

**В.К. Аргучинцев**

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

Построена численная модель переноса примесей в условиях сложного рельефа местности. Приведены результаты экспериментов, характеризующие распределение и дальность распространения твердых взвесей в Южном Прибайкалье для типичных метеорологических ситуаций.

Распространение атмосферных аэрозолей зависит от метеорологических условий, орографических неоднородностей местности, трансформации веществ за счет химических и фотохимических превращений, от взаимодействия примесей с поверхностью земли.

При математическом моделировании переноса примесей в мезомасштабном пограничном слое атмосферы возникает проблема восстановления метеорологических полей в связи с отсутствием регулярных наблюдений над водной поверхностью и труднодоступными горными районами. Для описания мезометеорологических процессов, возникающих над термическими и орографическими неоднородностями подстилающей поверхности, предлагается использовать негидростатическую модель без упрощений теории свободной конвекции [1].

Модель позволяет изучать широкий класс мезомасштабных явлений: бризовые и горнодолинные циркуляции с внешним ветром, фены, орографические волны, мезомасштабную структуру метеорологических фронтов, конвекцию, возникающую за счет естественных и антропогенных факторов и т.д.

Найденные на основе гидротермодинамической модели скорости движения и турбулентные характеристики используются для расчета переноса газовых и аэрозольных примесей с учетом химических реакций. Описание превращения веществ осуществляется с различной степенью детализации, зависящей от знания начальных условий, скоростей химических реакций и ресурсов вычислительной техники [2, 3]. В дальнейшем приведем результаты численного моделирования распространения твердых взвесей от промышленных предприятий Южного Прибайкалья.

В качестве исходного уравнения переноса и турбулентной диффузии примеси принято следующее дифференциальное уравнение в частных производных:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \text{div}(VS) - w_g \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial S}{\partial z} - \alpha S + F, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $x, y, z$  – оси прямоугольной системы координат:  $x, y$  – направлены по горизонтали,  $z$  – вертикально вверх;  $S$  – концентрация субстанции;  $V$  – вектор скорости ветра с компонентами  $u, v, w$ ;  $k_x, k_y, k_z$  – коэффициенты турбулентного обмена соответственно по горизонтали и вертикали;  $\alpha$  – коэффициент неконсервативности примеси;  $F(x, y, z, t)$  – функция, описывающая распределение и мощности источников рассматриваемой субстанции;  $w_g$  – скорость гравитационного осаждения аэрозолей, определяемая по формуле Стокса [4]:

$$w_g = (2 \rho_n g r^2) / (9 \rho v),$$

где  $\rho_n$  и  $r$  – соответственно плотность и радиус частицы взвеси;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  и  $v$  – плотность и вязкость воздуха.

Имея в виду решение задачи о распространении примеси над региональной областью, естественно предположить фоновое распределение примеси известным. Из-за отсутствия детальной информации из наблюдений в качестве начальных условий примем  $S$  равным фоновому распределению, а при его отсутствии  $S = 0$ .

В качестве краевых условий приняты

$$\partial S / \partial x = 0 \text{ при } x = 0, X;$$

$$\partial S / \partial y = 0 \text{ при } y = 0, Y;$$

$$\partial S / \partial z = 0 \text{ при } z = Z,$$

где  $x = 0, x = X, y = 0, y = Y, z = Z$  – границы области счета.

На уровне подстилающей поверхности поставлено граничное условие, учитывающее отражение и поглощение примесей в зависимости от свойств подстилающей поверхности.

Так как антисимметричная форма оператора переноса наиболее предпочтительна при построении энергетически сбалансированных конечно-разностных аппроксимаций, то, используя уравнение неразрывности для несжимаемой атмосферы, преобразуем (1) к следующему виду:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2} V \operatorname{grad} S + \frac{1}{2} \operatorname{div}(S V) - w_s \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial S}{\partial z} - \alpha S + F. \quad (2)$$

Интегрирование (2) проводилось численно в декартовой прямоугольной системе координат с применением метода фиктивных областей [5]. Введение таких областей позволяет вести расчеты с произвольной функцией, описывающей рельеф местности, делая модель более универсальной.

Для дискретизации по времени использовалась схема Кранка–Николсона и двуциклический метод многокомпонентного расщепления [5].

Введем сетку с основными узловыми точками:

$$x_i = i \Delta x; \quad y_j = j \Delta y; \quad z_k = k \Delta z; \quad i = 1 \div I, \quad j = 1 \div J, \quad k = 1 \div K,$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta y$  – шаги по горизонтали;  $\Delta z$  – шаг по вертикали. Используем также вспомогательные точки  $x_{i+1/2}, y_{j+1/2}, z_{k+1/2}$ , расположенные в серединах основных интервалов.

Для компактности дальнейшего изложения обозначим

$$S_{i,j,k} = S(x_i, y_j, z_k, t_\tau), \quad t_\tau = \tau \cdot \Delta t \quad (\tau = 0, 1, \dots),$$

$$(A_1 S)_{i,j,k} = \frac{u_{i+1/2,j,k} S_{i+1,j,k} - u_{i-1/2,j,k} S_{i-1,j,k}}{2 \Delta x} + \frac{k_{x,i+1/2,j,k} (S_{i+1,j,k} - S_{i,j,k})}{\Delta x^2} + \frac{k_{x,i-1/2,j,k} (S_{i,j,k} - S_{i-1,j,k})}{\Delta x^2},$$

$$(A_2 S)_{i,j,k} = \frac{v_{i,j+1/2,k} S_{i,j+1,k} - v_{i,j-1/2,k} S_{i,j-1,k}}{2 \Delta y} + \frac{k_{y,i,j+1/2,k} (S_{i,j+1,k} - S_{i,j,k})}{\Delta y^2} + \frac{k_{y,i,j-1/2,k} (S_{i,j,k} - S_{i,j-1,k})}{\Delta y^2},$$

$$(A_3 S)_{i,j,k} = \frac{(w_{i,j,k+1/2} - w_g) S_{i,j,k+1} - (w_{i,j,k-1/2} - w_g) S_{i,j,k-1}}{2 \Delta z} + \frac{k_{z,i,j,k+1/2} (S_{i,j,k+1} - S_{i,j,k})}{\Delta z^2} + \frac{k_{z,i,j,k-1/2} (S_{i,j,k} - S_{i,j,k-1})}{\Delta z^2},$$

где  $\Delta t$  – шаг по времени.

Тогда конечно-разностные аналоги уравнения (2) могут быть записаны в виде

$$(E + \frac{\Delta t}{2} A_\xi^\tau) S^{\tau+\xi/4} = (E - \frac{\Delta t}{2} A_\xi^\tau) S^{\tau+(\xi-1)/4}, \quad \xi = 1, 2, 3;$$

$$S^{\tau+1/4} = S^{\tau-1/4} + 2 \Delta t F^\tau;$$

$$(E + \frac{\Delta t}{2} A_{5-\xi}^\tau) S^{\tau+\xi/4} = (E - \frac{\Delta t}{2} A_{5-\xi}^\tau) S^{\tau+(\xi-1)/4}, \quad \xi = 2, 3, 4,$$

где  $E$  – единичная матрица. Для численной реализации конечно-разностных уравнений используется немонотонная прогонка [6].

Численное решение уравнения (1) сопоставлялось с аналитическим решением нестационарного уравнения распространения примеси [7]:

$$S = \frac{M}{(4\pi t)^{3/2} \sqrt{k_x k_y k_z}} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{4k_x t} - \frac{y^2}{4k_y t}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{4k_z t}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{4k_z t}\right] \right\},$$

полученное при действии мгновенного точечного источника мощностью  $M$  в точке  $(0, 0, H)$  в момент времени  $t = 0$ .

Расчеты проводились при следующих значениях параметров:  $M = 10^6$  мг/с,  $H = 120$  м,  $u = 4$  м/с,  $v = 0$ ,  $k_x = k_y = 500$  м<sup>2</sup>/с,  $k_z = 5$  м<sup>2</sup>/с,  $\Delta x = \Delta y = 250$  м,  $\Delta z = 30$  м,  $\Delta t = 30$  с. Изменение во времени концентраций примеси приведено на рис. 1.

Сравнение численных решений уравнения (1) с известными аналитическими решениями стационарных уравнений распространения примесей [8] также показало, что они согласуются с аналитическими решениями с удовлетворительной степенью точности как на высоте источника, так и у поверхности земли.

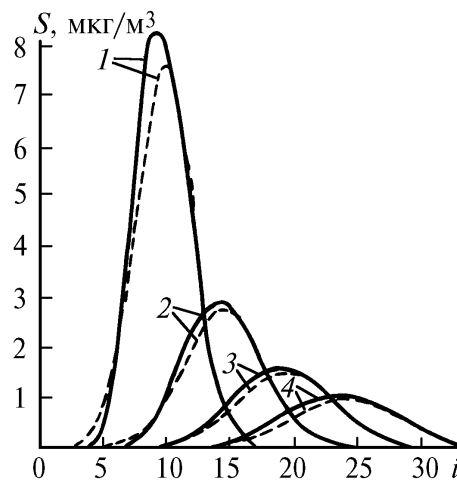


Рис. 1. Изменение концентрации примеси на высоте нестационарного точечного источника в моменты времени: 1 – 5 мин; 2 – 10 мин; 3 – 15 мин; 4 – 20 мин; сплошная линия – численное решение; штриховая – аналитическое решение

Перейдем к описанию численных экспериментов, характеризующих распределение твердых взвесей при типичных метеорологических ситуациях от антропогенных источников Приангарья и Южного Байкала. В рассмотрение были включены суммарные выбросы промышленных объектов г. Иркутска, Ангарска, Усоля-Сибирского, Черемхова, Зимы, Шелехова, Слюдянки и Байкальска.

Для моделирования процесса была выбрана область интегрирования площадью  $400 \times 250$  км<sup>2</sup> и высотой 2 км над подстилающей поверхностью; шаги по времени и горизонтали составляли соответственно 300 с и 5 км; шаги по вертикали задавались следующим образом:

$$\Delta z = \begin{cases} 50 \text{ м} & \text{для } z \leq 150 \text{ м,} \\ 150 & < 150 < z \leq 300, \\ 200 & < 300 < z \leq 500, \\ 500 & < z > 500. \end{cases}$$

Коэффициент турбулентного обмена по вертикали определялся из уравнения баланса турбулентной энергии;

$$k_x = (k_0 + \sqrt{V^2/2}) \Delta x; \quad k_y = (k_0 + \sqrt{V^2/2}) \Delta y,$$

где  $0 < k_0 \leq 1$ .

**Эксперимент 1.** В Восточной Сибири устанавливается азиатский антициклон, характерными особенностями которого являются повышенное атмосферное давление, приземные и приподнятые инверсии в сочетании со слабыми ветрами. Твердые взвеси выпадают в основном в ближайшей окрестности своих источников. Однако в районе Южного Байкала из-за больших температурных перепадов водной поверхности и суши возникают ветры с сильной муссонной составляющей, обеспечивающей перенос примесей, выбрасываемых промышленными предприятиями Слюдянки и Байкальска, в сторону Байкала, причем могут иметь место области суперпозиции их полей загрязнения.

На рис. 2 представлены рассчитанные приземные концентрации твердых взвесей в долях средней суточной предельно допустимой концентрации, равной  $0,15 \text{ мг/м}^3$ .

Основное загрязнение атмосферы над оз. Байкал происходит от предприятий гг. Слюдянки и Байкальска. Следует отметить, что в качестве входной информации в расчетах использованы только данные о выбросах промышленных приподнятых источников. Пыление отвалов ТЭЦ и горно-рудных предприятий, выбросы жилищно-бытовых объектов и транспорта в данных расчетах не учтены.

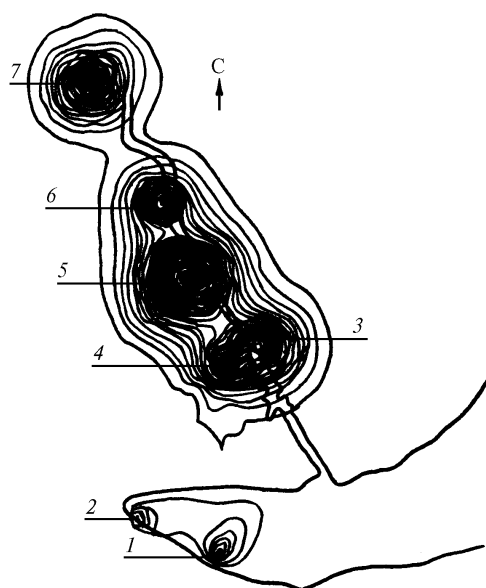


Рис. 2. Изолинии концентраций твердых взвесей у подстилающей поверхности при отсутствии внешнего потока (шаг –  $15 \text{ мкг/м}^3$ ). 1 – Байкальск, 2 – Слюдянка, 3 – Иркутск, 4 – Шелехов, 5 – Ангарск, 6 – Усолье-Сибирское, 7 – Черемхово

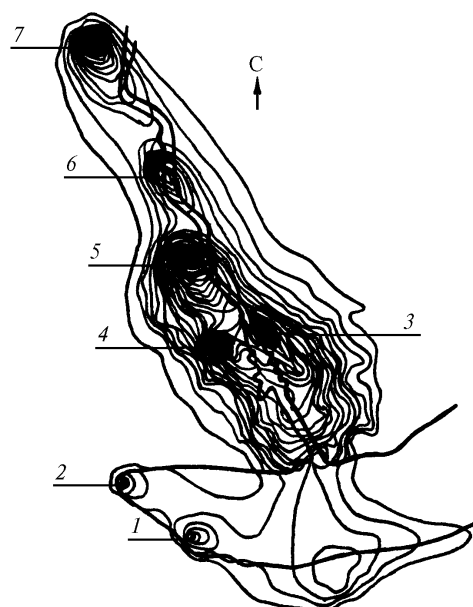


Рис. 3. Изолинии концентраций твердых взвесей у подстилающей поверхности при северо-западном ветре (шаг –  $15 \text{ мкг/м}^3$ ). 1 – Байкальск, 2 – Слюдянка, 3 – Иркутск, 4 – Шелехов, 5 – Ангарск, 6 – Усолье-Сибирское, 7 – Черемхово

**Эксперимент 2.** Ветровое поле задавалось характерным для северо-западного типа при прохождении фронтальных разделов и мощных вторжениях холодных воздушных масс. Поток твердых взвешенных частиц, подхваченный северо-западным переносом, со скоростью  $10 \text{ м/с}$  на верхней границе устремляется по долине р. Ангары в сторону Байкала (рис. 3). В ближайшей окрестности промышленных центров загрязненность уменьшается по сравнению с экспериментом 1.

С целью изучения степени влияния горных хребтов на перенос воздушных масс над Байкалом проводились также расчеты для орографически однородной местности. Сравнение их с вышеуказанными расчетами показало, что горные хребты существенно воздействуют на перенос воздуха и распространение примесей над озером. Так, при северо-западном переносе образуются области скопления и «отражения» примесей вблизи орографических неоднородностей на восточном побережье оз. Байкал (см. рис. 3).

Анализ результатов численных экспериментов для различных метеорологических условий показывает, что наибольший вклад в загрязнение атмосферы над Южным Байкалом с превышением максимальных разовых предельных допустимых концентраций вносят Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат (БЦБК) и предприятия г. Слюдянки. Из-за различной высо-

ты источников загрязнения примеси от БЦБК распространяются на большие расстояния, чем от предприятий г. Слюдянки. Вследствие удаленности и наличия орографических препятствий влияние Иркутско-Черемховского промышленного комплекса на загрязнение атмосферы над Южным Байкалом значительно меньше, чем от БЦБК и предприятий г. Слюдянки и не превышает средних суточных концентраций для выбрасываемых в атмосферу вредных примесей.

1. Аргучинцев В.К., Аргучинцева А.В. Негидростатическая модель мезомасштабного пограничного слоя атмосферы // Моделирование процессов гидросферы, атмосферы и ближнего космоса. Новосибирск: Наука, 1985. С. 79 – 84.
2. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я. Приоритеты глобальной экологии. М.: Наука, 1992. 263 с.
3. Huertas M.L., Lopez A. Simulation study of the SO<sub>2</sub> gaseous evolution in the troposphere // Atmos. Res. 1990.25. N 4. P. 363–374.
4. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд. АН СССР, 1955. 351 с.
5. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1980. 534 с.
6. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 592 с.
7. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, 1965. Ч. 1. 639 с.
8. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.

Лимнологический институт  
СО РАН, Иркутск

Поступила в редакцию  
28 марта 1994 г.

**V. K. Arguchintsev. Numerical Simulation of Aerosols Spreading at the Atmospheric Boundary Layer.**  
The numerical model of pollutants transport for the conditions of complicated relief is developed. The numerical experiments characterize distribution and distance of aerosols spreading in the region of South Baikal for typical meteorological situations.