

АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НАД ПРОМЫШЛЕННЫМ ГОРОДОМ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Г.В. Аверин, В.А. Павлий

Донецкий национальный технический университет

ВСТУПЛЕНИЕ

В настоящее время накоплено большое количество данных, характеризующих загрязнение наземного слоя атмосферы. Сбор экспериментальных данных проводится в течение длительного времени (с конца 70-х – начала 80-х годов) Гидрометеослужбой и Санитарно-эпидемиологической службой Украины, различными организациями Минприроды Украины и другими субъектами экологического мониторинга. В последние годы контроль загрязнения атмосферы осуществляется в 53 городах Украины по 10-15 вредным веществам. При этом количество стационарных контрольных постов различных субъектов мониторинга составляет от 2 до 8 в зависимости от размеров города, объемы накопленных данных включают более миллиона измерений для каждого крупного города. Одновременно с этим, субъектами экологического мониторинга также накапливается информация об основных метеорологических показателях: направлении и скорости ветра, температуре, относительной влажности, атмосферном давлении и др.

В настоящее время Украина вводит новую систему выдачи разрешений на выбросы вредных веществ в атмосферный воздух, что является частью политического курса страны на сближение с законодательством Европейского союза. В этом плане моделирование и прогнозирование уровня загрязнения атмосферы является основой для разработки Программ оздоровления атмосферного воздуха в населенных пунктах, создание которых предусмотрено для городов украинским законодательством. При этом важным фактором прогнозирования уровня загрязнения атмосферы является расчет фоновых концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе.

При разработке математических моделей распространения примесей очень часто возникают задачи восстановления по экспериментальным данным полей загрязнения атмосферы. Для решения такого типа задач следует увязать информацию субъектов экологического мониторинга с существующими закономерностями распространения примесей, и в частности, с уравнениями турбулентной диффузии. Общее уравнение распространения примесей имеет вид (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial \tau} + u \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial c}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial c}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{T,x} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{T,y} \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{T,z} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \right) - ac + Q(\tau, x, y, z), \end{aligned} \quad (1)$$

где: c - концентрация; τ - время; x, y, z - координаты; u, v, w - профили скорости ветра по координатам x, y, z ; $k_{T,x}, k_{T,y}, k_{T,z}$ - горизонтальные (вдоль x и y) и вертикальный коэффициенты турбулентной диффузии; a - константа; $Q(\tau, x, y, z)$ - функция эмиссии примеси.

При решении уравнения (1) с определенными краевыми условиями исследователи часто принимают значительное количество допущений, упрощающих исходное уравнение. При постановке задачи атмосферной диффузии согласно (1) часто пренебрегают членом $w \cdot \frac{\partial c}{\partial z}$, горизонтальные коэффициенты турбулентной диффузии принимают постоянными, если уравнение (1) рассматривается в системе координат, не связанной с направлением ветра. Например, основой методического документа [4] является решение уравнения вида (2) как частного случая уравнения (1):

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{T,y} \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{T,z} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q \cdot \delta(x, y, z - h), \quad (2)$$

где: $\delta(x, y, z - h)$ - дельта-функция, а координата x совпадает с направлением ветра.

Существуют решения классических задач атмосферной турбулентной диффузии, полученные для областей, достаточно удаленных от неровностей земной поверхности, открытых территорий, вне городской местности при наличии небольшого числа источников загрязнения и т.д. Сравнительный анализ результатов [1-4] показывает, что конечные формы решений упрощенного уравнения (1) для моделей “Гауссовского факела”, ОНД-86, Гриффурда-Ханна и др. функционально схожи между собой.

Имеются также решения (1), реализованные в сложных численных моделях. Например, в основе системы моделирования CALLPUF используется объединенная модель “факела Лагранжа” для прогнозирования распространения примеси от источника, которая основана на использовании распределений Гаусса. Модель была дополнена модулями для описания структуры ландшафта, учета

особенностей влажного и сухого распространения примесей и закономерностей простых химических реакций [1]. Модель “факела Лагранжа – Гаусса” решается численно на конечно-разностной сетке, учитывающей множество слоев по вертикальной координате. Однако подобные решения часто не позволяют реализовать для конкретных территорий процедуры адаптации параметров моделей по экспериментальным данным, собранным субъектами мониторинга.

В прикладных задачах атмосферного мониторинга распространены подходы, когда при моделировании распространения примеси в атмосферном воздухе используют модели статистической теории диффузии. В этом случае для расчета концентраций используются решения вида (3):

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2 \cdot \pi^{3/2} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}}, \quad (3)$$

где: $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ - дисперсии распределения примеси в направлении координат x, y, z , определенные экспериментальным путем.

Рассматривая постоянно действующий источник загрязнения высотой h в конкретной точке на плоскости $M(x, y)$ как точечный, и направляя координатную ось x вдоль направления ветра, в работе [2] было получено решение уравнения (2), характеризующее уровень загрязнения атмосферы на уровне земной поверхности вида:

$$c(x, y, z)|_{z=0} = \frac{Q}{\lambda_1 \sqrt{x^3}} \exp\left(-\frac{u \cdot h^{1+n}}{(1+n)^2 \lambda_2 \cdot x} - \frac{y^2}{4 \cdot \beta \cdot x}\right), \quad (4)$$

где: $\beta, \lambda_1, \lambda_2, n$ - константы.

Зависимость (4) положена в основу методики расчета концентраций вредных веществ при их распространении в атмосфере [4].

Рассмотрим применение уравнения (1) для случая контроля загрязнения атмосферы на стационарных постах. Учитывая, что субъекты мониторинга проводят периодические измерения уровня загрязнения атмосферного воздуха с интервалом 4-12 часов, будем рассматривать в рамках указанных

интервалов стационарную задачу переноса примеси $\left(\frac{\partial c}{\partial \tau} = 0\right)$. Наблюдение за загрязнением атмосферы

в городах проводятся на высоте 2-х метров на контрольных постах, размещенных на открытых площадках. Поэтому в качестве допущения можно считать, что коэффициенты турбулентной диффузии k_T в области средней высоты шероховатости (высоты зданий) постоянны и зависят только от скорости ветра. Это допущение подтверждается видом моделей турбулентности для шероховатых поверхностей [7]. Будем также считать, что в приземном слое (ниже уровня шероховатости поверхности (до 50 м)) концентрация примеси в точке $p(x, y)$ по высоте z приблизительно постоянна вследствие интенсивного турбулентного перемешивания, т.е. $\frac{\partial c}{\partial z} = 0$.

Указанные допущения позволяют строить более простые модели, основанные на существенном упрощении уравнения (1). Например, в источнике [5] приводится решение (6) уравнения (5), как частного случая уравнения (1) при действии мгновенного источника мощностью Q :

$$\frac{\partial c}{\partial x} = k_T \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}, \quad (5)$$

$$c(x, y) = \frac{Q}{2 \cdot \gamma \sqrt{\pi \cdot k_T \cdot x}} \exp\left(-\frac{y^2}{4k_T x}\right), \quad (6)$$

где: k_T, γ - константы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Основной задачей данной работы является разработка алгоритмов моделирования полей загрязнения атмосферы на основе данных, полученных на стационарных контрольных постах загрязнения атмосферы.

Принимая, что источник расположен на поверхности земли ($h = 0$), из (4) получим похожее на (6) уравнение:

$$c(x, y) = \frac{Q}{\lambda_1 \sqrt{x^3}} \exp\left(-\frac{y^2}{4 \cdot \beta \cdot x}\right), \quad (7)$$

Таким образом, можно считать, что конкретный i -тый постоянно действующий источник, размещенный в точке $g(x_i, y_i)$, осуществляет вклад в формирование поля концентраций на стационарном посту $p(x > x_i, y > y_i)$, при этом концентрация количественно определяется согласно (7). Так как в данном случае источник находится в произвольной точке $g(x_i, y_i)$ с подветренной стороны поста, а соотношение (7) предполагает, что он размещен в начале координат, необходимо скорректировать координаты источника относительно поста путем переноса системы координат источника на величину $(x - x_i)$ и $(y - y_i)$ по осям x, y соответственно.

В промышленном городе имеется значительное множество источников, которые могут вносить свой вклад в формирование поля концентраций вредной примеси. Поэтому для случая контроля загрязнения атмосферы на стационарном посту, используя принцип суперпозиции, можно приближенно представить значение концентрации в точке $p(x, y)$ в виде ряда:

$$c(x, y) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\sqrt{(x - x_i)^3}} \exp\left(-\frac{(y - y_i)^2}{4 \cdot \beta_i \cdot (x - x_i)}\right), \quad (8)$$

где: A_i, β_i - коэффициенты, характеризующие источники выбросов и параметры турбулентного переноса; N - количество источников; x_i, y_i - координаты источников.

При разработке алгоритмов моделирования загрязнения атмосферы обычно используют указанный подход при расчете концентраций примесей в атмосферном воздухе.

На практике обычно количество источников крайне велико, а их характеристики достоверно не определены, поэтому разложение (8) можно задать в виде:

$$c(x, y) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i}{\sqrt{(x - \varepsilon_x)^3}} \exp\left(-\frac{(y - \varepsilon_y)^2}{4 \cdot \beta \cdot (x - \varepsilon_x)}\right), \quad (9)$$

где: $A_i, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \beta$ - константы, причем $0 \leq \varepsilon_x \leq x, 0 \leq \varepsilon_y \leq y, 0 \leq A_i \leq A_{\max}$.

Таким образом, можно считать, что решение уравнения диффузии для концентрации вредной примеси в точке $p(x, y)$ может быть приближенно представлено в виде ряда (9).

В первом приближении раскладывая (9) в ряд по величинам $\frac{\varepsilon_x}{x} < 1$ и $\frac{\varepsilon_y}{y} < 1$, и рассматривая значение концентрации загрязняющего вещества на первом с подветренной стороны контрольном посту как фоновое, получим следующую приближенную формулу:

$$c(x, y) \approx \frac{A_\varepsilon}{\sqrt{x^3}} \exp\left(-\frac{y^2}{4 \cdot \beta_\varepsilon \cdot x}\right) + C_1, \quad (10)$$

где: $A_\varepsilon, \beta_\varepsilon$ - некоторые случайные функции, распределение которых должно определяться по экспериментальным данным; C_1 - значение фоновой концентрации загрязняющего вещества, т.е. в точках, для которых $x \rightarrow 0$.

Приближенное решение (10) дает вид функции изменения концентрации примеси в окрестности точки поста наблюдения. Дальнейшая задача заключается в определении неизвестных параметров решения по имеющимся экспериментальным данным. Результаты решения поставленной задачи можно использовать для решения общей задачи восстановления поля концентраций по всему городу в целом.

Алгоритм восстановления поля концентраций над городом предполагает:

- наличие экспериментальных данных, описывающих динамику концентраций загрязняющих веществ на стационарном посту за указанный период;
- наличие географической информации о месте расположения поста (в частности, географических координат);
- использование зависимостей, определяющих изменения концентрации примеси в окрестностях поста наблюдения, например, вида (10);
- формулирование базового алгоритма, позволяющего экстраполировать данные в пределах всего территориально-распределенного объекта.

Географическая информация о месте расположения поста позволяет привязать пост к выбранной декартовой системе координат. Масштаб, размеры и форма области поля концентраций выбираются в зависимости от площади города и требуемой точности расчета. Выбор системы координат должен удовлетворять следующим критериям:

- начальная точка системы координат должна лежать вне объекта, так что значения координат, определенные относительно нее, не должны быть отрицательными;
- ось y для упрощения расчетов должна быть направлена строго на север, ось x – с востока на запад.

После выбора начальной точки определяются координаты всех постов как проекции на соответствующие оси, а также расстояния от постов до начальной точки и расстояния между постами. Для расчета этих параметров лучше всего использовать формулу хаверсинусов [6], которая позволяет более точно определять расстояния в случае относительно близкого расположения постов. В таблице 1 приведены географические и декартовые координаты стационарных постов г. Донецка, измеренные с точностью ± 50 м., а на рис. 1 показано расположение постов относительно выбранной начальной точки с координатами ($47^{\circ}53'00.00''$ с.ш., $37^{\circ}37'00.00''$ в.д.), при этом размеры области составляют 30×30 км.

Таблица 1. Географические и декартовы (относительно начальной точки) координаты стационарных постов г. Донецка.

Номер поста	Северная широта (с.ш.)	Восточная долгота (в.д.)	Относительно начальной точки	
			x , м	y , м
2	$48^{\circ}03'01.28''$	$37^{\circ}43'34.73''$	8177	18570
4	$47^{\circ}58'28.34''$	$37^{\circ}48'02.23''$	13720	10140
5	$47^{\circ}58'48.28''$	$37^{\circ}51'09.81''$	17600	10760
7	$48^{\circ}02'22.23''$	$37^{\circ}44'57.36''$	9888	17370
9	$47^{\circ}59'36.78''$	$37^{\circ}48'49.26''$	14690	12260
14	$47^{\circ}57'42.42''$	$37^{\circ}44'20.45''$	9124	8723

В данной области расположены шесть стационарных контрольных постов загрязнения атмосферы Донецкого Гидрометеоцентра. Накопленные данные представляют собой временные ряды значений концентраций загрязняющих веществ, которые контролировались с 12-ти часовыми интервалами. Измерения проводились по общепринятым методикам согласно нормативному документу [9]. Общий объем экспериментальных данных за указанный период составляет более миллиона наблюдений. Для исследований в работе были использованы временные ряды диоксида азота (NO_2), аммиака (NH_3), диоксида серы (SO_2), оксида углерода (CO), формальдегида (HCHO), фенола ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$) и пыли.

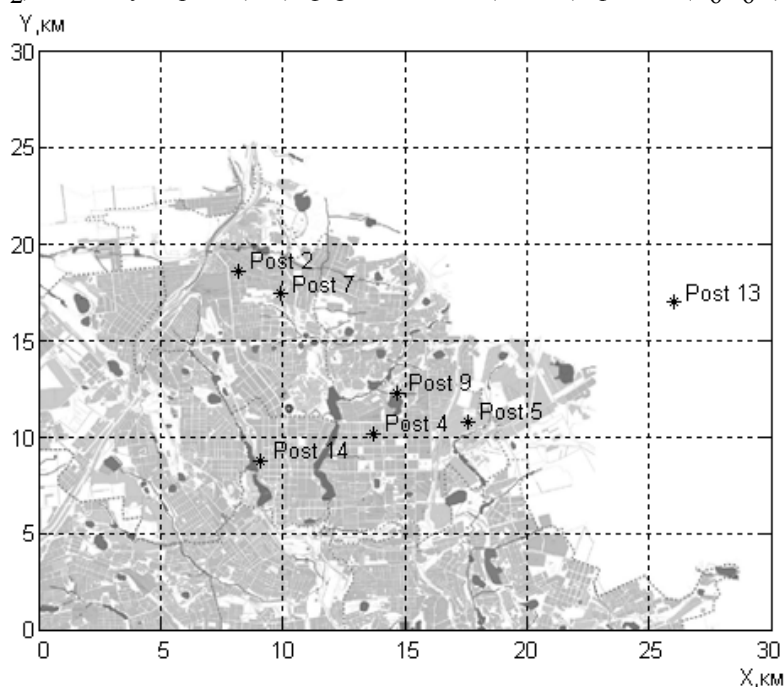


Рис. 1. Схема расположения постов относительно начальной точки с координатами ($47^{\circ}53'00.00''$ с.ш., $37^{\circ}37'00.00''$ в.д.)

Для моделирования изменения концентрации примеси в окрестности контрольного поста в качестве базового уравнения использовалась зависимость (10). Определение видов распределений величин β_ε и A_ε основывалось на оценке этих величин для выбранного направления ветра по всему массиву экспериментальных данных. Для этой цели выбирались наблюдения для близлежащей пары контрольных постов, и составлялась следующая система уравнений (11):

$$\left\{ \begin{array}{l} c_i(x_i, y_i) = \frac{A_i(\varepsilon)}{\sqrt{x_i^3}} e^{-\frac{y_i^2}{4\beta_\varepsilon x_i}} + C_1 \\ c_j(x_j, y_j) = \frac{A_j(\varepsilon)}{\sqrt{x_j^3}} e^{-\frac{y_j^2}{4\beta_\varepsilon x_j}} + C_1 \end{array} \right. , \quad (11)$$

где: i, j - номера двух соседних близлежащих постов, x_i, x_j, y_i, y_j - декартовы координаты постов с номерами i, j .

Из решения системы (11) определялись численные значения величин β_ε и A_ε .

Следует отметить, что базовое уравнение (2) предполагает моделирование распространения примеси вдоль оси x , которая должна совпадать с направлением ветра, следовательно, и решение системы (11) должно удовлетворять данному требованию. Так как направление ветра динамически изменяется, то в дальнейшем необходимо использовать поворот системы координат. Для этого можно использовать общеизвестные формулы [8], однако заметим, что направление оси x декартовой системы координат отличается от направления на север на угол 90° . Поскольку направление ветра субъектами мониторинга измеряется относительно направления на север, необходимо скорректировать соответствующее значение угла поворота (12):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{u,i} = x_{g,i} \cos(\alpha - 90) + y_{g,i} \sin(\alpha - 90) \\ y_{u,i} = y_{g,i} \cos(\alpha - 90) - x_{g,i} \sin(\alpha - 90) \end{array} \right. , \quad (12)$$

где: $x_{u,i}, y_{u,i}$ - промежуточные значения координат, полученные после поворота системы координат на угол α ; α - угол, характеризующий направление ветра; $x_{g,i}, y_{g,i}$ - начальные декартовы координаты контрольных постов (см. табл.1).

Для определения фоновой концентрации C_1 следует определить номер первого контрольного поста с подветренной стороны и переместить начало системы координат в точку, совпадающую с его координатами. Для этого можно использовать следующий алгоритм:

- поиск минимального значения x_{\min} среди элементов множества $x_{u,i}$ и выборка соответствующего ему $y_{\min} = y_{u,i}$;

- смещение координат всех постов на величины x_{\min} и y_{\min} соответственно:

$$x_i = x_{u,i} - x_{\min}; \quad y_i = y_{u,i} - y_{\min}. \quad (13)$$

Используя решение системы (11) и выражения (13), были получены окончательные формулы для определения коэффициентов β_ε и A_ε .

В данном случае уровень загрязнения на первом с подветренной стороны контрольном посту рассматривается как фоновый, поэтому решение (10) при $x=0$ должно удовлетворять граничному условию $C = C_1$.

Поскольку для решения (11) необходимо использовать данные наблюдений по двум постам, а количество стационарных постов в крупном промышленном городе обычно больше, то можно определить коэффициенты β_ε и A_ε для всех комбинаций пар близлежащих постов. В этом случае максимальное количество комбинаций составит

$$N = \frac{n^2 - n}{2},$$

где n - количество стационарных постов в городе.

В теоретическом решении коэффициент β_ε устанавливает связь между коэффициентом турбулентной диффузии и скоростью ветра ($k_T = \beta_\varepsilon \cdot u$), поэтому значение β_ε не может быть отрицательным. Значения β_ε , не удовлетворяющие указанному условию, а также слишком большие значения ($\beta_\varepsilon > 10^5$) считались аномальными и в дальнейших расчетах исключались.

Для определения значений коэффициентов β_ε и A_ε в связи с необходимостью обработки большого количества данных был разработан программный модуль, позволяющий для заданного количества постов и ингредиентов определить величины β_ε и A_ε согласно решению системы (11) и условий (13). По результатам работы данного модуля были построены графики распределения указанных коэффициентов. Для примера на рис. 2 приводятся виды графиков распределения коэффициентов β_ε и A_ε для диоксида азота (NO_2).

Из анализа видов распределений коэффициента β_ε следует, что для всех рассмотренных ингредиентов и контрольных постов распределение носит экспоненциальный характер. Из анализа распределений коэффициентов A_ε видно, что значения коэффициента являются как положительными, так и отрицательными. Так как теоретически коэффициент A_ε характеризует связь с интенсивностью источников выбросов, можно заключить, что на территории исследуемой области в разные периоды времени имеются не только выбросы, но и “стоки” загрязняющих веществ, вызванные процессами оседания, химическими реакциями, атмосферными явлениями и т.д. Вид распределения для большинства ингредиентов в этом случае похож на нормальное распределение.

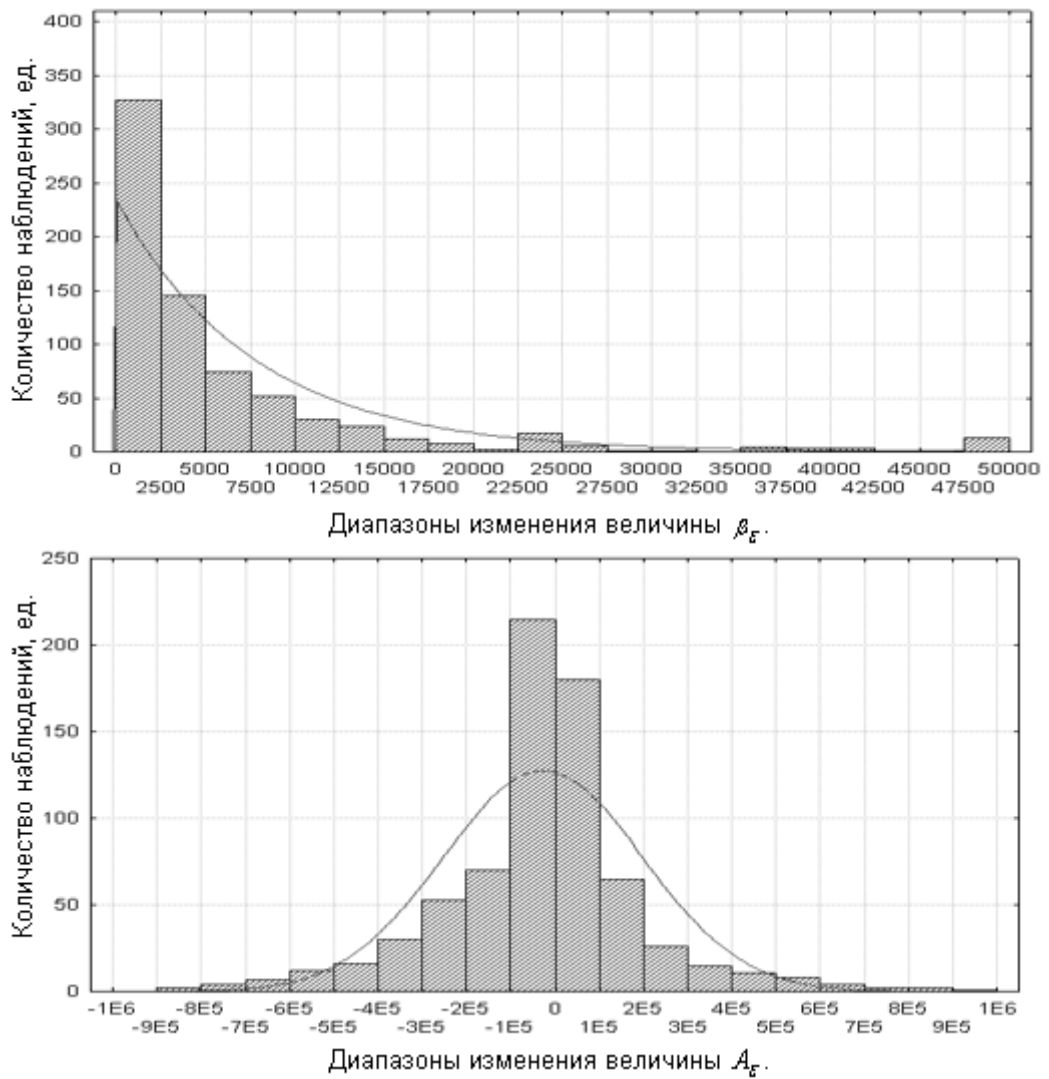


Рис.2. - График распределения коэффициентов β_ε и A_ε для диоксида азота (NO_2), построенный по экспериментальным данным для контрольных постов №2 и №7 за период с 2000 по 2006 гг.

Так как коэффициент β_ε характеризует параметры турбулентного переноса в конкретной точке и зависит только от вида ингредиента и географического расположения контрольного поста наблюдения, то полученные комбинации значений β_ε можно усреднить для каждого ингредиента и каждого поста в отдельности.

В таблице 2 представлены усредненные значения коэффициента β_ε . Усреднение производилось для всех измерений за 7 лет (с 2000 по 2006 гг.) и для всех комбинаций рассматриваемых пар постов, т.е.:

$$\beta_{\varepsilon_i} = \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^n \beta_{\varepsilon_{i,j}} \quad (14)$$

где: $\beta_{\varepsilon_{i,j}}$ - значение коэффициента, определенное из решения (11), β_{ε_i} - усредненное значение для i -ого поста.

Таблица 2. Усредненные значения коэффициентов β_ε при турбулентном переносе загрязняющих веществ.

Ингредиент	Номер поста					
	2	4	5	7	9	14
NO ₂	9175,30	5882,09	6250,09	7604,20	6232,50	7316,06
NH ₃	15631,82	-	-	11070,26	9492,16	9166,16
Пыль	9884,27	7445,00	7746,19	7602,29	5513,51	5980,65
SO ₂	7760,67	6176,70	6474,03	7956,53	6134,90	5432,65
CO	8554,91	3918,36	4860,27	4546,41	6008,50	3467,16
Формальдегид	12797,11	11203,64	12459,13	8260,47	6972,07	-
Фенол	-	-	-	9864,20	6373,95	8193,52

По средним значениям β_{ε_i} в процессе построения моделей определялись значения коэффициентов A_{ε_i} для текущих наблюдений, и эти данные экстраполировались для осуществления пространственного прогноза.

При восстановлении поля загрязнения атмосферы в качестве базового алгоритма можно использовать алгоритмы экстраполяции набора данных на всю площадь территориально-распределенного объекта. Такие алгоритмы позволяют восстановить вид поля распределения некоторой величины для произвольной точки $p(x, y)$, принадлежащей полю, по данным множества точек G , значения величин для которых известны. Используя подобный алгоритм, можно восстановить значения коэффициентов A_ε и β_ε , после чего определить величину концентрации в произвольной точке поля, воспользовавшись уравнением (11).

Следует отметить, что использовать подобные алгоритмы непосредственно для восстановления поля концентраций по данным контрольных постов достаточно сложно, так как изложенный выше подход показывает, что зависимость изменения концентрации от расстояния не является простой функцией и зависит от многих факторов.

Базовый алгоритм восстановления поля для произвольной величины предполагает:

- наличие множества $G\{g_1, g_2, g_3, \dots, g_u, \dots, g_n\}$ точек, каждая из которых характеризуется своими координатами $g_{u,x}$, $g_{u,y}$ и значением восстанавливаемой величины $g_{u,b}$. Чем больше количество точек, тем точнее будет результат аппроксимации;

- использование функций аппроксимации, определяющих изменение величины в зависимости от расстояния до точки, в которой значение величины известно. Следует отметить, что выбранный вид функции является определяющим при восстановлении поля концентрации. Выбор вида функции базируется на теоретических предположениях о динамике изменения восстанавливаемой величины. Так как коэффициенты A_ε и β_ε для заданного времени и вида ингредиента зависят только от географического положения точки (с которой связаны шероховатость земной поверхности, интенсивность выбросов и другие факторы), то можно использовать простейшие функции аппроксимации (линейные или обратные);

- использование для всех точек множества одной и той же функции экстраполяции.

Исходя из указанных предположений, предложен следующий алгоритм экстраполяции данных:

- выбирается некоторый шаг h и выполняется построение сетки для этого шага. Каждая точка множества $P\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_u, \dots, p_m\}$, лежащая в узлах сетки, характеризуется своими координатами $p_{u,x}$, $p_{u,y}$ и значением восстанавливаемой величины $p_{u,b}$.

- определяются расстояния между всеми комбинациями пар точек множеств P и G . Обозначив расстояние между точками p_u и g_u как $L(p_u, g_u)$, можно записать следующее соотношение:

$$L(p_u, g_u) = \sqrt{(g_{u,x} - p_{u,x})^2 + (g_{u,y} - p_{u,y})^2}; \quad (15)$$

- для каждой точки $p_u \in P$, $g_{u1 \neq u} \in G$ определяется влияние точки g_u на нее с использованием выбранной функции аппроксимации. Для этого можно использовать зависимость (16):

$$D_{i,b} = \frac{\sum_{u=1}^n F(g_{u,b}, L(D_i, g_u))}{\sum_{u=1}^n F(1, L(D_i, g_u))}; \quad (16)$$

где: $D = P \cup G$, $D_i \in D$; $F(\alpha, x)$ - функция аппроксимации, В работе исследовались линейные зависимости вида $F(\alpha, x) = \alpha - \frac{x \cdot \alpha}{M}$ и обратные вида $F(\alpha, x) = \frac{\alpha}{x}$; где: M - максимальное расстояние от точки $p_u \in P$ до границы поля;

- для каждой точки $g_{u1 \neq u} \in D$ определяется сумма соответствующих влияний, вносимых всеми точками $g_u \in G$;

- так как эта сумма согласно условию представляет собой $g_{u,b}$, составляется процентное соотношение, при помощи которого корректируются истинные значения влияний, оказываемых точками $g_u \in G$ на точки $g_{u1 \neq u} \in G$ и точки $p_u \in P$.

- сумма влияний на точки $p_u \in P$ и будет представлять собой искомые значения $p_{u,b}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Используя указанный алгоритм, был разработан программный модуль, позволяющий моделировать поле произвольной величины для задаваемой функции аппроксимации по множеству точек $g_u \in G$. С помощью данного модуля были восстановлены поля изменения коэффициентов β_ε и A_ε . При этом тестировались различные функции аппроксимации.

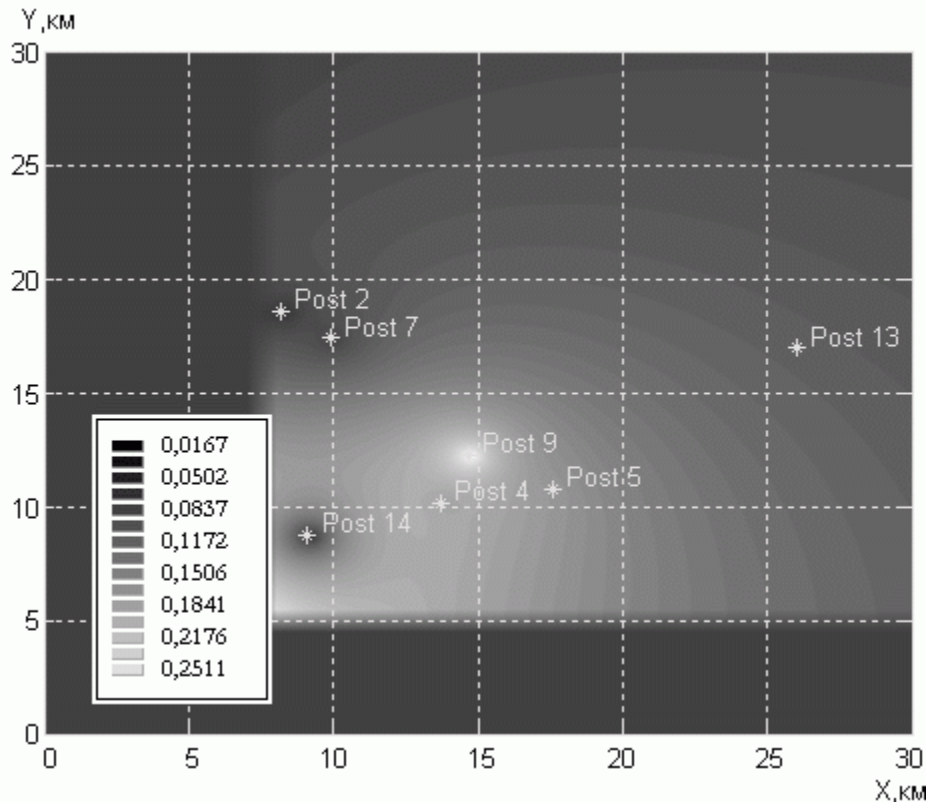


Рис. 3. Вид поля концентрации диоксида азота (NO_2), построенного по экспериментальным данным контрольных постов по состоянию на 17 октября 2006 г (19:00).

Далее, используя (10) и восстановленные значения коэффициентов β_{ε} и A_{ε} , было восстановлено поле концентрации C диоксида азота (рис. 3). Следует отметить, что уравнение (10) не может применяться для восстановления значения концентрации в окрестности начальной точки и осей координат, так как при малых значениях координат x, y обладает значительной неопределенностью. Поэтому в качестве левой и нижней границы восстанавливаемой области были выбраны координаты первых постов, встречающихся по направлениям x, y соответственно. Для сравнения в таблице 3 приводятся значения концентраций диоксида азота, измеренные на контрольных постах для выбранной даты.

Таблица 3. Значения концентрации диоксида азота (NO_2), измеренные на контрольных постах по состоянию на 17 октября 2006 г (19:00).

Концентрация NO_2 , мг/м ³	Номер поста					
	2	4	5	7	9	14
реальная	0,05	0,17	0,16	0,07	0,27	0,05
смоделированная	0,0486	0,1663	0,1592	0,07	0,2624	0,0482

Используя указанный алгоритм, можно осуществить моделирование поля концентраций любого загрязняющего вещества с учетом динамики во времени. Также возможно осуществление краткосрочного прогнозирования полей концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе.

ВЫВОДЫ

Предложенные зависимости и алгоритмы моделирования полей загрязнения по экспериментальным данным контрольных постов позволяют восстановить поля концентраций вредных веществ над значительными территориями. Это является важным при расчете фоновых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, на основе которых в проектной документации определяются объемы выбросов вредных веществ для отдельных источников.

РЕЗЮМЕ

Запропоновані математичні моделі розрахунку концентрацій забруднюючих речовин в атмосфері з урахуванням фонових концентрацій та динаміки вітру. Розроблено алгоритми відбудови полей концентрацій забруднюючих речовин за експериментальними даними контрольних постів спостереження.

SUMMARY

Mathematical models for calculation of contaminants concentration in the atmosphere taking into account the background concentration and wind dynamics are proposed. An algorithm for contaminants concentration fields' reconstruction, according to control observational stations experimental data, was developed.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. J. S. Scire, D. G. Strimaitis, R. J. Yamartino. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5). Earth Tech, Inc., Concord, January 2000.
2. М.Е. Берлянд. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы.- Л., 1975.-184 с.
3. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / под ред. Ф.Т.М. Ньистадта и Х. Ван Допа, 1985, Гидрометеиздат – 352с.
4. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – ОНД-86, Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 68 с.
5. А.В. Лыков. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
6. GIS-Lab: Вычисление расстояния и начального азимута между двумя точками на сфере. / <http://gis-lab.info/qa/great-circles.html>, GIS-Lab, 2002-2007.
7. А.И. Бобров, Г.В. Аверин. Теоретические основы диффузии тепла, импульса и примеси в горных выработках. – Макеевка-Донбасс: Изд. МакНИИ, 1994. – 270 с.
8. М.Я. Выгодский. Справочник по высшей математике. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. – 784 с.
9. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы.