

Особенности идентификации оптических характеристик пылевого аэрозоля методами дистанционного зондирования в ИК–области спектра

А. С. Папкина^{1,*}, Д. В. Калининская^{1,†}, Ю. И. Папкина^{2,‡}

¹Морской гидрофизический институт РАН, отдел оптики и биофизики моря
Россия, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

²Севастопольский Государственный Университет, кафедра высшей математики
Россия, 299053, Севастополь, ул. Университетская, д. 33

(Статья поступила 04.03.2020; подписана в печать 07.05.2020)

Оптические характеристики минеральной пыли в настоящее время остаются неопределенными, что обосновывает необходимость анализа ее вклада в радиационный баланс и требует изучения свойств пыли на региональном уровне. Целью данной работы является определение оптических характеристик пылевого аэрозоля в ИК–области спектра над Черноморским регионом с последующей проверкой точности работы существующих алгоритмов его идентификации. В качестве источника данных использовалась международная сеть наземных фотометров AERONET (Aerosol Robotic Network) и данные результатов дистанционного зондирования радиометра CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization). В данной работе исследовались следующие оптические параметры аэрозоля: альbedo однократного рассеивания (SSA), лидарные соотношения (Sa), коэффициенты деполяризации и аэрозольная оптическая толщина (AOT) с последующим вычислением коэффициента запыленности. При $0.53 \leq Rd \leq 0.89$ можно утверждать, что аэрозоль смешанный пылевой, при значениях выше — чистый пылевой. При $0.90 \leq SSA \leq 0.95$ поглощение аэрозодем слабое, если же данный показатель выше, то поглощение сильное. На основании многолетней статистики была выявлена доминация смешанного пылевого аэрозоля со слабым поглощением для рассматриваемого региона. Сравнительный анализ данных моделей AERONET и CALIPSO показал высокую корреляцию результатов.

PACS: 42.68.Jg

УДК: 551.46.5

Ключевые слова: пылевой аэрозоль, AERONET, CALIPSO, коэффициент деполяризации, альbedo однократного рассеивания.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы исследованиям влияния пылевого аэрозоля на климат уделяют особое внимание в силу того, что именно этот тип аэрозоля обуславливает изменчивость падающей солнечной и отраженной от Земли радиации. Эти взаимодействия регулируются не только пространственно–временным распределением пылевого аэрозоля, но и его микрофизическими, оптическими и химическими свойствами. Большое влияние также оказывают региональные особенности (источник) происхождения пыли, например, оптические характеристики Сахарской и Азиатской пыли имеют ряд важных отличий, которые необходимо учитывать при проведении атмосферной коррекции спутниковых данных [1]. Дополнительные неопределенности возникают из-за процесса перемешивания и взаимодействия пыли с черным углеродом, органическим углеродом и неорганическими загрязнителями, такими как сульфаты [2]. Таким образом, количественная оценка минеральной пыли и анализ ее вклада в радиационный баланс остаются неопределенными, что создает необходимость изучения свойств пыли на региональ-

ном уровне для проверки точности работы существующих моделей с усвоением новых оперативных океанологических данных. Целью данной работы является сравнительный анализ оптических характеристик пылевого аэрозоля над Черноморским регионом с аналогичными характеристиками по данным существующих моделей, идентифицирующих различные типы аэрозолей в ИК–области.

1. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В качестве наиболее масштабного источника данных оптических характеристик аэрозоля служит международная сеть наземных фотометров AERONET (Aerosol Robotic Network), осуществляющая дистанционное зондирование ослабления прямого солнечного излучения, по которому определяются следующие оптические характеристики аэрозоля: аэрозольная оптическая толщина, альbedo однократного рассеивания, размер и степень деформации частицы, коэффициенты деполяризации, коэффициент яркости подстилающей поверхности и т.д. (AERONET: [Электронный ресурс]. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Для проведения сравнительного анализа данных оптических характеристик атмосферного аэрозоля над Черным морем в данной работе используются результаты измерений радиометра CALIPSO (The Cloud-Aerosol Lidar and In-

*E-mail: hanna.papkova@gmail.com

†E-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru

‡E-mail: yulia.papkova@gmail.com

frared Pathfinder Satellite Observation), который предоставляет информацию о вертикальном распределении пространственных и оптических свойств аэрозоля по всему земному шару [3].

По данным продуктов инверсии AERONET (V3) уровня 1 и 2 были проанализированы следующие оптические характеристики аэрозоля: альbedo однократного рассеивания (SSA), лидарные соотношения (Sa) и коэффициенты деполяризации. Для типизации пылевого аэрозоля над исследуемым регионом была использована методика, описанная в [4]. Для определения коэффициента запыленности атмосферы (Rd) по входным данным коэффициентов деполяризации используется формула:

$$Rd = \frac{(\delta_p - \delta_{pnd})(1 + \delta_{pd})}{(\delta_{pd} - \delta_{pnd})(1 + \delta_p)}, \quad (1)$$

где δ_{pnd} и δ_{pd} — коэффициенты деполяризации не пылевых (фоновых) аэрозольных частиц и частиц чистого пылевого аэрозоля. Соответствующие значения Rd могут быть определены как по лидарным данным, так и по данным измерений фотометрами сети AERONET [4, 5]. Для решения задачи был произведен поиск Rd по данным измерений AERONET на длине волны 1020 нм, при фиксированных значениях коэффициентов деполяризации $\delta_{pnd} = 0.03$ для фонового аэрозоля и $\delta_{pd} = 0.31$ для чистой Сахарской пыли [4]. Длина волны 1020 нм была выбрана на основании работы [4], где было показано, что коэффициенты деполяризации на длинах волн 870 нм и 1020 нм имеют максимальные значения корреляции с теми же коэффициентами, определенными *in situ*.

Размер первоначального массива данных значений оптических характеристик аэрозоля (δ_p , SSA , Sa) составлял 10759 значений. За каждый день измерений были определены максимумы коэффициентов деполяризации и минимумы альbedo однократного рассеивания, а также проведен анализ данных 7-мидневных обратных траекторий AERONET для определения географического положения источника пылевого переноса. Если траектория аэрозоля зарождалась или большая часть пути траектории проходила через пустыню Сахара или Сирийскую пустыню, соответствующему дню присваивался тэг «пылевой перенос + источник пыли (Сахара/Сирия)». По результатам обработки первоначального массива данных этот тэг был присвоен 118 дням, из которых 98 переносов были зафиксированы со стороны Сахара и 20 — со стороны Сирийской пустыни. В выборку попадали и неблагоприятные для измерений фотометрами дни (высокая облачность или дожди), когда было произведено одно измерение, что является недостаточным условием для достоверной оценки оптических характеристик аэрозоля за день. Таким образом, для 21 строки данных в массиве (для 21 дня) последующий анализ оптических характеристик не проводился.

В работе представлены результаты статистического

анализа данных оптических характеристик аэрозоля для двух Черноморских станций AERONET: Sevastopol (44.616 с.ш., 33.517 в.д.) с 2006 по 2014 гг. и Gloria (44.600 с.ш., 29.360 в.д.) с 2014 по 2018 гг.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнительный анализ данных оптических характеристик чистого пылевого аэрозоля, предоставляемых сетью AERONET и данных, определяемых по алгоритму типизации аэрозоля радиометром CALIPSO показал, что величина коэффициентов деполяризации, на длинах волн близких к ИК-диапазону систематически ниже, чем величина Rd , полученных на длине волны 532 нм. Таким образом, если величина коэффициента деполяризации попадает в диапазон значений $0.53 \leq Rd \leq 0.89$, то такой аэрозоль типизируется как загрязненный пылевой аэрозоль (смешивание минеральной пыли с аэрозолем промышленного загрязнения), а при значениях выше — чистая пыль. При анализе изменчивости альbedo однократного рассеивания также был определен диапазон значений, характерных как для загрязненного, так и для чистого пылевого аэрозоля. Так без учета сезонности и географического расположения источника пыли были получены следующие средние значения оптических характеристик аэрозоля для Черноморского региона: $SSA = 0.9$, $\delta_p = 0.17$, $Sa = 43.14$ (с учетом 21 дня с одноразовыми дневными измерениями) и $SSA = 0.94$, $\delta_p = 0.19$, $Sa = 46.58$ (без учета данных за 21 день). Среднее значение коэффициента деполяризации для пылевого аэрозоля $Rd = 0.65$, в то время как средние величины оптических характеристик аэрозоля для дат, когда пылевой перенос со стороны Сахара и Сирии не был зарегистрирован, равны: $SSA = 0.94$, $\delta_p = 0.12$, $Sa = 37.39$, $Rd = 0.39$. Таким образом, если величина SSA попадает в диапазон $0.90 \leq SSA \leq 0.95$, то это соответствует слабому поглощению аэрозолем прямой солнечной радиации, а если величина SSA выше, это соответствует сильному аэрозольному поглощению света. Данные оптических характеристик с величинами средних отклонений представлены в табл. 1.

Анализ данных, представленных в таблице, показал, что в дни пылевых переносов над Черноморским регионом преимущественным типом аэрозоля является загрязненный пылевой аэрозоль, а процент регистрации случаев чистого пылевого аэрозоля составляет примерно 7%. При анализе особенностей оптических характеристик, для случая переноса чистого пылевого аэрозоля над Черноморским регионом, было показано, что чистый пылевой аэрозоль слабо поглощает в ИК-области спектра. Действительно, только в 13.5% случаев переносов было зарегистрировано сильное аэрозольное поглощение на длине волны 1020 нм.

На рис. 1,а показано распределение преимущественных типов аэрозоля по данным моделирования CALIPSO за 24.04.2014, где красным кругом выделена

Таблица 1: Средние значения оптических характеристик атмосферного аэрозоля для Черноморского региона по данным AERONET

	SSA_{1020}	δ_p_{1020}	$Sa_{1020}(sr)$
Пылевой перенос	0.94 ± 0.034	0.189 ± 0.05	46.976 ± 8.037
Без пылевого переноса	0.94 ± 0.04	0.122 ± 0.039	37.39 ± 7.26

область, соответствующая Черноморскому региону. На (рис. 1,б) и (рис. 1,в) показаны 7-дневные обратные траектории за этот же день для двух Черноморских станций AERONET (Sevastopol и Gloria).

Из рис. 1 видно, что для Черноморского региона за 24.04.2014 преимущественным типом аэрозоля является пылевой (чистый) и загрязненный пылевой аэрозоль, что согласуется с полученными результатами. Однако, анализируя только величину альбедо однократного рассеивания невозможно дать однозначную оценку тому, какой именно тип аэрозоля является преимущественным за исследуемый период, так как сам по себе аэрозоль над Черным морем зачастую является поглощающим, исходя из результатов табл. 1. В работе [6] были получены значения коэффициента деполаризации CALIPSO на длине волны 1064 нм $S_{1064}(sr)$ (Surface_1064_Integrated_Depolarization_Ratio) для пылевого аэрозоля $S_{1064}(sr) = 0.24 \pm 0.1$. Изменчивость величины коэффициента поглощения на длине волны 1020 нм (Sa_{1020}) также коррелирует с результатами предыдущих исследований. По данным лидарных соотношений различных типов аэрозолей CALIPSO пылью считаются частицы, для которых величины $S_{1064}(sr)$ попадают в диапазон $S_{1064} = 44 \pm 13$ [3]. Для Черноморского региона средний коэффициент поглощения для дней, когда регистрировался пылевой перенос по данным CALIPSO $S_{1064}(sr) = 0.34 \pm 0.06$.

Анализ сезонной изменчивости аэрозольных оптических характеристик показал, что из всех случаев пылевых переносов 66 % приходятся на летний сезон, 11% на зимний период и 21% в межсезонье. Средние отклонения сезонных значений оптических коэффициентов δ_p_{1020} и SSA_{1020} находятся в пределах 0.001–0.002, а следовательно в алгоритме классификации аэрозолей по данным AERONET их можно не учитывать, в отличие от аналогичных результатов в видимой области спектра.

Анализ изменчивости аэрозольной оптической толщины (AOT) проводился по данным AERONET Optical Depth версии V3 (https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/draw_map_display_aod_v3). Ранее было доказано, что данные AOT сети AERONET наиболее точно согласуются с натурными измерениями спектрофотометра SPM [7]. Средние значения AOT в дни пылевых переносов и без них (фоновый аэрозоль над исследуемым регионом) на разных длинах волн представлены в табл. 2.

Сравнительный анализ данных AOT, представленных в табл. 2 показал, что наибольшее расхождение

в значениях регистрируется на длине волны 1020 нм (AOT1020) для случаев пылевых переносов (разница в величинах более чем в 1,5 раза). Таким образом, расхождение в значениях оптических характеристик в ИК-области спектра можно использовать в качестве дополнительного критерия проверки наличия пылевого переноса над исследуемым регионом. Данные оптических характеристик, полученные в УФ-диапазоне используются для вычислений эффективного радиуса и массовой концентрации частиц в случае регистрирования пылевого переноса. В [8] было показано, что оптические свойства пыли над Черноморским регионом сопоставимы со свойствами вулканического пепла: и у пыли и у пепла близкие по диапазону размеры частиц, близкий состав минералов и горных пород, а также высокие значения δ .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью Черноморского региона является высокая пылевая загруженность со стороны Сахары. Для пылевой идентификации был проведен многолетний статистический анализ оптических характеристик атмосферного аэрозоля, по результатам которого, алгоритм, предложенный в [4], показал преимущество смешанного пылевого аэрозоля относительно чистого пылевого аэрозоля. Для чистого пылевого аэрозоля, регистрируемого над Черноморским регионом характерно слабое поглощение прямой солнечной радиации в ИК-области спектра.

Для Черноморского региона был определен средний коэффициент поглощения на длине волны 1064 нм для дней, когда регистрировался пылевой перенос по данным CALIPSO $S_{1064}(sr) = 0.34 \pm 0.06$. Также был проведен анализ влияния сезонной изменчивости на оптические характеристики аэрозоля в ИК-области спектра, откуда был сделан вывод о том, что в данном алгоритме классификации аэрозолей можно не делать поправку на сезонность. Одним из преимуществ определения пылевого аэрозоля в длинноволновом диапазоне является наибольшая разница в данных об аэрозольной оптической толщине между днями с высокой и низкой пылевой загруженностью. Анализ лидарных коэффициентов по данным радиометра CALIPSO и сети фотометров AERONET показал хорошую корреляцию, однако, коэффициент поглощения по данным CALIPSO более, чем в 1.5 раза выше.

На данный момент ни одна из действующих станций

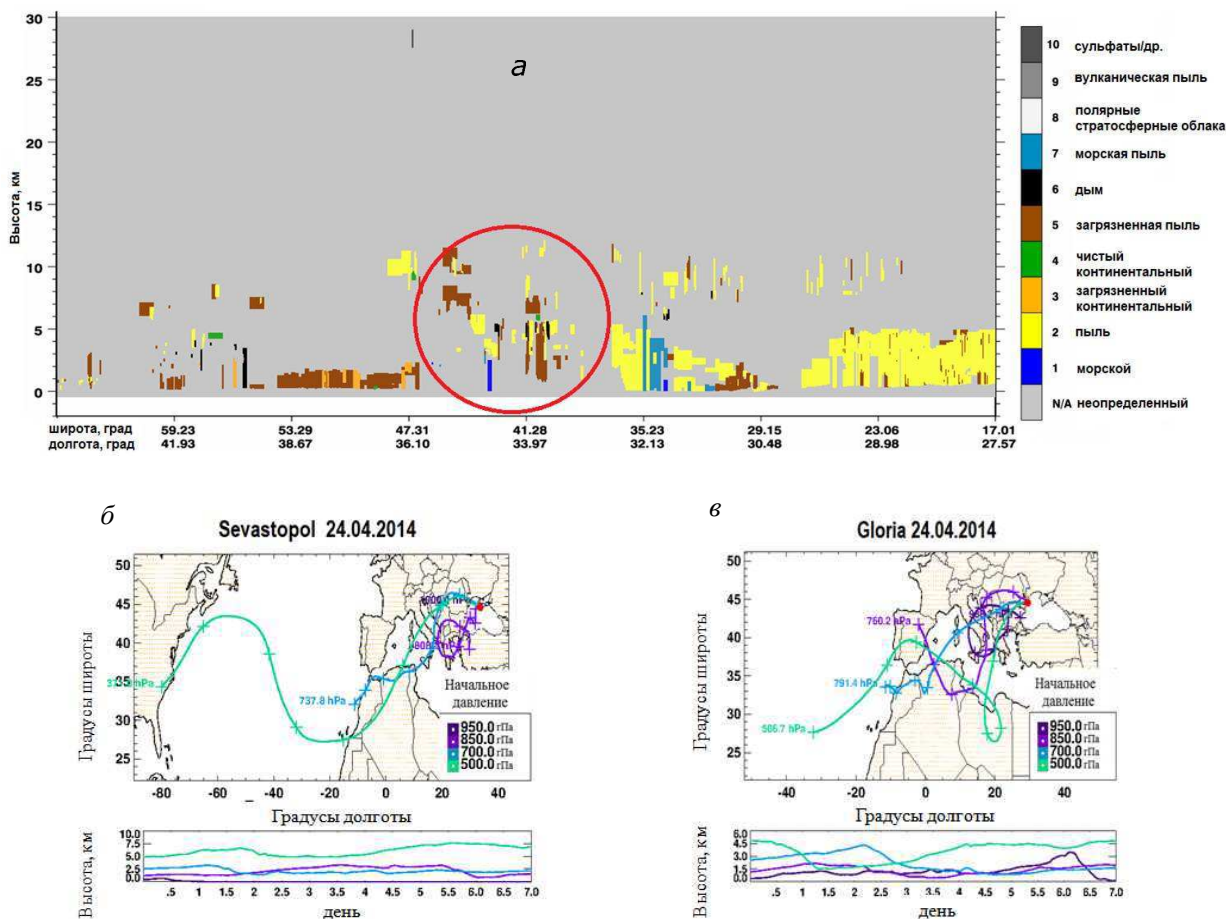


Рис. 1: Результаты моделирования за 24.04.2014: а — типа атмосферного аэрозоля по данным CALIPSO (ресурс: <https://eosweb.larc.nasa.gov/project/calipso>); б — обратных 7-дневных траекторий переноса атмосферного аэрозоля на станции AERONET Sevastopol; в — на станции Gloria (ресурс: <https://tropo.gsfc.nasa.gov/aeronet>)

Таблица 2: Средние значения АОТ для случаев пылевого переноса и для фонового аэрозоля Черноморского аэрозоля

	АОТ1020	АОТ870	АОТ675	АОТ500	АОТ440
Пылевой перенос	0.131±0.06	0.146±0.06	0.176±0.07	0.237±0.08	0.264±0.09
Без пылевого переноса	0.072±0.03	0.087±0.04	0.121±0.05	0.19±0.07	0.22±0.08

сети фотометров AERONET не предоставляет продукты инверсии, информацию об оптических характеристиках атмосферного аэрозоля, на длине волны 532 нм, а лишь 445 и 675 нм. Конечно, можно провести интерполяцию данных, построением полинома по всем точкам спектра или элементарным усреднением данных, но есть риск потерять достоверность значений. Сравнение оптических характеристик на 1020 нм по данным AERONET и 1064 нм по данным CALIPSO предоставит результаты с меньшей долей погрешности.

Автор выражает благодарность научному руководи-

телю кандидату физико-математических наук Шибанову Евгению Борисовичу, а также Тому Кушеру (Tom Kussera), Бренту Холбену (Brent Holben) и группе Жени Фельдмана (Gene Feldman) за расчеты данных ВТА и возможность использования фотометров AERONET над Черноморским регионом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90066 и в рамках программ государственного задания МГИ РАН по теме № 0827-2019-0002.

- [1] Рахимов Р. Ф., Козлов В. С., Панченко М. В., Тумаков А. Г., Шмаргунов В. П. // Оптика атмосферы и океана. 2014. **27**. № 02. С. 126.
- [2] Калинин Д. В., Вареник А. В., Папкина А. С. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. **15**. № 3. С. 217.
- [3] Kim M., Omar A., Tackett J., Vaughan M., Winker D. et al. // Atmospheric Measurement Techniques Discussions. 2018. **11**. P. 6107.
- [4] Shin S., Tesche M., Noh Y., Möller D. // [Atmospheric Measurement Techniques](#). 2019. **12**. P. 3789.
- [5] Haarig M., Althausen D., Ansmann A., Klepel A. et al. // EPJ Web of Conferences. 2016. **119**. P. 18009
- [6] Amiridis V., Wandinger U., Marinou E., Giannakaki E. et al. // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. **13**. P. 12089.
- [7] Kalinskaya D., Papkova A., Papkova Y., Gurov K. // Proceedings of International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2019. **19**, № 4.1. P. 1041.
- [8] Gasteiger, J., Freudenthaler V. // Atmospheric Measurement Techniques. 2014. **7**. P. 3773.

Identification optical characteristics of dust aerosol by remote sensing methods in the infrared region of the spectrum

A. S. Papkova^{1,a}, D. V. Kalinskaya^{1,b}, Yu. I. Papkova^{2,c}

¹Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Department of Optics and Biophysics of the Sea
Russia, 299011, Sevastopol

²Sevastopol State University, Department of Higher Mathematics
Russia, 299053, Sevastopol

E-mail: ^ahanna.papkova@gmail.com, ^bkalinskaya_d_v@mail.ru, ^cyulia.papkova@gmail.com

Bio-optical characteristics of mineral dust is currently remain uncertain, which proves the need for an analysis of its contribution to the radiation balance and requires a study of the properties of the dust at the regional level. The aim of this work is to determine the optical characteristics of dust aerosol in the long-wavelength spectral region over the Black Sea region, followed by checking the accuracy of the existing algorithms for its identification. AERONET (Aerosol Robotic Network), the international network of ground-based photometers, and CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) remote sensing results were used as a data source. In this paper the following optical parameters aerosol investigated: single scattering albedo (SSA), lidar ratio (Sa), depolarization ratios and aerosol optical thickness (AOT). Based on the value of the dust coefficient (Rd) at $0.53 \leq Rd \leq 0.89$, the aerosol is mixed dust, at values higher it is pure dust. Depending on the single scattering albedo, absorption is weak when $0.90 \leq SSA \leq 0.95$; if this indicator is higher, then absorption is strong. Based on many years of statistics, a mixed dust aerosol with weak absorption for the Black Sea region was identified. A comparative analysis of the data from the AERONET and CALIPSO models showed a strong correlation of the results.

PACS: 42.68.Jg

Keywords: dust aerosol, AERONET, CALIPSO, depolarization coefficient, single scattering albedo.

Received 04 March 2020.

Сведения об авторах

1. Папкина Анна Станиславовна — аспирант, ст. инженер-исследователь; e-mail: hanna.papkova@gmail.com.

2. Калинин Дарья Владимировна — мл. науч. сотрудник; e-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru.

3. Папкина Юлия Игоревна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; e-mail: yulia.papkova@gmail.com.