

Исследование изменчивости оптических и микрофизических характеристик аэрозолей над Черным морем под воздействием пожаров Причерноморья за 2018–2019 годы

Д. В. Калининская^{1, *}, А. С. Папкина¹, Д. М. Кабанов²

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

*E-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru

Поступила в редакцию 12.12.2019 г., после доработки – 06.03.2020 г.

Цель. Наземным объектом исследования является Причерноморье, где регистрировались пожары по данным системы *FIRMS*, а также акватория Черного моря, где осуществлялся мониторинг изменчивости основных оптических характеристик атмосферного аэрозоля под воздействием пожаров. Цель работы – провести исследование пожаров, зарегистрированных на территории Причерноморья по данным системы *FIRMS* за 2018–2019 гг., для оценки корреляции этих событий с изменчивостью основных оптических характеристик над Черным морем.

Методы и результаты. Исследованы вариации мощности излучения от пожаров по данным системы *FIRMS*. Приведены результаты статистической обработки спутниковых данных *MODIS* и *VIIRS* о пожарах за 2018–2019 гг. Проанализированы основные оптические и микрофизические характеристики атмосферного аэрозоля по данным *SPM* и *AERONET* для дат с наибольшим количеством пожаров в Черноморском регионе. Проведен сравнительный анализ дат особой интенсивности пожаров по спутниковым данным *MODIS* и *VIIRS* и дат аномальных значений оптических характеристик атмосферного аэрозоля над исследуемым регионом.

Выводы. Для выявленных по спутниковым данным *MODIS* и *VIIRS* событий пожаров в Причерноморье проведены комплексный анализ переносов воздушных масс по модели *HYSPLIT* и типизация аэрозоля по алгоритму *CALIPSO*. Датой самых интенсивных пожаров за 2019 г. является 22 июля. Согласно типизации аэрозоля по алгоритму *CALIPSO*, преимущественными типами аэрозоля в исследуемый день являются загрязненная пыль и дым. Исследование возможного источника переноса аэрозоля в этот день по данным двух спутников *MODIS* и *VIIRS* показало, что область интенсивного возгорания и задымления расположена к северо-востоку от Черноморского региона. Поскольку в этот день, по спутниковым данным, перенос пыли со стороны как пустыни Сахара, так и Сирийской пустыни не был зафиксирован, то можно сделать вывод, что увеличение значений аэрозольной оптической толщины АОТ (500) было обусловлено переносом с севера именно аэрозоля, образующегося в результате сжигания биомассы, в регион Черного моря.

Ключевые слова: *EOSDIS*, *MODIS*, *VIIRS*, *SPM*, *AERONET*, *CALIPSO*, обратные траектории *HYSPLIT*, Черное море, дым, сажа, смог, поглощающий аэрозоль, термические аномалии, аэрозольная оптическая толщина.

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-50023 и темы госзадания № 0827-2019-0002. Авторы благодарят С. М. Сакерина за предоставленный фотометр *SPM* и программное обеспечение к нему.

Для цитирования: Калининская, 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

© Калининская Д. В., Папкина А. С., Кабанов Д. М., 2020

Research of the Aerosol Optical and Microphysical Characteristics of the Atmosphere over the Black Sea Region by the *FIRMS* System during the Forest Fires in 2018–2019

D. V. Kalinskaya^{1,*}, A. S. Papkova¹, D. M. Kabanov²

¹ *Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

² *Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia*

**e-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru*

Purpose. The Black Sea region where the forest fires were recorded by the *FIRMS* system, as well as the atmosphere above it, namely the fire-induced variation of the atmospheric aerosol basic optical characteristics, were the main objects of the investigation. The study is aimed at examining the fires in the Black Sea region in 2018–2019 for assessing correlation between these events and variability of the basic optical characteristics over the Black Sea.

Methods and Results. Based on the *FIRMS* system data, variations of intensity of the fire-induced radiation were studied. The results of statistical processing of the *MODIS* and *VIIRS* satellite data on the fires in 2018–2019 were represented. For the dates when the fire numbers were the highest in the Black Sea region, the basic optical and microphysical characteristics of the atmospheric aerosol were analyzed due to the *SPM* and *AERONET* data. The dates when the fire intensity was particularly high (based on the *MODIS* and *VIIRS* data) were analyzed and compared with the dates when the anomalous values of the atmospheric aerosol optical characteristics were recorded over the region under study.

Conclusions. For the fire events in the Black Sea region revealed due to the *MODIS* and *VIIRS* data, complex analysis of the air mass transfer was performed by the model *HYSPLIT*, and the aerosol was typed by the *CALIPSO* algorithm. On June 22, 2019 the most intense fires were recorded. According to the aerosol typing by the *CALIPSO* algorithm, on this day the predominant aerosol types were the contaminated dust and smoke. Using the *MODIS* and *VIIRS* data, investigation of possible source of the aerosol transfer on this date showed that the area of intense inflammation and smoke was located to the northeast from the Black Sea region. Since the satellite-derived data on this day showed no dust transfer either from the Sahara or the Syria deserts, it is possible to conclude that increase of the values of aerosol optical thickness AOD (500) was conditioned by transfer of the aerosol resulted from biomass burning from the north to the Black Sea region.

Keywords: *EOSDIS, MODIS, VIIRS, SPM, AERONET, CALIPSO, 7-day back trajectories, Black Sea, HYSPLIT, smoke, soot, smog, absorbing aerosol, thermal anomalies, optical thickness of aerosol.*

Acknowledgments: the investigation was carried out at the support of the RFBR grant No. 19-05-50023 and the state task theme No. 0827-2019-0002. The authors are grateful to S. M. Sakerin for providing the *SPM* photometer and the corresponding software.

For citation: Kalinskaya, D.V., Papkova, A.S. and Kabanov, D.M., 2020. Research of the Aerosol Optical and Microphysical Characteristics of the Atmosphere over the Black Sea Region by the *FIRMS* System during the Forest Fires in 2018–2019. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(5), pp. 514-524. doi:10.22449/1573-160X-2020-5-514-524

Введение

Пожары играют важную роль в формировании локальной, региональной, а также глобальной изменчивости свойств атмосферы. Проявляется это, например, в выбросах в атмосферу парниковых газов и аэрозоля. Выбросы в атмосферу аэрозоля, который образовался вследствие лесных пожаров, могут оказывать существенное влияние на микрофизические и оптические характеристики облаков, а следовательно, на процессы осадкообразования и в результате – на погоду целого региона [1; 2, с. 215].

Пожары вносят существенные изменения в естественные гидрофизические и экологические, а также биогеохимические циклы элементов. Увеличение масштабов углеродсодержащих эмиссий обуславливает неоднозначные изменения состояния климатически активных компонентов атмосферного слоя. К этим изменениям, в частности, относятся деформации микро- и макроструктуры облачных полей, вызванные активным проникновением дымовых аэрозолей в атмосферу. Изменения отражательной способности подстилающей поверхности ведут к трудно прогнозируемым вариациям радиационного форсинга [1, с. 126; 3, с. 247; 4].

Атмосферный аэрозоль и входящий в его состав сажевый аэрозоль являются радиационно-активными составляющими атмосферы, влияющими на изменение климата. В связи с этим значительный интерес представляет изучение источников сажесодержащего аэрозоля природного и антропогенного характера, таких как, например, лесные пожары и городской смог [1; 3, с. 247]. Сажа является побочным продуктом горения и оказывает существенное влияние на атмосферу, оседая на низко расположенных облаках и удерживая тепло Земли. Оценки изменчивости относительного содержания сажи в атмосферном аэрозоле важны для модернизации как эмпирических аэрозольных моделей, так и климатических оценок [3, 5]. Кроме того, благодаря воздушным потокам сажа перемещается на большие расстояния и оседает на любой подстилающей поверхности, снижая ее отражательную способность, что может вызывать, например, дополнительное таяние снегов и испарение воды [6].

Комплексное воздействие лесных пожаров на атмосферные характеристики затрудняет оценку истинного масштаба ущерба, наносимого исследуемому региону. В связи с этим создание современных междисциплинарных методов исследования пожаров является фундаментальной задачей при изучении и прогнозировании атмосферных процессов.

Приборы и материалы

Система *EOSDIS (Earth Observing System (EOS) Data and Information System)* – международная распределенная система баз космических данных, которая создана и функционирует в рамках экспериментального проекта по обмену каталогами *CINTEX (Catalog Interoperability Experiment)*. Информационная система *NASA EOSDIS* является основной структурообразующей частью *CINTEX*. В настоящее время в эту систему входят 15 центров хранения и обработки космических данных: 9 из США и по одному из Австралии, Германии, Израиля, Канады, России и Японии. Особенностью системы данных *EOSDIS*, а соответственно, и *CINTEX* является то, что поиск данных пользователем ведется одновременно по всем центрам данных, включенным в систему¹. *EOSDIS* обеспечивает все сервисы, необходимые для выполнения программы *EOS*, а именно: сбор и хранение данных, их обработку, предоставление средств удаленного доступа к каталогам данных справочной информации [7, с. 241]. Одной из особенностей программы *EOS* является возможность периодического структурирования необработанного архива данных с использованием обновленной информации о калибровке и геолокации [8].

¹ URL: <https://earthdata.nasa.gov/eosdis> (дата обращения: 06.08.2020).

Массив данных спектрального радиометра *MODIS*, а именно данных о термоаномалиях, или активных пожарах, является одним из продуктов *EOSDIS* [8]. Термоаномалии – первые дистанционно обнаруженные объекты с разрешением ~ 1 км, которые могли быть проанализированы в сравнительном соотношении с данными о задымленности, полученными с бортовых и наземных датчиков пожароопасной обстановки. До 2003 г. система мониторинга лесных пожаров основывалась на данных метеорологических спутников *NOAA* и радиометров высокого разрешения *AVHRR*. Оба массива спутниковых данных содержали обновляемую несколько раз в сутки информацию об одной и той же территории. Появление новых космических систем (*TERRA/AQUA*) на базе *MODIS* позволило расширить возможности дистанционных средств и методов мониторинга лесных пожаров. С 2003 г. введен в эксплуатацию модуль первичной и тематической обработки данных *MODIS* для создания производных продуктов – термоаномалий². Данные о пожарах *MODIS* использовались для решения широкого круга научных задач относительно воздействия аэрозоля, образующегося в результате сжигания биомассы, на климат Земли [9–10], а также многочисленных задач оперативного мониторинга и дистанционного зондирования [11, 12].

В работе проанализированы данные, предоставляемые системой *FIRMS* (*Fire Information for Resource Management System*), которая является частью *EOS (LANCE)*. Для анализа термоаномалий над Черным морем эта система пожарной информации в течение 3 ч после прохождения спутников над исследуемой областью предоставляет файл, содержащий координаты пожаров и информацию об их интенсивности, полученные *VIIRS* [13] и *MODIS* [14]. *VIIRS* – двухполосный радиометр, работающий в УФ-, ИК- и видимом диапазоне (0,45–12 мкм).

Основным параметром интенсивности температурной аномалии (пожара) является радиационная мощность пожара (англ. *Fire Radiative Power, FRP*). *FRP* определяет количество тепловой энергии, выделяемой за единицу времени при горении растительного покрова и измеряемой в МВт. В работе [15] использована методика вычисления показателя *FRP*, позволяющего оценить интегральную радиационную мощность теплоизлучения от термически активной зоны.

На основе методики обработки снимков в ИК-диапазоне (на канале 4 мкм) по данным *MODIS* и *VIIRS* исследованы вариации мощности излучения от пожаров. Обрабатывались снимки термически активных участков (термоаномалий), расположенных вблизи Черноморского региона, по спутниковым данным за период 2018–2019 гг. Каждая запись о пожаре в базе данных представляет из себя набор координат выявленных термически активных зон. Для каждого участка, обозначенного как термически активная зона, был вычислен показатель *FRP* и получены статистические данные о локализации и интенсивности лесных пожаров [3].

Для определения типа аэрозоля над исследуемым регионом были проанализированы спутниковые данные *CALIPSO*.

² Российская система дистанционного мониторинга лесных пожаров / Д. В. Ершов [и др.] // ArcReview. 2004. № 4. URL: https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1911&SECTION_ID=50 (дата обращения: 06.08.2020).

CALIPSO (*Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation*) – американско-французский исследовательский спутник, запущенный в рамках программы *NASA EOS* (*Earth Observing System*) и предназначенный для изучения облачного покрова Земли.

Основной целью *CALIPSO* является проведение глобальных измерений аэрозолей и облаков. Такие измерения необходимы для изучения степени влияния аэрозолей и облаков на климатическую систему, а также для уточнения прогноза долгосрочных и сезонных межгодовых изменений климата. *CALIPSO* работает в паре с американской системой *CLOUDSAT* (*Cloud Satellite*), представляющей собой направленный в надира радар (94 ГГц), который измеряет коэффициент обратного рассеивания от облаков в виде функции расстояния.

Основным измерительным инструментом *CALIPSO* является трехканальный радиометр (рабочие длины волн каналов 8,65 мкм, 10,6 мкм и 12,05 мкм). Поскольку система является лидаром, с ее помощью можно восстанавливать вертикальную структуру атмосферы. В отличие от солнечного света, «зеленый луч» (523 нм) *CALIPSO* является полностью поляризованным в одном направлении. Атмосферное рассеяние изменяет падающую поляризацию, и измерение степени деполяризации предоставляет огромное количество информации о природе частиц, в особенности их геометрии. Преимущественный тип аэрозоля зависит от местоположения измерения, от величины интегрированного коэффициента обратного рассеивания и коэффициента деполяризации частиц [16]. Типизация аэрозолей, используемая *CALIPSO*, производится из кластерного анализа *AERONET*. Выделяются следующие типы аэрозолей: дым (аэрозоль, образующийся от сжигания биомассы), пыль, загрязненная пыль (смеси пыли и дыма), загрязненный континентальный и чистый континентальный аэрозоль [16–18]. Каждый тип аэрозоля характеризуется набором лидарных соотношений на длинах волн 532 и 1064 нм. Эти соотношения рассчитаны по типичным распределениям размеров частиц и комплексных показателей преломления, взятых из базы данных измерений *AERONET* [19].

Для определения источника аэрозоля, образующегося от сжигания биомассы, был проведен анализ обратных траекторий переноса воздушных масс по модели *HYSPLIT*. Модель *HYSPLIT* (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model*) – это система для расчета траекторий воздушного потока, а также комплексного переноса, дисперсии, химического преобразования и моделирования осадков. Данная модель предоставляет обратный траекторный анализ для определения происхождения воздушных масс и установления отношений источник – рецептор. Данные *HYSPLIT* также используются в различных моделях, описывающих атмосферный перенос, диспергирование и осаждение загрязняющих веществ и опасных материалов.

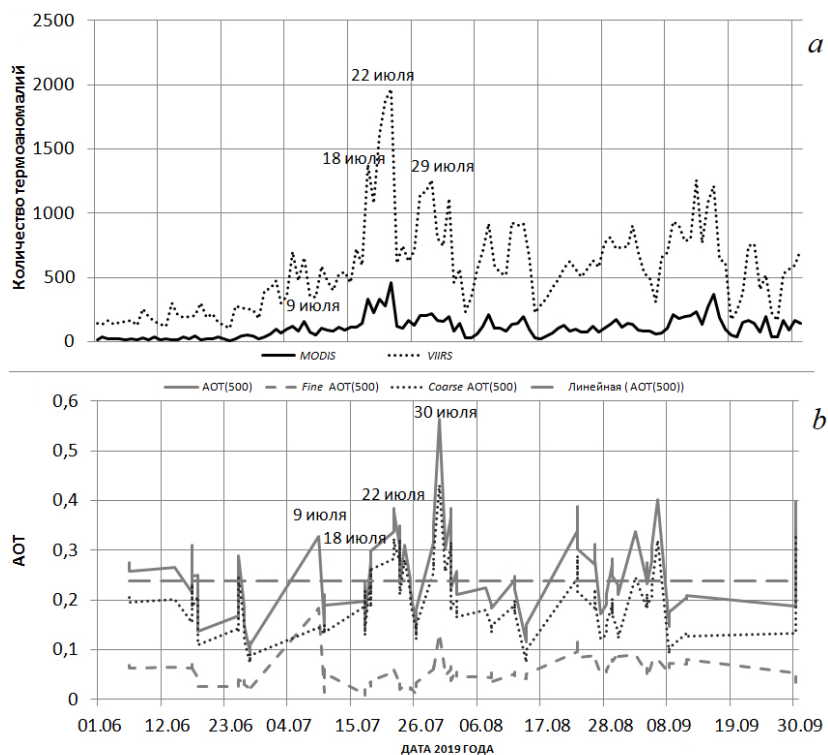
Метод расчета модели представляет собой гибрид между лагранжевым подходом, использующим движущуюся систему отсчета для расчетов адвекции и диффузии (когда траектории или воздушные массы перемещаются из своего первоначального местоположения), и методом Эйлера, который использует фиксированную трехмерную сетку в качестве системы отсчета для расчета концентраций загрязняющих веществ в воздухе. *HYSPLIT* развивает-

ся более 30 лет, начиная с оценки упрощенных единичных траекторий на основе радиозондовых наблюдений и заканчивая системой учета множественных взаимодействующих загрязняющих веществ, транспортируемых, диспергированных и осаждаемых в локальных и глобальных масштабах [20].

Результаты

Данные о пожарах *FIRMS*, хранящиеся на платформе *EOSDIS*, различаются: данные спутникового зонда *VIIRS* дополняются информацией о пожарах, обнаруженных по алгоритму *MODIS* за счет большего пространственного разрешения (375 м), что обеспечивает больший отклик от пожаров на относительно небольших участках [3].

Чтобы провести статистический анализ термоаномалий для региона Черного моря, в системе *FIRMS* была выделена исследуемая область и определен период наибольшей активности пожаров за 2018 и 2019 гг. – с июня по сентябрь 2019 г. Именно для этого периода далее представлены качественные и количественные результаты оценки пожаров. Количество точек возгорания по данным *MODIS* оказалось в 3–5 раз меньше, чем по данным *VIIRS* (рис. 1, *a*).



Р и с. 1. Количество пожаров по спутниковым данным *MODIS* и *VIIRS* за 2019 г. (*a*), временная изменчивость AOT по данным натурных измерений посредством *SPM* (*b*)

F i g. 1. Number of fires in 2019 based on the *MODIS* and *VIIRS* satellite data (*a*), AOD temporal variability based on *in situ* measurements by *SPM* (*b*)

Для комплексного анализа изменчивости оптических характеристик атмосферного аэрозоля в дни с пожарами, аномальными по интенсивности и по

количеству точек возгорания, вблизи акватории Черного моря, исследована временная изменчивость данных, полученных со спутников *VIIRS* и *MODIS*, и натурных данных фотометра *SPM* (аэрозольная оптическая толщина (AOT), а также вклад крупной (*Coarse* AOT (500)) и мелкодисперсной (*Fine* AOT(500)) фракции в общее распределение AOT) (рис. 1). В 2019 г. период с самым большим количеством пожаров – вторая половина июля: по данным *MODIS* количество точек возгораний составило 4707, а по данным *VIIRS* – 24108. В этом периоде также было отмечено максимальное (более чем в пять раз) расхождение в количестве термических аномалий по данным двух спутников (рис. 1, *a*). Как видно из рисунка, 22 июля 2019 г. наблюдался максимум количества и интенсивности термически активных точек. В этот день AOT, полученная посредством измерений фотометром *SPM* (0,36), превышала среднемесячное значение (0,25) в полтора раза.

За период пожаров, наибольших по количеству и интенсивности точек возгорания, на графике временного распределения AOT ее максимальное значение было зафиксировано 30 июля (рис. 1, *b*). Значения AOT за этот день на соседних черноморских станциях превышают среднемесячные значения за июль в 1,5–2 раза: на станции *Galata Platform* AOT (500) = 0,36 (при среднемесячном AOT (500) = 0,2), на станции *Gloria* AOT (500) = 0,34 (при среднемесячном AOT (500) = 0,265), на станции *Eforie* AOT (500) = 0,423 (при среднемесячном AOT (500) = 0,2). Оценка интенсивности и количества пожаров за 30 июля не показала максимального значения ни одного из этих параметров, однако за предыдущий день (29.07.2019) количество термоаномалий (1472) превышало среднемесячное (930) более чем в 1,5 раза. Так как 30.07.2019 не было зафиксировано экстремумов ни оптических характеристик, ни количества пожаров, комплексный анализ изменчивости основных оптических характеристик за 2019 г. в совокупности с исследованием спутниковых изображений и переносов воздушных масс был проведен за 22.07.2019, когда были зафиксированы и аномально высокие значения AOT, и максимальные показатели интенсивности и количества пожаров (рис. 1).

Для дней с максимумами AOT (по данным измерений фотометром *SPM*) (рис. 1, *b*) был проведен сравнительный анализ этих значений с максимумами AOT на длине волны 532 нм, полученными по алгоритму *CALIPSO ALay-Standard-V4*. Для этих дней также были проанализированы максимумы лидарных соотношений Sa , рассчитанных по формуле $Sa = \sigma / \beta$, где σ – коэффициент экстинкции, а β – значение функции рассеяния фазы при 180° (таблица).

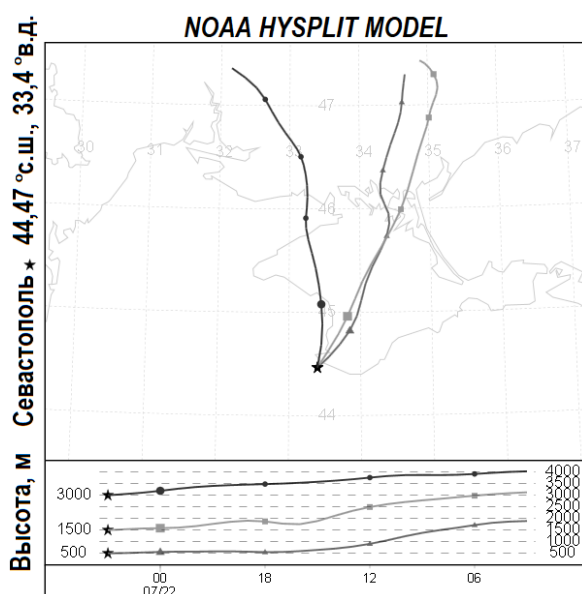
По классификации *CALIPSO* различных типов аэрозолей к смогу относят аэрозоли, лидарные коэффициенты которых на длине волны 532 нм имеют значения в пределах 70 ± 16 , а на длине волны 1064 нм – 30 ± 14 . Анализ данных, представленных в таблице, показал, что в дни с высокими (по данным измерений фотометром *SPM*) значениями AOT алгоритм *CALIPSO* выявил наличие смога над Черноморским регионом.

Увеличение AOT может быть обусловлено появлением в атмосфере поглощающих частиц, которыми являются пыль и дым [19–21]. Чтобы определить наличие и направление переноса поглощающего аэрозоля над Черноморским регионом 22 июля 2019 г., были проанализированы данные обратных траекторий модели *HYSPLIT* (рис. 2).

Значения AOT (по данным *SPM*) и лидарных соотношений *Sa_532*, *Sa_1064* (рассчитанные по алгоритму *CALIPSO*) в дни с максимальным количеством термоаномалий

Values of AOD (based on the *SPM* data) and lidar relations *Sa_532* and *Sa_1064* (calculated by the *CALIPSO* algorithm) on the days when the numbers of thermal anomalies were maximal

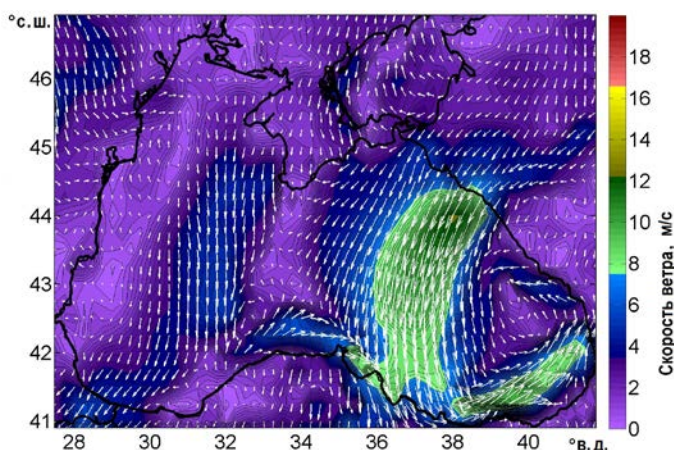
Дата /	AOT (532) / AOD (532)	<i>Sa_532</i>	<i>Sa_1064</i>
09.07.2019	0,24	70	44
18.07.2019	0,67	70	48
22.07.2019	0,78	70	48
30.07.2019	0,52	70	44



Р и с. 2. Обратные траектории по результатам моделирования *HYSPLIT* за 22.07.2019 г.
F i g. 2. Back trajectories based on the results of *HYSPLIT* modeling for 22.07.2019

Над регионом Черного моря преобладают ветры северо-западного, западного и юго-западного направлений, связанные с циркуляцией атмосферы в умеренных широтах Северного полушария. Анализ направлений ветра и обратных траекторий показал нетипичный для Черноморского региона перенос аэрозоля с севера и северо-востока в исследуемый регион в приземных слоях до 1,5 км (рис. 2, 3).

Для комплексного анализа источников аэрозоля, перенесенного с севера и способного повлиять на оптические характеристики аэрозоля над Черноморским регионом, были проанализированы карты пожаров, представленные в открытом доступе на платформе *EOSDIS* (координаты термоаномалий). Проведенный анализ массива данных *FRP* за 22.07.2019 выявил область возгораний между Запорожской и Донецкой областями (рис. 4).



Р и с. 3. Скорость и направление ветра в приземных слоях атмосферы за 22.07.2019 г.
F i g. 3. Wind speed and direction in the atmosphere surface layers on 22.07.2019



Р и с. 4. Распределение точек возгорания по спутниковым данным за 22 июля 2019 г.
F i g. 4. Distribution of the inflammation points based on the satellite data for July 22, 2019

Сажа является побочным продуктом горения биомассы и поглощает заметную долю падающей солнечной радиации, а значит, и влияет на величину АОТ атмосферы над исследуемым регионом. Для оценки масштабов распространения пожаров и сажевого аэрозоля были проанализированы данные основных оптических характеристик и обратных траекторий переноса воздушных масс как для Севастополя, так и для соседних западных черноморских станций *AERONET: Galata_Platform* (Болгария), *Eforie* и *Gloria* (Румыния). Анализ данных за тот же день не показал аномально высоких значений АОТ (500) ни на одной западной станции, однако на следующий день (23.07.2019) на всех этих станциях данные АОТ превышали среднемесячные значения за июль в 1,5–2 раза: на станции *Galata_Platform* АОТ (500) = 0,42 (при среднемесячном зна-

чении AOT (500) = 0,2), на станции *Gloria* AOT (500) = 0,435 (при среднемесячном AOT (500) = 0,265), на станции *Eforie* AOT (500) = 0,3 (при среднемесячном AOT (500) = 0,2). Максимальное значение AOT₅₃₂ по данным *CALIPSO*, равное 0,78, получено 22.07.2019, что совпадает с датой экстремально высоких значений AOT как по данным измерений *SPM*, так и по данным черноморских станций сети *AERONET*. Для подтверждения того факта, что именно аэрозоль, образующийся в результате сжигания биомассы, является причиной высоких значений AOT (500) за 22.07.2019, были проанализированы данные *CALIPSO* о типах аэрозоля над Черноморским регионом (рис. 5).

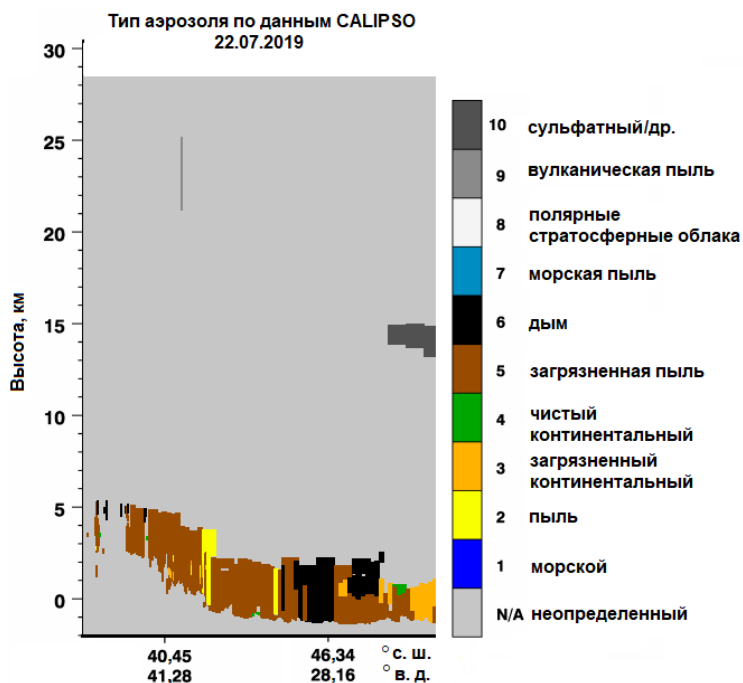


Рис. 5. Типизация аэрозоля по спутниковым данным *CALIPSO* за 22.07.2019 г.

Fig. 5. Aerosol typing based on the *CALIPSO* satellite data for 22.07.2019

Как видно из рис. 5, преимущественными типами аэрозоля за исследуемый день являются загрязненная пыль и дым. Этим обусловлены повышенные значения лидарных соотношений, характерные для смога, $Sa(532) = 70$ и $Sa(1064) = 48$. Поскольку 22.07.2019 г. перенос пыли со стороны как пустыни Сахара, так и Сирийской пустыни, по спутниковым данным, не был зафиксирован, то можно сделать вывод, что увеличение значений AOT (500) было обусловлено переносом с севера в регион Черного моря именно аэрозоля, образованного в результате сжигания биомассы.

Заклучение

Для случаев регистрации пожаров Причерноморья по спутниковым данным *MODIS* и *VIIRS* проведен комплексный анализ данных о переносах воздушных масс по модели *HYSPLIT* и спутниковых данных *CALIPSO* о типах

аэрозоля с целью выявить степень воздействия сжигания биомассы на атмосферу над Черноморским регионом. Анализ изменчивости основных оптических характеристик с 2018 по 2019 г. над Черным морем по данным сети *AERONET* и по данным фотометра *SPM* для дат интенсивных пожаров Причерноморья показал превышение дневных значений аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм (АОТ (500)) над среднемесячными в 1,5–2 раза. Датой наиболее интенсивных пожаров за 2019 г. является 22 июля.

Исследование возможного источника переноса аэрозоля за этот день по данным двух спутников *MODIS* и *VIIRS* показало, что область интенсивного возгорания и задымления расположена к северо-востоку от Черноморского региона. Преимущественными типами аэрозоля за исследуемый день по данным *CALIPSO* являются загрязненная пыль и дым. Так как каждый тип аэрозоля характеризуется определенным набором лидарных соотношений на длинах волн 532 (*Sa*₅₃₂) и 1064 нм (*Sa*₁₀₆₄), был проведен анализ этих характеристик для дней интенсивных пожаров за исследуемый период. Для 22.07.2019 были получены повышенные значения лидарных соотношений, характерные для смога: *Sa*₅₃₂ = 70 и *Sa*₁₀₆₄ = 48. Поскольку за этот день по спутниковым данным перенос пыли со стороны как пустыни Сахара, так и Сирийской пустыни не был зафиксирован, то можно сделать вывод, что увеличение значений АОТ (500) было обусловлено переносом с севера в регион Черного моря именно аэрозоля, образованного в результате сжигания биомассы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свойства атмосферного аэрозоля в дымовых шлейфах лесных пожаров по данным спектрофелометрических измерений / Р. Ф. Рахимов [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 126–133. URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/c29/c2994847f689f28f6980a2811da17e75.pdf> (дата обращения: 21.07.2020).
2. Калинин Д. В., Суслин В. В. Изменчивость оптических характеристик атмосферного аэрозоля над Черным морем во время летних пожаров 2010 г. // Труды международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». М. : ИО РАН, 2015. Т. 8. С. 215–219.
3. Калинин Д. В., Рябоконт Д. А. Исследование характеристик аэрозолей над Черным морем посредством системы FIRMS во время пожаров за период 2007–2018 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 4. С. 247–255. doi:10.21046/2070-7401-2019-16-4-247-255
4. Кондратьев К. Я., Григорьев Ал. А. Лесные пожары как компонент природной экодинамики // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 279–292.
5. Бондур В. Г., Гордо К. А., Кладов В. Л. Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории Северной Евразии по данным космического мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20. doi:10.7868/S0205961416060105
6. Комплексный подход в оценке эмиссии углеродсодержащих газов от лесных пожаров в Сибири / А. В. Панов [и др.] // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 30–38.
7. Саворский В. П. Узел распределенной системы космических данных ЦОХКИ ФИРЭ РАН // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1, № 1. С. 241–247.
8. The MODIS fire products / С. О. Justice [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83, iss. 1–2. P. 244–262. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00076-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00076-7)

9. Satellite observations of terrestrial water storage provide early warning information about drought and fire season severity in the Amazon / Y. Chen [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2013. Vol. 118, iss. 2. P. 495–504. doi:10.1002/jgrg.20046
10. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land / D. A. Chu [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29, iss. 12. P. MOD2-1-MOD2-4. doi:10.1029/2001GL013205
11. Fire and smoke remote sensing and modeling uncertainties: Case studies in Northern Sub-Saharan Africa / C. Ichoku [et al.] // *Natural Hazard Uncertainty Assessment: Modeling and Decision Support* / Eds. K. Riley, P. Webley, M. Thompson. Washington : AGU, 2016. P. 215–230. (Geophysical Monograph Series ; Vol. 223). doi:10.1002/9781119028116.ch14
12. An empirical model of optical and radiative characteristics of the tropospheric aerosol over West Siberia in summer / M. V. Panchenko [et al.] // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2012. Vol. 5, iss. 7. P. 1513–1527. https://doi.org/10.5194/amt-5-1513-2012
13. *Chuvieco E., Giglio L., Justice C.* Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data // *Global Change Biology*. 2008. Vol. 14, iss. 7. P. 1488–1502. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01585
14. *Glasius M., la Cour A., Lohse C.* Fossil and nonfossil carbon in fine particulate matter: A study of five European cities // *Journal of Geophysical Researches: Atmospheres*. 2011. Vol. 116, iss. D11. D11302. https://doi.org/10.1029/2011JD015646
15. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release / M. J. Wooster [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2005. Vol. 110, iss. D24. D24311. doi:10.1029/2005JD006318
16. 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. doi:10.1175/2009JTECHA1231.1
17. Comparison of CALIOP level 2 aerosol subtypes to aerosol types derived from AERONET inversion data / T. Mielonen [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36, iss. 18. L18804. doi:10.1029/2009GL039609
18. Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements / A. H. Omar [et al.] // *Journal of Geophysical Researches: Atmospheres*. 2005. Vol. 110, iss. D10. D10S14. doi:10.1029/2004JD004874
19. *Калинская Д. В., Папкова А. С.* Идентификация пылевого аэрозоля посредством радиометра CALIPSO над Черным морем // *Моря России: наука, безопасность, ресурсы : тезисы докладов научной конференции, Севастополь, 3–7 октября 2017 г. Севастополь : ФГБУН МГИ, 2017. С. 114–115.*
20. *Папкова А. С., Калинская Д. В.* Статистическое исследование переносов аэрозоля над Черноморским регионом в 2016 году по данным моделей HYSPLIT и AERONET // *Прикладные задачи математики : материалы XXV международной научно-технической конференции. Севастополь : СГУ, 2017. С. 145–148.*
21. *Калинская Д. В., Суслин В. В.* Исследование свойств аэрозолей над Черным морем во время события пылевой бури 2015 года // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. Вып. 3. С. 37–43.*

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

Папкова Анна Станиславовна, старший инженер-исследователь, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus Author ID: 57203015832**, hanna.parkova@gmail.com

Кабанов Дмитрий Михайлович, старший научный сотрудник, ИОА СО РАН (634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 6701750016**, dkaab@iao.ru