

Э.В. Макиенко, Р.Ф. Рахимов, Ю.А. Пхалагов, В.Н. Ужегов

Микрофизическая интерпретация аномальной спектральной зависимости аэрозольного ослабления излучения на приземной трассе

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 2.10.2003 г.

Анализируются возможные причины формирования достаточно редко наблюдаемой в приземном слое аномальной спектральной зависимости коэффициента аэрозольного ослабления, возникшей с приходом арктической воздушной массы. Результаты решения обратной задачи показали, что вторжение арктического воздуха проявилось в дисперсной структуре аэрозоля резким снижением содержания частиц аккумулятивной фракции, сужением среднедисперсной фракции и смещением спектра размеров в целом в область более мелких частиц. При наиболее выраженной аномалии оптический вклад аккумулятивной фракции частиц в ослабление видимого излучения уменьшился до пренебрежимо малого уровня. Оптический вклад грубодисперсных аэрозолей ($r > 2$ мкм) в интервале длин волн 0,44–1,06 мкм имеет спектральный ход коэффициента аэрозольного ослабления, близкий к нейтральному. В этих условиях среднедисперсные частицы интервала размеров 0,3–1,8 мкм с основной модой распределения геометрического сечения частиц по размерам около 0,6 мкм и размытым вторым максимумом около 1,4 мкм определили в целом аномальную спектральную зависимость измеренных коэффициентов аэрозольного ослабления.

Введение

В сентябре 2002 года в районе г. Томска наблюдался весьма редкий для приземных дымок случай аномальной спектральной зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления излучения $\beta_e(\lambda)$ в видимом диапазоне длин волн [1]. Причем формирование аномальной спектральной зависимости совпало по времени с процессом смены воздушной массы (ВМ), обогащенной дымовыми аэрозолями, на арктическую ВМ, приход которой сопровождался резким понижением температуры приземного слоя атмосферы примерно на 20 °С. Максимум аэрозольного ослабления, обычно расположенный в фиолетовой части спектра ($\lambda \leq 0,44$ мкм), сместился в область $\lambda \approx 0,8 \pm 1,4$ мкм.

Возможные причины возникновения нетипичного спектрального хода аэрозольной оптической толщи $\tau_a(\lambda)$ атмосферы, впервые зафиксированного С.Ф. Родионовым [2], подробно анализировались в серии работ [3–5]. Было показано, что специфический спектральный ход $\tau_a(\lambda)$ можно объяснить особенностями микрофизического состава аэрозоля, характерного для относительно чистого воздуха. Обнаружение аномального спектрального хода $\beta_e(\lambda)$, при осреднении данной величины на приземных горизонтальных трассах в средних широтах, — еще более уникальное событие. В теплые сезоны года формирование дисперсного состава аэрозолей вблизи подстилающей поверхности обычно протекает на фоне эмиссии аэрозолеобразующих соединений от различных источников. Поэтому в эпизо-

дах резкого понижения содержания частиц аккумулятивной фракции в составе приземной дымки их дефицит относительно быстро восполняется непосредственной близостью локальных источников, а также активностью процесса внутриагосферного кинетического развития оптически малоактивной микродисперсной фракции.

На рис. 1 представлены средняя за сентябрь спектральная зависимость коэффициентов аэрозольного ослабления $\bar{\beta}_e(\lambda)$ (кривая 1) со среднеквадратическими отклонениями и несколько единичных спектров, полученных в период смены задымленной воздушной массы на арктическую (кривые 2–5).

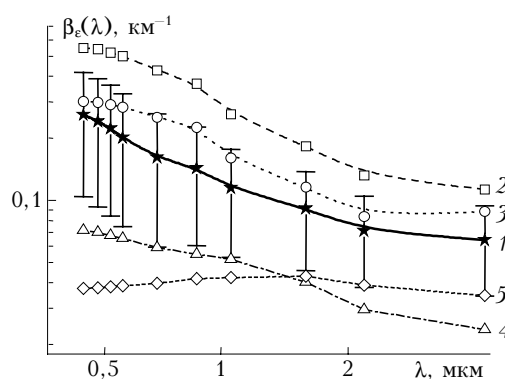


Рис. 1. Измеренные спектральные зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления: 1 — среднее за сентябрь; 2–5 — единичные реализации, полученные 12.09 в 13 ч; 13.09 в 7 ч; 14.09 в 7 ч и 14.09 в 17 ч соответственно

Как видно из рис. 1, кривая 2, измеренная 12 сентября в 13 ч (по местному времени), во всем спектральном диапазоне существенно превышает верхнюю границу дисперсии разброса измеренных значений относительно среднего. Столь высокие значения коэффициентов $\beta_e(\lambda)$ на анализируемом интервале длин волн являются следствием поступления в регион измерений ВМ, обогащенной аэрозолями дымового происхождения. Анализ траектории движения ВМ и синоптической ситуации убеждает в том, что это дымы дальнего переноса из европейской территории России.

Максимум замутнения атмосферы был достигнут примерно в полдень 12 сентября, после которого оптический вклад аккумулятивной фракции в видимом диапазоне длин волн снижается с 85 до 73%. Утром 13 сентября спектральная зависимость $\beta_e(\lambda)$ хотя и попала в коридор отклонений (кривая 3), но еще заметно превышала $\beta_e(\lambda)$.

Вторжение арктического воздуха резко изменило оптическую ситуацию, и к утру 14 сентября спектральная зависимость $\beta_e(\lambda)$ не только оказалась заметно ниже среднемесячной кривой, но и выпала за коридор среднеквадратических отклонений во всем диапазоне длин волн, попадая, таким образом,

в разряд аномальных только по этому признаку. К полудню 14 сентября значения коэффициента аэрозольного ослабления в видимом диапазоне продолжали понижаться, и в результате образовалась спектральная зависимость с аномальным ходом в видимом диапазоне длин волн (кривая 5).

Решение обратной задачи по спектральным зависимостям $\beta_e(\lambda)$, представленным на рис. 1, показывает (рис. 2,а), что характерной особенностью микроструктуры дымовых аэрозолей (кривые 1, 2) является существенно сдвинутая правая граница аккумулятивной фракции $r_{2,a}$ вплоть до значений $\sim 0,7-0,75$ мкм. Причем спектры $s(r)$, представленные на рис. 2,б (кривые 1-3), восстановленные по данным, измеренным 13 сентября, до вторжения арктической ВМ, обнаруживают редкую для аккумулятивной фракции устойчивость формы спектра размеров и указывают на сохранение дымовых аэрозолей вплоть до 21 ч 13 сентября.

Только утром 14 сентября (кривая 3 рис. 2,а), когда арктическая ВМ полностью вытеснила предыдущую массу, обогащенную дымовыми частицами, спектр размеров аккумулятивной фракции приобрел обычную форму с правой границей $r_{2,a} \sim 0,4-0,45$ мкм.

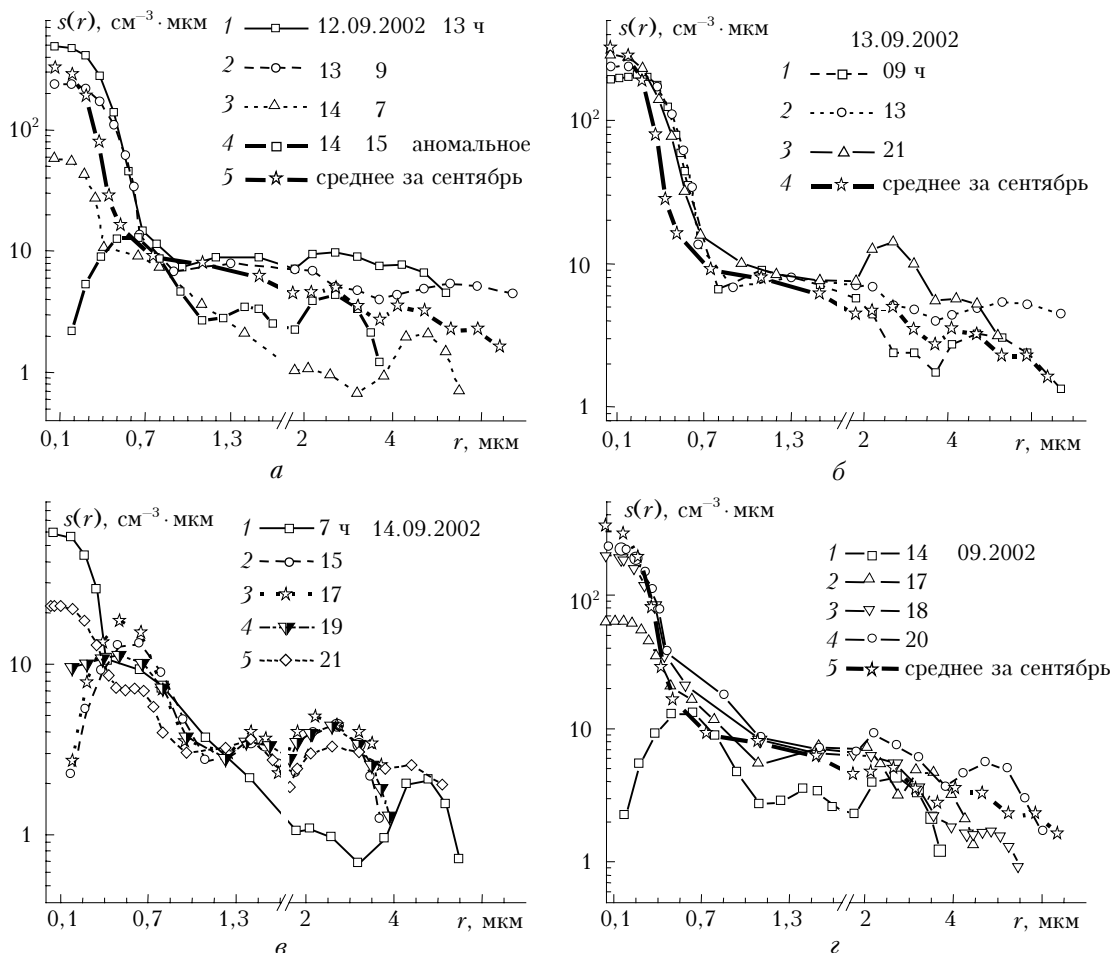


Рис. 2. Результаты обращения единичных и усредненных спектральных зависимостей $\beta_e(\lambda)$ по данным за сентябрь 2002 г.

Следует подчеркнуть, что правая граница среднемесячного спектра аккумулятивной фракции, несмотря на частые возмущения атмосферы в сентябре дымами, заметно сдвинута влево и имеет примерно ту же правую границу, что и кривая 3 (см. кривую 5 на рис. 2,а,г).

На рис. 2,в подробно представлена динамика дневной трансформации дисперсной структуры приземной дымки 14 сентября, которая показывает, что при вторжении арктического воздуха резко снизилось содержание частиц аккумулятивной фракции и основную роль в ослаблении излучения стала играть среднелдисперсная фракция. Спектр размеров среднелдисперсной фракции, в составе арктической ВМ, смещен в область более мелких частиц и более сужен, чем по усредненным данным за сентябрь (кривая 5 на рис. 2,а). Оптический вклад аккумулятивной фракции в видимом диапазоне длин волн снизился до пренебрежимо малых (на фоне погрешностей измерений) значений. Устойчивость формы спектра (кривые 2–4, рис. 2,в) указывает на достаточно высокую однородность распределения среднелдисперсной фракции аэрозолей в составе арктической ВМ.

Послеполуденная динамика изменения дисперсного состава приземной дымки 14 сентября показывает (кривые 3–5 рис. 2,в), что дефицит частиц аккумулятивной фракции, возникший в результате прихода арктической ВМ, начинает достаточно быстро восполняться в результате действия местных источников. Обращает на себя также внимание и устойчивое возрастание в течение дня оптического влияния наиболее крупной фракции частиц. Это обстоятельство прослеживается также и по результатам обращения $\beta_e(\lambda)$, измеренных в более теплых умеренных ВМ. В частности, на рис. 2,б, где представлены результаты обращения данных, измеренных 13 сентября, несмотря на относительную стабильность спектра размеров аккумулятивной фракции, содержание частиц грубодисперсной фракции в течение дня возрастает.

Динамика развития спектра размеров частиц приземной дымки от аномальной ситуации к обычной представлена на рис. 2,г. Здесь аномальная ситуация представлена единичным спектром (кривая 1), а остальные спектры (за 17, 18 и 20 сентября) усреднены за день. Прежде всего, обращает на себя внимание быстрый рост содержания частиц аккумулятивной фракции, которая уже к 20 сентября полностью восстановилась до обычной концентрации. Содержание частиц среднелдисперсной фракции в течение трех дней изменяется незначительно. Следует также отметить, что повышение температуры воздуха в приземном слое приводит к увеличению содержания крупных частиц за счет усиления конвективного выноса с подстилающей поверхности. Интересно отметить, что по мере прогрева почвы правая граница грубодисперсной фракции постепенно (в течение 3–4 сут) сдвигается от 4,0 до 7–9 мкм.

Количественные оценки изменения суммарного объемного содержания частиц средне- и грубодис-

персной фракций $V_{ст}$ в период с 14 по 20 сентября хорошо согласуются с динамикой изменения среднесуточных значений температуры приземного слоя воздуха t °С (рис. 3,а). Динамика изменения объемного содержания аккумулятивной фракцией $V_{ак}$ в те же дни неплохо коррелирует с изменением абсолютной влажности воздуха a (рис. 3,б).

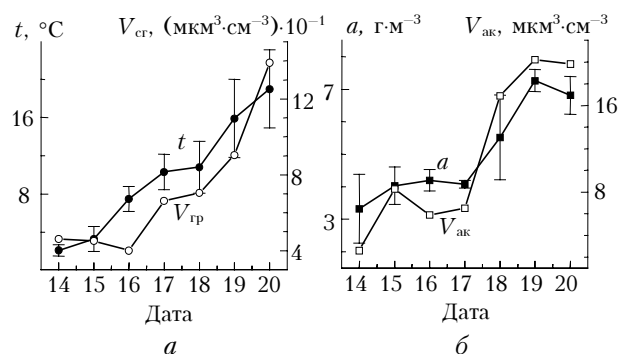


Рис. 3. Межсуточная динамика изменения суммарного объемного содержания средне- и грубодисперсных частиц и среднесуточной температуры приземного слоя (а); объемного содержания частиц аккумулятивной фракции и абсолютной влажности воздуха (б)

Однако не исключено, что взаимосогласованное изменение $V_{ак}$ и абсолютной влажности воздуха является лишь следствием смены относительно сухой арктической ВМ на более влажную умеренную ВМ, а наблюдаемая динамика $V_{ак}$ — отражением процесса перехода от одного характерного (для арктической ВМ) уровня содержания аккумулятивной фракции аэрозолей к другому, в данном случае для умеренной ВМ.

Если сравнить спектр размеров частиц в приземном слое в аномальной ситуации $s(r)$ (рис. 4,а, кривая 1) с аналогичными данными по атмосферной толще $s_c(r)$, полученными по результатам обращения $\tau_a(\lambda)$ [3–5] (кривые 2, 3), то нетрудно убедиться, что среднелдисперсная фракция в приземном слое имеет тот же характерный размер, что и осредненный по толще, но несколько шире по форме распределения. Причем на рис. 4,а представлены результаты обращения измеренных данных, полученных в разное время (даты указаны в подписях на рисунке), но в обоих случаях при вторжении в регион арктической ВМ. На рис. 4,б представлены спектры размеров дымки, полученные по результатам одновременных измерений ослабления на горизонтальной (кривая 5) и наклонной (кривая 4) трассах, но уже в умеренно-континентальной ВМ. Как видно, в этом случае среднелдисперсная фракция по толще и в приземном слое также лежит в одном диапазоне размеров частиц, но несколько смещенном вправо по сравнению с аномальной ситуацией. Таким образом, результаты, представленные на рис. 4, еще раз подтверждают ранее обсуждавшийся вывод [4] о фундаментальном значении среднелдисперсной фракции как важной составляющей фонового состояния атмосферной дымки.

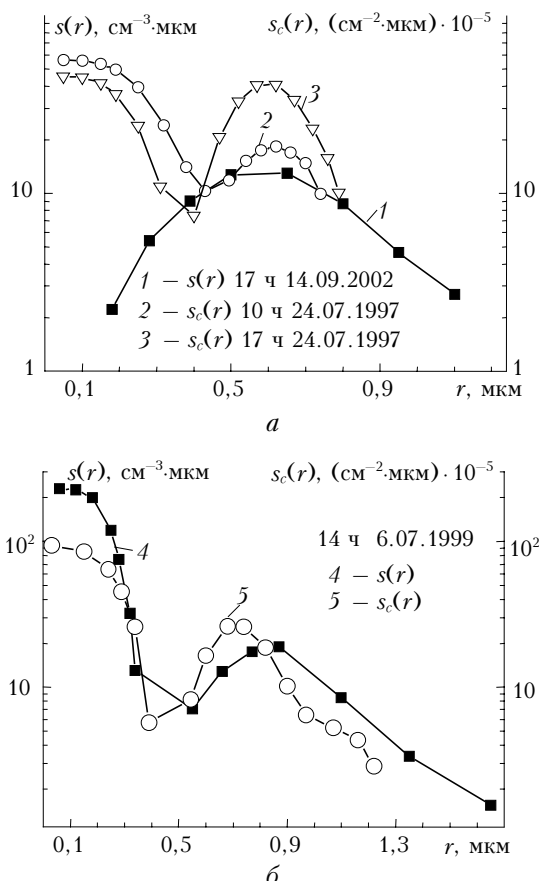


Рис. 4. Сравнение распределений частиц по размерам в аномальной (а) и обычной (б) ситуациях, восстановленных из обращения $\beta_\epsilon(\lambda)$ и $\tau_a(\lambda)$

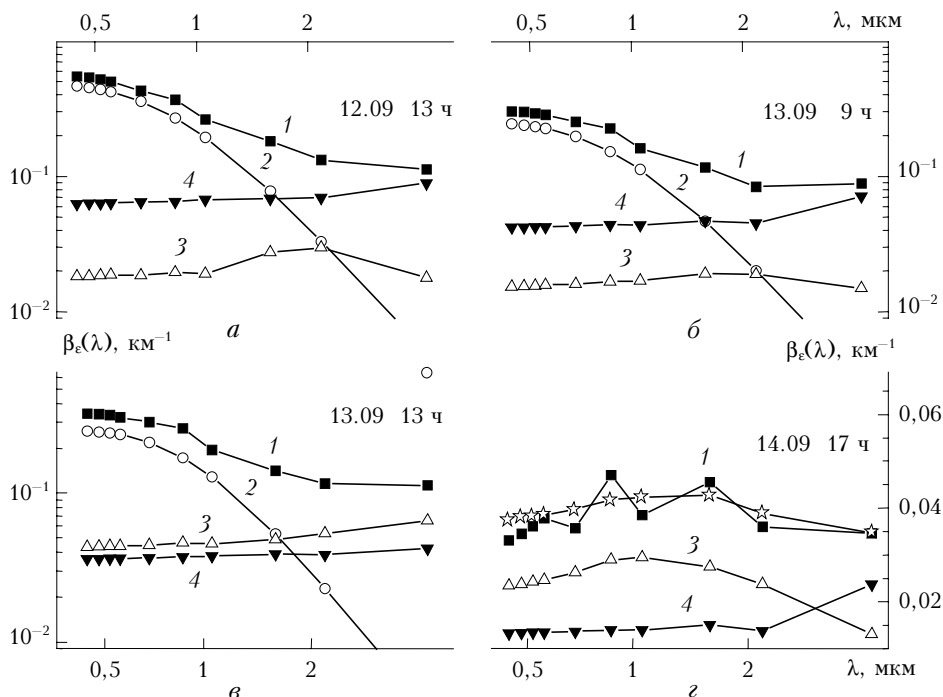


Рис. 5. Изменение оптического вклада аккумулятивной, среднедисперсной и грубодисперсной фракций аэрозоля (2, 3, 4 соответственно) в задымленной и арктической воздушных массах; 1 – измеренные значения $\beta_\epsilon(\lambda)$

При обращении данных оптических измерений были получены оценки вклада различных фракций в интегральную спектральную зависимость $\beta_\epsilon(\lambda)$. В частности, на рис. 5 отдельно представлены вклады в спектральную зависимость коэффициента ослабления от аккумулятивной, среднедисперсной и грубодисперсной фракций, а также их сумма. Для анализа были использованы данные измерений от 12–14 сентября 2002 г., для 13 сентября – утренняя и полуденная зависимости $\beta_\epsilon(\lambda)$.

Как нетрудно видеть из данных, представленных на рис. 5, а–в, в измерениях $\beta_\epsilon(\lambda)$ от 12–13 сентября (в задымленной атмосфере) отразился повышенный вклад частиц аккумулятивной фракции (кривые 2). Близость спектральных зависимостей этой фракции в указанный период, составляющий ~35–40 ч, свидетельствует об устойчивости концентрации частиц и сохранении формы спектра. В частности, в двойном логарифмическом масштабе устойчиво наблюдается отличная от закона Ангрстрема выпуклая форма спектральной зависимости $\beta_\epsilon(\lambda)$. Относительный вклад аккумулятивной фракции в интегральную спектральную зависимость $\beta_\epsilon(\lambda)$ в видимой области спектра ($\lambda < 0,69$ мкм) колеблется в интервале от 73 до 86%.

В ближнем ИК-диапазоне длин волн с $\lambda \sim 1,5$ мкм оптическое влияние дымовых аэрозолей снижается до 30%. В то же время, несмотря на высокое содержание дымовых аэрозолей 12–13 сентября, суммарный вклад среднедисперсной и грубодисперсной фракций в диапазоне $\lambda > 2,0$ мкм является определяющим не только в полдень, но и утром (см. рис. 5, а–в).

Данные, представленные на рис. 5,з, иллюстрируют изменение относительных вкладов фракций при вторжении арктической ВМ, которое произошло 14 сентября. Причем в этом случае оптический вклад аккумулятивной фракции оказался пренебрежимо малым, а вклад среднedisперсных аэрозолей (кривая 3), определивший аномальный спектральный ход $\beta_e(\lambda)$ во всем анализируемом спектральном интервале, составил более 50% от общего. Оптический вклад грубодисперсных аэрозолей ($r > 2 \text{ мкм}$) в интервале длин волн 0,44 – 1,06 мкм имеет спектральный ход, близкий к нейтральному (кривая 4). Кроме того, на рис. 5,з представлена для сравнения суммарная спектральная зависимость $\beta_e(\lambda)$ от среднedisперсной и грубодисперсной фракций (обозначена звездочками), рассчитанная по результатам решения обратной задачи, которая может рассматриваться как оптическая аппроксимация реально измеренной.

Резюмируя полученные результаты в целом, следует подчеркнуть, что в приземном слое, так же как и по данным измерений атмосферной толщи [4], основным фактором возникновения нестандартного спектрального хода $\beta_e(\lambda)$ является вторжение в регион измерений относительно сухой и достаточно холодной воздушной массы. Приход арктической ВМ предопределил резкое понижение содержания аккумулятивной фракции в приземном слое и существенное усиление оптического влияния

среднedisперсной фракции. С восстановлением типичного для умеренной ВМ уровня влагосодержания и температуры восстановились и обычно наблюдаемые пропорции между фракциями в дисперсной структуре приземного аэрозоля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 01-05-65197).

1. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. К вопросу о формировании аномальной структуры коэффициентов аэрозольного ослабления в приземных дымаках // Аэрозоли Сибири. IX рабочая группа: Тезисы докл. 2002. С. 52.
2. Родионов С.Ф. Электрофотометрические исследования атмосферы на Эльбурсе. Л.: Гидрометеонздат, 1970. 125 с.
3. Сакерин С.М., Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Кабанов Д.М. Интерпретация аномальной спектральной зависимости аэрозольной оптической толщи атмосферы. Часть I. Формальный анализ ситуации // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 9. С. 813–818.
4. Рахимов Р.Ф., Сакерин С.М., Макиенко Э.В., Кабанов Д.М. Интерпретация аномальной спектральной зависимости аэрозольной оптической толщи атмосферы. Часть II. Особенности дисперсной структуры аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 9. С. 819–825.
5. Макиенко Э.В., Рахимов Р.Ф., Сакерин С.М., Кабанов Д.М. Интерпретация аномальной спектральной зависимости аэрозольной оптической толщи атмосферы. Часть III. Динамика дисперсной структуры аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 7. С. 590–599.

E.V. Makienko, R.F. Rakhimov, Yu.A. Pkhalagov, V.N. Uzhegov. Microphysical interpretation of anomalous spectral dependence of aerosol extinction of radiation at a near-surface path.

Possible reasons for formation of the rarely observed anomalous spectral dependence of the aerosol extinction coefficient that arises in the near-surface atmospheric layer in connection with the intrusion of the Arctic air mass are analyzed. The results of solution of the inverse problem show that intrusion of the Arctic air manifests itself in the disperse structure of aerosol as a sharp decrease of the number of particles in the accumulative fraction, narrowing of the medium-disperse fraction, and the shift of the size spectrum as a whole to the range of smaller particles. At a more pronounced anomaly, the optical contribution of the accumulative fraction of particles to extinction of the visible radiation decreases to the negligibly small level. The optical effect of coarse aerosols ($r > 2 \text{ }\mu\text{m}$) in the wavelength region of 0.44–1.06 μm has the close-to-neutral spectral behavior of the aerosol extinction coefficient. Under these conditions, medium-disperse particles having the size of 0.3 to 1.8 μm with the main mode of the particle size (geometric cross section) distribution nearby 0.6 μm and the blurred second peak nearby 1.4 μm determined, in general, the anomalous spectral dependence of the measured aerosol extinction coefficients.