

## CALIPSO стратификация атмосферного аэрозоля с экологической оценкой над Черноморским регионом

А. С. Папкина<sup>1</sup>, С. О. Папков<sup>2</sup>, Д. М. Шукало<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия  
E-mail: hanna.papkova@gmail.com*

<sup>2</sup> *Севастопольский государственный университет, Севастополь, 299053, Россия  
E-mail: SOPapkov@sevsu.ru*

Для количественной оценки радиационного воздействия аэрозолей на региональный и глобальный климат важнейшим фактором является анализ влияния различных типов аэрозолей. В настоящее время существует ряд алгоритмов по идентификации разных видов аэрозолей, но большинство из них не учитывают региональные особенности и нуждаются в коррекции. В данном исследовании проведён анализ статистики стратификации аэрозолей в Черноморском регионе за последние пять лет на основе обработки данных радиометра спутника CALIPSO — единственного на текущий момент космического датчика, сообщаемого данные о вертикальном распределении пространственных и оптических характеристик аэрозоля по всему земному шару. Рассмотрены следующие виды аэрозолей: чистый морской, пылевой, загрязнённая пыль и пылевой морской аэрозоль. Особый интерес представляет пылевой и смешанный пылевой аэрозоль, так как между концентрацией аэрозолей пыли в атмосфере и здоровьем человека существует прямая связь. На основе многолетней статистики получены точные интервалы для лидарных коэффициентов различных подтипов аэрозолей, которые учитывают специфику Черноморского региона. При дальнейшем анализе результатов получена экологическая оценка чистоты атмосферы от загрязняющих веществ (главным образом природного происхождения) для Черноморского региона на основе распределения видов аэрозолей в тропосфере.

**Ключевые слова:** CALIPSO, пылевой аэрозоль, коэффициент деполяризации, лидарный коэффициент, оптическая толщина аэрозоля, AERONET

Одобрена к печати: 16.01.2020  
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-234-242

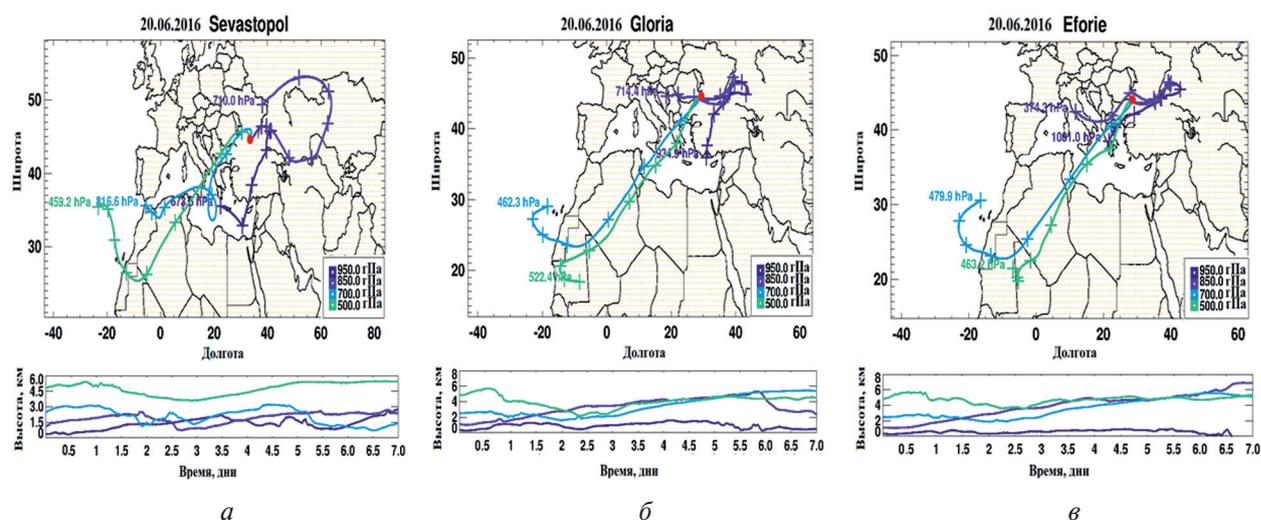
### Введение

Аэрозоли оказывают большое влияние на климатическую систему. Они напрямую связаны с климатом, рассеивая и поглощая излучение, а также оказывая комплексное воздействие на облака и осадки. Известно, что аэрозоли абсорбционного типа способствуют нагреву атмосферы (Zhining et al., 2015). Для количественной оценки радиационного воздействия аэрозолей на региональный и глобальный климат важнейшим фактором является анализ влияния различных типов аэрозолей.

Следует учитывать, что существует тесная связь между концентрацией аэрозолей пыли в атмосфере и здоровьем человека. Вред, который пыль может причинить здоровью, определяется в основном концентрацией пыли, присутствующей в воздухе. Людям с респираторными заболеваниями, такими как астма, хроническое обструктивное заболевание дыхательных путей или эмфизема, даже небольшое увеличение концентрации пыли грозит ухудшением симптомов (Sharma et al., 2013). Аэрозольная классификация может принимать различные формы. Для оценки радиационного воздействия аэрозолей их широко классифицируют как антропогенные (городское/промышленное загрязнение и сжигание биомассы) и природные (пустынная пыль, морская соль, биогенные и вулканические). В частности, описать концентрацию аэрозолей в конкретном регионе можно, используя данные расслоения тропосферного природного аэрозоля.

В предыдущих исследованиях (Ízdar, Murray, 1991) было доказано, что местные аэрозоли и переносимые на большие расстояния частицы влияют на наблюдаемую концентрацию

с одинаковой интенсивностью. Вопросам содержания пылевого аэрозоля на крымском побережье посвящена работа (Калинская и др., 2018), где сделан вывод, что поднятие большого количества пылевого аэрозоля сильными восходящими потоками, которое происходит в основном в Сахаре, способствует переносу микробиоты и минералов, в том числе повышенной концентрации фосфора и кремния. Важный факт, что доминирующим типом аэрозоля на суше у Чёрного моря является пыль, был подтверждён несколькими исследованиями. Например, анализом обратных траекторий (*англ.* Back Track Analysis — BTA) тропосферного аэрозоля по данным AERONET (Aerosol Robotic Network) (Kalinskaya, Papkova, 2018). В частности, результат моделирования семидневных обратных траекторий AERONET за 20.06.2016 показал наличие переноса пыли из Африки на всех черноморских станциях (*рис. 1*). Тот же вывод о распространённости пылевого аэрозоля был сделан с использованием анализа параметра аэрозольной оптической толщины AERONET (Kalinskaya, Suslin, 2016).



*Рис. 1.* Обратные семидневные траектории переноса аэрозоля по данным AERONET за 20.06.2016: *а* — для станции Севастополь (Крым); *б* — для станции Gloria (Румыния); *в* — для станции Eforie (Болгария)

В данном исследовании рассмотрены следующие типы аэрозолей: чистый морской, пылевой, загрязнённый пылевой и пылевой морской. Стоит отметить, что статистика по четырём последним типам аэрозолей проанализирована впервые для Черноморского региона. Целью настоящей работы является построение алгоритма стратификации подтипов аэрозолей над Черноморским регионом с последующим анализом их распределения в тропосфере. В результате оказывается возможной экологическая оценка чистоты атмосферы от загрязняющих веществ (главным образом природного происхождения) для конкретного региона. Следует отметить, что облачный аэрозольный лидар с ортогональной поляризацией CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) версии 4.10 (V4) включает в себя ряд алгоритмов выбора подтипов аэрозолей. Одним из определяющих параметров алгоритма стратификации спутника CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) для аэрозолей является лидарный коэффициент ( $Sa$ ). В данном исследовании предлагается поправка диапазона значений  $Sa$  над Черноморским регионом.

## Материалы и методы

На сегодняшний день радиометр CALIOP является единственным космическим датчиком, который наблюдает и сообщает о вертикальном распределении пространственных и оптических характеристик аэрозоля по всему земному шару (Omar et al., 2009). В настоящей работе

для стратификации аэрозоля был использован алгоритм CALIPSO новой версии V4 (2018). Основными входными параметрами для данного алгоритма являются интегрированное ослабленное обратное рассеяние ( $\gamma_{532}$ ), расчётный коэффициент деполаризации частиц ( $\delta_p$ ), а также высоты верхней и нижней границы ( $Z_{top}$ ,  $Z_{base}$ ). Наблюдаемая сила обратного рассеяния, т. е. интегрированное ослабленное обратное рассеяние при 532 нм, определяется следующим образом:

$$\gamma = \int_{top}^{base} \beta(z)T(z) dz,$$

где  $\beta$  — общее (обратное) рассеяние молекулярных частиц;  $T$  — атмосферный коэффициент пропускания, обусловленный как молекулами, так и частицами. В алгоритмах CALIPSO коэффициент деполаризации рассчитывается следующим образом (Kim et al., 2018):

$$\delta'_v = \frac{\sum_{Z_{base}}^{Z_{top}} [\beta'_{\perp m}(z) + \beta'_{\perp p}(z)]}{\sum_{Z_{base}}^{Z_{top}} [\beta'_{\parallel m}(z) + \beta'_{\parallel p}(z)]},$$

где  $z$  — высота, а индексы *top* (верх) и *base* (основание) относятся к верхним и нижним характеристикам. Индексы “ $\parallel$ ” и “ $\perp$ ” относятся к поляризованным и деполаризованным ослабленным сигналам обратного рассеяния  $\beta'$  соответственно. Кроме того, работа алгоритма зависит от типа поверхности: суша (пыль, загрязнённая пыль) или океан (чистый морской, пылевой морской). Более подробный алгоритм приведён в *табл. 1*.

Стоит отметить, что значения коэффициентов деполаризации CALIPSO согласуются с данными базы AERONET. В работе (Kim et al., 2018) для продуктов инверсии AERONET V3 были получены следующие значения: для загрязнённой пыли —  $0,15 \leq \delta_p < 0,25$ , для чистой пыли —  $\delta_p > 0,25$ .

*Таблица 1.* Схема выбора подтипа аэрозолей алгоритмом CALIPSO для тропосферных аэрозолей

Подтип тропосферного аэрозоля	$\gamma_{532}$	$\delta_p$	$Z_{top}$ , км	$Z_{base}$ , км	Тип поверхности
Чистый морской	>0,01	<0,05	<2,5		Океан
Пыль		>0,20			Суша
Чистый континентальный	<0,0005	<0,075			Суша
Загрязнённая пыль	<0,0005	<0,20			Суша
Пылевой морской		<0,20		<2,5	Океан

*Таблица 2.* Нормированные частоты аэрозольных подтипов в алгоритме CALIOP версии 4 для дневного и ночного времени

Подтип тропосферного аэрозоля	День, %	Ночь, %
Чистый морской	15	20
Пыль	8	11
Чистый континентальный	0,5	1
Загрязнённая пыль	4	7
Пылевой морской	6	6

Известно, что почти 80 % смога и 60 % загрязнённых аэрозолей пыли расположены над водой, в то время как пыль обнаруживается и на суше, и над водной гладью на сопоставимых

частотах. Глобальные распределения частот аэрозольных подтипов для дневного и ночного алгоритма CALIOP версии 4 (V4) (днём и ночью вместе для каждой версии) приведены в *табл. 2* согласно (Kim et al., 2018).

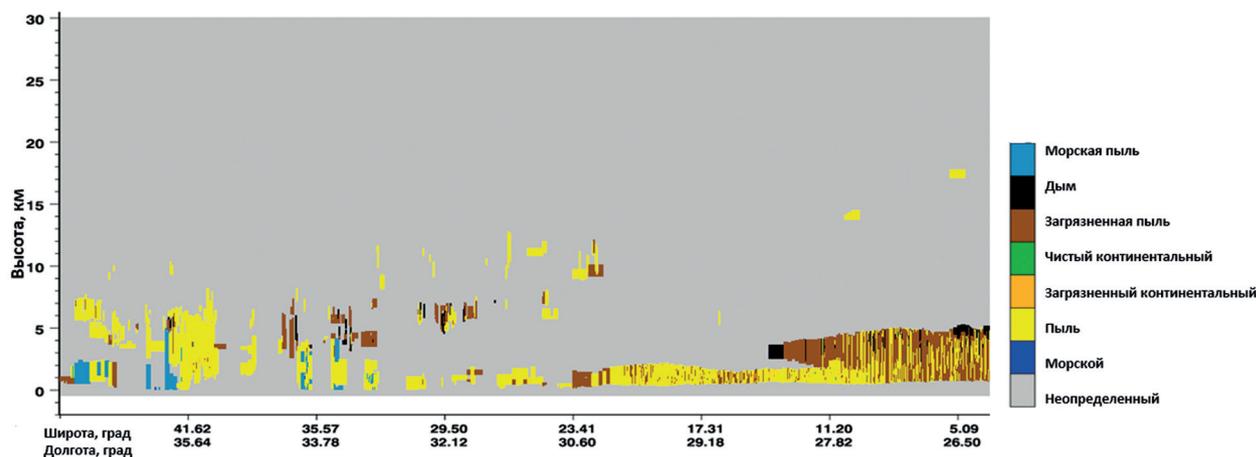
Таким образом, исходя из *табл. 2* ожидается, что в Черноморском регионе пыль и чистый морской аэрозоль будут доминирующими типами. Для данного исследования предлагаемый алгоритм был написан на языке программирования Python с использованием библиотек NETcdf; в частности, 655 файлов были проанализированы в координатах Черноморского региона в период с 2014 по 2018 г.

Для задачи стратификации аэрозоля CALIPSO также предлагает альтернативный алгоритм, использующий коэффициенты лидарного соотношения для длин волн в зелёном канале (532 нм) и инфракрасном диапазоне (1064 нм) (*табл. 3*).

*Таблица 3.* Лидарные соотношения аэрозолей с ожидаемыми неопределённостями для тропосферных и стратосферных аэрозольных подтипов при 532 и 1064 нм в алгоритме извлечения аэрозолей CALIOP версий 3 и 4 (V3, V4)

Подтип тропосферного аэрозоля	$Sa_{532}$ , ср		$Sa_{1064}$ , ср	
	V3	V4	V3	V4
Чистый морской	20±6	23±5	45±23	23±5
Пыль	40±20	44±9	55±17	44±13
Загрязнённая пыль	55±22	55±22	48±24	48±24
Пылевой морской	—	37±15	—	37±15

Известно, что лидарный коэффициент можно рассчитать как отношение экстинкции к обратному рассеянию:  $Sa = \sigma_a/\beta_a$  (Müller et al., 2007). Исходя из этого, алгоритм CALIPSO предоставляет карты подтипов аэрозолей (*рис. 2*).



*Рис. 2.* Подтип аэрозоля, предоставленный CALIPSO для версии V4 до 08.02.2018, с явным преобладанием пыли и загрязнённого морского аэрозоля

Случай, когда пылевой аэрозоль явно преобладает в атмосфере, с большой вероятностью связан с переносом пыли из Сахары или Сирии. Это можно подтвердить, проанализировав обратные траектории AERONET для любой из предоставленных в настоящее время станций Чёрного моря. На *рис. 3* (см. с. 238) показан перенос на длине волны 500 нм через Сахару.

Стоит отметить, что для Крыма этот алгоритм может работать с некоторыми неточностями, поскольку разделение координат на «земля» и «океан» не совсем корректно (из-за малого

территориального размера и большого прибрежного периметра). Также расхождение может быть связано с завышенными значениями скорости ветра в данном регионе. Ранее было установлено, что лидарное соотношение для морского аэрозоля изменяется со средней скоростью ветра на поверхности океана ( $U_{10}$ ). Для морских регионов выведены следующие закономерности вариации параметра  $Sa$ : с  $32 \pm 17$  ср (для  $0 < U_{10} < 4$  м/с) до  $22 \pm 7$  ср (для  $U_{10} > 15$  м/с) (Dawson et al., 2015).

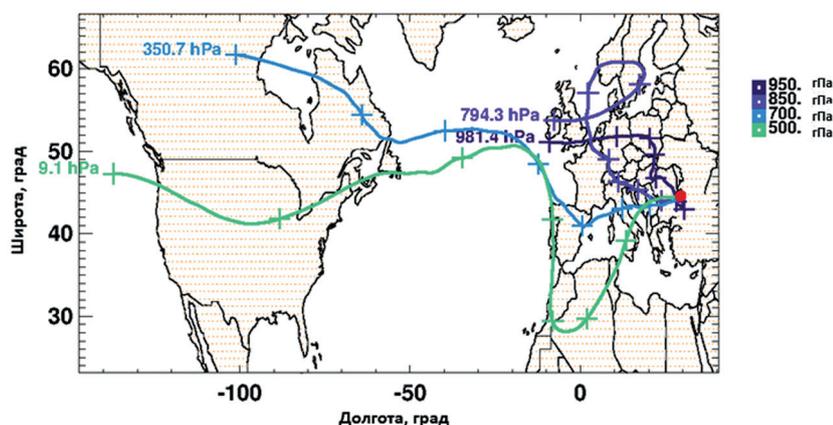


Рис. 3. Траектории обратного переноса аэрозоля по данным AERONET за 07.02.2018 для станции Glogia (Румыния)

Как следствие, следующим этапом настоящего исследования будет являться оценка степени загрязнения региона пылью.

### Результаты и обсуждение

Радиометр CALIOP совершил следующее количество измерений оптических параметров над Черноморским регионом: 2014 г. — 106 362, 2015 г. — 72 679, 2016 г. — 51 338, 2018 г. — 70 219. На основании этого были вычислены точные границы лидарных соотношений, учитывающие специфику данного региона (табл. 4).

Таблица 4. Лидарные соотношения аэрозолей с ожидаемыми неопределённостями для подтипов аэрозолей при 532 и 1064 нм в алгоритме CALIOP версии 4 (V4), скорректированном для региона Чёрного моря

Подтип тропосферного аэрозоля	$Sa_{532}$ , ср	$Sa_{1064}$ , ср	$Sa_{532}$ , ср	$Sa_{1064}$ , ср
	V4		V4 (Чёрное море)	
Чистый морской	$23 \pm 5$	$23 \pm 5$	$35 \pm 16$	$30 \pm 7$
Пыль	$44 \pm 9$	$44 \pm 13$	$44 \pm 10$	$41 \pm 8$
Загрязнённая пыль	$55 \pm 22$	$48 \pm 24$	$41 \pm 17$	$40 \pm 6$
Пылевой морской	$37 \pm 15$	$37 \pm 15$	$40 \pm 15$	$35 \pm 8$

Исходя из табл. 4, лидарные соотношения для чистого морского аэрозоля на длине волны 532 нм имеют наибольшее отклонение. Причина этого, как упоминалось ранее, заключается в том, что доминирующим типом аэрозоля в Черноморском регионе является пыль. Для понимания пространственного распределения аэрозольных потоков мы представили территорию Черноморского региона в виде нескольких субрегионов (рис. 4), что позволяет оценить процентное содержание конкретных подтипов аэрозоля в атмосфере. Программная реализация

данного алгоритма осуществлялась с помощью статистического анализа файлов с использованием пакетов Python (Numpy и Scipy). В табл. 5 представлен процент аэрозольных подтипов в атмосфере на основе указанного подхода.



Рис. 4. Области Черноморского региона для статистического анализа стратификации природных тропосферных аэрозолей за последние 5 лет

Таблица 5. Процентное распределение различных подтипов тропосферного аэрозоля природного происхождения в атмосфере над Черноморским регионом с учётом среднего отклонения

Цвет области (см. рис. 4)	Распределение аэрозоля, %			
	Пыль	Загрязнённая пыль	Чистый морской аэрозоль	Пылевой морской аэрозоль
Красный	50±1	7±1	15±2	27±4
Фиолетовый	58±2	22±14	5±2	14±6
Жёлтый	52±5	27±4	4±1	17±3
Голубой	59±9	9±5	16±4	22±4

Таким образом, исходя из данных табл. 5 можно увидеть, что на крымском побережье, по сравнению с другими областями, содержится в среднем на 7 % меньше чистого аэрозоля пыли. Тем не менее в данном субрегионе количество запылённого морского аэрозоля больше в среднем на 7 %. Эти данные можно объяснить тем, что количество загрязнённого пылевого аэрозоля напрямую связано с развитием промышленного производства, которое на Крымском полуострове ниже, чем в других прибрежных районах. В свою очередь, содержание чистого морского аэрозоля напрямую связано с периметром омываемой морем территории, поэтому его концентрация в Крыму и Турции выше, чем в других регионах.

### Заключение

Цель алгоритма стратификации видов аэрозолей при помощи дистанционного зондирования состоит в том, чтобы оценить соответствующее значение с минимальной погрешностью. На основании глобальной статистики (см. табл. 2) и результатов для Черноморского региона по распределению различных типов тропосферного аэрозоля природного происхождения

(см. табл. 5) можно сделать заключение, что концентрация пыли и запылённого морского аэрозоля в данном регионе более чем в два раза выше, чем ожидалось. Эти выводы коррелируют с ранее полученными данными изменчивости параметра аэрозольной оптической толщины и результатами анализа обратных траекторий данных AEORNET. Ежедневная пылевая нагрузка атмосферы должна учитываться и отслеживаться, особенно для людей с лёгочными и сердечно-сосудистыми заболеваниями. Стоит отметить, что алгоритм CALIPSO также может использоваться как инструмент прогнозирования переноса пыли и мониторинга условий окружающей среды в Черноморском регионе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, научный проект № 19-35-90066, и в рамках программ государственного задания Морского гидрофизического института Российской академии наук по теме № 0827-2019-0002.

Авторы благодарят Тома Кушера (Tom Kucsera), Брента Холбена (Brent Holben) и группу Жени Фельдмана (Gene Feldman) из Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration — NASA) за расчёты данных ВТА и возможность использования данных фотометров AERONET над Черноморским регионом.

## Литература

1. *Калинская Д. В., Вареник А. В., Папкина А. С.* Фосфор и кремний как маркеры переноса пыли над Черноморским регионом // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 217–225. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-217-225.
2. *Dawson K., Meskhidze N., Josset D., Gassó S.* Spaceborne observations of the lidar ratio of marine aerosols // J. Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. V. 15. P. 3241–3255. DOI: 10.5194/acp-15-3241-2015.
3. *İzdar E., Murray J.* Black Sea Oceanography // Turkey Oceanography. 1991. P. 469–487.
4. *Kalinskaya D. V., Papkova A. S.* Identification of the marine aerosol by the CALIPSO radiometer over the Black Sea for 2017 // 24<sup>th</sup> Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (Proc. SPIE). 2018. V. 10833. P. 10833M. DOI: 10.1117/12.2504520.
5. *Kalinskaya D. V., Suslin V. V.* Optical characteristics of Middle East arid aerosol and statistics of its registration over the Black Sea // 22<sup>nd</sup> Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (Proc. SPIE). 2016. V. 10035. P. 100353M. DOI: 10.1117/12.2248749.
6. *Kim M. H., Omar A. H., Tackett J. L., Vaughan M. A., Winker D. M., Trepte C. R., Hu Y., Liu Z., Poole L. R.* The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm // Atmospheric Measurements Techniques. 2018. V. 11. P. 6107–6135. DOI: 10.5194/amt-2018-166.
7. *Müller D., Ansmann A., Mattis I., Tesche M., Wandinger U., Althausen D., Pisani G.* Aerosol-type-dependent lidar ratios observed with Raman lidar // J. Geophysical Research D: Atmospheres. 2007. V. 112(16). Article ID D16202. DOI: 10.1029/2006JD008292.
8. *Omar A. H., Winker D. M., Vaughan M. A., Hu Y., Trepte C. R., Ferrare R. A., Lee K. P., Hostetler C. A., Kittaka C., Rogers R. R., Kuehn R. E.* The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. V. 26. P. 1994–2014. DOI: 10.1175/2009JTECHA1231.1.
9. *Sharma A. S., Maund S. D., Kelkar T., Knox J., Bhalerao S.* Influence of atmospheric aerosols on health and environment-climate change // Intern. J. Life Sciences. 2013. Issue S. P. 115–120. DOI: 10.1029/2007JD009436.
10. *Zhining T., Zhining Y., Mian C.* The Role of Aerosol-Cloud-Radiation Interactions in Regional Air Quality // A NU-WRF Study over the United States. Atmosphere. 2015. V. 6. P. 1045–1068. DOI: 10.3390/atmos6081045.

## CALIPSO stratification of atmospheric aerosols with environmental assessment of dust content over the Black Sea region

A. S. Papkova<sup>1</sup>, S. O. Papkov<sup>2</sup>, D. M. Shukalo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia  
E-mail: hanna.papkova@gmail.com

<sup>2</sup> Sevastopol State University, Sevastopol 299053, Russia  
E-mail: SOPapkov@sevsu.ru

Aerosols have a great influence on climate and our health. In order to quantify the radiation effects of aerosols on the regional and global climate, it is very important to evaluate correctly the effects of various types of aerosols. At the moment, there are many algorithms for the identification of different types of aerosols, but most of them do not take into account regional characteristics and need to be corrected. Currently, radiometer CALIOP is the only space-based sensor that observes and reports the vertical distributions of aerosol spatial and optical properties over the globe, and thus CALIOP can provide aerosol stratification data, based on integrated attenuated backscatter, estimated particle depolarization ratio and layer top and base altitude or lidar ratios. In current research the clean marine, dust, continental, polluted dust and dusty marine types are considered. The purpose of this study is to analyze the appearance statistics of these types over the Black Sea region for the last five years. As a result, an environmental assessment of the purity of the atmosphere from pollutants (mainly of natural origin) for the region is given based on aerosols distribution in the troposphere.

**Keywords:** CALIPSO, remote sensing, dust, depolarization ratio, lidar ratio, AERONET, aerosol optical thickness

Accepted: 16.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-234-242

### References

1. Kalinskaya D. V., Varenik A. V., Papkova A. S., Fosfor i kremnii kak markery perenosa pyli nad Chernomorskim regionom (Phosphorus and silicon as markers of dust aerosol transfer over the Black Sea region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 217–225, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-217-225.
2. Dawson K., Meskhidze N., Josset D., Gassó S., Spaceborne observations of the lidar ratio of marine aerosols, *J. Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, Vol. 15, pp. 3241–3255, DOI: 10.5194/acp-15-3241-2015.
3. İzdar E., Murray J., Black Sea Oceanography, In: *Turkey Oceanography*, 1991, pp. 469–487.
4. Kalinskaya D. V., Papkova A. S., Identification of the marine aerosol by the CALIPSO radiometer over the Black Sea for 2017, *24<sup>th</sup> Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (Proc. SPIE)*, 2018, Vol. 10833, p. 10833M, DOI: 10.1117/12.2504520.
5. Kalinskaya D. V., Suslin V. V., Optical characteristics of Middle East arid aerosol and statistics of it registration over the Black Sea, *22<sup>nd</sup> Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (Proc. SPIE)*, 2016, Vol. 10035, p. 100353M, DOI: 10.1117/12.2248749.
6. Kim M. H., Omar A. H., Tackett J. L., Vaughan M. A., Winker D. M., Trepte C. R., Hu Y., Liu Z., Poole L. R., The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm, *Atmospheric Measurements Techniques*, 2018, Vol. 11, pp. 6107–6135, DOI: 10.5194/amt-2018-166.
7. Müller D., Ansmann A., Mattis I., Tesche M., Wandinger U., Althausen D., Pisani G., Aerosol-type-dependent lidar ratios observed with Raman lidar, *J. Geophysical Research D: Atmospheres*, 2007, Vol. 112(16), Article ID D16202, DOI: 10.1029/2006JD008292.
8. Omar A. H., Winker D. M., Vaughan M. A., Hu Y., Trepte C. R., Ferrare R. A., Lee K. P., Hostetler C. A., Kittaka C., Rogers R. R., Kuehn R. E., The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, Vol. 26, pp. 1994–2014, DOI: 10.1175/2009JTECHA1231.1.

9. Sharma A. S., Maind S. D., Kelkar T., Knox J. Bhalerao S., Influence of atmospheric aerosols on health and environment-climate change, *Intern. J. Life Sciences*, 2013, Issue S, pp. 115–120, DOI: 10.1029/2007JD009436.
10. Zhining T., Zhining Y., Mian C., The Role of Aerosol-Cloud-Radiation Interactions in Regional Air Quality, *A NU-WRF Study over the United States. Atmosphere*, 2015, Vol. 6, pp. 1045–1068, DOI: 10.3390/atmos6081045.