«Оптика атмосферы и океана», **10**, N 9 (1997)

УДК 551.551.8

А.И. Бородулин, Б.М. Десятков, С.Р. Сарманаев

ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ, ВЫДЕЛЯЕМЫХ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Рассматривается поток аэрозольных частиц через подстилающую поверхность. Для данной, в общем случае случайной, характеристики выведено соотношение, связывающее мгновенное значение потока с мгновенным приземным значением концентрации. Это позволило получить выражение для функции распределения потока частиц. На основании этих результатов сделаны оценки значений математического ожидания потока, дисперсии и его перемежаемости. В качестве входных параметров были привлечены некоторые данные исследования интенсивности подъема радионуклидов в зоне Чернобыльской АЭС.

В ряде случаев подстилающая поверхность может являться достаточно мощным источником аэрозольных частиц. Это, например, относится к поверхности океана, выделяющей аэрозоли морской соли. Обычно оценка эмиссии поднимаемых с поверхности частиц производится: прямыми измерениями, косвенными градиентными методами, по данным о концентрации примеси над подстилающей поверхностью [1].

В статье рассматривается поток частиц через подстилающую поверхность. Для данной, в общем случайной, характеристики выведено соотношение, связывающее мгновенное значение потока с мгновенным приземным значением концентрации, что позволило получить выражение для функции плотности вероятности потока частиц.

На основании этих результатов сделаны оценки значений математического ожидания потока, его дисперсии и перемежаемости. Для этого использовалась справедливая для однородных по горизонтали фрагментов подстилающей поверхности одномерная модель распространения аэрозольных примесей в пограничном слое атмосферы. В качестве исходных данных были привлечены результаты исследования интенсивности подъема радионуклидов в зоне Чернобыльской трагедии [1].

Рассмотрим определение потока аэрозольных частиц, уносимых с подстилающей поверхности:

$$q = (U_z\, C)\Big|_{z=z_0}\ , \qquad (1)$$

где q – поток частиц; U_z – вертикальная компонента скорости ветра; C – концентрация аэрозолей; z_0 – вертикальная координата подстилающей. В соответствии с (1) поток есть произведение двух случайных, из-за турбулентности атмосферы, величин и также является случайной величиной. Поток q есть мгновенная (определенная в момент времени t), одноточечная (определенная в точке с координатами x, y, z_0) характеристика и имеет смысл количества частиц, выделяемых единичной площадью подстилающей поверхности в единицу времени.

Согласно (1) величина q зависит от мгновенного приземного значения концентрации примеси, т. е. $q = q(C)$. Сделаем предположение о малом значении концентрации вблизи подстилающей поверхности. Тогда поток можно приближенно представить в виде

$$q(C) \approx q(0) + \frac{\partial q(C)}{\partial C}\Big|_{C=0}\ C = VC\Big|_{z=z_0}\ . \qquad (2)$$

В правой части (2) учтено, что при нулевой концентрации поток всегда равен нулю. Ввиду того, что производная q по C в (2) берется при неслучайном, нулевом значении концентрации и скорость ветра на подстилающей поверхности также зануляется, предположим неслучайность величины V. Согласно (2) V имеет смысл характерной линейной скорости выделения аэрозольных частиц подстилающей поверхностью.

Соотношение (2) обосновывает пропорциональность мгновенного значения потока частиц мгновенному значению их концентрации вблизи подстилающей поверхности. Аналогичное, усредненное соотношение обычно принимается для примеси, выпадающей на подстилающую поверхность [2], т.е. стандартное граничное условие для концентрации примеси также неявно предполагает малость приземных значений концентрации и, следовательно, справедливость (2).

В соответствии с (2) для задания функции плотности вероятности потока q необходимо и достаточно знать функцию плотности вероятности концентрации аэрозольных частиц при $z = z_0$. Решение задачи определения одноточечной функции плотности вероятности $f(C)$ концентрации пассивных примесей, распространяющихся в турбулентной атмосфере, и экспериментальное обоснование полученных теоретических результатов описаны в [3]:

$$f(C,t) = (1-\gamma_c)\,\delta(C) + f^{(1)}(C,t);$$

$$f^{(1)}(C,t) = \frac{1}{\pi^{1/2}\beta}\left\{\exp\left[-\left(\frac{C-\overline{C}}{\beta}\right)^2\right] - \exp\left[-\left(\frac{C+\overline{C}}{\beta}\right)^2\right]\right\};$$

$$\gamma_c = \operatorname{erf}\left(\frac{\overline{C}}{\beta}\right), \tag{3}$$

где γ_c – вероятность наблюдения ненулевых значений концентрации, называемая перемежаемостью; $\delta(...)$ – дельта-функция; C – математическое ожидание концентрации примеси; β – второй параметр функции плотности вероятности; erf(...) – интеграл вероятности.

Определение второго параметра β наиболее удобно производить на основании выражения для дисперсии концентрации σ^2 [3]:

$$\frac{\sigma^2}{\overline{C}^2} = \gamma\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\beta}{\overline{C}}\right)^2 + 1\right] - 1 + \frac{\beta}{\pi^{1/2}\,\overline{C}}\exp\left[-\left(\frac{\overline{C}}{\beta}\right)^2\right]. \tag{4}$$

Учитывая линейную связь q и C, выпишем функцию плотности вероятности потока частиц $f_q(q, t)$:

$$f_q(q,t) = \frac{1}{V} f\left(\frac{q}{V}, t\right)\bigg|_{z=z_0}. \tag{5}$$

Так же, согласно (2) и (3), получаем выражения для величин, которые будем рассматривать в дальнейшем:

$$\overline{q} = V\,\overline{C}\,\Big|_{z=z_0};\quad \sigma_q^2 = V^2\sigma^2\Big|_{z=z_0};\quad \gamma = \operatorname{erf}\left(\frac{\overline{C}}{\beta}\right)\bigg|_{z=z_0}, \tag{6}$$

где σ_q^2 – дисперсия потока; γ – его перемежаемость.

Приводимые ниже результаты основаны на решении полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии и уравнения для дисперсии концентрации [2, 5]. Поэтому обсудим граничные условия на подстилающей поверхности.

Граничное условие для $\overline{C}$ имеет вид [2]

$$\left[(K_{zz} + \nu)\frac{\partial \overline{C}}{\partial z} + V\,\overline{C}\right]\bigg|_{z=z_0} = 0, \tag{7}$$

где K_{zz} – коэффициент турбулентной диффузии, соответствующий координате z; ν – коэффициент молекулярной диффузии частиц.

Граничное условие для σ^2 следует из [4]:

$$\left[(K_{zz} + \nu)\frac{\partial \sigma^2}{\partial z} + 2V\sigma^2\right]\bigg|_{z=z_0} = 0. \tag{8}$$

Если предположить горизонтальную однородность и квазистационарность процесса распространения частиц, то для определения $\overline{C}$ и σ^2 можно воспользоваться полуэмпирическими уравнениями [2, 5]:

$$-\frac{\partial}{\partial z}(K_{zz}+\nu)\frac{\partial \overline{C}}{\partial z}=0; \qquad (9а)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z}(K_{zz}+\nu)\frac{\partial \sigma^2}{\partial z}=2\,K_{zz}\left(\frac{\partial \overline{C}}{\partial z}\right)^2-E_\sigma. \qquad (9б)$$

Скорость диссипации дисперсии концентрации E_σ, согласно [5], положим равной $E_\sigma=\varepsilon(C_\sigma b^2)^{-1}\sigma^2$, где ε – скорость диссипации турбулентной энергии b^2, а C_σ – эмпирическая константа.

Из (9а) следует, что величина $\overline{q}$ не зависит от z:

$$-(K_{zz}+\nu)\frac{\partial \overline{C}}{\partial z}=\overline{q}; \quad z\ge z_0. \qquad (10)$$

На первом этапе решим уравнение (9а) с граничными условиями: $\overline{C}(z_1)=C_1$; $\overline{C}(h)=0$, где C_1 – известное для высоты z_1 математическое ожидание концентрации, а h – высота пограничного слоя атмосферы. Из (9а) и (10) следует

$$\overline{q}=\left[-(K_{zz}+\nu)\frac{\partial \overline{C}}{\partial z}\right]\Bigg|_{z=z_1}. \qquad (11)$$

Далее уравнение (9а) решается с граничным условием (11) при $z=z_0$ и $\overline{C}(z_1)=C_1$. Откуда, с учетом (6) и (11),

$$V=\overline{q}/[\overline{C}(z_0)]. \qquad (12)$$

Для определения параметра β в (3) следует решить уравнение (9б) с граничными условиями (8) и $\sigma^2(h)=0$.

Нахождение математического ожидания потока $\overline{q}$, σ_q^2 и скорости выделения V требует знания K_{zz}. В данной работе эту величину задавали на основании гипотезы [5]

$$K_{ij}=C_\varphi\frac{b^2}{\varepsilon}\tau_{ij}, \qquad (13)$$

где K_{ij} – ij-я компонента тензора коэффициентов турбулентной диффузии; $C_\varphi=0{,}13$, а τ_{ij} – тензор вязких напряжений Рейнольдса. Гипотеза (13) подтверждается рядом лабораторных и натурных экспериментов [3].

Для определения значений величин ε, b^2 и τ_{ij} использовалась алгебраическая модель [5], аналогичная описанной в [6].

Предположение о горизонтальной однородности и квазистационарности задачи позволяет применить упрощенные уравнения динамики пограничного слоя атмосферы для нахождения средних значений скорости ветра и температуры. С этой целью нами была использована численно-аналитическая модель [7].

В алгебраической и в численно-аналитической моделях нами выделяется приземный слой атмосферы, в котором используются соотношения теории подобия [2]. Необходимость рассмотрения двухслойных задач при использовании алгебраической и численно-аналитической моделей [2, 7] обусловлена различным влиянием подстилающей на режим турбулентности вне и внутри приземного слоя атмосферы.

Для расчетов по описанной выше модели были использованы результаты работы [1], в которой экспериментально исследовалась интенсивность ветрового подъема ряда радионуклидов с территорий, прилегающих к району Чернобыльской АЭС. Использованные нами исходные данные были получены в условиях горизонтальной однородности и усреднены по трехсуточному интервалу. Термическая стратификация атмосферы в среднем была нейтральной, поэтому получившиеся профили концентрации радионуклидов ^{144}Ce, ^{103}Ru, ^{137}Cs и скорости ветра до высоты 15 м были близки к логарифмическим [1].

При расчетах сначала по значению средней скорости ветра на высоте $z_1 = 2$ м с помощью численно-аналитической модели [7] восстанавливался профиль скорости ветра. Последний использовался для вычислений ε, b^2, τ_{zz} и K_{zz} по алгебраической модели [6]. Затем приведенная в [1] и нормированная в статье на значение $\overline{C}\,(z = 1$ м) концентрация C_1 использовалась для расчетов профилей концентрации и ее дисперсии по обсуждавшемуся выше алгоритму.

Вследствие нормировки в [1] исходных данных на $\overline{C}\,(z = 1$ м) среднее значение потока и его дисперсия были получены нормированными на это же значение и приведены ниже в условных единицах. В то же время указанная нормировка, очевидно, не влияет на перемежаемость потока и скорость выделения частиц подстилающей поверхностью.

Рассмотрим полученные результаты. В таблице приведены рассчитанные по описанному выше алгоритму значения $\overline{C}$, σ, а также перемежаемости концентрации радионуклидов γ_c для следующих исходных данных: $\overline{U}(z = 2$ м) = 3 м/с, $z_0 = 0{,}1$ м, нейтральной стратификации атмосферы и $\overline{C}(z = 1$ м) = 1 усл. ед. Вычисленные значения нормированного потока радионуклидов изотопа ^{144}Ce и характерной скорости выделения частиц подстилающей поверхностью составляют $2{,}5\cdot10^{-2}$ усл ед. и $5{,}2\cdot10^{-3}$ м/с соответственно. Стандартное отклонение потока равно $1{,}9\cdot10^{-3}$ усл ед. В силу вышесказанного перемежаемость потока радионуклидов γ получилась практически равной единице. Характерно, что перемежаемость концентрации γ_c (см. таблицу) заметно меньше единицы. Это связано с сильным влиянием турбулентности на распределение значений концентрации над подстилающей поверхностью.

Результаты расчета профиля концентрации радионуклидов изотопа ^{144}Ce, стандартного отклонения и перемежаемости, полученные на основании данных [1]

z, м	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
$\dfrac{\overline{C}}{\overline{C}\,(z = 1\ \text{м})}$	1,61	1,00	0,41	0,12	0,02
$\dfrac{\sigma}{\overline{C}\,(z = 1\ \text{м})}$	0,32	0,29	0,24	0,16	0,07
γ_c	1,00	1,00	0,91	0,50	0,14

В [1] анализируются интенсивность ветрового подъема радионуклидов $\alpha = q/p$ и эмпирический коэффициент ветрового подъема $R = \overline{C}(z = 1$ м$)/p$, где p – плотность осадка аэрозолей на подстилающей поверхности. Отсутствие данных о величине p не позволяет найти значения α и R. Поэтому нами вычислялось их отношение $\alpha/R = q/\overline{C}(z = 1$ м). Согласно [1] среднее по пяти экспериментам значение α/R равно $3{,}0\cdot10^{-2}$ м/с. По нашим расчетам, оно составляет $2{,}5\cdot10^{-2}$ м/с. Очевидно, совпадение вполне удовлетворительное, если учесть, что значения параметров α и R, приведенные в [1], имеют значительный разброс.

Таким образом, упомянутые при постановке задачи исследований методы определения потока частиц по данным о концентрации примесей, полученным над подстилающей поверхностью, дополняются в работе возможностью определения не менее практически важных статистических характеристик. Поскольку выше никак не оговаривался знак потока частиц, то полученные теоретические результаты вполне применимы и для процесса осаждения частиц на подстилающую поверхность, а также при взаимной конкуренции процессов осаждения и подъема частиц подстилающей.

1. Гаргер Е.К., Жуков Г.П., Седунов Ю.С. К оценке параметров ветрового подъема радионуклидов в зоне Чернобыльской атомной электростанции // Метеорология и гидрология. 1990. N 1. С. 5–10.
2. Монин А.С., Яглом А.М. // Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Ч. 1. М.: Наука, 1965. 640 с.

3. Бородулин А.И., Майстренко Г.М., Чалдин Б.М. // Статистическое описание распространения аэрозолей в атмосфере. Метод и приложения. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. 124 с.
4. Бородулин А.И. Задание граничных условий на подстилающей поверхности при решении уравнений для вторых моментов концентрации аэрозольных примесей // Известия АН. Сер. ФАО. 1994. N 30. С. 125–126.
5. Роди В. // Методы расчета турбулентных течений. М.: Мир, 1984. С. 227–322.
6. Теверовский Е.Н, Дмитриев Т.С. // Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
7. Десятков Б.М. // Об одном методе параметризации пограничного слоя атмосферы: Труды Западно-Сибирского регионального научно-исследовательского института. 1986. Вып. 77. С. 68–75.

НИИ аэробиологии, ГНЦ ВБ «Вектор»,
Новосибирская область

Поступила в редакцию
15 января 1997 г.

A.I. Borodulin, B.M. Desyatkov, S.R. Sarmanaev. **Flow Distribution Low of Aerosol Particles Emitted from the Underlying Surface.**

The aerosol particle flow from the underlying surface is considered in this work. For the given (in general case, accidental) characteristic, the expression relating the instantaneous value of the flow with the instantaneous value of aerosol particle concentration has been derived. This allowed the expression for the probability density function of particle flow to be deduced. On the basis of these results the values of mathematical expectation of the flow, dispersion and its alternation have been estimated. The results of the study of the wind rise intesity of radionuclides in the Chernobyl area have been used as initial data.