

*Свердлик Л.Г.*

**БОРБОРДУК АЗИЯ ҮСТҮНДӨГҮ АТМОСФЕРАЛЫК АЭРОЗОЛДУН ОПТИКАЛЫК КАСИЕТТЕРИНИН КӨП ЖЫЛДЫК ӨЗГӨРҮҮЛӨРҮНҮН РЕГИОНАЛДЫК ӨЗГӨЧӨЛҮКТӨРҮ**

*Свердлик Л.Г.*

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НАД ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИЕЙ**

*L.G. Sverdlik*

**REGIONAL PARTICULARITIES OF LONG-TERM VARIABILITY OF ATMOSPHERIC AEROSOL OPTICAL PROPERTIES OVER THE CENTRAL ASIA**

УДК: 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. Параметрлердин өзгөрүүлөрүнүн сызыктуу тренддери анализденген.*

***Негизги сөздөр:** спутниктик ченөөлөр, аэрозолдук оптикалык жоондук, Ангстрем көрсөткүчү, мейкиндиктик өзгөрүүлөр, убакыт тренди.*

*Представлены результаты спутниковых (MODIS/Terra) измерений межгодовой изменчивости аэрозольной оптической толщи и показателя Ангстрема в регионах Центральной Азии в 2002–2014 гг. Проанализированы линейные тренды изменения параметров.*

***Ключевые слова:** спутниковые измерения, аэрозольная оптическая толщина, показатель Ангстрема, пространственная изменчивость, временной тренд.*

*Results of satellite (MODIS/Terra) measurements of inter-annual variability of aerosol optical depth and Angstrom exponent in regions of Central Asia in 2002-2014 are presented. Linear trends of these parameters changes are analyzed.*

***Key words:** satellite measurements, aerosol optical depth, Angstrom exponent, spatial variability, temporal trend.*

**Введение**

Взвешенные в атмосфере частицы аэрозоля являются одним из основных загрязнителей, определяющим качество воздуха и оказывающим негативное воздействие на здоровье людей. В то же время, аэрозольные частицы представляют собой важный фактор, обуславливающий климатические изменения. Прогнозирование климата неизменно требует оценки аэрозольного радиационного форсинга (ARF), который, в свою очередь, основывается на информации о пространственном распределении и трансформации во времени оптических свойств аэрозоля [1, 2]. Большие неопределенности при вычислении радиационного форсинга связаны с существенной пространственной и временной изменчивостью состава и нагрузки аэрозоля. Предпочтительными и эффективными средствами мониторинга глобального и регионального распределения дисперсного состава и содержания аэрозоля, которые характеризуются показателем Ангстрема (AE) и аэрозольной оптической толщиной (AOD) и могут использоваться в экологических и климатических исследованиях, являются приборы дистанционного зондирования атмосферы. В последние годы число доступных международных баз данных параметров аэрозоля значительно увеличилось, главным образом, благодаря систематическим и долгосрочным глобальным наземным измерениям (AERONET) и спутниковым наблюдениям [2], что позволило выполнить многочисленные исследования пространственной изменчивости свойств различных типов аэрозоля, как на региональном уровне [3], так и в глобальном масштабе [4]. Вместе с тем, до настоящего времени подобные исследования для регионов Центральной Азии не проводились. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы восполнить этот пробел в аэрозольных измерениях.

**Регион исследования**

Основываясь на результатах предыдущих исследований [5, 6, 7], выявивших подверженность Центральной Азии влиянию нескольких основных источников аэрозоля, для проведения настоящего исследования была выбрана область (CA), ограниченная координатами 38.5–44.5 °N и 68.5–81.5 °E по широте и долготе, соответственно, которая включает всю территорию Кыргызстана. Чтобы обеспечить детальное описание свойств аэрозоля в этой области, были выделены 11 участков (рис. 1 и Таблица 1), семь из которых расположены в Кыргызстане и примерно соответствуют административно-территориальному делению страны, а также по одному в Казахстане (Алматы) и Таджикистане (Душанбе). С целью изучения степени влияния песчаных бурь на пространственное распределение AOD использовались также данные двух участков в пустыне Такла-Макан.

Таблица 1 – Символическое обозначение участков и координаты их центров

Site	Sym	Lat.	Long.	Site	Sym	Lat.	Long.
		(°N)	(°E)			(°N)	(°E)
Taklamakan	TM	40.5	79.5	Naryn	NA	41.5	76.5
Issyk-Kul	IK	42.5	77.5	Talas	TA	42.5	72.5
Djalal-Abad	DA	41.5	73.5	Batken	BA	40.5	70.5
Bishkek	BI	42.5	74.5	Osh	OS	40.5	72.5
Almaty	AL	43.5	76.5	Dushanbe	DU	38.5	68.5

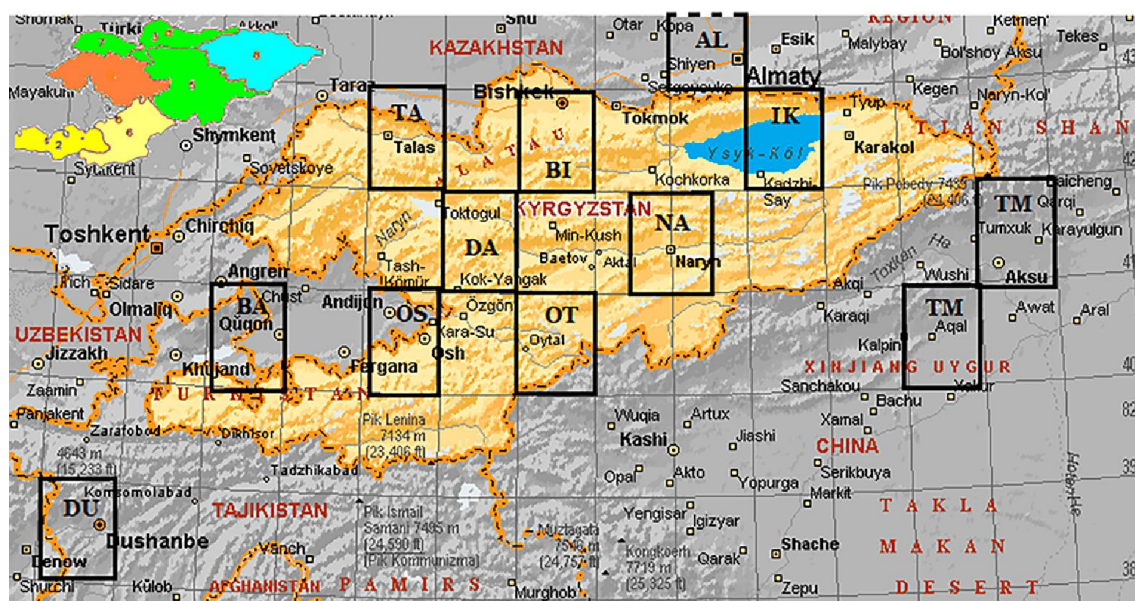


Рис. 1. Исследуемая область и участки, выделенные для сопоставления спутниковых данных

### Данные и методология

Для выделенных участков на основе данных MODIS (MOD08\_M3.051) [8] были построены временные ряды среднегодовых значений аэрозольной оптической толщи на длине волны 550 нм ( $AOD_{MODIS}$  или  $AOD_{550}$ ) и показателя Ангстрема ( $AE_{470/660}$ ) для длин волн  $\lambda_1=470$  нм и  $\lambda_2=660$  нм:

$$AE(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\ln[AOD(\lambda_1)/AOD(\lambda_2)]}{\ln[\lambda_2/\lambda_1]}$$

Точность данных MODIS AOD над земной поверхностью составляет  $\Delta AOD = \pm 0.05 \pm 0.15 \times AOD$ , что позволяет проводить анализ тренда [9]. Способность спутниковых измерений адекватно отражать состояние атмосферы оценивалось путем сопоставления со значениями аэрозольной оптической толщи ( $\lambda=500$  нм), полученными из базы данных измерений солнечными фотометрами CIMEL сети AERONET в пункте мониторинга Issyk-Kul [10, 11]. Сравнение средних за месяц значений идентичных параметров (AOD и AE), полученных приборами MODIS (Terra) и CIMEL (AERONET) было выполнено в виде:

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

где  $A$  – смещение линии регрессии,  $B$  – наклон. При этом данные наземного наблюдения AOD на длине волны 500 нм в процессе обработки пересчитывались с использованием показателя Ангстрема на длину волны 550 нм ( $AOD_{AERONET}$ ). Оценка достоверности результатов спутниковых измерений на участке IK показала хорошее согласие с данными AERONET на двух уровнях коррекции (Level 1.0 и Level 1.5) с коэффициентами корреляции Пирсона  $R^2=0.76$  и  $R^2=0.73$ , соответственно.

Интерпретации результатов спутниковых измерений было принято условие однородности характеристик аэрозольной составляющей атмосферы в пределах прямоугольных участков размером  $1^\circ \times 1^\circ$  или  $\sim 110 \times 80$  км, характеризующихся средними значениями  $\overline{AOD}_{X^\circ N; Y^\circ E}$ :

$$AOD_{IK} = \overline{AOD}_{42-43^\circ N; 77-78^\circ E}; AOD_{NA} = \overline{AOD}_{41-42^\circ N; 76-77^\circ E}; AOD_{DA} = \overline{AOD}_{41-42^\circ N; 73-74^\circ E};$$

$$AOD_{OS} = \overline{AOD}_{40-41^{\circ}N;72-73^{\circ}E}; AOD_{BA} = \overline{AOD}_{40-41^{\circ}N;70-71^{\circ}E}; AOD_{DU} = \overline{AOD}_{38-39^{\circ}N;68-69^{\circ}E};$$

$$AOD_{BI} = \overline{AOD}_{42-43^{\circ}N;74-75^{\circ}E}; AOD_{TA} = \overline{AOD}_{42-43^{\circ}N;72-73^{\circ}E}; AOD_{AL} = \overline{AOD}_{43-44^{\circ}N;76-77^{\circ}E};$$

$$AOD_{TM} = (\overline{AOD}_{40-41^{\circ}N;79-80^{\circ}E} + \overline{AOD}_{41-42^{\circ}N;80-81^{\circ}E})/2.$$

Анализ временных рядов  $AOD_{MODIS}$  и  $AE_{MODIS}$  в исследуемой области охватывает период с 2002 по 2014 годы. В пределах этого интервала времени производилась оценка коэффициента линейного тренда аэрозольных характеристик и вычисление параметров линейной регрессионной модели на основе метода наименьших квадратов.

### Результаты и обсуждение

#### Межгодовая изменчивость MODIS AOD и AE

Спутниковые данные 9 из 11 участков, рассредоточенных по всей области исследования, позволили проанализировать региональные особенности аэрозольного загрязнения атмосферы и оценить его долгосрочные тенденции, для чего использовалась аппроксимация линейных трендов среднегодовых значений  $MODIS AOD$  и  $AE$  (рис. 2). Результаты многолетних наблюдений показали сильные региональные различия и определенные закономерности распределения параметров аэрозоля, в соответствии с которыми все рассматриваемые участки были разделены на три группы: а) ИК, НА, ДА; б) ОС, ВА, ДУ; в) БИ, ТА, АЛ. Основанием для выделения однотипных участков послужила хорошая взаимосвязь между изменениями параметров ( $R^2 > 0.5$ ) и достаточно близкие уровни  $AOD$  и  $AE$ . За исключением группы (б), в которой вариации  $AOD$  были качественно подобными, но диапазон изменения существенно отличался.

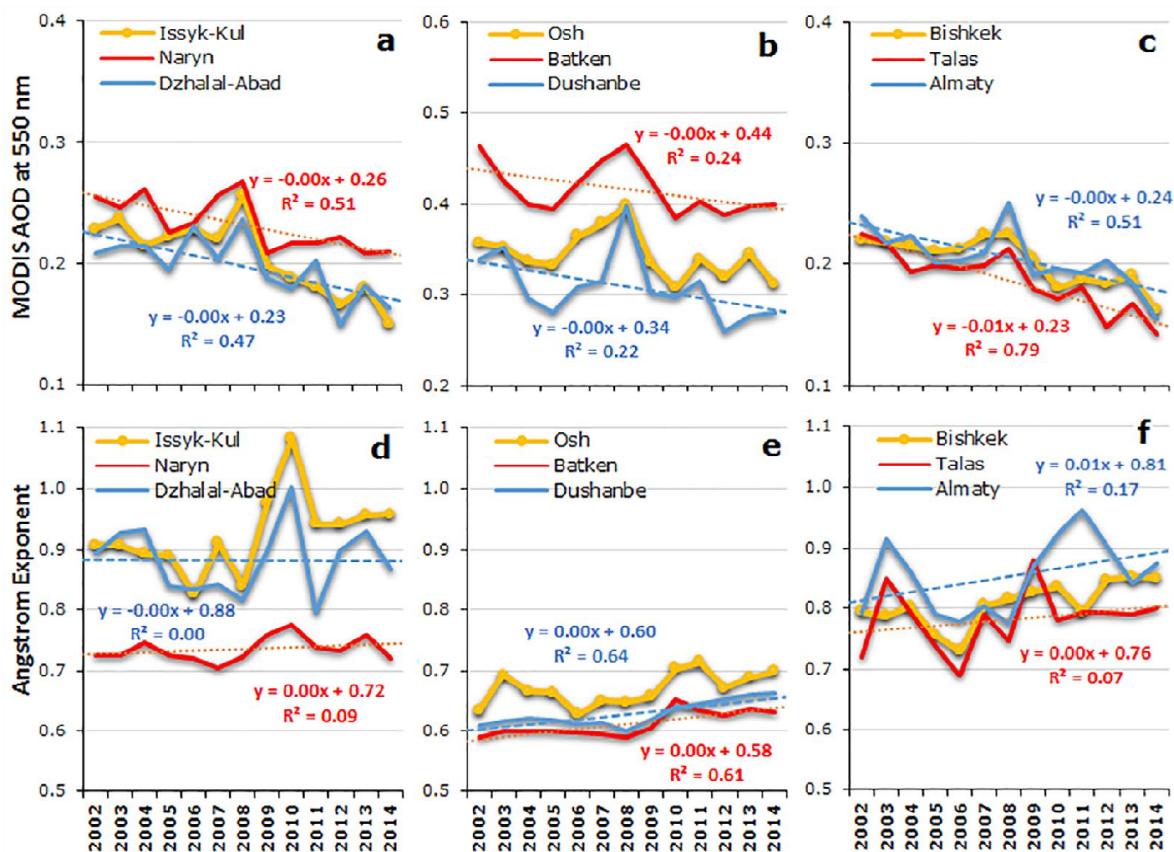


Рис. 2. Временные ряды и линейные тренды среднегодовых значений  $MODIS AOD$  (a, b, c) и  $AE$  (d, e, f) в регионах исследуемой области

Как видно, самые низкие среднегодовые значения  $0.15 \leq AOD \leq 0.25$  наблюдались на северных участках (ТА, БИ, АЛ) и несколько более высокая аэрозольная нагрузка ( $AOD=0.25-0.30$ ) зарегистрирована в регионах, расположенных на северо-востоке и в западной части области (ИК, НА, ДА). Наиболее загрязненными аэрозольными частицами участками являлись ОС, ВА и ДУ ( $AOD=0.3-0.5$ ). Значения показателя Ангстрема на участках варьировали в пределах от 0.6 до 1.1, что соответствует уровням, характеризующим пылевой аэрозоль ( $AE < 0.7$ ) и смешанные в различной пропорции составы ( $0.7 < AE < 1.1$ ), состоящие из крупных частиц пыли и тонкодисперсных частиц, главным образом, продуктов сгорания и сульфатов [5, 11].



Результаты показали наличие отрицательных линейных трендов *AOD* и положительных трендов *AE*. Рост *AE* за рассматриваемый период не превышал 15%, тогда как средний уровень содержания атмосферного аэрозоля в южных регионах (TM, OS, BA, DU) уменьшился на 10–20%, а на менее загрязненных участках произошло более значительное снижение *AOD* на 20–30% (NA, AL, BI, DA). Наибольший спад аэрозольной нагрузки атмосферы (~40%) наблюдался на участках IK и TA. Следует отметить, что длительные периоды устойчивого изменения *MODIS AOD* и *AE*, не наблюдались. Продолжительность последовательного нарастания или убывания характеристик составляла 1–3 года. В целом временные ряды *AOD* характеризовались максимальными значениями в 2008 и минимальными в 2012 и 2014 годах. Статистика средних многолетних значений и годовые линейные тренды *MODIS AOD* и *AE* для исследуемых участков приведена в Таблице 2.

Таблица 2 – Средние многолетние значения (2002–2014 гг.) и годовые линейные тренды *MODIS AOD* и *AE* (год<sup>-1</sup>) для исследуемых участков

Site	<i>AOD</i>	<i>AE</i>	<i>Trend AOD</i> (yr <sup>-1</sup> )	% <i>AOD</i> (yr <sup>-1</sup> )	<i>Trend AE</i> (yr <sup>-1</sup> )	% <i>AE</i> (yr <sup>-1</sup> )
	Total mean (2002-2014)					
TM	0.587±0.05	0.58±0.01	-0.0063	-1.07	0.0017	0.29
BA	0.416±0.03	0.61±0.02	-0.0035	-0.85	0.0043	0.71
OS	0.345±0.03	0.67±0.03	-0.0029	-0.84	0.0039	0.58
DU	0.309±0.04	0.63±0.02	-0.0044	-1.42	0.0042	0.67
NA	0.233±0.02	0.74±0.02	-0.0040	-1.72	0.0015	0.20
IK	0.206±0.03	0.93±0.07	-0.0065	-3.16	0.0081	0.87
AL	0.205±0.02	0.85±0.06	-0.0045	-2.20	0.0064	0.75
BI	0.203±0.02	0.81±0.04	-0.0042	-2.07	0.0064	0.79
DA	0.198±0.03	0.88±0.06	-0.0044	-2.22	0.0001	0.00
TA	0.189±0.03	0.78±0.05	-0.0058	-3.10	0.0035	0.45
CA	<b>0.313±0.03</b>	<b>0.71±0.02</b>	<b>-0.0052</b>	<b>-1.66</b>	<b>0.0029</b>	<b>0.41</b>

Наблюдаемую во всей области (CA) отрицательную годовую динамику *MODIS AOD* можно оценить величиной -0.0052 (-1.66%), при том, что отдельные изменения происходили в пределах от -0.0029 (-0.84%) на участке OS до -0.0065 (-3.16%) в IK (рис. 3).

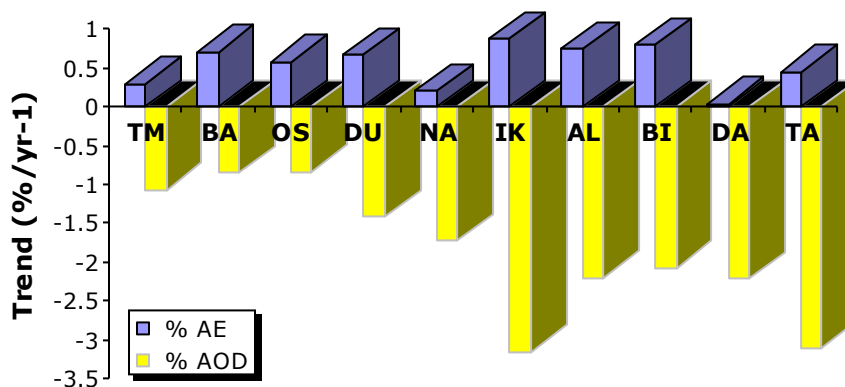


Рис. 3. Средние годовые линейные тренды *MODIS AOD* и *AE*

Сравнение выявленных линейных трендов с результатами, полученными в других регионах мира, показало достаточно близкую тенденцию уменьшения *AOD*, составляющую  $-0,0027 \pm 0,0014$  над европейскими регионами (1997–2010 гг.), и более значительное снижение в процентном выражении:  $-1,36 \pm 0,90\%$  на западе и  $-5,21 \pm 3,47\%$  на востоке США [9, 12]. В отличие от положительных тенденций  $+1,63 \pm 1,07\%$  на Ближнем Востоке из-за увеличения эмиссии пыли и от  $+2,26 \pm 1,71$  до  $+2,97 \pm 2,30\%$  в центральной части Китая вследствие роста промышленного производства.

Долгосрочные тенденции пространственного распределения показателя Ангстрема свидетельствуют о некотором уменьшении содержания крупных частиц пыли 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 (*AOD*) над всей областью исследования ( $-1.66\%$ ). В тоже время на всех участках обнаруживается небольшой, в пределах  $1\%$  в год, рост *AE*, что не позволяет связать тренд *AOD* с убыванием тонкодисперсного аэрозоля антропогенного происхождения. Наиболее вероятно это может быть обусловлено естественными природными процессами. Таким, например, как уменьшение эмиссии пылевого аэрозоля из пустыни Такла-Макан и многолетняя изменчивость общей циркуляции атмосферы, проявляющаяся в перестройке (повторяемости и интенсивности) зональной компоненты на меридиональную составляющую [6, 13]. И, как следствие, снижением запыленности атмосферы в исследуемой области.

Подтверждением влияния происхождения воздушных масс на наблюдаемые оптические свойства аэрозоля может служить анализ и статистическая кластеризация 96-часовых (4-D) обратных траекторий перемещения воздушных масс (*HYSPLIT*) [14]. Результаты моделирования на уровнях атмосферного давления 700 и 500 *hPa* для участка ИК позволили выделить основные направления переноса аэрозольного загрязнения: юго-восточное (*SE*); юго-западное (*SW*); западное (*W*) и северное, северо-западное (*NW*). Полученные многолетние (2008–2013) распределения повторяемости траекторий (рис. 4) показали достаточно стабильное доминирующее воздействие адвекции воздушных масс с юго-запада (*SW*), проходящих над пустынями Ливии, Аравии, Иранского нагорья, на долю которых приходилось от 35 до  $\sim 55\%$ . Соответственно, южные регионы показали минимальные отрицательные тренды *AOD*. Вместе с тем влияние воздушных масс, прибывающих с западного направления (*W*), которые пересекают Аральский бассейн, пустыню Кызылкум, плато Устюрт, неуклонно снижалось (27.0 и 16.4% в 2008 и 2013 годах, соответственно).

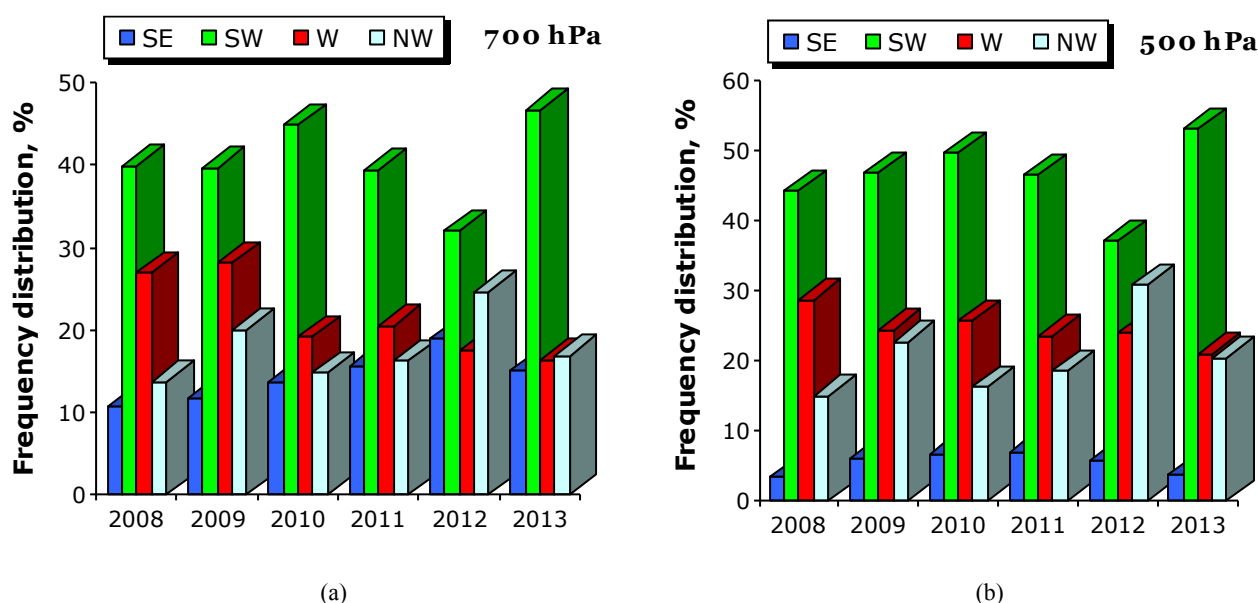


Рис. 4. Распределения повторяемости обратных траекторий (в %) по направлениям на изобарических уровнях: а – 700 *hPa*; б – 500 *hPa*

### Заключение

Результаты спутниковых измерений оптической толщи и показателя Ангстрема (*MODIS/Terra*) в период с 2002 по 2014 г. были использованы для исследования особенностей пространственного распределения и временной (среднегодовые и среднемесячные данные) изменчивости аэрозольного загрязнения 11 регионов в Центральной Азии. Результаты показали общее уменьшение *AOD* в области исследования, равное  $\sim 20\%$  за весь период. Более значительные изменения происходили в региональном масштабе (до  $\sim 40\%$  на участках ИК и ТА), что согласуется с соответствующими тенденциями, в других регионах мира. Было также установлено, что содержание крупных частиц аэрозоля в атмосфере снизилось в большей степени, чем частиц тонкодисперсной фракции, что обусловлено причинами естественного порядка, в частности, изменениями циркуляции атмосферы. Проведенные оценки региональных различий многолетней динамики аэрозольной нагрузки атмосферы показали, что к наиболее загрязненным регионам относятся Ошская (OS) и Баткенская (BA) области, а влиянию Азиатской пыли в различной степени подвержены все участки, расположенные на территории Кыргызстана.

Настоящая статья является первым этапом анализа пространственно-временных изменений аэрозольного загрязнения атмосферы в Центральной Азии, основанного на возможностях современных систем наблюдений. Важным результатом проведенного исследования является создание большой базы данных спутниковых (*MODIS/Terra*) и наземных (*AERONET*) измерений для исследуемых регионов. Объединение базы с данными других систем космического и наземного базирования даст более полное представление о процессах

трансформации атмосферного аэрозоля и будет способствовать решению актуальных задач экологического мониторинга, а также контроля и прогнозов качества воздуха.

Автор выражает благодарность руководителям и всем сотрудникам научных проектов MODIS/Terra и AERONET (Issyk-Kul) за их усилия в проведении измерений, обработке результатов и обеспечении свободного доступа к наборам данных, используемым в настоящем исследовании.

#### Литература:

1. Сverdlik Л.Г. Аэрозольное воздействие на перенос радиации и дистанционное лазерное зондирование оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля. Вестник КРСУ. 2005. Т. 5. № 7. С.105–108.
2. 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.
3. 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.
4. Chin M., Diehl T., Tan Q., Prospero J.M., Kahn R.A., Remer L.A., Yu H., Sayer A.M., Bian H., Geogdzhayev I.V., Holben B.N., Howell S.G., B.J. Huebert, Hsu N.C., Kim D., Kucsera T.L., Levy R.C., Mishchenko M.I., Pan X., Quinn P.K., Schuster G.L., Streets D.G., Strode S.A., Torres O., Zhao X.-P. Multi-decadal aerosol variations from 1980 to 2009: a perspective from observations and a global model. Atmos. Chem. Phys. 2014. 14. 3657–3690.
5. 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 PM<sub>2.5</sub> in Central Asia. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 2014. Т. 14. С. 11343.
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. Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля. Наука, новые технологии и инновации. 2014. № 4. С.26–31.
8. URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>
9. Yoon J.W., von Hoyningen-Huene A.A., Kokhanovsky M., Vountas, Burrows J.P. Trend analysis of aerosol optical thickness and Angstrom exponent derived from the global AERONET spectral observations. Atmos. Meas. Tech. 2012. 5. 1271–1299.
10. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
11. Сverdlik Л.Г. Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET). Наука, новые технологии и инновации. 2013. № 3. С. 3–7.
12. 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.
13. Ивлев Л.С. Аэрозоли и глобальные изменения климата. Региональная экология. 2011. № ¾. С. 83–93.
14. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), NOAA Air Resources Laboratory. College Park. MD. 2013.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор Лелевкин В.М.