

Р.Ф. Рахимов

ФАКТОР ГРАВИТАЦИОННОГО ОСЕДАНИЯ ПРИ АДВЕКЦИИ ГРУБОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ ВБЛИЗИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Обсуждается методика численного моделирования процесса перераспределения грубодисперсных аэрозолей по спектру размеров при их адвекции в турбулизированном воздушном потоке над однородной и неоднородной подстилающими поверхностями атмосферы. Представлены модельные оценки пространственного изменения спектра размеров аэрозольных частиц под воздействием фактора гравитационного оседания.

Светорассеяние атмосферной дымкой в ИК-диапазоне длин волн существенно зависит как от диэлектрических свойств грубодисперсной фракции, так и от относительного содержания и протяженности спектра в область крупных размеров. Последнее, как известно, определяется эффективностью выноса аэрозолей с подстилающей поверхности и спецификой их турбулентного смещения.

Сохраняя концептуальную основу предыдущих модельных оценок [1–3], изменение дисперсной структуры атмосферных аэрозолей будем определять редуцировано через интегральные признаки в терминах логнормального распределения. В связи с этим при описании процесса адвекции грубодисперсных аэрозолей над неоднородной поверхностью можно помимо уравнения диффузии для счетной концентрации частиц N_i привлечь аналогичные уравнения и для последующих интегральных признаков: S_i , V_i . Формально эту систему уравнений, используя обобщенный вектор-параметр \hat{Q}_i , можно представить в виде;

$$U(z) \frac{\partial \hat{Q}_i(x, z)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} D(z) \frac{\partial \hat{Q}_i(x, z)}{\partial z} - W_i(R_i) \frac{\partial \hat{Q}_i(x, z)}{\partial z}, \quad (1)$$

где под вектор-параметром $\hat{Q}_i(x, z)$ подразумевается отдельно либо объемная V_i , либо поверхностная S_i , либо просто счетная N_i концентрации аэрозольных частиц в некоторой точке с координатами x, z ; W_i — средняя скорость стоковского оседания частиц i -й фракции, оцениваемая для каждого уравнения по модальному радиусу функции плотности распределения соответствующего интегрального признака по спектру размеров. Ось x совпадает с направлением средней скорости ветра.

При этом предполагается, что вертикальные профили горизонтальной составляющей скорости воздушного потока $U(z)$ и коэффициента турбулентного обмена $D(z)$ в приземном слое имеют линейную зависимость от высоты, а именно:

$$U(z) = U_0 z; \quad D(z) = D_0 z. \quad (2)$$

Решение (1) с граничными условиями:

а) вертикальное распределение интегральных признаков в набегающем турбулентном потоке:

$$\hat{Q}_i(x, z)|_{x=0} = \hat{Q}_{i0} \exp(-\beta z^2), \quad (3)$$

б) горизонтальное распределение интегральных признаков на подстилающей поверхности:

$$\hat{Q}_i(x, z)|_{z=0} = \hat{Q}_{i1}(x), \quad (4)$$

в) на больших высотах $z \rightarrow \infty$

$$\hat{Q}_i(x, z) = 0, \quad (5)$$

имеет вид [3, 4]

$$\hat{Q}_i(x, z) = \hat{Q}_{i0} \zeta^{1-p} \exp(-\beta \zeta z^2) \{1 - \Gamma(p, \zeta^2 z^2)\} +$$

$$+ \frac{\alpha^p}{\Gamma(p)} \left(\frac{z}{2}\right)^{2p} \int_0^x \frac{\hat{Q}_{i1}(\xi)}{(x-\xi)^{1+p}} \exp\left[-\frac{\alpha z^2}{4(x-\xi)}\right] d\xi, \quad (6)$$

где $\alpha = U_0/D_0$; $p = W_{Q_i} / 2D_0$; $\zeta = \alpha/(\alpha + 4\beta x)$. $\Gamma(p, \chi) = \frac{1}{\Gamma(p)} \int_\chi^\infty \exp(-\xi)\xi^{p-1} d\xi$ — неполная Гамма-функция.

Если подстилающую поверхность разбить на m однородных участков, на которых интегральные признаки принимают постоянные значения:

$$\hat{Q}_i(x, z) = \sum_{n=1}^m (\hat{Q}_{i1,n} - \hat{Q}_{i1,n-1}) \sigma(x - x_{n-1}), \quad (7)$$

где $\sigma(x - x_j)$ — единичная функция:

$$\sigma(x - x_j) = \begin{cases} 1 & x > x_{j-1} \\ 0 & x < x_{j-1}, \quad x_{1-1} = 0, \quad \hat{Q}_{i1,1-1} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

тогда второй интеграл в решении (1) может быть представлен в виде [4]

$$\begin{aligned} & \frac{\alpha^p}{\Gamma(p)} \left(\frac{z}{2}\right)^{2p} \int_0^x \frac{\hat{Q}_{i1}(\xi)}{(x-\xi)^{1+p}} \exp\left[-\frac{\alpha z^2}{4(x-\xi)}\right] d\xi = \\ & = \sum_{n=1}^m (\hat{Q}_{i1,n} - \hat{Q}_{i1,n-1}) \Gamma\left[p, \frac{\alpha z^2}{4(x-x_{n-1})}\right] \sigma(x - x_{n-1}). \end{aligned} \quad (9)$$

Поскольку физико-химический состав аэрозолей почвенного происхождения (удельная плотность $\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$) имеет сложную природу, одновременно моделировалось совместное развитие трех подфракций, которые впоследствии аддитивно смешивались в одну основную. При этом исходные значения интегральных признаков выбирались так, чтобы модальные радиусы подфракций были равномерно разнесены по шкале размеров в интервале $R = 1,0 \div 10,0$ мкм. Таким образом, варьируя в численном эксперименте относительное весовое содержание, характерный размер и ширину спектра каждой подфракции, можно моделировать процессы турбулентного смешения первичных аэрозолей со сложным дисперсным составом и различной удельной плотностью вещества.

При проведении конкретных количественных оценок граничные условия (3)–(5) на спектр размеров аэрозольных частиц определялись косвенно, относительно фоновых значений интегральных признаков. В частности, для фонового уровня содержания грубодисперсной фракции обобщенный вектор-параметр спектра размеров $\hat{Q}_\phi \{N_\phi, S_\phi, V_\phi\}$ синтезировался в соответствии с данными [5] через аддитивную смесь интегральных признаков $N_{i\phi}, S_{i\phi}, V_{i\phi}$ трех подфракций, которые в сумме обеспечивали соответствующие [5] значения компонент $N_\phi = 0,38 \text{ см}^{-3}$; $S_\phi = 52,0 \text{ мкм}^2 \cdot \text{см}^{-3}$; $V_\phi = 49,0 \text{ мкм}^3 \cdot \text{см}^{-3}$. В этом случае свойства наземного источника $\hat{Q}_{i1}(x)$ оценивались в сравнении с величинами $\hat{Q}_{i\phi}$ как произведение:

$$\hat{Q}_{i1}(x) = q_1 g(x) \hat{Q}_{i\phi}. \quad (10)$$

Аналогичным образом определялся и спектр размеров адвектируемых частиц

$$\hat{Q}_{i0}(x) = q_0 \hat{Q}_{i\phi} \exp(-\beta z^2). \quad (11)$$

Влияние адвективной составляющей на механизм формирования пространственной структуры грубодисперсных аэрозолей зависит не только от значений параметров q_0 и β в (11), но и от скорости ветра U_0 .

Согласно Будыко [6] коэффициент турбулентного обмена $D(z)$ в приземном слое может быть связан со средней скоростью ветра:

$$D(z) = D_0 \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - \text{Ri}}, \quad (12)$$

где Ri — среднее по слою число Ричардсона; D_0 — значение коэффициента турбулентного обмена на высоте z_1 при равновесных условиях:

$$D_0 = \kappa^2 U_1 / \ln(z_1/z_0), \quad (13)$$

где κ — постоянная Кармана; U_1 — средняя скорость потока на высоте z_1 ; z_0 — параметр шероховатости подстилающей поверхности.

Полидисперсность аэрозольных частиц является принципиальным моментом данной формулировки проблемы. В отличие от монодисперсной системы максимумы распределения счетной и объемной концентраций для полидисперсных аэрозольных частиц заметно разнесены по шкале размеров. В связи с этим при диффузии системы между ячейками аэрозольного поля активизируются дополнительные обменные процессы, более крупные и тяжелые частицы при оседании обгоняют мелкие и легкие, что на значительных пространственных масштабах адвекции ведет практически к обмену структурными элементами спектра размеров — подфракциями. По этой причине, как показывают расчеты, при адвекции могут возникать характерные зоны пространственно-спектрального распределения грубодисперсной фракции.

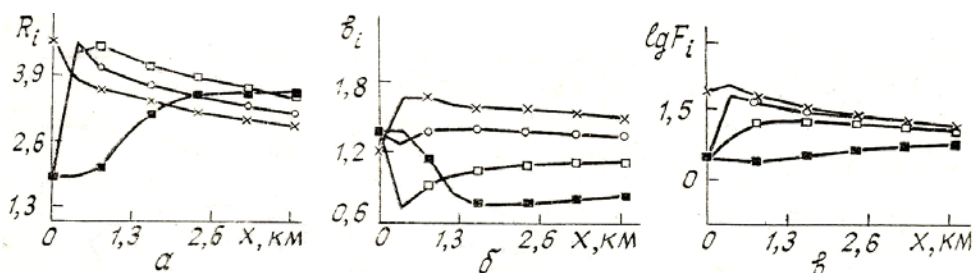


Рис. 1. Горизонтальное изменение параметров распределения грубодисперсных аэрозолей при их адвекции над однородной подстилающей поверхностью при $\beta = 0,1 \text{ м}^{-2}$; $U_0 = 0,18 \text{ м/с}$; $D_0 = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$; $W_d = 0,0 \text{ м/с}$: a — модального радиуса Ri , b — параметра дисперсности b_i , ϵ — параметра F_i [3]. Маркировка линий (x, o, □, ■) соответствует последовательно высотам $z = 1,0; 4,0; 13,6; 50,0 \text{ м}$

По-видимому, эти образования при конвективной неустойчивости приземного слоя в составе крупномасштабных турбулентных вихрей выносятся за пределы слоя трения. И в случае малой гигроскопичности частиц создают предпосылки к формированию аномалий повышенного содержания грубодисперсных аэрозолей на высотах 1,5 км и более, т. е. так называемых облаков неконденсационного происхождения [7].

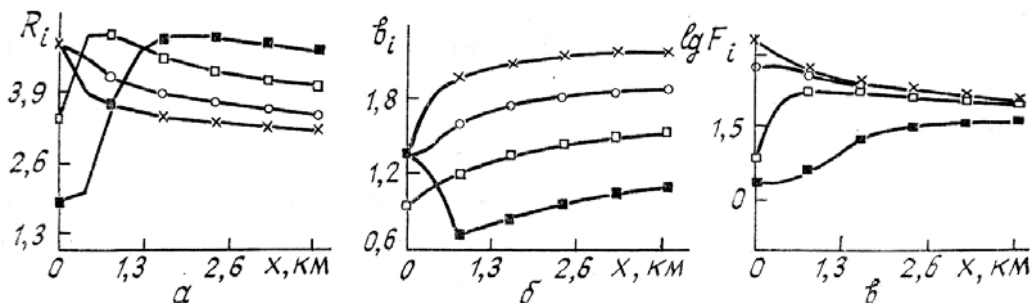


Рис. 2. То же, что и на рис. 1 для $\beta = 0,01 \text{ м}^{-2}$; $U_0 = 0,18 \text{ м/с}$; $D_0 = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$; $W_d = 0,0 \text{ м/с}$. Подрисуночные подписи для a, b, ϵ совпадают с рис. 1

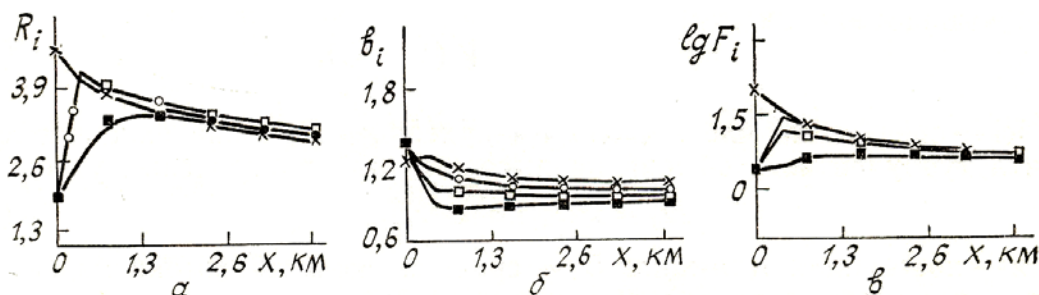


Рис. 3. То же, что и на рис. 1 для $\beta = 0,1 \text{ м}^{-2}$; $U_0 = 0,18 \text{ м/с}$; $D_0 = 0,06 \text{ м}^2/\text{с}$; $W_d = 0,0 \text{ м/с}$. Подрисуночные подписи для a, b, ϵ совпадают с рис. 1

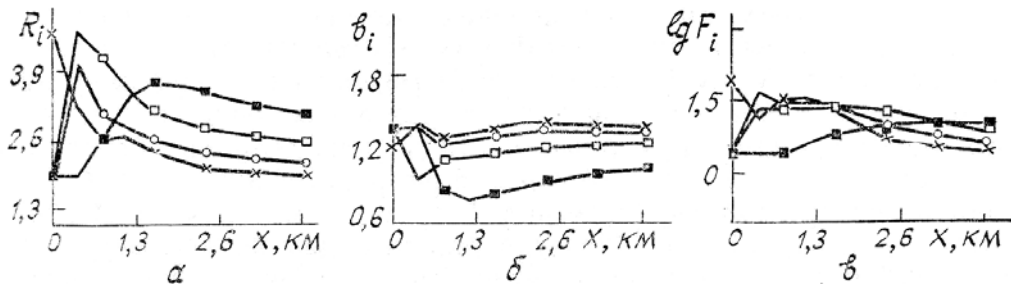


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, для $\beta = 0,1 \text{ м}^{-2}$; $U_0 = 0,18 \text{ м/с}$; $D_0 = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$; $W_d = 0,045 \text{ м/с}$. Подрисовочные подписи для $a, б, в$ совпадают с рис. 1

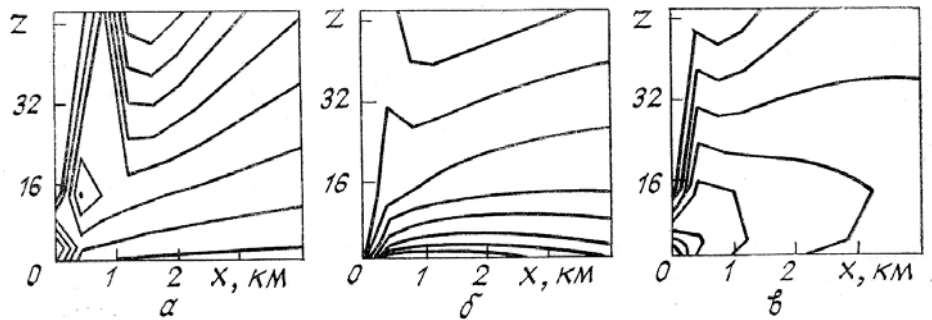


Рис. 5. Изолинии пространственного изменения параметров дисперсной структуры над однородной подстилающей поверхностью. Параметры процесса и подрисовочные подписи для $a, б, в$ совпадают с рис. 1

На рис. 1–6 представлены результаты численного моделирования горизонтального изменения параметров распределения грубодисперсных аэрозолей, рассчитанных исходя из интегральных признаков $\hat{Q}_i(x, z)$ модели (1)–(13) по методике [3]. Важным фактором, определяющим своеобразие анализируемого процесса, является исходное вертикальное распределение в набегающем турбулентном потоке интегральных признаков дисперсной структуры.

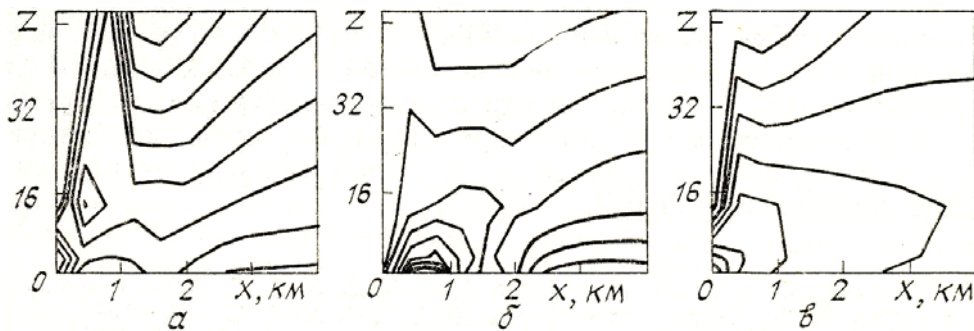


Рис. 6. Изолинии пространственного изменения параметров дисперсной структуры над неоднородной подстилающей поверхностью. Параметры процесса и подрисовочные подписи для $a, б, в$ совпадают с рис. 1

С увеличением однородности потока адвектируемых аэрозолей (при уменьшении значений β от 0,1 до $0,01^{-2}$) растет количество взвешенных частиц (рис. 1, $в$ и 2, $в$) и их характерный размер (рис. 1, a и 2, a). Однако ширина спектра размеров частиц на высотах $z < 10 \text{ м}$ заметно сужается (рис. 1, $б$ и 2, $б$). Если в первом случае b_i изменяется в интервале значений $0,8 \div 1,35$, то во втором — $b_i \sim 1,5 \div 2,4$.

Естественно полагать, что не менее важным фактором, регулирующим спектр размеров грубодисперсных аэрозолей, является турбулентное перемешивание. С увеличением интенсивности турбулентного перемешивания от $D_0 = 0,005$ до $0,06 \text{ м}^2/\text{с}$ спектр размеров частиц, во-первых, расширяется (рис. 1, $б$ и 3, $б$), во-вторых, максимум объемного распределения сдвигается в область малых размеров (рис. 1, a и 3, a) и, в-третьих, практически на всех высотах падает их абсолютное количественное содержание (рис. 1, $в$ и 3, $в$).

При малой интенсивности турбулентного перемешивания спектр размеров грубодисперсных аэрозолей по мере приближения к неотражающей подстилающей поверхности устойчиво сужается и сдвигается в область малых размеров.

К еще более резкому уменьшению размера частиц в приповерхностном слое $z < 10$ м и расширению спектра для высот выше 10 м ведет увеличение постоянной составляющей скорости оседания частиц от $W_d = 0,0$ до $4,5$ см/с (рис. 1, а и 4, а), особенно на расстояниях $x \sim 1,3$ км и более. Постоянная (по спектру размеров) составляющая скорости оседания рассматривается как возможное увеличение фиктивной скорости сухого осаждения частиц на элементах шероховатости подстилающей поверхности либо как результат антициклонального опускания воздушной массы в целом.

На рис. 5 и 6 представлены изолинии пространственного изменения параметров спектра при однородной и неоднородной подстилающих поверхностях. В первом случае выпадающие частицы полностью поглощаются подложкой (например, в случае водной поверхности) $\hat{Q}_i(x)|_{z=0} = 0$, а во втором значения вектор-параметра спектра размеров в (4) по координате x изменяются по логнормальному закону. Расчеты показывают, что при неоднородных граничных условиях деформации пространственной структуры распределения грубодисперсных аэрозолей наиболее существенны над областью неоднородности (4) до высот 10–15 м.

В заключение необходимо признать, что некоторые из указанных выше закономерностей прогнозируемы, поскольку соответствующие им модельные оценки ориентированы на выявление следствий изолированного изменения входных параметров модели. Однако даже по этим предварительным оценкам очевидна существенная зависимость пространственной структуры аэрозолей как от вертикального распределения параметров спектра размеров адвектируемых аэрозолей, так и от средней скорости ветра и интенсивности перемешивания.

Для целостного модельного представления процесса следует учитывать, что параметры модели в реальной географической ситуации являются взаимосвязанными.

1. Рахимов Р. Ф. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 3. С. 259–266.
2. Рахимов Р. Ф. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 4. С. 339–348.
3. Рахимов Р. Ф. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 5. С. 522–529.
4. Ермилов С. Н. // Труды ЛГМИ, 1974. Вып. 49. С. 106–118.
5. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: Изд-е ТФ СО АН СССР, 1986. 296 с.
6. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
7. Зуев В. Е., Белан Б. Д., Веретенников В. В., Задде Г. О., Панченко М. В., Рахимов Р. Ф. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 7. С. 737–743.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
3 июня 1991 г.

R. F. Rakhimov. The Effect of Gravitational Sedimentation of the Advection of Coarse Aerosol Fraction in the Atmosphere near the Ground.

A technique of numerical simulations of the process of coarse aerosol fraction redistribution over sizes at their advection in turbulized air flow over uniform and nonuniform underlying surfaces is discussed. Model estimations of spatial variations of the aerosol size spectrum under the effect of gravitational sedimentation are presented.