

Д.В. Калининская

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь***ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЫЛЕВОГО АЭРОЗОЛЯ
НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ**

Проанализированы данные оптических характеристик атмосферы во время переноса пылевого аэрозоля со стороны африканского континента. Проанализированы условия регистрирования и микроструктура пылевого аэрозоля. Описаны оптические свойства аэрозоля в столбе атмосферы, а также представлен анализ динамики пространственной изменчивости, распределения частиц пыли по размерам. Проведен сравнительный анализ данных станций *Messina* и *Sevastopol* во время зимнего переноса пыли пустыни Сахара. Определены характеристики пространственной изменчивости аэрозоля на разных высотах во время событий переноса пыли: определены средние и максимальные скорости переноса крупных частиц.

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

1. Введение.

Исследования дневной изменчивости аэрозольной оптической толщины (АОТ) важны для решения различных задач, включая разработку методов атмосферной коррекции спутниковых данных, расчет радиационных потоков, анализ взаимодействия аэрозолей с водяными парами и для решения задач здравоохранения.

Регион пустыни Сахара – один из самых обширных и мощных источников минеральной пыли в северном полушарии. Пыль оказывает одно из самых критических влияний на климат Земли. Геофизические исследования в основном сосредоточиваются на расшифровке влияния частиц пыли, состоящих из минералов (например, окислы и фосфаты менее чем 62 микрометра в диаметре), на климат. В некоторых случаях частицы пыли рассматривают как ядра конденсации дождевых капель, вместе с тем, эти частицы сдерживают выпадение осадков, впитывая влагу.

Существует два направления исследований влияния пыли на климат: в первом случае рассматривают пыль как источник охлаждения Земли, поскольку она препятствует попаданию солнечного света на земную поверхность. Второй тип исследований рассматривает пыль, как источник поглощения части солнечного света, а, следовательно, как источник нагревания атмосферы.

При рассмотрении антропогенных изменений климата часто пренебрегают минеральной пылью, рассматривая ее как часть естественного аэрозоля. Несмотря на то, что полностью невозможно определить влияние минеральной пыли на глобальный климат, некоторые исследователи считают, что пыль может быть важным климатообразующим компонентом, особенно над определенными океаническими областями и регионами, где концентра-

ции пыли высоки. Исследование оптических свойств сахарской пыли важны для различных оценок радиационного воздействия, так как пыль играет важную роль в процессе рассеяния. При исследовании вариаций пылевых аэрозолей в работах [1, 2] было показано, что дневная изменчивость аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ) почвенной пыли над различными станциями наблюдений относительно небольшая (менее $\pm 5\%$). С другой стороны, известны данные о более значительных вариациях АОТ пылевых аэрозолей в течение дня (больше 10% во все сезоны [3]). Столь значительные изменения АОТ существенно изменяют прозрачность атмосферы [4], влияют на безопасность работы авиации [5] и их необходимо учитывать при расчетах радиационного воздействия шлейфов пылевых аэрозолей.

2. Аппаратура, сбор данных и методика их обработки.

В настоящей статье представлены результаты измерений аэрозольной оптической толщины солнечным фотометром фирмы *CIMEL Electronique* модель 318 (*CE-318*) [6, 7]. Прибор является составной частью глобальной автоматизированной сети изучения аэрозоля *AERONET (AErosol RObotic NETwork)* и установлен на крыше здания Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины (МГИ НАН Украины) в точке с координатами 44°36'56" с.ш. и 33°31'02" в.д. на высоте 80 м над уровнем моря. Технические и метрологические характеристики, протокол измерений, процедуры калибровок и методы обработки данных, получаемых с помощью солнечных фотометров *CE-318*, подробно описаны в работе [6], поэтому здесь представлено лишь краткое описание прибора и методов обработки данных.

Автоматизированные солнечные фотометры (в дальнейшем, для сокращения, будем называть их фотометрами) *CE-318* имеют угол поля зрения 1,2° и предназначены для выполнения прямых измерений яркостей солнечного диска и небосвода. Измерения яркости Солнца проводятся в спектральных участках 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940 и 1020 нм. Эти измерения используются для расчета аэрозольной оптической толщины АОТ на каждой длине λ за исключением канала 936 нм, который используется для определения содержания паров воды в столбе атмосферы (в сантиметрах осажденной воды). Для выделения спектральных участков в приборе используются интерференционные фильтры с полосой пропускания 10 нм в видимом диапазоне спектра и с полосами 2 и 4 нм в каналах с длинами волн 340 и 380 нм (ультрафиолетовый участок спектра электромагнитного излучения, УФ-диапазон), соответственно. Измерения яркости Солнца на всех восьми спектральных участках проводятся с интервалом 15 минут в дневное время. Наряду с измерениями яркости Солнца фотометры *CE-318* в автоматическом режиме выполняют измерения спектральной яркости небосвода в альмукантарате Солнца и в плоскости солнечного вертикала. Эти измерения проводятся в спектральных участках 440, 675, 870 и 1020 нм при оптических воздушных массах 4, 3 и 2 в утренние часы и после полудня, а также через каждый час между ними. Результаты измерений используются для получения индикатрис рассеяния и последующего преобразования их в

микрофизические характеристики аэрозоля, распределение частиц аэрозоля по размерам, альbedo однократного рассеяния и другие. Методика этих преобразований (инверсий) изложена в [7, 8].

Для устранения погрешностей, вызванных попаданием в поле зрения прибора облаков, в процессе первичной обработки данных выполняется процедура экранирования результатов измерений от облаков [8]. При этом для отбраковки данных, зашумленных облаками, используются предположения о гладкости аэрозольной оптической толщины во времени и пространстве, т.е. исключаются большие и быстрые изменения АОТ. Измерения яркости Солнца выполняются последовательно в восьми спектральных участках, на что требуется приблизительно 10 секунд. Каждая последовательность состоит из трех таких измерений и занимает 30 секунд, создавая триплетное наблюдение для каждой длины волны. Интервал между триплетными измерениями в дневное время составляет около 15 минут. Эти триплеты используются для обнаружения облаков, поскольку ожидается, что изменения яркости облаков в пределах такого короткого интервала времени больше, чем соответствующие изменения аэрозольной оптической толщины [8]. Для окончательного экранирования данных от облаков, проверяют параметр Ангстрема, т.е. наклон спектральной зависимости АОТ. Признаком обнаружения облака считают сочетание небольших значений параметра Ангстрема с большими значениями аэрозольной оптической толщины. Применение последнего критерия в некоторых случаях может существенно исказить полученные результаты, так как его использование возможно только при отсутствии в атмосфере пылевых аэрозолей, характерными признаками которых так же являются значительное уменьшение значений показателя Ангстрема при существенном увеличении АОТ [9].

Целью данной работы является исследование оптических свойств аэрозоля для безоблачной атмосферы во время переноса пыли из пустыни Сахара над регионом Черного моря по данным измерений яркости солнца и небосвода посредством фотометра *CE-318* и портативного фотометра *MICROTOPS II*. В рамках программы *AERONET* были определены временная и пространственная изменчивость оптических характеристик атмосферного аэрозоля в районе Севастополя, характерных для пылевого аэрозоля.

3. Результаты и обсуждение.

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.

Особое внимание при анализе трех основных оптических характеристик привлекла изменчивость АОТ и параметра Ангстрема, т.к. разброс значений именно этих величин являлся наибольшим. Большие вариации аэрозольной оптической толщины и параметра Ангстрема были отмечены не только в определенный день, когда наблюдался интенсивный перенос пыли, но и в течение недели, когда регистрировалась длительная пылевая буря над Африканским континентом.

Оценивая интенсивность переноса пыли, можно выделить две фазы: «весеннюю» и «летнюю». Для данных фаз переноса характерны следующие значения основных оптических характеристик: первая фаза – высокие значения АОТ и очень низкие (менее 0,5) значения параметра Ангстрема, вторая фаза – высокие значения АОТ и средние (от 0,5 до 1,8) значения параметра Ангстрема (см. рис. 1). Однако, если говорить о межгодовой изменчивости, то надо отметить, что перенос пыли осуществляется в течение всех сезонов периода наблюдений [3].

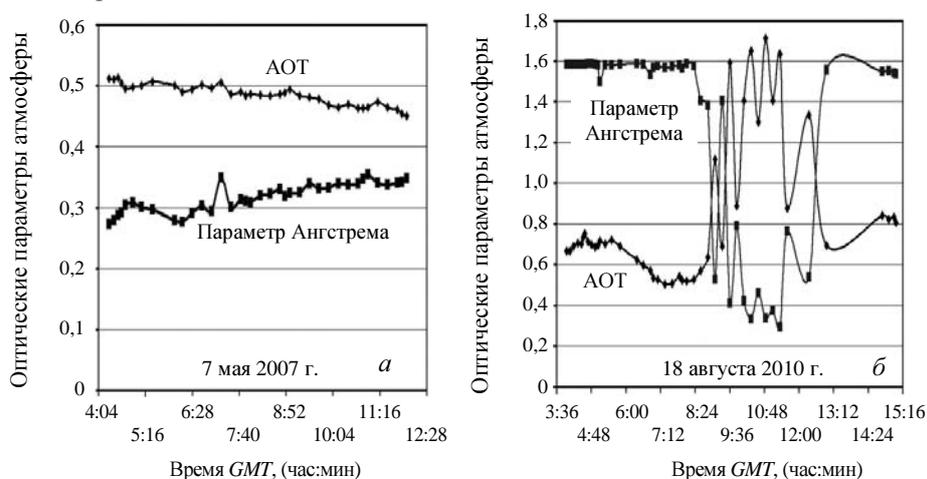


Рис. 1. Временная изменчивость АОТ (◆◆) и параметра Ангстрема (■■) во время весенней (а) и летней (б) фаз переноса пылевого аэрозоля. GMT – Greenwich Mean Time, среднее время по Гринвичу.

При анализе размерного состава аэрозоля (т.е. разделения частиц на грубую и тонкую фракции) было выявлено, что при наличии пылевого аэрозоля в столбе атмосферы, наблюдается резкое разделение фракций (см. рис. 2).

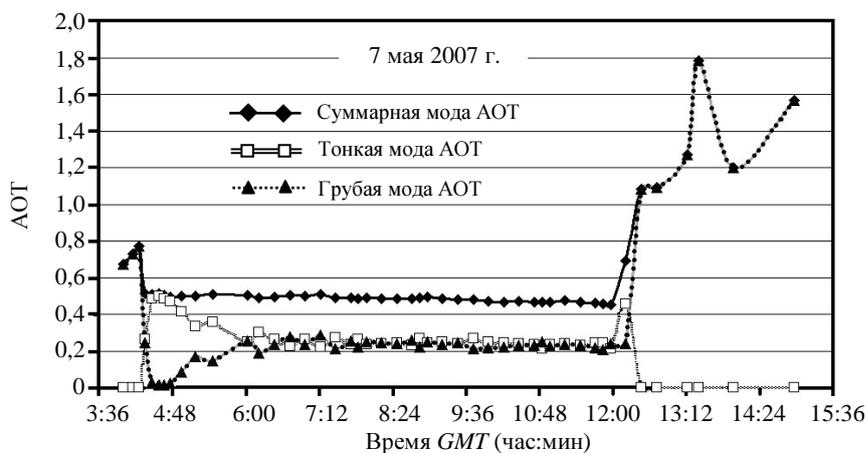


Рис. 2. Распределение мод АОТ для случая переноса пылевого аэрозоля, зарегистрированного 7 мая 2007 года.

При обработке данных АОТ и построении графиков дневного хода параметра Ангстрема и АОТ для дней, когда значения АОТ нетипично высоки, а значения параметра Ангстрема близки к нулю или даже принимают отрицательные значения, исследованы и проанализированы спутниковые изображения. Спутниковые изображения подтверждают интенсивный перенос пылевого аэрозоля со стороны Африканского континента в сторону региона Черного моря (см. рис. 3).

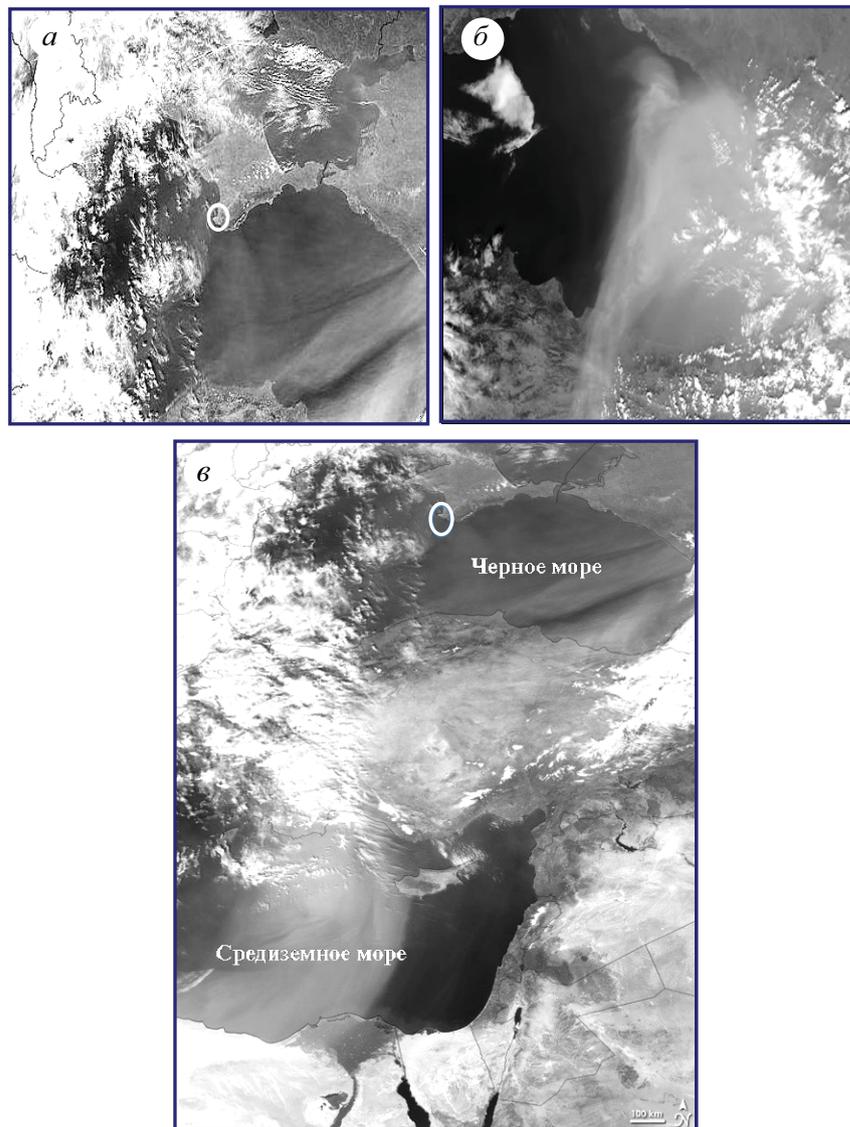


Рис. 3. Спутниковые изображения переноса пыли со стороны пустыни Сахара 24 марта 2008 г., полученные с помощью сканера *MODIS Terra*¹ (а, в) и *MODIS Aqua*² (б) (по данным сайта <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), белым овалом отмечено расположение станции *AERONET Sevastopol* (по данным сайта <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Основные статистические исследования изменчивости атмосферы, основанные на анализе изменчивости АОТ, проводятся на длине волны 500 нм (АОТ (500)), однако особое внимание в данной работе уделяется изменчивости АОТ в инфракрасном (ИК-) и УФ-спектральном диапазоне. Среднестатистическое спектральное распределение АОТ для любой станции *AERONET* можно записать в виде $\text{АОТ}(340) > \text{АОТ}(380) > \dots > \text{АОТ}(870) > \text{АОТ}(1020)$. При построении спектрального хода АОТ для дней интенсивного переноса пылевого аэрозоля над станцией *Sevastopol* были обнаружены аномалии спектральной кривой ($\text{АОТ}(340) < \text{АОТ}(380)$, $\text{АОТ}(870) < \text{АОТ}(1020)$) (см. рис. 4).

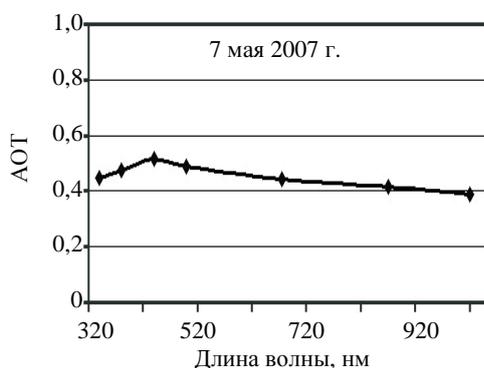


Рис. 4. Аномальное спектральное распределение аэрозольной оптической толщины атмосферы.

Наиболее часто данная аномалия регистрируется, когда наблюдается случай вторжения пылевого аэрозоля в атмосферу над исследуемым регионом. Анализ спектрального хода для всех дней периода измерений показал, что такая аномалия не является одиночной, и что подобное поведение спектральной кривой наблюдается не только для случаев переноса пылевого аэрозоля, но и для случаев чистой атмосферы. Также была обнаружена аномалия значений и в ИК-диапазоне. Аномалия в данном диапазоне

наблюдается чаще, чем для УФ-диапазоне, однако, она имеет менее выраженный разброс значений (если в УФ-диапазоне аномалия характеризуется вариацией значений в десятых долях, то в ИК-диапазоне в основном сотых долях): в 2006 г. – 2 дня, 2007 г. – 13 дней, 2008 г. – 17 дней, 2009 г. – 30 дней, 2010 г. – 8 дней, 2011 г. – 12 дней. Общее количество случаев регистрации аномалии спектральной кривой АОТ в ИК-диапазоне составило 82 дня. По среднедневным данным уровня 1,5 (*Level 1.5*) количество дней измерений, когда наблюдалась аномалия спектральной кривой АОТ в УФ-диапазоне за исследуемый период насчитывает: в 2006 году – 1 день, 2007 г. – 30 дней, 2008 г. – 2 дня, 2009 г. – 1 день, 2010 г. – 1 день, 2011 г. – 5 дней. За период с 2006 – 2011 г. общее количество случаев регистрации аномалий спектральной кривой АОТ в УФ-диапазоне составляет 40 дней. Однако уровень 2.0 предоставлен только для 3 дней за весь период измерений: 29.04.2007, 24.03.2008 и 30.01.2011.

Также были зафиксированы данные измерений АОТ, когда наблюдались сразу 2 аномалии в ИК- и УФ-диапазонах одновременно. Таких дней за 6 лет наблюдений было выявлено 7, но только для одного дня были предоставлены данные уровня обработки 2.0 (*Level 2.0*). Данное статистическое исследование было проведено для того, чтобы показать, что в зависимости от целей исследования можно использовать данные различных уровней обработки, однако остается до конца не ясно, вследствие чего аномалии спектральных кривых для дней регистрации переноса пылевого аэрозоля почти в 100% случаев пропадают в данных уровня обработки 2.0.

Регистрировать перенос пыли со стороны пустыни Сахара над Черноморским регионом можно, только если изначально пыль была поднята на очень большую высоту [3] и при наличии сильных воздушных потоков. Поэтому при анализе обратных траекторий переносов аэрозоля над станцией *Sevastopol* в первую очередь исследовался перенос на уровне 500 гПа (на высоте 4 км над уровнем моря).

Анализ изображений обратных семидневных траекторий переноса аэрозоля для исследуемых дней с аномальными значениями АОТ и параметра Ангстрема подтвердил перенос пылевого аэрозоля со стороны пустыни Сахара (см. рис. 5).

Название станции: *Sevastopol* (положение отмечено звездочкой)
7-дневные обратные траектории: 2007-05-07.

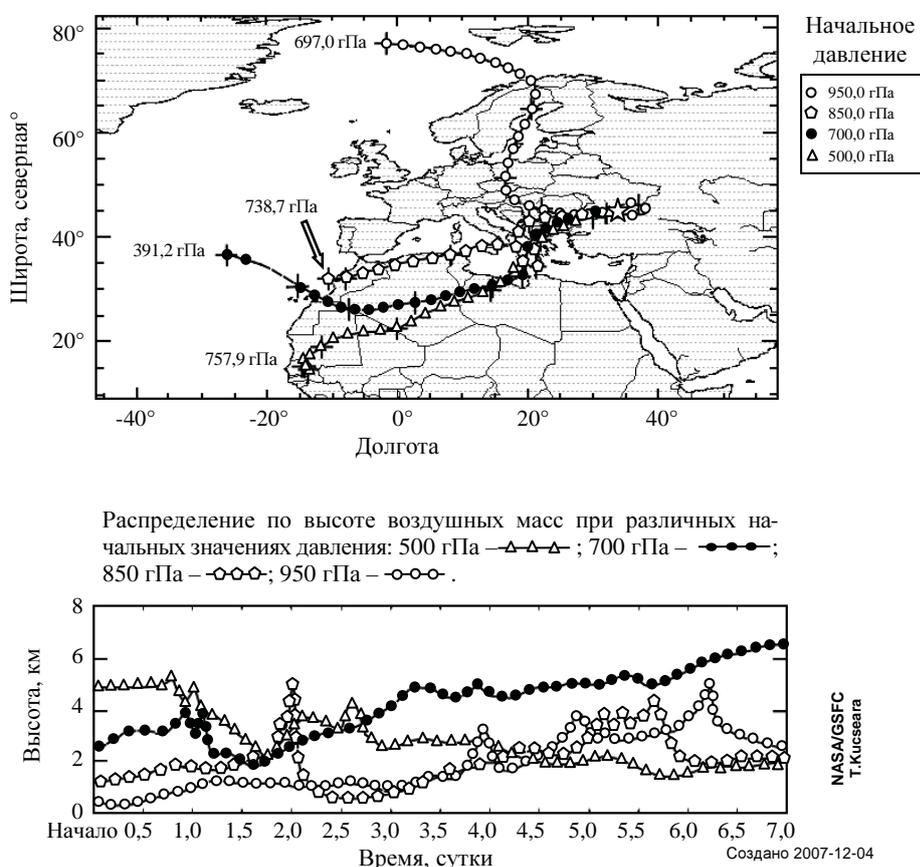


Рис. 5. Семидневные обратные траектории для случая переноса пылевого аэрозоля, зарегистрированного 7 мая 2007 г. (по данным сайта <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

В ходе визуальных наблюдений за состоянием атмосферы, проведенных на Мальте в период с ноября по декабрь 2009 г. был зарегистрирован сильный долговременный перенос пылевого аэрозоля со стороны африканского континента через Средиземное море в сторону черноморского региона.

Данные анализа обратных семидневных траекторий и распределения частиц по размерам, как на ближайшей к Мальте станции *Messina* сети

AERONET, так и данных станции *Sevastopol* подтвердили присутствие грубой моды в составе аэрозоля и резкое разделение фракций в данный период наблюдений (см. рис. 6 и рис. 7).

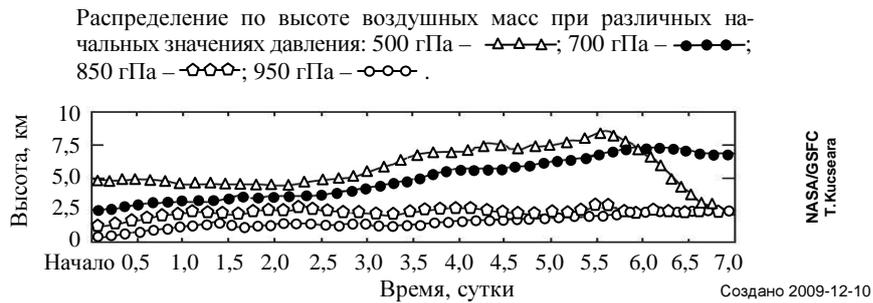
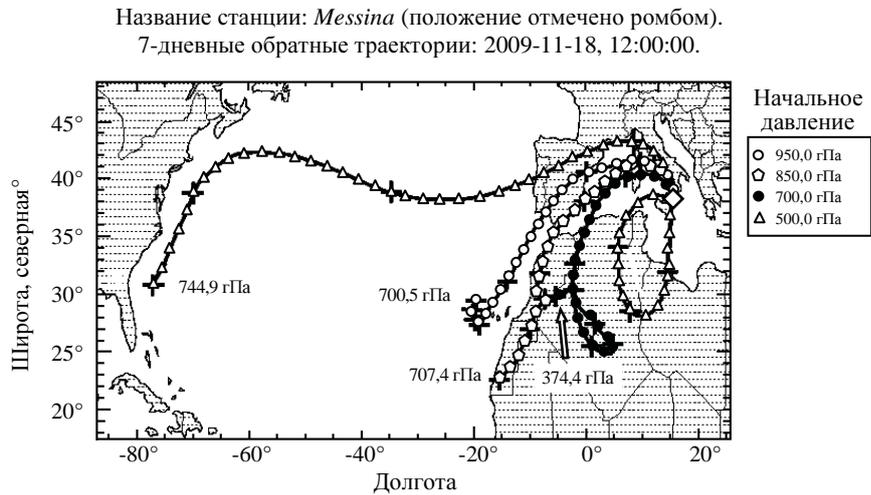


Рис. 6. Семидневные обратные траектории для случая переноса пылевого аэрозоля, зарегистрированного 18 ноября 2009 г. (по данным сайта <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

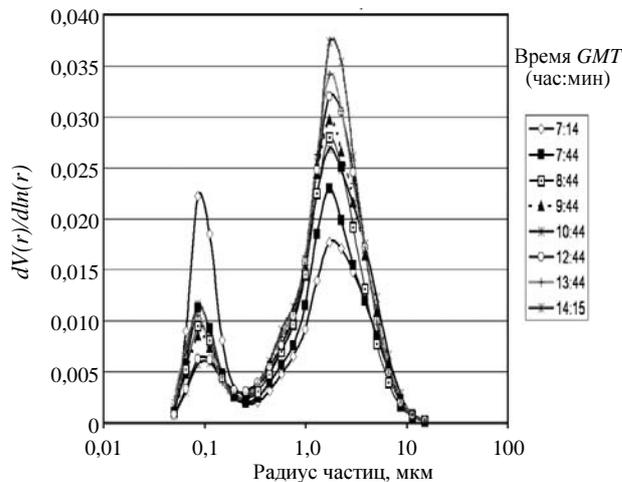


Рис. 7. Распределение частиц по размерам для события переноса пылевого аэрозоля, зарегистрированного 18 ноября 2009 г. на станции *Messina* (по данным сайта <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Для исследования пространственной изменчивости и определения скорости переноса пыли в регион Черного моря необходимо было проанализировать траектории переноса пыли, а также сделать сопоставление данных станций по ходу движения пылевого облака. Для анализа был выбран длительный зимний перенос пыли в декабре 2009 г. Пространственная изменчивость содержания пылевого аэрозоля была проанализирована путем исследования данных АОТ и параметра Ангстрема для станций, которые, по данным обратных траекторий, были на пути переноса пылевого облака. Для переноса пыли в декабре 2009 года такими станциями были (см. рис. 8).

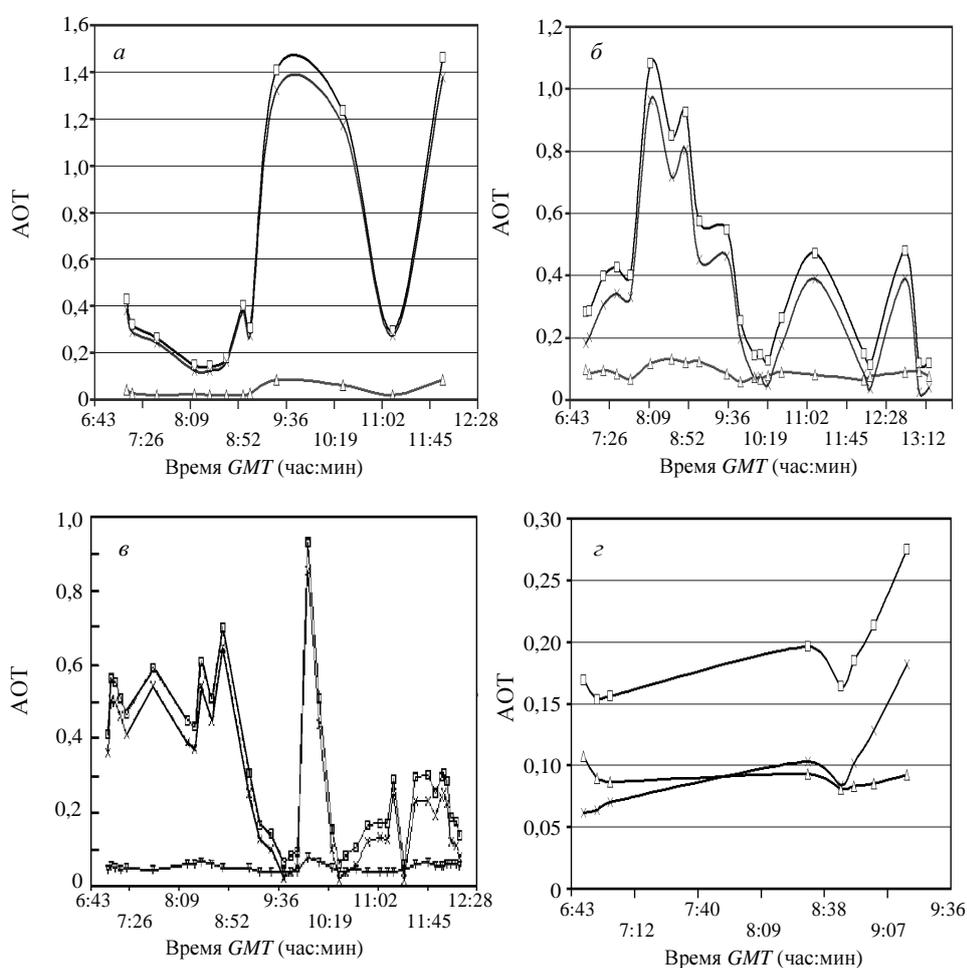


Рис. 8. Случай переноса пылевого аэрозоля, зарегистрированное 24 декабря 2009 г. на станциях AERONET: а – Messina (остров Сицилия, Италия); б – Moldova (Молдова, Кишинев); в – Rome (Италия); з – Sevastopol (АР Крым, Украина). Моды АОТ: \square – суммарная мода; \triangle , ∇ – тонкая мода; \times – грубая мода.

Также было подтверждено предположение о неоднородности переноса пылевого аэрозоля – случаи вторжения пыли происходят пульсациями, чему есть подтверждение на фотографиях небосвода во время данного переноса (см. рис. 9): фотография, показанная на рис. 9, а, соответствует началу слу-

чая переноса пылевого аэрозоля, а фотография, показанная на рис. 9, б, сделана спустя час после начала регистрации события. На ней хорошо видна граница между двумя пылевыми пульсациями, разделенными полосой чистого неба.

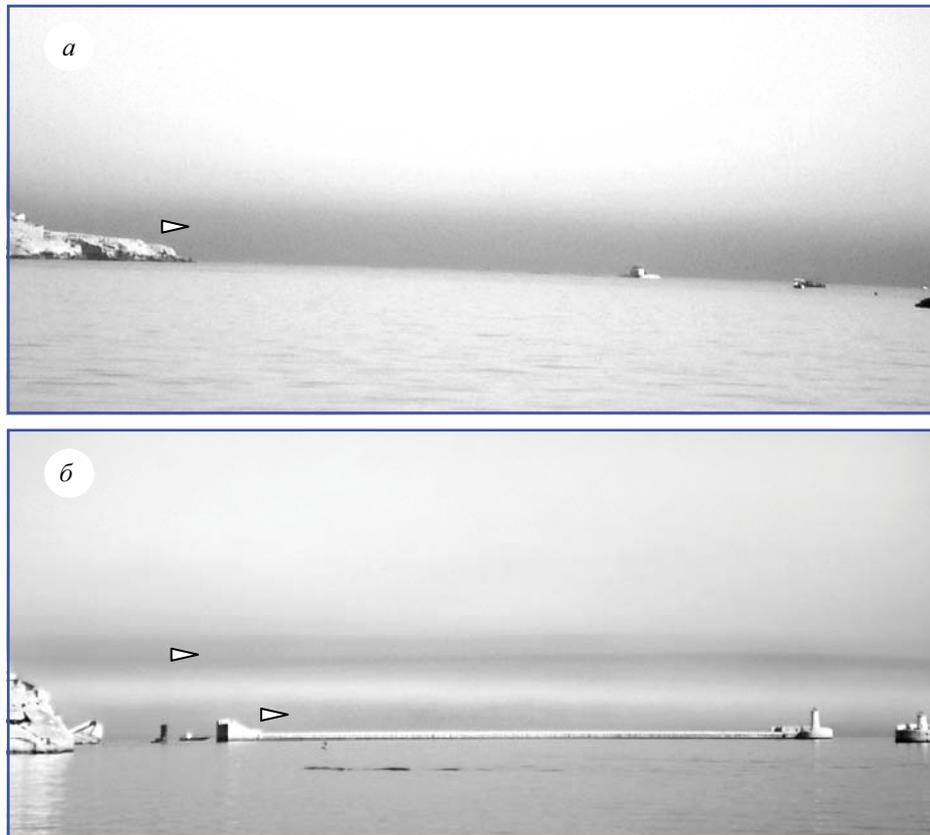


Рис. 9. Фотографии случая переноса пылевого аэрозоля, зарегистрированного 18 ноября 2009 г.: *a* – начальная стадия переноса; *б* – через час после начала переноса. Пылевые облака отмечены символом (\triangleright).

Однако, несмотря на то, что распространение пылевого аэрозоля не является однородным, для определения скорости перемещения пылевых облаков данный фактор не учитывается. В данной работе расчет был проведен по семидневным обратным траекториям между четырьмя станциями, при условии, что между двумя станциями скорость перемещения воздушных масс постоянна. Расчет показал, что средняя скорость перемещения Сахарской пыли составила 20 км/ч, а максимальная скорость переноса составила 32 км/ч.

4. Итоги и выводы.

1. Анализ основных оптических характеристик (аэрозольной оптической толщины и параметра Ангстрема) для случаев переноса пылевого аэрозоля позволил выделить 2 фазы интенсивного переноса: весеннюю и летнюю, а также определить диапазоны величин основных оптических характеристик для данных фаз.

2. Анализ спутниковых изображений для дат регистрирования переноса пылевого аэрозоля наглядно демонстрирует наличие пылевого аэрозоля в атмосфере над Черным морем.
3. Во время переноса пылевого аэрозоля в атмосфере преобладают крупные частицы и выявлено отсутствие корреляций в изменениях АОТ обусловленных тонкой и грубой фракциями (модами) аэрозолей (АОТ грубой и тонкой мод сильно различается по абсолютной величине).
4. Анализ оптических характеристик и визуальных наблюдений подтвердил предположение о неоднородности переноса пыли, имеющих по факту характер распространения пульсаций.
5. Средняя скорость распространения пылевого аэрозоля по результатам анализа события зимнего переноса пылевого аэрозоля составила 20 км/ч, а максимальная скорость перемещения 32 км/ч.

Благодарности. Авторы благодарят доктора Б. Холбена, руководителя Научного Проекта, за его поддержку работы AERONET в Севастополе и доктора А. Смирнова за его постоянное внимание к исследованиям аэрозоля над Черным морем, а также М. Сорокина – за действенную и оперативную поддержку прибора CE-318.

ПРИМЕЧАНИЯ.

- ^{1,2} MODIS – *The Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*, установлен на борту космических аппаратов *Terra* (Земля) и *Aqua* (Вода), запущенных на орбиту ИСЗ соответственно в 1999 и 2002 гг. Рабочий диапазон длин волн – от 0,4 до 14,4 мкм, разбит на 36 спектральных каналов, пространственная разрешающая способность которых составляет 250 м (2 канала), 500 м (5 каналов) и 1000 м (29 каналов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaufman Y.J., Holben B.N., Tanre D. et al. Will aerosol measurements from Terra and Aqua polar orbiting satellites represent the daily aerosol abundance and properties // *Geophys. Res. Lett.* - 2000. – Vol. 27. – P. 3861-3864.
2. Wang J., Xia X., Wang P. and Christopher S.A. Diurnal variability of dust aerosol optical thickness and Angstrom exponent over dust source regions in China // *Geophys. Res. Lett.* – 2004. – Vol. 31, L08107, doi:10.1029/2004GL019580.
3. Pinker R. T., Pandithurai G., Holben B.N., Dubovik O. A dust outbreak episode in sub-Saharan West Africa // *J. Geophys. Res.* – 2001. – Vol. 106, № D19. – P. 22923-22930.
4. Christopher S.A., Wang J., Ji Q., Tsay S.-C. Estimation of diurnal shortwave dust aerosol radiative forcing during PRIDE // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol. 108, № D19, 8596, doi:10.1029/2002JD002787.
5. Dubovik O., King M.D. A flexible inversion algorithm for the retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res.* – 2000. – Vol. 105, № D16. – P. 20673-20696.
6. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I. et al. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Rem. Sens. Environ.* – 1998 – Vol. 66. – P. 1-16.

7. *Holben B.N., Tanre D., Smirnov A. et al.* An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol Optical Depth from AERONET // *J. Geophys. Res.* – 2001. – Vol. 106, № D11. – P. 12067-12097.
8. *Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F. et al.* Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET database // *Rem. Sens. Env.* – 2000. – Vol.73, Iss. 3. – P. 337-349.
9. *Smirnov A., Holben B.N., Dubovik O. et al.* Measurement of atmospheric optical parameters on U.S. Atlantic coast sites, ships, and Bermuda during TARFOX // *J. Geophys. Res.* – 2000. – Vol. 105, № D8. – P. 9887-9901.

Матеріал поступил в редакцию 16.11.2012 г.

АНОТАЦІЯ Проаналізовані дані оптичних характеристик атмосфери під час переносу пилового аерозолю з боку африканського континенту. Проаналізовано умови реєстрації і мікроструктура пилового аерозолю. Описано оптичні властивості аерозолю в стовпі атмосфери, а також представлений аналіз динаміки просторової мінливості, розподілу часток пилу за розмірами. Проведено порівняльний аналіз даних станцій *Messina* і *Sevastopol* під час зимового переносу пилу пустелі Сахара. Визначено характеристики просторової мінливості аерозолю на різних висотах під час подій переносу пилу: визначені середні та максимальні швидкості переносу великих часток.

ABSTRACT Aerosol optical characteristics of atmosphere during the transfer of dust aerosol from the side of african continent are analyzed. The registration conditions and microstructure of dust aerosol are analyzed. Optical properties of aerosol in atmosphere column are described, and also the analysis of spatial variability dynamics, particles size distribution of dust are presented. The comparative analysis of the *Messina* and *Sevastopol* stations data during the winter transfer of Sahara dust is carried out. Characteristics of spatial variability of aerosol on different heights during the events of dust transfer are following: maximum and medium speeds of transfer of large particles are determined.