

**ФИЗИКА МАТЕМАТИКА ИЛИМДЕРИ**  
**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**PHYSICO-MATHEMATICAL SCIENCE**

*Свердлик Л.Г.*

**ТҮНДҮК ТЯНЬ-ШАНЬ ҮСТҮНДӨГҮ АЭРОЗОЛДУН ОПТИКАЛЫК  
КАСИЕТТЕРИНИН ӨЗГӨРГҮЧТҮГҮНҮН ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫК (AERONET)  
ЖАНА МОДЕЛДИК (NAAPS) МААЛЫМАТТАРЫН САЛЫШТЫРУУ  
НАТЫЙЖАЛАРЫ**

*Свердлик Л.Г.*

**РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ (AERONET) И  
МОДЕЛЬНЫХ (NAAPS) ДАННЫХ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
АЭРОЗОЛЯ НАД СЕВЕРНЫМ ТЯНЬ-ШАНЕМ**

*L.G. Sverdlik*

**COMPARISON RESULTS OF EXPERIMENTAL (AERONET)  
AND MODEL (NAAPS) DATA OF AEROSOL OPTICAL PROPERTIES VARIABILITY  
OVER NORTHERN TIEN-SHAN**

УДК: 504.3.054: 551.510.42

*Түндүк Тянь-Шань регионундагы аэрозолдук оптикалык калыңдыктын жылдык өзгөрүчтүгүнүн моделдик (NAAPS) жана эксперименталдык (AERONET) маалыматтарын салыштыруу натыйжалары жана атмосфералык аэрозолдун негизги компоненттеринин оптикалык калыңдыкка болгон салымынын баалоосу көрсөтүлгөн.*

**Негизги сөздөр:** *аэрозоль компоненттеринин ташылуу модели, оптикалык калыңдык, оптикалык касиеттердин жылдык өзгөрүчтүгү.*

*Приведены результаты сопоставления модельных (NAAPS) и экспериментальных (AERONET) данных годовой изменчивости аэрозольной оптической толщи в регионе Северного Тянь-Шаня и оценка вкладов в оптическую толщину основных компонентов атмосферного аэрозоля.*

**Ключевые слова:** *модель переноса аэрозольных компонентов, оптическая толщина, годовая изменчивость оптических свойств.*

*Results of comparison of model (NAAPS) and experimental (AERONET) data of annual variability of aerosol optical depth in Northern Tien-Shan region is presented and contributions of main atmospheric aerosol components to optical depth are estimated.*

**Key words:** *aerosol components transport model, optical depth, and annual variability of the optical properties.*

**Введение**

Проводимые в последние десятилетия многочисленные исследования параметров атмосферы направлены, главным образом, на решение таких важных проблем, как контроль загрязнения воздуха, аэрозольное радиационное воздействие на климат [1, 2], прогнозирование опасных природных процессов

и явлений [3, 4]. Как средство глобального мониторинга пространственно-временной изменчивости характеристик аэрозоля в экологических и климатических исследованиях предпочтительным является дистанционное зондирование с помощью орбитальных обсерваторий. Однако эти данные ограничены определенными временными рамками и не обладают необходимой точностью, особенно в случаях мелкомасштабных пространственных неоднородностей загрязнения или при измерениях над яркой земной поверхностью. Более надежную и точную информацию о содержании и спектральных свойствах аэрозоля предоставляют наземные наблюдения, например, лидарные станции проекта *Cis-LiNet* [5] или работающая на постоянной основе глобальная сеть *AERONET (AErosol RObotic NETwork)* [6]. К недостаткам фотометрических измерений может быть отнесена сильная зависимость от неблагоприятных метеоусловий и времени суток. Восполнить такие пробелы в экспериментальных данных вместе с дополнительной характеристикой аэрозоля, включающей определение типа частиц и источников эмиссии, позволяют модели. В частности, модель распространения компонентов аэрозоля *NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System)* [7]. Способность модели адекватно воспроизводить происходящие в реальной атмосфере физические процессы была проверена путем сопоставления региональных данных модели *NAAPS* с результатами наземных измерений (*AERONET*).

### Данные и методология

Содержание взвешенных в воздухе частиц количественно может быть определено аэрозольной оптической толщиной ( $AOD$ ), которая используется в качестве основного параметра в программе глобальных наблюдений в атмосфере (*GAW, The Global Atmosphere Watch*).

Станции сети *AERONET* используют стандартную модель солнечного фотометра *CIMEL CE-318* [8, 9], позволяющего измерять аэрозольную оптическую толщину на 8 длинах волн: 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940 и 1020 нм. В настоящей статье использовались среднесуточные данные уровня *Level 1.5* (фильтрация облаков) прямых измерений солнечной радиации, которые получены на станции *Issyk-Kul (AERONET)* в 2012 году. Выбор *Level 1.5*, имеющего более высокую погрешность восстановления  $AOD$  (~5-10% для  $AOD_{440} \leq 0.2$ ), обеспечил лучшую статистику данных. Измеренные значения оптической толщины на длине волны 500 нм ( $AOD_{500}$ ) в процессе обработки пересчитывались путем сплайновой интерполяции на длину волны модели 550 нм ( $AOD_{AERONET}$ ).

Выполненный ранее анализ спектральной зависимости ослабления и поглощения [6] позволил выделить в регионе пять типов аэрозоля: сульфатный или фоновый (*Background или Sulfate*); пылевой (*Dust*); дым (*Smoke*); смешанный (*Mixed*); смешанный сильно поглощающий аэрозоль (*Mixed/Abs*). Эти результаты были сопоставлены с модельными данными о вкладе в оптическую толщину различных типов аэрозоля.

*Аэрозольная модель NAAPS*, предназначенная для изучения процессов переноса загрязнений и

прогнозирования эпизодов крупномасштабной эмиссии аэрозоля, содержит четыре прогнозируемых компонента атмосферы: газообразный диоксид серы  $SO_2$ , частицы сульфатов ( $SO_4$ ), почвенной пыли и дыма [10]. Все разновидности рассматриваются как пассивные трассеры (т.е., не взаимодействуют друг с другом), и отслеживаются в виде массовой концентрации с последующей конвертацией в оптическую толщину ( $AOD_{NAAPS}$ ) на длине волны 550 нм [7]. В ряде исследований последних лет было проведено сравнение результатов моделирования с наблюдениями в областях с сильным влиянием континентального аэрозоля [11]. Глобальные источники минеральной пыли определены базой данных *Земной поверхности USGS (USGS Land Cover Characteristics Database)*. Эмиссия дыма основана на близких к реальному времени данных о пожарах спутника *Terra (MODIS)*. Модель обеспечивает прогнозы распределения тропосферного аэрозоля, как в глобальном масштабе, так и в 15 региональных версиях с 6-часовым разрешением по времени и горизонтальным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$ . Данные о ежедневной изменчивости  $AOD_{NAAPS}$  были получены для 06:00 UTC и 18:00 UTC, что соответствует полудню и полуночи местного времени.

### Результаты и обсуждение

*Вариации аэрозольной оптической толщины*, предсказанные моделью (*NAAPS*) и наблюдаемые солнечным фотометром (*AERONET*), представлены на рисунке 1. Годовой ход среднесуточных значений  $AOD$  на длине волны 550 нм характеризовался широким диапазоном изменчивости (от 0.02 до 2.4) с наиболее высокими значениями весной и низкими уровнями в зимний период.

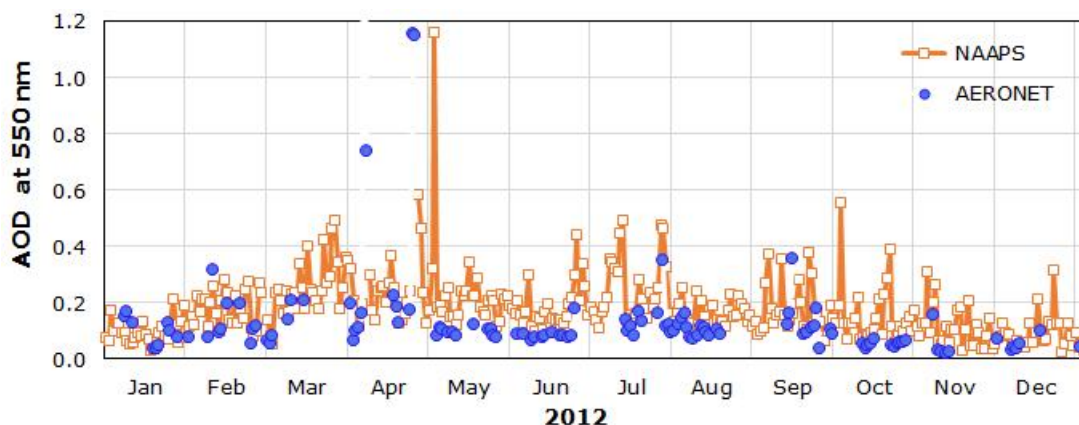


Рис. 1. Временные ряды модельных ( $AOD_{NAAPS}$ ) и наблюдаемых ( $AOD_{AERONET}$ ) среднесуточных значений аэрозольной оптической толщины.

Гистограммы частотного распределения и построенные на их основе интегральные распределения повторяемости значений (рис. 2а) показали, что преобладали относительно небольшие значения  $AOD$ . Половина точек данных *AERONET* и *NAAPS* приходится на диапазоны значений 0.08–0.14 и 0.11–0.22, а медианы распределения составили 0.11 и 0.16, соответственно.

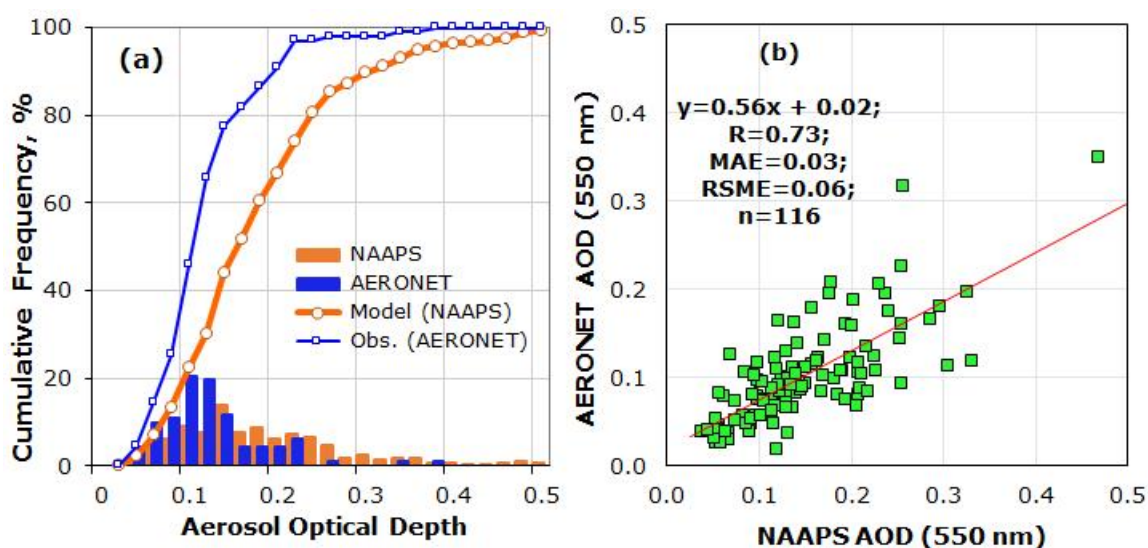


Рис. 2. Интегральные распределения повторяемости и гистограммы значений измеренных и модельных аэрозольных оптических толщин (а); сопоставление значений  $AOD_{NAAPS}$  и  $AOD_{AERONET}$  (b).

При хорошей согласованности временной изменчивости модельных и экспериментальных данных очевидны различия, выраженные в некоторой переоценке значений  $AOD_{NAAPS}$  в условиях умеренного загрязнения атмосферы ( $AOD < 0.5$ ) и не точном разрешении событий с высокой аэрозольной нагрузкой ( $AOD > 0.5$ ). Это может быть связано с пространственной изменчивостью распределения аэрозоля в регионе, поскольку усреднение данных  $NAAPS$  производится по области со сложным рельефом ( $\sim 100 \times 100$  км), в центре которой расположена станция  $AERONET$ . Исключив точки  $AOD > 0.5$ , получаем преобразованный массив наиболее типичных для региона данных (рис. 2b), сопоставление которых показало наличие хорошей корреляции ( $R^2=0.54$ ;  $R=0.73$ ).

В предположении линейной связи между параметрами это позволяет производить оценку временной изменчивости  $AOD_{AERONET}$  по предсказанным моделью данным ( $AOD_{NAAPS}$ ), используя следующее уравнение:

$$AOD_{AERONET} = 0.56 \times AOD_{NAAPS} + 0.02.$$

При средних значениях  $0.130 \pm 0.062$  и  $0.149 \pm 0.073$  для фактически наблюдаемых и прогнозируемых данных ( $n=116$ ) абсолютная погрешность

восстановления моделью  $AOD$  составила 0.03, а среднеквадратичное отклонение 0.06. Таким образом, модель  $NAAPS$  показала вполне удовлетворительные результаты, предоставляя достаточно точные значения  $AOD$  в условиях наиболее характерных аэрозольных нагрузок атмосферы.

**Основные компоненты аэрозоля**, определяющие, согласно данным модели  $NAAPS$ , вклад в  $AOD$ , классифицированы на три основных типа: сульфатный ( $SULF$ ), дымовой ( $SMOKE$ ) и пылевой ( $DUST$ ). Полная оптическая толщина ( $AOD_{NAAPS}$ ) является суммой вкладов этих типов аэрозоля, которые образуются разными источниками и механизмами эмиссии:

$$AOD_{NAAPS} = AOD_{SULF} + AOD_{SMOKE} + AOD_{DUST}$$

На рисунке 3 представлены графики годовой изменчивости оптической толщи этих компонентов аэрозоля, совмещенные с результатами классификации частиц по данным  $AERONET$  [6]. Очевидно, что в результатах наблюдается хорошее соответствие в определении периодов доминирования каждого типа аэрозоля. Такое разделение вкладов основных типов аэрозоля позволяет идентифицировать события, определяющие формирование годового цикла оптической толщи в регионе.

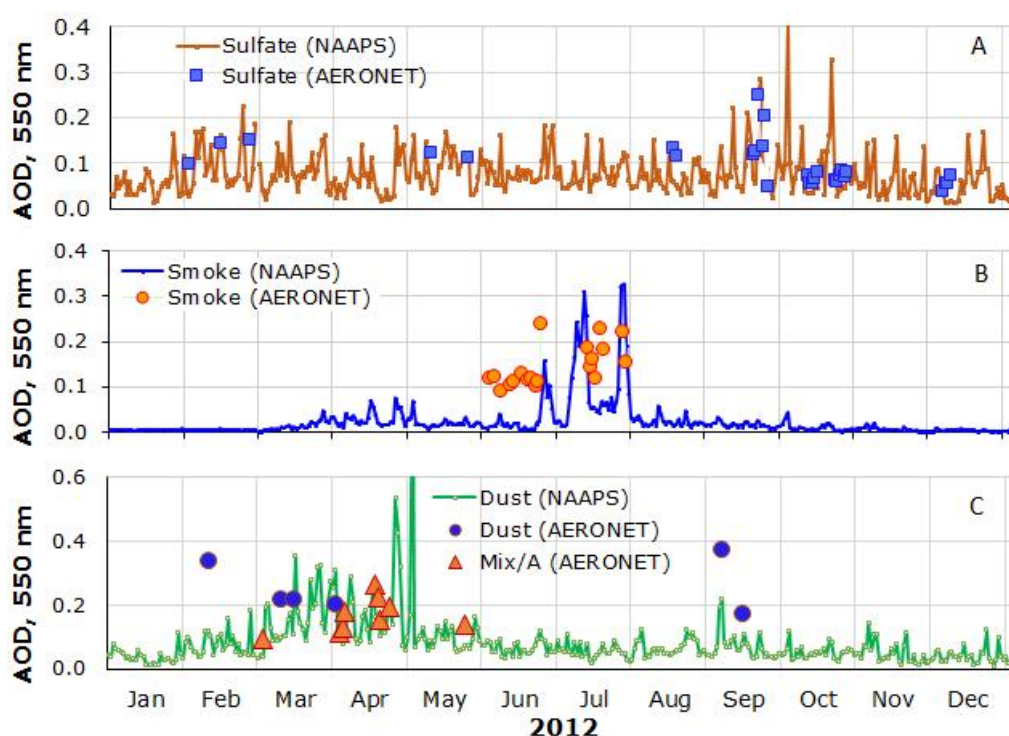


Рис. 3. Годовая изменчивость оптической толщины сульфатного (а), дымового (б) и пылевого (с) аэрозоля (NAAPS) и результаты идентификации доминирующих типов аэрозоля (AERONET).

Сульфаты, являющиеся самым значительным антропогенным компонентом, составляли существенную фракцию аэрозоля на протяжении всего года (рис. 3а). Наиболее типичные среднесуточные значения  $AOD_{SULF}$  варьировали в пределах от 0.04 до 0.1 (~70% данных) и определялись различными континентальными источниками. Частицы сульфатов были доминирующим компонентом атмосферы в конце зимы и осенью, когда наблюдались отдельные флуктуации  $AOD_{SULF} = 0.2-0.4$ , связанные с приходом воздушных масс европейского происхождения в условиях преобладания в атмосфере средних широт западно-восточного переноса.

Экстремальные засушливые погодные условия, сложившиеся на территории России в летний период, привели к интенсивным лесным и торфяным пожарам, сопровождавшимся сильным задымлением атмосферы. Наибольшее воздействие дымового аэрозоля на регион наблюдалось в июле ( $AOD_{SMOKE} = 0.1-0.3$ ), когда очаги были сконцентрированы в Западной Сибири и траектории воздушных масс, перемещающихся с северо-восточного направления, пересекали области активных пожаров (рис. 3б). Этот период характеризовался отсутствием сильных штормов пыли ( $AOD_{DUST} = 0.03-0.10$ ), а частицы дыма являлись основным компонентом, определяющими  $AOD$ .

В весенние месяцы регион подвергался воздействию пылевых бурь, происходящих в пустыне Такла-Макан. Самые высокие значения  $AOD_{DUST}$  (0.20–0.93) приходились на конец апреля – начало мая (рис. 3с). Азиатская пыль уверенно регистрируется спутниковым лидаром (CALIPSO/CALIOP) до высот  $h > 5.0$  км и поэтому легко преодолевает горную цепь Тянь-Шань, которая формирует северный край Таримского бассейна и представляет собой чередование областей высотой от 1.0 до 4.0–5.0 км [5, 7]. Ключевую роль в формировании пылевых бурь играет прохождение холодных фронтов, связанных с системами низкого давления в бассейне, что создает условия для подъема пыли в атмосферу. События Азиатской пыли определяли большую часть вариаций  $AOD$  в период с февраля по май.

Таким образом, годовая изменчивость оптической толщины была обусловлена как природными (лесные пожары, пылевые бури), так и антропогенными факторами, и в значительной степени отражает влияние процессов регионального и трансграничного переноса аэрозоля воздушными массами, пересекающими регион с нескольких направлений. Результаты моделирования позволили не только исследовать сезонные особенности изменчивости  $AOD_{NAAPS}$  (рис. 4), но и выделить эпизоды аэрозольного загрязнения региона и их эволюцию во времени.

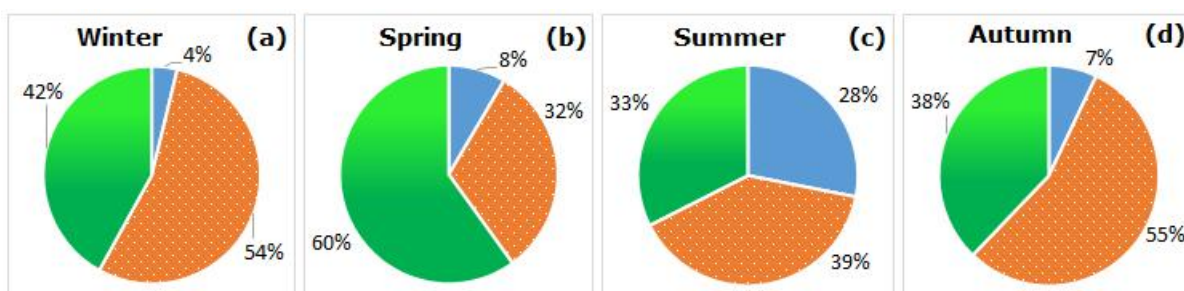


Рис. 4. Сезонный вклад в  $AOD$  (в процентах) каждого из моделируемых ( $NAAPS$ ) компонентов аэрозоля: зима (a), весна (b), лето (c), и осень (d).

**Вклад основных компонентов аэрозоля в оптическую толщину.** На рисунке 5 представлены диаграммы изменчивости среднемесячных значений  $AOD_{NAAPS}$  и вклада основных компонентов атмосферного аэрозоля в ослабление солнечного излучения.

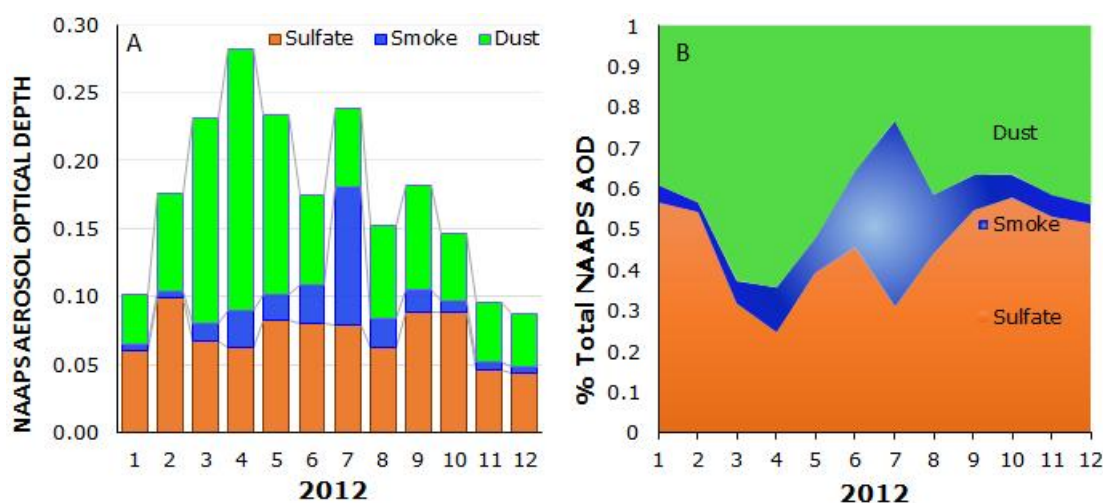


Рис. 5. Средние за месяц значения  $AOD$  (a) и вклад в полную оптическую толщину сульфатного, дымового и пылевого аэрозоля (b).

Вариации  $AOD$  показали отчетливый годовой ход с минимумом зимой ( $\sim 0.1$ ) и максимумами весной и летом ( $\sim 0.25$ ). Средние значения оптической толщины сульфатов, дыма/сажи и пыли, составляли  $0.08 \pm 0.02$ ,  $0.03 \pm 0.03$  и  $0.08 \pm 0.05$ , соответственно. Оценка вклада различных составляющих  $AOD_{NAAPS}$  показала, что пыль и сульфаты были основными типами аэрозоля (рис. 5b). Доля сульфатов была в среднем  $\sim 45\%$   $AOD$ , с максимумом в периоды осени/зимы (до  $60\%$   $AOD$ ). Процентное содержание минеральной пыли, наибольшей естественной разновидности аэрозоля в регионе, составляло в среднем за год  $45\%$   $AOD$ , достигая  $65\%$  в весенний период.

Наибольшее воздействие дыма лесных пожаров на регион приходилось на середину лета ( $45\%$   $AOD$ ). Несмотря на незначительный среднегодовой вклад дымового аэрозоля ( $\sim 10\%$   $AOD$ ), вследствие большой эффективности поглощения солнечной радиации он оказывает заметное влияние на радиационный баланс атмосферы и поверхности [1].

**Сравнение вкладов мелкодисперсной фракции в  $AOD$  по измеренным (AERONET) и модельным**

**( $NAAPS$ ) данным.** Наряду с суммарной  $AOD$ , важным параметром в дистанционном зондировании является относительный вклад в оптическую толщину мелкодисперсной фракции аэрозоля ( $FMF$ ), который может быть представлен в виде:

$$FMF(\lambda) = AOD_f(\lambda) / (AOD_f(\lambda) + AOD_c(\lambda)),$$

где символами  $f$  и  $c$  обозначены мелкодисперсная и крупнодисперсная компоненты  $AOD$  на длине волны  $\lambda$ , соответственно. Этот параметр позволяет характеризовать смешанные многокомпонентные составы частиц, состоящие из естественных аэрозолей, которые являются в основном частицами крупной фракции ( $r > \sim 1 \mu m$ ), и тонкодисперсных антропогенных частиц ( $r < \sim 1 \mu m$ ) [6, 12]. Применительно к данным модели  $NAAPS$ , определяя мелкодисперсную фракцию как смесь сульфатов и дыма, можно записать:

$$FMF_{NAAPS} = (AOD_{SULF} + AOD_{SMOKE}) / AOD_{NAAPS}$$

Рис. 6a иллюстрирует диапазон восстановленных среднемесячных модельных и измеренных значений  $FMF$  в пределах от  $\sim 0.35$  до  $\sim 0.75$ , позволяя выделить периоды доминирования пыли ( $FMF < 0.45$ )

и тонкодисперсного загрязнения ( $FMF > 0.60$ ). Несмотря на существенные различия между способами получения двух наборов данных получено близкое совпадение значений  $FMF$  с коэффициентом корреляции  $R=0.82$ . Это свидетельствует о надежности модельных оценок вклада мелкодисперсной фракции

аэрозоля в условиях, когда в атмосфере присутствуют смешанные в различной пропорции тонкодисперсные и крупные частицы, для которых характерны бимодальные распределения по размерам (рис. 6b).

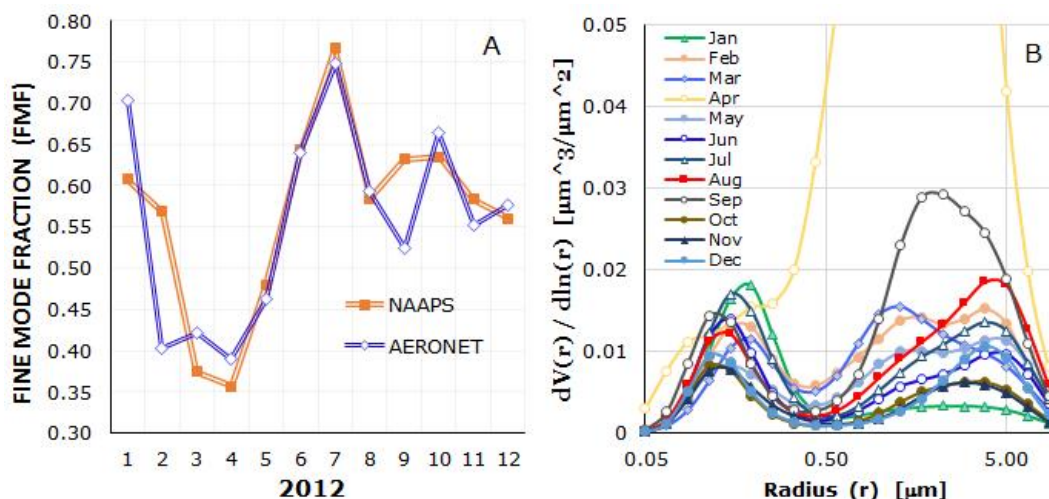


Рис. 6. Среднемесячные модельные и измеренные значения  $FMF$  (а) и объемные распределения аэрозольных частиц по размерам (б).

На рисунке 7 показана временная изменчивость оптической толщи, восстановленной моделью *NAAPS* для трех типов аэрозоля (сульфаты, дым/сажа, минеральная пыль), и вклады в  $AOD$  частиц тонкодисперсной (*Fine*) и крупной (*Coarse*) фракций по данным *AERONET*. Наблюдаемые изменения значений  $AOD$  характеризуют периоды, в которые доминировали Азиатская пыль (20-29 апреля) и дым лесных пожаров (03-13 июля 2012 г.). Модельные значения оптической толщи были примерно в 2 раза заниженными по сравнению с измеренными

данными, когда основной вклад в измеряемые значения  $AOD$  вносит крупнодисперсный пылевой аэрозоль. В противоположность этому графики демонстрируют сопоставимые величины  $AOD_f$  и  $AOD_{SULF} + AOD_{SMOKE}$  как в фоновые периоды, так и в случаях доминирования пыли и тонкодисперсного дымового аэрозоля. Это подтверждает высокую точность модельных прогнозов при низких и умеренных нагрузках тонкодисперсных частиц, однако наблюдается большая погрешность оценки  $AOD$  в условиях высокого содержания пыли.

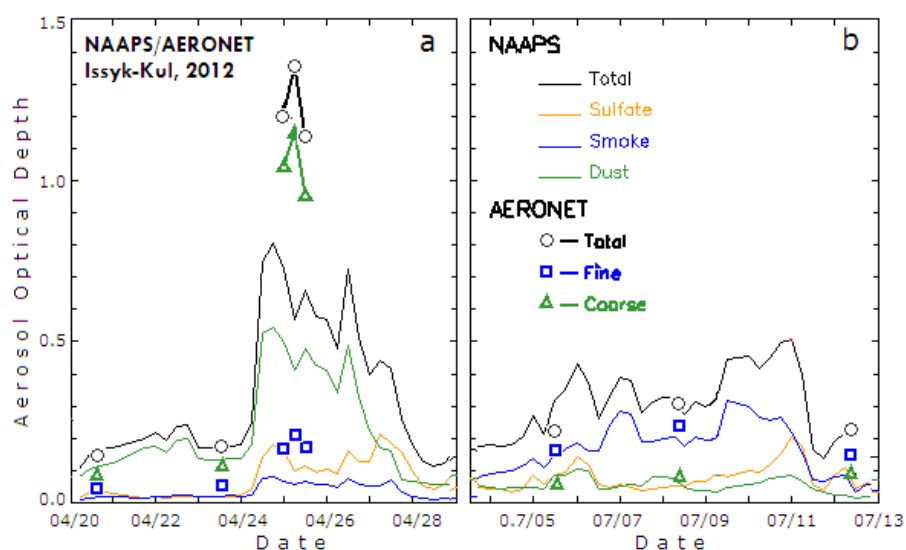


Рис. 7. Временная изменчивость  $AOD$ , восстановленной моделью *NAAPS* и наблюдаемой *AERONET* в условиях преобладания пыли (а) и дыма (б).

**Заключение.** Станция сети *AERONET*, расположенная в Северном Тянь-Шане, и модель распространения компонентов аэрозоля *NAAPS* обеспечили получение уникальных данных о годовой изменчивости аэрозольной оптической толщи, которые были сопоставлены для оценки точности и достоверности результатов моделирования характеристик аэрозоля. Сравнение показало достаточную адекватность восстановления моделью значений *AOD* в условиях наиболее характерных аэрозольных нагрузок атмосферы ( $AOD < 0.5$ ) с абсолютной погрешностью 0.03 и  $R=0.73$ .

Представленные модельные значения оптической толщи основных компонентов аэрозоля (пыль, сульфаты и дым) и результаты классификации частиц по спектральной зависимости ослабления и поглощения также показали хорошее совпадение, и отражают реальный вклад источников загрязнений в регионе. Важным свидетельством надежности оценок моделью относительного вклада мелкодисперсной фракции является согласие между среднемесячными модельными и измеренными значениями *FMF* ( $R=0.82$ ).

Представленные данные являются важной частью экологической информации и позволяют решать задачи контроля качества воздуха, восстанавливая по оптическим данным массовую концентрацию взвешенных частиц, различающихся по размеру, составу и происхождению.

*Автор выражает признательность руководителю научного проекта AERONET доктору Б.Холбену и его группе за поддержку работы станции «Issyk-Kul» и содействие в обработке данных измерений.*

#### Литература:

1. Свердлик Л.Г. Аэрозольное воздействие на перенос радиации и дистанционное лазерное зондирование оптических и физических характеристик атмосферного аэрозоля. Вестник КРСУ. - 2005. Том 5. - №7. - С. 105-108.
2. Свердлик Л.Г. Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля. Наука, новые технологии и инновации. - 2014. - № 4. - С. 26-31.
3. Имашев С.А., Свердлик Л.Г. Вариации температуры атмосферы в период высокой сейсмической активности в Японии в 2011 г. Наука и новые технологии. - 2015. - №1. - С. 15-19.
4. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Динамика температуры тропопавзы в период сейсмической активности в Центральном Тянь-Шане. Наука и новые технологии. - 2015. - №1. С. 23-27.
5. 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.
6. Свердлик Л.Г. Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET). Наука и новые технологии. - 2013. - №3. - С. 3-7.
7. Свердлик Л.Г. Сравнение экспериментальных (AERONET) и модельных (NAAPS) данных годовой изменчивости оптических свойств аэрозоля над северным Тянь-Шанем. Часть 1. Вариации аэрозольной оптической толщины атмосферы. Научный журнал Физика. - 2013. - №3. - С. 81-90.
8. Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F., Dubovik O., Slutsker I. Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET data base. Remote Sens. Environ. - 2000. - 73. 337-349.
9. Dubovik O., Holben B., Eck T.F., Smirnov A., Kaufman Y.J., Tanre D., Slutsker I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. J. Atmos. Sci. - 2002. - 59. - 590-608.
10. Christensen J.H. The Danish Eulerian hemispheric model – A three-dimensional air pollution model used for the Arctic. Atmos. Environ. - 1997. - 31. 4169-4191.
11. Maciszewska A.E., Marcowicz K.M., Witek M.L. A Multiyear Analysis of Aerosol Optical Thickness over Europe and Central Poland Using NAAPS Model Simulation. Acta Geophysica. - 2010. V. 58, no. 6. P. 1147-1163.
12. Eck T.F., B.N. Holben, A. Sinyuk, R.T. Pinker, P. Goloub, H. Chen, B. Chatenet, Z. Li, R.P. Singh, S.N. Tripathi, J.S. Reid, D.M. Giles, O. Dubovik, N.T. O'Neill, A. Smirnov, P. Wang, X. Xia. Climatological aspects of the optical properties of fine/coarse mode aerosol mixtures. J. Geophys. Res. 2010. 115, D19205.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор Каримов К.А.