воды в столбе атмосферы [17, 22, 23].

Набор радиометров для визуализации в видимом инфракрасном диапазоне *VIIRS* (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) предоставляет аэрозольные продукты *Deep Blue NASA Standard Level-2 (L2)* спутниковой системы *Joint Polar Satellite System (JPSS)*. *VIIRS* обеспечивает спутниковые измерения АОТ и аэрозольных свойств над сушей и океаном в виде ежедневных данных с шагом 6 мин. Для получения значений АОТ начиная с 17 февраля 2018 г. предложен алгоритм *VIIRS Deep Blue Aerosol (DB)* [21]. По результатам работы алгоритма создается массив научных данных, который содержит информацию о 55 слоях. Алгоритм *DB* создан для определения типа аэрозоля над сушей, а спутниковый алгоритм *Satellite Ocean Aerosol Retrieval (SOAR)* – над водой (акваториями). В результате обработки сигналов, полученных на определенных диапазонах работы *VIIRS*, по двум алгоритмам получают данные об АОТ «*L2 Deep Blue*», которые являются эталонными на длине волны 550 нм [18–20].

¹ *Ångström A.* On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air // *Geografiska Annaler*. 1929. Vol. 11, iss. 2. P. 156–166. <https://doi.org/10.1080/20014422.1929.11880498>
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 41 № 1 2025 105

Оба эти алгоритма позволяют определить тип атмосферного аэрозоля в дневное время при отсутствии облаков и снега. На суше тип аэрозоля классифицируется на основе значений АОТ, параметра Ангстрема (α), эквивалентной отражательной способности Ламберта (LER) и яркостной температуры. Комбинированный тип аэрозоля над сушей и океаном определяется на основе пикселей, прошедших проверку на качество [20].

Программный комплекс *SILAM* 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. Система компьютерного моделирования рассеивания загрязняющих веществ *SILAM*, разработанная Финским метеорологическим институтом, представляет собой современный мощный инструмент для моделирования рассеивающих свойств аэрозолей, газовых составляющих, частиц пыли, радионуклидов и природных аллергенов в атмосфере [24].

Модель *SILAM* предоставляет карты, где показаны концентрации мелких частиц диаметром до 2,5 мкм ($PM_{2.5}$) и крупных частиц 10 мкм (PM_{10}) на высоте 10 м над землей. Локальные загрязнения невозможно распознать с помощью модели *SILAM*, однако глобальные загрязнения она хорошо визуализирует [24–27].

Для нахождения источников различных типов аэрозолей над Черным морем в данной работе используется программный комплекс моделирования обратных траекторий перемещения потоков *HYSPLIT*². Для оценки концентрации взвешенных частиц используются результаты измерений детектором *Espada M3* (URL: <http://www.ocrkj.com>) китайского производства, которые позволяют контролировать качество воздуха по следующим параметрам:

- $PM_{2.5}$ – микрочастицы аэрозоля (диапазон измерения $PM_{2.5}$ и PM_{10} 0–2500 мкг/м³);
- PM_{10} – частицы аэрозоля с размерами более 10 мкм;
- *TVOC* – летучие органические соединения, включая токсичные бензол и стирол (диапазон измерения *TVOC* 0 – 2,5 мг/м³);
- *AQI* – общий индекс качества воздуха (англ. *Air Quality Index*) – один из интегрированных показателей загрязненности атмосферного воздуха. Индекс качества воздуха является кусочно-линейной функцией концентрации загрязняющих веществ в атмосфере: диоксида серы (SO_2), диоксида азота NO_2 , PM_{10} и $PM_{2.5}$, окиси углерода (CO) и озона (O_3). Для каждого из этих загрязнителей Агентство США по охране окружающей среды (*EPA*) установило национальные стандарты качества воздуха. В основе вычисления *AQI* – соотношение измеренной усредненной концентрации загрязнителя и стандартной (допустимой) концентрации этого загрязнителя.

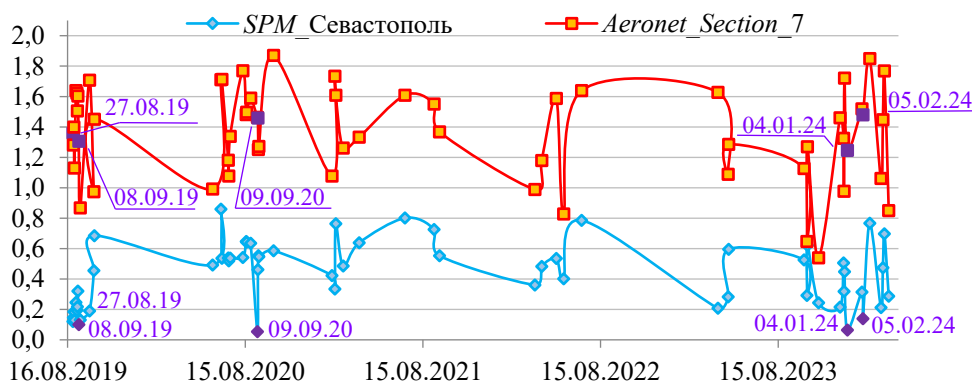
Детектор имеет цветной *TFT*-дисплей для отображения информации о состоянии воздуха на нескольких экранах. Светодиодное кольцо является инди-

² *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, 2010.

катором качества воздуха и может изменять цвет от зеленого до красного в зависимости от значений измеряемых параметров, где зеленый цвет соответствует норме, а красный – критическому уровню загрязнения.

Результаты

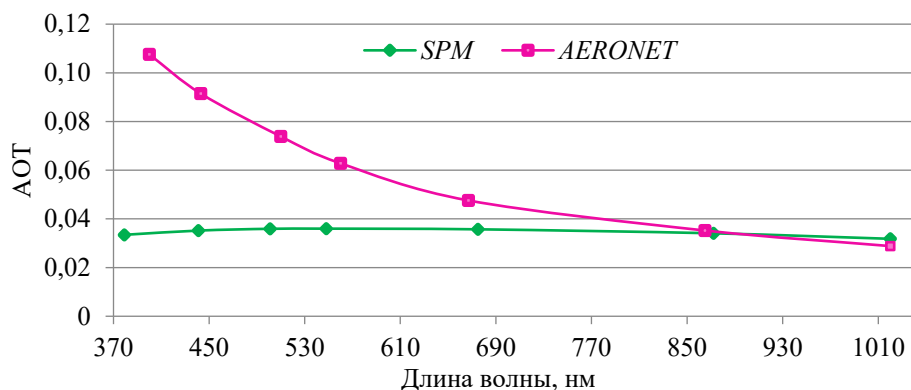
В результате выборки данных измерений фотометром *SPM* станции Севастополь и фотометром *CIMEL* станции *Section_7* международной сети *AERONET* за период с 27.08.2019 по 31.03.2024 были получены 60 дат, в которые рассчитанные значения параметра Ангстрема на станциях различались более чем в 2,5 раза. На рис. 1 выделены пять дат, в которые значения α различались более чем в 10 раз. Из 60 дат исследуемого периода в 17 из них были выявлены различия значений более чем в 5 раз. Максимальная разница значений параметра Ангстрема (более чем в 27 раз) была получена 09.09.2020 ($\alpha_{SPM} = 0,05$, а $\alpha_{AERONET} = 1,46$). Такая разница в значениях указывает на то, что в атмосфере над западной и центральной частями Черного моря наблюдались различные типы аэрозоля.



Р и с. 1. Параметр Ангстрема на станциях сети *AERONET* Севастополь по данным фотометра *SPM* и *Section_7* по данным фотометра *CIMEL*

F i g. 1. The Angstrom parameter values at the stations of *AERONET* network: Sevastopol – based on the *SPM* photometer data, and *Section_7* – based on the *CIMEL* photometer data

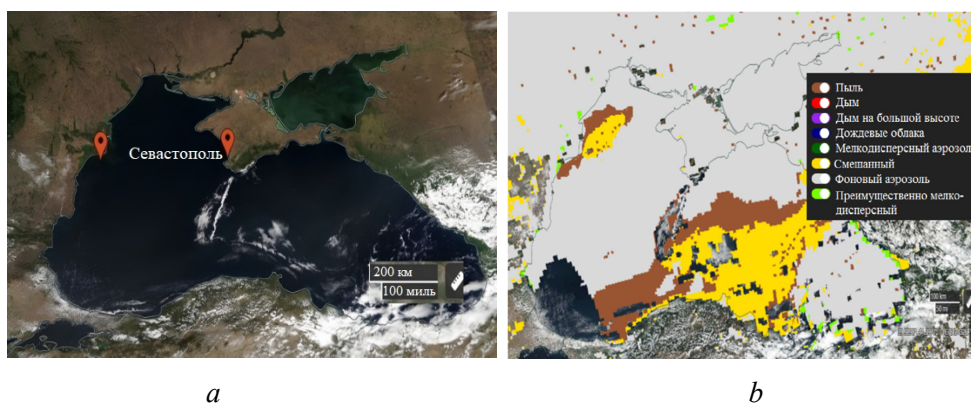
Анализ основных оптических характеристик показал, что спектральный ход АОТ, полученный по данным двух фотометров за 09.09.2020, сильно различается в диапазоне длин волн 380–680 нм. Например, сравнительный анализ значений АОТ на длине волны 500 нм ($AOT(500)$) показал разницу значений в два раза. Однако стоит отметить, что и на станции Севастополь, и на станции *Section_7* полученные значения АОТ в несколько раз ниже фоновых (для станции Севастополь $AOT(500) = 0,036$ при фоновой $AOT(500) = 0,18$, а для *Section_7* $AOT(510) = 0,074$ при фоновой $AOT(510) = 0,15$ (рис. 2)). При исследовании атмосферы над различными регионами для выявления аномальных ситуаций определяют фоновые характеристики атмосферного аэрозоля. В данной работе под фоновым аэрозолем подразумеваются средние значения оптических характеристик при исключении выбросов (скачков значений).



Р и с. 2. Спектральная изменчивость AOD на станциях сети *AERONET*: *Section_7* по данным измерений фотометра *CIMEL* и Севастополь по данным фотометра *SPM* за 09.09.2020

Fig. 2. Spectral variability of AOD values at the stations of *AERONET* network: *Section_7* – based on the *CIMEL* photometer measurements, and Sevastopol – based on the *SPM* photometer data on 09.09.2020

Анализ спутниковых изображений 09.09.2020 показал, что атмосфера над акваторией Черного моря была чистой (облачность минимальная) (рис. 3, *a*). Для всех исследуемых областей региона Черного моря по алгоритму *DB* был определен преимущественный тип аэрозоля за этот день: над западной частью Черного моря – пылевой и смешанный, а над станцией Севастополь – фоновый (рис. 3, *b*).

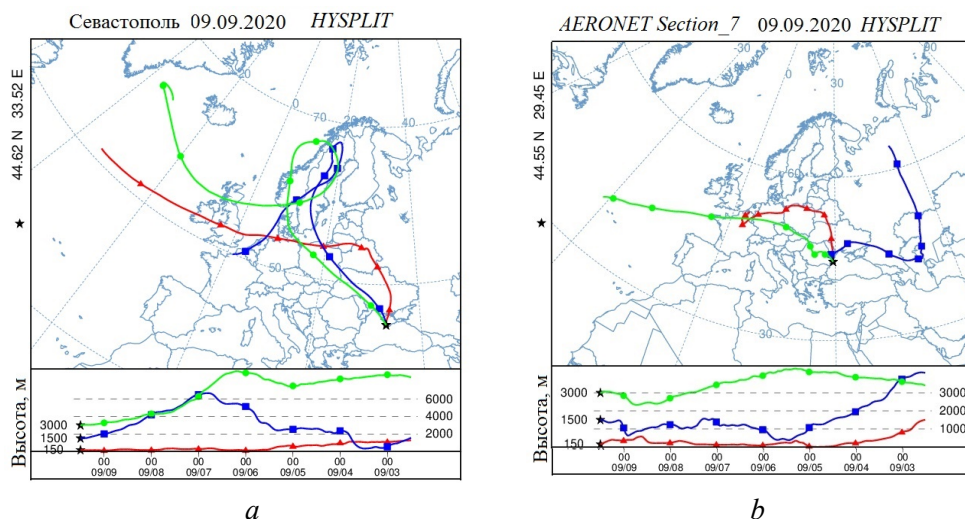


Р и с. 3. Спутниковые изображения спектро радиометра *VIIRS* за 09.09.2020: цветосинтезированное в естественных цветах (*TrueColor*) (*a*), полученное по алгоритму *Satellite Ocean Aerosol Retrieval* (*b*) (Источник: AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRTdoi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT.002; AERDB_L2_VIIRS_NOAA20doi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20.002)

Fig. 3. *VIIRS* spectroradiometer images: color-synthesized in natural colors (*TrueColor*) (*a*), and obtained using the *Satellite Ocean Aerosol Retrieval* algorithm (*b*) for 09.09.2020 (Source: AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRTdoi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20_NRT.002; AERDB_L2_VIIRS_NOAA20doi:10.5067/VIIRS/AERDB_L2_VIIRS_NOAA20.002)

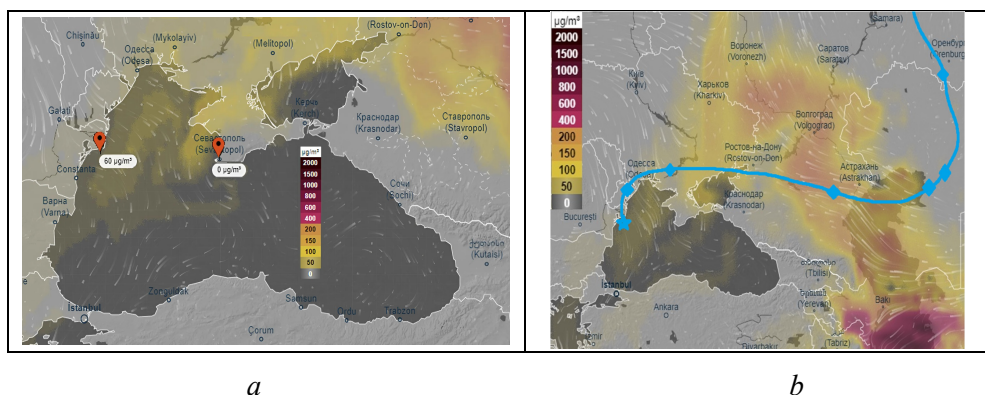
Для дня с максимальной разницей значений α были проанализированы данные моделирования обратных траекторий воздушных потоков *HYSPLIT*

(рис. 4) и данные о загрузке пылевым аэрозолем *SILAM* (рис. 5). По результатам модели *HYSPLIT* видно, что на двух высотах (2000 и 3000 м) для обеих станций регистрируется перенос с северо-востока. Данные о направлении переноса на высоте 1500 м различаются: для западной черноморской станции *Section_7* наблюдается перенос с северо-востока, а для станции Севастополь (как и на двух других высотах) – с северо-запада (рис. 4, а).



Р и с. 4. Обратные траектории переноса воздушных потоков по результатам моделирования *HYSPLIT* за 09.09.2020 г. для станций сети *AERONET*: Севастополь (а) и *Section_7* (b) (URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)

F i g. 4. Reverse trajectories of air flow transfer based on the results of *HYSPLIT* modeling for the stations of *AERONET* network: Sevastopol (a) and *Section_7* (b) for 09.09.2020 (URL: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)



Р и с. 5. Результаты моделирования концентрации пыли в атмосфере по данным *SILAM* для станций сети *AERONET* Севастополь и *Section_7* за 09.09.2020 г. (URL: <https://thredds.silam.fmi.fi/thredds/catalog/catalog.html>)

F i g. 5. Results of modeling dust concentration in the atmosphere based on the *SILAM* data for the stations of *AERONET* network Sevastopol and *Section_7* for 09.09.2020 (URL: <https://thredds.silam.fmi.fi/thredds/catalog/catalog.html>)

По данным модели *SILAM* о загрузке пылевым аэрозолем были получены концентрации пыли для обеих станций. Как видно из рис. 5, *a*, на станции Севастополь за 09.09.2020 концентрация пыли нулевая (пыль не обнаружена), тогда как на западной черноморской станции ее значение в 14:00 достигало 60 мкг/м^3 . Согласно рис. 5, *b*, источник пылевой активности за этот день переместился со стороны пустыни Каракумы вдоль Каспийского моря в сторону северо-запада, а обратные траектории по результатам модели *HYSPLIT* для станции *Section_7* проходили именно через область облака пыли (см. рис. 4, *b*).

В результате анализа изменчивости параметра Ангстрема (см. рис. 1) выделен период с 27.08.2019 по 30.09.2019, когда в течение всего месяца значения на двух станциях различались в 5 раз и более. Максимальная разница в 13 раз была получена 08.09.2019 ($\alpha_{\text{SPM}} = 0,1$, а $\alpha_{\text{AERONET}} = 1,31$), а минимальная разница в 5 раз – 06.09.2019 ($\alpha_{\text{SPM}} = 0,3$, а $\alpha_{\text{AERONET}} = 1,6$). На рис. 6 также выделены даты 27.08.2019 и 30.09.2019, когда значения параметра Ангстрема различались в 11 и 9 раз.

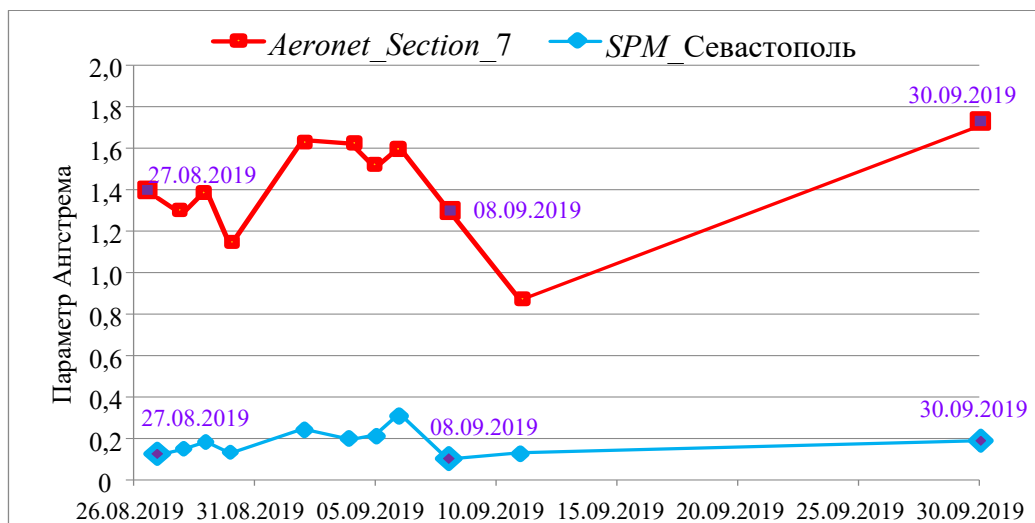


Рис. 6. Параметр Ангстрема для станций сети *AERONET* Севастополь и *Section_7* с 27.08.2019 по 30.09.2019

Fig. 6. The Angstrom parameter for the stations of *AERONET* network Sevastopol and *Section_7* for the period 27.08.2019–30.09.2019

Еще одной характеристикой качества атмосферного воздуха и аэрозоля является концентрация частиц *PM2.5* и *PM10*. Концентрацию частиц получают только для приземного слоя, именно поэтому характеристика не может полностью отражать ситуацию с аэрозольной загрузкой. Данная характеристика используется для оценки локальных выбросов, например вблизи промышленных предприятий или вблизи сельскохозяйственных полей, где используют химикаты для обработки от насекомых. АОТ, в отличие от концентрации взвешенных частиц, измеряется во всем столбе атмосферы [18, 22], поэтому именно ее анализ чаще используется для определения состояния атмосферы над исследуемым регионом.

Чтобы исключить воздействие локальных выбросов аэрозольных загрязнений, вызванных масштабными переносами аэрозоля за период с июня 2023 по май 2024 г., на точность определения концентрации частиц, был проанализирован набор данных, включающий значения концентраций частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} , полученные по данным детектора *Espada M3*, спектральные значения АОТ по данным фотометра *SPM*, спутниковые данные *VIIRS* и данные об аэрозоле по модели *SILAM*. Анализ всех этих данных необходим для оценки воздействия на поверхностный слой Черного моря осаждения аэрозоля. Выявление аэрозоля, содержащего микроэлементы (азот, фосфор и кремний), важно, так как при осаждении он попадает в верхний слой водоемов и в дальнейшем может вызывать кратковременный рост биопродуктивности фитопланктона [28–32]. Когда дополнительное поступление микроэлементов прекращается, биопродуктивность возвращается к первоначальному уровню.

Ранее для станции Севастополь были получены фоновые значения основных оптических характеристик [13, 33]. Для дней с такими характеристиками был проведен анализ изменчивости значений $PM_{2.5}$ и PM_{10} , который позволил получить фоновые значения концентрации мелких и крупных частиц: $PM_{2.5} = 7 \text{ мкг/м}^3$, $PM_{10} = 8 \text{ мкг/м}^3$.

В течение всего дня 30 ноября наблюдались низкие относительно фоновых значения АОТ (среднедневное значение $AOT(500) = 0,06$), однако значения концентрации частиц, по данным измерений детектора *Espada M3*, за этот день превышали фоновые более чем в три раза ($PM_{2.5} = 23 \text{ мкг/м}^3$, $PM_{10} = 25 \text{ мкг/м}^3$). Анализ вклада крупных и мелких частиц в общее распределение АОТ за этот день показал преимущество мелкодисперсного аэрозоля (85 %). Данные о концентрации частиц по модели *SILAM* показали минимальные расхождения с натурными данными (рис. 7). Такие значения АОТ и концентраций частиц показывают, что за 30.11.2023 аэрозоль не достиг слоев верхней атмосферы, аэрозольное воздействие было локальным в поверхностном слое атмосферы до 50 м (измерения проводились на высоте 45 м) и приземной аэрозоль внес минимальный вклад в общую величину АОТ всего слоя атмосферы.

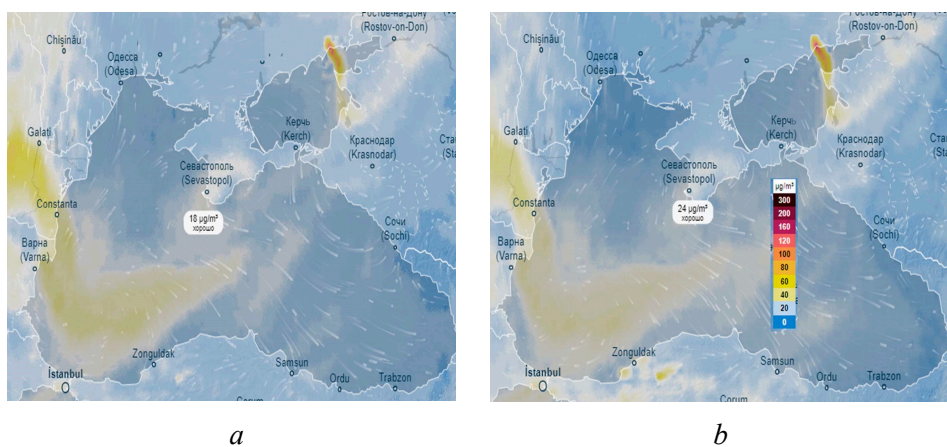
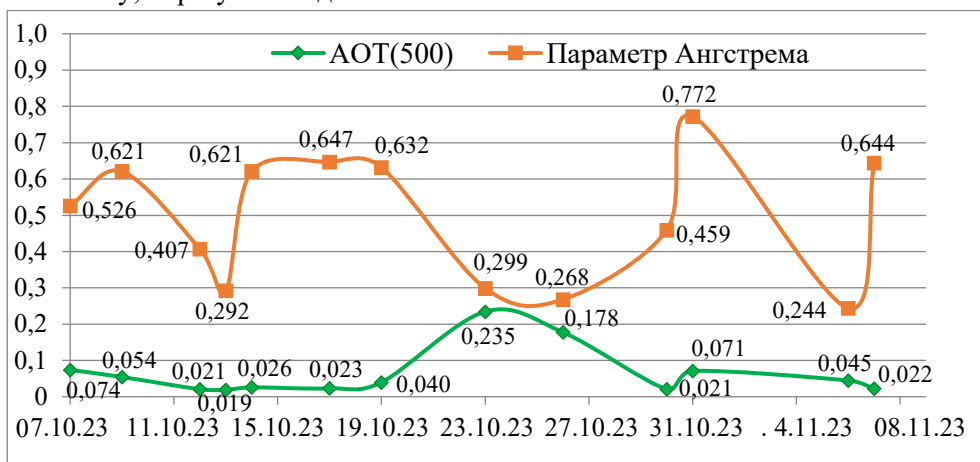


Рис. 7. Результаты моделирования концентрации частиц $PM_{2.5}$ (a); PM_{10} (b) по данным *SILAM* на 22:00 29.11.2021

Fig. 7. Results of simulating the concentrations of $PM_{2.5}$ (a) and PM_{10} (b) particles based on the *SILAM* data at 22:00 on 29.11.2021

В период с 07.10.2023 по 07.11.2023 были получены anomalно низкие значения параметра Ангстрема и АОТ (рис. 8). Из 13 дней измерений только за один день (23.10.2023) значения аэрозольной оптической толщины (АОТ(500) = 0,26) превышали фоновые, однако значения параметра Ангстрема ($\alpha = 0,3$) и за этот день были намного ниже фонового значения ($\alpha = 1,25$). Солнечная ясная погода наблюдалась 23.10.2023 до 14:00. Именно в этот дневной промежуток были получены отличающиеся от фоновых значения основных оптических характеристик, что соответствует присутствию в атмосфере аэрозоля, например пылевого аэрозоля или дыма. При этом, по данным детектора *Espada M3*, значения концентрации частиц $PM_{2.5}$ не превышали 12 мкг/м^3 , а PM_{10} – 13 мкг/м^3 .

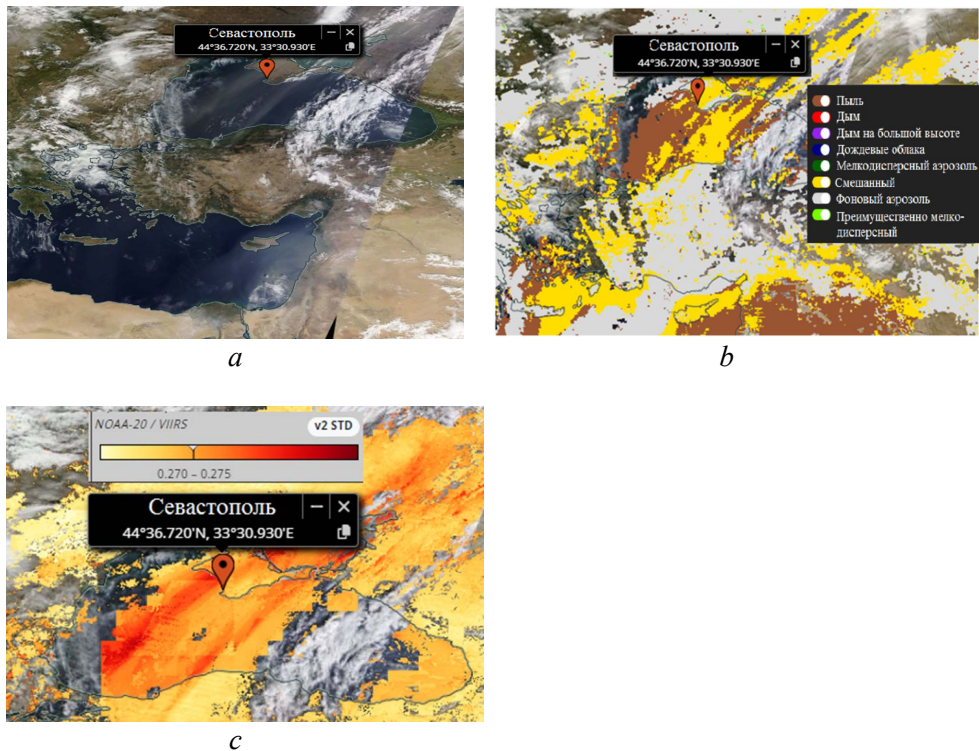
После 14:00 на небе появилась сплошная плотная дымка, которая не позволила продолжить измерения фотометром, однако измерения детектором не зависят от наличия солнца, поэтому мониторинг значений концентрации был продолжен. В результате измерений был зарегистрирован постепенный рост концентрации частиц: в 17:30 значения $PM_{2.5}$ составляли 27 мкг/м^3 , а PM_{10} – 34 мкг/м^3 , к 21:30 они достигли максимума – $PM_{2.5} = 31 \text{ мкг/м}^3$ и $PM_{10} = 36 \text{ мкг/м}^3$. Именно такой характер изменчивости параметров атмосферы говорит о том, что частицы аэрозоля в начале дня находились выше приземного слоя (что было подтверждено повышенными значениями АОТ), а затем, постепенно осаждааясь на подстилающую поверхность, стали коагулировать влагу, образуя слой дымки.



Р и с. 8. Параметр Ангстрема и АОТ(500) по данным фотометра *SPM* на станции Севастополь
F i g. 8. The Angstrom parameter and AOD(500) based on the *SPM* photometer data at Sevastopol station

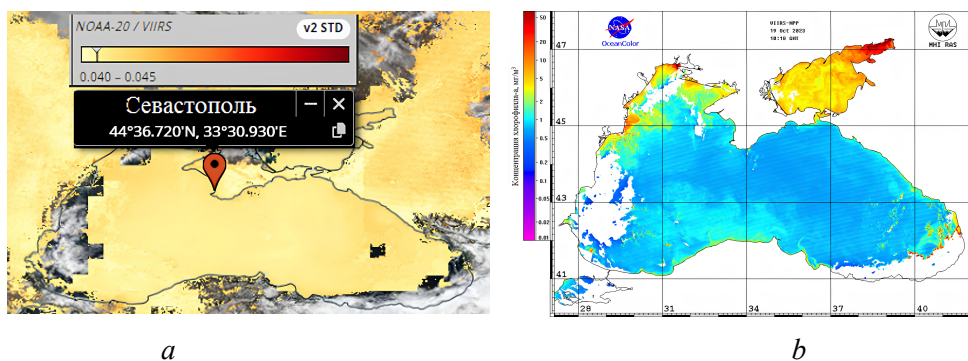
Стоит отметить, что в начале и середине дня крупные и мелкие частицы присутствовали в среднем количестве в приземном слое (данные детектора в пределах среднегодовых значений $PM_{2.5} = 11 \text{ мкг/м}^3$ и $PM_{10} = 12 \text{ мкг/м}^3$). После 14:00 началось интенсивное осаждение частиц аэрозоля, в результате к 21:30 максимальное их количество выпало на подстилающую поверхность, что подтверждается максимальными значениями концентрации частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} . Спутниковые данные подтверждают перенос пылевого аэрозоля 23.10.2023 со стороны пустыни Сахара (рис. 9, *a, b*). Значения *VIIRS* АОТ(500)

в интервале от 0,27 до 0,275 (отмеченные на шкале (рис.9, c)) близки к фотометрическим натурным значениям, полученным на станции Севастополь.



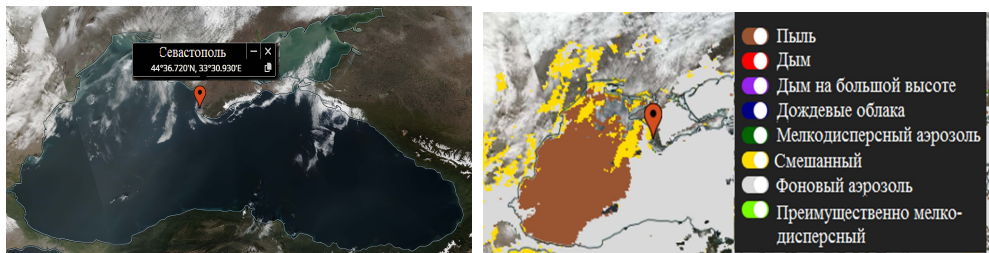
Р и с. 9. Спутниковые изображения пылевого переноса спектро радиометра VIIRS за 23.10.2023: цветосинтезированное в естественных цветах (*True Color*) (a); полученное по алгоритму *Satellite Ocean Aerosol Retrieval* (b) и по спутниковым измерениям AOD(500) (c)

F i g. 9. Satellite images of dust transfer obtained by the VIIRS spectroradiometer for 23.10.2023: color-synthesized in natural colors (*TrueColor*) (a); obtained using the *Satellite Ocean Aerosol Retrieval* algorithm (b) and obtained using satellite AOD(500) measurements (c)



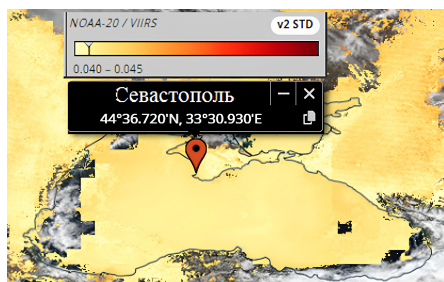
Р и с. 10. Пространственное распределение по спутниковым данным VIIRS, полученным над Черноморским регионом за 19.10.2023, аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм (a), концентрации хлорофилла a (b)

F i g. 10. Spatial distribution of aerosol optical depth at a wavelength 500 nm (a) and chlorophyll a concentration based on the VIIRS satellite data obtained over the Black Sea region (b) for 19.10.2023

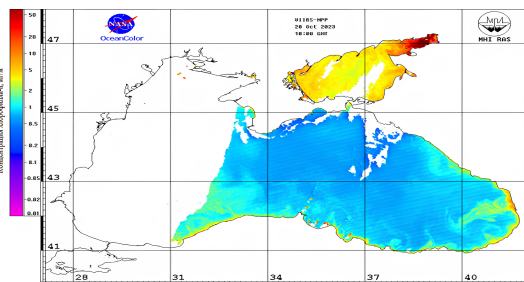


a

b

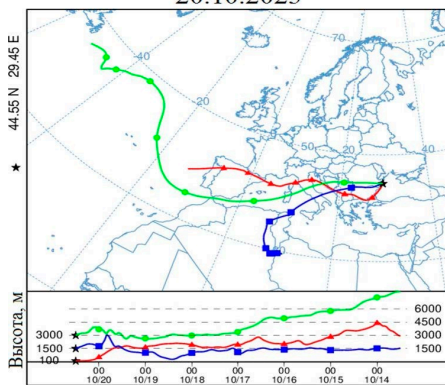


c



d

NOAA HYSPLIT MODEL
20.10.2023



e

Рис. 11. Спутниковое изображение: цветосинтезированное в естественных цветах (*TrueColor*) (*a*), полученное по алгоритму *Satellite Ocean Aerosol Retrieval* (*b*), по спутниковым измерениям АОТ(500) (*c*), концентрации хлорофилла *a* (*d*) по спутниковым данным *VIIRS* за 20.10.2023 над Черноморским регионом; обратные траектории переноса воздушных потоков по результатам моделирования *HYSPLIT* для западной черноморской станции

Fig. 11. Satellite images: color-synthesized in natural colors (*TrueColor*) (*a*), obtained using the *Satellite Ocean Aerosol Retrieval* algorithm (*b*), obtained using the AOD(500) satellite measurements (*c*) and chlorophyll *a* concentration (*d*) based on the *VIIRS* satellite data obtained over the Black Sea region on 20.10.2023; reverse trajectories of air flow transfer based on the results of *HYSPLIT* modeling for the western Black Sea station

В предыдущих исследованиях было показано, что над Черным морем регистрируются пылевые переносы длительностью от 1 до 10 сут [1, 13, 34].

Для определения начала переноса были проанализированы данные второй половины октября. Значения АОТ 19.10.2023, полученные на станции Севастополь по измерениям *SPM*, соответствовали значениям АОТ чистой атмосферы ($AOТ(500) = 0,040$), как и спутниковые данные *VIIRS* $AOТ(500) = 0,04$, которые полностью совпадают с натурными данными (отмечены на шкале АОТ (рис. 10, *a*)). Значения концентрации хлорофилла *a* за исследуемый день типичны для октября (рис. 10, *b*).

Уже 20.10.2023 параметры атмосферы над западной частью акватории и побережья Черного моря изменились и по фотометрическим, и по спутниковым, и по модельным данным. Именно дата 20.10.2023 является началом пылевого переноса со стороны пустыни Сахара (рис. 11). Как видно из рис. 11, западная часть акватории, в которой не определились значения концентрации хлорофилла *a*, не закрыта облаками, поэтому отсутствие данных можно объяснить только присутствием большого количества аэрозольных частиц над этой областью. Данный факт подтверждают высокие значения АОТ и доминирующий пылевой тип аэрозоля по данным радиометра *VIIRS* (рис. 11).

Анализ спутниковых, натуральных и модельных данных показал, что окончание пылевого переноса регистрируется над черноморскими станциями 29.10.2023 (пылевой шлейф за этот день сместился в сторону юго-западного побережья), а уже 30.10.2023 пылевой аэрозоль полностью отсутствует в атмосфере над всей акваторией и побережьем Черного моря. Это означает, что низкие значения параметра Ангстрема сами по себе не являются показателем наличия в атмосфере аэрозоля, такого как пыль или дым. Но в сочетании с высокими значениями аэрозольной оптической толщины и концентрации частиц *PM2.5* и *PM10* они дают основания утверждать, что над исследуемой областью находится аэрозоль этих двух типов (в то же время нельзя утверждать, что он присутствует над всем исследуемым регионом).

Заключение

Сравнительный анализ значений параметра Ангстрема на черноморских станциях Севастополь и *Section_7* позволил выявить даты, в которые на одной станции были зарегистрированы оптические характеристики, соответствующие пылевому аэрозолю, а на второй станции аэрозоль данного типа не был обнаружен. Это подтверждает различную аэрозольную загрузку над западной и центральной частями Черного моря и пространственную изменчивость основных оптических характеристик аэрозоля при регистрации пылевого переноса со стороны пустыни Сахара.

Проведенные измерения концентрации частиц *PM2.5* и *PM10* в дни с фоновыми оптическими характеристиками атмосферного аэрозоля позволили получить значения фоновых характеристик взвешенных частиц ($PM2.5 = 7 \text{ мкг/м}^3$, $PM10 = 8 \text{ мкг/м}^3$).

Главный вывод исследования: низкие значения параметра Ангстрема в комплексе с высокими (превышающими фоновые более чем в 1,5 раза) значениями аэрозольной оптической толщины, а также высокими (превышающими фоновые более чем в 3 раза) значениями концентрации частиц *PM2.5* и *PM10* являются показателем наличия в атмосфере над исследуемой

областью пылевого аэрозоля или дыма от пожаров. Однако если на фотометрической станции получены только низкие значения параметра Ангстрема, это не указывает на присутствие в атмосфере аэрозоля, такого как пыль или дым. В данной работе показано, что наличие аэрозоля этих типов над одной областью Черноморского региона (над Севастополем) не означает их наличие над всей акваторией Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kalinskaya D. V., Varenik A. V.* The research of the dust transport impact on the biogeochemical characteristics of the Black Sea surface layer // Proceeding of SPIE. SPIE, 2019. Vol. 11208 : 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 1120845. <https://doi.org/10.1117/12.2540432>. EDN TUJSHK.
2. *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. Т. 14, iss. 4. 831. EDN ETNGND. <https://doi.org/10.3390/rs14040831>
3. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. / О. В. Копелевич [и др.]. Москва : ИО РАН, 2018. 140 с.
4. *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 : ИКИ РАН, 2020. С. 216. EDN SEBHMT.
5. *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.
6. *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.
7. 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.
8. Уточненная интерпретация данных наблюдений Черного моря спутниковым прибором SeaWiFS осенью 1998 года / В. С. Суетин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 2. С. 68–79. EDN YORKCD.
9. *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.
10. Минералогический состав пылевого аэрозоля в период пылевых бурь / М. И. Ходжахон [и др.] // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2017. Т. 60, № 1–2. С. 64–67. EDN YUMUBH.
11. *Вареник А. В.* Неорганический азот в атмосферных осадках города Севастополя: источники, изменчивость и влияние на поверхностный слой прибрежных районов Черного моря // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28, № 6. С. 75–84. EDN ZXHLQR. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2017-6-75-84>
12. *Даченко Ю. С., Пуклаков В. В.* Прогноз развития фитопланктона в проектируемом низконапорном водохранилище на р. Дон // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 1. С. 57–67. EDN EJHZFN. <https://doi.org/10.31857/S0321059620010046>

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. *Костяной А. Г.* Спутниковый мониторинг параметров климатической системы Земли. Часть 1 – Океан // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 2. С. 63–85. EDN ZELKBD. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2017-2-63-85>
15. *Kok J. F., Renno N. O.* Enhancement of the emission of mineral dust aerosols by electric forces // Geophysical Research Letters. 2006. Vol. 33, iss. 19. L19S10. <https://doi.org/10.1029/2006GL026284>
16. *Назаров Б. И., Маслов В. А., Абдулаев С. Ф.* Оптические и микрофизические параметры аридного пылевого аэрозоля // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 4. С. 505–511. EDN MTIZSH.
17. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях / С. М. Сакерин [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117. EDN PKZHTN.
18. 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>
19. 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>
20. 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>
21. *Розенберг Г. В.* Оптические исследования атмосферного аэрозоля // Успехи физических наук. 1968. Т. 95, № 1. С. 159–208. <https://doi.org/10.3367/UFN.0095.1968051.0159>
22. *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>
23. 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)
24. 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>
25. 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>
26. 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. URL: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/7af36183-b475-4f92-8d91-19b5251f7e09/content> (data of access: 15.01.2025).
27. Variability of aerosol concentrations of fractions PM10 and PM2.5 in the atmosphere surface layer at the reference monitoring station Boyarsky / A. L. Dementeva [et al.] // Proceeding of SPIE. SPIE, 2019. Vol. 12780 : 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 127805X. <https://doi.org/10.1117/12.2690736>
28. *Migon C., Sandroni V.* Phosphorus in rainwater: Partitioning inputs and impact on the surface coastal ocean // Limnology and Oceanography. 1999. Vol. 44, iss. 4. P. 1160–1165. <https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.4.1160>
29. *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>

30. *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>
31. *Вареник А. В., Коновалов С. К.* Вклад атмосферных осадков в поступление биогенных элементов в районе крымского побережья // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления-III»). Ростов-на-Дону : ЮНЦ РАН, 2021. С. 253–256. EDN VJXXSP.
32. *Орехова Н. А.* Режим биогенных элементов Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 6. С. 710–726. EDN EFDKRY. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-6-710-726>
33. Результаты измерений аэрозольной оптической толщи атмосферы в Черноморском регионе (2015–2016) / Д. В. Калинская [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 6. С. 489–496. <https://doi.org/10.15372/AOO20170607>. EDN YTZDJT.
34. *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. <https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-3-399-415>

Об авторе:

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