УДК 528.8

П.Е. Густокашин, М.Ю. Катаев

Сравнительный анализ аэрозольной оптической толщи из спутниковых продуктов MODIS и CALIPSO уровня L2

Аэрозольная оптическая толща является значимым климатическим параметром, который определяет состояние атмосферы наряду с газовым составом и облаками. Изучение изменений этого параметра в зависимости от разнообразных условий является важной научной задачей. Приводится сравнение временной динамики аэрозольной оптической толщи атмосферы на территории Западной Сибири, полученной по данным спутниковых приборов CALIPSO (лидарные сигналы) и MODIS (многоспектральные изображения) по данным уровня L2. Приводится описание спутникового прибора MODIS, который измеряет интегральную по всей атмосфере оптическую толщу аэрозоля и прибора CALIPSO, который измеряет высотные профили коэффициента рассеяния аэрозоля. Показано, что между измерениями этих приборов наблюдается согласие за период 3 года.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толща, атмосфера, лидарное зондирование, спутниковые многоспектральные изображения.
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-70-74

Оперативные количественные оценки аэрозольной оптической толщи (АОТ) в атмосфере, включая пространственно-временное распределение, являются важной научно-практической задачей [1]. Целью представляемых исследований является получение временного распределения АОТ в пространстве Западной Сибири по данным различных спутниковых приборов. Из числа существующих оперативных продуктов, получаемых из обработки спутниковых измерений, наибольший интерес представляют данные инструментов MODIS и CALIPSO, входящих в состав американо-французской орбитальной группировки спутников A-train (подробная информация на http://atrain.nasa.gov/). Спутники из группы A-train пролетают над одной и той же точкой земной поверхности несколько раз в день (максимально 14), что позволяет сформировать детальную картину атмосферы в зоне пролета.

Спутник Aqua с инструментом MODIS приблизительно в 11 утра местного времени пролетает территорию Западной Сибири, и данные по аэрозолям, облачной фазе и оптические параметры облаков доступны только в дневное время [http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov] в полосе шириной 2300 км. Алгоритмы обработки данных измерений MODIS используют мультиспектральное излучение для того, чтобы определить тип аэрозоля и суммарную оптическую толщину. Лидарные данные можно получить из продуктов спутникового прибора CALIPSO (включает лидар CALIOP), которые включают в себя: облачные свойства, интегрированное ослабленное обратное рассеяние, коэффициент деполяризации лидарного сигнала, оптическую толщину аэрозоля, коэффициенты обратного рассеяния, температуру и высоту облачного слоя, среднюю в высотном диапазоне 0–25 км [https://www-calipso.larc.nasa.gov].

Сравнение оптической толщи аэрозоля с инструментов MODIS и CALIOP позволяет уточнить информацию о качественном пространственно-временном представлении распределения АОТ. Получаемые косвенные измерения должны проходить верификацию, поэтому важно проводить сравнительный анализ результатов измерений различных приборных систем.

Описание спектрорадиометра MODIS

Спектрорадиометр MODIS расположен на борту спутников Terra и Aqua, которые являются частью комплексной программы NASA EOS (Earth Observing System), направленной на исследования суши, воды и атмосферы. Спутник Terra был запущен в 1999 г., а Aqua – в 2002 г. MODIS имеет 36 спектральных каналов (от 0,41 до 14,0 мкм) с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и дальнем инфракрасном диапазонах и позволяет производить регулярную съемку одной территории с пространственным разрешением до 250, 500 и 1000 м. Оба спутниковых прибора решают общие задачи и среди них – получение изображений атмосферной аэрозольной оптической толщи. Другой не менее важной задачей является получение информации о том, как формируются и развиваются облака, как они влияют на погоду, климат и количество осадков. Спутниковый прибор MODIS позволяет получать информацию о пространственно-временном распределении (изображения) аэрозольной оптической толщи [2, 3]. Над поверхностью суши, вне территории, закрытой облачными образованиями, оптическая плотность аэрозоля измеряется на следующих длинах волн: 0,47, 0,55 и 0,66 мкм [3].

Описание CALIPSO

Спутниковый прибор CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrated Pathfinder Satellite Observation) – американо-французский исследовательский спутник, был запущен в 2006 г. Прибор решает общие задачи: получение изображений облаков (прибор широкополосной камеры WFC) и профилей атмосферных аэрозолей (лидара CALIOP [4–7]). Спутниковые лидарные измерения обратного рассеяния, распределенного по высоте, не зависят от отражения от поверхности и требуют необходимости определения аэрозольного отношения (an aerosol extinction-to-backscatter ratio). Величину аэрозольного отноше-

ния определяют на длинах волн (532 и 1064 нм) и по её значению выделяют следующие классы: пыль, континентальный аэрозоль, загрязненная пыль (от выбросов лесных пожаров), дым (от лесных пожаров), чистый континентальный аэрозоль, чистый морской аэрозоль [4]. Тогда как данные по аэрозольной оптической толще, полученные с MODIS, представляют собой двумерное поле (изображение), интегрированное по высоте, то данные, получаемые с помощью лидара CALIOP, представляют высотные профили коэффициентов обратного рассеяния послойно, с горизонтальным осреднением от 1/3 до 80 км.

Данные со спутниковых приборов MODIS и CALIOP

Сравнительному анализу данных спутниковых приборов посвящены работы [8–14]. И лишь только одна работа [13] связана со сравнительным анализом данных об атмосферной аэрозольной толще для территории земного шара. Поэтому интересным является сравнительный анализ АОТ указанных спутниковых приборов для территории Западной Сибири. В работе используются данные MODIS второго уровня MOD04, которые генерируются с пространственным разрешением 3×3 км. Данные со спутникового прибора CALIOP поступают из одной и той же географической точки каждые 16 дней и расположены в продукте CALIPSO CALIOP L2 Lidar Standard. Минимальное разрешение в этом продукте составляет 333 м.

Выбор территории сравнения данных

В качестве сравниваемых возьмем данные приборов MODIS и CALIOP для территории Западной Сибири (координаты 54–60° с.ш., 80–88°в.д.) за 2015–2017 гг. На рис. 1 представлены траектории движения CALIPSO над территорией Западной Сибири и площадь данных MODIS (прямоугольник).

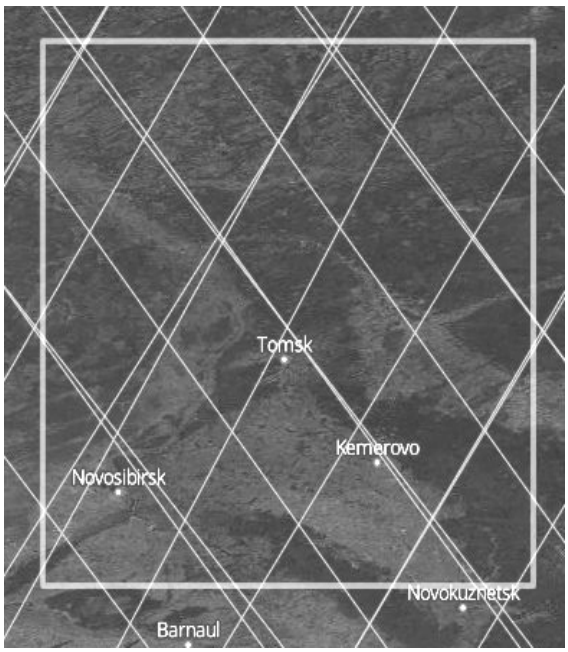


Рис. 1. Траектории движения спутника CALIPSO над территорией Западной Сибири за год и область наблюдений MODIS (прямоугольник)

Из рис. 1 видно, что траектории измерений CALIPSO попадают в изображение MODIS на редкой пространственной сетке.

Описание программы

Для визуализации данных CALIOP и MODIS была разработана программа [15], которая позволяет выбирать из продуктов второго уровня данные измерений для их дальнейшего сравнения. Данные со спутникового прибора CALIPSO, включающего лидар CALIOP, представляют собой профиль аэрозольной оптической толщи в тропосфере и нижней части стратосферы с длиной волны 1064 нм. Данные с прибора MODIS представляют собой изображение, покрывающее большую часть Западной Сибири. Чтобы сравнить данные этих спутниковых приборов, необходимо найти на изображении MODIS точки, которые соответствуют точкам измерений CALIOP для безоблачных областей.

Структура программы приведена на рис. 2. Для автоматического считывания данных спутниковых приборов, организации хранения, обработки и анализа была написана программа, состоящая из следующих модулей: 1) модуль чтения; 2) модуль обработки; 3) модуль вывода; 4) модуль управления. Модули вывода, обработки и чтения являются независимыми и обособленными. Модуль управления является единственным модулем, знающим про остальные и служащим для передачи данных между остальными модулями. Модуль управления предназначен для приема основной части команд терминала, их обработки, управления запуском других модулей и хранения промежуточных данных.

Управление программой основано на вызове определенных модулей с помощью команд. Команды бывают следующих типов: «read calipso» – вызывает модуль чтения для считывания файлов со спутникового прибора CALIOP. «read modis» – вызывает модуль чтения для считывания файлов со спутникового прибора MODIS. «read all» – вызывает модуль чтения для считывания файлов со спутникового прибора CALIOP и MODIS. «process calipso» – вызывает модуль обработки для обработки считанных ранее файлов со спутникового прибора CALIOP. «process modis» – вызывает модуль обработки для обработки считанных ранее файлов со спутникового прибора MODIS. «process all» – вызывает модуль обработки для обработки считанных ранее файлов сначала со спутникового прибора CALIOP, а затем со спутникового прибора MODIS. «out calipso» – вызывает модуль вывода для вывода считанных и обработанных ранее файлов со спутникового прибора CALIOP. «out modis» – вызывает модуль вывода для вывода считанных и обработанных ранее файлов со спутникового прибора MODIS. Команда «out all» – вызывает модуль вывода для вывода считанных и обработанных ранее файлов сначала со спутникового прибора CALIOP, а затем со спутникового прибора MODIS.

Если была введена некорректная команда или данные, нужные для выполнения команды, не были получены, то пользователь получает сообщение об ошибке, и модуль начинает ожидание следующей команды от пользователя. После анализа команды

происходит вызов соответствующего модуля. После выполнения задачи вызванного модуля, происходит сохранение полученных от него данных, а затем ожидание следующей команды от пользователя.

Полученные результаты

Для анализа пространственно-временных данных спутниковых приборов выбираются временные отрезки, когда над определенной территорией изображения MODIS, для которой наблюдается безоблачная ситуация, существует измерений CALIOP. Затем найденные измерения CALIOP интегрируются, получая значение AOT в слое атмосферы 0–25 км. Учитывая, что 70% всей аэрозольной массы расположено в 10-километровом нижнем слое атмосферы [16], то полученное значение будет весьма близко к AOT, полученной с борта MODIS. На рис. 3 показано изменение AOT (Optical_Depth_Aerosols _Land), полученного по данным MODIS.

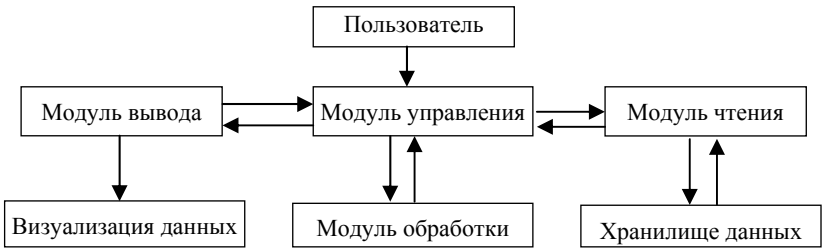


Рис. 2. Структура программы

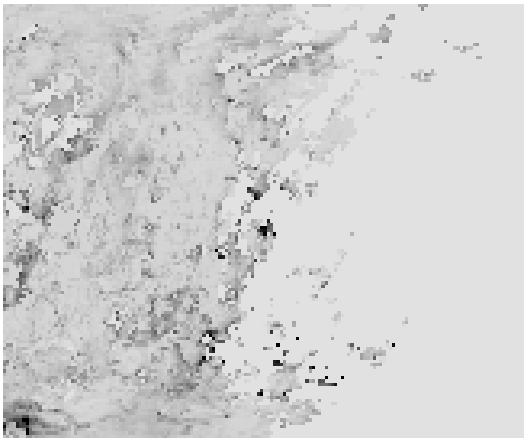


Рис. 3. Изображение AOT по траектории пролета MODIS над территорией Западной Сибири согласно данным продукта MOD04

Для сравнения данных со спутниковых приборов MODIS и CALIOP необходимо выполнить совмещение пространственных сеток, так как AOT для первого спутника дана на пространственной сетке с шагом 3 км, а для лидара – 333 м. Таким образом, необходимо учитывать, что лидарная сетка (часть траектории, связанная с безоблачной областью) увеличивается в 9 раз (0,333м×9~3 км). При этом, согласно рис. 1, траектории перемещения лидара пересекают область измерений MODIS, что также приводит к контролю попадания пикселя CALIOP в тот или иной пиксель изображения MODIS.

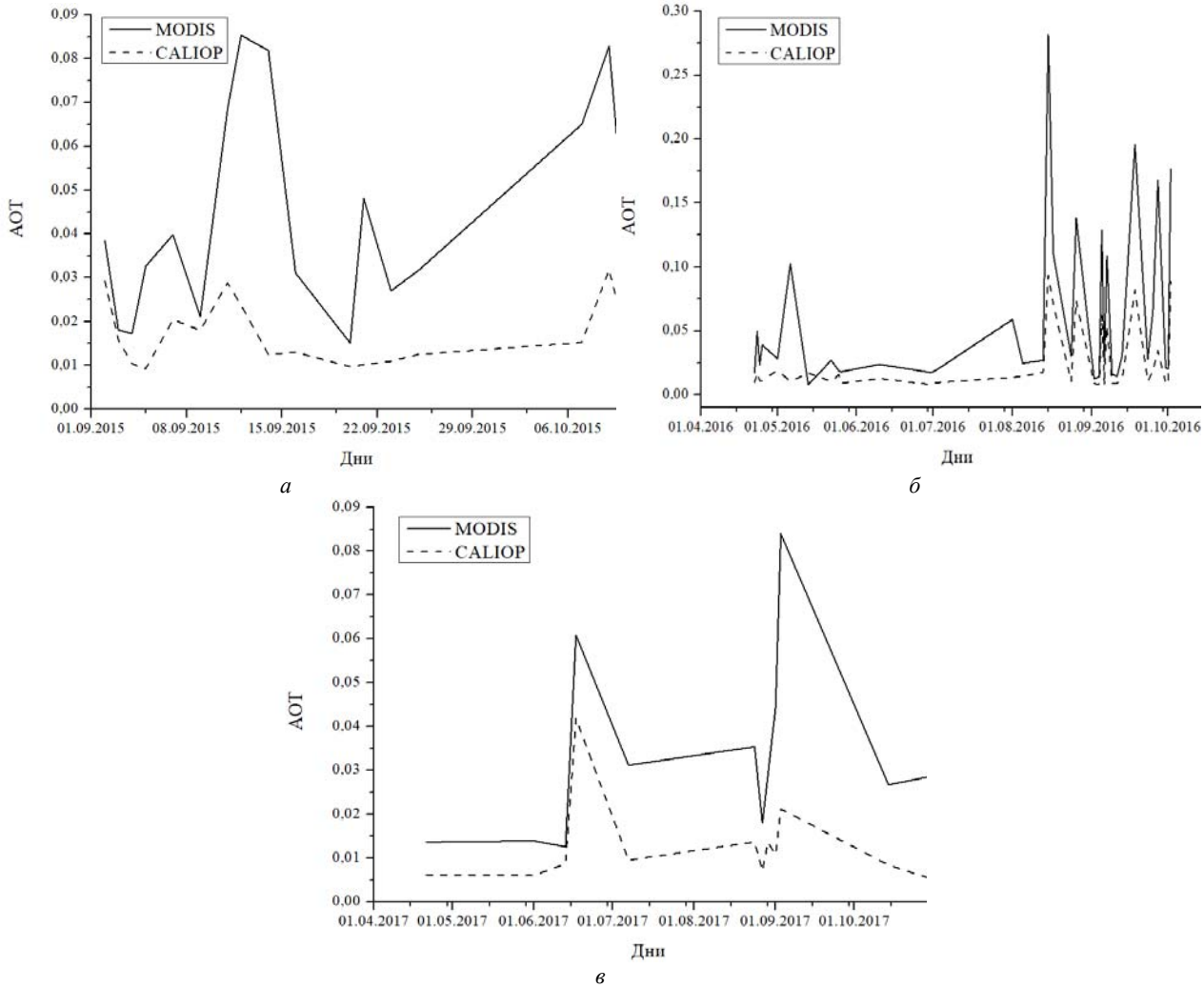
Результаты выбранных значений AOT от двух спутниковых приборов за 2015, 2016 и 2017 гг. представлены на рис. 4, где видно, что величины AOT спутниковых приборов MODIS (сплошная линия) и CALIOP (пунктирная линия) по значению и поведению во многом идентичны. Видно, что число точек, в которых выполнен сравнительный анализ незначительное, что связано с тем, что над территорией Западной Сибири наблюдается 60–90 безоблачных дней. Отметим, что в 2015 и 2017 гг., величины AOT были приблизительно одинаковы и составляют примерно 0.05 для MODIS и 0.015 для CALIOP. В начале 2016 г. значения были такими же, однако во второй половине года (август–октябрь) наблюдалось увеличение примерно в три раза.

Заключение

Проведенный анализ показал перспективность комбинирования данных пассивных и активных спутниковых приборов по изучению аэрозольной оптической толщи. Статистический анализ собранного многолетнего массива данных, совмещенных в пространстве измерений MODIS и CALIPSO (CALIOP), существенно облегчает интерпретацию временных данных AOT за счет вертикального распределения аэрозольного ослабления в атмосфере. Такое совмещение позволяет получить трехмерное разрешение поведения аэрозольной оптической толщи.

В то же время следует отметить, что между различными спутниковыми данными существует некоторая несогласованность, которые связана с пространственным и временным разрешением (частотой наблюдения и временем пролета), спектральными свойствами приборов и недостатками алгоритмов обработки. Однако тем не менее данные сравнения позволяют получить физически корректную модель пространственно-временного изменения свойств атмосферного аэрозоля.

Данная работа выполняется в центре космического мониторинга Земли ТУСУРа и в рамках проекта РФФИ №16-05-00901 «Механизмы, закономерности и особенности формирования стратосферного и мезосферного аэрозоля над территорией Сибири и Дальнего Востока» и государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 8.8184.2017/8.9 «Методология создания систем энергогенерирующих и энергопреобразующих устройств для наземных и бортовых комплексов наземного, космического и подводного базирования».



а *б* *в*

Рис. 4. Результаты сопоставления данных от спутниковых приборов MODIS и CALIOP за 2015 (*а*), 2016 (*б*), 2017 (*в*) гг.

Литература

1.Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной□оптики / Ю.М. Тимофеев, А.В. Васильев. – СПб.: Наука, 2000. – 475 с.

2. Remer L.A. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation // J. Atmos.Sci. – 2005. – Vol.62. – P. 947–973.

3. Techniques for the retrieval of aerosol properties over land and ocean using multiangle imaging / J.V. Martonchik, D.J. Diner, R.A. Kahn et al. // IEEE Trans on Geosci. and Remote Sens. – 1998. – Vol. 36. – P. 1212–1227.

4. The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm / A. Omar, D. Winker, C. Kittaka, M. Vaughan et al. // J. Atmos. Ocean. Tech. – 2009. – Vol. 26. – P. 1994–2014.

5. Temporal variability of aerosol optical thickness vertical distribution observed from CALIOP / T.D. Toth, J. Zhang, J.R. Campbell, J.S. Reid, M.A. Vaughan // J. Geophys. Res. Atmos. – 2016. – Vol. 121. – P. 9117–9139.

6. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms / D.M. Winker, M.A. Vaughan, A. Omar, Y. Hu et al. // J. Atmos. Ocean. Tech. – 2009. – Vol. 26. – P. 2310–2323.

7. The global 3-D distribution of tropospheric aerosols as characterized by CALIOP / D.M. Winker, J.L. Tackett, B.J. Getzewich, Z. Liu et al. // Atmos. Chem. Phys. – 2013. – Vol. 13. – P. 3345–3361.

8. Synergy between CALIOP and MODIS instruments for aerosol monitoring: application to the Po Valley / P. Royer, J.-C. Raut, G. Ajello, S. Berthier, P. Chazette // Atmos. Meas. Tech. – 2010. – Vol. 3. – P. 893–907.

9. A novel method for estimating shortwave direct radiative effect of above-cloud aerosols using CALIOP and MODIS data / Z. Zhang, K. Meyer, S. Platnick, L. Oreopoulos, D. Lee, H. Yu // Atmos. Meas. Tech. – 2014. – Vol. 7. – P. 1777–1789.

10. Costantino L. Aerosol indirect effect on warm clouds over South-East Atlantic, from co-located MODIS and CALIPSO observations / L. Costantino, F.-M. Breon // Atmos. Chem. Phys. – 2013. – Vol. 13. – P. 69–88.

11. Meyer K. Estimating the direct radiative effect of absorbing aerosols overlying marine boundary layer clouds in the southeast Atlantic using MODIS and CALIOP / K. Meyer, S. Platnick, L. Oreopoulos, D. Lee // J. Geophys. Res. Atmos. – 2013. – Vol. 118. – P. 4801–4815.

12. Varnai T. Analysis of co-located MODIS and CALIPSO observations near clouds / T. Varnai, F. Marshak // Atmos. Meas. Tech. – 2012. – Vol. 5. – P. 389–396.

13. Kittaka C. Intercomparison of column aerosol optical depths from CALIPSO and M.ODIS-Aqua / C. Kittaka, D.M. Winker, M.A. Vaughan, A. Omar, L.A. Remer // Atmos. Meas. Tech. – 2011. – Vol. 4. – P. 131–141.

14. Chan M.A. Arctic Cloud Characteristics as Derived from MODIS, CALIPSO, and CloudSat // Journal of climate. – 2013. – Vol. 26. – P. 3285–3306.

15. Густокашин П.Е., Программное обеспечение чтения данных MODIS (продукт MOD04) и CALIPSO / П.Е. Густокашин, М.Ю. Катаев // XVI Междунар. науч.-практ. конф. – М.: МЦНО, 2018. – Т. 16, № 6. – С. 6–10.

16. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.

Густокашин Павел Евгеньевич
Магистрант каф. автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: (382-2) 70-15-36
Эл. почта: diwixis@mail.ru

Катаев Михаил Юрьевич
Д-р техн. наук, профессор каф. АСУ ТУСУРа,
профессор Юргинского технологического института,
ф-ла Национального исследовательского
Томского политехнического университета
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Gustokashin P.E., Kataev M.Yu.

Comparative analysis of aerosol optical thickness from MODIS and CALIPSO L2 satellite products

Aerosol optical thickness is a significant climatic parameter that determines the state of the atmosphere along with gas composition and clouds. The study of changes in this parameter, depending on a variety of conditions is an important scientific task. This paper compares the temporal dynamics of an aerosol optical thickness of the atmosphere in Western Siberia, obtained from satellite data CALIPSO (lidar signals) and MODIS (multi-spectral images) according to L2 data. A description is given of the satellite instrument MODIS, which measures the optical thickness of the aerosol integrated over the entire atmosphere and the instrument CALIPSO, which measures the height profiles of the aerosol dispersion coefficient. It is shown that there is a correlation between the measurements of these devices over a period of 3 years.

Keywords: aerosol optical thickness, atmosphere, lidar sensing, satellite multispectral images.
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-70-74

References

1. Timofeev Yu.M., Vasilyev A.V. *T Teoreticheskie osnovy atmosfernoj optiki*. SPb, Science, 2000. 475 p.

2. Remer L.A. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. J. Atmos. Sci. 2005. vol. 62, pp. 947–973.

3. Martonchik J.V., Diner D.J., Kahn R.A., Ackerman T.P., Verstraete M.M., Pinty B., Gordon H.R. Techniques for the retrieval of aerosol properties over land and ocean using multiangle imaging. *IEEE Trans on Geosci. and Remote Sens*. 1998, vol. 36, pp. 1212–1227.

4. A. Omar, D. Winker, C. Kittaka, M. Vaughan et al. The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2009, vol. 26, pp. 1994–2014.

5. Toth T.D., Zhang J., Campbell J.R., Reid J.S., Vaughan M.A. Temporal variability of aerosol optical thickness vertical distribution observed from CALIOP *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016, vol. 121, pp. 9117–9139.

6. A. Omar, D. Winker, C. Kittaka, M. Vaughan et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2009, vol. 26, pp. 2310–2323.

7. Winker D.M., Tackett J.L., Getzewich B.J., Liu Z., Vaughan M.A., Rogers R.R. The global 3-D distribution of tropospheric aerosols as characterized by CALIOP. *Atmos. Chem. Phys*. 2013, vol. 13, pp. 3345–3361.

8. Royer P., Raut J.-C., Ajello G., Berthier S. Chazette P. Synergy between CALIOP and MODIS instruments for aerosol monitoring: application to the Po Valley. *Atmos. Meas.* Tech. 2010, vol. 3, pp. 893–907.

9. Zhang Z., Meyer K., Platnick S., Oreopoulos L., Lee D., Yu H. A novel method for estimating shortwave direct radiative effect of above-cloud aerosols using CALIOP and MODIS data. Atmos. Meas. Tech. 2014, vol. 7, pp. 1777–1789.

10. Costantino L., Breon F.-M. Aerosol indirect effect on warm clouds over South-East Atlantic, from co-located MODIS and CALIPSO observations. *Atmos. Chem. Phys*. 2013, vol. 13, pp. 69–88.

11. Meyer K., Platnick S., Oreopoulos L., Lee D. Estimating the direct radiative effect of absorbing aerosols overlying marine boundary layer clouds in the southeast Atlantic using MODIS and CALIOP J. *Geophys. Res.-Atmos.* 2013, vol. 118. pp. 4801–4815.

12. Varnai T., Marshak F. Analysis of co-located MODIS and CALIPSO observations near clouds. *Atmos. Meas. Tech.* 2012, vol. 5, pp. 389–396.

13. Kittaka C., Winker D.M., Vaughan M.A., Omar A., Remer L.A. Intercomparison of column aerosol optical depths from CALIPSO and MODIS-Aqua. *Atmos. Meas. Tech.* 2011, vol. 4, pp. 131–141.

14. Chan M.A. Arctic Cloud Characteristics as Derived from MODIS, CALIPSO, and CloudSat. *Journal of Climate*. 2013, vol. 26, pp. 3285–3306.

15. Gustokashin P.E., Kataev M.Yu. *Programmnoe obespechenie chteniya dannyh MODIS (produkt MOD04) i CALIPSO* [MODIS data reading software (product MOD04) and CALIPSO]. XVI Intern. scientific-practical conf. Moscow, MTSNO. 2018, vol. 16, no. 6, pp. 6–10.

16. Ivlev L.S., Dovgalyuk Yu.A. *Fizika atmosfernyh aehrozol'nyh sistem.* [Physics of atmospheric aerosol systems]. St. Petersburg, Institute of Chemistry St. Petersburg State University, 1999, 194 p.

Pavel E. Gustokashin
Undergraduate Student
Department Automated Control Systems (ACS)
Tomsk State University of Control Systems
and Radio Electronics (TUSUR)
40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36
Email: diwixis@mail.ru

Mikhail Yu. Kataev
Doctor of Engineering, Professor
Department Automated Control Systems (ACS)
Tomsk State University of Control Systems
and Radio Electronics (TUSUR)
Professor at Yurga Institute of Technology, Branch
of the National Research Tomsk Polytechnic University
40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Email: kmy@asu.tusur.ru