

УДК 551.510.42:551.501.8
DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-8-165-171

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Л.Г. Свердлов

Аннотация. Представлены результаты комплексных наблюдений вертикальной структуры и динамики слоев пылевого аэрозоля с использованием современных методов дистанционного контроля, которые направлены на изучение процессов формирования, трансформации и переноса аэрозольных загрязнений в регион. Основываясь на данных спутниковых наблюдений (Aura / OMI), а также наземных лидарных и фотометрических («IAOSA-KRSU», AERONET) измерений, рассмотрены изменения параметров атмосферы во время интенсивной песчаной бури в Западном Китае (пустыня Такла-Макан) 27–29 апреля 2023 г. Спутниковые карты аэрозольного индекса AI позволили оценить последствия распространения сильно поглощающих частиц минеральной пыли над территорией Кыргызстана. Азиатская пыль наблюдалась, главным образом, над его восточной частью, где расположена Полевая экспериментальная база ВГО ФАП КРСУ и ИС РАН. Слой Азиатской пыли, занимающий область высот до 5–6 км, был уверенно зарегистрирован наземными приборами и характеризовался повышенными значениями аэрозольной оптической толщи (AOT = ~0.2–0.4). Выполнено сопоставление лидарных и фотометрических измерений, показавшее высокую корреляцию между двумя наборами AOT. Присутствие крупнодисперсной пыли в атмосфере подтверждено модельными данными (HYSPLIT, NAAPS).

Ключевые слова: пылевой аэрозоль; лидар; солнечный фотометр; спутниковые измерения; оптическая толщина; модели HYSPLIT и NAAPS.

ЖЕРДЕГИ ЖАНА СПУТНИКТИК ӨЛЧӨӨЛӨРДҮН МААЛЫМАТТАРЫ БОЮНЧА АТМОСФЕРАНЫН ПАРАМЕТРЛЕРИНИН ӨЗГӨРҮЛМӨЛҮҮЛҮГҮ

Л.Г. Свердлов

Аннотация. Аэрозоль чаңынын катмарларынын вертикалдык түзүмүн жана динамикасын алыстан башкаруунун заманбап ыкмаларын колдонуу менен комплекстүү байкоолордун натыйжалары берилген, алар аэрозолдук булгануунун пайда болуу, трансформация жана аймакка өтүү процесстерин изилдөөгө багытталган. Спутниктик байкоолордун (Aura / OMI), ошондой эле жер үстүндөгү лидарлык жана фотометрикалык («IAOSA-KRSU», AERONET) өлчөөлөрдүн маалыматтарына таянып, 2023-жылдын 27-29-апрелде Батыш Кытайда (Такла-Макан чөлүндө) болгон катуу кум бороонунун учурунда атмосфералык параметрлердин өзгөрүшү каралган. AI аэрозолдук индексинин спутниктик карталары Кыргызстандын аймагына күчтүү сиңүүчү минералдык чаң бөлүкчөлөрүнүн таралышынын кесепеттерин баалоого мүмкүндүк берди. Азия чаңы негизинен анын чыгыш бөлүгүндө байкалган, анда КРСУ менен Россия Илимдер Академиясынын Илимий станциясынын Атмосфералык процесстердин физикасынын бийик тоолуу обсерваториясынын талаа эксперименталдык базасы жайгашкан. Бийиктиги 5-6 километрге чейинки аймакты ээлеген Азия чаңынын катмары жер үстүндөгү приборлор менен ишенимдүү катталган жана аэрозолдук оптикалык калыңдыктын жогорулатылган маанилери менен мүнөздөлгөн (AOT = ~0.2–0.4). Лидарлык жана фотометрикалык өлчөөлөрдү салыштыруу жүргүзүлүп, эки AOT топтомунун ортосундагы жогорку корреляцияны көрсөттү. Атмосферада ири чаңдын болушу моделдик маалыматтар менен тастыкталат (HYSPLIT, NAAPS).

Түйүндүү сөздөр: аэрозоль чаңы; лидар; күн фотометри; спутниктик өлчөө; оптикалык калыңдык; HYSPLIT жана NAAPS моделдери.

ATMOSPHERIC VARIABILITY FROM GROUND AND SATELLITE MEASUREMENTS DATA

L.G. Sverdlik

Abstract. The results of complex observations of the vertical structure and dynamics of dust aerosol layers using modern methods of remote control are presented, which are aimed at studying the processes of formation, transformation, and transfer of aerosol contaminants to the region. Based on satellite observation data (Aura/OMI), ground-based lidar and photometric ("IAOCA-KRSU," AERONET) measurements, changes in atmospheric parameters during an intense sandstorm in Western China (Takla Makan Desert) were considered on April 27-29, 2023. Satellite maps of the aerosol index AI made it possible to assess the consequences of the spread of highly absorbing particles of mineral dust over the territory of Kyrgyzstan. Asian dust was observed mainly over its eastern part, where the Field Experimental Base of the HAO APP KRSU and the National Academy of Sciences of the Russian Academy of Sciences is located. The Asian dust layer, which occupies an altitude area of up to 5-6 km, was confidently recorded by ground instruments and was characterized by increased values of the aerosol optical thickness ($AOT \sim 0.2-0.4$). A comparison of lidar and photometric measurements was performed, showing a high correlation between the two AOT sets. The presence of coarse dust in the atmosphere is confirmed by model data (HYSPLIT, NAAPS).

Keywords: dust aerosol; lidar; sun photometer; satellite data; optical thickness; HYSPLIT and NAAPS models.

Введение. Минеральная пыль является самым распространенным типом атмосферного аэрозоля, который оказывает существенное влияние на качество воздуха в Центральной и Восточной Азии и может приводить к тяжелым последствиям для здоровья людей, увеличивая риск респираторных заболеваний [1–3]. Основными источниками запыленности атмосферы являются песчаные бури в пустынях Западного Китая (Такла-Макан), а также северо-западного Китая и Монголии (пустыня Гоби). Эти природные явления представляют собой постоянную сезонную проблему и экологическую угрозу региону [4]. Поднятая в атмосферу Азиатская пыль переносится на большие расстояния в восточном направлении, достигая Южной Кореи и Японии [5–7] и иногда Северной Америки [напр., 4, 8]. Воздействие песчаных бурь испытывают не только области, которые находятся с подветренной стороны от пустыни Такла-Макан. Увеличение содержания Азиатской пыли в средней и нижней тропосфере наблюдалось средствами дистанционного зондирования также и в северо-западных регионах [6, 9, 10].

Основная задача настоящего исследования – проведение комплексных наблюдений параметров взвешенных в атмосферном воздухе частиц с использованием современных методов дистанционного контроля, которые направлены на изучение процессов формирования, трансформации и переноса пылевого аэрозоля в регион. Основываясь как на данных спутниковых наблюдений, так и наземных лидарных и фотометрических измерений, рассмотрены изменения параметров атмосферного аэрозоля во время интенсивной песчаной бури в пустыне Такла-Макан 27–29 апреля 2023 г. и последствия распространения пыли над территорией Кыргызстана, главным образом, над его восточной частью, где расположена Полевая экспериментальная база (ПЭБ) Высокогорной обсерватории физики атмосферных процессов КРСУ и ИС РАН (ВГО ФАП КРСУ и ИС РАН).

Исходные экспериментальные и модельные данные

Наземные измерения. Мониторинг оптических и микрофизических характеристик тропосферного аэрозоля проводили с использованием многоканального лидарного комплекса и солнечного фотометра CIMEL CE-318 (AERONET), установленных на ПЭБ. Лидарная система, оснащенная высокоэнергетическим (170–850 мДж) Nd: YAG лазером LS-2147/3 (Lotis ТП) с частотой следования импульсов 10 Гц, позволяет регистрировать сигналы упругого обратного рассеяния на трех длинах волн (355, 532 и 1064 нм), а также в Рамановском (387 нм) и поляризационных (532 нм) каналах [11]. Высотное разрешение $\Delta z = 30$ м позволяет профилировать оптические свойства атмосферного аэрозоля. При проведении лидарных измерений особое внимание уделяли специальным наблюдениям, которые проводили без фиксированного расписания во время аномальных событий, характеризующихся значительным изменением оптического состояния атмосферы (напр., пылевые выносы, вулканы и пр.).

Данные о параметрах атмосферного аэрозоля в столбе атмосферы получены солнечным фотометром CIMEL станции «IAOCA-KRSU» (42.46383° с.ш.; 78.52895° в.д.; 1930 м), входящей в состав глобальной Сети AERONET (Aerosol Robotic Network) [12]. Результаты фотометрических измерений представлены среднесуточными значениями аэрозольной оптической толщи AOT (Level 1.5, cloud screening) [10]. Участие в глобальном проекте AERONET обеспечивает сопоставимость результатов измерений, выполненных в различных регионах мира.

Методика совместной обработки данных лидарных и фотометрических измерений подробно изложена в работе [11]. В основе обработки данных наземного дистанционного зондирования лежит условие равенства рассчитанной по лидарным данным и измеренной солнечным фотометром аэрозольных оптических толщин, что позволяет вычислить среднее значение лидарного отношения и уточненный искомый профиль коэффициента обратного аэрозольного рассеяния ($\beta_a(\lambda, z)$), а также оценку относительной ошибки в определении $\beta_a(\lambda, z)$.

Спутниковый мониторинг атмосферы. Пространственный масштаб аэрозольного загрязнения и его эволюцию во времени оценивали с помощью спутникового дистанционного зондирования параметров атмосферы. Идентифицировать события Азиатской пыли позволяла информация о поглощающей способности аэрозолей. Мерой отличия ультрафиолетового (УФ) излучения атмосферы, содержащей аэрозоли, от излучения чистой молекулярной атмосферы служил аэрозольный индекс AI (UV Aerosol Index), полученный мультиспектральным прибором OMI (Ozone Monitoring Instrument) спутника Aura [13, 14]. При наличии в тропосфере поглощающих аэрозолей, в частности, минеральной пыли пустыни Такла-Макан, индекс AI принимал близкие к нулевым значения.

Модель HYSPLIT. Моделирование обратных траекторий **перемещения** воздушных масс проводили с помощью программного комплекса NOAA HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [15]. В качестве входных данных модели HYSPLIT использовали двухмерные и трехмерные поля температуры, давления, меридиональной и зональной скорости ветра, которые представлены в глобальной базе метеопараметров GDAS (Global Data Assimilation System) с горизонтальным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$.

Модель распространения компонентов аэрозоля NAAPS. Исследование процессов эмиссии и переноса загрязнений в атмосфере проводили на основе данных глобальной аэрозольной модели NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System) [16]. Карты распределения трех основных типов аэрозоля (сульфаты, дым и пыль) представляются в 15 региональных версиях с 6-часовой дискретизацией по времени [2].

Результаты экспериментальных и модельных исследований

Эмиссия пыли пустынь с разной интенсивностью происходит в течение всего года, но, как правило, максимальная активность пыльных бурь наблюдается в весенние месяцы (март – май) [4, 6]. Один из эпизодов выноса Азиатской пыли, который оказал значительное влияние на состояние атмосферы в исследуемом регионе, наблюдался 27–29 апреля 2023 г. На рисунке 1а приведены результаты фотометрических наблюдений AOT на длине волны 1020 нм, которые были отфильтрованы от облаков (Level 1.5) и детализированы с использованием тонкодисперсной (AOT-Fine) и крупнодисперсной (AOT-Coarse) составляющих. Сравнивая эти параметры, становится очевидно, что крупнодисперсный пылевой аэрозоль являлся доминирующим типом взвешенных в атмосфере частиц, которые практически определяли характер эволюции AOT-Total. Среднесуточные значения полной оптической толщи AOT-Total изменяли от 0.200 до 0.400. Результаты лидарных измерений, выполненных 27 апреля 2023 г. с 09:00 по 21:00 местного времени (Local Time), представлены на рисунке 1б в виде высотного-временной диаграммы отношения рассеяния на длине волны 1064 нм (R_{1064}) в диапазоне высот 0.9–8 км. Главная особенность состояла в том, что в начале эпизода вертикальное распределение пылевого аэрозоля имело сложную многослойную структуру. Несколько слоев пыли наблюдалось над пограничным слоем до высоты ~6.0 км. Дневные наблюдения показали значительно более выраженные изменения вертикальной структуры аэрозоля.

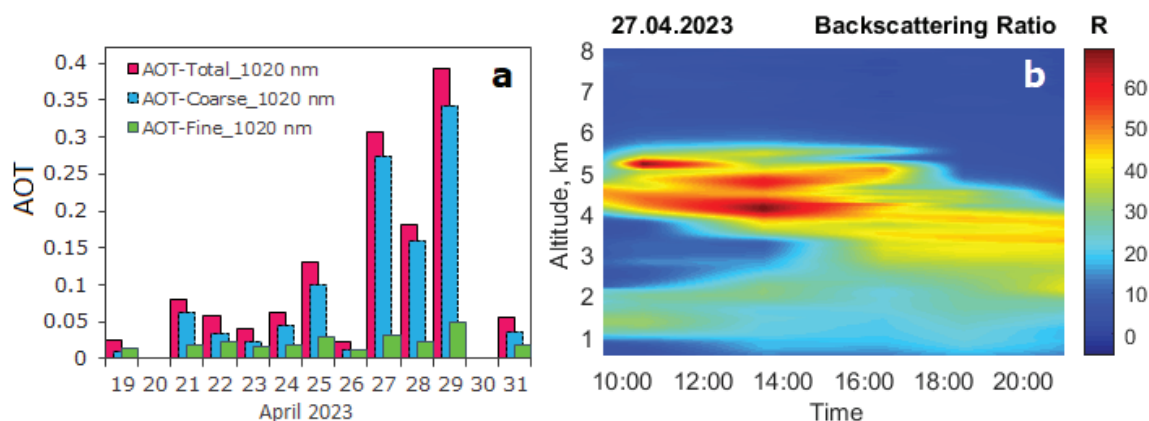


Рисунок 1 – Временной ход AOT-Total, AOT-Fine и AOT-Coarse (Level 1.5) на длине волны 1020 нм («IAOCA-KRSU», AERONET) в период 19–31 апреля 2023 г. (a) и высотно-временные изменения $R_{1064}(h)$ по данным лидарного зондирования с 09:00 до 21:00 (Local Time) 27 апреля 2023 г. (b)

Максимальных значений отношение рассеяния достигало примерно в 14:00 на высоте 4.0 км. Начиная с 16:00 верхняя граница аэрозольного загрязнения постепенно смещалась вниз до высоты ~4.0 км, что, вероятно, связано со спадом температуры, уменьшением интенсивности турбулентного обмена и процессом осаждения крупных частиц пыли. После захода Солнца произошло слияние слоя пыли с пограничным слоем атмосферы. Более детально динамика вертикальных профилей R_{1064} , рассчитанных для интервала высот 0.9–10.0 км по данным 6 измерений, проведенных 27 апреля 2023 года с 09:30 до 21:00 (LT), показана на рисунке 2.

Аэрозольную оптическую толщину на длине волны 1064 нм (AOT_{1064}), вычисленная с использованием профилей аэрозольного обратного рассеяния и среднего значения лидарного отношения (35 ср.), рассчитанного по данным совместной обработки лидарных и фотометрических измерений, изменяли в пределах от 0.215 до 0.382. Среднее значение составляло 0.297 ± 0.048 .

Применение корреляционного анализа позволило сопоставить результаты лидарных и фотометрических измерений AOT. Количественная оценка взаимосвязи значений аэрозольной оптической толщи, выполненная по данным совпадающих по времени измерений, показала хорошее соответствие между оптическими свойствами, полученными лидарной системой (1064 нм) и солнечным фотометром (1020 нм). Корреляция между двумя наборами данных была очень высокой и составляла $r^2 = 0.88$ (рисунок 3).

Последствия выноса Азиатской пыли хорошо иллюстрируют карты пространственного распределения аэрозольного индекса атмосферы AI. На рисунке 4а представлена региональная карта среднесуточных значений AI, которые были зарегистрированы 27 апреля 2023 г. Как видно, аэрозольное загрязнение охватывало всю восточную часть Кыргызстана.

Распределение повторяемости 24-h обратных траекторий движения воздушных масс перед приходом в географическую точку, расположенную над обсерваторией ($42.46^\circ N$; $78.53^\circ E$) на высоте 2000 м (AGL), показаны на рисунке 4б. Траектории вычисляли для каждых 6 часов в период с 24 апреля (12:00 UTC) по 27 апреля (18:00 UTC) 2023 г. с последующим суммированием частот попадания в каждую ячейку сетки $1^\circ \times 1^\circ$ и нормированием на общее количество смоделированных траекторий. Согласно этим данным, перенос аэрозоля в нижней тропосфере преимущественно происходил из северо-западного Китая (пустыня Такла-Макан). Результаты траекторного анализа подтверждаются региональными модельными данными (NAAPS) о распределении аэрозольной оптической толщи 27 апреля 2023 г. (UTC 12:00Z), которые показывают наличие в атмосфере пылевого аэрозоля (рисунок 5). Значения AOD изменяли в пределах 0.200–0.800.

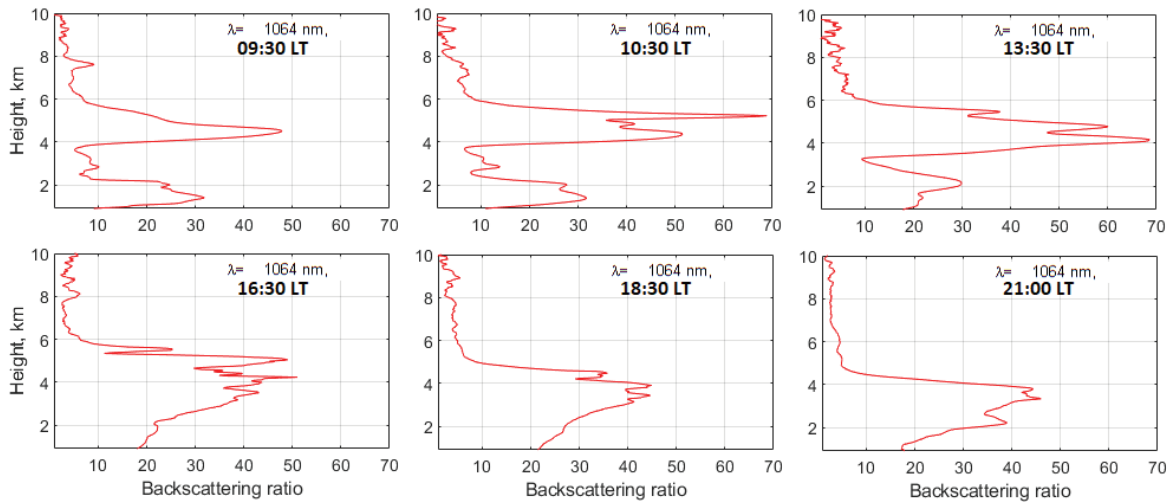


Рисунок 2 – Трансформация вертикальных профилей отношения рассеяния (R) на длине волны 1064 нм, полученных наземным лидаром в период с 09:00 до 21:00 (LT) 27 апреля 2023 г.

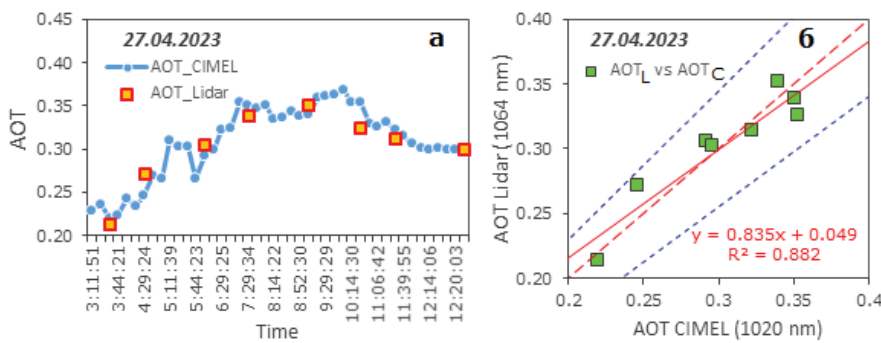


Рисунок 3 – Сопоставление результатов лидарных и фотометрических измерений АОТ на Экспериментальной базе ВГО ФАП КРСУ и ИС РАН (27.04.2023)

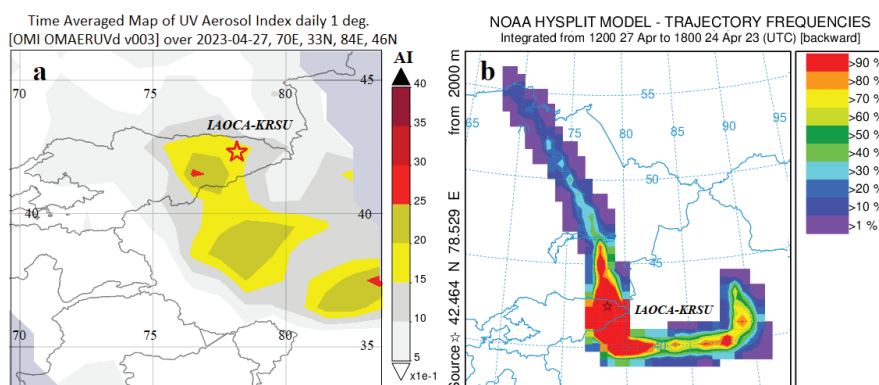


Рисунок 4 – Карта распределения аэрозольного индекса атмосферы (АИ) по данным спутника Aura (ОМИ) во время события Азиатской пыли 27 апреля 2023 г. (а). Частотное распределение 24-ч обратных траекторий, проходящих над обсерваторией (42.46° N; 78.53° E) на высоте 2000 м над поверхностью (AGL) в период с 24 апреля (12:00 UTC) по 27 апреля (18:00 UTC) 2023 г. (б)

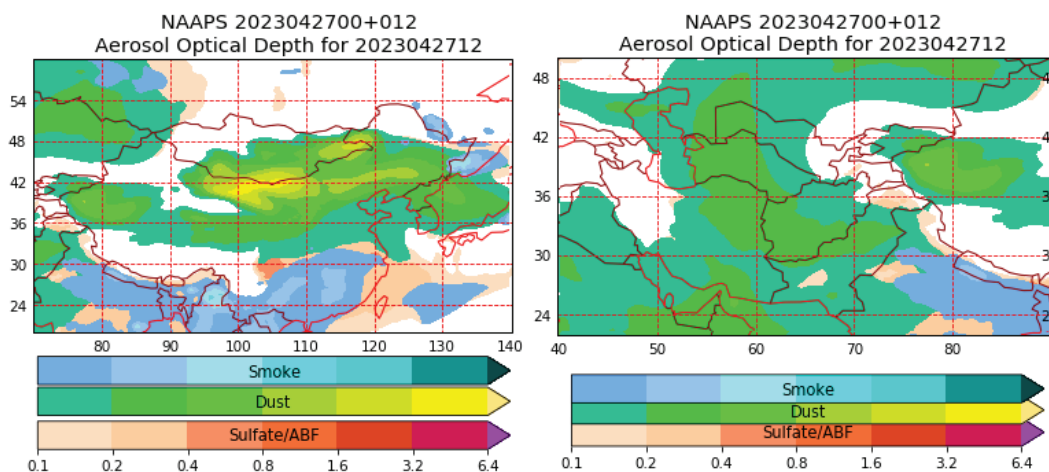


Рисунок 5 – Результаты моделирования пространственного распределения оптической толщи пылевого аэрозоля 27 апреля 2023 (модель NAAPS)

Заключение. Расположение Полевой экспериментальной базы ВГО ФАП КРСУ и НС РАН в непосредственной близости от одной из крупнейших территорий эмиссии пыли, пустыни Такла-Макан, определяет существенную роль этого источника в увеличении аэрозольной нагрузки в нижней тропосфере. В настоящем исследовании проанализированы последствия влияния интенсивной пыльной бури, произошедшей в Китае 27–29 апреля 2023 г., на состояние атмосферы в регионе, основанные на совместном использовании дистанционных спутниковых наблюдений и наземных лидарных и радиометрических («IAOSA-KRSU», AERONET) измерений. Идентификация пылевого аэрозоля была проведена по результатам экспериментальных измерений с привлечением модельных данных (HYSPLIT, NAAPS). Выявлены особенности пространственной и временной изменчивости характеристик пылевого аэрозоля, что важно для дальнейшего изучения процессов формирования, трансформации и переноса атмосферного аэрозоля в регионе.

Сопоставление восстановленных значений аэрозольной оптической толщи, измеренных лидарной системой и солнечным фотометром, показало высокую корреляцию ($r = 0.94$) между двумя наборами данных.

Автор выражает благодарность сотрудникам NASA GES-DISC, HYSPLIT, NAAPS и AERONET за предоставление доступа к данным.

Проведенные исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах». Регистрационный номер темы: 1021052806454-2-1.5.1.

Поступила: 04.05.23; рецензирована: 19.05.23; принята: 24.05.23.

Литература

1. Сverdlik L.G. Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля / Л.Г. Сverdlik // Наука, новые технологии и инновации. 2014. № 4. С. 26–31.
2. Сverdlik L.G. Результаты сравнения экспериментальных (AERONET) и модельных (NAAPS) данных изменчивости оптических свойств аэрозоля над Северным Тянь-Шанем / Л.Г. Сverdlik // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2016. № 3. С. 3–9.

3. *Lopez-Cayueta M.-A.* Vertical characterization of fine and coarse dust particles during an intense Saharan dust outbreak over the Iberian Peninsula in springtime 2021 / M.-A. Lopez-Cayueta, C. Córdoba-Jabonero, D. Bermejo-Pantaleón, M. Sicard., V. Salgueiro, F. Molero, C. Violeta Carvajal-Pérez, M. José Granados-Muñoz, A. Comerón, F.T. Couto, R. Barragán, M.-P. Zorzano, J. Antonio Bravo-Aranda, C. Muñoz-Pocar, M. Joao Costa, B. Artíñano, A. Rodríguez-Gómez, D. Bortoli, M. Pujadas, J. Abril-Gago, L. Alados-Arboledas, J.L. Guerrero-Rascado // *Atmos. Chem. Phys.* 2023. Vol. 23. P. 143–161.
4. *Habib A.* Dust particles in the free troposphere over a Chinese desert region as revealed from balloon-borne measurements under calm weather conditions / A. Habib, B. Chen, G.-Y. Shi, Y. Iwasaka, D. Nath, B. Khalid, S.-C. Tan, T. Mahmood, R.-G. Jiao, N. Dider // *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. 2019. Vol. 12. No. 1. P. 12–20. DOI: 10.1080/16742834.2019.1536645.
5. *Chen B.B.* Lidar Measurements of the Vertical Distribution of Aerosol Optical and Physical Properties over Central Asia / B.B. Chen, L.G. Sverdlik, S.A. Imashev, P.A. Solomon, J. Lantz, J.J. Schauer, M.M. Shafer, M.S. Artamonova, G.R. Carmichael // *International Journal of Atmospheric Sciences*. 2013. Vol. 2013. ID 261546. P. 1–17. DOI: 10.1155/2013/261546.
6. *Kulkarni S.* Source sector and region contributions to BC and PM_{2.5} in Central Asia / S. Kulkarni, N. Sobhani, J.P. Miller-Schulze, M.M. Shafer, J.J. Schauer, P.A. Solomon, P.E. Saide, S.N. Spak, Y.F. Cheng, H.A. C. Denier van der Gon, Z. Lu, D.G. Streets, G. Janssens-Maenhout, C. Wiedinmyer, J. Lantz, M. Artamonova, B. Chen, S. Imashev, L. Sverdlik, J.T. Deminter, B. Adhikary, A. D'Allura, C. Wei, G.R. Carmichael // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. Vol. 15. P. 1683–1705.
7. *Cheng Y.* Enhanced Simulation of an Asian Dust Storm by Assimilating GCOM-C Observations / Y. Cheng, T. Dai, D. Goto, H. Murakami, M. Yoshida, G. Shi, T. Nakajima // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. P. 3020. DOI: 10.3390/rs13153020.
8. *Fischer E.V.* A decade of dust: Asian dust and springtime aerosol load in the U.S. Pacific Northwest / E.V. Fischer, N.C. Hsu, D.A. Jaffe, M.J. Jeong, S.L. Gong // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36. L03821. DOI: 10.1029/2008GL036467.
9. *Sverdlik L.G.* Comparative analysis of lidar investigations of aerosol in Central Asia and West Siberia / L.G. Sverdlik, B.B. Chen, Y.S. Balin, G.P. Kokhanenko, I.E. Penner, S.V. Samoilova // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* 20, Atmospheric Physics. 2014. P. 92923J.
10. *Сverdlik Л.Г.* Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET) / Л.Г. Сverdlik // *Наука и новые технологии*. 2013. № 3. С. 3–7.
11. *Сverdlik Л.Г.* Методика автоматической калибровки при обработке лидарных сигналов упругого обратного рассеяния / Л.Г. Сverdlik, П.В. Козлов // *Вестник КPCУ*. 2017. Т. 17. № 1. С. 201–205.
12. The AERONET (AErosol RObotic NETwork). URL: <http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/> (дата обращения: 15.05.2023).
13. The NASA GES-DISC. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 06 мая 2023 г.).
14. *Torres O.* Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: An overview / O. Torres, A. Tanskanen, B. Veihelmann, C. Ahn, R. Braak, P.K. Bhartia, P. Veefkind, P. Levelt // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. D24S47.
15. *Stein A.F.* NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System / A.F. Stein, R.R. Draxler, G.D. Rolph, J.B. Stunder, M.D. Cohen, F. Ngan // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. Vol. 96. No. 12. P. 2059–2077. DOI: 10.1175/bams-d-14-00110.1.
16. The Navy Aerosol Analysis and Prediction System (NAAPS). URL: http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/index_shortcuts.html (дата обращения: 12.05.2023).