

М.В. Панченко, С.А. Терпугова

ВНУТРИСЕЗОННЫЕ ФАКТОРЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК СУБМИКРОННОГО АЭРОЗОЛЯ. 2. СУТОЧНЫЙ ХОД (вертикальный профиль)

Анализируются проявления суточного хода вертикального профиля аэрозольного коэффициента рассеяния в различные сезоны года. Показано, что в зимних условиях закономерной трансформации содержания аэрозоля по вертикали в течение суток практически не наблюдается, однако возможен перенос аэрозольных слоев упорядоченными вертикальными движениями. Летом суточный ход аэрозольного профиля проявляется наиболее ярко. Его характерными особенностями являются снижение общего содержания аэрозоля в подынверсионном слое (100–400 м) в течение ночи и увеличение высоты слоя перемешивания и его наполнение аэрозолем в течение дня. Весной и осенью выявить суточный ход в анализируемом массиве данных практически не удалось из-за повышенной динамики межсуточной изменчивости всех атмосферных процессов.

Наряду с изменчивостью аэрозольных характеристик, которая обусловлена процессами синоптического масштаба [1], состояние аэрозоля также подвержено и более быстрым вариациям на суточном и внутрисуточном уровне.

Из всего спектра аэрозольной изменчивости наиболее хорошо понятны основные физические процессы, определяющие суточный ход содержания аэрозоля и трансформации его оптических свойств (см., например, [2, 3]).

При попытках количественного описания суточного хода любой из аэрозольных характеристик для конкретных условий на первый план выходит геофизическая сущность аэрозоля и возникает необходимость учета всего разнообразия внешних синоптических, метеорологических и локальных факторов, предыстории данной воздушной массы, состояния подстилающей поверхности, характера инсоляции и т.д. Отсюда, на сегодняшнем уровне знаний, возможность создания чисто теоретической (количественной) модели, описывающей все это многообразие факторов в их взаимосвязи, даже для описания суточного хода весьма проблематична. Поэтому по-прежнему более реальным представляется введение их в модель на основе данных экспериментальных наблюдений.

Исходя из этих соображений, в данной статье попытаемся описать внутрисуточную изменчивость вертикального профиля аэрозольных характеристик (от 0 до 5 км), проявляющуюся в первую очередь в средних значениях для различных представительных массивов наблюдательных данных, которые могут составить основу эмпирической модели для исследуемого региона.

Для того чтобы снизить воздействие межсезонной изменчивости на характер формирования вертикальных профилей атмосферных параметров, анализ проведен отдельно для каждого из сезонов. Разбиение массивов данных на «утро», «день», «ночь» и «вечер» проводилось в зависимости от времени восхода и захода солнца на широте данного географического пункта для каждого месяца.

В соответствии с развиваемым нами подходом для выяснения роли различных процессов в суточном ходе уберем влияние относительной влажности воздуха (которая имеет свой суточный ход) и рассмотрим изменчивость сухого аэрозоля (т.е. процессы, связанные непосредственно с образованием, поступлением и стоком частиц из атмосферы).

На рис. 1 приведены вертикальные профили коэффициентов рассеяния $\sigma_d(H)$ сухой основы аэрозольных частиц для зимнего, весеннего и осеннего сезонов.

В зимних условиях закономерной трансформации содержания аэрозоля по вертикали в течение суток практически не наблюдается. Несмотря на существование суточного хода температуры в нижних (< 1 км) слоях атмосферы, в среднем температурный профиль сохраняет инверсный характер [8], что в значительной мере подавляет аэрозольный обмен между высотами.

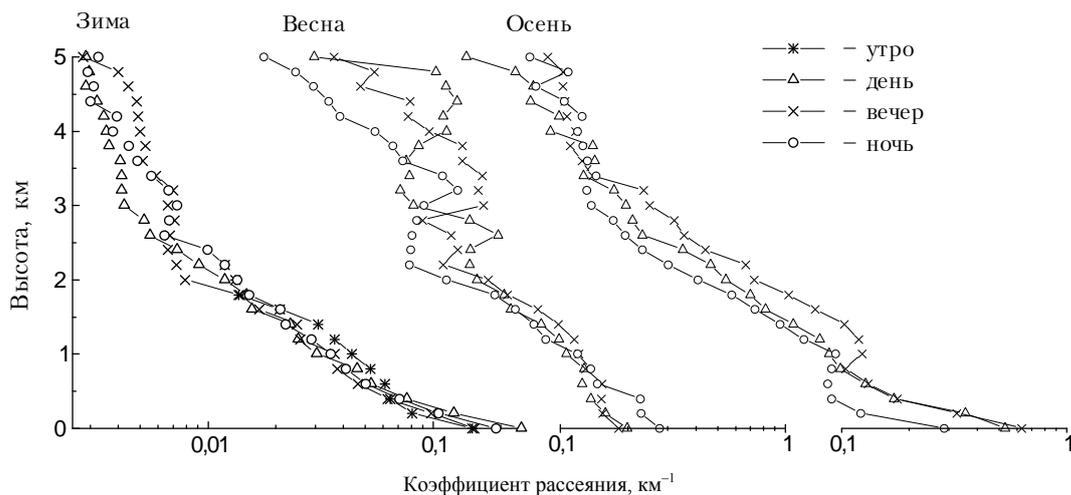


Рис. 1. Суточный ход вертикального профиля коэффициента рассеяния сухой основы аэрозольных частиц для зимнего, весеннего и осеннего сезонов

В этом случае при моделировании суточного хода оптических характеристик в слое перемешивания можно ограничиться только учетом изменения относительной влажности воздуха. В свободной атмосфере в конкретных реализациях зимой наблюдаются только движения аэрозольных слоев, которые в случае вертикального перемещения не вызывают заметных изменений в общей оптической толще атмосферы, но их знание необходимо при решении ряда практических задач, таких как оптическая локация, оценка фона естественных и искусственных источников и т.д.

Проанализируем подобную динамику на примере рис. 2, на котором представлены вертикальные профили коэффициента рассеяния $\sigma_d(H)$ и температуры воздуха T , измеренные в районе г. Колпашева с интервалом в 1 ч 14 января 1986 г. в антициклональных условиях [4].

Как видно из рис. 2, а, слой аэрозоля, который наблюдался на высоте $H_1 = 1700$ м, в течение часа переместился на высоту $H_2 = 1800$ м.

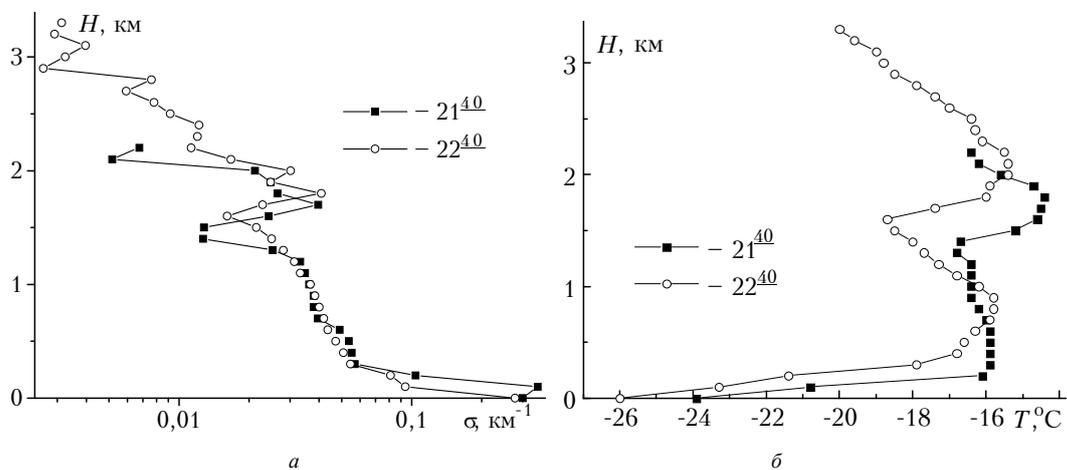


Рис. 2. Вертикальные профили аэрозольного коэффициента рассеяния (а) и температуры (б), измеренные 14 января 1986 г. в г. Колпашеве с интервалом 1 ч

Ранее в совместных работах с Б.Д. Беланом [4, 5] было показано, что для анализируемых нами условий можно пренебречь многими аэрозольными процессами, определяющими изменчивость $\sigma_d(H)$ на рассматриваемых высотах.

Измерения проводились в условиях ясной погоды, следовательно, вымывание аэрозоля облаками и осадками в районе наблюдений отсутствовало. В темное время суток можно пренебречь образованием новых аэрозольных частиц в результате фотохимических реакций. Скорости седиментации и коагуляции частиц субмикронного диапазона размеров малы, и для ин-

тервала времени между зондированиями (~1 ч) эти процессы можно не учитывать. Во время измерений наблюдались мощные, порядка нескольких градусов, инверсии температуры на высотах 0–400 м и 1,5–2 км (рис. 2, б), что свидетельствует о том, что на уровне рассматриваемого нами аэрозольного слоя турбулентный обмен в значительной степени подавлен.

Таким образом, в нашем случае необходимо считаться только с горизонтальным и вертикальным движением аэрозоля, что может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial \sigma_d}{\partial t} = v \frac{\partial \sigma_d}{\partial x} + w \frac{\partial \sigma_d}{\partial z}, \quad (1)$$

где v и w – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости ветра соответственно.

Анализ данных измерений коэффициента рассеяния вдоль трассы полета самолета-лаборатории (на расстоянии ~1000 км) показал, что в (1) можно пренебречь слагаемым $v \frac{\partial \sigma_d}{\partial x}$,

поскольку его величина оказалась на 2 порядка меньше $w \frac{\partial \sigma_d}{\partial z}$. Таким образом, основной перенос аэрозоля в нашем случае обусловлен только упорядоченными вертикальными движениями, т.е.

$$\frac{\partial \sigma_d}{\partial t} = w \frac{\partial \sigma_d}{\partial z}. \quad (2)$$

Чтобы проверить полученный в результате упрощений вывод, была проведена оценка величины скорости вертикальных движений w . Для этого использовался адиабатический метод расчета [6], так как высоты измерений были расположены между основными изобарическими поверхностями. (Профили температуры, по которым проводился расчет w , приведены на рис. 2, б).

Результаты расчетов дали величину $w = 97$ м/ч, что хорошо согласуется с наблюдательными данными по оптическим и микроструктурным характеристикам.

Таким образом, можно заключить, что в тех случаях, когда турбулентный перенос аэрозоля подавлен, возможен его эффективный перенос упорядоченными восходящими и нисходящими движениями воздуха.

Весна и осень характеризуются повышенной динамикой межсуточной изменчивости всех атмосферных процессов (частые смены воздушных масс, значительное число дней с осадками и т.д.), что во многом затрудняет анализ и затушевывает характерные особенности суточного хода. Внутрисуточная трансформация вертикального профиля $\sigma_d(H)$ весной и осенью в основных чертах напоминает летний суточный ход, но амплитуда вариаций выражена гораздо слабее. Отметим также, что в весеннем массиве данных велико количество реализаций, в которых наблюдается ночное накопление аэрозоля в приземных слоях атмосферы.

Наиболее ярко суточный ход вертикального профиля аэрозоля проявляется летом. Усредненный массив летних $\sigma_d(H)$ представлен на рис. 3.

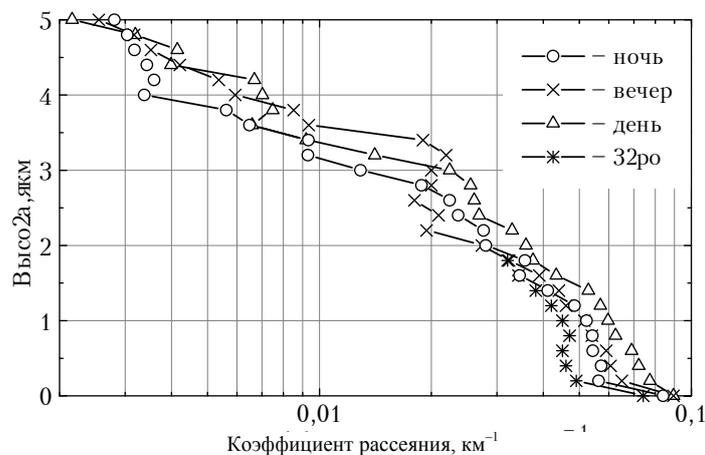


Рис. 3. Суточный ход вертикального профиля коэффициента рассеяния сухой основы аэрозольных частиц летом

Прежде чем приступить к описанию основных процессов изменчивости вертикального профиля сухой основы аэрозоля, необходимо оценить «качество» [7] полученных нефелометрических данных. Для этого обратимся к результатам измерений метеорологических параметров атмосферы и рассмотрим суточный ход вертикальных профилей температуры и удельной влажности для анализируемого массива, приведенный на рис. 4.

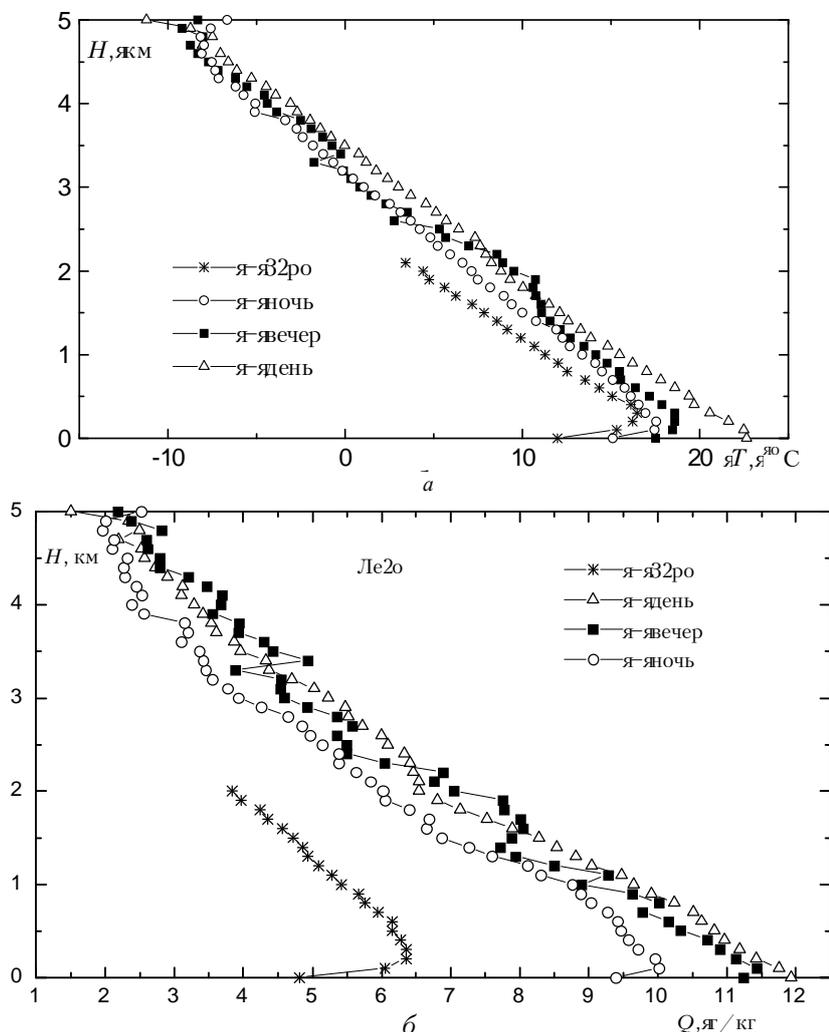


Рис. 4. Суточный ход вертикального профиля температуры (а) и удельной влажности (б) летом

Как видим, для средних профилей \bar{T} и \bar{Q} в подмассивах «ночь», «день» и «вечер» суточный ход этих параметров не только хорошо соответствует имеющимся представлениям, но и количественно согласуется со среднеклиматическими летними данными (см., например, [8]). В то же время по температуре $\bar{T}(H)$ и особенно по удельной влажности $\bar{Q}(H)$ подмассив «утренних» данных выпадает из общего ансамбля. Понятно, что это обусловлено слабой статистической обеспеченностью данных «утренних» наблюдений в нашем массиве. Следовательно, использование этого подмассива возможно только при анализе вертикальной стратификации, но вряд ли целесообразно при проведении каких-либо количественных оценок внутри анализируемого суточного хода $\sigma_d(H)$.

Летом, начиная с вечера, в течение ночи, как правило, происходит образование приземной температурной инверсии, высота которой к утру может достигать 400–500 м (см. рис. 4, а). Это приводит к снижению общего содержания аэрозоля в подынверсионном слое (100–400 м). Минимальные значения на высоте ~ 300 м наблюдаются в утренние часы.

В результате прогрева подстилающей поверхности и атмосферы в течение дня происходит увеличение высоты слоя перемешивания и его наполнение аэрозолями. С наступлением

вечера (вероятно, как показано в [9], при смене знака радиационного баланса) вынос аэрозоля из приземного слоя прекращается и нижние слои атмосферы (по средним данным, примерно с высоты $H \sim 1,5$ км) начинают опустошаться. Выше, вплоть до $H \sim 3,5$ км, в вечерние часы продолжается некоторое увеличение высоты слоя перемешивания. Вблизи его верхней границы на вечерних данных отчетливо проявляется максимум коэффициента рассеяния σ_d . Проведенные оценки показывают, что летом в течение суток (от ночи к вечеру) осуществляется поступление в атмосферу аэрозольного вещества субмикронной фракции в количестве около 15–20 мг на каждый квадратный метр поверхности, что хорошо согласуется с результатами [9].

Анализ усредненных в целом по сезону данных $\sigma_d(H)$ не позволяет проследить межсуточное накопление аэрозоля и корректно оценить, какая доля аэрозольных частиц возвращается на подстилающую поверхность в течение темного времени суток, а какая за счет процессов вовлечения поступает в свободную атмосферу. По очень грубым оценкам, проведенным нами, можно ожидать, что в течение дня при так называемом радиационном типе погоды [2, 3] в свободную атмосферу попадает около $0,5 \div 1$ мг/м² сухого аэрозольного вещества.

Средние скорости изменения содержания субмикронного аэрозоля $\frac{1}{M} \frac{\partial M}{\partial t}$ в различных слоях атмосферы в течение суток (%/ч) приведены в таблице.

H , км	Ночь–день	День–вечер	Вечер–ночь
0–0,6	+16%я	–0,5%я	–4%я
0,6–3	+15%я	0я	–4%я
3–3,5	+55%я	+5%я	–27%я
3,5–5	+34%я	+2%я	–14%я

Понятно, что приводимые нами усредненные данные дают представление лишь об основных тенденциях процессов, протекающих в атмосфере. Наиболее ярко аэрозольная динамика проявляется в отдельных реализациях при радиационном типе погоды. Проиллюстрируем этот процесс на примере данных, полученных в антициклональных условиях в районе г. Новосибирска с интервалом ~ 4 ч и в районе г. Томска с интервалом ~ 1 ч.

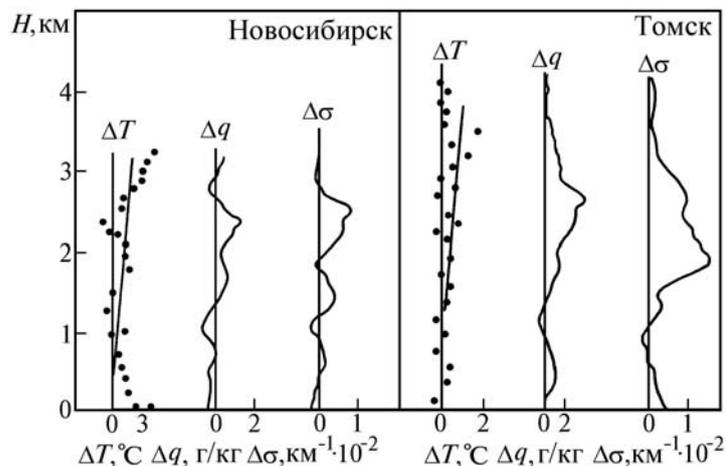


Рис. 5. Вертикальные профили приращений коэффициента рассеяния, температуры и удельной влажности за время между двумя циклами зондирования летним днем в антициклональных условиях

На рис. 5 приведены вертикальные профили приращений коэффициента рассеяния $\Delta\sigma_d(H)$, температуры ΔT и удельной влажности ΔQ за время между двумя зондированиями. Из рис. 5 видно, что в периоды наблюдения идет прогрев практически всего слоя перемешивания (по «вечерним» данным в Томске приземные слои уже выхолаживаются). Одновременно по всему профилю идет прирост содержания аэрозоля и водяного пара, но приращения этих субстанций имеют максимум на высоте несколько меньшей, чем максимальный нагрев. Более того, как отчетливо видно из «вечерних» данных (Томск), явно прослеживается расщепление высот максимального накопления рассматриваемых величин (T , Q и σ в порядке убывания).

Понятно, что суточный ход содержания сухой основы аэрозоля является результатом конкуренции следующих процессов: генерации новых аэрозольных частиц в процессе фотохимических и химических превращений газ – частица, подъема с подстилающей поверхности «старого» аэрозоля (той же природы) и частиц, образованных процессами диспергирования, выносом аэрозольных частиц с уровня наблюдения под действием вертикальных потоков в вышележащие слои или их приходом с верхнего уровня и осаждением частиц на подстилающую поверхность [3]. Также очевидно, что для конкретных условий интенсивность каждого из процессов зависит от большой совокупности факторов: инсоляции, состояния подстилающей поверхности и т.д. Отсюда, а также из проанализированных нами самолетных данных следует, что наиболее сильно проявления суточного хода должны наблюдаться в приземном слое атмосферы (анализ результатов приземных измерений авторы предполагают представить в следующей публикации).

В заключение авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку данной работы (номер проекта 95-05-14195).

1. Панченко М.В., Терпугова С.А. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 12. С. 1761–1766.
2. Сидоров В.Н., Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1984. Т. 20. N 12. С. 1156–1164.
3. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 370 с.
4. Белан Б.Д., Задде Г.О., Панченко М.В. и др. // Всес. конф. «Трансформация и дальний перенос газовых и аэрозольных примесей в атмосфере»: Тез. докл. Вильнюс, 1986. С. 112–113.
5. Белан Б.Д., Панченко М.В., Рассказчикова Т.М., Польшкин В.В. // IX Всесоюз. симп. по лазер. и акустич. зондированию атмосферы: Тез. докл. Томск, 1987. Ч. 1. С. 130–135.
6. Хромов С.П. Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 700 с.
7. Панченко М.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 8. С. 1022–1032.
8. Климат Томска / Под ред. С.Д. Кошинского, Л.И. Трифоновой, Ц.А. Швер. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 176 с.
9. Ковалев А.Ф. // Труды ИЭМ. 1990. N 51. С. 83–87.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
28 января 1996 г.

M. V. Panchenko, S. A. Terpugova. Seasonal Factors of the Variability of Submicron Aerosol Characteristics. 2. Diurnal Behavior (vertical Profile)

In this paper we analyze the diurnal behavior of the vertical profile of aerosol scattering coefficient in different seasons. It is shown that in winter there is practically no regular transformation of aerosol content during a day, however, the transport of aerosol layer by an ordered vertical motion is possible. Diurnal behavior of aerosol profile is the most pronounced in summer. Its features are the decrease of the total aerosol content in the sub-inversion layer (100–400 m) during a night and the increase of the height of the mixing layer and its filling with aerosol during a day. We have not succeeded in revealing the diurnal behavior in spring and autumn from the bulk of data analyzed, because of the high variability of all atmospheric processes from day to day.