

А.В. Аргучинцева

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Математическое моделирование распределения атмосферных аэрозолей основывается на стохастическом подходе описания климатических характеристик рассматриваемых регионов в виде многомерных функций плотности вероятности реализации конкретного метеокомплекса. Эти характеристики замыкают дифференциальное уравнение, описывающее перенос и турбулентную диффузию загрязняющего вещества. Приводятся примеры расчетов, оценивающих вклад конкретных промышленных источников в загрязнение атмосферы и подстилающей поверхности в районе Южного Байкала.

Загрязнение окружающей среды отходами промышленных и бытовых предприятий (трубы, стоки, отвалы золы и шлаков и пр.) оказывает на здоровье человека не только прямое, но и косвенное влияние (эрозия почв, поражение флоры и фауны). Самоочищение среды от оказанных на нее вредных воздействий в значительной степени зависит от климатических особенностей местности. Поэтому несомненный интерес представляет оценка метеорологического потенциала атмосферы, определяющего возможности рассеяния и накопления загрязняющих ингредиентов как в приземном слое, так и на подстилающей поверхности. С этих позиций наиболее адекватным изучаемому явлению функциональным пространством является вероятностное, минимизирующее по сравнению с другими пространствами погрешности результатов. Поясним высказанное утверждение. Обычно концентрации примеси рассчитывают для каких-то мгновенных или усредненных метеорологических параметров. В первом случае получают результат именно для мгновенных характеристик, вероятность совместной реализации которых, как правило, очень мала. Во втором случае – результат для усредненных за некоторый промежуток времени характеристик, которые могут никогда не существовать в реальной атмосфере. Поэтому перенос и турбулентную диффузию примеси надежнее рассматривать в поле случайных скоростей, считая реализацию всех метеорологических комплексов как полную группу событий за интересующий нас отрезок времени.

При таком подходе уже не предполагается однозначной зависимости между начальными условиями и последующим развитием процесса, а допускается принципиальная возможность различного протекания процессов, повторяющихся многократно при сходных начальных условиях [1].

В качестве исходного уравнения, описывающего процесс переноса и турбулентной диффузии примеси, примем, например:

$$u \frac{\partial s}{\partial x} - w_g \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial s}{\partial z}, \quad (1)$$

где x, y, z – оси декартовой прямоугольной системы координат, для которой x и y – горизонтальные координаты, причем ось x ориентирована в направлении ветра, ось z направлена вертикально вверх; главные оси тензора турбулентной диффузии совпадают с координатными осями ($k_{ij} = 0$, если $i \neq j$; $k_{ij} = k_i$, если $i = j$, $i, j = x, y, z$); s – концентрация рассматриваемого ингредиента; u – горизонтальная (по оси x) компонента вектора скорости ветра; w_g – скорость гравитационного осаждения частиц.

Граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} us &= M \delta(y) \delta(z - H) && \text{при } x = 0, \\ |s| &\neq \infty && \text{при } z \rightarrow \infty, |y| \rightarrow \infty, \end{aligned}$$

$$k_z \frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z = 0.$$

Здесь M – интенсивность источника (количество вещества, выбрасываемого в единицу времени); H – его геометрическая высота; δ – дельта-функция Дирака.

Решение исходного дифференциального уравнения (1), полученное в [2], но записанное в обозначениях [3] с исправлением замеченных ошибок, имеет вид

$$s = \frac{M(zH)^{-\mu(1+n)/2} z_1^{1+\mu(1+n)}}{2(1+n) k_1 \sqrt{\pi} k_0 x^3} \exp \left[-\frac{y^2}{4 k_0 x} - \frac{u_1 (H^{1+n} + z^{1+n}) z_1^{1-n}}{(1+n)^2 k_1 x} \right] I_\mu \left[\frac{2u_1 (Hz)^{(1+n)/2} z_1^{1-n}}{(1+n)^2 k_1 x} \right],$$

где $\mu = w_g z_1 / (k_1 (1+n))$; I – функция Бесселя мнимого аргумента; $k_z = k_1 (z/z_1)$; $u = u_1 (z/z_1)^n$; $k_y = k_0 (z/z_1)^n$, $k_0 = L/2 \sqrt{u^2 + v^2}$; L – масштаб расчетного шага; v – компонента вектора скорости ветра по оси y ; n – безразмерный параметр для интерполяции вертикального профиля скорости ветра; k_1 и u_1 – соответственно коэффициент турбулентной диффузии и скорость ветра на высоте $z_1 = 1$ м.

Поток (Π) взвеси на подстилающую поверхность с учетом граничных условий рассчитывается по формуле

$$\Pi = w_g s.$$

Задача замыкается на данные метеорологических наблюдений стационарных станций и постов, на основе которых строится климатическая функция плотности вероятностей реализации метеокомплексов. При таком подходе многие недостатки аналитических решений, возникающие из-за упрощений исходных дифференциальных уравнений, нивелируются.

В силу того, что записанное аналитическое решение справедливо для дифференциального уравнения (1), в котором ось абсцисс ориентирована в направлении ветра, расчет примеси в каждой точке пространства приходится вести во вращающейся системе координат, чтобы полностью описать статистическую структуру ветра за рассматриваемый отрезок времени. Если ставится вопрос об оценке накопления тяжелых частиц на подстилающей поверхности, то, как правило, приходится использовать эмпирические законы распределения. Если же необходимо оценить экологическую обстановку с точки зрения вероятности превышения предельно допустимых концентраций, то задачу описания статистической структуры можно свести к теоретическим законам распределения, подобранным из соображений минимальной невязки с реальным эмпирическим распределением. В этом случае время счета значительно уменьшается.

Надо отметить, что идея метода может быть использована и для других типов аналитических решений.

В качестве иллюстраций приведем некоторые расчетные эксперименты.

Эксперимент 1. Поставлена цель оценить вклад антропогенных источников Ангарска и Иркутска в загрязнение Южного Байкала. В качестве загрязняющего ингредиента рассматривалась пыль (суммарные выбросы пыли в Ангарске примерно в четыре раза больше, чем в Иркутске) с учетом процентного содержания ее фракций. Далее, для каждой фракции рассчитывалась гравитационная скорость осаждения [4]. Данные о метеорежиме по шести стационарным постам за 10-летний период наблюдений позволили построить эмпирическую функцию плотности распределения вероятностей вектора скорости ветра как устойчивую климатическую характеристику. Результаты расчетов приведены на рис. 1. Причем надо обратить внимание на то, что расчеты были проведены отдельно для Иркутска и Ангарска и сведены в один рисунок для иллюстрации вклада каждого промузла в загрязнение подстилающей поверхности. Как видим, несмотря на то, что от Байкала промышленные источники Ангарска более удалены, вклад их в общее загрязнение акватории Южного Байкала не меньше, чем от Иркутска.

Эксперимент 2. Проведены расчеты количества выпадающей в течение года на подстилающую поверхность пыли, выбрасываемой источниками г. Байкальска (рис. 2). Рельеф снят с шагом 1 км на расстоянии 44 км к востоку, 9 км к западу и 15 км к югу от Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК). Результаты расчетов сравнивались с данными снего-съемок, на основе которых были определены накопления взвесей за период устойчивого снежного покрова в районе Южного Байкала [5] и дали хорошее соответствие.

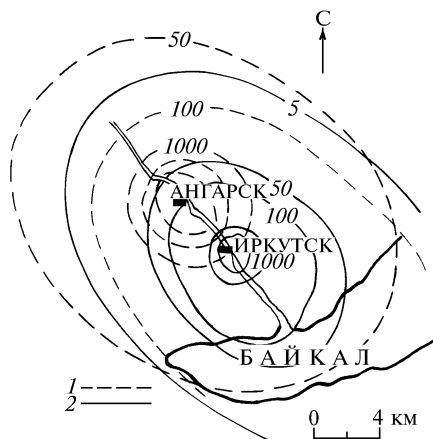


Рис. 1. Количество пыли, выпадающей в течение года на подстилающую поверхность от источников: 1 — от Ангарска; 2 — от Иркутска (мг/м²)

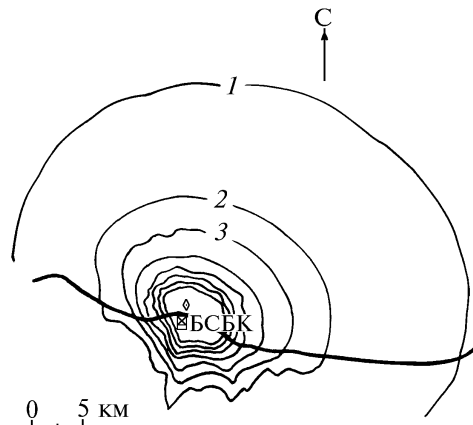


Рис. 2. Количество пыли, выпадающей в течение года на подстилающую поверхность (БЦБК). Изолиния 1 — 100 мг/м²; 2 — 500 мг/м²; 3 — 1000 мг/м²; далее — с шагом 1000 мг/м². Жирная линия — контур береговой линии Байкала. а — локальный максимум, равный 37000 мг/м²

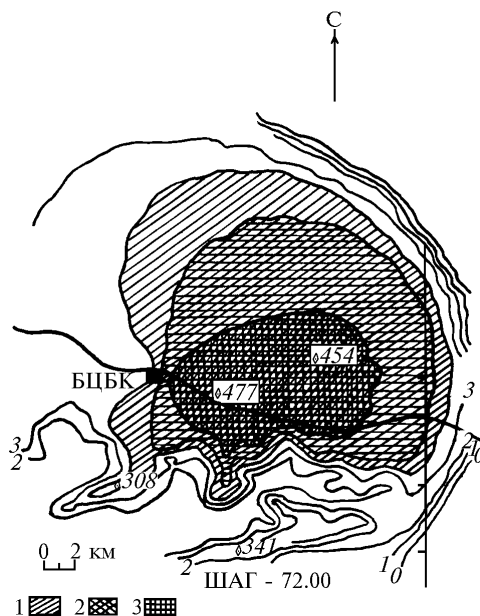


Рис. 3. Частота превышения 20 ПДК метилмеркаптана в июле (БЦБК): 1 — с вероятностью не менее 0,4 (288 ч); 2 — $\geq 0,5$ (360 ч); 3 — $\geq 0,6$ (432 ч)

Эксперимент 3. За все многолетние месяцы (усреднение за 15 лет) проведены расчеты вероятности превышения предельно допустимых концентраций метилмеркаптана (ПДК = $9 \cdot 10^{-6}$ мг/м³). Так как области загрязнения концентрациями метилмеркаптана выше ПДК составляют более 100 км, то результаты расчетов приводятся для случая, когда превышение выбранного критерия достигает не менее 20 ПДК. Рельеф использован из эксперимента 2. В качестве иллюстрации приведен расчет для июля (рис. 3). Береговая линия обозначена так же, как на рис. 2. Для удобства изолинии повторяемости превышения 20 ПДК проведены с шагом 72 ч, что соответствует вероятности 0,1. Опасные зоны заштрихованы. Дополнительно проведенные расчеты показали, что в районе БЦБК достигаются даже 90–100-кратные превышения ПДК данного ингредиента.

Рассмотренные модели позволяют давать прогностические результаты (реконструкция предприятий, смена вида топлива, изменение режима работы, совершенствование очистных

сооружений, ввод в эксплуатацию новых объектов и пр.). Результаты таких расчетов даны, например, в работах [6–8].

1. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Вероятностные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 271 с.
2. Гандин Л. С., Соловейчик Р. Э. // Тр. ГГО. 1958. Вып. 77. С. 84–94.
3. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
4. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М.: АН СССР, 1955. 351 с.
5. Аргучинцев В. К., Аргучинцева А. В., Власенко В. В., Галкин Л. М., Ходжер Т. В. // География и природные ресурсы. 1989. N 3. С. 66–74.
6. Аргучинцев В. К., Аргучинцева А. В. // География и природные ресурсы. 1993. N 4. С. 69–74.
7. Аргучинцева А. В. // География и природные ресурсы. 1994. N 2. С. 50–55.
8. Аргучинцева А. В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 8. С. 1101–1105.

Иркутский государственный
университет

Поступила в редакцию
26 января 1995 г.

A. V. Arguchintseva. Mathematical Simulation of Distribution of Anthropogenic Aerosols.

Mathematical simulation of aerosols air distribution is based on the stochastic approach to the description of climatic characteristics of the regions. This approach uses multidimensional function of the probability density of the particular meteorological situations. The results of computational experiments are given. They estimate the contribution of every industrial source to the air and underlying surface pollution in the south region of Lake Baykal.