

УДК 551.507.362.2:504.3.054

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ НАД СЕВЕРНЫМ ТЯНЬ-ШАНЕМ

Л.Г. Сverdlik

Проанализированы результаты многолетних спутниковых измерений (MODIS/EOS Aqua&Terra) аэрозольной оптической толщи (AOD), восстановленные с применением алгоритмов Dark Target и Deep Blue над Северным Тянь-Шанем. Проведена оценка точности спутниковых данных, основанная на сопоставлении с результатами наземных фотометрических наблюдений (AERONET), выделены структурные составляющие временных рядов AOD (2001–2016 гг.).

Ключевые слова: аэрозоль; спутниковые измерения; оптическая толщина; AERONET; сезонные изменения; тренд; “Кумтор”.

COMPARATIVE ANALYSIS OF LONG-TERM GROUND-BASED AND SATELLITE MEASUREMENTS OF AEROSOL OPTICAL DEPTH OVER NORTHERN TIEN-SHAN

L.G. Sverdlik

Results of long-term satellite measurements (MODIS / EOS Aqua & Terra) of aerosol optical depth (AOD), reconstructed using Dark Target and Deep Blue algorithms over Northern Tien Shan are presented and analyzed. Estimation of satellite data accuracy based on comparison with results of ground-based photometric observations (AERONET) was made and structural components of AOD time series (2001–2016) were identified.

Keywords: aerosol; satellite observations; optical depth; AERONET; seasonal variations; temporal trend; “Kumtor”.

Введение. Одной из важных задач современных измерений в атмосфере, направленных на получение информации о качестве воздуха, источниках загрязнения и количественных оценках радиационного воздействия на климат [1], является исследование пространственного распределения и трансформации во времени оптических свойств аэрозоля [2–5]. Как средство глобального мониторинга изменчивости характеристик аэрозоля, в первую очередь его оптической толщи (AOD), в экологических и климатических исследованиях все более широко применяется дистанционное зондирование с помощью орбитальных обсерваторий. Однако находящиеся в свободном доступе спутниковые данные, кроме того, что ограничены определенными временными рамками, не обладают высоким пространственным разрешением и хорошей точностью, особенно в случаях мелкомасштабных пространственных неоднородностей аэрозольных структур или при измерениях над яркой земной поверхностью. Оценки достоверности восстановления аэрозольной оптической толщи по измерениям сканирующего спектрометра среднего разрешения MODIS (EOS Aqua&Terra), мульти-

спектрального прибора OMI (EOS Aura), сканирующего радиометра MISR (EOS Terra) приведены во многих публикациях [2, 6], однако на уровне региональных данных этот вопрос в полной мере не изучен [3, 7].

В настоящей статье, являющейся продолжением цикла работ по исследованию особенностей пространственно-временного распределения аэрозольного загрязнения в Центральной Азии (CA) [3, 4, 7], рассмотрен методический подход к анализу многолетних спутниковых данных, который включает оценку погрешности восстановления значений MODIS AOD, основанную на сопоставлении с результатами наземных фотометрических наблюдений (AERONET), и результаты выделения структурных составляющих долговременных временных рядов AOD (в первую очередь, сезонного цикла и тренда).

Регион исследования и климатологические ряды спутниковых (MODIS) и наземных (AERONET) данных AOD. Исследуемая область (CA) включает всю территорию Кыргызстана и ограничена координатами 38.5–44.5 °N и 68.5–81.5 °E по широте и долготу, соответственно.

Чтобы обеспечить детальное описание свойств взвешенных в воздухе частиц в этой области, подверженной влиянию нескольких основных источников аэрозоля [8–10], были выделены 10 участков, семь из которых расположены в Кыргызстане, а также по одному в Казахстане (Алматы), Таджикистане (Душанбе) и Китае (пустыня Такла-Макан) [3]. Однако прежде чем рассматривать региональные особенности многолетних вариаций оптической толщи, были подробно проанализированы результаты спутниковых и наземных измерений AOD , полученные в пределах одного из участков – ИК (41.5–43.0 °N; 76.5–78.0 °E) (рисунок 1).



Рисунок 1 – Исследуемая область и участок, выделенный для сопоставления наземных и спутниковых данных

Выбор этого региона (ИК) определили два важных обстоятельства. Во-первых, здесь расположена станция “Иссык-Куль”, входящая в состав глобальной Аэрозольной автоматизированной сети *AERONET* (*AEROSOL ROBOTIC NETWORK*) [11], на которой получены экспериментальные данные о свойствах атмосферного аэрозоля за достаточно продолжительный период (с августа 2007 г. по ноябрь 2016 г.). Во-вторых, нахождением в этом регионе крупнейшего в Центральной Азии рудника по добыче золота “Кумтор” (*Centerra Gold Inc.*), работы на котором будут продолжаться до 2026 года. Принимая во внимание, что разработка месторождения осуществляется открытым способом с применением таких технологических процессов, как бурение, взрывные работы, погрузка и транспортировка породы тяжелой горной техникой, это потенциально может оказывать негативное воздействие на состояние атмосферы и ледников.

Для анализа пространственного распределения аэрозольной оптической толщи были построены временные ряды среднемесячных значений AOD на длине волны $\lambda = 550$ нм по данным многолетних измерений (2001–2016 гг.) спектрометра *MODIS*, установленными на спутниках *Terra* и *Aqua* ($MODIS_{(T)}$ и $MODIS_{(A)}$) [12]. Данные *MODIS* имеют несколько различных уровней обработки. В данном случае значения AOD были получены

на основе файлов *MOD08_M3* и *MYD08_M3* коллекции 6 с применением алгоритмов *Dark Target (DT)* и *Combined Dark Target and Deep Blue (DT/DB)*. Таким образом, для проверки достоверности временных климатологических рядов спутниковых AOD и обоснования возможности их практического применения в различных исследованиях были сформированы четыре набора данных: $AOD_{MODIS_{(T)}}$, $AOD_{MODIS_{(T)}/DT/DB}$, $AOD_{MODIS_{(A)}/DT}$ и $AOD_{MODIS_{(A)}/DT/DB}$. Пространственное разрешение спутниковых данных составляло $1^\circ \times 1^\circ$.

Задача оценки точности спутниковых измерений AOD , как правило, решается путем сопоставления с данными наземных измерений солнечными фотометрами *CIMEL CE-318* (*AERONET*), которые предоставляют наиболее точные значения оптической толщи во всей колонне атмосферы. Причем такое сравнение позволяет также определить причину происхождения ошибок, которые могут являться следствием неверного выбора коэффициента отражения поверхности, погрешностей калибровки или других проблем [13]. В настоящей работе использовались результаты прямых измерений солнечной радиации, представленные в базе данных сети *AERONET* в пункте мониторинга *Issyk-Kul* [11]. Среднемесячные значения $AOD_{AERONET}$ восстановленные с применением автоматической фильтрации влияния облачности, дополнительной ручной проверки и корректировки результатов с учетом повторной калибровки фотометра, отвечали требованиям Уровня 2.0 (*Level 2.0*). Погрешность измерения $AOD_{AERONET}$ в видимом диапазоне ($\lambda = 550$ нм) составляла ± 0.01 [10]. Динамика среднемесячных значений $AOD_{MODIS_{(T)}}$ и $AOD_{MODIS_{(A)}/DT}$ и $AOD_{AERONET}$ измеренных над участком ИК в 2009–2015 гг. показана на рисунке 2.

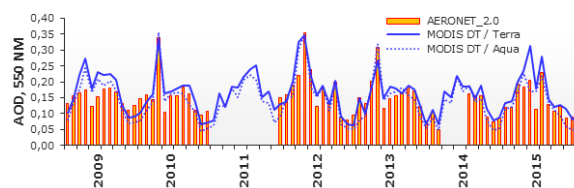


Рисунок 2 – Динамика среднемесячных значений $AOD_{MODIS_{(T)}/DT}$, $AOD_{MODIS_{(A)}/DT}$ и $AOD_{AERONET}$ (*Level 2.0*), измеренных над участком ИК в 2009–2015 гг.

Оценка точности спутниковых измерений AOD . Анализ соответствия спутниковой информации и результатов наземных дистанционных измерений проводился путем сравнения средних за месяц значений AOD , полученных приборами *MODIS* (*Terra* и *Aqua*) и *CIMEL* (*AERONET*) в виде:

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

где A – смещение линии регрессии; B – наклон.

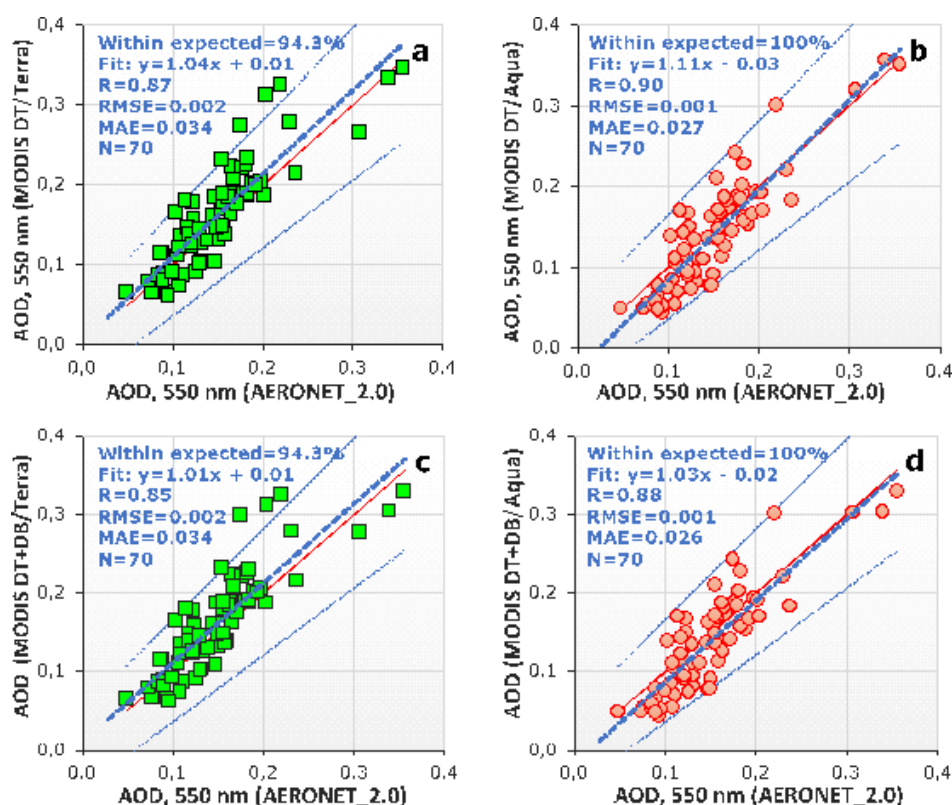


Рисунок 3 – Сравнение результатов наземных (*AERONET*) и спутниковых измерений $AOD_{MODIS(T)DT}$ (a); $AOD_{MODIS(A)DT}$ (b); $AOD_{MODIS(T)DT/DB}$ (c) и $AOD_{MODIS(A)DT/DB}$ (d)

Таблица 1 – Средние значения AOD , параметры линейных уравнений ($y=a+b*x$), коэффициенты корреляции (R) и детерминации (R^2), среднеквадратичная ($RMSE$) и средняя абсолютная ошибка (MAE) между среднемесячными значениями AOD_{MODIS} и $AOD_{AERONET}$ на участке ИК в 2009–2015 гг.

MODIS /Time Series/	AOD	EE	Linear regression parameter				RMSE	MAE
	Mean±SD	%	a	b	R	R ²		
EOS Terra (MOD08 M3 v6)								
Dark Target (DT)	0.162±0.066	94.7	0.01	1.04	0.87	0.76	0.002	0.034
Combined DT+DB	0.162±0.066	94.7	0.01	1.01	0.85	0.73	0.002	0.034
EOS Aqua (MYD08 M3 v6)								
Dark Target (DT)	0.140±0.070	100	-0.03	1.11	0.90	0.80	0.001	0.027
Combined DT+DB	0.138±0.066	100	-0.02	1.03	0.88	0.77	0.001	0.026

Для проведения такого сравнения было необходимо привести значения AOD , измеряемые каждым датчиком, к общей длине волны. Поэтому данные наземного наблюдения AOD на длине волны $\lambda=500$ нм в процессе обработки пересчитывались с использованием показателя Ангстрема (α) в интервале 440–675 нм на длину волны $MODIS$ ($\lambda=550$ нм):

$$AOD_{AERONET} = AOD_{550nm} = AOD_{500nm} (550/500)^{-\alpha}.$$

Оценка методической погрешности спутниковых измерений аэрозольной оптической толщи

производилась в соответствии с известным выражением [2], представляющим сумму абсолютной (0.05) и относительной (15 %) ошибки, которые возникают в результате задания граничных условий (напр., коэффициента отражения поверхности, а также калибровки инструмента) и модельных значений параметров аэрозоля (таких, как альbedo однократного рассеяния SSA):

$$EE_{MODIS} = \pm(0.05 + 0.15 \times AOD_{AERONET}).$$

Восстановленные значения AOD_{MODIS} , которые находятся в пределах ожидаемой ошибки (EE),

могут быть отнесены к достоверным данным хорошего качества [2, 13]:

$$AOD_{AERONET} - |EE| \leq AOD_{MODIS} \leq AOD_{AERONET} + |EE|,$$

где $|EE|$ – абсолютная величина определенной ранее ожидаемой ошибки.

В дополнение к использованию линейной регрессии были также вычислены среднеквадратичная ошибка ($RMSE$) и средняя абсолютная ошибка (MAE) между результатами спутниковых измерений и наблюдениями $AERONET$ в 2009–2015 гг. [13]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (AOD_{(MODIS)_i} - AOD_{(AERONET)_i})^2},$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |AOD_{(MODIS)_i} - AOD_{(AERONET)_i}|,$$

где n – количество наблюдений.

Сравнение результатов спутниковых наземных измерений AOD в видимой области спектра ($\lambda = 550$ нм) показало, что различие (наклон, смещение, коэффициент корреляции, %EE, $RMSE$, MAE) между двумя приборами $MODIS$ (*Terra* и *Aqua*) было незначительным и может считаться вполне приемлемым для практического использования (рисунок 3, таблица 1).

Практически все значения (94,7–100 %) рассматриваемых наборов среднемесячных данных $MODIS$ лежат в пределах величины $\pm(0.05+0.15 \cdot AOD_{AERONET})$, а коэффициенты взаимной корреляции между данными $MODIS$ и $AERONET$ составляли $R = 0.85-0.90$ ($R^2 = 0.73-0.80$). При средних значениях 0.150 ± 0.056 и 0.162 ± 0.066 наземных и спутниковых данных ($n = 70$), соответственно, абсолютная погрешность $AOD_{MODIS(T)DT}$ составила 0.034, а среднеквадратичное отклонение 0.002.

Наклон (b) уравнения линейной регрессии показывает, насколько близко принятая модель аэрозоля соответствует местному типу взвешенных в воздухе частиц, а точка пересечения или смещение (a) указывает на ошибку, вызванную неточным заданием коэффициента отражения поверхности [14]. Данные $MODIS_{(A)DT}$ показали несколько более высокую корреляцию ($R = 0.90$) с измерениями $AERONET$, соответственно их можно считать более предпочтительными и, возможно, на этом сказывается влияние водной глади озера Иссык-Куль.

Диапазон изменений многолетних среднемесячных значений $MODIS AOD$ ($MODIS_{(T)DT}$, $MODIS_{(A)DT}$, $MODIS_{(T)DT/DB}$ и $MODIS_{(A)DT/DB}$) находился в пределах 0.06–1.3, 0.20–1.64, 0.05–1.07 и 0.06–1.53, соответственно, что указывает на

некоторую переоценку $AOD_{MODIS(T)}$ и недооценку $AOD_{MODIS(A)}$ относительно значений $AOD_{AERONET}$ (0.18–1.36).

Исходя из этих оценок, проблема выбора между данными $MODIS/Aqua$ и $MODIS/Terra$ в оптимальном виде может быть решена, вероятно, путем вычисления среднего значения AOD_{MODIS} (*Dark Target*):

$$AOD_{MODIS} = (AOD_{MODIS(T)DT} + AOD_{MODIS(A)DT}) / 2.$$

Таким образом, использование значений оптической толщи, восстановленной на основе комбинированного алгоритма (DT/DB), не приводит к улучшению корреляции между спутниковыми и наземными данными. В то же время, очевидно, что спутниковые измерения AOD показали хорошие результаты, предоставляя достаточно точные значения оптической толщи в условиях наиболее характерных аэрозольных нагрузок атмосферы в регионе, что позволяет проводить анализ трендовых составляющих многолетних временных рядов.

Анализ структурных составляющих временных рядов $MODIS AOD$. Анализ временного ряда среднемесячных $AOD_{MODIS(T)DT}$ в исследуемой области охватывает период с 2001 по 2016 годы. В пределах этого интервала времени производилась оценка линейного тренда аэрозольной оптической толщи посредством метода наименьших квадратов. Было установлено, что статистическая значимость линейной тенденции изменения AOD была на уровне 95 %. Поскольку исходный временной ряд $AOD_{MODIS(T)DT}$ содержит явно выраженную периодически повторяющуюся сезонную компоненту, была определена усредненная кривая соответствующих каждому месяцу вариаций AOD за исследуемый период (рисунок 4), которая характеризовалась максимумом в апреле (0.239 ± 0.056) и минимумом в декабре (0.072 ± 0.024). Для аппроксимации периодической (сезонной) компоненты временного ряда использовался полином 6-го порядка.

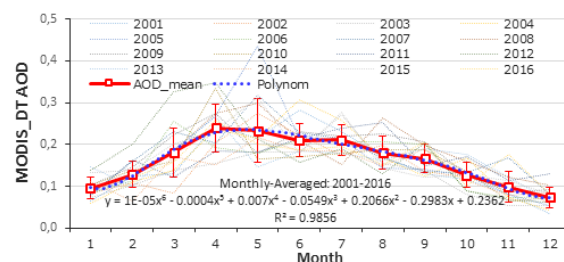


Рисунок 4 – Многолетние среднемесячные значения и среднее распределение $AOD_{MODIS(T)DT}$ (2001–2016 гг.)

Для более корректной оценки тренда была выполнена корректировка годовых циклов путем

вычитания (аддитивная модель) полиномиальной кривой (рисунок 5, а). Образованные с применением процедуры сезонной декомпозиции модифицированные временные ряды $AOD_{MODIS(T)DT}$ включающие нерегулярные компоненты, изменения которых носят случайный характер, и тренд-циклические составляющие послужили для определения тренда. В целом скорректированный временной ряд $AOD_{MODIS(T)DT}$ (рисунок 5, б) характеризовался положительным трендом (+3.30 % в год) в период с 2001 по 2008 гг., который в 2008–2016 гг. сменился отрицательной динамикой (–1.37 % в год). Такая особенность поведения AOD, которая подобна, например, изменениям в Ираке и Саудовской Аравии, определялась активной эмиссией пыли в 2007–2008 гг. [15]. На этот же период приходится максимум повторяемости (числа дней с пыльными бурями) и продолжительности пыльных бурь в пустынях северо-западного Китая и Монголии (Такла-Макан, Гоби). Отрицательный тренд оптической толщи в последние годы (2008–2016 гг.) связан, главным образом, с уменьшением в атмосфере относительного вклада крупных частиц пылевого аэрозоля [4]. Аналогичная тенденция снижения концентрации аэрозольной компоненты атмосферы в последние десять лет наблюдалась в Северной Америке и большинстве стран Западной Европы [15, 16].

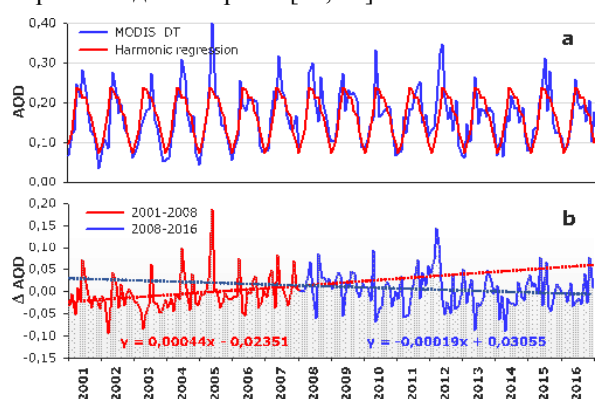


Рисунок 5 – Исходный и модифицированный (а) временные ряды среднемесячных значений $AOD_{MODIS(T)DT}$. Оценки линейных трендов в периоды 2001–2008 и 2008–2016 гг. (б)

Сочетание влияния двух этих региональных особенностей обусловило общую небольшую положительную тенденцию $AOD_{MODIS(T)DT}$ (+0.56 % в год), рассчитанную для всего периода исследования с 2001 по 2016 г.

Заключение. Шестнадцатилетний ряд (2001–2016 гг.) аэрозольной оптической толщи (AOD), сформированный по данным наблюдения спутниковым радиометром $MODIS$ над Исык-

Кульским регионом, был проанализирован с целью исследования тенденций временной изменчивости аэрозольной нагрузки атмосферы. Оценка точности спутниковых данных AOD_{MODIS} , которая производилась путем сравнения с результатами наземных измерений ($AERONET$), показала хорошее согласие между временными рядами с коэффициентами корреляции, составляющими $R = 0.85–0.90$. При этом не менее 95 % AOD_{MODIS} находилось в пределах методической погрешности спутникового метода.

Временные серии среднемесячных значений $AOD_{MODIS(T)DT}$ с 2001 по 2008 г. показали положительную динамику аэрозольной нагрузки атмосферы (+3.30 % в год) и отрицательную тенденцию (–1.37 % в год) в период 2008–2016 гг. Общее увеличение $AOD_{MODIS(T)DT}$ за период исследования с 2001 по 2016 г. было небольшим и составляло ~9 %.

На основе представленных данных можно сделать вывод, что явно выраженного негативного воздействия рудника “Кумтор” на состояние атмосферы в Исык-Кульском регионе не обнаружено.

Автор выражает благодарность сотрудникам NASA GES-DISC, обслуживающим интерактивный веб-интерфейс Giovanni, за обеспечение свободного доступа к данным.

Литература

1. Свердлик Л.Г. Аэрозольное воздействие на перенос радиации и дистанционное лазерное зондирование оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля / Л.Г. Свердлик // Вестник КPCY. 2005. Т. 5. № 7. С. 105.
2. Levy R.C. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land / R.C. Levy, L.A. Remer, R.G. Kleidman, S. Mattoo, C. Ichoku, R. Kahn, T.F. Eck // Atmos. Chem. Phys. 2010. 10. 10399–10420.
3. Свердлик Л.Г. Региональные особенности многолетней изменчивости оптических свойств атмосферного аэрозоля над Центральной Азией / Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации. 2016. № 9. С. 8–13.
4. Свердлик Л.Г. Спутниковый мониторинг межгодовой и сезонной изменчивости оптических свойств атмосферного аэрозоля в Центральной Азии / Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации. 2017. № 1. С. 3–8.
5. Свердлик Л.Г. Методика автоматической калибровки при обработке лидарных сигналов упругого обратного рассеяния / Л.Г. Свердлик, П.В. Козлов // Вестник КPCY. 2017. Т. 17. № 1. С. 201–205.
6. Levy R.C. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean / R.C. Levy,

- S. Mattoo, L.A. Munchak, L.A. Remer, A.M. Sayer, F. Patadia, N.C. Hsu // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. 6. 2989–3034.
7. *Свердлик Л.Г.* Результаты сравнения экспериментальных (AERONET) и модельных (NAAPS) данных изменчивости оптических свойств аэрозоля над Северным Тянь-Шанем / Л.Г. Свердлик // *Наука, новые технологии и инновации.* 2016. № 3. С. 3–9.
 8. *Свердлик Л.Г.* Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля / Л.Г. Свердлик // *Наука, новые технологии и инновации.* 2014. № 4. С. 26–31.
 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 // В сб.: *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 20, Atmospheric Physics.* 2014. С. 92923J.
 10. *Свердлик Л.Г.* Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET) / Л.Г. Свердлик // *Наука, новые технологии и инновации.* 2013. № 3. С. 3–7.
 11. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>
 12. URL: <http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/>
 13. *Bibi H.* Intercomparison of MODIS, MISR, OMI, and CALIPSO aerosol optical depth retrievals for four locations on the Indo-Gangetic plains and validation against AERONET data / H. Bibi, K. Alam, F. Chishtie, S. Bibi, I. Shahid, T. Blaschke // *Atmospheric Environment.* 2015. 111. 113–126.
 14. *Hyer E.J.* An over-land aerosol optical depth data set for data assimilation by filtering, correction, and aggregation of MODIS Collection 5 optical depth retrievals / E.J. Hyer, J.S. Reid, J. Zhang // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. 4. 379–408.
 15. *Notaro M.* Regime shift in Arabian dust activity, triggered by persistent Fertile Crescent drought / M. Notaro, Y. Yu, O.V. Kalashnikova // *J. Geophys. Res.-Atmos.* 2015. Vol. 120. 19. 10229–10249.
 16. *Mao K.B.* Global aerosol change in the last decade: An analysis based on MODIS data / K.B. Mao, Y. Ma, L. Xia, W.Y. Chen, X.Y. Shen, T.J. He, T.R. Xu // *Atmospheric Environment.* 2014. 94. 680–686.