

УДК 551.510.42:551.521 (575.2) (04)

ДИНАМИКА ЧАСТИЦ АККУМУЛЯЦИОННОЙ МОДЫ ПРИ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ПЕРЕНОСАХ АЭРОЗОЛЯ

Б.Б. Чен – докт. физ.-мат. наук, профессор,

Л.Г. Свердлик – канд. физ.-мат. наук,

С.А. Имашев – аспирант

Проведен анализ спектральных измерений аэрозольной оптической толщины τ_a в диапазоне длин волн от 340 до 870 нм на двух экспериментальных точках Лидарной станции Теплоключенка для типичных случаев трансграничного переноса пылевого и сульфатного аэрозоля на Центральный Тянь-Шань от различных источников загрязнения.

Ключевые слова: пылевой аэрозоль; сульфатный аэрозоль; аэрозольная оптическая толщина; массовая концентрация; солнечный фотометр; лидар; аккумуляционная мода; показатель Ангстрема.

Введение

Известно, что после формирования аэрозолей, например, в процессах сжигания биомассы, сгорания твердого топлива в городских/индустриальных условиях динамические процессы могут привести к изменению во времени структуры распределения частиц по размерам. Так, старение аэрозолей в случае сжигания биомассы приводит к изменениям в распределении аэрозоля по размерам в связи с коагуляцией, конденсацией и процессами перехода “газ-частица” [1]. Подобная изменчивость в распределениях по размерам наблюдалась и у городских (индустриальных) аэрозолей из-за роста частиц при высокой относительной влажности и взаимодействия аэрозоля с облаками [2].

Эти изменения в распределении по размерам различных типов аэрозоля сильно влияют на радиационные свойства аэрозолей, таких, как фазовая функция рассеяния, альbedo однократного рассеяния и, особенно, на спектральное изменение аэрозольной оптической толщины. Характеристика спектральной зависимости аэрозольной оптической толщины τ_a в атмосфере важна для моделирования радиационных эффектов аэрозоля на систему атмосфера-поверхность, восстановления параметров аэрозоля при спутниковом дистанционном зондировании, корректировки эффекта, вносимого аэрозолем при дистанционном зондировании поверхности Земли, а также для определения областей-источников аэрозоля и изменения характеристик аэрозоля во времени.

Показатель Ангстрема α , который является углом наклона зависимости логарифма аэро-

зольной оптической толщины $\ln(\tau_a)$ от логарифма длины волны $\ln(\lambda)$ [3]

$$\tau_a = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad (1)$$

$$\alpha = -\frac{d \ln \tau_a}{d \ln \lambda} = -\frac{\ln\left(\frac{\tau_{a2}}{\tau_{a1}}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)}, \quad (2)$$

обычно используется для характеристики зависимости τ_a от длины волны и получения некоторой общей информации о распределении аэрозольных частиц по размерам, так как α , как известно, характеризует наклон показателя спектрального ослабления и связан с распределением частиц по размерам Юнге.

Этот параметр часто вычисляется на основе спектральных измерений с помощью наземных солнечных фотометров (радиометров), спутниковых и самолетных дистанционных зондирований.

В работе [4] приведен анализ измерений τ_a в диапазоне длин волн от 340 до 1020 нм по данным наземных радиометров сети AERONET, расположенных в различных точках, где преобладают аэрозоли от сжигания биомассы, аэрозоли городского типа или пылевой аэрозоль пустынь. Показано, что имеется значительная кривизна зависимости $\ln(\tau_a)$ от $\ln(\lambda)$ для аэрозоля, у которого в распределении по размерам доминирует аккумуляционная мода (аэрозоль сжигания биомассы и городской аэрозоль). Расчет по теории Ми для частиц дыма при сжигании биомассы хорошо согласуется с наблюдениями, подтверж-

дая тот факт, что большая спектральная изменчивость α является следствием доминирования аэрозолей аккумуляционной моды.

Значительная кривизна зависимости $\ln(\tau_a)$ от $\ln(\lambda)$ с доминирующей аккумуляционной модой для аэрозолей с высокими значениями оптической толщи дает значения α , отличающиеся друг от друга в 3–5 раз в диапазоне длин волн от 340 до 870 нм [4].

Кривизну зависимости $\ln(\tau_a)$ от $\ln(\lambda)$ можно характеризовать второй производной α' [4]

$$\alpha'(\lambda_i) = \frac{d\alpha}{d \ln \lambda} = - \left(\frac{2}{\ln \lambda_{i+1} - \ln \lambda_{i-1}} \right) \left(\frac{\ln \tau_{\alpha_{i+1}} - \ln \tau_{\alpha_i}}{\ln \lambda_{i+1} - \ln \lambda_i} - \frac{\ln \tau_{\alpha_i} - \ln \tau_{\alpha_{i-1}}}{\ln \lambda_i - \ln \lambda_{i-1}} \right). \quad (3)$$

Эта вторая производная зависимости $\ln(\tau_a)$ от $\ln(\lambda)$ показывает относительное влияние аккумуляционной моды по сравнению с частицами крупной фракции на оптические свойства частиц.

Типичные значения α варьируются от >2.0 для “свежих” частиц дыма, в которых доминирует аэрозоль аккумуляционной моды [5], до почти нулевого значения для случаев пылевых аэрозолей, где доминируют частицы крупной фракции [6].

Методика измерений

Измерения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля при трансграничных переносах в район Центрального Тянь-Шаня проведены на двух экспериментальных точках Лидарной станции Теплокюченка. Эти точки расположены таким образом, чтобы максимально фиксировать перенос воздушных масс на Центральный Тянь-Шань от различных источников аэрозольного загрязнения. Так, точка Bishkek_Site в 30 км южнее г. Бишкека расположена в предгорной части до встречи с горными хребтами воздушных потоков с бассейна Аральского моря, Казахстана, Ближнего Востока, перемещающихся через пустыни Кара-Кум и Кызыл-Кум. Точка Lidar_Site (собственно сама Лидарная станция) расположена в высокогорной части Центрального Тянь-Шаня. Перенос аэрозольного загрязнения через эту точку осуществляется не только от вышеуказанных источников, но также и от таких крупных источников, как пустыня Такла-Макан и Южная Азия, которая является одним из крупнейших источников загрязнения, в частности, коричневого облака (смога).

1. *Оптические измерения.* Измерения аэрозольной оптической толщины на 5 длинах волн

(340, 380, 500, 675, 870 нм) проводились с помощью портативного, мультиполосного солнечного фотометра Microtops II Sunphotometer.

Каждый из каналов оборудован узкополосным фильтром и фотодиодом для конкретного диапазона длин волн.

Радиация, собираемая коллиматором и прошедшая оптический фильтр, попадает на фотодиод и затем выдается электрический ток, пропорциональный лучистой энергии, принятой фотодиодом. Эти сигналы сначала усиливаются, а затем преобразуются в цифровые сигналы с помощью АЦП высокого разрешения.

Для достижения лучших результатов прибор может производить серию быстрых измерений в течение одного измерения. Обработка серий измерений позволяет уменьшить погрешности, связанные с нацеливанием на солнце и с шумами. При этом точность прибора составляет 1–2%.

На измерительных точках Lidar_Site и Bishkek_Site в солнечных фотометрах длина сканирования установлена равной 32, что подходит для большинства условий проведения измерений.

Прибор оснащен последовательным интерфейсом, который позволяет передавать данные в виде простого текстового протокола и дистанционно управлять прибором с помощью любого компьютера.

2. *Лидарные измерения.* Методология измерения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля с помощью многоволнового лидара приведена в [7].

3. *Гравиметрические измерения.* Измерения массовой концентрации (микрограмм/м³) приземного аэрозоля проводились с помощью прибора Series 8500 TEOM/FDMS Monitor, который имеет возможность измерять как нелетучие, так и летучие компоненты при скорости прокачки 1 м³/час. Прибор был сконфигурирован аэродинамическим фильтром входного потока для частиц с размерами менее 2,5 микрон, что позволяет измерять как мелкую, так и крупную фракцию аэрозоля.

Для среднечасовой массовой концентрации точность прибора составляет ± 2.5 микрограмм/м³, а минимальный предел измерения массы – 0.06 микрограмм.

Микропроцессорный блок обеспечивает измерения в реальном режиме времени, хранение измеренных данных, а также возможности ввода/вывода – в аналоговом и цифровом (RS232) виде.

4. *Отбор проб воздуха.* Отбор проб взвешенных в воздухе химических веществ в двух

диапазонах размеров частиц (PM10 и PM2.5 с использованием тефлоновых и кварцевых фильтров) производился одновременно на 8 каналах (по 4 канала PM2.5 и PM10), начиная с 8 июля на участке Bishkek_Site и с 14 июля 2008 на участке Lidar_Site, с помощью прибора URG-3000ABC (Medium Volume Particulate Sampler). Приборы работали через день, начиная с 08 часов местного времени. Длительность отбора проб составляла 24 часа (сутки). Перед началом каждого отбора проб проводилась тщательная калибровка нормы потока в каждом из 8 каналов с помощью ротаметра (Rotometer P-03269-80). В каждой пятой по счету серии измерений (один раз в 10 дней) производился фоновый отбор проб.

5. **Химический анализ.** Химический анализ проб воздуха проводился в Университете Мэдисон-Висконсин в рамках партнерского проекта МНТЦ #3715. Были получены данные о массовой концентрации органического, элементного углерода и неорганических компонент аэрозоля.

Анализ результатов

Вынос аэрозоля в район Центрального Тянь-Шаня в период с 4 по 14 августа 2008 г.

Обратные траектории, построенные по лагранжевой модели HYSPLIT-4, показывают (рис.1), что источником этого выноса была пыльная буря в пустыне Такла-Макан.

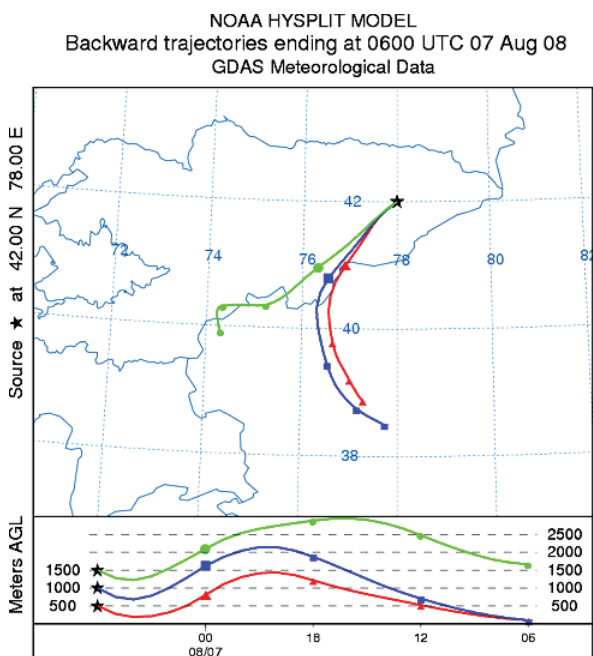


Рис. 1. Обратные траектории HYSPLIT-4. Lidar_Site, 7 августа 2008 г. Уровни высот: 500, 1000 и 1500 м

Наибольшая интенсивность бури наблюдалась в период с 7 по 9 августа 2008 г. Результаты моделирования процесса переноса пылевого аэрозоля в район проведения измерений с использованием концентрационной модели HYSPLIT-4 [8] с входными параметрами для пылевой бури [9] приведены на рис. 2.

1. Динамика аэрозолей в горах (точка Lidar_Site).

Прибор TEOM-FDMS, измеряющий массовую концентрацию аэрозоля в приземном слое, зарегистрировал высокий уровень концентрации частиц PM2.5 в период с 7 по 11 августа 2008 г. (рис. 3).

На рис. 3 и далее цифрами I, II, III и IV обозначены периоды, связанные с особенностями динамики аэрозолей в районе проведения измерений.

I период: Период перед вторжением пыльной бури. Характеризуется фоновыми значениями приземной концентрации частиц размерами менее 2,5 мкм для этого сезона (15–25 мкг/м³). Начало 01-08-2008, 8:00, конец 04-08-2008, 8:00

II период: Период, характеризующий начало вторжения пыльной бури. Характеризуется резким падением температуры приземного слоя и последующим ростом, а также изменением суточного хода оптических характеристик (аэрозольной оптической толщины, параметра Ангстрема, первой производной от параметра Ангстрема и т.д.). В этот период в распределении аэрозоля по размерам преобладала аккумуляционная мода. Начало 04-08-2008, 8:00, конец 07-08-2008, 8:00

III период: Период, характеризующий пик вторжения пыльной бури в район проведения измерений. Характеризуется высокими значениями массовой концентрации частиц PM2.5 (40–100 мкг/м³), увеличением аэрозольной оптической толщины, малыми значениями параметра Ангстрема, близкими к нулю значениями первой производной от параметра Ангстрема. В этот период в распределении аэрозоля по размерам доминировала крупнодисперсная мода, так как пылевой аэрозоль характеризуется именно частицами крупного размера ($R > 0.8 \mu\text{m}$). Начало 07-08-2008, 8:00, конец 14-08-2008, 8:00

IV период: Период, характеризующий конец пылевого вторжения и возврат к фоновым значениям оптических и микрофизических характеристик. Начало 14-08-2008, 8:00.

Солнечный фотометр Microtops II в период III также зарегистрировал повышение концентрации аэрозоля в атмосфере, что отразилось в ви-

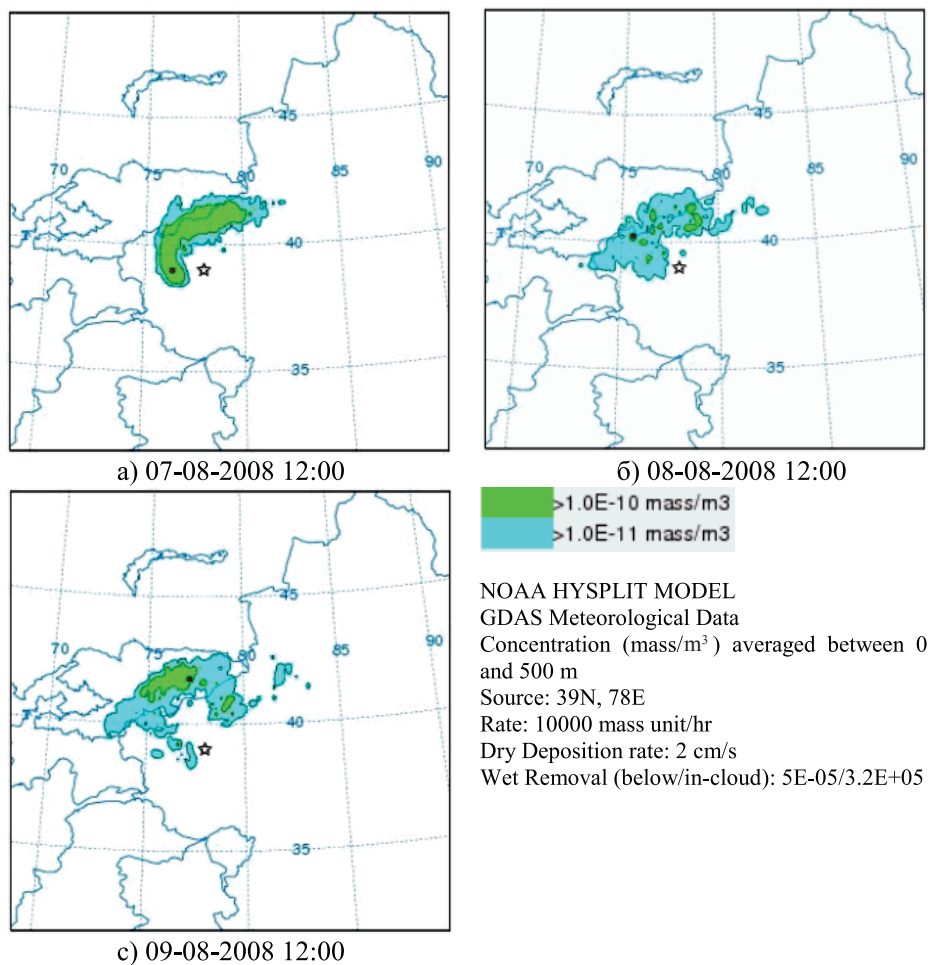


Рис. 2. Пространственно-временное распределение пылевого аэрозоля по модели HYSPLIT-4. Источник – пыльная буря в районе пустыни Такла-Макан (7–9 августа 2008 г.)

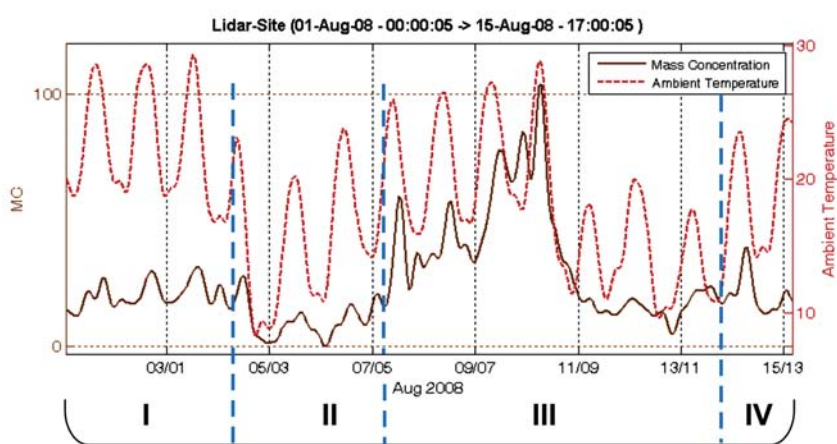


Рис. 3. Массовая концентрация частиц PM_{2,5} и температура воздуха. Lidar_Site, 01–15 августа 2008 г.

де изменения значений аэрозольной оптической толщины по сравнению с фоновыми значениями. Однако использование одних только значений аэрозольной оптической толщины не дает полной информации о структурных изменениях в аэрозольных слоях, в частности об изменениях в распределении частиц по размерам за счет различных процессов (укрупнение, осаждение и т.д.).

На рис. 4 представлен 2-недельный ход аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм и параметр Ангстрема, вычисленный для пары длин волн (500, 375 нм). Как видно из рисунка, значительное увеличение значений аэрозольной оптической толщины происходило именно в период максимальной интенсивности пылевого выноса в район проведения измерений (период III). Однако это не дает информации о характеристиках самого аэрозоля (относительный размер частиц, модальная структура распределения по размерам и т.д.). Использование параметра Ангстрема позволяет получить эту дополнительную информацию. Так, из рисунка видно, что период III характеризовался малыми значениями параметра Ангстрема, по сравнению с периодами I и IV, которые являются фактически фоновыми (период I предшествовал пылевому выносу, а период IV характеризует возврат к фоновому состоянию). Такие малые значения параметра Ангстрема характерны для частиц крупной фракции, а именно пылевого аэрозоля.

Однако, наряду с четко выраженным периодом интенсивности пыльной бури III (изменение массовой концентрации частиц в приземном воздухе, увеличение значений аэрозольной оптической толщины) можно видеть отрезок времени, ха-

рактеризующийся относительно высокими значениями параметра Ангстрема (период II).

Значения параметра Ангстрема, вычисленные по τ_a , измеренным солнечным фотометром, для различных пар длин волн (380_500 нм, 500_675 нм, 675_870 нм) для периода II имеют существенную спектральную изменчивость (рис.5). Подобная спектральная изменчивость α отмечалась в [10] для частиц дыма (частиц аккумуляционной моды) при сжигании биомассы в Бразилии при использовании коротковолновых пар длин волн (340 и 440 нм или 440 и 670 нм), чем α , вычисленный с использованием длинноволновых измерений τ_a .

Именно такое поведение параметра Ангстрема для различных пар длин волн является причиной значительной кривизны зависимости $\ln(\tau_a)$ от $\ln(\lambda)$, что, в свою очередь, указывает на присутствие аккумуляционной моды (аэрозоль сжигания биомассы и/или локальный промышленный аэрозоль).

Характеристика степени кривизны зависимости $\ln(\tau_a)$ от $\ln(\lambda)$ по второй производной α' дает возможность количественно оценить соотношение мелкодисперсных и крупнодисперсных частиц (рис.6).

Чем выше значение этого параметра, тем больше в атмосфере содержание аэрозоля аккумуляционной моды. И, наоборот, значения α' , близкие к нулю, указывают на то, что в распределении частиц по размерам доминируют частицы крупного размера. Относительно пылевого аэрозоля это означает, что распределение перестает быть бимодальным, смещаясь в сторону крупнодисперсных частиц. При этом преобладание ча-

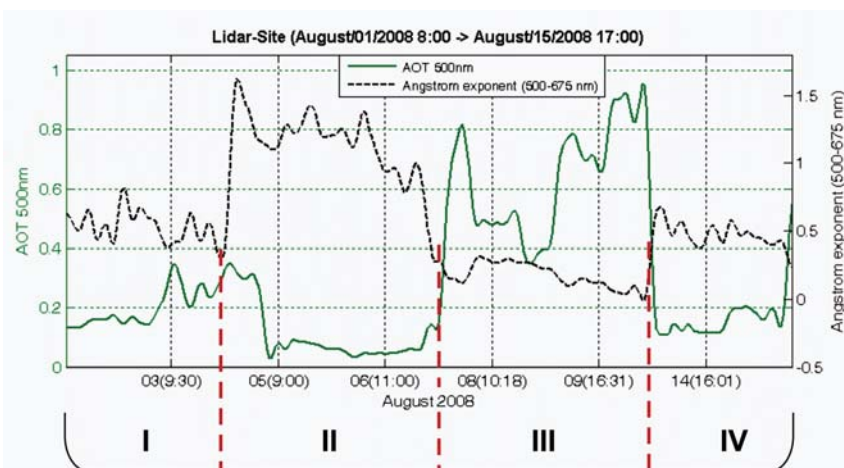


Рис. 4. Аэрозольная оптическая толщина (500 нм) и параметр Ангстрема (500–675 нм). Lidar_Site, 01–15 августа 2008 г.

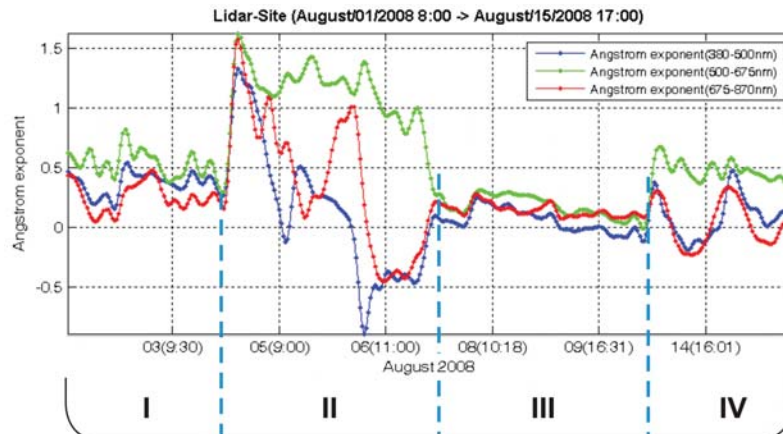


Рис.5. Спектральная изменчивость параметра Ангстрема.
Lidar_Site, 01–15 августа 2008 г.

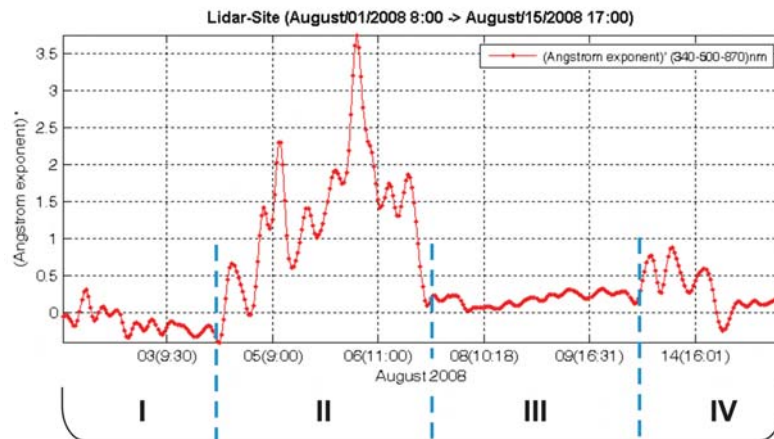


Рис.6. Производная от параметра Ангстрема (340–500–870 нм).
Lidar_Site, 01–15 августа 2008 г.

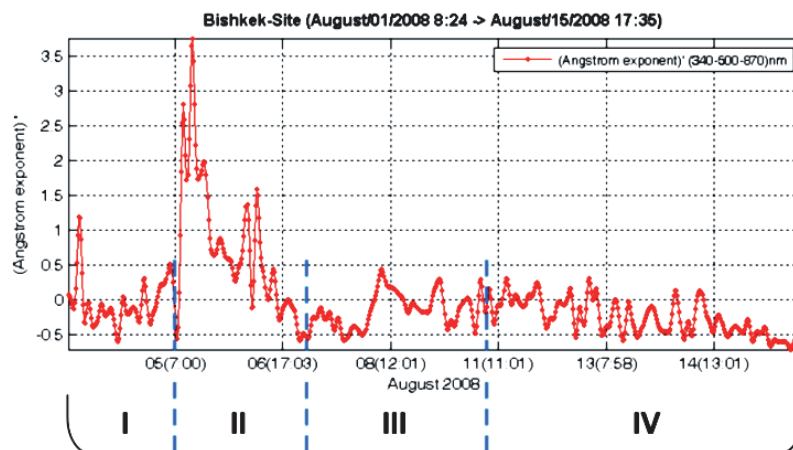


Рис.7. Производная от параметра Ангстрема (340–500–870 нм).
Bishkek_Site, 01–15 августа 2008 г.

стиц размером $r > 0.6 \mu\text{m}$ в пустынном пылевом аэрозоле является основным признаком отличия пылевого аэрозоля от аэрозоля городского типа и аэрозоля сжигания биомассы, которые характеризуются доминированием мелкодисперсной (аккумуляционной) моды [11].

Объемное распределение частиц по размерам пустынной пыли всегда характеризуется бимодальной структурой с преобладанием частиц крупнодисперсной моды. Вероятно, что одна из причин такой бимодальной структуры – это смешение пустынного пылевого аэрозоля с антропогенным загрязнением в пограничном слое атмосферы. Эти загрязнения могут иметь как местное происхождение, так и могут накапливаться при прохождении воздушной массы по траектории переноса [11]. Соответственно, в отличие от городского аэрозоля и аэрозоля при сжигании биомассы, восстановленные оптические характеристики пустынной пыли имеют определенные особенности, например, параметр Ангстрема в этом случае имеет малые значения [12].

2. Динамика аэрозолей в предгорной части Центральной Азии (точка Bishkek_Site).

Периоды, связанные с особенностями динамики аэрозолей при переносе пыли в предгорную часть (точка Bishkek_Site), несколько отличаются от таковых в горах (точка Lidar_Site). Так, началом и концом **I периода** являются соответственно 01-08-2008 8:00 и 05-08-2008 7:00; **II периода** – 05-08-2008 7:00 и 07-08-2008 8:00; **III периода** – 07-08-2008 8:00 и 11-08-2008 9:00 и началом **IV периода** – 11-08-2008 9:00.

Период II, характеризующий начало вторжения в предгорную часть, запаздывает по времени по сравнению с началом этого же периода в горах. Фактически вынос аэрозоля в предгорную часть начался позже на 21–24 часа. Это связано с тем, что из-за особенностей рельефа воздушные массы от источника загрязнения при своем движении накрывают в первую очередь горный район. На рис. 1 и 2а отчетливо видно, как воздушные массы, двигаясь вдоль гор, на границе с Китаем входят в юго-восточную часть Киргизии, огибая местные горные хребты (Борколдой, Жетим и Терской Ала-Тоо) и лишь затем доходят до точки Bishkek_Site.

Этот период для предгорной части также характеризуется существенным увеличением кривизны зависимости $\ln(\tau_a)$ от $\ln(\lambda)$ (рис. 7), а также разбросом в значениях параметра Ангстрема для длин волн 500, 675 и 870 нм (рис. 8), что позволяет говорить о доминировании в этот период частиц аккумуляционной моды в атмосфере.

Из фотометрических данных видно (рис. 9), что источниками больших значений аэрозольной оптической толщины являются именно частицы крупной фракции, присутствующие в пылевом аэрозоле. В частности, это видно на временном ходе аэрозольной оптической толщины (500 нм) и параметра Ангстрема (500–675 нм). В рассматриваемом промежутке времени (особенно в периоды II и III) эти две характеристики идут в противофазе – возрастания параметра Ангстрема (частицы мелкой фракции) соответствуют уменьшению аэрозольной оптической толщины (рис. 4 и 9).

Влияние пылевого вторжения на массовую концентрацию приземного аэрозоля PM 2.5 не так сильно выражено для точки Bishkek_Site (рис. 10). Это, вероятнее всего, является результатом того, что данная точка не находилась на прямом потоке воздушных пылевых масс. Видимо вклад дальнего пылевого вторжения был затенен местными источниками аэрозоля PM2.5 вследствие недостаточно высокой концентрации пылевого аэрозоля, дошедшего до точки Bishkek_Site, а также влияния местных циркуляционных процессов. Однако ход приземной температуры (рис. 10) имеет такой же характер, что и на участке Lidar_Site (рис. 3), а именно, падение температуры перед вторжением и после вторжения.

Причем зачастую это сопровождается увеличением влажности воздуха и выпадением осадков.

Как известно, частицы аккумуляционной моды (0,1–1,0 μm) являются источниками ядер конденсации при образовании облаков [13]. Частицы аккумуляционной моды в основном образуются из первичных выбросов и формирования сульфатов в облаках. Другим возможным источником является коагуляция более мелких частиц и гетерогенная конденсация паров на поверхность аэрозольных частиц. Частицы аккумуляционной моды могут формироваться в облачные капли и достичь существенной массы за счет оксидирования серы [14].

Как группа, мелкодисперсные аэрозоли ($d < 1 \mu\text{m}$) являются кислотными и содержат в основном сульфаты, соединения аммония, углеводороды, элементный углерод (сажу), токсичные металлы и воду в атмосфере [15].

Данные химического анализа проб приземного воздуха для первой половины августа 2008 г. также подтверждают, что источником загрязнения была пылевая буря, для которой характерно большее процентное содержание неорганического аэрозоля по сравнению с органи-

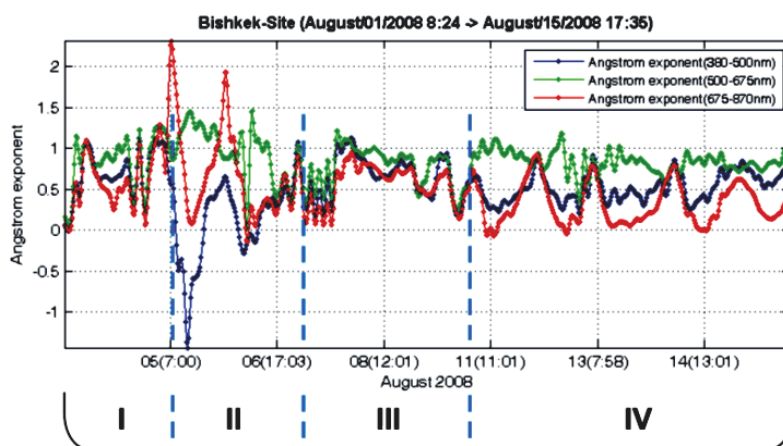


Рис. 8. Аэрозольная оптическая толщина (500, 675 и 870 нм). Bishkek_Site, 01–15 августа 2008 г.

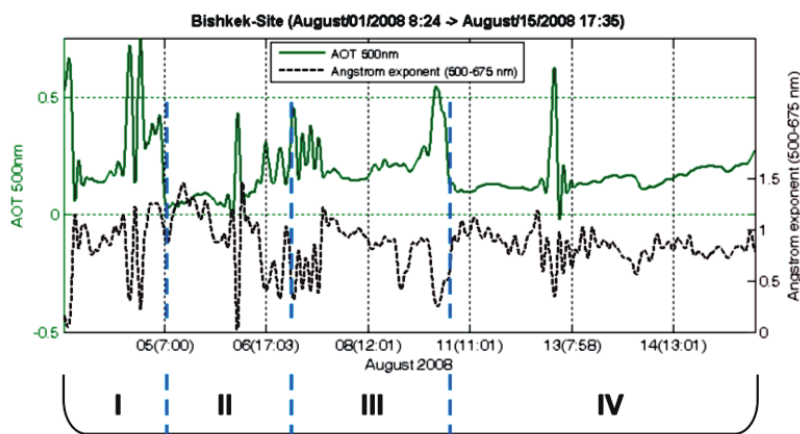


Рис. 9. Аэрозольная оптическая толщина (500нм) и параметр Ангрема (500–675 нм). Bishkek_Site, 01–15 августа 2008 г.

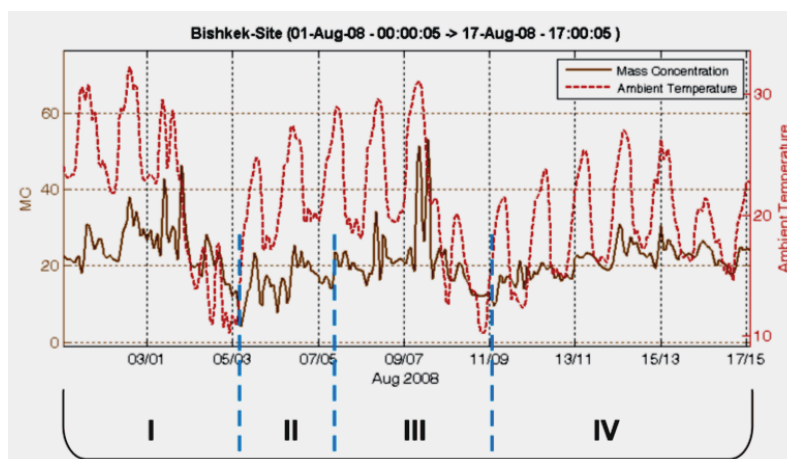


Рис.10. Массовая концентрация частиц PM 2,5 и температура воздуха. Bishkek_Site, 01–15 августа 2008 г.

ческим и элементарным углеродом. В этот период максимальное значение массовой концентрации элементарного углерода достигало $0,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ на точке Lidar_Site и $0,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ на точке Bishkek_Site, а максимальное значение массовой концентрации органического углерода – $5,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ на точке Lidar_Site и $5,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ на точке Bishkek_Site (рис.11). Максимальные же среднечасовые значения концентрации достигали $100\text{--}100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ на участке Lidar_Site и $50\text{--}55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ на участке Bishkek_Site.

В период максимальной интенсивности пылевой бури процентное содержание неорганических частиц в общей массе приземного аэрозоля составило 85% на Lidar_Site и 65% на Bishkek_Site, что типично для случаев дальнего пылевого переноса.

Повышенное содержание неорганических компонент аэрозоля в точке Lidar_Site по сравнению с точкой Bishkek_Site связано с разной удаленностью точек наблюдения от источника загрязнения (первая точка расположена ближе к источнику).

3. Вынос аэрозоля на Центральный Тянь-Шань в сентябре 2008 г.

В период с 01 сентября по 14 октября 2008 г. на участке Bishkek_Site наблюдалось заметное увеличение содержания пылевого аэрозо-

ля в атмосфере. Максимальные среднечасовые концентрации частиц достигали значений $55\text{--}60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, что являлось следствием как продолжительного периода теплой сухой погоды (дневная $T_{\text{air}}=15\text{--}25^\circ\text{C}$), так и эмиссии аэрозоля из пустынных районов Африканского континента (Сахара), Ближнего Востока, Китая (Такла-Макан) и Казахстана (бассейн Аральского моря). Данные о средних значениях аэрозольных характеристик, типах и источниках частиц во время основных переносов в сентябре-октябре 2008 г. сведены в таблице. Левые колонки АОТ и PM2.5 относятся к участку Bishkek_Site, правые – Lidar_Site.

Заметим, что в отдельных случаях приборы TEOM/FDMS на Lidar_Site регистрировали обычные фоновые значения концентрации частиц, что свидетельствует об отсутствии осаждения аэрозоля на подстилающую поверхность.

Из таблицы следует, что на обеих точках массовая концентрация частиц достигала пиковых значений 18–19 сентября, что совпадает по времени с выносом пылевого аэрозоля из пустыни Сахара через Ближний Восток и Аральский бассейн (рис. 12). Одновременно происходил вынос сульфатного аэрозоля из Северо-Восточного Казахстана. Спустя день (20–21 сентября) прекратился вынос пыли, остался только вынос сульфатного аэрозоля.

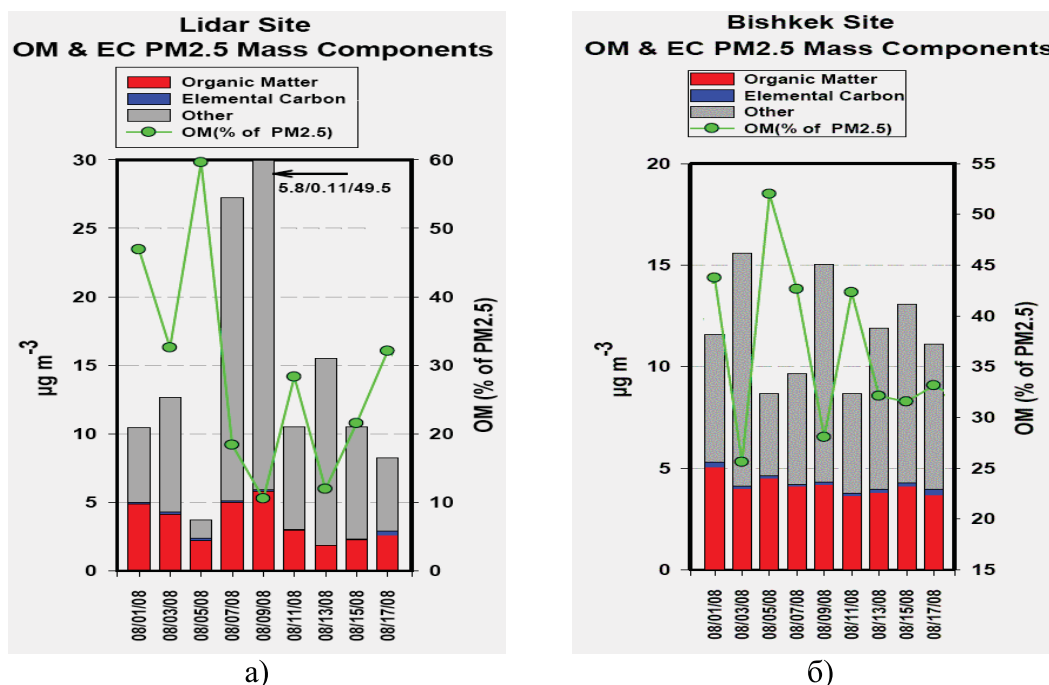


Рис. 11. Массовая концентрация аэрозольных компонент PM 2,5 на участках Lidar_Site (а) и Bishkek_Site (б). 1–8 августа 2008 г.

Дата	АОТ		PM2.5 ($\mu\text{g m}^{-3}$)		Тип аэрозоля, источник
Сентябрь					
02-03	0.37±0.2	0.21±0.06	49.2±1.8	-	Сульфаты, Европа, Казахстан
10-11	0.30±0.08	0.25±0.05	41.8±2.7	-	Пыль, Такла-Макан
18-19	0.28±0.1	0.21±0.04	45.40	16.0±6.8	Пыль, Сахара, Ближний Восток, Аральский бассейн
24-25	0.26±0.04	0.36±0.13	38.20	9.8±3.0	Пыль, Такла-Макан
Октябрь					
02-04	0.26±0.06	0.17±0.01	26.4±11.0	7.9±1.7	Пыль, Сахара, Ближний Восток
10-12	0.17±0.10	0.24	33.4±7.5	7.1±2.7	Пыль, Сахара, Ближний Восток
17-18	-	0.16±0.07	-	6.5±3.5	Пыль, Аральский бассейн
23-24	-	0.26±0.07	-	6.0±2.5	Пыль, Сахара, Ближний Восток, Аральский бассейн
28-31			-	5.9±2.2	Сульфаты, Европа, Казахстан

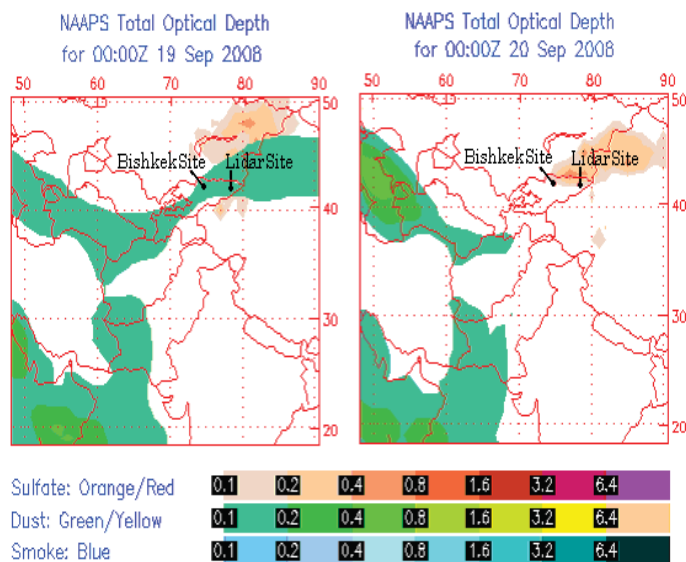


Рис. 12. Данные аэрозольной модели NAAPS. 19–20 сентября 2008 г.

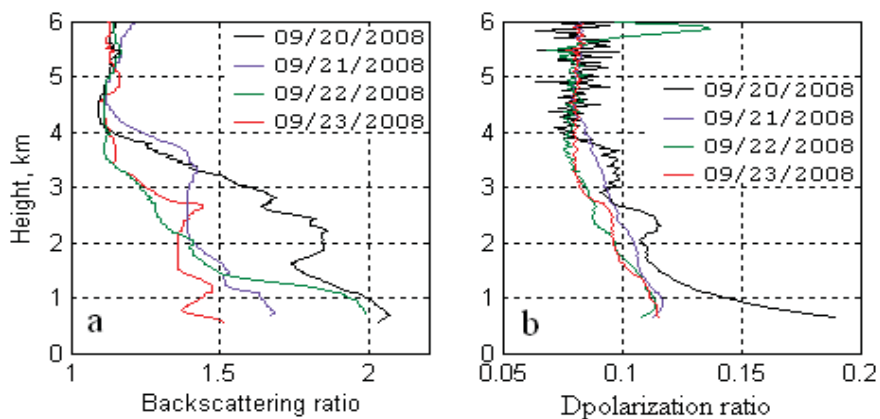


Рис. 13. Вертикальные профили отношения рассеяния (а) и деполяризации (б) 20–23 сентября 2008 г.

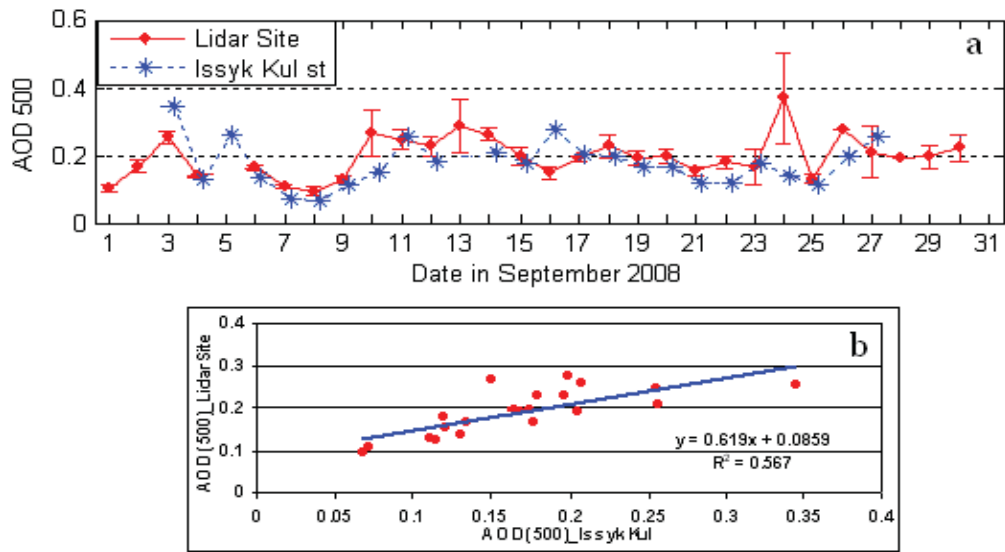


Рис.14. Сравнение данных AOT_500, полученных на точке Lidar_Site и станции Иссык-Куль (AERONET).

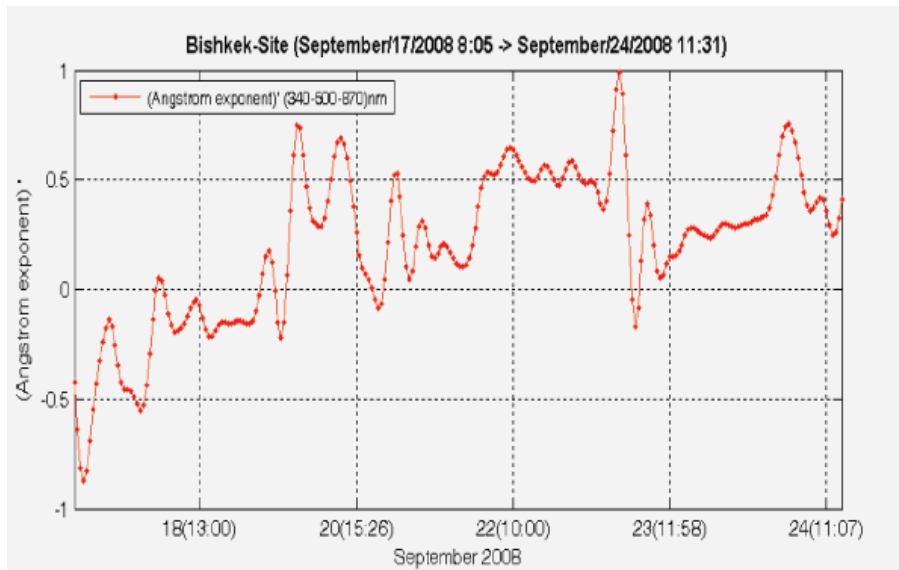


Рис. 15. Производная от параметра Ангстрема (340–500–870 нм) Bishkek_Site. 17–24 сентября 2008 г.

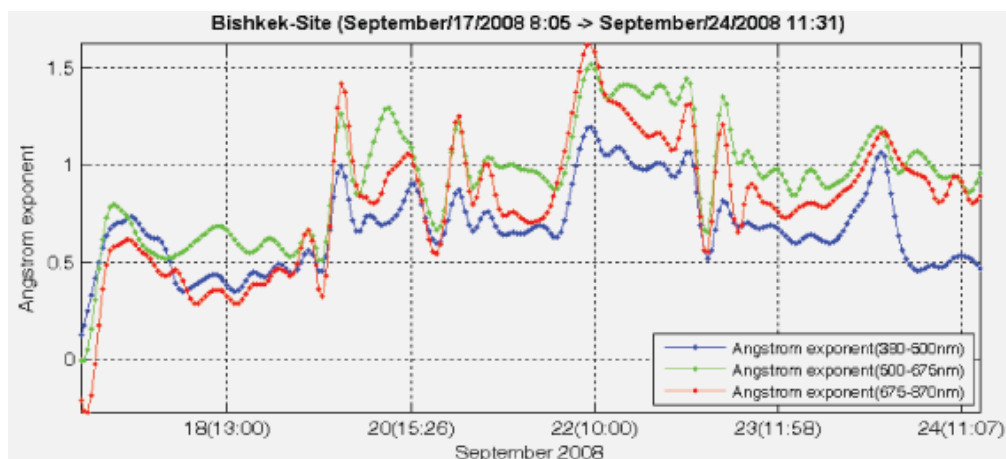


Рис. 16. Параметр Ангстрема (380–500, 500–675 и 675–870нм) Bishkek_Site. 17–24 сентября 2008 г.

Временную трансформацию аэрозоля в слое атмосферы до высоты 6 км иллюстрируют вертикальные профили отношения рассеяния и деполяризации 20–23 сентября 2008 г. по данным лидарного зондирования на Lidar_Site (рис. 13). Как видно, аэрозольное загрязнение тропосферы было ограничено высотами от 3.5 до 4.5 км и характеризовалось сравнительно высокими значениями деполяризации 20-го сентября и умеренными значениями деполяризации ($D=0.08 - 0.12$) в остальные дни. Т.е. наблюдаемые 21–23 сентября аэрозольные слои состояли из тонкодисперсных частиц, что является типичным для сульфатного аэрозоля, образованного в результате сгорания топлива.

Сравнение результатов измерения АОТ на точке Lidar_Site на длине волны 500 нм с данными, полученными солнечным фотометром CIMEL CE 318-2 на станции Иссык-Куль, входящей в сеть AERONET [16], приведено на рис. 14.

Расстояние между указанными точками составляет примерно 100 км по прямой линии. Видно, что результаты измерений АОТ₅₀₀ хорошо согласуются между собой (коэффициент регрессии $R^2=0.567$).

Поведение производной от параметра Ангстрема в точке Bishkek-Site 17–24 сентября 2008 г. показывает сильную изменчивость во времени, что является причиной сложного состава аэрозольного образования (рис. 15). Данные модели NAAPS показали (рис. 12), что в этот период основными компонентами такого смешанного образования были пыль и сульфаты. В период с 17–19 сентября 2008 г. доминировали частицы пыли (крупная фракция), затем в эту

воздушную массу добавились сульфаты, которые для региона Средней Азии являются в основном результатом сгорания твердого топлива и имеют размеры частиц в субмикронном диапазоне.

Поведение самого параметра Ангстрема также показывает смешанность крупных частиц, таких как пыль (малые значения параметра Ангстрема) и мелких частиц, таких как сажа и сульфаты (более высокие значения параметра Ангстрема). Это хорошо видно на рис. 16.

Выводы и заключение

Проведена градация динамики аэрозоля при трансграничных переносах по значениям массовой концентрации $PM_{2.5}$, измеренным с помощью прибора TEOM/FDMS, и температуре воздуха. Выделены 4 периода в динамике аэрозоля: период перед вторжением пыльной бури на Центральный Тянь-Шань, начало вторжения, пик вторжения и конец пылевого вторжения.

Период перед вторжением пыльной бури характеризуется фоновыми значениями приземной концентрации частиц размерами менее 2,5 мкм.

Начало вторжения сопровождается резким падением температуры приземного слоя и ее последующим ростом и изменением суточного хода оптических характеристик. Наблюдается существенная спектральная изменчивость параметра Ангстрема, вычисленного для различных коротковолновых пар длин волн (380–500 нм, 500–675 нм, 675–870 нм). Такая спектральная изменчивость параметра Ангстрема отмечается для частиц антропогенного аэрозоля (в нашем случае преимущественно сульфатного аэрозоля). Отмечающаяся значительная кривизна зависимости $\ln(\tau_a)$ от $\ln(\lambda)$, в свою очередь, указывает

на присутствие в этот период частиц аккумуляционной моды.

Пик вторжения пыльной бури на Центральный Тянь-Шань характеризуется высокими значениями массовой концентрации аэрозольных частиц PM_{2,5}, увеличением τ_a , малыми значениями α . В этот период в распределении аэрозоля доминирует крупнодисперсная мода, то есть пылевой аэрозоль.

В конце пылевого вторжения происходит возврат к фоновым значениям оптических и микрофизических характеристик аэрозоля.

Оценка степени кривизны зависимости $\ln(\tau_a)$ от $\ln(\lambda)$ по второй производной (3) позволяет количественно оценить соотношение мелкодисперсных и крупнодисперсных частиц. Так, получено, что чем выше значение этого параметра, тем больше содержание аэрозоля аккумуляционной моды в атмосфере. И, наоборот, значения α' , близкие к нулю, указывают на то, что в распределении частиц по размерам доминирует крупнодисперсный аэрозоль. Относительно пылевого аэрозоля это означает, что распределение частиц по размерам перестает быть бимодальным, смещаясь в сторону крупнодисперсных частиц. Преобладание частиц размером $r > 0.6 \mu\text{m}$ в пустынном пылевом аэрозоле является основным признаком отличия пылевого аэрозоля от антропогенного сульфатного аэрозоля, характеризующегося доминированием аккумуляционной моды.

В то же время следует отметить, что часто наблюдается одновременный перенос на Центральный Тянь-Шань пыли и соли и антропогенного сульфатного аэрозоля. В таких случаях распределение частиц по размерам обычно характеризуется бимодальной структурой с преобладанием частиц крупнодисперсной моды.

Химический анализ проб воздуха подтверждает тот факт, что для пыли характерно большее содержание неорганического аэрозоля, чем органического и элементного углерода (сажа). В период максимальной интенсивности пыльной бури процентное содержание неорганических частиц в общей массе приземного аэрозоля составляет 65–85%, что является типичным для дальнего переноса пыли.

Работа поддержана Международным научно-техническим центром (Проект МНТЦ 3715).

Литература

1. Reid, J.S., P. V. Hobbs, R. J. Ferek, D. R. Blake, J. M. Martins, M. R. Dunlap and C. Liou. Physical, chemical and optical properties of regional hazes dominated by smoke in Brazil // *J. Geophys. Res.*, 103, 32,059-32, 080, 1998.
2. Remer, L.A., Kaufman Y.J., Holben B.N., Thompson A.M. and McNamara D.P. Biomass burning aerosol size distribution and modeled optical properties // *J. Geophys. Res.*, 103, 31,879-31,891, 1998.
3. Angstrom A. On the atmospheric transmission of Sun radiation and on dust in the air, *Geogr. Ann.*, v.12, 130-159, 1929.
4. Eck T.F., Holben B.N., Reid J.S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N.T., Slutsker I. and Kinne S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols, // *Journal of Geophysical Research*, Vol 104, 24, 31, 333-31,349, 1999.
5. Kaufman Y.J., Setzer A., Ward D., Tanre D., Holben B.N., Menzel R., Pereira M.C. and Rasmussen R. Biomass burning airborne and space borne experiment in the Amazonas (BASE-A) // *J. Geophys. Res.*, 97, 14,581-14,599, 1992.
6. Holben B.N., Eck T.F. and Fraser R.S. Temporal and spatial variability of aerosol optical depth in the Sahel region in relation to vegetation remote sensing // *Int. J. Remote Sens.*, 12, 1147-1163, 1991.
7. Chen B.B., Sverdlik L.G., Kozlov P.V. Optics and Microphysics of Atmospheric Aerosol. – Bishkek: Ed. KRSU, 222 p., 2004.
8. Escudero M., Stein A., Draxler R.R., Querol X., Alastuey A., Castillo S., Avila A. Determination of the contribution of Northern Africa dust source areas to PM10 concentrations over Central Iberian Peninsula using the HYSPLIT model // *J. Geophys. Res.*, 111, 2005.
9. Arimot, R. Eolian dust and climate: relationships to sources, tropospheric chemistry, transport and deposition // *Earth science reviews*, 54, 29-42, 2001.
10. Reid J.S., Eck T.F., Christopher S.A., Hobbs P.V. and Holben B.N. Use of the Angstrom exponent to estimate the variability of optical and physical properties of aging smoke particles in Brazil // *J. Geophys. Res.*, 1999.
11. Dubovik O., Holben B.N., Eck T.F., Smirnov A., Kaufman Y.J., King M.D., Tanre D. and Slutsker I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // *J. Atmosph. Sci.*, V.59, 590-608, 2002.
12. Aculinin A. Variation of aerosol optical and microphysical properties in Kishinev during the saharan dust outbreak into Europe on October 30, 2001 // *Moldavian Journal of the Physical Sciences*, Vol. 5, N2, 2006.

13. *Anttila T. and Kerminen V.-M.* On the contribution of Aitken mode particles to cloud droplet populations at continental background areas – a parametric sensitivity study // *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4625-4637, 2007.
14. *Komppula M.* New particle formation and its connection with cloud droplet population in a remote continental site in Northern Finland // *Report series in aerosol science*, 75, 2005.
15. *Hinds, W.* *Aerosol Technology*. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc. 1999.
16. <http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/>