

## МИНЕРАЛЬНАЯ ПЫЛЬ И РАДИАЦИОННЫЙ ФОРСИНГ НАД ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИЕЙ

С.И.Попель<sup>1,3</sup>, Б.Б.Чен<sup>2</sup>, В.В.Адушкин<sup>3</sup>, П.Г. Вайдлер<sup>4</sup>,  
С.А. Имашев<sup>2</sup>, Т.В.Лосева<sup>3</sup>, Л.Г.Свердлик<sup>2</sup>, Ф.Фридрих<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований Российской академии наук

<sup>2</sup>Кыргызско-Российский Славянский Университет

<sup>3</sup>Институт динамики геосфер Российской академии наук

<sup>4</sup>Karlsruhe Institute of Technology, Campus North, Germany

E-mail: s\_i\_popel@mail.ru

**Аннотация.** Проведено комплексное исследование, характеризующее роль и радиационные проявления мелкомасштабного аэрозоля над регионом Центральной Азии. Расчеты аэрозольного радиационного форсинга выполнены на основе методики, учитывающей особенности Азиатского региона и используемого оборудования на измерительных точках сети обсерваторий UNEP/NOAA «Аэрозоль-Химия-Климат», в которую входит высокогорный лидарный комплекс Теплоключенка в Центральном Тянь-Шане. Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля, используемые в рамках расчетов, восстановлены по данным указанного лидарного комплекса. Исследована роль слоев аэрозольного загрязнения в изменении потоков излучения в атмосфере и на подстилающей поверхности. Показано, что при нарушениях радиационного фона в климатической системе происходит перераспределение энергии, вследствие чего возникают погодные (климатические) аномалии, в которых важную роль играет аэрозольное загрязнение атмосферы. Наибольший радиационный эффект аэрозоля в атмосфере Центральной Азии достигается в присутствии Атмосферных Коричневых Облаков.

### 1. Введение

Мелкодисперсные частицы фундаментальным образом воздействуют на климат и биосферу из-за их влияния на процесс распределения солнечной энергии над поверхностью Земли. Они задерживают солнечное излучение поглощением и отражением еще до того, как оно достигнет поверхности, и вызывают

нарушение температурного цикла, цикла осадков и циклов производства биомассы. Поглощение приводит к нагреву атмосферы. Мелкодисперсные частицы инициируют конденсацию в облаках. Увеличение числа капель в облаке усиливает эффект отражения солнечного света (делает облака светлее), что также приводит к затемнению и охлаждению поверхности.

В настоящее время, от выделений в атмосферу загрязнителей, в частности, черного углерода страдают, прежде всего, развивающиеся страны Азии, Африки и Южной Америки. Наиболее критическое состояние отмечается у азиатских стран, где наблюдается такое явление, как Атмосферные Коричневые Облака (аббревиатура ABC от английского Atmospheric Brown Cloud), представляющие собой скопления загрязненного воздуха регионального масштаба, которые состоят из большого количества мелкомасштабных частиц сажи, сульфатов, нитратов, зольной пыли и других загрязнителей [1, 2].

В настоящее время в рамках российско-кыргызско-германского сотрудничества проводятся исследования по аэрозольным частицам,

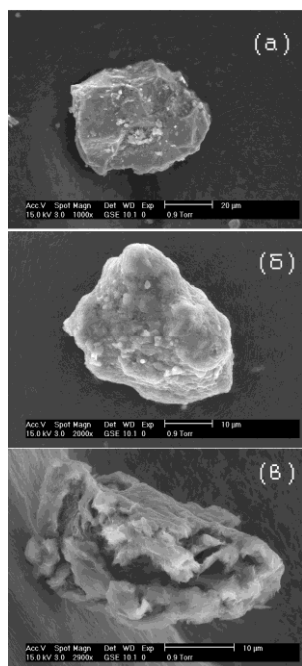


Рис.1. Электронные изображения, иллюстрирующие морфологию минеральных аэрозольных частиц над территорией Киргизии.

Атмосферным Коричневым Облакам и их проявлениям в Центральной Азии. Ведутся как экспериментальные, так и теоретические работы.

Описание методики сбора и анализа нано- и микромасштабных частиц над Киргизией представлено в статье [3]. Одним из основных компонентов атмосферного аэрозоля в Центральной Азии является минеральная пыль. На рис. 1

приведены примеры фотографий, иллюстрирующие морфологию аэрозольных минеральных частиц. Видна существенная роль адгезии, которая приводит к тому, что более мелкие частицы удерживаются на более крупных.

Азиатский минеральный аэрозоль является одним из самых существенных источников неопределенности в оценке аэрозольного радиационного форсинга. Это связано с тем, что смесь тяжелого воздушного загрязнения над Азиатским континентом и сезонное увеличение частиц пыли пустынь в результате сказываются сложным образом на оптических свойствах аэрозоля. В данной работе представлены количественные оценки аэрозольного радиационного форсинга на основе экспериментальных данных о физических и оптических свойствах аэрозоля при переносах загрязнения в Центральную Азию.

Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля восстановлены по данным высокогорного лидарного комплекса Теплоключенка Кыргызско-Российского Славянского университета в Центральном Тянь-Шане. Для их нахождения использовались сигналы обратного рассеяния многоволнового лидара ( $\lambda = 355, 532, 1064$  нм), имеющего каналы поляризации ( $\lambda = 532$  нм) и комбинационного (Рамановского) рассеяния атмосферным азотом ( $\lambda = 387$  нм). В непосредственной близости от высокогорного лидарного комплекса проводились измерения полной аэрозольной оптической толщины на пяти длинах волн ( $\lambda = 340, 380, 500, 675$  и  $870$  нм) с помощью солнечного фотометра и озонметра Microtops II. Фотометрические измерения синхронизировались по времени с работой лидара. Существенное внимание уделялось специальным наблюдениям, которые проводились во время аномальных событий, характеризующихся значительным изменением оптического состояния атмосферы (пылевые выносы, АВС).

Значение аэрозольного радиационного форсинга на высоте  $z$  в атмосфере определяется как разность радиационных балансов  $Q(z)$  на этой высоте с учетом аэрозоля  $\tau$  и без него ( $\tau = 0$ ). Здесь  $\tau$  – аэрозольная оптическая толщина. Разность значений аэрозольного радиационного форсинга на границах атмосферы характеризует поглощение солнечного излучения атмосферой. Величина аэрозольного радиационного форсинга зависит от зенитного угла Солнца  $\theta$ , оптических параметров аэрозоля (главным образом, от

оптической толщины  $\tau$  и альbedo однократного рассеяния аэрозоля  $\omega$ ), а также от альbedo поверхности и влагосодержания атмосферы.

Расчеты аэрозольного радиационного форсинга проводились на основе методики, учитывающей особенности Азиатского региона и используемого оборудования на измерительных точках сети обсерваторий UNEP/NOAA «Аэрозоль-Химия-Климат», в которую входит лидарный комплекс Теплоключенка. Согласно этой методике, среднесуточный аэрозольный форсинг на поверхности Земли ( $R_{af}(0)$ ) и на верхней границе атмосферы ( $R_{af}(\infty)$ ) рассчитываются по формулам

$$R_{af}(0) = -\beta_0 \tau, \quad (1)$$

$$R_{af}(\infty) = -\beta_\infty \tau, \quad (2)$$

$$\beta_0 = C_0 \{ (1-A) [1 - \omega(f - \nu\gamma)] - \omega b A (1 - 2\nu) \}^h, \quad (3)$$

$$\beta_\infty = C_\infty \left\{ \omega(b + \nu\gamma) - 2A \left[ 1 - \omega f - \left( 1 - \frac{1+2\gamma}{2} \omega \right) \nu \right] \right\}^h, \quad (4)$$

$$f = \frac{1+\gamma}{2}, \quad b = \frac{1-\gamma}{2}, \quad (5)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{3} \langle \cos \theta \rangle_{daytime} \right), \quad (6)$$

где  $A$  – альbedo поверхности,  $f$  и  $b$  – коэффициенты прямого и обратного рассеяния, вычисляемые на основе фактора асимметрии  $\gamma$ , представляющего собой средний косинус индикатрисы рассеяния; постоянная  $\nu$  позволяет делать корректировку на зенитный угол  $\theta$  с учетом сезонного и широтного изменений потоков солнечного излучения, угловые скобки в (6) означают усреднение по времени в течение светлого времени суток;  $h$  – эмпирическая величина для корректировки малых нелинейных эффектов;  $C_0 = T_0 SD / R^2$  и  $C_\infty = T_0 C_0$  – постоянные, учитывающие переход от радиационных потоков в широкополосном диапазоне, зависящих от места и времени проведения измерений, к

эффективной длине волны;  $S = 1370 \text{ Вт/м}^2$  – солнечная постоянная,  $D$  – часть светлого времени суток,  $R$  – расстояние от Земли до Солнца в астрономических единицах,  $T_0$  – широкополосное пропускание в атмосфере без аэрозоля, но с учетом молекулярного рассеяния и поглощения озоном и водяным паром.

Скорость нагрева для каждого слоя рассчитывалась по формуле

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{g}{c_p} \frac{\Delta F_{Atm}}{\Delta p}, \quad (7)$$

где  $T$  – температура,  $g$  – ускорение свободного падения,  $c_p$  ( $= 1004 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$ ) – теплоемкость сухого воздуха,  $F$  – суммарный поток излучения (во всем интервале длин волн),  $p$  – давление.

Расчеты аэрозольного радиационного форсинга проводились для летних условий 2012 г., когда вынос аэрозольного загрязнения происходил, в основном, из бассейна Аральского моря. Что касается других источников, следует отметить пустыню Такла-Макан. Однако за весь летний период вынос загрязнения из этой пустыни наблюдался только в течение 3-х дней (7-9 августа). Летний период 2012 г. характеризовался тем, что теплый и малоподвижный высотный гребень повышенного давления в средних широтах препятствовал зональному переносу, создавая меридиональное направление течений в тропосфере и отклоняя движение воздушных масс от зонального (западно-восточного) направления. Высотный гребень со временем распространялся на север, охватывая все большую территорию, включающую весь Центральноазиатский регион. В это время в тропосфере происходило накопление загрязнения. Погода при этом наблюдалась конвективно-безразличная, поэтому активного переноса загрязнения в другие регионы не происходило.

Как было показано, наибольший радиационный эффект аэрозоля в атмосфере достигается в присутствии АВС и превышает радиационный эффект от присутствия минеральной пыли в 2 раза, что связано с присутствием антропогенных частиц с сильным поглощением (низким значением альбеда однократного рассеяния).

На рис. 2 представлены расчеты аэрозольного радиационного форсинга при различных видах переноса. Во всех случаях наблюдается дополнительный нагрев слоев аэрозольного

загрязнения, что приводит к повышению устойчивости атмосферы, т.е. к уменьшению вероятности развития процесса облакообразования и повышению уровня конденсации. А поскольку подстилающая поверхность охлаждается, то происходит ее иссушение. При сохранении таких условий в течение длительного времени, как это было на протяжении всего лета 2012 г., наступает засушливый период (засуха).

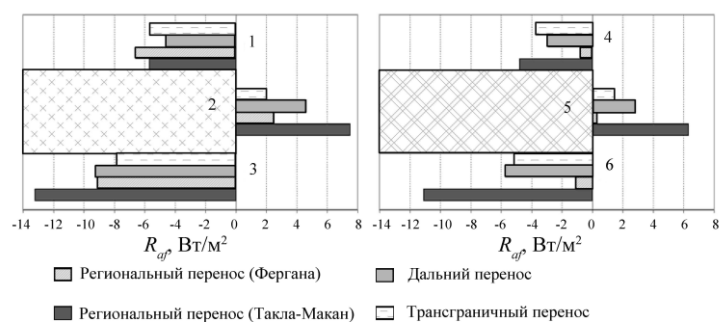


Рис.2 Аэрозольное радиационное воздействие на верхней границе атмосферы (1), в толще атмосферы (2), на подстилающей поверхности (3) и в самих слоях переноса загрязнения (на верхней границе слоя (4), в самом слое атмосферы (5) и на нижней границе слоя (6)) при различных видах переноса.

Итак, при нарушениях радиационного фона в климатической системе происходит перераспределение энергии, вследствие чего возникают погодные (климатические) аномалии, в которых важную роль играет аэрозольное загрязнение атмосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 14-05-90106\_Киргизия\_а) и Международного научно-технического центра (проект № KR–2105).

### Литература

1. V. Ramanathan, P.J. Crutzen. // Atmospheric Environment, 2003, v. 37, No. 28, с. 4033.
2. В.В. Адушкин, С.И. Попель, Б.Б. Чен, П.Г. Вайдлер, Ф. Фридрих. // Докл. РАН, 2012, т. 447, № 4, с. 440.