

Влияние балла облачности на характеристики соответствия измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы прибором MODIS/Terra наблюдениям сети AERONET

А. Е. Белов, Н. В. Панкратова, В. С. Ракитин, Ю. В. Киселёва

*Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: y.beloff2013@yandex.ru*

Проанализированы и сопоставлены данные измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы спутникового спектрометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), коллекция 6.1, параметр Dark Target Deep Blue Combined Mean для длины волны 550 нм и 30 наземных спектрофотометров сети AERONET, уровень измерений 1.5 (*англ.* AErosol RObotic NETwork, L1.5), расположенных в разных климатических и географических зонах. Эти пункты были разделены на четыре условные группы: 1 — континентальные станции средних широт; 2 — тропические и субтропические станции, находящиеся в береговых районах; 3 — станции, расположенные в пустынных районах; 4 — высокоширотные станции. Рассчитаны параметры корреляции наземных и спутниковых данных в зависимости от параметров облачности (переменная Cloud Fraction Day Mean), определяемых по измерениям MODIS. При сопоставлении синхронных рядов MODIS и AERONET установлена зависимость характеристик соответствия орбитальных данных наземным измерениям от параметров облачности. Уменьшение облачности в момент измерений приводит к улучшению корреляционных параметров. Степень проявления этого эффекта на разных станциях отличается. Лучше всего описываемый эффект обнаруживается для станций, расположенных в континентальных районах умеренного пояса. Слабее всего — в пустынных районах.

Ключевые слова: аэрозоль, дистанционное зондирование атмосферы, валидация, аэрозольная оптическая толщина, MODIS, AERONET

Одобрена к печати: 05.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-349-362

Введение

Атмосферный аэрозоль представляет собой мелкие твёрдые частицы или капельки жидкости, взвешенные в воздухе, диаметр которых варьирует от нескольких нанометров до нескольких десятков микрометров (Charlson et al., 1992). Аэрозоль оказывает значимое воздействие как на относительно короткопериодные колебания средней глобальной температуры (1–3 года) (Seip et al., 2024), так и на долгопериодные изменения глобального климата (Bright, Gueymard, 2019). Кроме того, аэрозольное загрязнение атмосферы имеет серьёзное влияние на здоровье человека. При вдыхании мелкодисперсных аэрозольных компонент окружающего воздуха существенно увеличивается риск заболевания дыхательных путей и нервной системы (Cipoli et al., 2023). Таким образом, наблюдения и анализ содержания аэрозолей в атмосфере необходимы как для оценки происходящих изменений климата, так и для оценки рисков для здоровья населения.

Для анализа аэрозольного загрязнения атмосферы удобно использовать аэрозольную оптическую толщину (АОТ), которая является коэффициентом аэрозольного ослабления излучения, интегрированным по высоте (Жданова, Чубарова, 2018; Плахина и др., 2018). Аэрозольная оптическая толщина отражает оптические свойства атмосферы и тесно связана с концентрацией аэрозоля в воздухе.

Для мониторинга состава атмосферы, в том числе и АОТ, широко используются методы дистанционного зондирования, одним из которых представляется метод спутникового зондирования, где восстановление АОТ проводится по измеренной солнечной радиации на верхней границе атмосферы и по модельным расчётам аэрозольного переноса. Аэрозольную оптическую толщину измеряет большое количество спутниковых приборов:

MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), MISR (*англ.* Multi-angle Imaging SpectroRadiometer), TOMS (*англ.* Total Ozone Mapping Spectrometer), OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument) и других (Mischenko et al., 2007). Главное достоинство метода заключается в покрытии измерениями большой площади: спутниковые наблюдения могут охватывать весь земной шар. Однако главная проблема данного метода состоит в возможности значительного снижения точности измерений вследствие неоднородности атмосферы (Плахина и др., 2018; Remer et al., 2005). Кроме того, используемые алгоритмы восстановления АОТ имеют ряд значительных ограничений, таких как сложность и неопределённость при восстановлении АОТ над водными объектами и высоко отражающими поверхностями, а также в условиях облачности (Жданова, Чубарова, 2018).

Другой метод дистанционного зондирования — наземные спектрометрические наблюдения — позволяет проводить более точные измерения АОТ. Самой широко распространённой наземной измерительной сетью является фотометрическая сеть AERONET (*англ.* AErosol RObotic NETwork). На сегодняшний день в мире функционирует более 1000 станций этой сети. Каждая из них оборудована солнечными фотометрами CIMEL; измерения АОТ проводятся на нескольких длинах волн (в том числе на 500 нм) с заявленной точностью 0,01 (Dubovik et al., 2002). Для результатов измерений данной сети разработаны специальные алгоритмы, позволяющие восстанавливать большое количество аэрозольных и оптических параметров атмосферы, проинтегрированных по высоте. Достоинством AERONET можно считать единообразие приборов, методов калибровки и алгоритмов восстановления аэрозольных параметров, а также высокую точность.

Однако, несмотря на большую численность пунктов AERONET, результаты их измерений имеют локальный или региональный характер, а ряды наблюдений содержат пропуски или заметно ограничены по времени. В результате эти данные затруднительно использовать для изучения пространственно-временной динамики содержания аэрозолей в глобальном масштабе. Так, измерения AERONET не проводятся на значительных площадях труднодоступных районов Земли и над океанами; на территории России расположены всего восемь пунктов сети, однако данные по ним доступны лишь до 2021 г.

Таким образом, наиболее точную информацию о содержании аэрозолей и оптических свойствах атмосферы можно получить путём комплексного использования и наземных, и спутниковых измерений. Для оценки качества и последующего репрезентативного анализа орбитальных наблюдений необходимо тщательное сопоставление с наземными данными, которые можно считать эталонными. Кроме того, по результатам масштабного исследования (с привлечением большого количества данных наземных пунктов) представляется возможным проведение дополнительной фильтрации данных спутникового спектрометра и изучение влияния этой фильтрации на параметры корреляции орбитальных и наземных рядов. Фильтрация может выполняться по дополнительным параметрам, оцениваемым MODIS (например, альbedo и высота поверхности над уровнем моря, параметры облачности и т. п.); целью разрабатываемых методов фильтрации является повышение репрезентативности спутниковых измерений.

В работе проанализированы данные АОТ, полученные со спутникового спектрометра MODIS и по данным наземной сети AERONET. Впервые для различных географических районов было проведено тщательное исследование влияния облачности на корреляцию орбитальных и наземных рядов. По результатам работы рассчитаны параметры фильтрации по баллу облачности, рекомендуемые к применению при восстановлении значений АОТ по данным MODIS для разных географических и климатических районов.

Методы и измерительные данные

Измерения AERONET

В качестве эталонных наземных измерений нами были использованы среднесуточные значения АОТ уровня 1.5 (англ. Level 1.5 — L1.5), полученные сетью AERONET и находящиеся в открытом доступе (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Данные L1.5 подвергаются предварительной фильтрации от облачности на длине волны 500 нм. Условием наблюдений стала безоблачная погода. Измерения проводятся в восьми спектральных линиях на длинах волн 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 и 1020 нм. Оптическая толщина вычисляется исходя из спектрального ослабления луча на каждой длине волны при помощи закона Бугера. Для дальнейшего сопоставления с результатами спутниковых измерений данные АОТ AERONET пересчитывались для длины волны 550 нм по формуле (Eck et al., 1999):

$$AOT_{550} = \frac{AOT_{500}}{\exp\left(\left(-\ln \frac{500}{550}\right)\alpha\right)},$$

где AOT_{550} , AOT_{500} — аэрозольная оптическая толщина на длине волны 550 и 500 нм соответственно; α — параметр Ангстрема на длине волны 440–675 нм.

Уровень 1.5 данных AERONET выбран из-за лучшей статистической обеспеченности рядов наблюдений. Так, обеспеченность среднесуточными данными измерений на уровне данных L2.0 на отдельных станциях меньше на 20–25 % по сравнению с L1.5 (например, Hong_Kong_Sheung и XiangHe).

Для сопоставления результатов наземных и орбитальных измерений были выбраны данные 30 станций AERONET, которые расположены в четырёх разных климатических/географических зонах Евразии и северной части Африки и обладают длительными равномерными измерительными рядами АОТ на длине волны 500 нм с хорошей статистической обеспеченностью (табл. 1). Основным дополнительным критерием являлись различия в географических и климатических условиях.

Таблица 1. Информация о станциях наземной измерительной сети AERONET, использованных в исследовании

№	Название станции (в соответствии со списком https://aeronet.gsfc.nasa.gov/)	Координаты, град		Высота, м н. у. м.	Количество синхронных пар AERONET и MODIS/Terra	Период, годы
		с. ш.	в. д.			
<i>Группа 1 (станции, расположенные в континентальных районах средних широт)</i>						
1	Paris	48,8	2,4	50	1717	2006–2024
2	Brussels	50,8	4,4	120	1214	2006–2024
3	Hamburg	53,6	9,9	120	1031	2002–2022
4	Munich_University	48,1	11,6	40	1024	2011–2023
5	Leipzig	51,4	12,4	533	1724	2001–2023
6	Helsinki	60,2	25,0	53	1153	2008–2022
7	Toravere	58,3	26,5	85	1630	2002–2022
8	Minsk	53,9	27,6	235	831	2008–2022
9	Peterhof	59,9	29,8	58	374	2013–2021
10	Dushanbe	38,6	68,9	821	2369	2010–2024
11	Kanpur	26,5	80,2	123	4290	2001–2022
12	XiangHe	39,8	117,0	36	4050	2001–2024
13	Osaka	34,7	135,6	50	2128	2002–2024

Окончание табл. 1

№	Название станции (в соответствии со списком https://aeronet.gsfc.nasa.gov)	Координаты, град		Высота, м н. у. м.	Количество синхронных пар AERONET и MODIS/Terra	Период, годы
		с. ш.	в. д.			
<i>Группа 2 (тропические и субтропические станции, находящиеся в береговых районах)</i>						
14	Rome-Tor Vergata	41,8	12,6	130	1991	2013–2024
15	Athens-NOA	38,0	23,7	130	1622	2008–2024
16	NGHIA_DO	21,0	105,8	50	550	2010–2023
17	Hong_Kong_Sheung	22,5	114,1	40	601	2012–2022
18	Hong_Kong_PolyU	22,3	114,2	30	1361	2005–2024
<i>Группа 3 (станции, расположенные в пустынных районах)</i>						
19	Tunis_Carthage	36,8	10,2	10	1846	2013–2022
20	Medenine_IRA	33,5	10,6	34	805	2014–2022
21	Cairo_EMA_2	30,1	31,3	70	3714	2010–2024
22	Weizmann_Institute	31,1	34,8	73	1535	2015–2022
23	Eilat	29,5	34,9	15	2289	2007–2022
24	Lahore	31,5	74,3	209	3339	2007–2024
25	Dalanzadgad	43,6	104,4	1470	3573	2001–2022
<i>Группа 4 (высокоширотные станции)</i>						
26	Thule	76,5	–68,7	225	950	2007–2024
27	Ny_Alesund_AWI	78,9	11,9	7	490	2017–2024
28	Hornsund	77,0	15,5	12	1128	2005–2024
29	Matorova_FMI	68,0	24,2	340	220	2020–2024
30	Sodankyla	67,4	26,7	184	470	2007–2024

П р и м е ч а н и е: Станции поделены на группы в зависимости от климатических и географических особенностей расположения: первая группа (континентальные районы средних широт, номера станций с 1-й по 13-ю); вторая группа (тропические и субтропические станции, находящиеся в береговых районах, станции с 14-й по 18-ю); третья группа (пустынные районы, номера станций с 19-й по 25-ю); четвертая группа (полярные и субполярные районы, станции с 26-й по 30-ю).

Измерения MODIS

В качестве данных орбитальных измерений использованы данные АОТ со спутникового спектрометра MODIS — коллекция 6.1 (*англ.* Collection 6.1), установленного на спутниках Terra (EOS AM-1 (*англ.* Earth Observing System Ante Meridiem-1)) и Aqua (EOS PM-1 (*англ.* Earth Observing System Post Meridiem-1)) (Wei et al., 2019). Мы использовали переменную Dark Target Deep Blue Combined Mean на длине волны 550 нм с суточным осреднением и пространственным разрешением $1 \times 1^\circ$ (L3 или 3-й уровень).

В настоящей работе нами не проводилась группировка станций по степени аэрозольного загрязнения; мы сконцентрировались исключительно на географических особенностях пунктов, для которых выполнялось исследование характеристик соответствия спутниковых и наземных данных. Для того, чтобы охватить как можно больший спектр условий атмосферы и подстилающей поверхности и определить их влияние на корреляцию между спутниковыми и наземными измерениями, нами были выбраны станции, располагающиеся в качественно различающихся по климатическим и географическим характеристикам районах. Первая группа станций (№ 1–13 в табл. 1) находится в континентальных районах умеренного пояса. Вторая группа станций (№ 15–18 в табл. 1) расположена в прибрежных районах тропического и субтропического пояса, а одна из них (NGHIA_DO, Вьетнам) — в континентальном

районе тропического пояса. Данная станция формально не относится к береговым, однако характер обнаруженного эффекта наиболее соответствует станциям второй группы. Третью группу станций (№ 19–25 в *табл. 1*) составляют пункты AERONET, расположенные в местностях, характеризующихся высокой отражательной способностью поверхности (пустынные территории) с отсутствием значительных сезонных вариаций альbedo поверхности. Известно, что спутниковые измерения АОТ в пустынных районах зачастую показывают неудовлетворительные результаты (Жданова, Чубарова, 2018; Almazroui, 2019; Wei et al., 2018). Вследствие этого попытка провести ещё одно сопоставление спутниковых и наземных данных в таких районах представляется целесообразной. Четвёртая группа станций (№ 25–30 в *табл. 1*) сформирована высокоширотными станциями, расположенными в европейских высокоширотных районах и на о. Гренландия.

Известно, что восстановление АОТ по спутниковым данным затрудняется наличием облачности (Chu et al., 2003; Remer et al., 2005; Wang et al., 2017). Поэтому нами была проведена пошаговая фильтрация спутниковых данных по переменной Cloud Fraction Day Mean (или сокр. CF (*англ.* Cloud Fraction)), которая содержится в данных MODIS 3-го уровня и отражает степень покрытия неба облаками над ячейкой размером $1 \times 1^\circ$, в которой находится измерительный пункт. Переменная усредняется по всем первичным пикселям MODIS в момент измерений и может принимать величину от 0 (0 % неба покрыто облаками) до 1 (100 % неба покрыто облаками). Фильтрация, отбор и обработка данных MODIS проводилась при помощи специального программного обеспечения, разработанного в ИФА РАН (Ракитин и др., 2025; Rakitin et al., 2023). Для каждой станции AERONET были составлены корреляционные диаграммы с сопоставлением результатов измерения АОТ спутниковым спектрометром MODIS и наземными фотометрами сети AERONET при различных значениях CF. При исследовании параметров соответствия орбитальных и наземных данных использовалась линейная форма зависимости:

$$\text{AOT}(\text{Sat}) = \text{AOT}(\text{Gr}) \cdot K + A,$$

где $\text{AOT}(\text{Sat})$ — величина, измеренная спутниковым прибором MODIS/Terra; $\text{AOT}(\text{Gr})$ — аналогичная величина, измеренная приборами наземной сети AERONET; K и A — коэффициент наклона и свободный член линейной регрессии для синхронных пар дневных измерений АОТ MODIS/Terra и AERONET соответственно; R — коэффициент корреляции для данной пары наземного и спутникового прибора.

Для получения наиболее точной картины влияния условий облачности на качество измерений MODIS было решено провести сопоставление результатов измерений двух видов данных с шагом фильтра параметров облачности CF, равным 0,1, от $\text{CF} \leq 1,0$ (нефильтрованные данные MODIS) до $\text{CF} \leq 0,1$ (10%-е заполнение облачностью ячейки $1 \times 1^\circ$).

Результаты и обсуждение

Вследствие того, что в качестве основного показателя качества соответствия данных АОТ MODIS и AERONET мы используем параметры уравнения линейной регрессии, представляется возможным анализ вариации значений каждого из них.

В целом следует отметить увеличение коэффициента корреляции R для всех станций группы 1 при уменьшении CF. На трёх станциях (Paris, Peterhof, XiangHe) улучшение упомянутого параметра выражено менее явно (в среднем R варьирует от 0,79 при $\text{CF} \leq 1,0$ до 0,81 при $\text{CF} \leq 0,5$ и до 0,82 при $\text{CF} \leq 0,1$). В остальных пунктах группы 1 (10 из 13) установлено более существенное увеличение R при уменьшении балла облачности, см. *рис. 1* (см. с. 354). В среднем для 10 станций R увеличился с 0,79 (для нефилтрованных данных, т.е. при $\text{CF} \leq 1,0$) до 0,84 для $\text{CF} \leq 0,5$ и до 0,88 для $\text{CF} \leq 0,1$.

Для всех пунктов группы 2 получен аналогичный эффект. На одной из пяти станций группы (Rome-Tor Vergata) эффект увеличения корреляционного коэффициента выражен явно (R для данной станции варьирует от 0,77 при $\text{CF} \leq 1,0$ до 0,79 при $\text{CF} \leq 0,5$ и до 0,84 при

$CF \leq 0,1$), на остальных четырёх — менее заметно: значения R в среднем изменяются от 0,79 при $CF \leq 1,0$ и 0,80 при $CF \leq 0,5$ до 0,85 при $CF \leq 0,1$ (см. рис. 1).

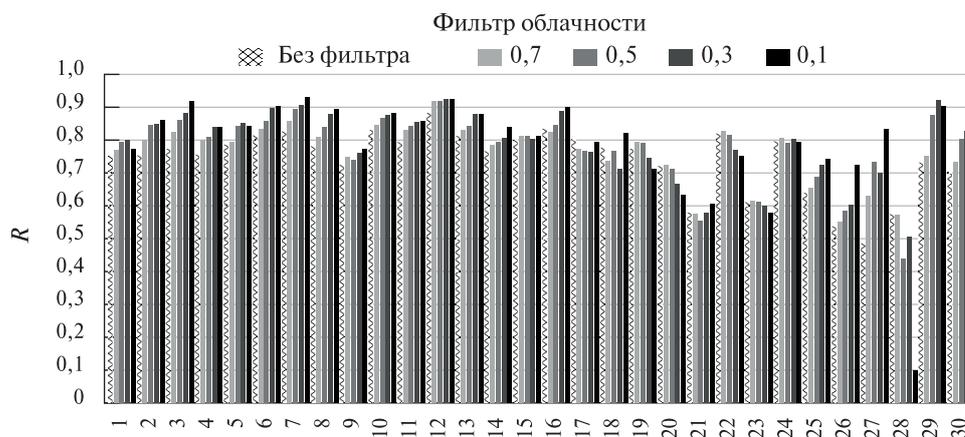


Рис. 1. Коэффициент корреляции R для синхронных пар дневных измерений АОТ MODIS/Terra и AERONET L1.5 (здесь и далее на рисунках по оси абсцисс указаны номера станций в соответствии с табл. 1)

Среди станций, расположенных в пустыне (группа 3), описанный эффект явно выражен на одной (Dalanzagdad, плато Гоби) из семи станций (R для данных этой станции варьирует от 0,64 при $CF \leq 1,0$ до 0,69 при $CF \leq 0,5$ и до 0,74 при $CF \leq 0,1$), ещё на одной (Саиго_ЕМА_2, Египет) эффект выражен слабо (R изменяется от 0,64 при $CF \leq 1,0$ до 0,74 при $CF \leq 0,1$, принимая при $CF \leq 0,5$ наиболее низкое значение 0,55). На остальных пяти станциях данной группы этот эффект не отмечается (см. рис. 1). Значения R изменяются от 0,75 при $CF \leq 1,0$ до 0,74 при $CF \leq 0,5$ и до 0,69 при $CF \leq 0,1$ (т.е. фактически происходит уменьшение R). Такое понижение R при уменьшении степени облачности, на наш взгляд, может быть объяснено географическими и климатическими особенностями расположения данных пунктов. В пустынных районах при значительной инсоляции и высоком значении альbedo поверхности создаются неблагоприятные условия для спутниковых измерений АОТ; именно поэтому при уменьшении CF для большинства станций третьей группы отмечается ухудшение характеристик сопоставления с эталонными данными AERONET, что подтверждается и другими исследователями (Жданова, Чубарова, 2018; Almazroui, 2019; Wei et al., 2018).

Для большей части пунктов, расположенных в высокоширотных областях и формирующих четвертую группу станций, отмечен рост коэффициента корреляции R при уменьшении CF (см. рис. 1). Исключение составляет только станция Hornsund, для которой R сначала растёт от 0,57 при $CF \leq 1,0$ до 0,70 при $CF \leq 0,8$; при дальнейшем уменьшении доли облачности отмечено понижение рассматриваемого параметра до 0,44 при $CF \leq 0,5$ и до отрицательных значений при $CF \leq 0,1$. Такая особенность вариаций коэффициента корреляции на данной станции, на наш взгляд, может быть связана с резким сокращением числа измерительных дней с синхронными парами спутниковых и наземных измерений: так, при $CF \leq 0,5$ остаётся только 15 %, а при сокращении CF до 0,1 — только 1 % от первоначального количества данных. Поэтому для пункта Hornsund для $CF \leq 0,1$ значения корреляционных параметров далее не приводятся.

Для остальных станций группы 4 отмечено увеличение этого параметра: в среднем по четырём станциям этой группы (без пункта Hornsund) R принимает значения от 0,61 при $CF \leq 1,0$ до 0,75 при $CF \leq 0,5$ и до 0,82 при $CF \leq 0,1$ (см. рис. 1).

Эффект улучшения коэффициента наклона линейной регрессии K проявляется в приближении значений данного параметра к единице.

В целом величина K для всех станций группы 1, располагающихся в континентальных зонах умеренного пояса (кроме Helsinki), варьирует в пределах 0,9–1,1, т.е. близка к единице.

Таким образом, для станций этой группы было отмечено в общем хорошее согласие спутниковых и наземных данных по параметру K . Эффект улучшения рассматриваемого параметра наиболее явно проявляется на 7 из 13 станций, например, для станции Munich_University значения K варьировали от 1,08 при $CF \leq 1,0$ до 1,06 при $CF \leq 0,5$ и до 0,99 при $CF \leq 0,1$.

На трёх станциях группы 1 (Paris, Peterhof, XiangHe) рассматриваемый эффект не был выражен. При уменьшении балла облачности значения параметра K фактически отдалялись от единицы (рис. 2). Вариации K в среднем для этих трёх станций составили от 0,97 при $CF \leq 1,0$ до 0,91 при $CF \leq 0,5$ и до 0,87 при $CF \leq 0,1$. Для оставшихся трёх станций (Togavere, Leipzig и Dushanbe) проявление эффекта имело слабо выраженный характер: K изменялся в диапазоне близких значений.

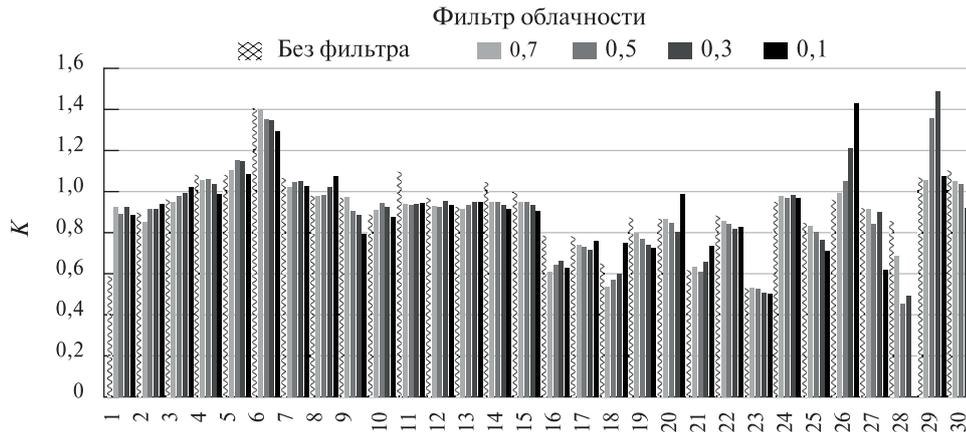


Рис. 2. Коэффициент наклона линейной регрессии K для синхронных пар дневных измерений АОТ MODIS/Terra и AERONET L1.5

Для станций группы 2 не было отмечено явного проявления рассматриваемого эффекта (см. рис. 2). Незначительное приближение коэффициента наклона к единице при уменьшении степени облачности было отмечено только для пункта Hong_Kong_Sheung, вариации данного параметра составили от 0,65 при $CF \leq 1,0$ до 0,57 при $CF \leq 0,5$ и до 0,75 при $CF \leq 0,1$.

Для остальных станций группы 2 рассматриваемый эффект не проявился: вариации K в среднем составили от 0,90 при $CF \leq 1,0$ до 0,82 при $CF \leq 0,5$ и до 0,80 при $CF \leq 0,1$.

Среди станций группы 3, расположенных в пустынных областях, рассматриваемый эффект наиболее явно проявился на станциях Cairo_EMA_2, Medenine_IRA и Lahore. Однако величина K для этих станций достаточно сильно различается. Так, для пунктов Medenine_IRA и Lahore вариации K составили от 0,90 при $CF \leq 1,0$ до 0,92 при $CF \leq 0,5$ и до 0,98 при $CF \leq 0,1$, а для станции Cairo_EMA_2 данный параметр варьировал в пределах от 0,61 при $CF \leq 1,0$ до 0,62 при $CF \leq 0,5$ и до 0,74 при $CF \leq 0,1$.

Для остальных станций группы 3 рассматриваемого эффекта (приближение величины коэффициента наклона K к единице) при уменьшении балла облачности не наблюдалось. Например, для станции Dalanzadgad величина K изменялась от 0,85 при $CF \leq 1,0$ до 0,80 при $CF \leq 0,5$ и до 0,71 при $CF \leq 0,1$.

Для высокоширотных станций, составляющих четвертую группу, не было отмечено заметного улучшения характеристики K при уменьшении балла облачности (см. рис. 2). Для двух станций (Thule и Hornsund) при уменьшении CF величина K начинает превышать единицу, и это отклонение растёт по мере уменьшения балла облачности. На остальных трёх пунктах данной группы наблюдалась незначительная флуктуация параметра K : в среднем от 1,03 при $CF \leq 1,0$ до 1,08 при $CF \leq 0,5$ и до 0,92 при $CF \leq 0,1$.

В целом отметим, что зависимость коэффициента наклона K от облачности в большинстве пунктов разных групп оказалась относительно незначительной. В каждой группе есть пункты, для которых величина K либо существенно превышает единицу (например, Helsinki

группы 1, $K = 1,3...1,4$), либо существенно меньше единицы, например три станции группы 2 (NGHIA_DO, Hong_Kong_Sheung, Hong_Kong_PolyU, $K \sim 0,6...0,75$) и станция Eilat группы 3 ($K \sim 0,6$), см. рис. 2. Значение K оказалось наиболее близко к 1 (условие, когда спутниковые данные наиболее точно соответствуют наземным измерениям) на станциях группы 1.

Параметр A (свободный член линейной регрессии) характеризует величину систематической ошибки; чем меньше величина A , тем меньше величина систематических расхождений между спутниковыми и наземными данными. Эффект уменьшения A при уменьшении балла облачности получен для всех станций первой группы (рис. 3).

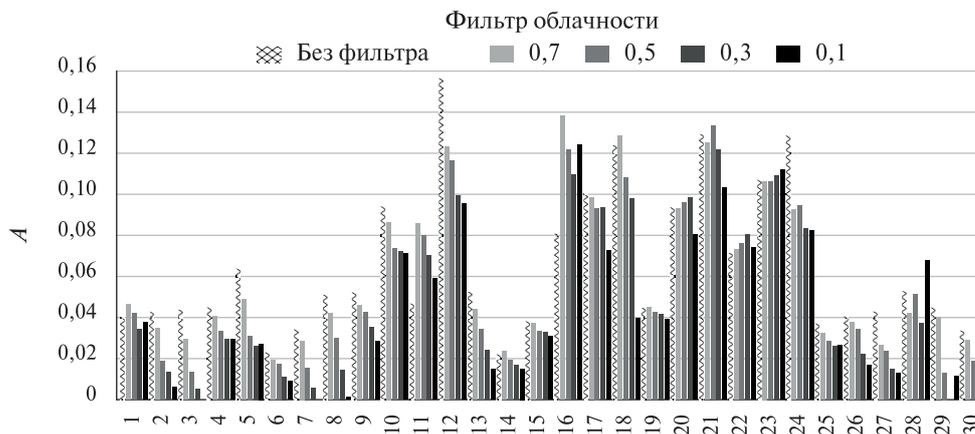


Рис. 3. Свободный член линейной регрессии A для синхронных пар дневных измерений АОТ MODIS/Terra и AERONET L1.5

Для 10 станций величина A в целом невелика и варьирует в среднем от 0,046 при $CF \leq 1,0$ до 0,028 при $CF \leq 0,5$ и до 0,015 при $CF \leq 0,1$. Для трёх станций группы 1 (Dushanbe, Капруг, XiangHe), которые также характеризуются явным проявлением эффекта уменьшения модуля A , значения данного параметра оказались в 2–3 раза больше, чем на остальных станциях, и изменяются в среднем от 0,099 при $CF \leq 1,0$ до 0,089 при $CF \leq 0,5$ и до 0,075 при $CF \leq 0,1$ (см. рис. 3).

Для станций второй группы, расположенных в прибрежных зонах тропического и субтропического пояса, эффект уменьшения параметра A явно выражен на одной из пяти станций (Hong_Kong_Sheung): значения A для данного пункта варьировали от 0,124 при $CF \leq 1,0$ до 0,108 при $CF \leq 0,5$ и до 0,039 при $CF \leq 0,1$ (см. рис. 3).

Ещё на трёх станциях данной группы (Rome-Tor Vergata, Athens-NOA и Hong_Kong_PolyU) проявление рассматриваемого эффекта было менее явным: параметр A в среднем флуктуировал в диапазоне близких значений от 0,050 при $CF \leq 1,0$ до 0,048 при $CF \leq 0,5$ и до 0,040 при $CF \leq 0,1$.

Эффект уменьшения параметра A при уменьшении степени облачности не выявлен только на одной станции второй группы (NGHIA_DO): значения A составили 0,081 при $CF \leq 1,0$; 0,122 при $CF \leq 0,5$ и 0,124 при $CF \leq 0,1$.

Среди станций, расположенных в пустынных районах (третья группа), наиболее значительное уменьшение величины свободного члена линейной регрессии было отмечено в трёх пунктах (Dalanzadgad, Cairo_EMA_2 и Lahore). Для пункта Dalanzadgad параметр A оказался в среднем в 2–3 раза меньше, чем для двух остальных станций (см. рис. 3), и варьировал от 0,037 при $CF \leq 1,0$ до 0,028 при $CF \leq 0,5$ и до 0,024 при $CF \leq 0,1$. Для пунктов Cairo_EMA_2 и Lahore значения A изменялись в диапазоне от 0,129 при $CF \leq 1,0$ до 0,114 при $CF \leq 0,5$ и до 0,093 при $CF \leq 0,1$.

Неявное проявление эффекта, выраженное во флуктуации параметра A в диапазоне близких величин, было отмечено для станций Tunis_Carthage и Medenine_IRA. Для первой из них вариации рассматриваемого параметра составляли от 0,044 при $CF \leq 1,0$ до 0,042 при $CF \leq 0,5$ и до 0,040 при $CF \leq 0,1$.

Остальные три станции, расположенные в пустынных областях, характеризовались отсутствием рассматриваемого эффекта: вариации A для них варьировали в среднем от 0,091 при $CF \leq 1,0$ до 0,093 при $CF \leq 0,5$ и до 0,095 при $CF \leq 0,1$.

Станции четвёртой группы из высокоширотных районов в основном характеризовались улучшением значений параметра A при уменьшении степени облачности (см. рис. 3). Исключение составляет только пункт Hornsund: для него в диапазоне $0,8 < CF \leq 1,0$ отмечено сначала улучшение (спад) величины A от 0,053 при $CF \leq 1,0$ до 0,034 при $CF \leq 0,8$, а затем рост до 0,058 при $CF \leq 0,2$. Для остальных четырёх станций данной группы наблюдалось значительное уменьшение A : средние значения варьировали от 0,040 при $CF \leq 1,0$ до 0,022 при $CF \leq 0,5$ и до 0,011 при $CF \leq 0,1$ (см. рис. 3).

В табл. 2 показана реакция всех трёх параметров линейной регрессии на балльность облачности.

Таблица 2. Изменение параметров корреляции синхронных рядов наблюдений АОТ MODIS/Terra и AERONET L1.5 при проведении фильтрации по переменной CF. Символ «+» обозначает явное проявление эффекта; «±» — незначительное его проявление; «-» — отсутствие

№	Название станции	Корреляционный параметр		
		A	K	R
<i>Группа 1</i>				
1	Paris	+	-	±
2	Brussels*	+	+	+
3	Hamburg*	+	+	+
4	Munich_University*	+	+	+
5	Leipzig	+	±	+
6	Helsinki*	+	+	+
7	Toravere	+	±	+
8	Minsk*	+	+	+
9	Peterhof	+	-	±
10	Dushanbe	+	±	+
11	Kanpur*	+	+	+
12	XiangHe	+	-	±
13	Osaka*	+	+	+
<i>Группа 2</i>				
14	Rome-Tor Vergata	±	-	+
15	Athens-NOA	±	-	±
16	NGHIA_DO	-	-	±
17	Hong_Kong_Sheung	+	±	±
18	Hong_Kong_PolyU	±	-	±
<i>Группа 3</i>				
19	Tunis_Carthage	±	-	-
20	Medenine_IRA	±	+	-
21	Cairo_EMA_2	+	+	±
22	Weizmann_Institute	-	-	-
23	Eilat	±	-	-
24	Lahore	+	+	-
25	Dalanzadgad	+	-	+

№	Название станции	Корреляционный параметр		
		<i>A</i>	<i>K</i>	<i>R</i>
<i>Группа 4</i>				
26	Thule	±	+	+
27	Ny_Alesund_AWI	+	–	+
28	Hornsund**	–	–	–
29	Matorova_FMI	+	±	+
30	Sodankyla*	+	+	+

Примечание: На станциях, отмеченных символом *, проявляется эффект улучшения всех трёх исследуемых параметров при уменьшении балла облачности; для пункта Hornsund, обозначенного символом **, эффект улучшения всех трёх корреляционных характеристик наблюдается только до величины $CF \leq 0,8$; при дальнейшей фильтрации с уменьшением значений CF эффект отсутствует или происходит ухудшение корреляционных характеристик.

Установлено, что эффект улучшения параметров линейной регрессии (R , K , A) наиболее явным образом проявляется для станций, расположенных в континентальной зоне умеренного пояса; так, положительные измерения всех трёх рассматриваемых параметров отмечены на 7 из 13 станций первой группы. Кроме того, аналогичное улучшение наблюдается для высокоширотной станции Sodankyla.

Отмечается заметное сокращение числа синхронных пар спутниковых и наземных измерений при уменьшении степени облачности (в среднем по всем 30 станциям при значении $CF \leq 0,1$ остаётся только 30 % от первоначального количества данных). Наиболее явное сокращение числа пар синхронных наблюдений выявлено для четвёртой группы станций, расположенных в высокоширотных областях (при значении $CF \leq 0,1$ в среднем остаётся только 8 % от первоначального количества данных). Наименее же заметное сокращение количества данных отмечается для третьей группы станций, находящихся в пустынных районах (при значении $CF \leq 0,1$ в среднем остаётся 51 % от первоначального количества данных). Такое неодинаковое сокращение числа синхронных пар измерений, вероятно, связано с метеорологическими особенностями рассматриваемых регионов.

Обобщая полученные результаты отметим, что для улучшения качества данных MODIS/Terra (по АОТ) над континентальными районами предпочтительнее выглядит фильтрация по облачности $CF \leq 0,5$, в целом значительно увеличивающая репрезентативность спутниковых измерений АОТ 3-го уровня и при этом незначительно уменьшающая количество экспериментальной информации (на большинстве станций остаётся до 70–80 % от общего количества нефильтрованных данных).

Выводы

Проведено сопоставление синхронных рядов измерений АОТ спутникового спектрометра MODIS/Terra и спектрофотометров наземной сети AERONET с применением фильтрации по баллу облачности CF с шагом 0,1. Проанализированы данные 30 станций наземной сети наблюдений, расположенных в разных климатических и географических зонах. Практически для всех исследуемых пунктов при уменьшении балла облачности выявлен эффект улучшения параметров линейной регрессии: коэффициента корреляции R , коэффициента наклона K и величины свободного члена A .

Наиболее значимое проявление эффекта улучшения параметров линейной регрессии отмечено для станций AERONET, расположенных в континентальном районе умеренного пояса. При этом особо заметная реакция на уменьшение облачности проявилась в значениях коэффициента корреляции R . Так, выявлено значительное улучшение R на 10 из 13 станций

этой группы; в среднем R увеличился с 0,79 (для нефилтрованных данных, $CF \leq 1,0$) до 0,84 для $CF \leq 0,5$ и до 0,88 при $CF \leq 0,1$. В целом рост параметра R отмечен для 24 из 30 станций AERONET.

Приближение коэффициента наклона K к единице при сокращении балла облачности отмечено на 17 из 30 станций, а эффект уменьшения величины свободного члена A — для 27 из 30 станций.

Значимое улучшение всех трёх параметров линейной регрессии установлено на 8 из 30 станций AERONET, 7 из которых располагаются в континентальных районах умеренного пояса, 1 — в высокоширотной области.

Несмотря на значительное улучшение качества данных при применении фильтрации по облачности, остаётся проблема заметного сокращения количества данных (в среднем при $CF \leq 0,1$ остаётся только 30 % от первоначального количества данных).

Таким образом, для улучшения качества данных MODIS/Terra (по АОТ) над континентальными районами наиболее целесообразно использовать фильтрацию по облачности $CF \leq 0,5$, что, с одной стороны, увеличивает репрезентативность измерений MODIS АОТ, с другой — незначительно сокращает количество экспериментальной информации (до 70–80 % от общего количества нефилтрованных данных).

Отметим, что в пустынных регионах метод фильтрации по облачности проявил себя нейтрально, что связано с известными трудностями спутникового аэрозольного мониторинга в этих областях. Незначительное проявление эффекта установлено для станций тропических и субтропических широт, где, по сравнению с умеренным поясом, довольно много солнечных дней, в то время как на прибрежных станциях велико влияние водной поверхности, входящей в область усреднения данных MODIS.

На большей части станций этих районов при сокращении степени облачности наблюдается улучшение корреляционных параметров (в особенности A и R), но при этом, в силу метеорологических особенностей, в двух пунктах из пяти заметно сокращается число измерительных дней с синхронными парами спутниковых и наземных измерений.

Пока нельзя сделать однозначный вывод об универсальной рекомендации относительно параметров фильтрации по баллу облачности CF для всех рассмотренных географических районов. В этом направлении требуются дальнейшие исследования.

Подобный анализ влияния облачности на измерения АОТ на базе спутникового спектрометра MODIS/Terra проведён впервые. В дальнейшем планируется продолжение работы за счёт расширения перечня станций AERONET с целью охвата более широкого спектра географических и климатических условий и разработки соответствующей классификации и рекомендаций по фильтрации измерений MODIS.

Авторы благодарны коллективам AERONET и MODIS за возможность использования измерительных данных. Для измерений на станции Петергоф использовалось оборудование ресурсного центра «Геомодель» Научного парка СПбГУ. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-77-31009.

Литература

1. *Жданова Е. Ю., Чубарова Н. Е.* Пространственная изменчивость аэрозольной оптической толщины на территории Московского региона по спутниковым и наземным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 236–248. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-236-248.
2. *Плахина И. Н., Панкратова Н. В., Махоткина Е. Л.* Сравнение данных наземного и спутникового мониторинга аэрозольной оптической толщины атмосферы для территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 225–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-225-234.
3. *Ракитин В. С., Казаков А. В., Еланский Н. Ф., Кириллова Н. С., Федорова Е. И.* Программа для визуализации и анализа орбитальной информации о составе атмосферы: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025619712. Рег. 17.04.2025.

4. *Almazroui M.* A comparison study between AOD data from MODIS deep blue collections 51 and 06 and from AERONET over Saudi Arabia // *Atmospheric Research*. 2019. V. 225. P. 88–95. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.03.040.
5. *Bright J. M., Gueymard C. A.* Climate-specific and global validation of MODIS Aqua and Terra aerosol optical depth at 452 AERONET stations // *Solar Energy*. 2019. V. 183. P. 594–605. DOI: 10.1016/j.solener.2019.03.043.
6. *Charlson R. J., Schwartz S. E., Hales J. M. et al.* Climate forcing by anthropogenic aerosols // *Science*. 1992. V. 255. P. 423–430. DOI: 10.1126/science.255.5043.423.
7. *Chu D., Kaufman Y., Zibordi G. et al.* Global monitoring of air pollution over land from Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2003. V. 108. No. D21. Article 4661. DOI: 10.1029/2002JD003179.
8. *Cipoli Y. A., Furst L., Feliciano M. et al.* Respiratory deposition dose of PM_{2.5} and PM₁₀ during night and day periods at an urban environment // *Air Quality, Atmosphere and Health*. 2023. V. 16. P. 2269–2283. DOI: 10.1007/s11869-023-01405-1.
9. *Dubovik O., Holben B., Eck T. F. et al.* Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // *J. Atmospheric Sciences*. 2002. V. 59. No. 3. P. 590–608. DOI: 10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2.
10. *Eck T. F., Holben B. N., Reid J. S. et al.* Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 1999. V. 104. No. D24. P. 31333–31349. DOI: 10.1029/1999JD900923.
11. *Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Cairns B. et al.* Past, present, and future of global aerosol climatologies derived from satellite observations: A perspective // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2007. V. 106. No. 1–3. P. 325–347. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2007.01.007.
12. *Rakitin V. S., Kazakov A. V., Elansky N. F.* Multifunctional software of the OIAP RAS for processing and analysis of orbital data on the atmospheric composition: tasks, possibilities, application results, and ways of development // *Proc. SPIE*. 29th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2023. V. 12780. Article 127805T. DOI: 10.1117/12.2690561.
13. *Remer L. A., Kaufman Y. J., Tanré D. et al.* The MODIS aerosol algorithm, products and validation // *J. Atmospheric Sciences*. 2005. V. 62. No. 4. P. 947–973. DOI: 10.1175/JAS3385.1.
14. *Seip K. L., Grøn Ø., Wang H.* Identifying climate variables that interchange with volcanic eruptions as cooling forces during the Common Era's ice ages // *EGUsphere: Preprint*. 2024. 28 p. DOI: 10.5194/egusphere-2024-1874.
15. *Wang Q., Sun L., Wei J. et al.* Validation and accuracy analysis of global MODIS aerosol products over land // *Atmosphere*. 2017. V. 8. No. 8. Article 155. DOI: 10.3390/atmos8080155.
16. *Wei J., Sun L., Peng Y. et al.* An improved high-spatial-resolution aerosol retrieval algorithm for MODIS images over land // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2018. V. 123. No. 21. P. 12291–12307. DOI: 10.1029/2017JD027795.
17. *Wei J., Li Z., Peng Y., Sun L.* MODIS Collection 6.1 aerosol optical depth products over land and ocean: validation and comparison // *Atmospheric Environment*. 2019. V. 201. P. 428–440. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.12.004.

Effect of cloudiness on the correspondence characteristics between MODIS/Terra measurements and AERONET observations of aerosol optical thickness of the atmosphere

A. E. Belov, N. V. Pankratova, V. S. Rakitin, J. V. Kiseleva

*A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: y.beloff2013@yandex.ru*

The paper analyzes and compares the data of atmospheric aerosol optical thickness measurements by the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) satellite spectrometer, Collection 6.1, Dark Target Deep Blue Combined Mean parameter for a wavelength of 550 nm, and 30 ground-based spectrophotometers of the AERONET network, measurement level 1.5 (Aerosol RObotic NETwork,

L1.5), located in different climatic and geographical zones. These locations were divided into 4 conditional groups: 1 — continental stations of mid-latitudes; 2 — tropical and subtropical stations located in coastal areas; 3 — stations located in desert areas; 4 — high-latitude stations. The correlation parameters of ground-based and satellite data were calculated depending on the cloudiness parameters (Cloud Fraction Day Mean variable) determined from MODIS measurements. A comparison of synchronous MODIS and AERONET datasets revealed a dependence of the correlation between orbital data and ground-based measurements on cloud cover parameters. Decreased cloud cover at the time of measurement leads to improved correlation parameters. The degree of this effect varies at different stations. It is most pronounced for stations located in continental temperate regions. It is the weakest in the desert regions.

Keywords: aerosol, atmospheric remote sensing, validation, aerosol optical depth, MODIS, AERONET

Accepted: 05.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-349-362

References

1. Zhdanova E. Yu., Chubarova N. Ye., Spatial variability of aerosol optical thickness on the territory of Moscow and Moscow Region by satellite and ground based data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 7, pp. 236–248, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-236-248 (in Russian).
2. Plakhina I. N., Pankratova N. V., Makhotkina E. L., Comparison of ground and satellite monitoring of aerosol optical thickness of the atmosphere in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 2, pp. 225–234, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-225-234 (in Russian).
3. Rakitin V. S., Kazakov A. V., Elansky N. F., Kirillova N. S., Fedorova E. I., *Programma dlya vizualizatsii i analiza orbital'noi informatsii o sostave atmosfery* (Program for visualization and analysis of orbital information on the composition of the atmosphere), Certificate of state registration of software No. 2025619712 (RU), Reg. 17.04.2025 (in Russian).
4. Almazroui M., A comparison study between AOD data from MODIS deep blue collections 51 and 06 and from AERONET over Saudi Arabia, *Atmospheric Research*, 2019, V. 225, pp. 88–95, DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.03.040.
5. Bright J. M., Gueymard C. A., Climate-specific and global validation of MODIS Aqua and Terra aerosol optical depth at 452 AERONET stations, *Solar Energy*, 2019, V. 183, pp. 594–605, DOI: 10.1016/j.solener.2019.03.043.
6. Charlson R. J., Schwartz S. E., Hales J. M. et al., Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, 1992, V. 255, pp. 423–430, DOI: 10.1126/science.255.5043.423.
7. Chu D., Kaufman Y., Zibordi G. et al., Global monitoring of air pollution over land from Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, V. 108, No. D21, Article 4661, DOI: 10.1029/2002JD003179.
8. Cipoli Y. A., Furst L., Feliciano M. et al., Respiratory deposition dose of PM_{2.5} and PM₁₀ during night and day periods at an urban environment, *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2023, V. 16, pp. 2269–2283, DOI: 10.1007/s11869-023-01405-1.
9. Dubovik O., Holben B., Eck T. F. et al., Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *J. Atmospheric Sciences*, 2002, V. 59, No. 3, pp. 590–608, DOI: 10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAOP>2.0.CO;2.
10. Eck T. F., Holben B. N., Reid J. S. et al., Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, V. 104, No. D24, pp. 31333–31349, DOI: 10.1029/1999JD900923.
11. Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Cairns B. et al., Past, present, and future of global aerosol climatologies derived from satellite observations: A perspective, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, V. 106, No. 1–3, pp. 325–347, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2007.01.007.
12. Rakitin V. S., Kazakov A. V., Elansky N. F., Multifunctional software of the OIAP RAS for processing and analysis of orbital data on the atmospheric composition: tasks, possibilities, application results, and ways of development, *Proc. SPIE. 29th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2023, V. 12780, Article 127805T, DOI: 10.1117/12.2690561.
13. Remer L. A., Kaufman Y. J., Tanré D. et al., The MODIS aerosol algorithm, products and validation, *J. Atmospheric Sciences*, 2005, V. 62, No. 4, pp. 947–973, DOI: 10.1175/JAS3385.1.

14. Seip K. L., Grøn Ø., Wang H., Identifying climate variables that interchange with volcanic eruptions as cooling forces during the Common Era's ice ages, *EGUsphere: Preprint*, 2024, 28 p., DOI: 10.5194/egusphere-2024-1874.
15. Wang Q., Sun L., Wei J. et al., Validation and accuracy analysis of global MODIS aerosol products over land, *Atmosphere*, 2017, V. 8, No. 8, Article 155, DOI: 10.3390/atmos8080155.
16. Wei J., Sun L., Peng Y. et al., An improved high-spatial-resolution aerosol retrieval algorithm for MODIS images over land, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, V. 123, No. 21, pp. 12291–12307, DOI: 10.1029/2017JD027795.
17. Wei J., Li Z., Peng Y., Sun L., MODIS Collection 6.1 aerosol optical depth products over land and ocean: validation and comparison, *Atmospheric Environment*, 2019, V. 201, pp. 428–440, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.12.004.