

РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН
В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 551. 510. 42

Р.Ф. Рахимов

**ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИКО-МИКРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЭРОЗОЛЕЙ
ПРИ ДИФФУЗИОННО-СЕДИМЕНТАЦИОННОМ РАСПЛЫВАНИИ
АНОМАЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ СЛОЕВ В МЕЗОСФЕРЕ**

Представлены результаты модельных оценок изменчивости оптико-микрофизических характеристик аэрозольной компоненты в процессе турбулентного перемешивания и гравитационного оседания частиц космического происхождения в мезосфере. Оценки показывают, что вариации лидарного отношения могут достигать 300–400%, что в значительной степени предопределяется динамикой изменения состава грубодисперсной фракции по высоте.

В отличие от стратосферного слоя фактический материал о природе мезосферного слоя крайне ограничен. Наряду с существенной неоднозначностью оценок мощности притока межпланетной пыли [1, 2] практически не исследован вопрос о стоках и механизме трансформации аэрозольного вещества в слое. Седиментационная нестационарность состояния аэрозолей в слое усугубляется довольно интенсивным турбулентным перемешиванием $D \sim 3\text{--}5 \text{ м}^2/\text{с}$.

Крупные частицы космической пыли и микрометеоры при внедрении в атмосферу планеты в результате резкого торможения и перехода кинетической энергии в тепловую испытывают не только испарение вещества, но и фрагментацию структуры, что ведет к накоплению вблизи высот торможения (80–110 км) аэрозольных частиц. Вопрос о диффузионно-седиментационном расплывании инъекционных аэрозольных аномалий и изменении оптико-микрофизических свойств аэрозольных частиц космического происхождения на высотах мезосферы в научной литературе по данной проблеме практически не анализировался.

В данной статье на основе пофракционного синтеза результирующего спектра размеров частиц рассмотрено пространственно-временное изменение дисперсной структуры мезосферных аэрозолей на основе динамики изменения интегральных параметров спектра размеров.

В качестве исходной математической основы модели, описывающей изменение структуры слоя, была использована система уравнений для компонентов вектор-параметра $\hat{Q}_i = \{N_i, S_i, V_i\}$, характеризующего спектр размеров аэрозольных частиц i -й фракции в терминах логнормального распределения [3, 4]:

$$\frac{\partial \hat{Q}_i(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} D(z) \frac{\partial \hat{Q}_i(z, t)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} [W_{qi}(z, t) \hat{Q}_i(z, t)], \quad (1)$$

где под вектор-параметром $\hat{Q}_i(z, t)$ в каждом i -м уравнении подразумевается отдельно либо объемная V_i , либо поверхностная S_i , либо просто счетная N_i концентрации аэрозольных частиц на некоторой высоте z ; t – текущее время процесса; W_{qi} – средняя скорость стоковского оседания частиц i -й фракции, оцениваемая для каждого уравнения по модальному радиусу функции плотности распределения соответствующего интегрального признака по шкале размеров. Скорость гравитационного оседания частиц определяется по формуле Стокса–Каннингема [5]:

$$W_s = \frac{2g\rho r^2}{9\eta} (1 + C_{khi} K_n), \quad (2)$$

где r – радиус частицы; g – ускорение силы тяжести; ρ – плотность аэрозольного вещества; η – вязкость воздуха; $K_n = l_0/r$ – число Кнудсена, а l_0 – длина свободного пробега молекул; C_{khi} – средневзвешенное по спектру размеров i -й фракции значение поправки Каннингема и [5]:

$$C_{khi} = 1 + \frac{l_0}{r_i} (1,257 + 0,4 \exp(-1,1 \frac{l_0}{r_i})). \quad (3)$$

Полагая длину свободного пробега «молекул» воздуха l_0 изменяющейся по барометрическому закону с постоянной по высоте температурой T , для скорости вертикального оседания частиц W_s можно использовать следующее обобщение [9]:

$$W_s = \frac{2g\rho r^2}{9\eta} - \frac{2g\rho r}{9\eta} C_{kni} l_0 \exp\left(\frac{mgz}{K_B T}\right) = -A - B \exp(\gamma z), \quad (4)$$

где m – масса «молекул» воздуха; K_B – постоянная Больцмана; l_0 – длина свободного пробега «молекул» при нормальных условиях.

В расчетах рассмотрен интервал высот 76–116 км, характерный для начального этапа внедрения межпланетной пыли, а также для фрагментации и сгорания осколков [7]. В связи с этим значения основных параметров задачи в пределах указанной стратификации в соответствии со справочными данными выбраны следующими: $T = 200$ К; $\eta = 1,7 \cdot 10^{-5}$ Н·с/м²; $l_0 = 4,2 \cdot 10^{-8}$ м; $\rho = 6,9 \cdot 10^3$ кг/м³ [6]. Последний выбор обусловлен ориентацией на химический состав метеорных осколков.

С целью избежать побочных эффектов смешения спектров размера инжектированных и фоновых аэрозолей, высотное изменение интегральных признаков последних ($\hat{Q}_i^\phi = \{N_i^\phi, S_i^\phi, V_i^\phi\}$) было стилизовано, следуя в целом экспоненциальной зависимости:

$$\hat{Q}_i^\phi(z) = \hat{Q}_{i0}^\phi \exp\{-\hat{G}_{qi}^\phi(z - 72)\}, \quad (5)$$

где \hat{Q}_{i0}^ϕ – значения интегральных признаков фоновой компоненты на высоте $z = 72$ км; \hat{G}_{qi}^ϕ – вектор-параметр, задающий градиенты вертикального изменения соответствующих интегральных признаков фоновой компоненты. Конкретные значения $\hat{Q}_{i0}^\phi, \hat{G}_{qi}^\phi$ приведены в табл. 1.

В расчетах в качестве исходных значений интегральных признаков микродисперсной и грубодисперсной фракций, инжектированных в аномальный слой, были использованы следующие величины: $N_1 = 6,46e3$ см⁻³; $S_1 = 2,14e2$ см⁻³; $V_1 = 5,11e0$ мкм²·см⁻³; $N_2 = 6,41e1$ мкм²·см⁻³; $S_2 = 5,97e1$ мкм³·см⁻³; $V_2 = 7,59e0$ мкм³·см⁻³.

Таблица 1

Фракции	$N_{i0}^\phi, \text{см}^{-3}$	G_{ni}^ϕ	$S_{i0}^\phi, \text{мкм}^2 \cdot \text{см}^{-3}$	G_{si}^ϕ	$V_{i0}^\phi, \text{мкм}^2 \cdot \text{см}^{-3}$	G_{vi}^ϕ
Аккумулятивная	6,46e-2*	0,140	2,14e-3	0,143	5,11e-5	0,170
Грубодисперсная	6,41e-4	0,140	5,97e-4	0,158	7,59e-5	0,185

*Здесь и далее 6,46e-2 обозначает $6,46 \cdot 10^{-2}$.

В табл.2–4 представлены результаты модельных оценок изменения интегральных признаков для двух фракций как по высоте, так и во времени.

Таблица 2

Изменение счетной концентрации по высоте для разных моментов

z, км	Время, сут							
	1,5	2,5	4,5	7,5	1,5	2,5	4,5	7,5
	$N_1, \text{см}^{-2}$, микродисперсная фракция				$N_2, \text{см}^{-2}$, грубодисперсная фракция			
76	0,797E-01	0,797E-01	0,797E-01	0,797E-01	0,178E-03	0,178E-03	0,178E-03	0,178E-03
80	0,455E-01	0,455E-01	0,455E-01	0,455E-01	0,102E-03	0,102E-03	0,102E-03	0,102E-03
84	0,260E-01	0,260E-01	0,260E-01	0,270E-01	0,582E-04	0,582E-04	0,582E-04	0,585E-04
88	0,149E-01	0,154E-01	0,362E-01	0,154E+00	0,333E-04	0,333E-04	0,348E-04	0,417E-04
92	0,529E+00	0,115E+01	0,183E+01	0,212E+01	0,388E-04	0,678E-04	0,991E-04	0,111E-03
96	0,603E+01	0,537E+01	0,442E+01	0,361E+01	0,247E-03	0,221E-03	0,182E-03	0,149E-03
100	0,714E-02	0,540E-01	0,303E+00	0,697E+00	0,625E-05	0,748E-05	0,157E-04	0,295E-04
104	0,158E-02	0,158E-02	0,217E-02	0,167E-01	0,354E-05	0,354E-05	0,355E-05	0,396E-05
108	0,903E-03	0,903E-03	0,903E-03	0,940E-03	0,202E-05	0,202E-05	0,202E-05	0,202E-05
112	0,516E-03	0,516E-03	0,516E-03	0,516E-03	0,116E-05	0,116E-05	0,116E-05	0,116E-05

Изменение суммарной поверхности по высоте для разных моментов

z, км	Время, сут							
	1,5	2,5	4,5	7,5	1,5	2,5	4,5	7,5
	S_1 (мкм ² ·см ⁻³), микродисперсная фракция				S_2 (мкм ² ·см ⁻³), грубодисперсная фракция			
76	0,363E-02	0,363E-02	0,363E-02	0,363E-02	0,116E-02	0,116E-02	0,116E-02	0,116E-02
80	0,205E-02	0,205E-02	0,205E-02	0,205E-02	0,615E-03	0,615E-03	0,615E-03	0,638E-03
84	0,116E-02	0,116E-02	0,116E-02	0,117E-02	0,327E-03	0,327E-03	0,344E-03	0,365E-03
88	0,653E-03	0,662E-03	0,987E-03	0,277E-02	0,175E-03	0,198E-03	0,232E-03	0,225E-03
92	0,851E-02	0,176E-01	0,275E-01	0,316E-01	0,219E-03	0,223E-03	0,200E-03	0,175E-03
96	0,879E-01	0,783E-01	0,646E-01	0,528E-01	0,175E-03	0,155E-03	0,130E-03	0,111E-03
100	0,192E-03	0,912E-03	0,455E-02	0,102E-01	0,261E-04	0,266E-04	0,293E-04	0,338E-04
104	0,662E-04	0,662E-04	0,754E-04	0,289E-03	0,139E-04	0,139E-04	0,139E-04	0,140E-04
108	0,374E-04	0,374E-04	0,374E-04	0,379E-04	0,737E-05	0,737E-05	0,737E-05	0,737E-05
112	0,211E-04	0,211E-04	0,211E-04	0,211E-04	0,392E-05	0,392E-05	0,392E-05	0,392E-05

Таблица 4

Изменение суммарного объема по высоте для разных моментов

z, км	Время, сут							
	1,5	2,5	4,5	7,5	1,5	2,5	4,5	7,5
	V_1 (мкм ³ ·см ⁻³), микродисперсная фракция				V_2 (мкм ³ ·см ⁻³), грубодисперсная фракция			
76	0,192E-03	0,192E-03	0,192E-03	0,192E-03	0,602E-03	0,602E-03	0,602E-03	0,617E-03
80	0,971E-04	0,971E-04	0,971E-04	0,971E-04	0,287E-03	0,287E-03	0,301E-03	0,300E-03
84	0,492E-04	0,492E-04	0,492E-04	0,495E-04	0,137E-03	0,141E-03	0,159E-03	0,151E-03
88	0,249E-04	0,251E-04	0,311E-04	0,637E-04	0,797E-04	0,998E-04	0,877E-04	0,793E-04
92	0,164E-03	0,327E-03	0,502E-03	0,575E-03	0,842E-04	0,676E-04	0,525E-04	0,439E-04
96	0,157E-02	0,140E-02	0,115E-02	0,945E-03	0,301E-04	0,269E-04	0,233E-04	0,208E-04
100	0,467E-05	0,178E-04	0,825E-04	0,183E-03	0,710E-05	0,714E-05	0,735E-05	0,768E-05
104	0,164E-05	0,164E-05	0,181E-05	0,560E-05	0,339E-05	0,339E-05	0,339E-05	0,340E-05
108	0,832E-06	0,832E-06	0,832E-06	0,842E-06	0,162E-05	0,162E-05	0,162E-05	0,162E-05
112	0,421E-06	0,421E-06	0,421E-06	0,421E-06	0,771E-06	0,771E-06	0,771E-06	0,771E-06

На рис. 1–4 показано изменение оптико-микрофизических свойств аэрозольных частиц при их диффузном оседании с высоты $z=90$ км. Рассмотрен вариант интенсивности турбулентного перемешивания $D=5,5$ м²/с. При этом на каждой высоте аномального накопления для описания поведения аккумулятивной и грубодисперсной фракций использовалось по три подфракции аэрозольных частиц с модальными радиусами $r_{im}=0,5r_m$; r_m ; $2,0r_m$. Параметры f_i и b_i вычислялись таким образом, чтобы все три подфракции в целом были оптически эквивалентны исходному распределению каждой из ранее указанных двух фракций.

На рис. 1 представлены результаты расчета для спектра размеров двух фракций. Рассмотрено изменение положения моды относительно шкалы размеров, а также ширины во времени для четырех высот $z = 84, 86, 88, 90$ км. Динамика спектров рассмотрена на интервале времени t от 1,5 до 7 сут.

Неизменность спектра размеров микродисперсной фракции на высоте 84 км обусловлена тем, что в расчетах был рассмотрен вариант с начальной высотой локализации аэрозольной аномалии на высоте 95 км. Как показывают оценки, скорость седиментационного оседания данной фракции такова, что к началу седьмых суток мелкие частицы облака при оседании достигают лишь высоты 86 км (рис. 1, б), а высот 88 и 90 км частицы микродисперсной фракции достигает соответственно на четвертые и вторые сутки.

Иная ситуация для грубодисперсной фракции – на всех высотах наблюдаются существенные изменения спектра как по положению моды, так и по ее ширине. Причем если на высотах 84, 86, 88 км наблюдаются достаточно существенные изменения ширины моды распределения, то данные для высоты 90 км показывают на существенные изменения характерного размера частиц в сторону уменьшения.

Изменение ширины моды грубодисперсной фракции $b_2(z, t)$ более подробно представлено на рис. 2, который показывает, что со временем вблизи высоты начальной локализации формируется спектр размеров с достаточно широким распределением. Процесс гравитационного сепарирования аэрозольных частиц, наблюдаемый в основном на высотах, лежащих ниже первоначального положения аномального слоя, со временем переходит на все более низкие высоты.

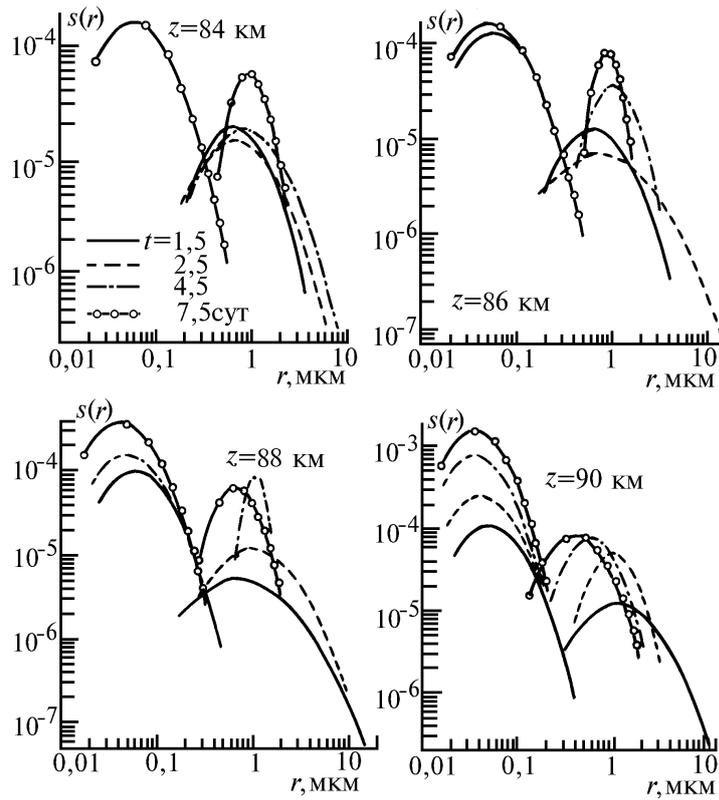


Рис. 1. Динамика изменения положения и ширины моды аккумулятивной и грубодисперсной фракций во времени

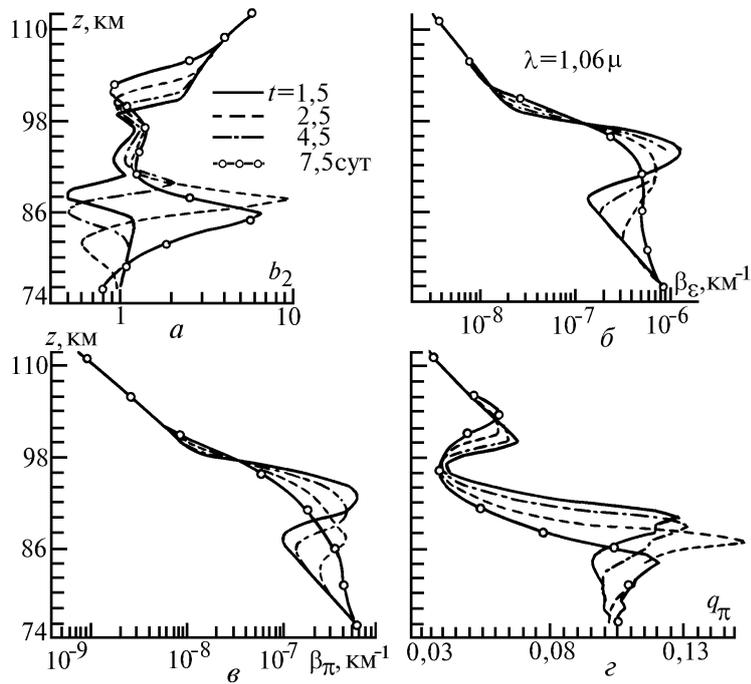


Рис. 2. Трансформация вертикальных профилей параметров аэрозольного светорассеяния для длины волны $\lambda=1,06 \mu$ и ширины спектра грубодисперсной фракции $b_2(z) - a$; коэффициентов ослабления $\beta_e(z) - \beta$; обратного рассеяния $\beta_\pi(z) - \beta_\pi$; лидарного отношения $q_\pi - z$

При этом вертикальные профили коэффициентов ослабления и обратного рассеяния, отличаясь друг от друга динамикой изменения, тем не менее в целом указывают на достаточно плавное расплывание аномального аэрозольного слоя. Но совсем иная ситуация наблюдается для профилей лидарного отношения (рис. 2, *з*). При оседании слоя динамика изменения лидарного отношения может достигать 300–400% и, как показывают представленные оценки, данная характеристика, в отличие от коэффициента ослабления (рис. 2, *б*), в значительной степени предопределяется динамикой изменения грубодисперсной фракции.

Достаточно сложна динамика изменения индикатрисы рассеяния. На рис. 3 представлены данные, иллюстрирующие изменение формы индикатрисы рассеяния через параметры, характеризующие вытянутость индикатрисы рассеяния вперед $A_{sa} = \mu(15^\circ)/\mu(110^\circ)$, рис. 3, *а*; назад $D_{sa} = \mu(165^\circ)/\mu(110^\circ)$, рис. 3, *б*; выраженность ореольной части $O_{re} = \mu(0^\circ)/\mu(5^\circ)$, рис. 3, *в*; а также степень поляризации под углом $\theta = 90^\circ$, рис. 3, *з*.

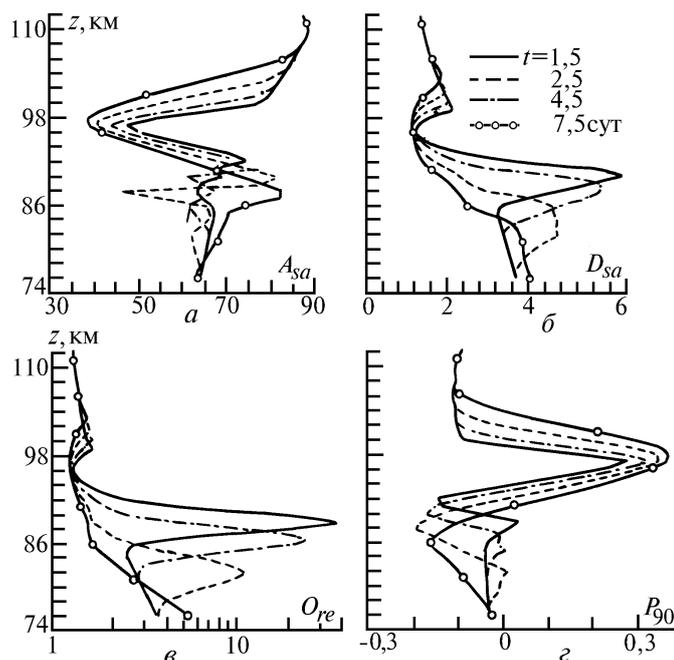


Рис. 3. Изменение вертикальных профилей параметров, определяющих изменение формы индикатрисы рассеяния и степени поляризации излучения, рассеянного под углом 90° , для длины волны $\lambda = 1,06$ мкм: *а* – $A_{sa}(z)$; *б* – $D_{sa}(z)$; *в* – $O_{re}(z)$; *з* – $p(90, z)$

Как показывают расчеты (рис. 3, *а*), выше аномального слоя происходит накопление относительно мелких аэрозольных частиц, поэтому вытянутость индикатрисы вперед заметно уменьшается, хотя по-прежнему существенно отличается от рэлеевской. Максимум, наблюдаемый для параметра D_{sa} на рис. 3, *б*, постепенно опускается, что говорит о достаточно динамичном изменении на этих высотах содержания грубодисперсных аэрозолей. Об этом также можно судить по результатам, представленным для ореольной части индикатрисы рассеяния на рис. 3, *в*. Вертикальный профиль для степени поляризации под углом $\theta = 90^\circ$ также обнаруживает взаимно согласованное поведение с параметром, характеризующим вытянутость индикатрисы в целом $A_{sa}(z)$.

На рис. 4 представлены данные, иллюстрирующие трансформацию угловой зависимости степени поляризации для длины волны $\lambda = 1,06$ мкм. Как было отмечено ранее, изменение состояния поляризации рассеянного излучения в рассмотренном варианте на всех высотах предопределяется в основном динамичностью состояния грубодисперсной фракции.

В заключение необходимо подчеркнуть, что представленные в статье результаты показывают, что темп и характер деформаций, испытываемых структурой мезосферных новых аэрозолей, аэрозолей, существенно зависят от входных параметров процесса: исходного профиля фонтенсивности турбулентного перемешивания, характерного размера инжектированных аэрозолей, удельной плотности вещества, что предопределяет неоднозначную динамику оптических свойств.

В частности, здесь был рассмотрен пример со значительным содержанием частиц грубодисперсной фракции, что предопределило своеобразие в изменении степени поляризации $p(\theta, z)$.

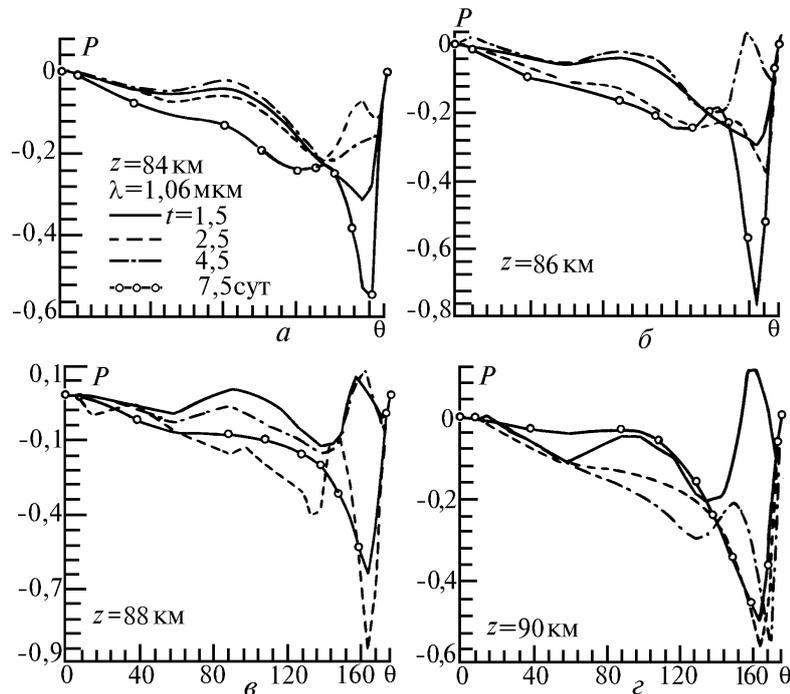


Рис. 4. Изменение угловой зависимости степени поляризации $p(\theta, z)$ при турбулентном распылении и оседании аномального слоя в мезосфере

Ввиду большого числа варьируемых параметров модели всестороннее исследование различных факторов изменчивости состояния аэрозолей в мезосфере предполагается продолжить последовательным анализом влияния каждого из них.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-05-16463-а).

1. Лебединец В. Н. Аэрозоль верхней атмосферы и космическая пыль. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 272 с.
2. Лебединец В. Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве, метеоры. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 248 с.
3. Рахимов Р. Ф. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 6. С. 645–652.
4. Рахимов Р. Ф. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 5. С. 525–533.
5. Райст П. Аэрозоли. М.: Мир, 1987. 289 с.
6. Уэбб В. Структура стратосферы и мезосферы. М.: Мир, 1969. 259 с.
7. Микиров А. Е., Смеркалов В. А. Исследование рассеянного излучения в верхней атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 208 с.
8. Гринберг М. Межзвездная пыль. М.: Мир, 1970. 200 с.
9. Гринин А. П., Куни Ф. М. // Труды ИЭМ. 1985. Вып. 35 (113). С. 52–56.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
г. Томск

Поступила в редакцию
25 декабря 1994 г.

R. F. Rakhimov. Variability of Optical and Microphysical Characteristics of Aerosol during Sedimentation Diffusion of Anomalous Aerosol Layers in Atmosphere.

The results of simulative estimates are presented of aerosol microphysical characteristics variability in the process of turbulent mixing and gravitational sedimentation in mesosphere of the particles of space origin. The estimates show the variations of lidar ratio to reach 300–400% due to dynamics of coarse-dispersed fraction variations with the height.