

ФИЗИКА ИЛИМДЕРИ
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ
PHYSICS

Свердлик Л.Г.

**БОРБОРДУК АЗИЯДАГЫ АТМОСФЕРАЛЫК АЭРОЗОЛДУН ОПТИКАЛЫК
ӨЗГӨЧӨЛҮКТӨРҮНҮН ЖЫЛ АРАЛЫК ЖАНА МЕЗГИЛДИК ӨЗГӨРҮҮЛӨРҮНҮН
СПУТНИКТИК МОНИТОРИНГИ**

Свердлик Л.Г.

**СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ МЕЖГОДОВОЙ И СЕЗОННОЙ
ИЗМЕНЧИВОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ В
ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ**

L.G. Sverdlík

**SATELLITE MONITORING OF INTERANNUAL AND SEASONAL VARIABILITY OF
ATMOSPHERIC AEROSOL OPTICAL PROPERTIES IN CENTRAL ASIA**

УДК: 551.509.68; 551.510.42

2002-2014 жылдардагы Борбордук Азиянын региондорундагы аэрозолдук оптикалык жоондук жана Ангстрем көрсөткүчүнүн жылдык жана мезгилдик өзгөрүүлөрүнүн спутниктик өлчөөлөрүнүн (MODIS/Terra) натыйжалары көрсөтүлдү. Атмосфералык аэрозолдун параметрлеринин мейкиндиктеги бөлүштүрүлүшүнө болгон Азия чаңынын эмиссиясынын жана жер топографиясынын таасири көрсөтүлгөн.

***Негизги сөздөр:** спутниктик ченөөлөр, аэрозолдук оптикалык жоондук, Ангстрем көрсөткүчү, мейкиндиктик өзгөрүүлөр, топография, Азия чаңы.*

Представлены результаты спутниковых измерений (MODIS/Terra) межгодовой и сезонной изменчивости аэрозольной оптической толщи и показателя Ангстрема в регионах Центральной Азии в 2002–2014 годах. Приведены оценки влияния топографии местности и эмиссии Азиатской пыли на пространственное распределение параметров атмосферного аэрозоля.

***Ключевые слова:** аэрозоль, спутниковые измерения, оптическая толщина, показатель Ангстрема, пространственная изменчивость, топография, Азиатская пыль.*

Results of satellite (MODIS/Terra) measurements of inter-annual and inter-seasonal variability of aerosol optical depth and Angstrom exponent in regions of Central Asia in 2002-2014 are presented. Estimations of influence of terrain topography and Asian dust emissions on spatial distribution of atmospheric aerosol parameters are also presented.

***Key words:** aerosol, satellite measurements, optical depth, Angstrom exponent, spatial variability, topography, Asian dust.*

Введение

Климатические эффекты атмосферного аэрозоля, как результат взаимодействия различных его компонентов с солнечной радиацией, привлекают серьезное внимание и активно обсуждаются во многих публикациях [1, 2]. В то же время, взвешенные в атмосфере частицы аэрозоля являются одним из основных загрязнителей, определяющим качество воздуха и оказывающим негативное воздействие на здоровье людей [3, 4]. Для решения задач, связанных

с проблемами изменения климата и экологии, необходима информация о трансформации во времени оптических и микрофизических характеристик аэрозоля [5]. При этом важным условием снижения неопределенности является знание пространственной изменчивости состава и нагрузки аэрозоля.

Центрально-Азиатский регион представляет интерес вследствие географического расположения относительно наиболее крупных источников минеральной пыли [6], антропогенного загрязнения и продуктов горения, образующихся при лесных пожарах [7]. Однако, к настоящему времени регион остается недостаточно исследованным. Данные немногочисленных наземных измерительных участков не способны обеспечить полную характеристику пространственно-временного распределения физических свойств аэрозолей в Центральной Азии, поэтому в настоящей работе были использованы возможности современных спутниковых технологий и глобальных моделей. Такой подход позволил исследовать особенности многолетней и сезонной изменчивости аэрозольного загрязнения отдельных регионов с оценками степени влияния топографии местности и выносов Азиатской пыли.

Регион исследования и используемые данные

Результаты многолетних спутниковых наблюдений показали сильные региональные различия распределения параметров аэрозоля в области, ограниченной координатами 38.5–44.5 °N и 68.5–81.5 °E по широте и долготе, соответственно, которая включает всю территорию Кыргызстана [4, 8]. Чтобы обеспечить более детальное описание свойств аэрозоля в этой области, были выделены 11 участков (табл.1), семь из которых расположены в Кыргызстане, а также по одному в Казахстане (Алматы) и Таджикистане (Душанбе). С целью изучения степени влияния песчаных бурь на пространственное распределение AOD использовались также данные участка в пустыне Такла-Макан.

Таблица 1. Символическое обозначение участков и координаты их центров

Site	Sym	Lat.	Long.
		(°N)	(°E)
Taklamakan	TM	41.5	79.5
Issyk-Kul	IK	42.5	77.5
Djalal-Abad	DA	41.5	73.5
Bishkek	BI	42.5	74.5
Almaty	AL	43.5	76.5

Site	Sym	Lat.	Long.
		(°N)	(°E)
Naryn	NA	41.5	76.5
Talas	TA	42.5	72.5
Batken	BA	40.5	70.5
Osh	OS	40.5	72.5
Dushanbe	DU	38.5	68.5

Для выделенных участков на основе данных MODIS уровня M3 (MOD08_M3.051 product, MODIS Terra Level-3 Data) [9] были построены временные ряды среднегодовых значений аэрозольной оптической толщи на длине волны 550 нм (AOD) и показателя Ангстрема (AE) для длин волн $\lambda_1=470$ нм и $\lambda_2=660$ нм. Эти параметры характеризуют общее содержание и дисперсный состав аэрозоля в атмосфере, соответственно. При интерпретации результатов спутниковых измерений было принято условие однородности характеристик аэрозольной составляющей атмосферы в пределах прямоугольных участков размером $1^\circ \times 1$. Анализ временных рядов AOD и AE в исследуемой области охватывает период с 2002 по 2014 годы. Результаты измерения параметров атмосферы на большей части участков не обнаруживало значительных различий в последние годы (2012–2014 гг.), поэтому с целью изучения сезонной изменчивости свойств аэрозоля были проанализированы спутниковые данные 2012 года.

Карты пространственного распределения аэрозольного индекса (UV Aerosol Index, AI) были получены прибором OMI (Ozone Monitoring Instrument) спутника Aura [9]. Вычисления AI_{UV} производились по измеренной и рассчитанной для Рэлеевского рассеяния ультрафиолетовой радиации I

(354 нм) и коэффициенту отражения поверхности R^* (354) [10]:

$$AI_{UV} = -100 \times \log_{10} \left[\frac{I_{354}^{obs}}{I_{354}^{calc}(R_{354}^*)} \right]$$

Анализ полученных результатов Многолетняя изменчивость MODIS AOD и AE

Как было показано в работе [4], самые низкие среднегодовые значения $0.15 \leq AOD \leq 0.25$ наблюдались на северных участках (TA, BI, AL) и несколько более высокая аэрозольная нагрузка ($AOD=0.25-0.30$) зарегистрирована в регионах, расположенных на северо-востоке и в западной части области (IK, NA, DA). Наиболее загрязненными аэрозольными частицами участками являлись OS, BA и DU ($AOD=0.3-0.5$). Усредненная за период с 2002 по 2014 годы карта пространственного распределения аэрозольной оптической толщи показана на рис. 1. Выявленную в исследуемой области отрицательную годовую динамику MODIS AOD можно оценить величинами, изменяющимися от -0.0029 (-0.84%) на участке OS до -0.0065 (-3.16%) на участке IK [4].

Time Averaged Map of Aerosol Optical Thickness at 0.55 microns for both Ocean (best) and Land (corrected): Mean of Daily Mean monthly 1 deg. [MODIS-Terra MOD08_M3 v8] over 2002-Jan - 2014-Dec, Region 68E, 38N, 81E, 45N

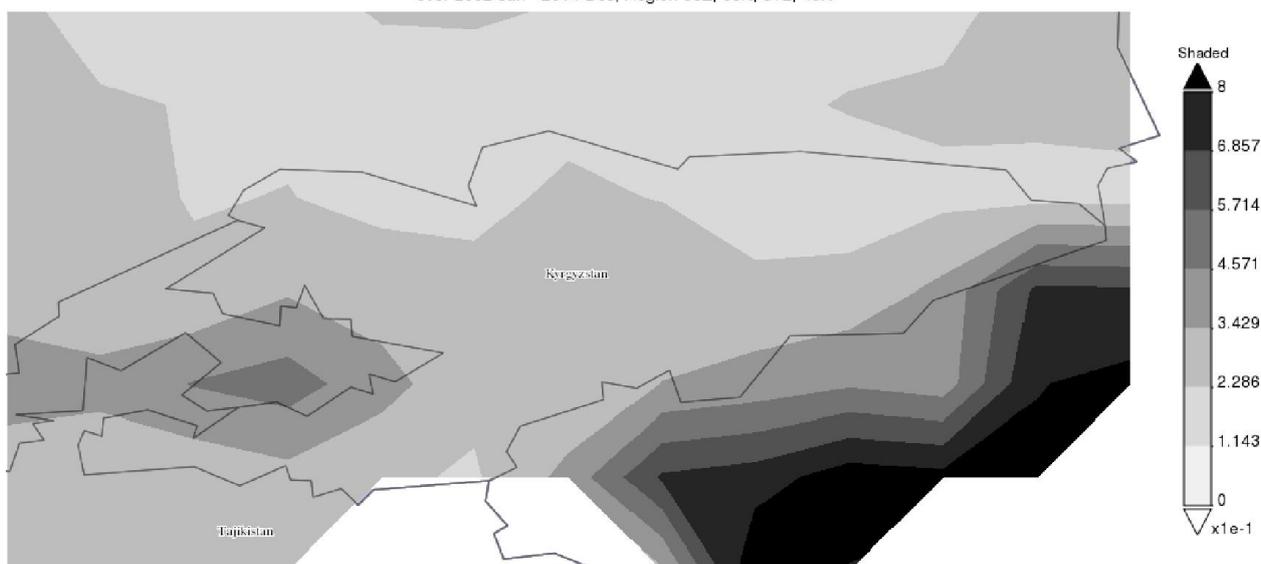


Рис. 1. Усредненная за период с 2002 по 2014 годы карта пространственного распределения аэрозольной оптической толщи (550 нм)

Значения показателя Ангстрема на участках варьировали в пределах от 0.5 до 1.2, что соответствует данным, характеризующим пылевой ($AE < 0.7$) и смешанный аэрозоль ($0.7 < AE < 1.2$), состоящий из крупных частиц пыли и тонкодисперсных частиц продуктов сгорания биомассы, сульфатов или городского загрязнения [7]. Анализ долгосрочных тенденций пространственного распределения показателя Ангстрема свидетельствует о некотором уменьшении содержания крупных частиц в атмосфере, в большей степени над северными и северо-восточными участками (IK, BI, AL), где положительный тренд AE составлял 0.75–0.87% в год. Напротив, исключительно низкий тренд AE (0.001%) наблюдался на участке DA.

Таким образом, анализ спутниковых данных (2002–2014 гг.) показал отсутствие согласованного изменения характеристик аэрозоля на участках, но при этом наличие явной тенденции уменьшения общего содержания аэрозоля над всей областью исследования (–1.66%). В тоже время на всех

участках обнаруживается небольшой, в пределах 1% в год, рост AE , что наиболее вероятно может быть обусловлено естественными природными процессами. Таким, например, как уменьшение эмиссии пылевого аэрозоля из пустыни Такла-Макан и изменчивость общей циркуляции атмосферы, проявляющаяся в перестройке (повторяемости и интенсивности) зональной компоненты на меридиональную составляющую [4]. И, как следствие, снижением запыленности атмосферы в области.

Сезонные вариации пространственного распределения AOD и AE

Данные о пространственном распределении значений $MODIS AOD$ и AE позволили оценить не только тенденции, степень и масштаб загрязнения различных областей, но также проследить эволюцию оптических характеристик атмосферного аэрозоля в годовом цикле. Временные ряды среднемесячных значений $MODIS AOD$ и AE в каждом из выбранных участков в 2012 г. приведены на рис. 2.

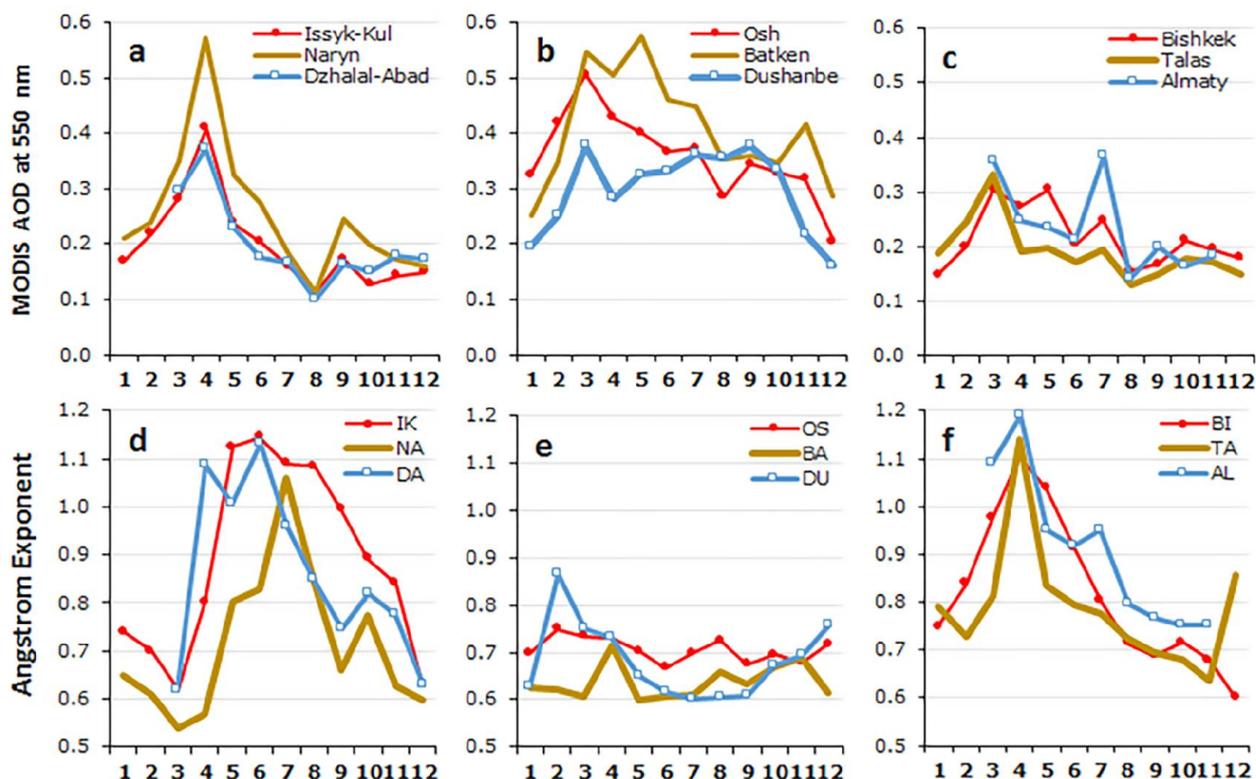


Рис. 2. Годовой ход среднемесячных значений AOD_{550} (a, b, c) и $AE_{470/660}$ (d, e, f) в различных регионах исследуемой области (2012 г.)

Анализ спутниковых данных выявил следующие особенности пространственного распределения $MODIS AOD$ и AE . Вариации аэрозольной оптической толщи характеризовались высокими значениями в весенние и летние месяцы и низкими уровнями зимой. Наиболее сильные сезонные изменения AOD наблюдались на участках OS, BA и NA, где значения AOD в весенний период превышали в 2–3 раза данные, полученные в холодные месяцы (декабрь и январь). Весенний максимум AOD на участках IK,

NA и DA сопровождался уменьшением уровней AE (0.5–0.7) вследствие преобладания в атмосфере крупнодисперсного пылевого аэрозоля. Наиболее высокая доля частиц тонкой фракции ($AE > 1.0$) в период с мая по сентябрь на участке IK была, вероятно, обусловлена влиянием дыма лесных пожаров в России [7]. На участках NA, BI и AL это воздействие было ограничено более коротким периодом времени (июнь–июль). В юго-западных регионах (OS, BA и DU) средние значения параметра

Ангстрема изменялись незначительно (0.60–0.75) на протяжении всего годового цикла, в то время как уровни *AOD* существенно различались (0.2–0.6). Причем значения *AE* были существенно более низкими, чем на других участках, предполагая отсутствие крупных антропогенных источников загрязнения в этих районах и доминирование источников крупнодисперсных аэрозольных частиц. Наибольшие значения аэрозольной оптической толщи (*AOD* > 0.3) наблюдались весной в условиях повышения концентраций пылевого аэрозоля и характеризовались низкими значениями показателя Ангстрема (*AE* < 0.8). Основной вклад в изменения *AOD* на северных участках (BI, TA, AL) весной вносили источники антропогенного аэрозоля (*AE* ≥ 1.1), включая эмиссию от техногенных выбросов в крупных

городах Бишкек и Алматы, а влияние пылевого аэрозоля было слабо выраженным.

Спутниковые дистанционные измерения параметров атмосферы позволили также оценить пространственный масштаб аэрозольного загрязнения и его эволюцию во времени. Последствия адвективного переноса Азиатской пыли и дымового аэрозоля, образованного в результате интенсивных и продолжительных лесных пожаров в России, иллюстрируют карты пространственного распределения аэрозольного индекса атмосферы (*AI*), полученные прибором *OMI/Aura*. Этот параметр чувствителен к присутствию в атмосфере поглощающих аэрозольных частиц [10]. На рис. 3 представлены региональные распределения *AI*, осредненные в периоды наиболее сильного воздействия Азиатской пыли (24–25 апреля) и лесных пожаров (03–08 июля 2012).

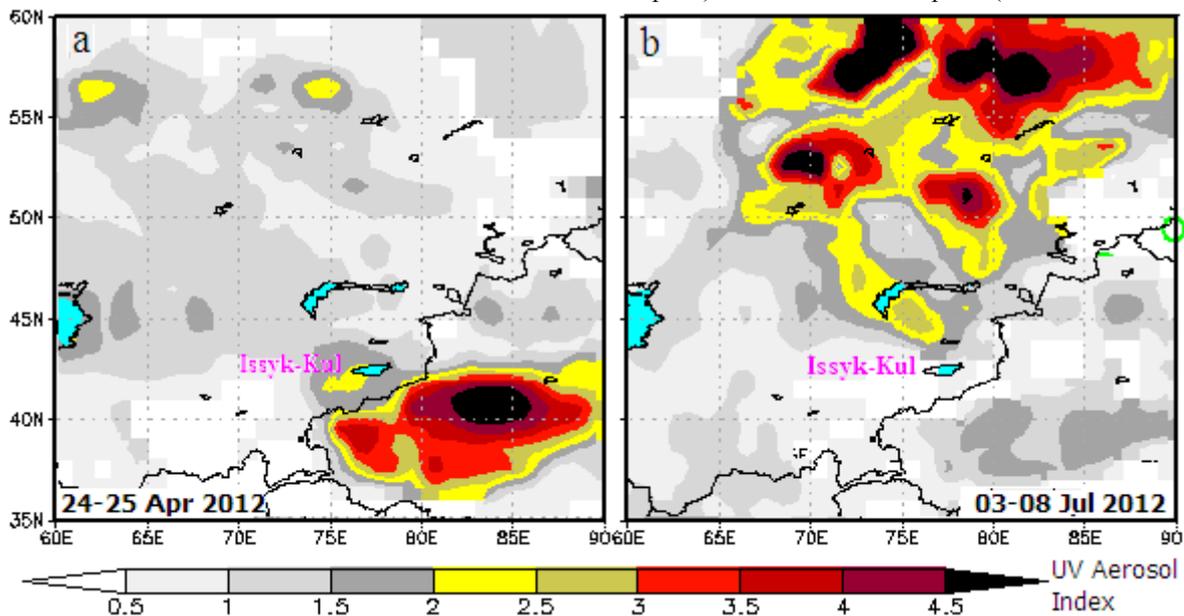


Рис. 3. Карты распределения аэрозольного индекса атмосферы (*AI*) по данным спутника *Aura* (*OMI*) для событий: а – Азиатской пыли (24-25 апреля 2012); б – дыма лесных пожаров в России (03–08 июля 2012)

Влияние топографии местности на пространственное распределение аэрозоля

Полученные в последние годы данные [11] позволяют предположить, что топография местности существенно влияет на пространственное распределение *AOD* и *AE*. Особое значение это имеет для исследуемой области с ее сложным строением рельефа. Предполагая, что вертикальное распределение коэффициента ослабления (β_0) в различных регионах является подобным и подчиняется экспоненциальному закону, оптическая толщина от уровня *Z* до верхней границы атмосферы может быть определена, как:

$$\tau_z = \int_z^{\infty} \beta_0 \exp(-z/H) dz = H\beta_0 \exp(-z/H) = \tau_0 \exp(-z/H)$$

где τ_0 и τ_z представляют собой значения *AOD*, измеренные на поверхности и на высоте *Z*, соответственно. Высотное распределение аэрозоля (*H*) для каждой области может быть получено с использованием спутниковых и модельных технологий.

Основываясь на данных радиометра теплового излучения и отражения (*ASTER/Terra*) и цифровой модели рельефа (*DEM*) [12] было определено, что средние высоты территорий выделенных участков (*H*) располагаются на уровнях от 0.89 ± 0.52 км (AL) до 3.28 ± 0.47 км (NA) (см. Табл. 2). Представленные на рис. 4 соотношения между среднегодовыми значениями *AOD* и высотами местности, показали наличие значительной обратной корреляции между ними ($R^2=0.78$).

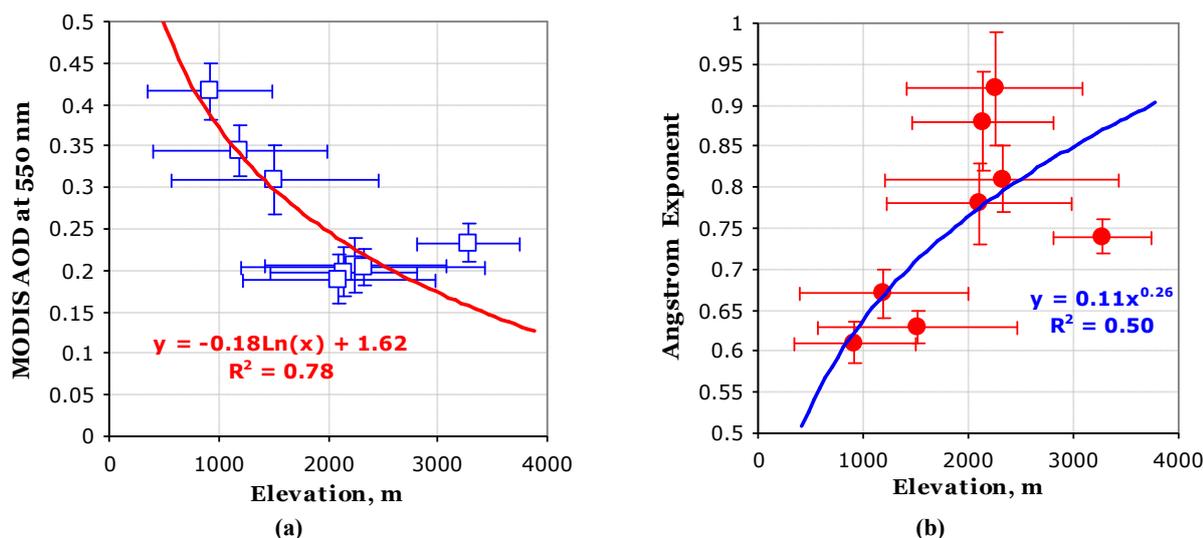


Рис. 4. Зависимости между средними высотами участков и оптическими параметрами аэрозоля: AOD (a) и AE (b)

В тоже время найдена положительная корреляция ($R^2=0.50$) между H и AE , свидетельствующая, что в горных регионах доминируют аэрозольные частицы более тонкодисперсной фракции. Соотношения между средними высотами участков и оптическими параметрами аэрозоля могут быть аппроксимированы логарифмической зависимостью для AOD ($AOD = -0.18 \times \ln(H) + 1.62$) и степенной для AE ($AE = 0.11 \times H^{0.26}$).

Оценка степени влияния выносов Азиатской пыли

Поднятая в атмосферу Азиатская пыль преимущественно переносится на восток, достигая Тихого океана и иногда побережья Северной Америки [3], но значительная ее часть распространяется в западном и северо-западном направлении, затрагивая значительную территорию Кыргызстана, при этом максимальная нагрузка пылевого аэрозоля сконцентрирована, как правило, в восточной части республики [2, 4]. Именно в направлении участков ИК, НА и ДА, как правило, происходили вторжения Азиатской пыли. Даже при том, что расстояние между пустыней Такла-Макан (ТМ) и областью ДА составляет более 500 км, наблюдалась тесная корреляционная связь измеренных значений AOD_{TM} и AOD_{DA} на всем временном интервале исследований.

Очевидная синхронность поведения AOD на этих трех участках подтверждает идентичность основного источника эмиссии пылевого аэрозоля (Таблица 2). Анализ распределения характеристик аэрозоля в регионах, направленный на оценку степени влияния Азиатской пыли, показал, что с удалением от пустыни Такламакан значения AOD снижаются примерно на 50% на участке ИК, на ~60% на участках ОС и ВА, и на ~70% – в областях НА и ДА. Наиболее высокая взаимная корреляция со среднемесячными значениями AOD_{TM} ($0.70 \leq R^2 \leq 0.75$) получена для трех участков (НА, ИК и ДА). Значительно более низкие коэффициенты корреляции наблюдались на участках, расположенных на севере (БИ и ТА) и юго-западе (ОС и ВА) исследуемой области ($0.18 \leq R^2 \leq 0.47$). В районах ДУ и АЛ влияние Азиатской пыли оказалось незначительным ($R^2 < 0.05$).

Таблица 2. Средние высоты участков (над уровнем моря), параметры линейных уравнений ($y=ax+b$) и соответствующие коэффициенты корреляции (R) и детерминации (R^2) между среднемесячными значениями AOD_{TM} и AOD_{550} на рассматриваемых участках в 2012 году.

Region	Elevation, m			Linear regression parameter				D (km)	A (°)
	Min	Max	Mean±SD	a	b	R	R ²		
TM	167	7456	1860±1290	1	0	1	1	0	0
NA	2053	4534	3280±470	0.45	-0.03	0.87	0.75	250	271
IK	1601	4590	2250±830	0.30	0.01	0.86	0.74	200	304
DA	857	4172	2140±675	0.26	0.40	0.84	0.71	515	260
OS	423	4341	1195±800	0.20	0.23	0.69	0.47	600	262
BA	344	3553	920±575	0.26	0.25	0.61	0.37	760	265
BI	613	4569	2325±1110	0.13	0.14	0.55	0.30	430	287
TA	605	4120	2100±880	0.08	0.14	0.42	0.18	590	283
DU	410	4556	1515±945	0.03	0.28		0.01	-	-
AL	501	3935	890±515	0.07	0.19		0.04	-	-

(*) D и A – расстояние и азимут каждого участка относительно пустыни Такламакан.

Заключение

Анализ спутниковых данных пространственного распределения *AOD* и *AE* (*MODIS/Terra*) в Центральной Азии (38.5–44.5 °N и 68.5–81.5 °E) выявил уникальные региональные межгодовые и сезонные особенности, обусловленные географическим расположением, зависимостью от рельефа местности и активности источников атмосферного аэрозоля. Результаты показали общее уменьшение *AOD* в области исследования, равное ~20% за весь период. Более значительные изменения происходили в региональном масштабе (до ~40% на участках ИК и ТА). Было также установлено, что содержание крупных частиц аэрозоля в атмосфере снизилось в большей степени, чем частиц тонкодисперсной фракции. Проведенные оценки региональных различий аэрозольной нагрузки атмосферы показали, что к наиболее загрязненным регионам относятся Ошская (OS) и Баткенская (BA) области, а воздействие Азиатской пыли в различной степени подвержена большая часть территории Кыргызстана. Наиболее сильное влияние Азиатской пыли наблюдалось на участках NA, ИК и DA и приходилось на весенний период.

Проведенные исследования показали, что спутниковые наблюдения имеют достаточный для практического использования уровень точности данных и открывают широкие возможности для регулярного мониторинга аэрозольного загрязнения регионов. В результате могут быть получены как интегральные оценки аэрозольной нагрузки атмосферы, так и восстановлена динамика распространения и продолжительность опасного воздействия аэрозоля в исследуемой области, которые являются важными характеристиками качества воздуха и основными параметрами при исследованиях климатических изменений.

Автор выражает благодарность коллегам NASA GES-DISC, обслуживающим систему GIOVANNY (*MODIS/Terra*), за обеспечение свободного доступа к данным, используемым в настоящем исследовании.

Литература:

1. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 1. Образование,

свойства аэрозоля и их трансформация. Оптика атмосферы и океана. 2006. 19. №1.

2. Сverdlik Л.Г. Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля. Наука, новые технологии и инновации. 2014. № 4. С.26–31.
3. Kulkarni S., Sobhani N., Miller-Schulze J.P., Shafer M.M., Schauer J.J., Solomon P.A., Saide P.E., Spak S.N., Cheng Y.F., Van Der Denier Gon H.A.C., Lu Z., Streets D.G., Janssens-Maenhout G., Wiedinmyer C., Lantz J., Artamonova M., Chen B., Imashev S., Sverdlik L., Deminter J.T., Adhikary B., Dallura A., Wei C., Carmichael G.R. Source sector and region contributions to BC and PM2.5 in Central Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 2014. Т. 14. С. 11343.
4. Сverdlik Л.Г. Региональные особенности многолетней изменчивости оптических свойств атмосферного аэрозоля над Центральной Азией. Наука, новые технологии и инновации. 2016. № 9. С. 8–13.
5. Ruiz-Arias J.A., Dudhia J., Gueymard C.A., Pozo-Vazquez D. Assessment of the Level-3 MODIS daily aerosol optical depth in the context of surface solar radiation and numerical weather modeling. *Atmos. Chem. Phys.* 2013. 13. 675–692.
6. Sverdlik L.G., Chen B.B., Balin Y.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E., Samoilova S.V. Comparative analysis of lidar investigations of aerosol in Central Asia and West Siberia. В сборнике: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 20, Atmospheric Physics*. 2014. С. 92923J.
7. Сverdlik Л.Г. Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET). Наука, новые технологии и инновации. 2013. № 3. С. 3–7.
8. Сverdlik Л.Г. Результаты сравнения экспериментальных (AERONET) и модельных (NAAPS) данных изменчивости оптических свойств аэрозоля над северным Тянь-Шанем. Наука, новые технологии и инновации. 2016. № 3. С. 3–9.
9. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>
10. Torres O., Tanskanen A., Veihelmann B., Ahn C., Braak R., Bhartia P. K., Veeffkind P., Levelt P. Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: An overview. *J. Geophys. Res.* 2007. 112. D24S47.
11. Dong Z.P., Yu X., Li X.M., Dai J. Analysis of variation trends and causes of aerosol optical depth in Shaanxi Province using MODIS data. *Chin. Sci. Bull.* 2013. Vol. 58. No. 35. 4486-4496.
12. URL: <http://ws.csiss.gmu.edu/DEMExplorer/>

Рецензент: д.ф.-м.н. Гайнутдинова Р.Д.