

Свердлик Л.Г.

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ АБСОРБИРУЮЩЕГО АЭРОЗОЛЯ

L.G. Sverdlik

PECULIARITIES OF ABSORBING AEROSOL RADIATIVE PROPERTIES

УДК: 551.524:551.515

На основе использования данных спутникового дистанционного зондирования (MODIS/Terra и AIRS/Aqua) и наземных измерений проведено исследование эффекта абсорбирующего аэрозоля на радиационный режим и устойчивость атмосферы в условиях аномального выноса Азиатской пыли.

Research of absorbing aerosol effect on radiative mode and stability of atmosphere during transport of Asian dust is carried out on the basis of satellite remote sensing data (MODIS/Terra and AIRS/Aqua) and surface measurements.

Введение

Разработка и внедрение современной системы глобального мониторинга параметров атмосферы и Земной поверхности, включающей разнообразные по техническим характеристикам космические средства дистанционного зондирования, позволяет решать широкий круг задач в области экологических и климатических исследований. Особое место среди этих задач в последние годы занимает всестороннее изучение поглощающих свойств атмосферного аэрозоля, которые напрямую связаны с воздействием аэрозоля на радиационный баланс и вертикальную структуру температуры атмосферы, а, соответственно, протекающие в ней процессы, включая интенсивность переноса аэрозольного загрязнения, динамику формирования и фазовых переходов облачных образований. Последствия влияния абсорбирующего аэрозоля проявляются в уменьшении солнечной радиации, достигающей подстилающей поверхности, дополнительном нагреве атмосферы и увеличении эффективного потока на верхней ее границе [1,2], т.е. в значительной мере могут определять происходящие и прогнозируемые изменения погоды и климата. Преобразование энергии солнечного излучения, обусловленное присутствием аэрозольных слоев, оказывает влияние на пространственно-временные изменения структурных и динамических характеристик атмосферы. Важные результаты, имеющие отношение к воздействию абсорбирующего аэрозоля на температурный режим и устойчивость тропосферы, приведены в недавних работах [3,4]. В регионе, расположенном в северном Тянь-Шане, до настоящего времени подобные прямые исследования влияния абсорбирующего аэрозоля на распределение температуры в нижней тропосфере не проводились. Вопрос о том, в какой степени это влияние может быть отнесено к основным наблюдаемым типам аэрозоля, был рассмотрен в [5]. Согласно получен-

ным по данным измерений AERONET результатам наиболее сильным поглощением солнечного излучения и радиационным форсингом в атмосфере обладают частицы Азиатской пыли. Поэтому в настоящей статье проанализированы особенности аэрозольного влияния на радиационные характеристики и устойчивость атмосферы в ходе развития одного из наиболее интенсивных за последние годы выносов пыли с территории северо-западного Китая, который был зарегистрирован с 20 по 30 апреля 2010 года. Оценки воздействия абсорбирующего аэрозоля на состояние нижней тропосферы были получены на основе использования данных спутникового дистанционного зондирования (MODIS/Terra, AIRS/Aqua и CALIOP/CALIPSO), а также наземных измерений (AERONET).

Регион исследования, используемые данные и методология

Как показывают многолетние спутниковые, модельные и наземные экспериментальные данные, ежегодно в весенние месяцы регион северного Тянь-Шаня подвергается влиянию пылевых бурь [5]. Наиболее высокие значения аэрозольной оптической толщины (AOD) приходятся обычно на конец апреля–начало мая, что совпадает по времени с периодом наибольшей активности одной из крупнейших в мире территорий эмиссии пыли – пустыни Такла-Макан (37–42°N; 77–87°E). Азиатская пыль распространяется не только на восток, достигая Тихого океана и иногда побережья Северной Америки [6], но и в западном и северо-западном направлении, затрагивая значительную территорию Кыргызстана, при этом максимальная нагрузка пылевого аэрозоля сконцентрирована, как правило, в восточной части республики. Поэтому для проведения настоящего исследования был выбран участок, расположенный в непосредственной близости от пустыни Такла-Макан и имеющий следующие координаты по широте и долготе: 42–43°N и 78–79°E, соответственно. В границах этого участка по данным спутниковых измерений были восстановлены значения AOD, характеризующие аэрозольную нагрузку атмосферы, и вертикальные профили температуры атмосферы.

Значения оптической толщины (AOD) на длине волны $\lambda=550$ нм с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ получены спектрорадиометром среднего разрешения MODIS (MOD08_D3.051, MODIS Terra Daily Level-3 Data). Точность данных MODIS AOD над земной поверхностью составляет

$\Delta AOD = \pm 0.05 \pm 0.15 \times AOD$. Карта пространственного распределения MODIS AOD в период с 26 по 28 апреля 2010, на которую нанесен исследуемый участок, представлена на рис. 1.

Профили температуры атмосферы в пределах уровней давления от 700 до 100 гПа восстановлены по данным многоканального дифракционного

спектрометра AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*), размещенного на спутнике Aqua (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>). Прибор AIRS позволяет определять вертикальные профили температуры в дневное и ночное время с погрешностью $\sim 1^\circ\text{K}$ в слоях толщиной 1 км, что сопоставимо с данными радиозондирования атмосферы [7].

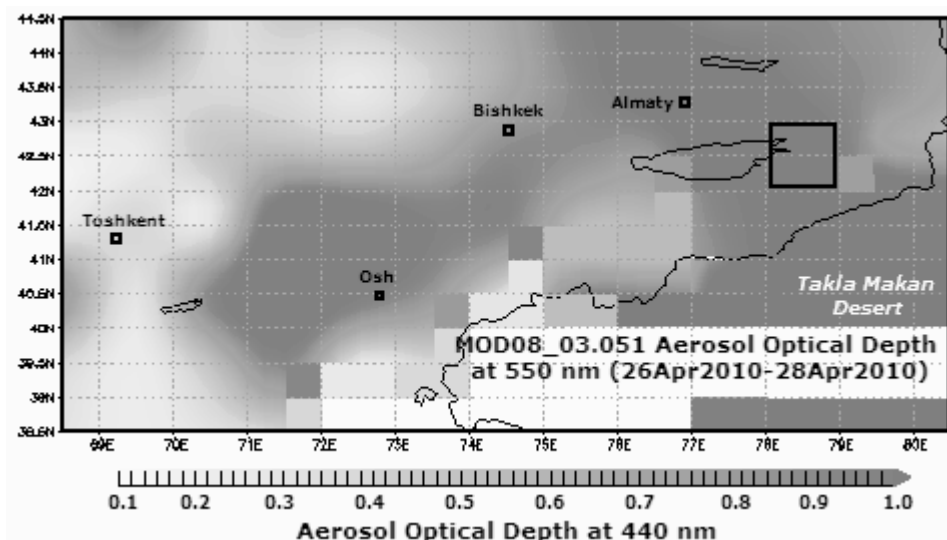


Рис. 1. Региональная карта распределения MODIS AOD 26–28 апреля 2010.

Для выявления регионального эффекта абсорбирующего аэрозоля на устойчивость стратификации атмосферы проводилось сравнение вертикального изменения температуры окружающего частицу воздуха (dT/dh) с сухадиабатическим градиентом температуры ($\gamma_A = 9.8^\circ\text{C}/\text{км}$), который представляет собой изменение с высотой температуры перемещающегося малого объема воздуха («частицы»). В качестве критериев устойчивости атмосферы были приняты следующие условия [8]:

- $dT/dh > \gamma_A$ – при перемещении вверх «частица» оказывается теплее окружающего воздуха и состояние атмосферы неустойчиво;

- $dT/dh = \gamma_A$ – вертикальное смещение не приводит к разности температур и состояние атмосферы безразличное;

- $dT/dh < \gamma_A$ – «частица» при вертикальном поднятии оказывается холоднее окружающего воздуха и состояние атмосферы устойчиво.

Дополнительная информация о вертикальном распределении оптических характеристик аэрозоля в диапазоне высот, который занимал в атмосфере слой пылевого аэрозоля, была получена лидаром CALIOP, установленном на борту спутника CALIPSO (<http://www-calipso.larc.nasa.gov/>). Результаты спутниковых лидарных измерений, объединенные с данными аэрозольных моделей (NAAPS, DREAM) и обратным траекторным анализом (HYSPLIT-4) использовались для идентификации пылевого аэрозоля.

Результаты и обсуждение

Вариации радиационных характеристик атмосферного аэрозоля

Временной ряд значений MODIS AOD ($\lambda = 550$ нм) для каждого пиксела ($1^\circ \times 1^\circ$), а также изменчивость средних дневных величин оптической толщины по данным AERONET (рис. 2a) демонстрирует динамику распространения пылевого аэрозоля в регионе. После фонового периода ($AOD = 0.24 \pm 0.04$) первое относительно небольшое повышение AOD до уровня 0.44 ± 0.09 наблюдалось 22 апреля. Основной пылевой эпизод был зарегистрирован 26–27 апреля, когда оптическая толщина быстро увеличилась примерно в 5–6 раз до значений 1.36 ± 0.44 , затем 28–30 апреля последовало снижение содержания аэрозоля, но уровень AOD оставался достаточно высоким (0.74 ± 0.14). На рис. 2b представлены зависимости от длины волны аэрозольной оптической толщины поглощения (AAOD). Как видно, частицы Азиатской пыли обладали сильным поглощением, особенно в коротковолновой области спектра, составляющим $AAOD_{440} = 0.18$, что значительно превышало соответствующие значения в фоновых условиях ($AAOD_{440} = 0.03$).

Результаты сравнительного анализа показали хорошее соответствие спутниковой информации данным наземных радиационных измерений. Так, например, наблюдалась сильно выраженная корреляционная связь ($R^2 = 0.91$) между восстановленными значениями MODIS AOD и наблюдениями AERONET AOD:

$$AOD_{MODIS} = A + B * AOD_{AERONET},$$

где: $A = 0.19$; $B = 0.78$; $R^2 = 0.91$.

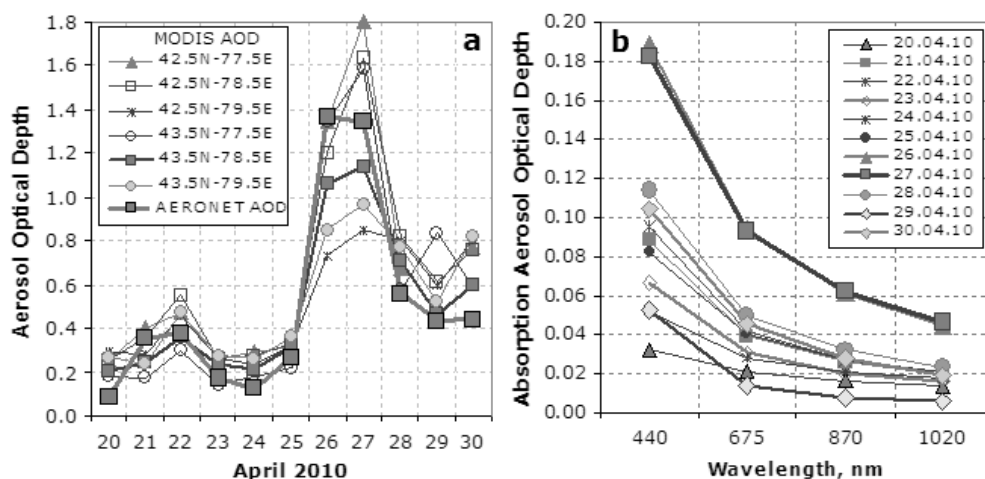


Рис. 2. Вариации значений MODIS и AERONET AOD (a) и спектральной зависимости оптической толщины поглощения (b) в период с 20 по 30 апреля 2010.

Высокая запыленность атмосферы 26–27 апреля привела к значительному изменению радиационного баланса атмосферы, уменьшив суммарную (прямую плюс рассеянную) солнечную радиацию, поступающую на земную поверхность и измеренную в спектральном диапазоне 305–2800 нм пиранометром CMP3 (*Kipp & Zonen*), приблизительно на 135 Вт/м² (14:00 LT). Подобные результаты показали расчеты коротковолновых потоков радиации, основанные на данных измерений сети AERONET, в соответствии с которыми значение радиационного форсинга на поверхности (ΔF_{SFC}) во время наиболее интенсивной стадии пылевого события 26–27 апреля 2010 года ($\text{AOD}_{500}=1.36\pm0.11$) в среднем составляло -181.4 ± 10.6 Вт/м². Присутствие пылевого аэрозоля обусловило также высокий положительный радиационный форсинг в атмосфере ($\Delta F_{\text{ATM}}=242.4\pm17.4$ Вт/м²) вследствие сильного поглощения солнечного излучения ($\text{SSA}_{440}=0.865\pm0.02$) и, соответственно, увеличение радиационной скорости нагрева ($\delta T/\delta t$), которую можно оценить величиной $\sim 6.3\pm0.5$ К/день.

Полученные данные о существенных изменениях $\delta T/\delta t$ в слоях Азиатской пыли хорошо согласуются с результатами ряда других исследований. Например, в [9] сообщается, что типичные значения скорости нагрева запыленной атмосферы в коротковолновом диапазоне изменялись в пределах 1–4 К/день, а в слоях пыли с высокой оптической толщиной достигали значений 6 К/день.

Влияние пылевого аэрозоля на температуру атмосферы

Широкий диапазон изменения AOD от фоновых величин до умеренных и высоких значений, отмеченный в период с 20 по 30 апреля 2010 года, позволяет проследить влияние нагрузки пылевого аэрозоля на тепловой режим атмосферы. На рис. 3а показан график изменчивости восстановленных значений температуры атмосферы (*AIRS Temperature*) на трех стандартных уровнях давления (700, 600 и 500 гПа), соответствующих высотам ~ 3.0 , 4.2 и 5.6 км, и на подстилающей поверхности (~ 2.0 км, a.s.l.).

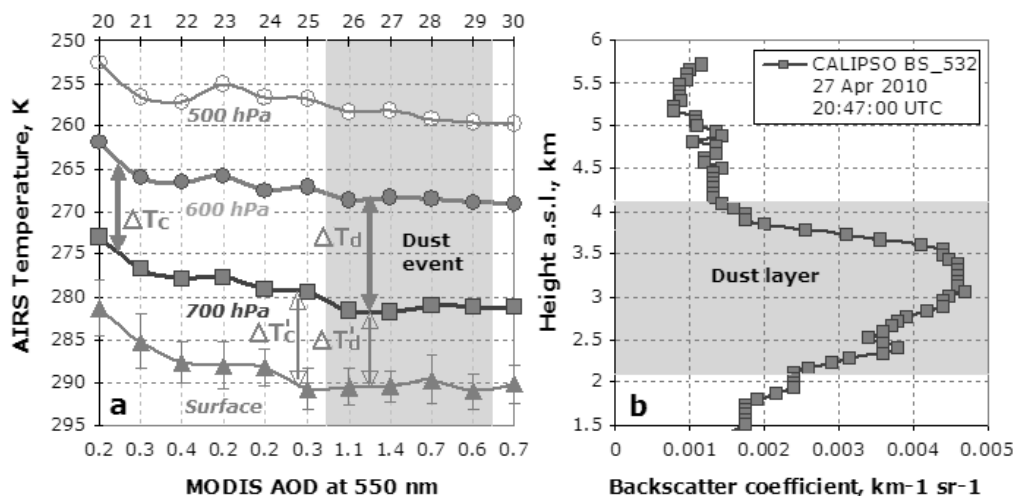


Рис. 3. Зависимости AOD от температуры атмосферы на трех уровнях давления (700, 600 и 500 гПа) в период с 20 по 30 апреля 2010 года (a) и вертикальный профиль коэффициента обратного рассеяния пылевого аэрозоля ($\lambda=532$ нм), измеренный лидаром CALIOP/CALIPSO (b).

Принимая во внимание характер высотного распределения пылевого аэрозоля, измеренного спутниковым лидаром CALIOP/CALIPSO (рис. 3b) и показавшего, что максимум нагрузки пыли приходился на диапазон высот $H < 4.0$ км, проведенное исследование было ограничено нижней тропосферой до уровня 600 гПа. Различие между изображенными кривыми зависимости AIRS T от MODIS AOD, представляющее разность температур (ΔT) между уровнями атмосферы 700 гПа и 600 гПа ($\Delta T \equiv T_{700\text{hPa}} - T_{600\text{hPa}}$), может служить признаком стабильности нижней тропосферы. Наиболее устойчивое состояние атмосферы наблюдается при небольших величинах вертикального градиента температуры [4]. В предположении изменения температуры внутри выделенного слоя по сухадиабатическому закону вертикальный градиент температуры (γ_A) составляет $\sim 10(\text{K})/1000$ м. С учетом разницы высот ($\Delta H = H_{600\text{hPa}} - H_{700\text{hPa}} \sim 4200 - 3000 = 1200$ м) это приводит к изменению температуры между двумя уровнями давления $\Delta T_A = \gamma_A \times \Delta H \approx 12.0(\text{K})$. Как показано на рис. 3а, для относительно чистой атмосферы ($\text{AOD} < 0.3$) разность температур была равна: $\Delta T_C \sim 10.5(\text{K}) < \Delta T_A$, что характеризует устойчивую атмосферу. В условиях высокой концентрации поглощающего пылевого аэрозоля ($\text{AOD} > 1.0$) различие температур составляло $\Delta T_d \sim 13.5(\text{K}) > \Delta T_A$, что было обусловлено дополнительным разогревом воздуха на уровне 700 гПа, равным $\Delta T = \Delta T_d - \Delta T_C = 3.0(\text{K})$, предполагая возникновение восходящих и нисходящих движений воздуха вследствие развивающейся неустойчивости атмосферы. Нарушение устойчивости атмосферы, особенно в горных условиях, ускоряет процессы образования облаков [3,8], в которых частицы пыли выступают в качестве ядер конденсации. Возникновение и развитие облаков в свою очередь приводило, как видно из представленных данных, к определенной стабилизации наблюдаемого 28–30 апреля температурного различия $\Delta T_d \sim 12.0(\text{K})$.

Подтверждением способности частиц пыли выступать в качестве ядер конденсации и активизации процесса образования облаков является рост интегрального содержания водяного пара в столбе атмосферы, который наметился 27 апреля ($W = 0.6$ см), достигнув 30-го апреля значения $W = 1.3$ см, что полностью соответствует данным спутниковых измерений (AIRS/Aqua). Степень покрытия облаками (Cloud Fraction) рассматриваемого пиксела ($1^\circ \times 1^\circ$) изменялась от 2 % до 39 % в период с 27 по 30 апреля. Исследование влияния облаков на радиационный баланс атмосферы будет проведено в последующей работе.

На более низких уровнях (между 700 гПа и земной поверхностью, т.е., между высотами ~ 3.0 и 2.0 км над уровнем моря,

где $\Delta T'_A = T_{\text{Surf}} - T_{700\text{hPa}} = 10(\text{K})$) явно проявлялся стабилизирующий эффект аэрозоля во время основной фазы пылевого события ($\Delta T'_d \sim 8.6(\text{K}) < \Delta T'_A$), при том, что накануне пылевого выноса (25 апреля) разность температур составляла $\Delta T'_C \sim 11.3(\text{K}) > \Delta T'_A$, определяя состояние неустойчивой стратификации атмосферы. Переход к более устойчивой атмосфере, вероятно, в первую очередь связан с радиационным нагревом пылевого слоя и «парниковым» эффектом крупных частиц пыли, которые сопоставимы по размеру с длиной волны в тепловом спектре ($\lambda > 4.0$ мкм). Сильное поглощение коротковолновой и длинноволновой радиации могло привести к образованию под зоной максимума плотности слоя пылевого аэрозоля локальной температурной инверсии [10], которая подавляла конвекцию.

Температурный эффект пылевого аэрозоля на поверхности

С целью предоставления более полной картины относительно развития рассматриваемого пылевого события и выяснения надежности используемой в исследовании спутниковой информации было выполнено сопоставление результатов с данными наземных измерений метеорологических параметров. На рис. 4а, показаны вариации дневной и ночной приземной скорости ветра, которые иллюстрируют заметное уменьшение средних дневных значений 28–30 апреля (~ 2.1 м/с) по отношению к предшествующему периоду ($2.3 - 4.0$ м/с), что являлось следствием изменения вертикального распределения температуры и повышения устойчивости в области нижней границы атмосферы.

В условиях стабильной атмосферы происходило снижение вертикального и горизонтального движения воздуха, поэтому пыль могла находиться на нижних уровнях атмосферы в течение менее длительного времени из-за увеличения скорости осаднения частиц. Одновременно это фактор ограничивал масштаб пространственного распространения пылевого аэрозоля. Если в дневное время наблюдалось практически полное отсутствие ветра на поверхности, то в темное время суток происходило ослабление температурных инверсий, что приводило к существенному увеличению скорости ветра и способствовало переносу аэрозольного загрязнения.

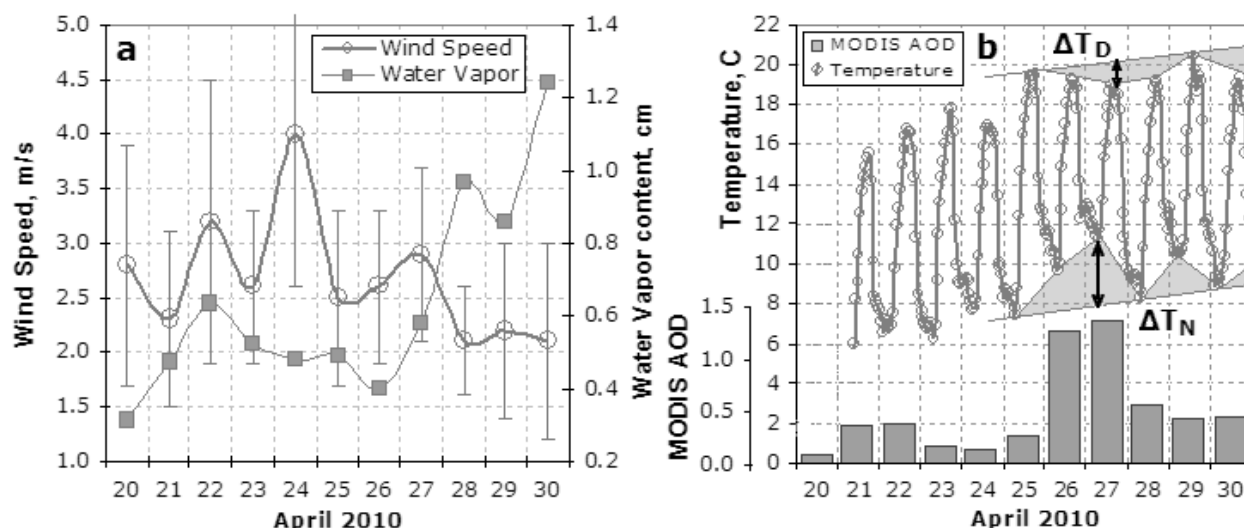


Рис. 4. Временные ряды изменчивости средних значений дневной и ночной скорости ветра (а) и температуры воздуха (б) в период 25–30 апреля 2010.

Суточный ход приземной температуры во время пылевого события характеризовался падением дневных и повышением ночных уровней. Показанные на рис. 4б отрезки прямых линий, проведенные по максимальным дневным и минимальным ночным значениям температуры 25–30 апреля, свидетельствуют, что по абсолютной величине дневное охлаждение воздуха ($\Delta T_D \sim -0.9 \pm 0.4^\circ\text{C}$) меньше, чем его ночное потепление ($\Delta T_N \sim 2.5 \pm 0.3^\circ\text{C}$). Это предполагает наличие суммарного положительного радиационного форсинга пылевого аэрозоля ($\Delta T = \Delta T_D + \Delta T_N = 1.7 \pm 0.1^\circ\text{C}$), обладающего потенциальной возможностью подавления ночного охлаждения поверхности [11]. Такой же эффект дополнительного нагрева воздуха у поверхности в ночное время из-за увеличения тепловой радиации, приходящей от нагретого пылевого слоя, был обнаружен на основе анализа изменчивости температуры во время пылевых выносов в Таджикистане [1]. В дневные часы этого теплового излучения было недостаточно, чтобы компенсировать сильное ослабление солнечной радиации на поверхности, что приводило к общему понижению температуры.

Заключение

На основе использования результатов спутникового дистанционного зондирования и наземных измерений проведено исследование эффекта абсорбирующего аэрозоля на радиационный режим и устойчивость атмосферы в условиях выноса Азиатской пыли. Анализ данных, восстановленных в пределах участка с координатами 42–43°N и 78–79°E, расположенного в непосредственной близости от пустыни Такла-Макан, показал, что аномально высокое содержание сильно абсорбирующего пылевого аэрозоля оказывает существенное влияние на изменение радиационного баланса и вертикальную структуру температуры в нижней тропосфере. Дополнительное нагревание слоя пыли вследствие поглощения пылевым аэрозолем коротковолновой и

длинноволновой радиации приводило к изменениям устойчивости на различных уровнях атмосферы. Были установлены также эффекты охлаждения поверхности в дневное время вследствие поглощения пылью коротковолновой радиации и увеличения температуры в темное время суток из-за дополнительного нагрева приповерхностного воздуха пылевым слоем.

Результаты, полученные в ходе проведенного исследования, направленного на оценку эффектов абсорбирующего пылевого аэрозоля в атмосфере, могут служить в качестве входных параметров при количественном определении длинноволновой составляющей аэрозольного радиационного форсинга.

Автор выражает благодарность руководителям и всем штатным сотрудникам научных проектов MODIS/Terra, AIRS/Aqua, CALIOP/CALIPSO и AERONET за их усилия по обработке результатов измерений и обеспечение свободного доступа к соответствующим наборам данных, используемым в настоящем исследовании.

Литература

1. Соколик И.Н., Голицын Г.С.: Исследование оптических и радиационных характеристик пылевого аэрозоля. Известия АН Физика атмосферы и океана, Т. 28, №8, С. 787–797, 1992.
2. Свердлик Л.Г.: Радиационные свойства атмосферного аэрозоля. Научный журнал Физика, №1, С. 55–66, 2014.
3. Davidi A., Kostinski A. B., Koren I., Lehahn Y.: Observational bounds on atmospheric heating by aerosol absorption: Radiative signature of transatlantic dust, Geophys. Res. Lett., 39, L04803, 2012.
4. Mishra A. K., Klingmueller K., Fredj E., Lelieveld J., Rudich Y., Koren I.: Radiative signature of absorbing aerosol over the Eastern Mediterranean Basin. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 14, 2403–2447, 2014.
5. Свердлик Л.Г.: Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET). Наука и новые технологии, №3, С.3–7, 2013.

6. Huang J., Fu Q., Su J., Tang Q., Minnis P., Hu Y., Yi Y., Zhao Q.: Taklimakan dust aerosol radiative heating derived from CALIPSO observations using the Fu-Liou radiation model with CERES constraints, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 4011–4021, 2009.
7. Тимофеев Ю.М.: Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности. СПб, СПбГУ, 129 с., 2009.
8. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А.: Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб, НИИХ СПбГУ, 194 с., 1999.
9. Liu J., Zheng Y., Li Z., Flynn C., Welton E.J., Cribb M.: Transport, vertical structure and radiative properties of dust events in southeast China determined from ground and space sensors. *Atmospheric Environment*, 45, 6469–6480, 2011.
10. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В.: Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеиздат, 224 с., 1983.
11. Alizadeh Choobari O., Zawar-Reza P., Sturman A.: The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review. *Atmospheric Research*, 138, 152–165, 2014.

Рецензент: д. ф-м. н., профессор Каримов К.А.
