
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ҐРУНТОВИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 631.416.8

С. Н. Сердюк, В. И. Рубан

ОПЫТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ ДНЕПРОПЕТРОВСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

С. М. Сердюк, В. І. Рубан

Дніпропетровський національний університет

ДОСВІД ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ҐРУНТАХ ДНІПРОПЕТРОВСЬКОЇ АГЛОМЕРАЦІЇ

Наведено статистичну методику оцінювання просторового забруднення ґрунтів важкими металами поблизу постійно діючого стаціонарного джерела. Проведено тестові розрахунки та отримано функції, що описують зміну інтенсивності забруднення ґрунтів з використанням даних вітрового режиму м. Дніпропетровська.

Ключові слова: ґрунти, важкі метали, моделювання.

S. N. Serdyuk, V. I. Ruban

Dnipropetrovsk National University

DISTRIBUTION FORECASTING EXPERIENCE OF THE HEAVY METALS IN SOILS OF DNIPROPETROVSK AGGLOMERATION

The statistic method of evaluate of spatial pollution source by heavy metals is given near the constantly existing stationary source. The test calculation is done. The functions of change of intensiveness soils pollution is shown with the use of data of wind regime for the city of Dnipropetrovsk.

Keywords: soils, heavy metals, modeling.

По оценкам Всемирной организации здравоохранения, из более чем 6 млн известных химических соединений практически используется в хозяйственной деятельности до 500 тыс. соединений; из них около 40 тыс. обладают вредными для человека свойствами, а 12 тыс. являются токсичными. Металлы являются одними из первых токсичных техногенных веществ, которые в свободном состоянии не характерны для биосферы. Средняя техногенная нагрузка отдельных химических элементов на поверхность суши к началу XXI в. значительно возросла и находится в пределах 500–1000 кг/(км²×год) для Na, Ca, Fe; 500–200 кг/(км²×год) для K, Al; 10–0,1 кг/(км²×год) для таких токсичных металлов, как Cu, Zn, Ni, Pb, Cd (Орлов, Садовникова, Лозановская, 2002). Эти данные свидетельствуют о расширении масштабов техногенной сферы, что связано с интенсивным диспергированием вещества суши, запылением и химическим загрязнением атмосферы, возвратным выпадением аэрозолей, антропогенной пыли и химических веществ на сушу и поверхностные воды, то есть химическим загрязнением атмосферного воздуха, почвенного покрова, гидросферы. При этом начинают исчезать природные геохимические различия между отдельными регионами. Происходит техногенное выравнивание значений местных кларков. Таким образом, можно говорить о происходящей в настоящее время «металлизации биосферы» (Алексеенко, 2000).

© Сердюк С. Н., Рубан В. И., 2005

Современный город представляет собой «техногенный субрегион биосферы», где наиболее интенсивно происходит геохимическая миграция химических элементов, в частности тяжелых металлов. Это связано с концентрацией на достаточно ограниченной территории разнопланового промышленного производства, населения и автотранспорта. Ранее проведенные нами исследования загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова г. Днепропетровска показали, что содержание в нем *Fe*, *Mn*, *Cu*, *Zn*, *Ni*, *Pb*, *Cd* превосходит природное в десятки и сотни раз (Сердюк, 2004). Общеизвестно, что металлы относятся к стойким загрязнителям, так как скорость их техногенного поступления в геосистему многократно превышает скорость естественных процессов разложения и выноса (например, период полуудаления для *Cu* составляет от 310 до 1500 лет, *Zn* – от 70 до 510 лет, *Pb* – 740–5900 лет, *Cd* – до 110 лет (Кабата-Пендиас, 1989)).

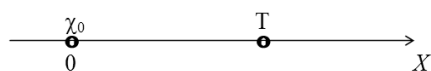
Экологические последствия техногенного увеличения содержания тяжелых металлов в среде связаны с общетоксическим воздействием высоких доз тех или иных металлов на организм человека. Это выражается в поражении и изменении деятельности центральной и периферической нервной системы, кроветворения, влиянии на репродуктивную функцию, возникновении злокачественных новообразований, нарушении аппарата наследственности. Наибольшую опасность для территорий с компактным проживанием населения представляет возможность проявления негативного воздействия тяжелых металлов на организм человека через десятилетия и в последующих поколениях (Кораблева, Чесанов, Шапарь, 2001). Таким образом, исследование загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова г. Днепропетровска актуально (Сердюк, 2001).

В настоящей работе, как результирующем этапе исследования долговременных процессов загрязнения тяжелыми металлами урбанизированных территорий, представлены результаты моделирования горизонтального перераспределения подвижных форм тяжелых металлов в корнеобитаемом слое почвы для решения последующих экологических задач в рамках мониторинга загрязнения среды городских территорий.

Основы статистической оценки параметров функций, описывающих интенсивность распределения тяжелых металлов в почвах по мере удаления от стационарного источника загрязнения

Предлагаемая методика основана на параметрах, которые могут быть легко получены или оценены по результатам наблюдений в существующей системе мониторинга.

За основу была принята гипотеза Г. И. Марчука (1982) о том, что воздушные массы долговременно перемещаются в одном направлении (положительное направление) (Δt_1), а потом их движение меняется в противоположную сторону (отрицательное направление) (Δt_2) (см. ниже *схему*). Тогда величина загрязнения почвы в точке *T* и атмосферы над ней в основном зависит от ветрового потока, который дует вдоль оси *X* в положительном и отрицательном направлениях.



где χ_0 – источник загрязнения; *T* – точка наблюдения.

Соотношение $\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}$ может быть рассчитано по розе ветров в данной местности (Павлов, Переметчик, Шевченко, 1999). Для простоты будем считать, что скорость ветра в положительном и отрицательном направлениях постоянная и равна *u*.

Для решения поставленной задачи использовали функцию, которая описывает интенсивность распределения аэрозольной субстанции во времени и пространстве (Марчук, 1982):

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

где Δt_1 и Δt_2 – время, на протяжении которого воздушные массы перемещаются соответственно в положительном и отрицательном направлениях; Q – мощность источника; $\sigma \geq 0$ – обратная величина относительно интервала времени, за который интенсивность субстанции уменьшится в l раз по сравнению с начальной интенсивностью a_0 ; μ – горизонтальный коэффициент диффузии; u – скорость ветра.

Пусть $x_0 = 0$ – металлургический завод им. Петровского; x_i – расстояние от источника загрязнения до места проведения эксперимента; y_i – содержание металла в точке x_i , полученное экспериментально.

Нами была модифицирована исходная модель Г. И. Марчука (1982) за счет введения следующих обозначений:

$$\beta = \sqrt{\frac{\sigma}{\mu} + \frac{u^2}{4\mu^2}} + \frac{u}{2\mu}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{\sigma}{\mu} + \frac{u^2}{4\mu^2}} - \frac{u}{2\mu}, \quad A = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \quad \text{и} \quad B = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1 + \Delta t_2}.$$

Тогда функция (1) принимает вид

$$\varphi(x) = (A \exp(-\alpha x) + B \exp(-\beta x)). \quad (2)$$

Для оценки параметров A , B , α и β использовали метод наименьших квадратов, то есть

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

$$\sum_i (y_i - (A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i)))^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

На оценку неизвестных параметров A , B , α и β слагаемое $\sum_i y_i^2$ не влияет, поэтому им можно пренебречь.

Для определения минимума найдем частные производные по параметрам A , B , α и β , а затем приравняем их к нулю. Решая систему из этих уравнений, найдем значения искомых параметров:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta}{\partial A} &= \frac{\partial}{\partial A} \left(\sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i))^2 \right) = \\ &= 2 \sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i))^2 = \\ &= -2 \sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i)) \exp(-\alpha x_i). \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Delta}{\partial B} &= \frac{\partial}{\partial B} \left(\sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i))^2 \right) = \\
&= 2 \sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i))^2 = \\
&= -2 \sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i)) \exp(-\beta x_i).
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Delta}{\partial \alpha} &= \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i))^2 \right) = \\
&= 2 \sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i))^2 = \\
&= 2 \sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i)) A x_i \exp(-\alpha x_i).
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Delta}{\partial \beta} &= \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i))^2 \right) = \\
&= 2 \sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i))^2 = \\
&= 2 \sum_i (y_i - A \exp(-\alpha x_i) - B \exp(-\beta x_i)) A x_i \exp(-\beta x_i).
\end{aligned} \tag{8}$$

Приравняв данные производные к нулю, получим систему уравнений, линейную относительно параметров A и B :

$$\begin{cases}
\sum_i y_i \exp(-\alpha x_i) - A \sum_i \exp(-2\alpha x_i) - B \sum_i \exp(-(\alpha + \beta)x_i) = 0, \\
\sum_i y_i \exp(-\beta x_i) - A \sum_i \exp(-(\alpha + \beta)x_i) - B \sum_i \exp(-2\beta x_i) = 0, \\
\sum_i y_i x_i \exp(-\alpha x_i) - A \sum_i x_i \exp(-2\alpha x_i) - B \sum_i x_i \exp(-(\alpha + \beta)x_i) = 0, \\
\sum_i y_i x_i \exp(-\beta x_i) - A \sum_i x_i \exp(-(\alpha + \beta)x_i) - B \sum_i x_i \exp(-2\beta x_i) = 0.
\end{cases} \tag{9}$$

Выразив из вышепредставленной системы уравнений параметр A , получим

$$A = \frac{-\sum_i y_i \exp(-\beta x_i) \times \sum_i \exp(-(\alpha + \beta)x_i) + \sum_i y_i \exp(-\alpha x_i) \times \sum_i \exp(-2\beta x_i)}{\sum_i \exp(-2\alpha x_i) \times \sum_i \exp(-2\beta x_i) - \left(\sum_i \exp(-(\alpha + \beta)x_i) \right)^2}, \tag{10}$$

Подставив параметр A в первое уравнение вышепредставленной системы (9), выразим параметр B :

$$B = \frac{\sum_i y_i \cdot \exp(-\alpha \cdot x_i)}{\sum_i \exp(-(\alpha + \beta) \cdot x_i)} - \frac{\sum_i y_i \exp(-\beta \cdot x_i) \cdot \sum_i \exp(-(\alpha + \beta)x_i) \cdot \sum_i \exp(-2\alpha \cdot x_i)}{\sum_i \exp(-(\alpha + \beta)x_i) \cdot (\sum_i \exp(-2\alpha \cdot x_i) \cdot \sum_i \exp(-2\beta \cdot x_i) - (\sum_i \exp(-(\alpha + \beta)x_i))^2)} - \frac{\sum_i y_i \exp(-\alpha \cdot x_i) \cdot \sum_i \exp(-2\beta \cdot x_i) \cdot \sum_i \exp(-2\alpha \cdot x_i)}{\sum_i \exp(-(\alpha + \beta)x_i) \cdot (\sum_i \exp(-2\alpha \cdot x_i) \cdot \sum_i \exp(-2\beta \cdot x_i) - (\sum_i \exp(-(\alpha + \beta)x_i))^2)} \quad (11)$$

Подставив параметры A и B в третье и четвертое уравнения системы (9), получим уравнения, позволяющие определить параметры α и β .

Ниже представлены результаты моделирования, которые дают возможность оценить пространственное распределение подвижных форм тяжелых металлов по мере удаления от стационарного источника загрязнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью пакета прикладных программ *Maple 7* были получены численные значения параметров A , B , α и β и функции прогноза пространственного загрязнения почв по мере удаления от металлургического завода им. Петровского (г. Днепропетровск). Моделирование было проведено на примере распространения подвижных форм тяжелых металлов в горизонтальном пространстве по мере удаления от металлургического завода им. Петровского, поскольку данное предприятие является приоритетным источником загрязнения окружающей среды металлами. В его технологических газопылевых выбросах постоянно в значительных количествах присутствуют *Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd*.

Рассмотрим случай распространения подвижных форм тяжелых металлов, когда западное направление избрано положительным.

Функция, описывающая распространение Cu в данном случае, и ее графическое отображение (рис. 1) имеют следующий вид:

$$\varphi(x) = 1,92 \times e^{-1,7 \cdot x} + 5,48 \times e^{-1,08 \cdot x} \quad (12)$$

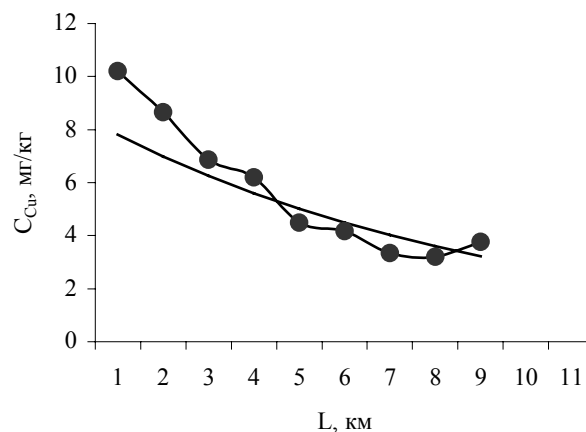


Рис. 1. Графическое изображение теоретической (простая линия) и экспериментальной (линия с точечными маркерами) функций пространственного распространения Cu в почвах

Функцию, описывающую распространение *Pb*, когда положительное направление – западное, и ее графическое изображение (рис. 2) можно представить следующим образом:

$$\varphi(x) = 0,01 \times e^{-0,7x} + 4,05 \times e^{-0,01x} \quad (13)$$

Пространственное распространение *Cd* в почвах в западном направлении (рис. 3) описывается следующей функцией:

$$\varphi(x) = 0,01 \times e^{-0,8x} + 3,04 \times e^{-0,01x} \quad (14)$$

Аналогичным образом нами получены функции прогноза пространственного распространения *Fe*, *Mn*, *Cu*, *Zn*, *Ni*, *Pb*, *Cd* в почвенном покрове г. Днепропетровска для 8 румбов по мере удаления от металлургического завода им. Г. И. Петровского.

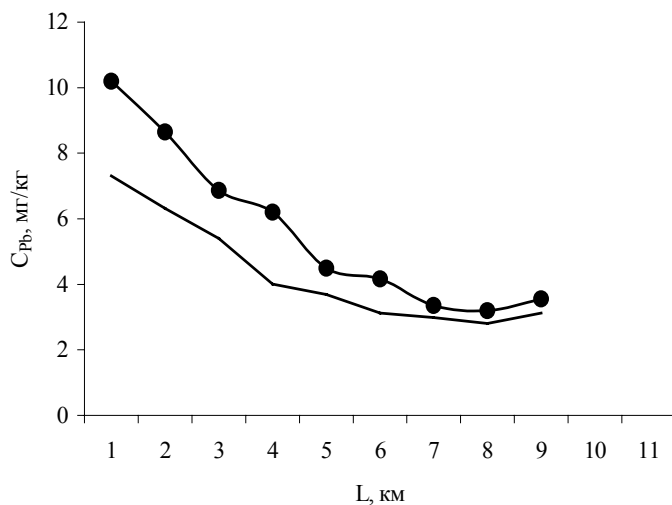


Рис. 2. Графическое изображение теоретической (простая линия) и экспериментальной (линия с точечными маркерами) функций пространственного распространения *Pb* в почвах

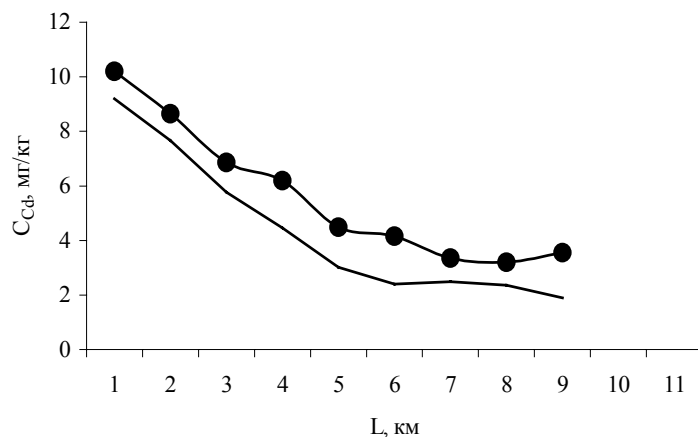


Рис. 3. Графическое изображение теоретической (простая линия) и экспериментальной (линия с точечными маркерами) функций пространственного распространения *Cd* в почвах

При сопоставлении данных, полученных экспериментально и расчетным путем по стандартной статистической методике (Боровиков, 2003), наблюдаем достаточно точную сопоставимость в пределах ошибки измерения (δ) менее 5,0 %.

ВЫВОДЫ

Предложена действующая модель пространственного распространения подвижных форм тяжелых металлов в почвах по мере удаления от стационарного источника техногенной эмиссии.

Получены функции прогноза пространственного распространения подвижных форм тяжелых металлов в почвах в реальных физико-географических условиях.

Полученные функции 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 уровни загрязнения в будущем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В. А.** Экологическая геохимия. – М.: Логос, 2000. – 627 с.
- Боровиков В.** STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
- Кораблева А. И., Чесанов Л. Г., Шапарь А. Г.** Введение в экологическую токсикологию. – Д.: Центр экономического образования, 2001. – 308 с.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.** Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
- 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 Днепрпетровска. – Д.: Арб, 1999. – 109 с.
- Орлов Д. С., Садовникова Л. К., Лозановская И. Н.** Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. – М.: Высш. шк., 2002. – 334 с.
- Сердюк С. Н.** Влияние загрязнения атмосферного воздуха тяжелыми металлами на здоровье населения // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Биосфера и человек». – Майкоп: Изд-во АГУ, 2001. – С. 396–398.
- Сердюк С. М.** Екологічна оцінка забруднення важкими металами урбанізованих територій Дніпропетровсько-Дніпродзержинської агломерації: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. – Д., 2004. – 20 с.

Надійшла до редколегії 21.02.05