

Д.В.Калинская, В.В.Суслин

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АЭРОЗОЛЕЙ НАД ЧЁРНЫМ МОРЕМ ВО ВРЕМЯ СОБЫТИЯ ПЫЛЕВОЙ БУРИ 2015 ГОДА

Проанализированы спутниковые изображения *AQUA* и *TERRA MODIS* и данные результатов измерений оптических характеристик пылевого аэрозоля посредством сети *AERONET* во время события выноса пылевого аэрозоля осенью 2015 г. Описаны оптические свойства аэрозоля в столбе атмосферы, а также представлен анализ динамики пространственной изменчивости, распределения частиц пыли по размерам. Проведён сравнительный анализ данных станций *Galata Platform*, *Gloria*, *Eforie*, *Kuwait_University* и *Sevastopol* во время переноса пылевого аэрозоля. Определены характеристики пространственной изменчивости аэрозоля на разных высотах во время событий переноса пыли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черное море, AERONET, пылевой аэрозоль, параметр Ангстрема, спутниковые изображения, распределение частиц по размерам*

Введение. События выноса пылевого аэрозоля со стороны Азии и Сахары по направлению стран Европы характерны чаще всего для весеннего сезона, но, как известно, их также можно наблюдать и в течение всего года [1 – 4]. Существенная изменчивость, свойственная аэрозолю, обусловлена многообразием типов аэрозольных частиц (химического состава, размеров) и процессов их трансформации в атмосфере под влиянием многочисленных факторов: метеоусловий, атмосферной циркуляции, солнечной инсоляции, а также вида подстилающей поверхности как одного из важных источников аэрозоля. Значительные изменения аэрозольной оптической толщины во время вторжения в атмосферу большого количества пылевого аэрозоля существенно изменяют прозрачность атмосферы [2, 3], а также влияют на безопасность работы авиации [5], что является особо актуальным вследствие военного конфликта на территории Ближнего Востока. Различные вещества, включая токсичные металлы, могут переноситься с пылью на значительные расстояния.

В сентябре 2015 г. была зафиксирована необычная пыльная буря, возникшая на Ближнем Востоке, которая соединила в себе характеристики двух природных явлений – хабуба и шамала. Хабуб возникает вследствие штормовых фронтов и часто принимает форму сплошной стены из песка и пыли. Подобно грозам, хабуб возникает внезапно и, как правило, отличается непродолжительным характером (Большая советская энциклопедия.– М.: Советская энциклопедия, 1969 – 1978). Затяжные, масштабные пыльные бури, которые могут длиться до нескольких дней, в Ираке и странах Персидского залива обычно связывают с шамалем (северо-западным ветром). Впервые специалисты НАСА заметили эту бурю на спутниковых снимках 31 августа, когда она проходила вдоль границы между Ираком и Сирией. Сначала перенос был зафиксирован в сторону Персидского залива, а затем и в сторону Средиземного и Черного морей. Начало процессу положил низ-

кий циклон из Европы, который в конце августа – начале сентября сместился на Ближний Восток. 1 сентября с помощью сканирующего спектрорадиометра среднего разрешения *MODIS*, установленного на американском спутнике «*Terra*», была зафиксирована редкая по виду циклоническая пыльная буря над Ираком, влияние которой постепенно усиливалось.

Целью данной работы является:

- 1) исследование оптических, микрофизических и пространственно-временных характеристик атмосферного аэрозоля над Черным морем во время события пылевой бури, зафиксированной осенью 2015 г. со стороны Сирии;
- 2) по полученным данным подтвердить или опровергнуть наличие пылевого аэрозоля пустыни со стороны Сирии над исследуемым регионом;
- 3) провести сравнительный анализ оптических характеристик пылевого аэрозоля для данного события и пылевого аэрозоля пустыни Сахара.

Аппаратура и данные. Данные измерений, представленные в статье, были получены посредством прибора *CE-318*, который является всепогодным программируемым спектральным спектрофотометром и может продолжительное время работать в автономном режиме. Спектрофотометр предназначен для автоматического сканирования Солнца и небосвода, накопления и передачи на Платформу Сбора Данных (*DCP*) результатов измерений (Интернет, каналы спутниковой связи и др.) [6]. Измерения ослабления прямого солнечного излучения проводятся на всех длинах волн, причем частота измерений зависит от величины атмосферной массы в направлении на Солнце. Стандартная модель прибора *CE-318* оснащена интерференционными фильтрами с полосами пропускания: 340, 380, 440, 500, 870, 940 и 1020 нм.

До 2015 г. на базе Морского гидрофизического института располагалась станция международной сети *AERONET*, позволяющая осуществлять измерения основных оптических характеристик, а также микрофизических параметров атмосферы. Однако с 5 марта 2015 г. измерения были прекращены. Анализировать атмосферный аэрозоль над Черным морем на данный момент можно по данным станций *Galata Platform* (Болгария), *Eforie* (Румыния), *Gloria* (Румыния).

Результаты. Основным способом измерения важнейших оптических характеристик атмосферы – АОТ (аэрозольной оптической толщины), параметра Ангстрема (α) и содержания водяного пара (W) – являются измерения ослабления в атмосфере спектрального состава прямой солнечной радиации.

Для исследуемого периода использовались данные только для двух станций *Galata Platform* и *Gloria* (данные *level 1.5*), т.к. на станции *Eforie* было сделано всего 5 измерений (четыре измерения за 13 сентября 2015 г. и одно измерение за 15 сентября 2015 г.).

Для пылевого аэрозоля по данным многих исследований [3, 4, 7 – 13] зачастую характерны высокие значения АОТ, низкие значения показателя Ангстрема и превалирование крупной фракции в графике распределения частиц по размерам. На первом этапе исследования, опираясь на метеорологические данные, а именно сведения, что изначально пылевой аэрозоль со стороны Сирии сместился в сторону Персидского залива, были проанализированы данные *AERONET* станции *Kuwait_University*, расположенной на северной части побережья залива. Были получены аномально низкие (порой

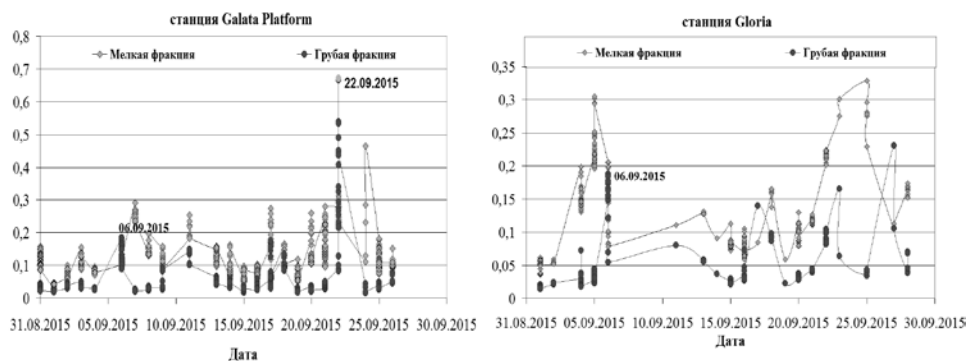
даже отрицательные) значения параметра Ангстрема и высокие значения АОТ, что характерно для пылевого типа аэрозоля.

Вторым этапом исследования было проведение сравнительного анализа оптических характеристик пылевого аэрозоля на станции, непосредственно близко расположенной к источнику выброса пыли, и оптическими характеристиками аэрозоля для черноморских станций.

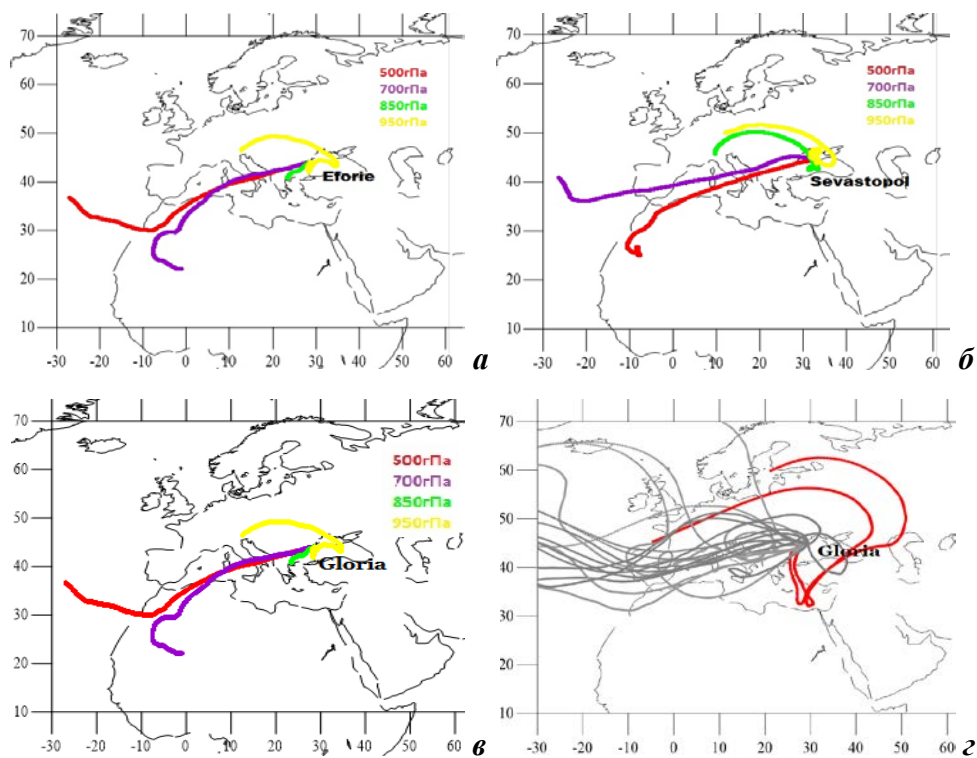
Анализ основных оптических характеристик на станциях западной части Черного моря не выявил длительного периода с аномально высокими значениями аэрозольной оптической толщины, однако резкий скачок в область низких значений параметра Ангстрема для станций *Galata Platform* и *Gloria* был зафиксирован для одной даты: 6 сентября. Значение параметра Ангстрема ниже 0,7 характерно для крупных пылевых частиц. Однако при анализе вклада крупной и мелкой взвеси в общее распределение аэрозольной составляющей для периода пылевой бури не было выявлено сильного роста показателя крупных частиц в атмосфере над данным регионом ни для одной станции. На исследуемых станциях 6 сентября только во второй половине дня по данным измерений прибора *CIMEL* был выявлен незначительный рост содержания крупной взвеси в атмосфере.

Анализ обратных семидневных траекторий показал 6 сентября перенос со стороны пустыни Сахара. Распределение по высоте воздушных масс при различных начальных значениях давления (рис.2) демонстрирует перенос пылевого аэрозоля на трех черноморских станциях по нескольким высотам. Семидневные обратные траектории, построенные за месяц отдельно по каждому аэрозольному слою для исследуемых станций, показал двухдневный перенос (3 и 4 сентября на высоте 500 гПа) на станции *Gloria* со стороны Сирии (рис.2, *г* (красные линии)). Предполагается, что перенос на этой высоте мог повлиять на величины значений основных оптических характеристик, изменчивость которых, однако, была зарегистрирована несколькими днями позже (6 сентября).

Данные обратных траекторий, обработанные алгоритмом пространственно-временной локализации источников приземного аэрозоля [13] за 6 сентября, показали увеличение интенсивности восходящего потока над пустыней Сахара.



Р и с . 1 . Микрофизические характеристики аэрозоля для двух черноморских станций.



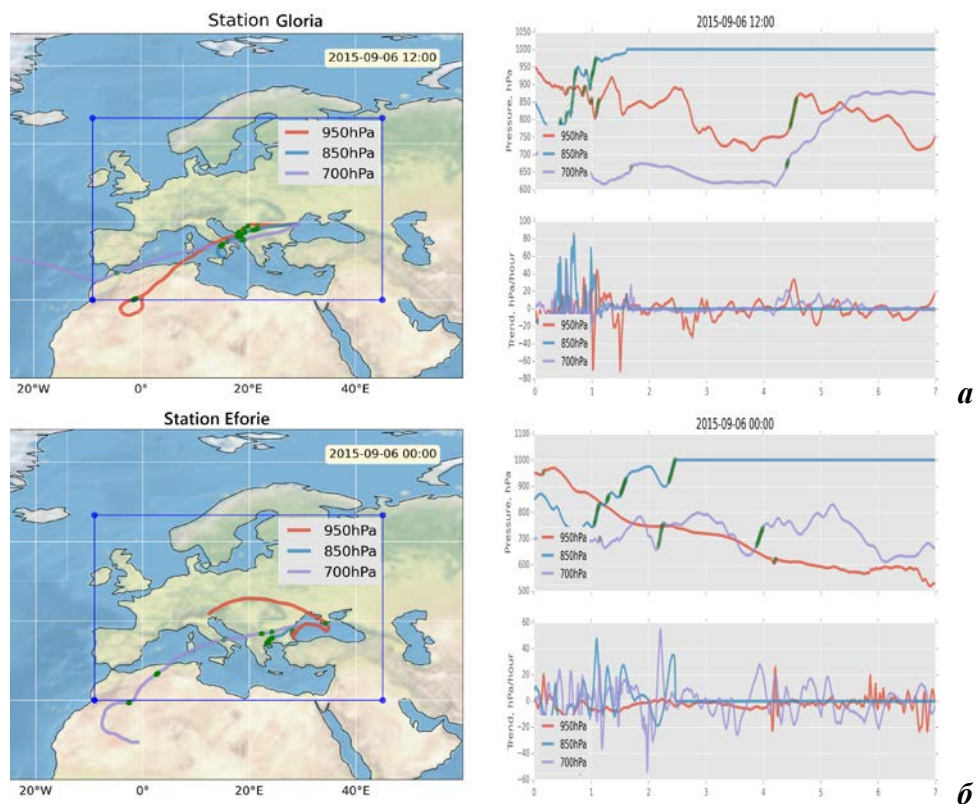
Р и с . 2 . Семидневные обратные траектории за 6 сентября 2015 г. для станций Eforie (а), Sevastopol (б), Gloria (в), на станции Gloria за период 1 – 20 сентября 2015 г. (з) для слоя 500гПа по данным сайта <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>.

Согласно методике, преобладающий тип аэрозоля может быть обнаружен в том случае, когда он находится на высоте до 700 гПа над исследуемым регионом. Анализ обратных семидневных траекторий показал перенос со стороны сирийской пустыни для двух дней исследуемого периода на 500 гПа как по данным AERONET (рис.3), так и по данным лаборатории NOAA Air Resources Laboratory модели HYSPLIT (рис.4).

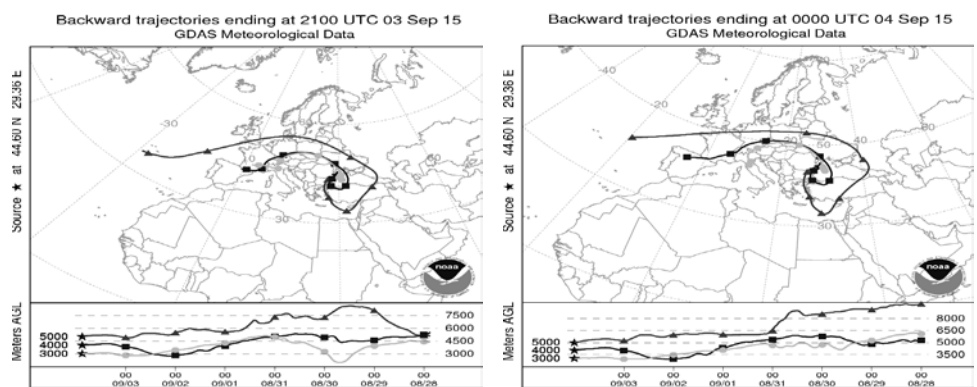
Микрофизика. Модель AERONET инвертирует рассеяние небосвода одновременно на всех доступных длинах волн для сценариев полного солнечного альмукантарата или сценария измерений в основной плоскости работы прибора ($\sim 2,0^\circ < \Theta$) одновременно с измерениями аэрозольной оптической толщины $\tau(\lambda)$ на тех же самых длинах волн. В зависимости от модели радиометра Cimel измерения могут быть проведены на всех или некоторых спектральных каналах: 0,34; 0,38; 0,44; 0,5; 0,675; 0,87; 1,02 и 1,64 μm .

Разделение на мелкую (тонкую) и грубую фракций: алгоритм инверсии находит минимум в интервале распределения частиц по размерам от 0,439 до 0,992 μm . Этот минимум используется в качестве начальной точки разделения между частицами мелкой и крупной фракции. Используя это разделение, алгоритм моделирует оптическую толщину, фазовую функцию и альбедо однократного рассеяния тонкой и грубой фракций отдельно.

Анализ распределения частиц по размерам подтвердил наличие в атмосфере крупных частиц пыли над регионом Черного моря 6 сентября 2015 г.

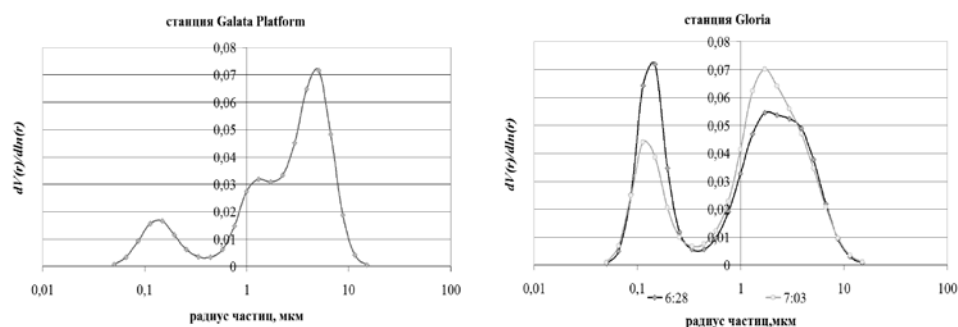


Р и с . 3 . Семидневные обратные траектории для случая переноса пылевого аэрозоля при различных начальных значениях давления с выделенными (зеленым) участками восходящих потоков аэрозоля, полученные по методике [5] для станций *Gloria* (а), *Eforie* (б).



Р и с . 4 . Семидневные обратные траектории за 3 и 4 сентября 2015 г. для случая станции *Gloria* по данным модели *HYSPLIT NOAA Air Resources Laboratory* (<http://www.arl.noaa.gov>).

Исследования оптических и пространственно-временных характеристик пылевого аэрозоля во время пылевого события в сентябре 2015 г. показали отличия как микрофизических, так и основных оптических характеристик пылевой бури Сирии от характеристик пылевого аэрозоля пустыни Сахара [12].



Р и с . 5 . Распределение частиц по размерам для 6 сентября 2015 г. на станциях *Galata Platform* и *Gloria* (по данным сайта <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Пылевой аэрозоль, наблюдаемый в исследуемый период, характеризуется комбинированным составом как мелких, так и крупных частиц в эквивалентном соотношении. Анализ показателя преломления для характеристик пылевого аэрозоля за 6 сентября 2015 г. показал отклонения от нормального (среднестатистического для нашего региона) распределения.

Выводы.

1. Аэрозоль, наблюдаемый за период сильной пылевой бури, достигший региона Черного моря, характеризуется комбинированным составом как мелких, так и крупных частиц в эквивалентном соотношении.

2. Пыльная буря, возникшая на Ближнем Востоке, соединила в себе характеристики сразу двух природных явлений, однако, несмотря на большую интенсивность, исследования пространственно-временных характеристик пылевого аэрозоля не подтвердили присутствие пылевого аэрозоля со стороны Сирии над регионом Черного моря.

3. За исследуемый период был обнаружен день экстремального выброса пылевого аэрозоля, однако не со стороны Сирии, а со стороны пустыни Сахара (6 сентября 2015 г.).

Благодарность. Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-35-00179 и гранта РФФИ 14-45-01516 р_юг_a. Авторы благодарят проект *AERONET* и в частности В.Н.Холбен, G.Zibordi, Sabina Stefan, Hala Khalid Al-Jassar за предоставленные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li Z., Chen H., Cribb M., Dickerson R., Holben B., Li C., Lu D., Luo Y., Maring H., Shi G., Tsay S.-C., Wang P., Wang Y., Xia X., Zheng Y., Yuan T., Zhao F.* Aerosol optical properties and its radiative effects in northern China // *J. Geophys. Res.*– 2007.– 112. doi: 10.1029/2006JD007382.
2. *Li Z., Chen H., Cribb M., Dickerson R., Holben B., Li C., Lu D., Luo Y., Maring H., Shi G.* Preface to special section on East Asian studies of tropospheric aerosols: An international regional experiment (EAST-AIRE) // *J. Geophys. Res.*– 2007.– 112. doi: 10.1029/2007JD008853.
3. *Tsunematsu N., Kai K., Matsumoto T.* The influence of synoptic-scale air flow and local circulation on the dust layer height in the north of the Taklimakan Desert // *Water Air Soil Pollut. Focus.*– 2005.– 5.– P.175-193.

4. Logan T., Xi B., Dong X., Obrecht R., Li Z., Cribb M. A study of Asian dust plumes using satellite, surface, and aircraft measurements during the INTEX-B field experiment // *J. Geophys. Res.*– 2010.– 115. doi:10.1029/2010JD014134.
5. Pope C.A. Air pollution and health – Good news and bad // *N. Engl. J. Med.*– 2004.– 351.– P.1132-1134.
6. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote F., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajama T., Lavenu F., Jankoviak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sensing & Environment.*– 1998.– № 66.– P.1-16.
7. Sun Y., Zhuang G., Wang Y., Zhao X., Li J., Wang Z., An Z. Chemical composition of dust storms in Beijing and implications for the mixing of mineral aerosol with pollution aerosol on the pathway // *J. Geophys. Res.*– 2005.– 110. doi:10.1029/2005JD006054.
8. Хромов С.П., Петросянци М.А. Метеорология и климатология.– М.: Изд-во МГУ, Наука, 2006.– 327 с.
9. Муравьев А.В. Режимы атмосферной циркуляции и долгосрочный метеорологический прогноз / Дис. на соиск. уч. ст. докт. физ.-мат. наук.– М.: ГМИЦ России, 2006.– 172 с.
10. Яковлева Д.В., Толкаченко Г.А. Исследование дневной изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы над Черным морем // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– вып.16.– С.212-223.
11. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль.– Л.: Гидрометеиздат, 1983.– 224 с.
12. Калининская Д.В. Исследование особенностей оптических характеристик пылевого аэрозоля над Чёрным морем // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– вып.26(2).– С.151-162.
13. Калининская Д.В., Суслин В.В. Простая методика определения источников приземного аэрозоля на основе результатов анализа обратных траекторий // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.*– 2015.– т.8, вып.1.– С.59-67.

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.

D.V.Kalinskaya, V.V.Suslin

STUDY PROPERTIES OF AEROSOLS OVER THE BLACK SEA DURING THE DUST STORM OF 2015

The satellite images AQUA and TERRA MODIS and in situ data of optical characteristics of the dust aerosol used AERONET network during the removal of dust aerosol in the autumn 2015 are analyzed. The optical properties of aerosols in the atmospheric column are described, and the dynamics of the spatial variability of distribution, dust particle size distribution are analyzed. The data obtained on the stations Galata Platform, Gloria, Eforie, Kuwait_University and Sevastopol during the transport of dust aerosol is compared. The parameters of spatial variability of aerosol on the different heights during the transport of dust storm are determined.

KEYWORDS: *the Black Sea, AERONET, dust aerosol, Angstrom parameter, satellite images, particle size distribution*