

Б.М. Десятков, А.И. Бородулин, С.С. Котлярова

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ, ВЫДЕЛЯЕМЫХ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, ПУТЕМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Рассматривается метод оценки потока аэрозольных частиц с подстилающей поверхности путем решения обратной задачи их распространения в пограничном слое атмосферы. Метод основан на применении сопряженного уравнения турбулентной диффузии и оригинальной модели распространения аэрозолей в пограничном слое атмосферы. Рассматриваются практические примеры, в которых в качестве исходных данных использованы результаты исследования интенсивности ветрового подъема радионуклидов в зоне Чернобыльской трагедии и результаты измерения концентрации невесомой примеси (метана) над болотом. Для восстановления профилей скорости ветра, необходимых для решения уравнения турбулентной диффузии, использовались данные стандартных метеонаблюдений.

При решении ряда практических задач возникает необходимость оценить поток аэрозольных частиц с подстилающей поверхности, например потоки аэрозолей морской соли или пыли, поднимаемой ветром с поверхности Земли. Обычно оценка эмиссии поднимаемых с подстилающей поверхности частиц производится: прямыми измерениями; косвенными методами; с помощью градиентных измерений, по данным о концентрации примеси над подстилающей поверхностью [1]. Однако эти подходы дают только локальные оценки, которых недостаточно для получения интегральных характеристик эмиссии с больших площадей. Таким образом, актуальной является задача оценки средних значений потока с больших территорий по измеренным в ряде контрольных точек над подстилающей поверхностью значениям концентрации примеси.

В данной статье предложен метод оценки потока частиц с подстилающей поверхности путем решения обратной задачи их распространения в пограничном слое атмосферы. Метод основан на применении сопряженного уравнения турбулентной диффузии. В качестве исходных данных использованы результаты исследования интенсивности ветрового подъема радионуклидов в зоне Чернобыльской трагедии [1] и результаты измерения концентрации невесомой примеси (метана), выделяемой заболоченной подстилающей поверхностью [2].

Пусть распространение примесей в атмосфере является квазистационарным и описывается полумпирическим уравнением [3]

$$U \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + V \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + (\bar{W} - V_s) \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x + \nu) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (K_y + \nu) \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (K_z + \nu) \frac{\partial \bar{C}}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $\bar{C}$  – математическое ожидание концентрации;  $U, V, \bar{W}$  – средние значения  $\bar{x}, \bar{y}$  и  $\bar{z}$  компонент скорости ветра соответственно;  $V_s$  – скорость седиментации частиц;  $k_x, k_y, k_z$  – коэффициенты турбулентной диффузии;  $\nu$  – коэффициент молекулярной диффузии частиц. Оси  $x$  и  $y$  расположим в горизонтальной плоскости, а ось  $z$  направим вертикально вверх. Предположение о квазистационарности процесса диффузии не исключает зависимости коэффициентов в (1) от времени.

Рассмотрим область пространства  $\Omega$ , включающую подстилающую поверхность, выделяющую аэрозольные частицы и ограниченную плоскостями  $x = 0, x = X, y = 0, y = Y, z = H$ , а также плоскостью  $z = 0$ , соответствующей подстилающей поверхности. Пусть  $S_0$  – часть подстилающей поверхности, испускающей частицы. Зададим на  $\Omega$  следующие граничные условия:

$$\bar{C}(0, y, z) = \bar{C}(X, y, z) = \bar{C}(x, 0, z) = \bar{C}(x, Y, z) = \bar{C}(x, y, H) = 0;$$

$$K_z \left. \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right|_{z=0} = -\bar{q} \text{ на } S_0; K_z \left. \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \text{ вне } S_0, \quad (2)$$

где  $\bar{q}(x, y)$  – математическое ожидание потока примеси.

Согласно [4] сформулируем сопряженную к (1) и (2) задачу в виде

$$-\bar{U} \frac{\partial C^*}{\partial z} - \bar{V} \frac{\partial C^*}{\partial y} - (\bar{W} - V_z) \frac{\partial C^*}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x + v) \frac{\partial C^*}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (K_y + v) \frac{\partial C^*}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (K_z + v) \frac{\partial C^*}{\partial z} + R, \quad (3)$$

где  $R(x, y, z)$  – некоторая пока не определенная функция. Зададим на  $\Omega$  следующие граничные условия:

$$C^*(0, y, z) = C^*(X, y, z) = C^*(x, 0, z) = C^*(x, Y, z) = C^*(x, y, H) = 0; \quad K_z \left. \frac{\partial C^*}{\partial z} \right|_{z=0} = 0. \quad (4)$$

Умножим (1) на  $C^*$  и вычтем из него (3), помноженное на  $\bar{C}$ . Полученное выражение проинтегрируем по области  $\Omega$ . После проведения выкладок с учетом (2) и (4) получим

$$\int_{S_0} C^*(x, y, 0) \bar{q}(x, y) dx dy = \int_{\Omega} R \bar{C}(x, y, z) dx dy dz. \quad (5)$$

Будем считать, что поверхность, выделяющая частицы, однородна и  $\bar{q}$  не зависит от  $x, y$ . Тогда, задав  $R$  в виде

$$R(x, y, z) = Q \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0), \quad (6)$$

где  $Q$  – константа;  $\delta(\dots)$  – дельта-функция;  $x_0, y_0, z_0$  – координаты точки измерения концентрации примеси, получим

$$\bar{q} = Q \bar{C}(x_0, y_0, z_0) \left[ \int_{S_0} C^*(x, y, 0) dx dy \right]^{-1}, \quad (7)$$

где  $\bar{C}(x_0, y_0, z_0)$  – измеренное значение концентрации.

Таким образом, можно сформулировать следующий алгоритм решения обратной задачи определения среднего значения потока примеси. В точке с координатами  $x_0, y_0, z_0$ , где были проведены измерения концентрации  $\bar{C}(x_0, y_0, z_0)$ , задаем  $R$  в виде (6). Не нарушая общности рассуждений, полагаем  $Q = 1$ . Теперь, решая сопряженную задачу (3) и (4), получаем функцию Грина  $C^*$  во всех точках области  $\Omega$ , в том числе на поверхности  $S_0$ , и по (7) находим искомое среднее значение потока  $\bar{q}$ .

В [5] нами обоснована пропорциональность потока примеси приземному значению математического ожидания ее концентрации:

$$\bar{q} = V \bar{C}(x, y, 0). \quad (8)$$

Коэффициент пропорциональности  $V$  имеет смысл характерной линейной скорости выделения частиц подстилающей поверхностью и может представлять интерес для описания процесса эмиссии на конкретных типах поверхности. Первые результаты оценок  $V$  на основании данных измерений и последующих расчетов приведены в [5].

Обсуждавшиеся выше прямая и обратная задачи решались с помощью численных методов. Для этого использовалась трехмерная численно-аналитическая модель [6], описывающая процесс распространения примесей в термически стратифицированном пограничном слое атмосферы. Эта модель основана на линеаризованном варианте полной системы уравнений динамики пограничного слоя атмосферы и позволяет учитывать нестационарность метеорологических полей, динамическую, термическую и орографическую неоднородности подстилающей поверхности.

Для расчетов по описанной выше модели были использованы данные работы [1], в которой экспериментально исследовалась интенсивность ветрового подъема ряда радионуклидов с

территорий, прилегающих к району Чернобыльской АЭС. Используемые 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  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и скорости ветра до высоты 15 м были близки к логарифмическим [1].

При расчетах сначала по значению средней скорости ветра на высоте  $z_0 = 2$  м с помощью численно-аналитической модели [6] восстанавливались профиль скорости ветра и коэффициенты турбулентной диффузии. Затем приведенная в [1] и нормированная в статье на  $\bar{C}(z = 1 \text{ м})$  величина  $\bar{C}(x_0, y_0, z_0)$  использовалась для расчетов потока по обсуждаемому выше алгоритму.

Вследствие нормировки в [1] исходных данных на  $\bar{C}(z = 1 \text{ м})$  среднее значение потока было получено нормированным на это же значение и приведено ниже в условных единицах. В то же время указанная нормировка, очевидно, не влияет на величину скорости выделения частиц подстилающей поверхностью.

Приведем полученные результаты, которые были рассчитаны для  $\bar{U}(z = 2 \text{ м}) = 3 \text{ м/с}$ , нейтральной стратификации и  $\bar{C}(z = 1 \text{ м}) = 1 \text{ усл.ед.}$  Вычисленные значения нормированного потока радионуклидов изотопа  $^{144}\text{Ce}$  и характерной скорости выделения частиц подстилающей поверхностью получились равными  $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ усл.ед.}$  и  $8,9 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  соответственно.

В [1] также рассматриваются интенсивность ветрового подъема  $\alpha = q/p$  и эмпирический коэффициент  $\mu = \bar{C}(z = 1 \text{ м})/p$ , где  $p$  – плотность осадка аэрозолей на подстилающей поверхности. Нами вычислялось отношение  $\alpha/\mu = q/\bar{C}(z = 1 \text{ м})$ . Согласно [1] среднее по пяти экспериментам значение  $\alpha/\mu$  равно  $3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ . По нашим расчетам оно составляет  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ . Очевидно, совпадение удовлетворительное, если учесть, что значения параметров  $\alpha$  и  $\mu$ , данные в [1], имеют значительный разброс.

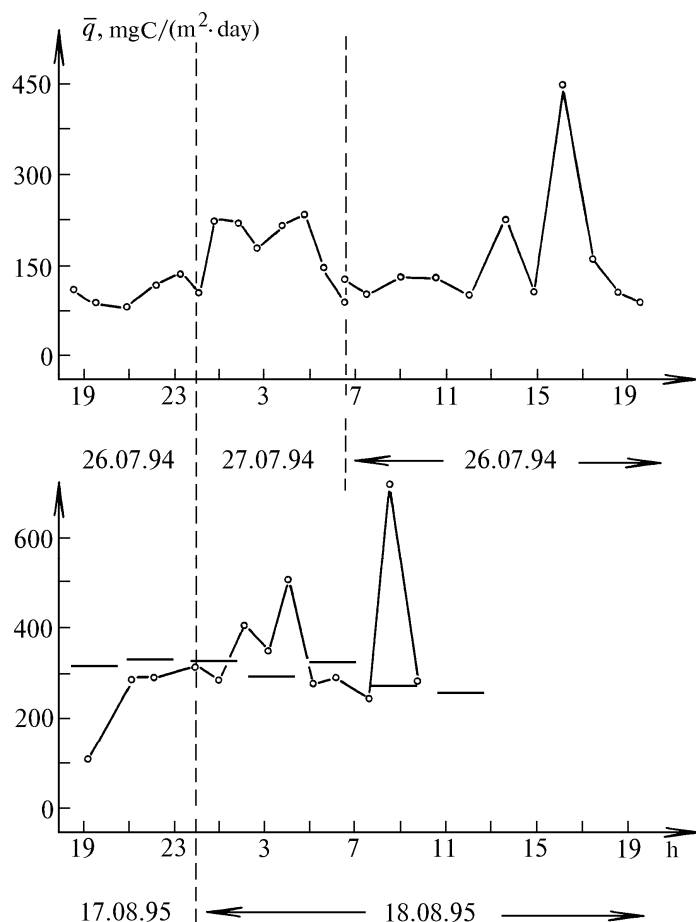
Для дополнительной проверки рассматриваемого метода были проведены расчеты по оценке потока невесомой примеси (метана) с использованием экспериментальных данных, полученных в Бакчарском районе Томской области на базе Плотниковского стационара Института почвоведения и агрохимии СО РАН. В качестве объекта исследований было выбрано Бакчарское болото [2]. В течение ряда дней во время экспедиций 1994 и 1995 гг. нами проводились ежечасные измерения концентрации метана, скорости ветра, температуры и влажности воздуха над болотом на высоте  $z = 2$  м от подстилающей поверхности и на расстоянии порядка 100 м от кромки болота. Метеорологические измерения проводились с помощью стандартной аппаратуры.

Расчеты проводились при следующих значениях входных параметров:  $X = Y = 3000 \text{ м}$ ,  $H = 60 \text{ м}$ ; шаги разностной сетки составляли  $\Delta x = \Delta y = 200 \text{ м}$ ,  $\Delta z = 2 \text{ м}$ . Болото занимало приблизительно  $6,6 \text{ км}^2$  из  $9 \text{ км}^2$  исследуемой области. Граница его в виде ломаной линии проходила с северо-северо-запада на юго-юго-восток. Выбранная расчетная сетка, на боковых границах которой согласно (2) следует ставить нулевые граничные условия для  $\bar{C}$ , должна давать искаженные значения математического ожидания концентрации из-за того, что ряд ее граничных узлов расположен непосредственно над болотом, где концентрация не равна нулю. Однако специально проведенные расчеты показали, что влияние границ на  $\bar{C}(x_0, y_0, z_0)$  при указанных параметрах шаблона и размерах расчетной области пренебрежимо мало.

Рассмотрим некоторые результаты расчетов. На рисунке приведены рассчитанные значения потока метана для 26–27.07.94 и 17–18.08.95. Горизонтальными отрезками отмечены измеренные камерным статическим методом [2] значения  $\bar{q}$  (длина штрихов соответствует продолжительности процесса измерения). Видно, что экспериментально полученный поток метана изменяется плавно, а рассчитанные значения имеют значительный разброс. Это, по видимому, можно объяснить несоответствием времени отбора проб воздуха ( $\sim 1 \text{ мин}$ ) периоду усреднения при измерении потока метана камерным статическим методом ( $\sim 2 \text{ ч}$ ). Длительность метеорологических наблюдений составляла минуты.

В такой ситуации очевидно, что временной ход измеренных камерным статическим методом значений потока метана будет более гладким, чем рассчитанных. Однако среднее плюс-минус стандартное отклонение  $\bar{q}$  по данным, полученным нами камерным статическим методом 17–18.08.95, составило  $300 \pm 27 \text{ мгC}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ , а среднее рассчитанное значение потока равно  $334 \pm 150 \text{ мгC}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$  (единица массы соответствует массе углерода, содержащегося в молекуле метана). По данным экспериментов, приведенных в [2], за 1992–1994 гг. среднее по всем наблюдениям значение потока на Бакчарском болоте равно  $221 \pm 223 \text{ мгC}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ , а рас-

считанное на основании экспериментов 26–27.07.94 составляет  $154 \pm 83$  мгС/(м<sup>2</sup>·сут). В целом, с учетом сделанных выше замечаний, совпадение в среднем рассчитанных и измеренных значений потока метана можно считать удовлетворительным.



Найденные путем решения обратной задачи значения потока невесомой примеси (метана)

После определения потока метана путем решения обратной задачи (2), (3) последний был использован нами для решения прямой задачи распространения (1) и (2). Полученные расчетным путем значения концентрации  $\bar{C}(x_0, y_0, z_0)$  отличаются от измеренных значений не более чем на 20%. Такое совпадение рассчитанных и наблюдавшихся значений концентрации можно считать удовлетворительным. Это указывает на корректность предлагаемого подхода, основанного на решении обратной задачи. Дополнительно такая процедура демонстрирует приемлемую точность расчетов, достигнутую при применении численных методов решения выписанных выше уравнений.

Рассмотрим рассчитанные по формуле (8) согласно приведенным на рисунке данным значения характерной линейной скорости выделения молекул метана подстилающей поверхностью. Среднее значение  $V$  для эксперимента 26–27.07.94 равно  $5,5 \pm 1,5$  мм/с, а для 17–18.08.95 составляет  $4,9 \pm 0,6$  мм/с. Мы видим, что полученное приблизительно через год в той же точке болота среднее значение  $V$  практически воспроизвелось. Следовательно, соотношение (8) может использоваться для оценки потока по данным о приземной концентрации примеси.

Таким образом, предложенный в данной статье метод оценки потока газовых и аэрозольных примесей с подстилающей поверхности путем использования измеренных значений концентрации и решения обратной задачи может давать вполне разумные и близкие к реальным значения искомым значениям потока примеси с подстилающей поверхности.

В заключение авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку данной работы.

1. Гарнер Е.К., Жуков Г.П., Седунов Ю.С. К оценке параметров ветрового подъема радионуклидов в зоне Чернобыльской атомной станции//Метеорология и гидрология. 1990. N 1. С. 5–10.
2. Паников Н.С., Сизова М.В., Зеленев В.В. и др. Эмиссия  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  из болот Западной Сибири: пространственное и временное варьирование потоков // Экологическая химия. 1995. Т. 4. N 1. С. 13–24.
3. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Ч. 1. М.: Наука, 1965. N 3. 640 с.
4. Марчук Г.И. // Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.
5. Бородулин А.И., Махов Г.А., Сарманаев С.Р., Десятков Б.М. О распределении потока метана над заболоченной местностью//Метеорология и гидрология. 1995. N 11. С. 72–79.
6. Десятков Б.М., Сарманаев С.Р., Бородулин А.И. Численно-аналитическая модель переноса аэрозолей в термически стратифицированном пограничном слое атмосферы//Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 8. N 6. С. 815–820.

НИИ аэриобиологии, ГНЦ ВБ «Вектор»,  
Новосибирская обл.

Поступила в редакцию  
16 января 1997 г.

**B. M. Desyatkov, A. I. Borodulin, S. S. Kotlyarova. Determination of Flow of Aerosol Particles Flow, Emitted From Underlying Surface, by Solving Inverse Problem of Their Dispersion in the Atmosphere.**

The estimation method for the aerosol particles flow from underlying surface by solving inverse problem of their dispersion in the atmospheric boundary layer is discussed. The method is based on the turbulent diffusion conjugate equation and original model of the aerosol dispersion in the atmospheric boundary layer. This work presents the results of study of the wind rise intensity of radionuclides in the Chernobyl area and measurements of weightless pollutants (methane) rise over wetlands as the initial data. To reproduce the wind velocity profiles required for the solution of the turbulent diffusion equation, the data of standard meteorological observations were used.