

УДК 504.3.064, 571.54

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

С.Ж. Вологжина

SIMULATION OF GROUND-LEVEL AIR POLLUTION IN THE BAIKAL REGION

S.Zh. Vologzhina

Статья посвящена проблеме загрязнения атмосферы. Для оценки распределения примесей антропогенного характера используется математическая модель, основанная на аналитических решениях дифференциального уравнения, описывающего перенос и турбулентную диффузию примеси. На основе модели рассчитаны вероятностные характеристики области загрязнения атмосферы от антропогенных источников, определены зоны превышения ПДК и их размеры.

The article is devoted to the problem of air pollution. To assess the distribution of impurities of human nature we were using a mathematical model based on analytic solutions to differential equations describing the transport and turbulent diffusion of the impurity. Based on the model calculated the probability characteristics of air pollution from anthropogenic sources identified zones exceeded maximum allowable concentrations and their sizes.

Как известно, основными факторами, определяющими диффузию примесей в атмосфере, являются ветер и параметры источников загрязнения. Первый из них несет в себе значительный элемент случайности, и для его описания широко используются статистические и вероятностные характеристики второй может быть значительно детерминированным. Поэтому одним из подходов к задаче определения вероятностных характеристик области загрязнения от одиночного источника является установление аналитической связи между вероятностными характеристиками и областью загрязнения.

Примесь, поступающая в атмосферу от какого-либо постоянно действующего промышленного источника, в дальнейшем распространяется за счет переноса ветром и турбулентной диффузии. Распределение ее в пространстве в основном определяется параметрами выброса, характером подстилающей поверхности, состоянием атмосферы.

При распределении примеси от источника загрязнения в атмосфере наблюдаются некоторые закономерности. На малых расстояниях от источника максимум концентрации примеси по высоте отмечается примерно на уровне источника, и профиль концентрации по отношению к этому уровню почти симметричен. Постепенно, с увеличением расстояния максимум (ось факела) снижается, а на некотором расстоянии он достигается у земной поверхности. С этого момента концентрация убывает с ростом высоты, причем в нижнем слое медленнее, а в верхнем быстрее. Вертикальное распределение концентрации на разных расстояниях от линейного источника имеет в некотором отношении аналогичный характер. При малых расстояниях оно почти симметрично относительно уровня источника. С увеличением расстояния эта симметрия нарушается таким образом, что убывание концентрации вверх происходит быстрее, чем вниз, а положение максимума концентрации по вертикали постепенно снижается до уровня подстилающей поверхности. Основная часть примеси всегда сосредотачивается в сравнительно узкой струе примеси. В распределении же наземной концентрации по направлению ветра отмечается максимум на некотором расстоянии от

источника [Берлянд, 1985]. Увеличение концентрации примеси существенно зависит от высоты расположения нижней границы инверсии над источником и от высоты источника. Это увеличение тем больше, чем ближе к источнику основание инверсионного слоя и чем ниже уровень источника. Если слой ослабленной турбулентности расположен на достаточно большом удалении над источником, то возрастание приземной концентрации сравнительно мало, и оно существенно только на довольно больших расстояниях от источника. Когда же задерживающий слой начинается непосредственно над источником, увеличение максимума приземной концентрации составляет 50–70 %, а иногда более 100 %. Наличие штилевых слоев в зоне распространения примеси приводит к увеличению ее приземной концентрации. Когда слой с ослабленной скоростью ветра расположен на некотором уровне, то чем ниже этот уровень, тем сильнее влияние данного слоя. Неблагоприятным является направление ветра вдоль источника выброса. При этом поля концентрации примесей от отдельных точечных источников складываются и формируют новое поле с более высоким показателем загрязнения воздуха. Скорость ветра имеет важное значение как основной фактор турбулентности, а следовательно, диффузии примеси [Семенченко, Белов, 1984].

В качестве входной информации для расчетов по математической модели использовались инвентаризационные данные о параметрах источников выбросов предприятий Байкальского региона: мощность выброса, координаты относительного размещения источников, скорость выброса, радиус и высота труб, температура газовоздушной смеси. Кроме того, использовались многолетние данные ежедневных 8-срочных метеорологических наблюдений за вектором скорости ветра с целью получения статистически устойчивых климатических характеристик.

Наблюдения на гидрометеостанциях и постах за скоростью ветра проводятся в полярной системе координат. Поэтому полученные многолетние массивы данных по каждому пункту были обработаны по специальной компьютерной программе с разложением вектора скорости ветра на скалярные ком-

поненты декартовой прямоугольной системы координат с последующей статистической обработкой полученной информации.

В качестве исходного уравнения, описывающего процесс переноса и турбулентной диффузии примеси, принимается уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial s}{\partial z} + \alpha s = \\ = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial s}{\partial z}, \end{aligned}$$

где t – время; x, y, z – оси декартовой прямоугольной системы координат (оси x, y – направлены по горизонтали, ось z – вертикально вверх); s – концентрация примеси; u, v, w – компоненты вектора скорости ветра соответственно по осям x, y, z ; w_g – скорость гравитационного осаждения частиц; α – коэффициент распада примеси.

Исходное уравнение после некоторых упрощений принимает вид

$$u \frac{\partial s}{\partial x} - w_g \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial s}{\partial z}.$$

Граничные условия имеют вид

$$us = M\delta(y)\delta(z - H) \text{ при } x=0,$$

$$|s| = 0 \text{ при } z \rightarrow 0, |y| \rightarrow \infty,$$

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

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

Аналитическое решение этого дифференциального уравнения имеет вид

$$\begin{aligned} s = \frac{M}{4\pi x \sqrt{k_y k_z}} \exp\left(-\frac{uy^2}{4k_y x}\right) \times \\ \times \left(\exp\left(-\frac{u(z+H)^2}{4k_z x}\right) + \exp\left(-\frac{u(z-H)^2}{4k_z x}\right) \right), \\ k_z = k_1(z_1/z_2)u = u_1(z/z_1)^n, \quad k_y = k_0(z/z_1)^n, \\ k_0 = L/2\sqrt{u^2 + v^2}. \end{aligned}$$

Здесь L – масштаб расчетного шага, n – безразмерный параметр для интерполяции вертикального профиля скорости ветра.

Несмотря на упрощения реальных физических процессов, использование полученного аналитического решения очень сильно выигрывает за счет того, что реализация алгоритма проводится во вращающейся вслед за ветром системе координат по всем его возможным модульным значениям, рассчитываемым по принципу шкалы Бофорта [Моделирование и управление процессами регионального развития, 2001].

Рассмотрим применение математической модели на примере выбросов загрязняющих веществ в Улан-Удэ.

Расчеты были произведены для 16 веществ и для четырех месяцев: для декабря и февраля, как неблагоприятных месяцев для рассеяния примесей, и ию-

ля и августа, когда наибольшей повторяемости достигают сильные ветры при северо-западном направлении [Климат Улан-Удэ, 1983]. В результате произведенных расчетов были получены 64 карты-схемы загрязнения территории с изолиниями, проведенными по частоте превышения ПДК_{с.с} в часах.

По таким веществам, как фториды газообразные, оксид железа, фтористый водород, соединения марганца, аммиак, соединения свинца, взвешенные вещества, соединения олова, пыль неорганическая с содержанием кремния более 70 %, превышений ПДК_{с.с} обнаружено не было. Оно было получено по таким веществам, как оксид углерода, оксид и диоксид азота, бенз(а)пирен, сажа, диоксид серы, пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20 % и с содержанием кремния от 20 до 70 %.

В качестве примера приведены результаты по распределению диоксида серы.

На рис. 1 и 2 представлены карты-схемы распределения диоксида серы, поступающего от стационарных источников в Улан-Удэ, в феврале и июле, построенные по результатам расчетов по математической модели распределения примесей в атмосфере. Изолиния 24 показывает область, в которой не менее 24 ч в месяц концентрация диоксида серы превышает установленную ПДК_{с.с}, далее все изолинии проведены с шагом 24 ч (сутки). В июле рассеяние примесей происходит на большие расстояния, чем в феврале, но с меньшими концентрациями. Максимальное превышение ПДК_{с.с} диоксида серы в феврале составляет 600 ч из 672 возможных, а в июле 450 ч из 744 возможных.

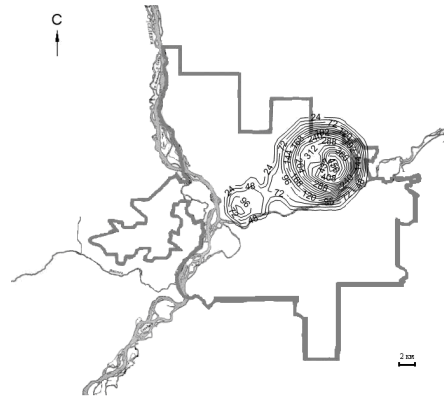


Рис. 1. Частота превышения ПДК_{с.с} диоксида серы в феврале.

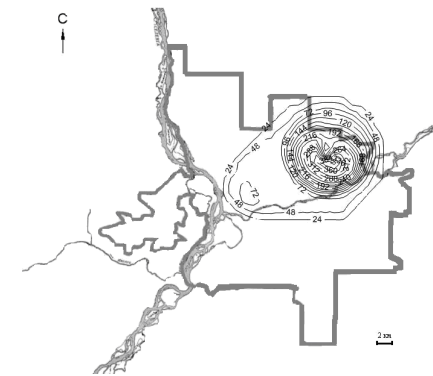


Рис. 2. Частота превышения ПДК_{с.с} диоксида серы в июле.

Работа выполнена при поддержке Иркутского государственного университета, индивидуальный исследовательский грант № 091-08-104.

Моделирование и управление процессами регионального развития / под ред. С.Н. Васильева. М.: Физматлит, 2001. 432 с.

Семенченко Б.А., Белов П.Н. Метеорологические аспекты охраны природной среды. М.: Изд-во МГУ, 1984. 94 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометгиздат, 1985. 272 с.

Климат Улан-Удэ / под ред. Н.И. Сницаренко, Ц.А. Швер. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 240 с.

Иркутский государственный университет, Иркутск