

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРЕНОСА ТЯЖЕЛЫХ
МЕТАЛЛОВ ОТ СТАЦИОНАРНОГО ИСТОЧНИКА ТЕХНОГЕННОЙ
ЭМИССИИ С УЧЕТОМ ФЛУКТУАЦИЙ НАПРАВЛЕНИЙ ВЕТРА**

С. М. Сердюк

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО ПЕРЕНОСУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ
ВІД СТАЦІОНАРНОГО ДЖЕРЕЛА ТЕХНОГЕННОЇ ЕМІСІЇ
З УРАХУВАННЯМ ФЛУКТУАЦІЙ НАПРЯМКІВ ВІТРУ**

Дніпропетровський національний університет

Запропоновано статистичну модель оцінювання забруднення приземного повітряного шару поблизу постійно діючого стаціонарного джерела техногенної емісії. Методика базується на статистичних даних щодо повітряного режиму (троянди вітрів) та відстані від стаціонарного джерела забруднення атмосфери важкими металами. Проведено розрахунки параметрів функцій, що описують розповсюдження важких металів у реальних умовах (м. Дніпропетровськ).

Ключові слова: важкі метали, забруднення, моделювання, експоненціальний закон.

S. N. Serdyuk

Dnipropetrovsk National University

**MODELING OF HEAVY METALS TRANSFER FROM A STATIONARY SOURCE OF
TECHNOGENIC EMISSION TAKING INTO ACCOUNT OF A WIND DIRECTION
FLUCTUATION**

The statistic model of estimation of air pollution near the stationary sources of technogenic emission is proposed. The technique is based on the statistic data of wind regimes and distance from the stationary air pollution source by heavy metals. The parameters of heavy metals distribution law are calculated at the real conditions (city of Dnipropetrovsk).

Keywords: heavy metals, pollution, modeling, exponent law.

Носителями основной массы рассеянных элементов в атмосфере служат аэрозоли, представляющие собой твердые и жидкие частицы, взвешенные в воздухе и являющиеся ядрами конденсации паров воды. Естественный аэрозоль атмосферы дополняют загрязняющие вещества, выбрасываемые в воздушный бассейн как побочные продукты хозяйственной деятельности человека. Важное место среди них занимают тяжелые металлы (ТМ), которые всегда присутствуют в атмосферных осадках и аэрозолях (Пелипец, Гасвський, 2001). Обычно аэрозоли состоят не из одного элемента или соединения, а представляют собой гетерогенную смесь компонентов. Наиболее распространенными являются *Si, Ca, Al, Fe* (Lee, Goranson, 1972). Аэрозоли, содержащие микроэлементы, образуются в основном в результате промышленной деятельности, сжигания угля и нефти, химических реакций между газообразными микроэлементами и разбрызгивания воды и минеральной пыли, поднимаемой ветрами с земли и водной поверхности. Такие элементы, как *Pb, Zn, Cu, Fe, Mn* и *Ni*, поступают в атмосферу в основном в результате антропогенной деятельности. Анализ промышленных дымов показал (Lee, Goranson, 1972), что они являются значительным потенциальным источником загрязнения атмосферного воздуха *Cu, Pb, Mn, Ni, At, F*. В целом наиболее высокие уровни загрязнения ТМ отмечаются вокруг предприятий черной металлургии и тепловых электростанций (Волохов, Ревич, 1990; Малахов, Сенилов, 1992; Тютюнова, 1993).

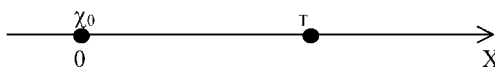
Загрязнение ТМ актуально для областного центра Украины – г. Днепропетровска. На его площади в $396,8 \text{ км}^2$ с населением свыше 1,2 млн человек размещено более 200 промышленных предприятий и организаций различного профиля, выбрасывающих в атмосферу до 100 загрязняющих веществ (Павлов, Переметчик, Шевченко, 1999; Емец, Богаченко, 2001). По данным областного управления статистики, на один квадратный километр территории города приходится 392,3 т вредных веществ. В целом выбросы осуществляются 7400 стационарными источниками загрязнения, из которых 6600 (89 %) – организованные (Емец, Богаченко, 2001). Основу промышленного комплекса г. Днепропетровска составляют предприятия черной металлургии, машиностроения, химической промышленности, энергетики. Данные промышленные комплексы характеризуются значительными газопылевыми выбросами, содержащими большое количество *Pb, Zn, Cu, Cd, Cr, Fe, Ni, Mn* и др. Среди них приоритетным источником загрязнения окружающей природной среды г. Днепропетровска ТМ является Днепропетровский металлургический завод им. Г. И. Петровского, в технологических газопылевых выбросах которого постоянно присутствуют *Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Pb*. Моделирование пространственного распространения загрязнения от стационарного источника техногенной эмиссии было проведено на примере распространения ТМ от металлургического завода им. Г. И. Петровского.

Выполнена аппроксимация функциями зависимостей уровней загрязнения ТМ атмосферного воздуха от расстояния до источника загрязнения и характеристик ветрового режима (роза ветров). Полученные значения этих функций представляют практический интерес, поскольку позволяют при изучении полей загрязнения ограничиться минимумом точек отбора проб, интерполировать и экстраполировать значения уровней загрязнения в точках, где не было измерений, иметь возможность оценить размеры зоны локального загрязнения и прогнозировать возможные загрязнения в будущем.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Перенос загрязняющих субстанций в атмосфере осуществляется ветровыми потоками воздуха с учетом их мелкомасштабных флуктуаций. Осредненный поток субстанций, переносимых воздушными массами, как правило, имеет адвективную и конвективную составляющие, а осредненные флуктуационные их движения можно интерпретировать как диффузию на фоне основного осредненного движения (Марчук, 1982). В настоящей главе рассмотрена разработанная модель переноса загрязненных субстанций (ТМ) от стационарного источника техногенной эмиссии с учетом флуктуаций направлений ветра.

Зафиксируем точку на земной поверхности (Т). Проведем ось координат ОХ через точечный источник загрязнения (χ_0) и точку наблюдения так, чтобы начало координат совпадало с χ_0 и являлось положительным направлением, которое ведет к точке Т.



Рассмотрим случай, когда ветер длительное время дул в положительном направлении, затем переменялся и стал дуть в противоположную сторону. Для решения поставленной задачи воспользуемся функцией, описывающей интенсивность распределения аэрозольной субстанции во времени и пространстве, полученной Г. И. Марчуком (1982):

$$\begin{aligned} \varphi(x) = & \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2 + \Delta t_1} \left(\frac{Q}{\sqrt{4\sigma\mu + u^2}} \exp \left(- \left\{ \sqrt{\frac{\sigma}{\mu} + \frac{u^2}{4\mu^2}} - \frac{u}{2\mu} \right\} x \right) \right) + \\ & + \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \left(\frac{Q}{\sqrt{4\sigma\mu + u^2}} \exp \left(- \left\{ \sqrt{\frac{\sigma}{\mu} + \frac{u^2}{4\mu^2}} + \frac{u}{2\mu} \right\} x \right) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где Q – мощность источника; $\sigma \geq 0$ – обратная величина интервалу времени, за который интенсивность субстанции уменьшится в ℓ раз по сравнению с начальной интенсивностью φ_0 ; μ – горизонтальный коэффициент диффузии; u_1 – скорость ветра в случае, когда направление положительное; u_2 – скорость ветра в случае, когда направление отрицательное.

Пусть Δt_1 – время, в течение которого ветер дует в положительном направлении; Δt_2 – время, в течение которого ветер дует в отрицательном направлении.

За исходную точку отсчета был принят металлургический завод им. Г. И. Петровского ($x_0 = 0$). Кроме того, принимаем, что x_i – расстояние от источника загрязнения до места проведения эксперимента, а y_i – содержание металла в точке x_i , полученное экспериментально.

Для решения уравнения (1) вводим следующие обозначения:

$$A = \frac{Q}{\sqrt{4\sigma\mu + u_1^2}}, \quad B = \sqrt{\frac{\sigma}{\mu} + \frac{u^2}{4\mu^2}}, \quad C = \frac{u}{2\mu}, \quad K = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \quad \text{и} \quad E = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1 + \Delta t_2}.$$

Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$\varphi(x) = K (A \exp(-\{B - C\}x) + E (A \exp(-\{B + C\}x)), \quad (2)$$

Коэффициенты K и E известны по розе ветров (Павлов и др., 1999). Следовательно, задача заключается в том, чтобы определить значения A , B и C при известных x_i и y_i . С этой целью воспользуемся методом наименьших квадратов (метод МНК). Квадрат отклонения функции $\varphi(x_i)$ от y_i должен быть минимальный, то есть

$$\sum_i (y_i - \varphi(x_i))^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\sum_i y_i^2 - 2 \sum_i y_i \varphi(x_i) + \sum_i \varphi(x_i)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

Поскольку на определение A , B и C слагаемое $\sum_i y_i^2$ не влияет, им можно пренебречь.

Для определения минимума функции найдем частные производные по параметрам A , B и C и приравняем их к нулю. Решив полученную систему уравнений, найдем, что

$$-2 \sum_i y_i \varphi(x_i) + \sum_i \varphi(x_i)^2 = 0, \quad (5)$$

Подставив выражение функции $\varphi(x_i)$ в (5) получим следующее уравнение:

$$-2 \sum_i y_i (K(A \exp\{-(B-C)x_i\}) + E(A \exp\{-(B+C)x_i\})) + \sum_i (K(A \exp\{-(B-C)x_i\}) + E(A \exp\{-(B+C)x_i\}))^2 = 0, \quad (6)$$

$$- \sum_i 2Ky_i A e^{-(B-C)x_i} - \sum_i 2Ey_i A e^{-(B+C)x_i} + \sum_i K^2 A^2 e^{-(B-C)2x_i} + \sum_i KEA^2 e^{-2Bx_i} + \sum_i E^2 A^2 e^{-(B+C)2x_i} = 0 \quad (7)$$

Выразим параметр A через B и C и подставим в уравнение (7):

$$A = \frac{\sum_i 2y_i K e^{-(B-C)x_i} + \sum_i 2y_i E e^{-(B+C)x_i}}{\sum_i K^2 e^{-(B-C)2x_i} + \sum_i KE e^{-2Bx_i} + \sum_i E^2 e^{-(B+C)2x_i}}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \left(- \frac{2y_i K \left(\sum_{i=1}^n 2y_i K e^{-(B-C)x_i} + \sum_{i=1}^n 2y_i E e^{-(B+C)x_i} \right) e^{-(B-C)x_i}}{\sum_{i=1}^n K^2 e^{-(B-C)2x_i} + \sum_{i=1}^n KE e^{-2Bx_i} + \sum_{i=1}^n E^2 e^{-(B+C)2x_i}} \right) + \\ & + \sum_{i=1}^n \left(- \frac{2Ey_i \left(\sum_{i=1}^n 2y_i K e^{-(B-C)x_i} + \sum_{i=1}^n 2y_i E e^{-(B+C)x_i} \right) e^{-(B+C)x_i}}{\left(\sum_{i=1}^n K^2 e^{-(B-C)2x_i} + \sum_{i=1}^n KE e^{-2Bx_i} + \sum_{i=1}^n E^2 e^{-(B+C)2x_i} \right)} \right) + \\ & + \sum_{i=1}^n \left(\frac{K^2 \left(\sum_{i=1}^n 2y_i K e^{-(B-C)x_i} + \sum_{i=1}^n 2y_i E e^{-(B+C)x_i} \right)^2 e^{-(B-C)2x_i}}{\left(\sum_{i=1}^n K^2 e^{-(B-C)2x_i} + \sum_{i=1}^n KE e^{-2Bx_i} + \sum_{i=1}^n E^2 e^{-(B+C)2x_i} \right)^2} \right) + \\ & + \sum_{i=1}^n \left(\frac{KE \left(\sum_{i=1}^n 2y_i K e^{-(B-C)x_i} + \sum_{i=1}^n 2y_i E e^{-(B+C)x_i} \right)^2 e^{-2Bx_i}}{\left(\sum_{i=1}^n K^2 e^{-(B-C)2x_i} + \sum_{i=1}^n KE e^{-2Bx_i} + \sum_{i=1}^n E^2 e^{-(B+C)2x_i} \right)^2} \right) + \\ & + \sum_{i=1}^n \left(\frac{E^2 \left(\sum_{i=1}^n 2y_i K e^{-(B-C)x_i} + \sum_{i=1}^n 2y_i E e^{-(B+C)x_i} \right)^2 e^{-(B+C)2x_i}}{\left(\sum_{i=1}^n K^2 e^{-(B-C)2x_i} + \sum_{i=1}^n KE e^{-2Bx_i} + \sum_{i=1}^n E^2 e^{-(B+C)2x_i} \right)^2} \right) = 0. \quad (9) \end{aligned}$$

Параметры B и C выразим из функции (9). Значения этих параметров в аналитическом виде записываются довольно сложно, поэтому перейдем к описанию практических результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием теоретического решения функции (2), отражающей зависимость степени загрязнения окружающей природной среды ТМ от расстояния до стационарного источника техногенной эмиссии, определим вид функций для рассматриваемых ингредиентов по сторонам света от металлургического завода им. Г. И. Петровского.

Выберем направление распространения загрязняющих субстанций *запад – восток*. При этом за положительное примем сначала западное направление, а за отрицательное – восточное, а затем наоборот. Полученные функции, описывающие распространения примеси в западном и восточном направлениях, приведены в табл. 1 и 2.

Для направления распространения загрязняющих субстанций *север – юг* за положительное направление примем сначала северное, а за отрицательное – южное, а затем наоборот. Полученные функции, описывающие распространения примеси в северном и южном направлениях, сведены в табл. 3 и 4.

Таблица 1

Функции, описывающие техногенное распространение ТМ от стационарного источника техногенной эмиссии в западном направлении

ТМ	ЗАПАД
Fe	$\varphi(x) = 1,01e^{(-6,32)x} + 1,35e^{(-8,38)x}$
Mn	$\varphi(x) = 0,77e^{(-5,77)x} + 0,99e^{(-8,03)x}$
Cu	$\varphi(x) = 0,004e^{(-2,8)x} + 0,005e^{(-2,92)x}$
Zn	$\varphi(x) = 0,005e^{(-3,39)x} + 0,007e^{(-3,58)x}$
Ni	$\varphi(x) = 0,003e^{(-2,84)x} + 0,004e^{(-2,99)x}$
Pb	$\varphi(x) = 0,006a^{(-2,94)x} + 0,008a^{(-3,03)x}$

Таблица 2

Функции, описывающие техногенное распространение ТМ от стационарного источника техногенной эмиссии в восточном направлении

ТМ	ВОСТОК
Fe	$\varphi(x) = 1,01a^{(-8,38)x} + 1,35a^{(-6,32)x}$
Mn	$\varphi(x) = 0,77e^{(-8,03)x} + 0,99e^{(-5,77)x}$
Cu	$\varphi(x) = 0,004e^{(-2,92)x} + 0,005e^{(-2,8)x}$
Zn	$\varphi(x) = 0,005e^{(-3,58)x} + 0,007e^{(-3,39)x}$
Ni	$\varphi(x) = 0,003e^{(-2,99)x} + 0,004e^{(-2,84)x}$
Pb	$\varphi(x) = 0,006e^{(-3,03)x} + 0,008e^{(-2,94)x}$

Таблица 3

**Функции, описывающие техногенное распространение ТМ
от стационарного источника техногенной эмиссии в северном направлении**

ТМ	СЕВЕР
Fe	$\varphi(x) = 1,01e^{(-6,32)x} + 1,35e^{(-8,38)x}$
Mn	$\varphi(x) = 0,76e^{(-1,44)x} + 0,24e^{(-7,25)x}$
Cu	$\varphi(x) = 0,0001e^{(-1,08)x} + 0,00003e^{(-3,08)x}$
Zn	$\varphi(x) = 0,008e^{(-1,4)x} + 0,002e^{(-5,4)x}$
Ni	$\varphi(x) = 0,009e^{(-2,26)x} + 0,003e^{(-5,73)x}$
Pb	$\varphi(x) = 0,04e^{(-2,48)x} + 0,01e^{(-4,73)x}$

Таблица 4

**Функции, описывающие техногенное распространение ТМ
от стационарного источника техногенной эмиссии в южном направлении**

ТМ	ЮГ
Fe	$\varphi(x) = 1,01e^{(-8,38)x} + 1,35e^{(-6,32)x}$
Mn	$\varphi(x) = 0,76e^{(-7,25)x} + 0,24e^{(-1,44)x}$
Cu	$\varphi(x) = 0,0001e^{(-3,08)x} + 0,00003e^{(-1,08)x}$
Zn	$\varphi(x) = 0,008e^{(-5,4)x} + 0,002e^{(-1,4)x}$
Ni	$\varphi(x) = 0,009e^{(-5,73)x} + 0,003e^{(-2,26)x}$
Pb	$\varphi(x) = 0,04e^{(-4,73)x} + 0,01e^{(-2,48)x}$

Теперь за направление распространения загрязняющих субстанций выберем *северо-запад – юго-восток*. Причем за положительное направление выберем сначала северо-западное, а за отрицательное – юго-восточное, а затем наоборот. Полученные функции, описывающие распространения примеси в северо-западном и юго-восточном направлениях, сведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

**Функции, описывающие техногенное распространение ТМ от стационарного источника
техногенной эмиссии в северо-западном направлении**

ТМ	СЕВЕРО-ЗАПАД
Fe	$\varphi(x) = 0,26e^{(-5,1)x} + 1,3e^{(-10,95)x}$
Mn	$\varphi(x) = 0,34e^{(-5,21)x} + 1,7e^{(-8,78)x}$
Cu	$\varphi(x) = 0,00006a^{(-2,06)x} + 0,0004a^{(-3,91)x}$
Zn	$\varphi(x) = 0,003e^{(-3,24)x} + 0,01e^{(-5,43)x}$
Ni	$\varphi(x) = 0,00005e^{(-1,99)x} + 0,0002e^{(-2,11)x}$
Pb	$\varphi(x) = 0,0002e^{(-2,69)x} + 0,001e^{(-2,75)x}$

Таблица 6

Функции, описывающие техногенное распространение ТМ от стационарного источника техногенной эмиссии в юго-восточном направлении

ТМ	ЮГО-ВОСТОК
Fe	$\varphi(x) = 0,26e^{(-10,95)x} + 1,3e^{(-5,1)x}$
Mn	$\varphi(x) = 0,34e^{(-8,78)x} + 1,7e^{(-5,21)x}$
Cu	$\varphi(x) = 0,00006e^{(-3,91)x} + 0,0004e^{(-2,06)x}$
Zn	$\varphi(x) = 0,003e^{(-5,43)x} + 0,01e^{(-3,24)x}$
Ni	$\varphi(x) = 0,00005e^{(-2,11)x} + 0,0002e^{(-1,99)x}$
Pb	$\varphi(x) = 0,0002e^{(-2,75)x} + 0,001e^{(-2,69)x}$

И наконец, за направление распространения загрязняющих субстанций выберем *северо-восток – юго-запад*. Причем за положительное направление выберем сначала северо-восточное, а за отрицательное – юго-западное, а затем наоборот. Полученные функции, описывающие распространения примеси в северо-восточном и юго-западном направлениях, сведены в табл. 7 и 8.

Таблица 7

Функции, описывающие техногенное распространение ТМ от стационарного источника техногенной эмиссии в северо-восточном направлении

ТМ	СЕВЕРО-ВОСТОК
Fe	$\varphi(x) = 2,67e^{(-4,07)x} + 0,33e^{(-10,21)x}$
Mn	$\varphi(x) = 1,95e^{(-3,21)x} + 0,25e^{(-7,41)x}$
Cu	$\varphi(x) = 0,09e^{(-2,38)x} + 0,12e^{(-4,38)x}$
Zn	$\varphi(x) = 1,78e^{(-3,04)x} + 0,22e^{(-5,13)x}$
Ni	$\varphi(x) = 1,21e^{(-2,11)x} + 0,15e^{(-4,12)x}$
Pb	$\varphi(x) = 1,25e^{(-2,28)x} + 0,16e^{(-4,3)x}$

Таблица 8

Функции, описывающие техногенное распространение ТМ от стационарного источника техногенной эмиссии в юго-западном направлении

ТМ	ЮГО-ЗАПАД
Fe	$\varphi(x) = 2,67e^{(-10,21)x} + 0,33e^{(-4,07)x}$
Mn	$\varphi(x) = 1,95e^{(-7,41)x} + 0,25e^{(-3,21)x}$
Cu	$\varphi(x) = 0,09e^{(-4,38)x} + 0,12e^{(-2,38)x}$
Zn	$\varphi(x) = 1,78e^{(-5,13)x} + 0,22e^{(-3,04)x}$
Ni	$\varphi(x) = 1,21e^{(-4,12)x} + 0,15e^{(-2,11)x}$
Pb	$\varphi(x) = 1,25e^{(-4,3)x} + 0,16e^{(-2,28)x}$

ВЫВОДЫ

1. Разработана высокоточная модель распространения тяжелых металлов от стационарного источника техногенной эмиссии по всем странам света.
2. Сопоставляя полученные экспериментально и расчетным путем данные, можно сделать вывод, что наблюдается хорошая сходимость результатов в пределах ошибки измерения (δ менее 5 %).
3. Полученный закон распространения загрязненных субстанций (ТМ) от стационарного источника эмиссии

$$(\varphi(x) = K(A \exp(-\{B - C\}x)) + E(A \exp(-\{B + C\}x)))$$

можно использовать для предварительной оценки областей распространения тяжелых металлов в данной географической обстановке. Все это минимизирует материальные вложения и затраты времени при мониторинговых исследованиях загрязнения урбанизированных территорий тяжелыми металлами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Волохов А.А., Ревич Б.А. Особенности микроэлементного состава атмосферного воздуха в зоне влияния различных типов производств // Тр. конф. «Эколого-геохимические исследования в районах интенсивного хозяйственного воздействия». – М.: ИМГРЭ, 1990. – С. 164.
- Емец Н. А., Богаченко Л. Д. Зонирование территории города Днепропетровска по степени загрязнения атмосферного воздуха // Экологія кризових регіонів України: Тези доп. міжнар. конф. – Д.: ДНУ, 2001. – С. 106.
- Малахов С. Г., Сенилов Н. Б. Зависимость содержания металлов в почве и в снежном покрове от расстояния до места их выбросов // Почвоведение. – 1992. – № 9. – С. 141-146.
- Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – С. 9–31.
- Павлов В. А., Переметчик Н. Н., Шевченко Б. Е. Экологический паспорт города Днепропетровска. – Д.: Арб, 1999. – С. 109.
- Пелипець М. В., Гаєвський В. Г. Сніговий покрив як індикатор стану довкілля // Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки». – Д., 2001. – С. 189-190.
- Тютюнова Ф. И. Атмосферный перенос тяжелых металлов // Энергия: экономика, техника, экология. – 1993. - № 9. – С. 26-30.
- Lee R. E., Goranson S. National air surveillance cascade imparter network. 1: Size distribution measurements of suspended particulate matter in air // Environ. Sci. Technol. – 1972. – № 6. – P. 1019-1024.

Надійшла до редколегії 14.05.04