

## Влияние циклона на пространственное распределение дымового аэрозоля от пожаров в мае 2021 года

Д. В. Калининская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ kalinskaya\_d\_v@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2022; одобрена после рецензирования 18.02.2022;  
принята к публикации 15.03.2022

### Аннотация

**Цель.** Проведено комплексное исследование дальнего переноса дымового аэрозоля с использованием средств спутникового и наземного мониторинга, а также результатов моделирования динамики атмосферы.

**Методы и результаты.** Рассмотрен период множественных интенсивных пожаров, зарегистрированных в Западной Сибири вблизи границы с Казахстаном в мае 2021 г. Для оценки масштабов и расположения активных пожаров за рассматриваемый период привлекались карты спутникового мониторинга из архивов системы *FIRMS*. При анализе спутниковых изображений выявлен перенос дыма от пожаров 9 и 10 мая в сторону Среднего Урала, подтвержденный фотометрическими измерениями на станции аэрозольного мониторинга *AERONET*. Для подтверждения переноса дыма со стороны Урала представлены результаты моделирования обратных траекторий перемещения воздушных потоков, выполненного с помощью программного комплекса *HYSPLIT*. Над территорией Волгоградской области 11 мая сформировался циклон, район Урала оказался на его периферии, что способствовало переносу дымового аэрозоля через Черноморский регион в сторону Финляндии на расстояние более 4000 км. Основная информация о стадиях формирования циклонической завихренности и переносе дымового аэрозоля была получена по данным со спутниковых платформ *MODIS Aqua*, *VIIRS* и *CALIPSO*. По спутниковым данным *VIIRS* проанализирована динамика изменчивости температуры поверхностного слоя и концентрации хлорофилла *a* в зоне максимального ветрового воздействия для Черноморского региона до и после прохождения циклона. Проанализированы также основные оптические и микрофизические характеристики атмосферного аэрозоля по данным портативного солнечного фотометра и солнечных стационарных фотометров сети *AERONET* за исследуемый период.

**Выводы.** В мае 2021 г. сложился ряд специфических метеорологических условий, которые способствовали накоплению дымового аэрозоля в атмосфере Среднего Урала и его последующему переносу сначала в Черноморский регион, а затем в сторону Финляндии.

**Ключевые слова:** *FIRMS*, *MODIS*, *VIIRS*, *SPM*, *AERONET*, *CALIPSO*, обратные траектории *HYSPLIT*, Черное море, атмосферный аэрозоль, аэрозоль, пожар, спутниковый мониторинг, наземный мониторинг, аэрозольная оптическая толщина, *MAIAC*, оптические характеристики

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, научный проект № 19-05-50023 и в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ № 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». Автор благодарит Тома Кусера (Tom Kusera), Брента Холбена (Brent Holben), Джузеппе Зиборди (Giuseppe Zibordi) и группу Жене Фельдмана (Gene Feldman) из *NASA* за предоставление данных AOT, расчеты данных *BTA*, обработку результатов измерений, полученных на севастопольской станции *AERONET*, и за возможность использования качественных данных фотометрических измерений. Автор также выражает признательность С. М. Сакерину и Д. М. Кабанову за предоставление фотометра *SPM* и программное обеспечение к нему.

© Калининская Д. В., 2022

Для цитирования: Калинин Д. В. Влияние циклона на пространственное распределение дымового аэрозоля от пожаров в мае 2021 года // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 324–340. doi:10.22449/0233-7584-2022-3-324-340

## Impact of the Cyclone on Spatial Distribution of the Smoke Aerosol Resulted from the Fires in May, 2021

D. V. Kalinskaya

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

✉ *kalinskaya\_d\_v@mail.ru*

### *Abstract*

*Purpose.* Using the satellite and ground-based monitoring, as well as the results of modeling the atmosphere dynamics, a long-range transport of smoke aerosol was comprehensively studied.

*Methods and Results.* The period of multiple and intense fires recorded in Western Siberia near the Kazakhstan border in May, 2021 was considered. To analyze the scales and locations of the most active fires during the period under consideration, the satellite monitoring maps from the FIRMS system archives were used. Being analyzed, the satellite images showed the smoke transfer on May, 9 and 10 towards the Middle Urals that was confirmed by photometric measurements at the AERONET aerial ash monitoring station. The results of modeling the air mass back transfer performed due to the HYSPLIT software were represented to confirm smoke transport from the Urals. On May, 11 a cyclone was formed over the territory of the Volgograd region, its periphery just covered the Urals region. This fact contributed to the smoke aerosol transfer towards Finland at a distance exceeding 4000 km via the Black Sea region. The basic information on the stages of the cyclonic vorticity formation and the smoke aerosol transport was obtained from the MODIS Aqua, VIIRS and CALIPSO satellite platforms. Based on the VIIRS satellite data, the dynamics of the surface layer temperature variability and the chlorophyll a concentration in the zone of the maximum wind impact in the Black Sea region before and after the cyclone passage were analyzed. The main optical and microphysical characteristics of the atmosphere aerosol for the period under study were also analyzed using the data from a portable sun photometer and the AERONET stationary ones.

*Conclusions.* A number of specific meteorological conditions which developed in May, 2021 promoted accumulation of the smoke aerosol in the atmosphere of the Middle Urals and its subsequent transport, first, to the Black Sea region and then – towards Finland.

**Keywords:** FIRMS, MODIS, VIIRS, SPM, AERONET, CALIPSO, HYSPLIT back trajectories, Black Sea, atmospheric aerosol, fire, satellite monitoring, land monitoring, aerosol optical depth, MAIAC, optical characteristics

**Acknowledgments:** the work was carried out with financial support of the Russian Foundation for Basic Research, scientific project No. 19-05-50023, and within the framework of the theme of state assignment of Marine Hydrophysical Institute, 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 marine environment, and mathematical modeling using remote and contact measurements”. The authors are thankful to Tom Kucsera, Brent Holben and Giuseppe Zibordi, and also to the group of Gene Feldman from NASA for providing the AOD data, calculating the BTA data, processing the measurement results obtained at the Sevastopol AERONET station, and for the possibility of using high-quality photometric measurement data. The author is also grateful to S. M. Sakerin and D. M. Kabanov for providing the SPM photometer and its software.

**For citation:** Kalinskaya, D.V., 2022. Impact of the Cyclone on Spatial Distribution of the Smoke Aerosol Resulted from the Fires in May, 2021. *Physical Oceanography*, 29(3), pp. 303-319. doi:10.22449/1573-160X-2022-3-303-319

## Введение

Точную оценку радиационного воздействия аэрозолей на климатическую систему осложняет недостаток информации об их временной и пространственной изменчивости, а также оптических и микрофизических свойствах [1, 2]. Для понимания динамики распределения аэрозолей необходимо исследовать влияние аэрозолей различных типов на глобальные и региональные изменения климата. Одним из преимуществ дистанционного метода исследования является его обширное покрытие по пространству. При этом неоднородности атмосферы (облачность, стратификация, изменчивость атмосферного давления и температурная инверсия) могут оказывать существенное влияние на качество полученных спутниковых данных и впоследствии на результаты их анализа <sup>1</sup>.

Наземные измерения позволяют скорректировать те неточности в определении полученных дистанционными методами оптических характеристик, которые были вызваны изменчивостью и аномалиями этих характеристик. Однако локальные измерения на отдельной станции не дают возможности полностью описать распределение аэрозолей над акваторией или наземным регионом из-за значительной пространственной и временной неоднородности аэрозольных частиц в атмосфере. Таким образом, сопоставление данных спутниковых и наземных наблюдений позволяет восстановить более полную картину распределения оптических характеристик атмосферы и оценить как локальные, так и глобальные случаи аэрозольного воздействия на климат (см. работу <sup>2</sup> и статьи [2, 3]).

Главными задачами космического мониторинга пожаров являются оперативное определение очагов возгорания и оценка площадей, пострадавших от пожаров. Для решения этих задач данные дистанционного зондирования *MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro Radiometer)* со спутников *Aqua* и *Terra* [4] используются в качестве базовых, а данные натуральных измерений оптических параметров атмосферы подстилающей поверхности – с целью уточнения.

## Приборы и материалы

Аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы вычисляется согласно закону Бугера по спектральному ослаблению прямого солнечного излучения. Для определения АОТ рассчитывается ослабление света вследствие молекулярного рассеяния Рэля и поглощения газообразными составляющими атмосферы, которое затем вычитается из общей оптической толщины атмосферы. Измерения фотометров используются для расчета АОТ на длинах волн  $\lambda$  за исключением канала 936 нм, по измерениям на котором определяют содержание паров воды в столбе атмосферы [5, 6]. АОТ является индикатором изменчивости оптических свойств атмосферы из-за корреляции между концентраци-

---

<sup>1</sup> Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии : Физика атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1984. 752 с.

<sup>2</sup> Ивлев Л. С. Влияние атмосферных аэрозолей на глобальный и региональный климат Земли // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем : сборник докладов. Санкт-Петербург : ГУАП, 2015. С. 117–119.

ями аэрозольных частиц и коэффициентами ослабления света, данные о которых получают благодаря широкому использованию методов спутникового дистанционного зондирования [2].

В работе использованы три типа данных об АОТ атмосферы: данные измерений, полученные со спутников *Terra* и *Aqua* спектрорадиометром *MODIS* [4], результаты наземных наблюдений, измеренные портативным фотометром *SPM* [7] для станции Севастополь, и данные фотометров со станций международной сети аэрозольного мониторинга *AERONET* [8, 9].

Благодаря спутниковому продукту *MODIS Aerosol Optical Depth (AOD)* уровня *L2* можно получить точное синоптическое представление об уровне загрузки аэрозоля в атмосфере. Аэрозоли поглощают и рассеивают падающий солнечный свет, что снижает видимость и увеличивает АОТ. Аэрозоли также влияют на погоду и климат, способствуя охлаждению или нагреву Земли, помогая образованию облаков или предотвращая его [10]. Спутниковые данные уровня *L3* представляют собой количественную информацию. Эти данные используются при прогнозировании воздействия аэрозолей в различных моделях.

Оценки АОТ, полученные с помощью алгоритма *MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction)*, характеризуют величину аэрозольного поглощения и рассеяния во всем столбе атмосферы<sup>3</sup>. С целью определения пространственно-временных особенностей АОТ для Черноморского региона были применены именно данные, рассчитанные с применением спутникового алгоритма *MAIAC*, так как они имеют высокое пространственное разрешение и доступны за период измерений радиометра *MODIS*. Сравнительный анализ этих данных и данных черноморских станций сети *AERONET* показал, что данные, полученные с помощью алгоритма *MAIAC*, имеют меньшие, по сравнению с другими аэрозольными продуктами *MODIS*, расхождения с данными наземных измерений. В настоящее время *MAIAC* является единственным алгоритмом, который позволяет получить высококачественную информацию об аэрозолях с пространственным разрешением 1 км, включая мелкомасштабные городские загрязнения, дым от активных пожаров (в том числе и небольших локальных пожаров) и пыльные бури. Продукты *MAIAC* позволяют фиксировать и точно типизировать аэрозоли при большинстве активных пожаров, которые часто распознаются как облака в стандартных рабочих алгоритмах атмосферной коррекции. Благодаря хорошей точности на всех типах подстилающей поверхности, включая яркие снежные и городские поверхности, продукт *MAIAC «AOD»* широко используется для контроля качества воздуха во всем мире. *MAIAC* предоставляет данные в условиях частичной облачности<sup>3</sup>, когда стандартные продукты с грубым разрешением не могут обеспечивать достоверной информацией об оптических характеристиках атмосферного слоя<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> *Lyapustin A., Wang Y.* MAIAC: Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS : Algorithm Theoretical Basis Document (ver. 1.0). URL: [https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/mis-sions-and-measurements/modis/MAIAC\\_ATBD\\_v1.pdf](https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/mis-sions-and-measurements/modis/MAIAC_ATBD_v1.pdf) (date of access: 23.05.2022).

<sup>4</sup> *Краснощёков К. В., Якубайлик О. Э.* Оценка качества атмосферного воздуха по спутниковым данным // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы VII Международной научной конференции. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2020. С. 236–239.

АОТ по данным *MODIS* и *MAIAC* – результат комбинации измерений спутников *Terra* и *Aqua*, информация о котором предоставляется в близком к реальному времени. При этом разрешение сенсора *MODIS* – 0,5°, разрешение снимков – 2 км, временное разрешение – суточное, а у продуктов *MAIAC* разрешение сенсора – 1 км, разрешение снимков – 1 км, временное разрешение – суточное<sup>4</sup>.

Чтобы сопоставить спутниковые и наземные измерения для корректировки неточностей, вызванных изменчивостью и аномалиями атмосферных параметров, были отобраны данные международной сети фотометров *AERONET*, находящиеся в свободном доступе на сайте <http://aeronet.gsfc.nasa.gov> [11].

Для Черноморского региона наземный мониторинг осуществлялся с использованием солнечного фотометра *SPM* – портативного прибора для измерений спектральной прозрачности атмосферы. Определение искомым характеристик атмосферы основывается на методе спектральной прозрачности – фотометрировании прямого солнечного излучения, прошедшего через атмосферу<sup>5</sup>, и дифференциальной методике [7, 12, 13].

Для определения местоположения и масштабов очагов возгорания использовались карты спутникового мониторинга активных пожаров, полученные из архивов системы *FIRMS* (URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>).

Для определения преимущественного типа аэрозоля за исследуемый период были проанализированы спутниковые данные *CALIPSO* – американо-французского исследовательского спутника, запущенного в рамках программы *NASA EOS (Earth Observing System)*, предназначенного для изучения облачного покрова Земли и вертикальной структуры атмосферного аэрозоля. Основным измерительным инструментом *CALIPSO* является трехканальный изображающий радиометр (8,65; 10,6 и 12,05 мкм). По измерениям *CALIPSO* можно восстанавливать вертикальную структуру атмосферы, а также определять преимущественный тип аэрозоля над исследуемым регионом.

Типы аэрозолей определяют по величине интегрированного коэффициента обратного рассеяния и коэффициента деполяризации частиц. Типы аэрозолей, определяемые по алгоритмам *CALIPSO*: дым (от горящей биомассы), пыль, загрязненная пыль (смеси пыли и дыма), загрязненный континентальный и чистый континентальный аэрозоль [14, 15]. Каждый тип аэрозоля характеризуется набором лидарных отношений на длинах волн 532 и 1064 нм. Лидарные отношения рассчитываются по типичным распределениям размеров частиц и комплексных показателей преломления [16–17].

Для получения информации об источнике дымового аэрозоля использовались результаты расчета обратных траекторий переноса воздушных масс, полученные с помощью программного комплекса модели *HYSPLIT*. Анализ обратных траекторий позволяет отследить перемещение воздушных потоков на разных высотах и установить местоположение вероятных источников поступления примесей в атмосферу [16–18].

---

<sup>5</sup> *Васильев М. С.* Исследования атмосферного аэрозоля и водяного пара в Якутии методами спектральной солнечной фотометрии // Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, с международным участием. Нерюнгри : Изд-во Технического института (ф) СВФУ, 2018. С. 225–228.

## Результаты

Дым от крупных лесных пожаров оказывает сильное влияние на радиационные характеристики атмосферы и является важной компонентой оптической погоды в ряде регионов. Пожары можно рассматривать как случайные эпизодические явления, но для бореальной климатической зоны в теплый период они являются типичными ситуациями [19].

В конце апреля и начале мая 2021 г. были зафиксированы множественные очаги возгорания на юге Среднего Урала и Западной Сибири. Площадь территории, охваченной этими пожарами, превысила 500 км<sup>2</sup>. По информации Уральского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, во многих районах на юге Свердловской области уровень пожарной опасности достиг чрезвычайного 5-го класса. Для этих областей такие масштабные пожары в мае – достаточно редкое явление (последний раз подобное наблюдалось в 2004 г. в Курганской области, однако тогда дым распространялся в другом направлении).

9 мая над территорией Урала сформировались благоприятные условия для развития первой стадии циклона: холодный воздух с севера начал перемещаться на юг в сторону теплого воздуха, образуя участок холодного фронта. Одновременно с юга теплый воздух начал перемещаться в сторону холодного, образуя теплый участок фронта. В результате слияния арктического и азиатского антициклонов 11 мая над территорией южного Урала сформировался крупный антициклон, а над территорией Волгоградской области – циклон с давлением в центре (49,474° с. ш., 45,773° в. д.) 1004 гПа, диаметром 1200 км на высоте 5 км (оценки проведены по данным сайта <https://www.ventusky.com>). По информации ГИС-центра ПГНИУ (URL: <http://accident.perm.ru>), 10 мая установился восточный ветер в нижней части тропосферы и продукты горения от пожаров начали распространяться в сторону Урала и далее по западной периферии антициклона вдоль Уральского хребта на север.

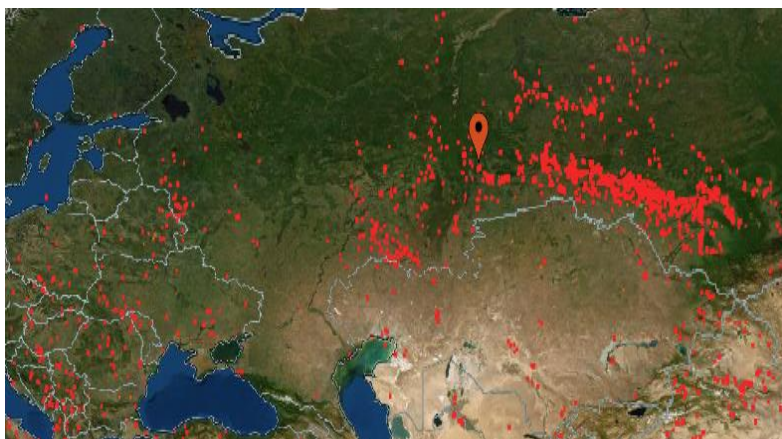
За сутки циклон со скоростью 20 км/ч переместился в направлении Ростовской области, где была зарегистрирована его максимальная интенсивность: на высоте 1 км максимальные орбитальные скорости достигали 100 км/ч, а на высоте 100 м орбитальные скорости не превышали 50 км/ч. По спутниковым данным за 11 мая были оценены размеры циклона: его диаметр составил около 2500 км на высоте 5 км, а зона пространственного воздействия распределения дымового аэрозоля (оцененная по данным за 13 мая) составила около 4000 км (рис. 1, а).

Для оценки степени воздействия циклона на пространственное распределение дыма от пожаров на Урале были проанализированы данные об оптических характеристиках атмосферного аэрозоля на станциях *AERONET* – сначала непосредственно вблизи пожаров до появления циклона (начиная с 9 мая), а затем на других станциях по ходу перемещения циклона за все дни, когда на спутниковых снимках наблюдалась дымка от пожаров (рис. 1, а).

10 мая регистрировались задымление и запах гари в Екатеринбурге, которые были обусловлены устойчивой атмосферой и слабым ветром, не способствовавшими перемешиванию приземного слоя атмосферы и ее очищению.



*a*



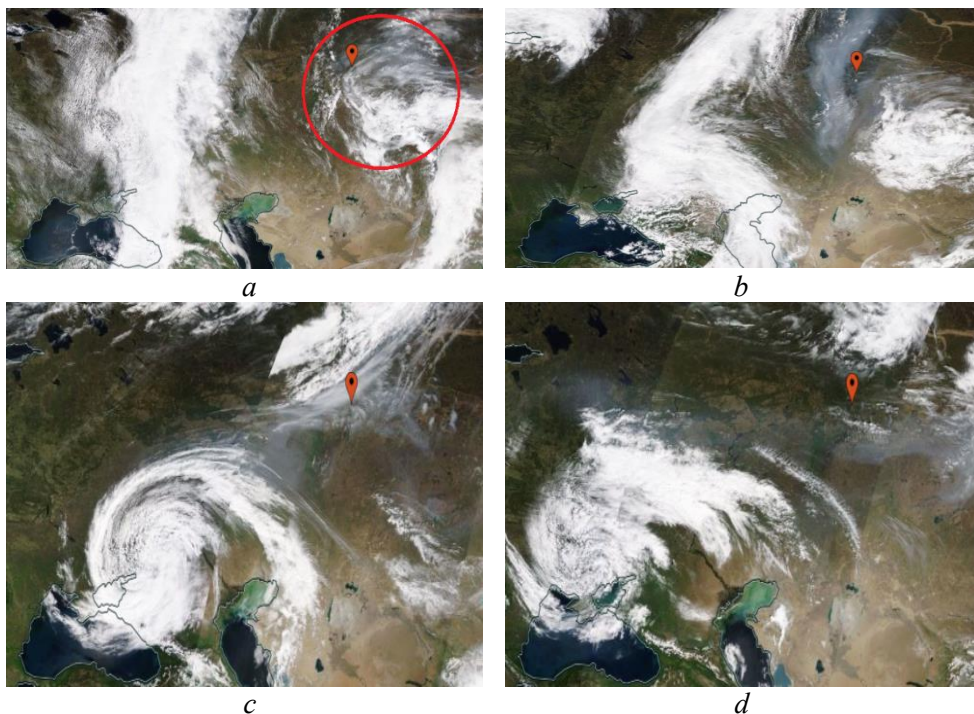
*b*

**Р и с. 1.** Полученное посредством спектро радиометра *MODIS* спутниковое изображение в естественных цветах (*TrueColor*) дошедшего до территории Финляндии дымового шлейфа за 13 мая 2021 г. (*a*); области интенсивных пожаров по данным системы *FIRMS* за 9 мая 2021 г. (*b*) (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

**F i g. 1.** *MODIS* spectroradiometer-derived satellite image (for May 13, 2021) of a smoke plume in natural colors (*TrueColor*) that reached the territory of Finland (*a*); areas of intense fires according to the *FIRMS* system for May 9, 2021 (*b*) (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

Ближайшей к зоне возгорания, по данным системы *FIRMS*, была станция *AERONET Yekaterinburg* ( $57,03833^{\circ}$  с. ш.,  $59,54500^{\circ}$  в. д.), которая отмечена маркером на рис. 1, *b*. Как видно из карт, других таких же интенсивных и масштабных областей возгорания нет. Данные об АОТ и распределении частиц по размерам подтвердили наличие большого количества мелкодисперсных аэрозольных частиц дыма в атмосфере над рассматриваемым регионом. Так, например, за 10 мая на станции *Yekaterinburg* среднее значение АОТ на длине волны 500 нм (АОТ (500)) равно 1,04, а максимальное значение за этот

день АОТ (500) составляет 3,2 (уровень данных обработки *AERONET level 1,5*). На рис. 2 маркер отмечает расположение станции *Yekaterinburg*, а кругом на рис. 2, *a* выделен регион, оказавшийся под воздействием дыма от пожаров. Как видно из рис. 2, *a*, дым от пожаров 9 мая покрывает территорию Свердловской области равномерно, однако 10 мая на границе раздела холодного континентального арктического воздуха и теплого континентального тропического воздуха образуется фронт окклюзии, содержащий область повышенной концентрации дымового аэрозоля, т. е. область стагнации, которая отличается от другой облачности по плотности и структуре (рис. 2, *b*).



**Р и с. 2.** Спутниковые цветосинтезированные изображения в естественных цветах (*TrueColor*), полученные посредством спектрорадиометра *MODIS* за 9 (*a*); 10 (*b*); 11 (*c*); 12 мая (*d*) 2021 г. (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

**F i g. 2.** Satellite color-synthesized images in natural colors (*TrueColor*) obtained using the *MODIS* spectroradiometer for May, 9 (*a*), May, 10 (*b*), May, 11(*c*) and 12 (*d*), 2021 (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

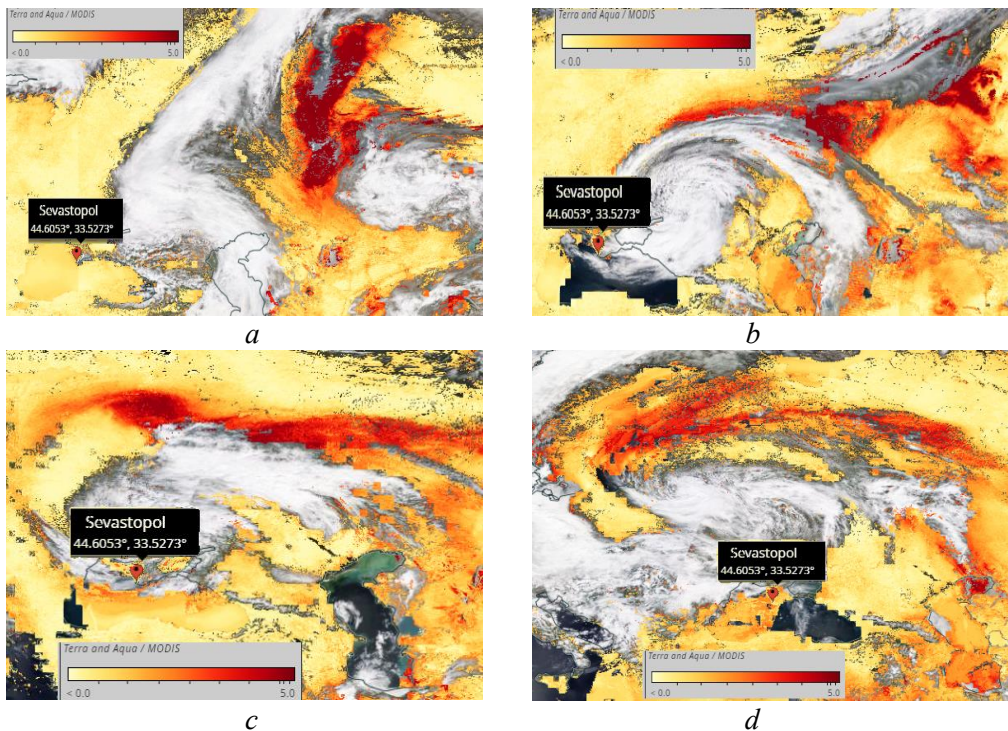
По данным *AERONET*, во время циклона преобладают мелкодисперсные частицы и наблюдаются низкие значения АОТ, что обусловлено выпадением в осадок основной части аэрозоля под воздействием силы тяжести и силы инерции. На любые частицы, взвешенные в потоке внутри циклона, действует, помимо центробежной силы, сила Кориолиса, которая стремится сместить их с криволинейных линий тока по касательным, направленным под некоторым углом вниз и к периферии.

Именно этот факт объясняет значения АОТ, полученные на станции *AERONET Kyiv* (50,364° с. ш., 30,497° в. д.) и Севастополь (44,616° с. ш., 33,517° в. д.) до и после прохождения циклона. На станции Севастополь значения аэрозольной оптической толщины, полученные посредством фотометра



SPM, следующие: за 10 мая АОТ (500) = 0,09; за 12 мая АОТ (500) = 0,1; за 13 мая среднедневная АОТ (500) = 0,08, минимальная за весь период с 9 по 13 мая АОТ (500) = 0,03. Такие низкие значения объясняются тем, что с 11 по 13 мая над Севастополем периодически шли дожди. Значения АОТ для станции *Kyiv* на длине волны 500 нм отсутствуют за 9–31 мая, поэтому анализ оптических характеристик аэрозоля для данной станции был сделан по данным, полученным на длине волны 675 нм (АОТ (675)). 12 мая значения АОТ очень низкие (АОТ (675) = 0,024), так как третья стадия развития циклона (максимальное развитие) к этому дню уже прошла и почти весь аэрозоль был вымыт из атмосферы осадками. За 13 мая на станции *Kyiv* АОТ (675) = 0,416, что выше среднемесячных значений за май 2021 г. (АОТ (675) = 0,165) в 2,5 раза, так как дымовой аэрозоль в этот день также наблюдался над станцией.

После прохождения циклона воздействие дыма могло наблюдаться также на российских станциях *AERONET Moscow\_MSU\_MO* (55,707° с. ш., 37,522° в. д.), *Zvenigorod* (55,695° с. ш., 36,775° в. д.) и станции *Minsk* (53,920° с. ш., 27,601° в. д.), расположенной в Белоруссии. Однако до и во время циклона, что видно на спутниковых изображениях, станция *Minsk* находилась на удалении от дымового шлейфа, а 12, 13 и 14 мая на всех трех станциях была зарегистрирована облачность, поэтому данные об оптических характеристиках атмосферного аэрозоля отсутствуют.



**Р и с. 3.** Распределение АОТ по данным *MODIS* за 10 (a), 11 (b), 12 (c), 13 мая (d) 2021 г. (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

**Fig. 3.** Distribution of aerosol optical thickness according to the *MODIS* data for May, 10 (a), 11 (b), 12 (c), 13 (d), 2021 (URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

Динамика изменчивости значений АОТ, полученных с помощью фотометров *AERONET* и по спутниковым данным *MODIS*, сходна (рис. 3). Однако данные об изменчивости АОТ, полученные дистанционными методами, превышают натурные значения в несколько раз, что подтверждается в предыдущих исследованиях [20, 21]. Отражательная способность воды и суши сильно различается, что обуславливает сложности при определении оптических характеристик с использованием одних и тех же алгоритмов и методов для различных типов подстилающей поверхности. Это приводит к тому, что неточность в оценке отражательной способности на величину 0,01 может привести к неточности оценки АОТ на величину 0,1 [22].

Как видно из рис. 3, облако дыма 10 мая содержит большую концентрацию аэрозольных частиц, которые в результате образовавшегося циклона частично заглубляются, при этом большая их часть распространяется по периферии (11 и 12 мая), а затем воздушными потоками они разносятся вплоть до Финского залива (13 мая) (рис. 1, а).

На рис. 4 показан вклад крупнодисперсной и мелкодисперсной фракций в общее распределение АОТ на длине волны 500 нм для трех станций. Как видно из рисунка, во время регистрации переноса дымового аэрозоля (на станции *Yekaterinburg* 10 мая 2021 г. и на станциях *Kuopio* и *Hyytiala* 13 мая 2021 г.) заметен рост значений АОТ, причем именно за счет мелкодисперсной фракции.

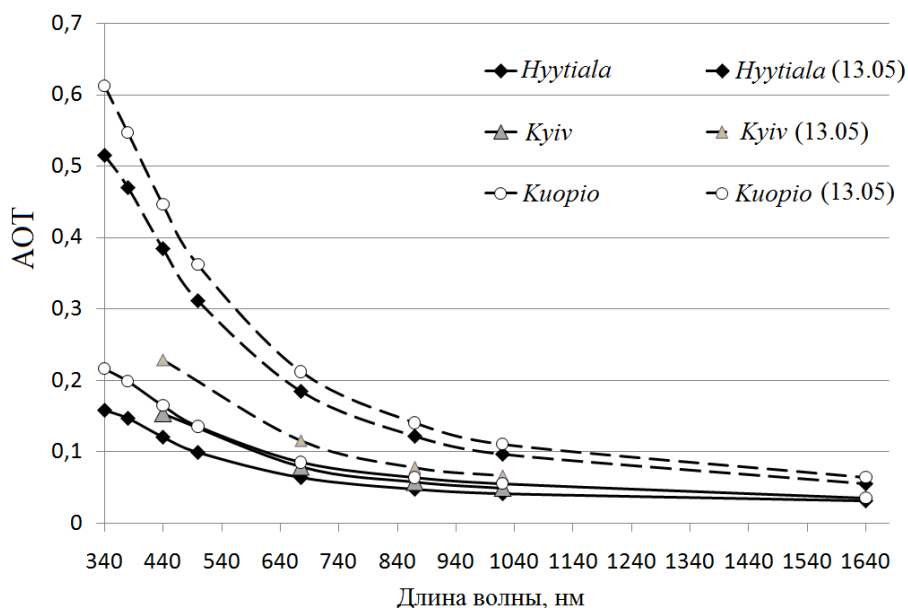
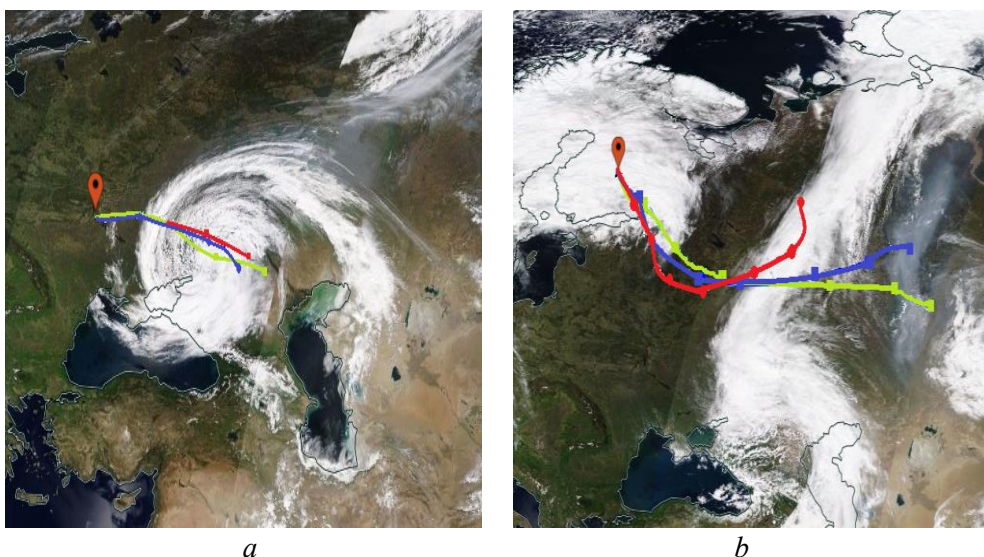


Рис. 4. Спектральная изменчивость АОТ для станций *AERONET* *Hyytiala*, *Kyiv* и *Kuopio*  
 Fig. 4. Spectral variability of AOT for the AERONET stations *Hyytiala*, *Kyiv* and *Kuopio*

По данным работы [19], для двух выделенных подмассивов данных «дым/фон» наиболее существенные изменения АОТ при дымах происходят в видимом диапазоне спектра за счет высоких значений мелкодисперсной компоненты. Например, в области 500 нм средние и модальные значения АОТ (500) увеличиваются в ~ 2,7 раза, а вклад мелкодисперсной моды – в три

раза. Грубодисперсная компонента в условиях дымов тоже возрастает – в среднем в 1,5 раза. Анализ данных, полученных для станций *Huutiala*, *Kuopio* и *Kyiv*, за дни регистрации дыма также показал увеличение мелкодисперсной моды в 1,5–3 раза (рис. 4).

Для подтверждения масштабов распространения дымового аэрозоля был проведен анализ данных модели *HYSPLIT*, предоставляющей обратные траектории перемещения воздушных потоков в направлении станций *AERONET* соответственно для каждого дня переноса (рис. 5). На рис. 5 показан результат моделирования обратных траекторий на высотах 250, 500 и 1500 м для станций: 1) *Kyiv* за 13 мая, где виден юго-восточный перенос на всех высотах через область, над которой господствовал циклон 11 мая (рис. 5, *a*); 2) *Kuopio*, где наблюдается восточный перенос со стороны Урала (результат моделирования за пять дней до дня регистрации дыма над Финляндией) (рис. 5, *b*).

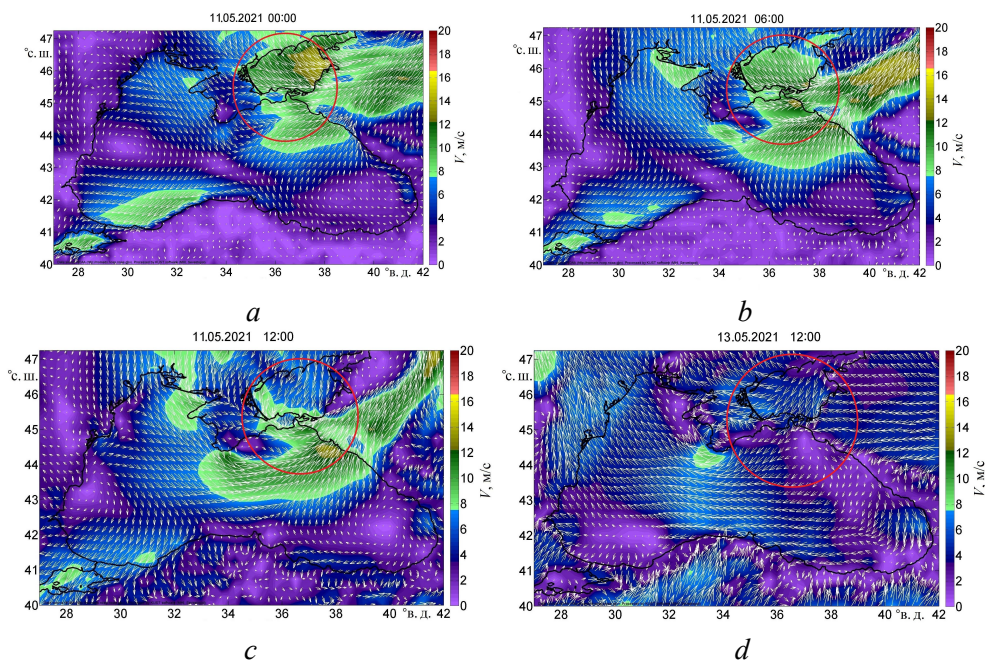


**Р и с. 5.** Обратные траектории переноса воздушных потоков по результатам моделирования *HYSPLIT* за 13 мая 2021 г. для станций *AERONET* *Kyiv* (*a*), *Kuopio* (*b*)

**F i g. 5.** Back trajectories of the air mass transfer based on the results of the *HYSPLIT* modeling for May 13, 2021 for the *AERONET* stations *Kyiv* (*a*) and *Kuopio* (*b*)

Возникновение и развитие циклона совпадает с началом интенсивного прогрева поверхностного слоя, который мог повлиять на изменчивость гидрофизических характеристик вод Черного моря. Для оценки масштабов воздействия циклона были проанализированы приземные скорости ветра до и во время прохождения циклона, а также пространственное распределение полей температуры и концентрации хлорофилла *a* для Черноморского региона.

В ночь с 10 на 11 мая максимальное ветровое воздействие (область которого выделена красным кругом на рис. 6) наблюдается в восточной части Азовского моря (скорость ветра  $V$  достигала 14 м/с), в восточной акватории Черного моря скорость ветра доходила до 8 м/с (рис. 6, *a*).



**Рис. 6.** Пространственное распределение направлений и скоростей приземного ветра над Черноморским регионом 11 мая в 00:00 (*a*), в 6:00 (*b*), в 12:00 (*c*); 13 мая в 12:00 (*d*)

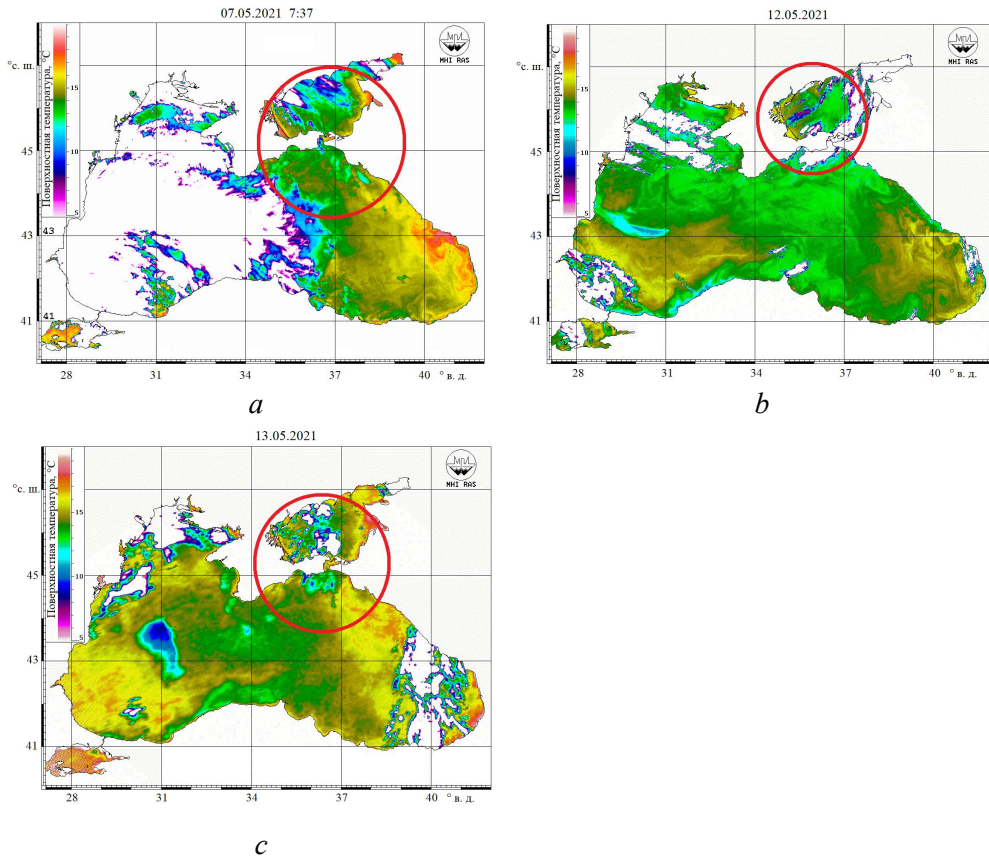
**Fig. 6.** Spatial distribution of the surface wind directions and velocities over the Black Sea region on May 11, 00:00 (*a*); May 11, 6:00 (*b*); May 11, 12:00 (*c*) and May 13, 12:00 (*d*)

11 мая в 6:00 вблизи Керченского пролива наблюдаются локальные максимумы скорости ветра ( $V \approx 15$  м/с), которые в течение дня смещаются на юг (рис. 6, *b*, *c*). К концу дня ветровое воздействие циклона минимизируется, а к полудню 13 мая в восточной части Черного моря наблюдается штиль (рис. 6, *d*). Изменчивость интенсивности и направления ветра во время прохождения циклона и после него повлияла на пространственное распределение полей температуры, особенно в зоне максимальных скоростей.

Как видно из рис. 7, *a*, еще до прохождения циклона (7 мая) в восточной части Черного моря наблюдался прогрев вод, характерный для начала мая ( $t_{cp} = 15$  °С).

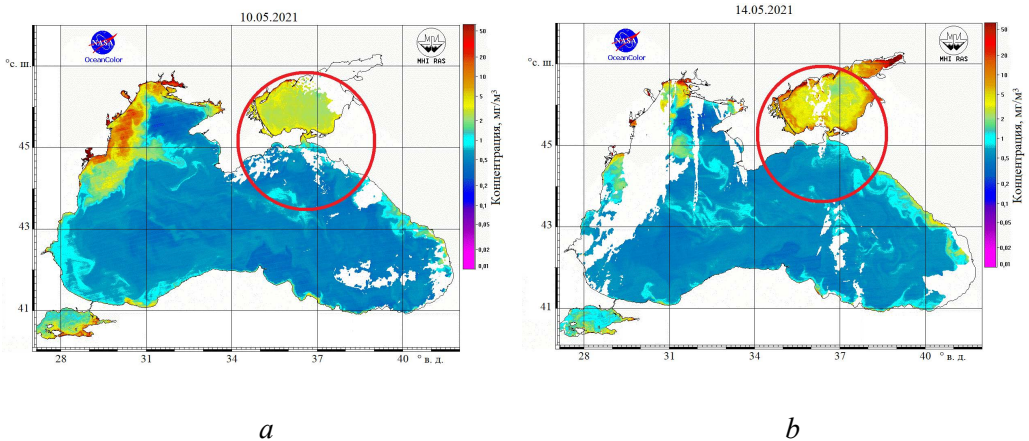
После прохождения циклона (12 мая) наблюдается понижение температуры в северо-восточной области на 2–3 °С (рис. 7, *b*), однако с 13 мая вновь возобновляется дневной прогрев поверхностных вод (рис. 7, *c*).

Оценка пространственной изменчивости концентрации хлорофилла *a* в зоне максимального ветрового воздействия для Черноморского региона показала минимальные различия значений концентрации до и после прохождения циклона (рис. 8).



**Р и с. 7.** Пространственное распределение полей температуры для акватории Черного моря 7 (а), 12 (б) и 13 мая (с) по спутниковым данным VIIRS

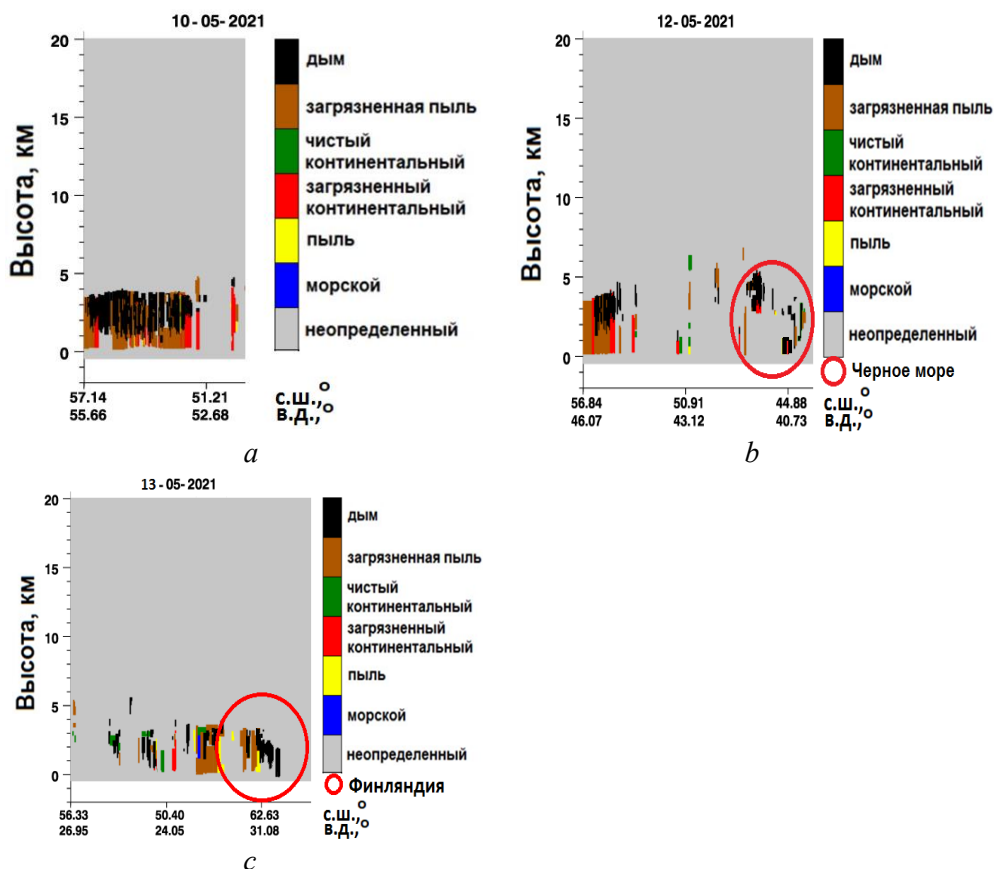
**Fig. 7.** Spatial distribution of surface temperature for the Black Sea region on May, 7 (a); May, 12 (b) and May, 13 (c) based on the VIIRS satellite data



**Р и с. 8.** Пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* над Черноморским регионом 10 (а) и 14 мая (б) по спутниковым данным VIIRS

**Fig. 8.** Spatial distribution of the chlorophyll *a* concentration over the Black Sea region on May, 10 (a); May, 14 (b) based on the VIIRS satellite data

Анализ спутниковых данных *CALIPSO* о типизации аэрозоля за 10 мая над территорией Урала (Свердловская область) подтвердил наличие частиц дыма от пожаров в приземном атмосферном столбе высотой до 5 км (рис. 9, *a*), 12 мая дымовой аэрозоль был зарегистрирован над территорией Черного моря (рис. 9, *b*), что подтверждает пространственное распределение данного типа аэрозоля по периферии циклона. Поскольку по спутниковым данным над акваторией Финского залива и территорией Финляндии было зарегистрировано облако дыма, анализ типов аэрозоля по данным *CALIPSO* за 13 мая был проведен для территории, ближайшей к станциям *AERONET Kuopio* и *Hyytiälä*. Как видно из рис. 9, *c*, над территорией Финляндии 13 мая был зарегистрирован дымовой аэрозоль.



**Р и с. 9.** Типизация аэрозоля по спутниковым данным *CALIPSO* над Уралом от 10 мая (*a*), над Черным морем от 12 мая (*b*), над Финляндией от 13 мая (*c*)

**F i g. 9.** Aerosol typing over the Urals on May, 10 (*a*), the Black Sea on May, 12 (*b*) and Finland on May, 13 (*c*) based on the *CALIPSO* satellite data

Сложился ряд факторов, способствующих глобальному переносу и распространению дымового аэрозоля:

1) множественные интенсивные пожары, регистрируемые в Западной Сибири вблизи границы с Казахстаном;

- 2) смена направления приземного ветра с западного на восточное 9 мая 2021 г. над областью интенсивных возгораний;
- 3) накопление дыма в области стагнации, расположенной над Свердловской областью;
- 4) одновременное образование циклона, смещающегося на юго-запад, и антициклона, смещающегося на северо-восток, 10 мая 2021 г.

### **Заключение**

Пожары на Урале регистрируются на протяжении всего года, однако особая пожарная активность наблюдается в весенне-летний период. С 8 по 11 мая 2021 г. были зарегистрированы множественные интенсивные пожары вблизи территории Западной Сибири и границы с Казахстаном. Образующийся в результате горения биомассы дымовой аэрозоль мелкодисперсный, поэтому может переноситься на тысячи километров от зоны зарождения при благоприятных метеорологических условиях.

10 мая установился восточный ветер в нижней части тропосферы, и продукты горения начали распространяться на Урал, а затем по западной периферии антициклона продолжили перемещаться вдоль Уральского хребта на север. Одним из факторов, благодаря которым аэрозоль может перемещаться на значительные расстояния, являются циклонические и антициклонические завихренности, которые и были зарегистрированы 11 мая 2021 г. Циклон, образовавшийся над территорией Волгоградской области, создал благоприятные условия, благодаря которым дымовой аэрозоль был перенесен от места пожаров, регистрируемых в Западной Сибири, в сторону Черного моря, а впоследствии – в направлении территории Финляндии.

По спутниковым данным *VIIRS*, температура поверхностных вод (наблюдавшийся с начала мая прогрев) после прохождения циклона в районе интенсивного ветрового воздействия уменьшилась на 2–3 °С. На пространственную изменчивость распределения хлорофилла *a* циклон не повлиял.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Clouds and aerosols / O. Boucher [et al.] // *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 2013. Chapter 7. P. 571–658. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.016>
2. *Плахина И. Н., Панкратова Н. В., Махоткина Е. Л.* Сравнение данных наземного и спутникового мониторинга аэрозольной оптической толщины атмосферы для территории России // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 2. С. 225–234. doi:10.21046/2070-7401-2018-15-2-225-234
3. *Гинзбург А. С., Губанова Д. П., Минашкин В. М.* Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // *Российский химический журнал*. 2008. Т. 52, № 5. С. 112–119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-estestvennyh-i-antropogennyh-aerозoley-na-globalnyy-i-regionalnyy-klimat/viewer> (дата обращения: 10.05.2022).

4. *Vermote E. F., Saleous N. Z., Justice C. O.* Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83, iss. 1–2. P. 97–111. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00089-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00089-5)
5. Оптические свойства черноморского аэрозоля и верхнего слоя морской воды по данным прямых и спутниковых измерений / В. В. Суслин [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 20–32. doi:10.22449/0233-7584-2016-1-20-32
6. *Яковлева Д. В., Толкаченко Г. А.* Исследование особенностей дневной изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы над Черным морем // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь, 2008. Вып. 16. С. 212–223.
7. 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.
8. *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. <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>
9. 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. [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)
10. Результаты измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы в Черноморском регионе (2015–2016) / Д. В. Калининская [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30, № 6. С. 489–496. doi:10.15372/AOO20170607
11. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols / T. F. Eck [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1999. Vol. 104, iss. D24. P. 31333–31349. <https://doi.org/10.1029/1999JD900923>
12. *Кабанов Д. М., Сакерин С. М.* О методике определения аэрозольной оптической толщины атмосферы в ближнем ИК-диапазоне спектра // *Оптика атмосферы и океана*. 1997. Т. 10, № 8. С. 866–875.
13. *Remer L. A., Kahn R. A., Koren I.* Aerosol indirect effects from satellite: Skeptics vs. Optimists // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. Vol. 73, iss. 13, supplement. A1088. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.014>
14. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm / A. H. Omar [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2009. Vol. 26, iss. 10. P. 1994–2014. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1231.1>
15. *Kalinskaya, D. V., Papkova A. S.* Identification of the marine aerosol by the CALIPSO radiometer over the Black Sea for 2017 // *Proceedings of SPIE*. Tomsk : SPIE, 2018. Vol. 10833 : 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 108335K. <https://doi.org/10.1117/12.2504520>
16. 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>
17. *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
18. *Калинская, Д. В., Папкина А. С., Кабанов Д. М.* Исследование изменчивости оптических и микрофизических характеристик аэрозолей над Черным морем под воздействием пожаров Причерноморья за 2018–2019 годы // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 5. С. 559–570. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-559-570



19. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / С. Ю. Андреев [и др.]. Томск : Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. 483 с.
20. Trends in MODIS and AERONET derived aerosol optical thickness over Northern Europe / P. Glantz [et al.] // *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2019. Vol. 71, iss. 1. 1554414. doi:10.1080/16000889.2018.1554414
21. *Schutgens N. A. J., Nakata M., Nakajima T.* Validation and empirical correction of MODIS AOT and AE over ocean // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2013. Vol. 6, iss. 9. P. 2455–2475. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2455-2013>
22. *Hauser A., Oesch D., Wunderle S.* NOAA AVHRR derived Aerosol Optical Depth (AOD) over Land: A comparison with AERONET Data // *Optica Pura y Aplicada*. 2004. Vol. 37, num. 3. P. 3131–3135. URL: [https://www.sedoptica.es/Menu\\_Volumenes/Pdfs/149.pdf](https://www.sedoptica.es/Menu_Volumenes/Pdfs/149.pdf) (date of access: 31.05.2022).

*Об авторах:*

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