

УДК 504.53+625.7/8

Н.В. ВНУКОВА, к.геогр.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой, **А.В. КУХАРСКАЯ**, аспирант
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ НА ПРИДОРОЖНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Рассмотрена математическая модель качественного состояния придорожных почв. Предложен способ определения поля аэрозольных выпадений от автотранспортных средств вдоль автомобильных магистралей на основе решения полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы методом конечных разностей (МКР).

загрязнение, тяжелые металлы, придорожное пространство, математическая модель

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в связи с увеличением масштабов загрязнения окружающей природной среды (ОПС) продуктами техногенной деятельности человечества все большее внимание уделяется проблеме накопления тяжелых металлов (ТМ). Известно, что такие металлы, как кадмий, свинец, ртуть, никель, медь и др., оказывают отрицательное – канцерогенное, мутагенное, тератогенное и нейротоксическое – воздействие на человека [1].

В работе [1] автор проводит исследование загрязненности почв вдоль автомобильных магистралей ТМ (медь, марганец, свинец, цинк, никель). Объектом исследования является магистраль Виа – Балтика. В работе [2] рассматриваются вопросы техногенного воздействия автомобильной дороги на экосистемы. Проведено математическое моделирование процессов химического загрязнения ОПС, приведены результаты экспериментального изучения загрязнения природных комплексов на территории, прилегающей к автомагистрали



«Дон». В работе [3] представлены результаты полевых исследований, свидетельствующих о повышенном содержании ТМ в почвах, прилегающих к автомобильным дорогам. Проведен анализ распределения свинца, кадмия и меди в органах кукурузы, произрастающей на загрязненных территориях. В статье [4] автор описывает математическую модель процесса управления эколого-рекреационными системами, позволяющую осуществлять прогнозное моделирование процесса, а также оптимальное управление данными системами, что дает высокий экономический эффект при функционировании курортов. В работе [5] рассмотрена математическая модель длительного аэрозольного загрязнения территорий, прилегающих к автомобильным дорогам. Представлены результаты исследований аэрозольных выпадений, проводившихся в Новосибирской области в 1999–2000 гг.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно, что основным источником поступления ТМ в организм человека является пищевая продукция, в частности сельскохозяйственные культуры, выращенные на загрязненных почвах. Основными источниками поступления ТМ в ОПС являются нефтеперерабатывающие, электротехнические, машиностроительные, химические и другие предприятия, а также автомобильный транспорт. Концентрация ТМ в выхлопных газах автомобилей зависит от типа используемого топлива. Например, при сжигании 1 кг бензина выделяется 0,5 г свинца, а при сжигании 1 кг дизельного топлива – 0 г. Следовательно, тип используемого топлива и разная интенсивность движения транспортных средств на автомобильных дорогах обуславливают разные концентрации свинца в почвах придорожной зоны (табл. 1) [2].

С целью снижения концентрации свинца в почвах, прилегающих к автомобильным дорогам, целесообразно использовать растения, обладающие способностью на-

Таблица 1 – Изменение содержания свинца в почвах и растениях вблизи автомагистралей в зависимости от интенсивности движения транспортных средств

Интенсивность движения транспортных средств, тыс. в сутки	Содержание свинца в почве, мг/кг	Содержание свинца в смеси трав, мг/кг
10–19	780	140
20–39	1250	270
40–50	1650	320
>50	2200	350

капливать в себе ТМ. Такой способ очистки почв получил название «фиторемедиация». Наибольшей способностью аккумулировать ТМ обладают такие растения, как кукуруза, подсолнечник и индийская (сарептская) горчица.

Установлено, что содержание ТМ изменяется в обратной зависимости расстояния от дороги (рис. 1) [2]. Так, при интенсивности движения 15 000 автомобилей в сутки концентрация металлов на расстоянии 200 м от автотрассы ниже уровня предельно допустимой.

При увеличении содержания ТМ в почве их содержание в растениях также увеличивается, что недопустимо при выращивании сельскохозяйственных культур. Тяжелые металлы, мигрируя и накапливаясь в почве, нарушают происходящие в ней процессы, что может привести к исключению почвы из севооборота. Решение данной проблемы – разработка способа изъятия ТМ из почвы при определении уровня загрязнения придорожных почв.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИДОРОЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Рассмотрим уравнение, описывающее изменение качественного состояния почв придорожных территорий магистралей в зависимости от времени и факторов, влияющих на них:

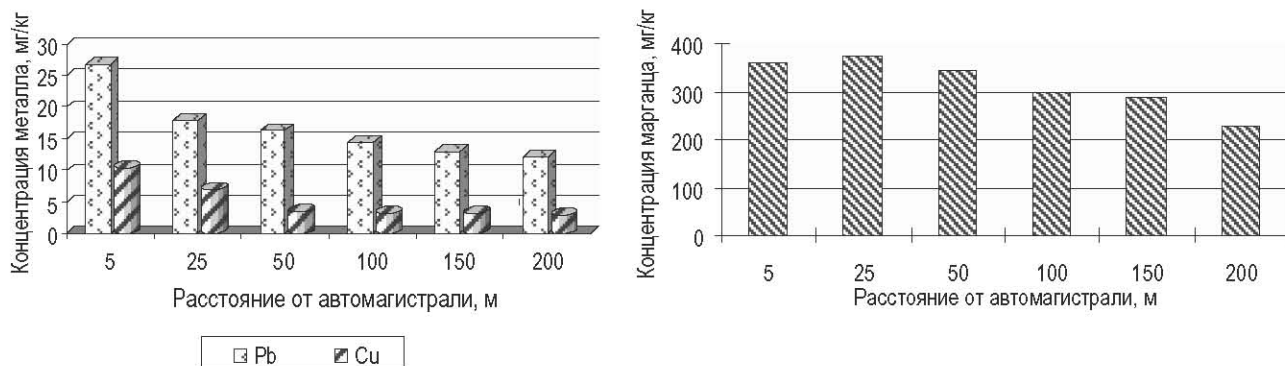


Рисунок 1 – Содержание ТМ в прилегающих почвах на разных расстояниях от автомобильной магистрали

$$\frac{\partial(\varphi(t) - (\varphi_0))}{\partial t} = G(t) - F(t) + \zeta(t), \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ – текущий уровень загрязнения почв придорожного пространства; (φ_0) – начальный уровень загрязнения почв придорожного пространства; $G(t)$ – функция агрессии, формирующаяся за счет аэрозольных выпадений; $F(t)$ – функция защиты, формирующаяся за счет факторов уменьшения концентрации загрязняющих веществ; $\zeta(t)$ – некоторая случайная величина загрязнений, нерегулярно поступающих в почвенный покров (смыв дорожного смета дождевыми водами).

Проинтегрировав формулу (1), получим

$$\int_0^t \frac{\partial(\varphi - \varphi_0)}{\partial t} dt = \int_0^t G(t) dt - \int_0^t F(t) dt + \int_0^t \zeta(t) dt. \quad (2)$$

Таким образом можно найти значение $\varphi(t)$:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \int_0^t G(t) dt - \int_0^t F(t) dt + \int_0^t \zeta(t) dt \leq \varphi_{\max}, \quad (3)$$

где φ_{\max} – предельно допустимое значение уровня загрязнения, при котором нарушается гомеостаз системы.

Обозначим функцию, характеризующую колебания концентрации основных загрязняющих веществ, следующим образом:

$$C_n(t) = \int_0^t [G(t) - F(t) + \zeta(t)] dt, \quad (4)$$

где n – вид загрязняющего вещества.

Для использования формулы (3) применительно к реальным объектам ее удобно привести к нормированному виду

$$\varphi(t) = \sum_n \frac{C_n(t) + \varphi_{0n}}{ПДК_n} \leq \varphi_{\max}, \quad (5)$$

где $ПДК_n$ – предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества n .

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЙ

Рассмотрим функцию агрессии $G(t)$. В данном случае, применительно к автомобильным дорогам, она представляет собой аэрозольные выпадения на придорожном пространстве. Поле аэрозольных загрязнений $S(a, z)$ на придорожной территории определяется на основе решения полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы [6]

$$u \frac{\partial S}{\partial a} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (6)$$

где u – скорость ветра в направлении подвижной оси a ; w – скорость оседания аэрозольной примеси; $k(z)$ – коэффициент вертикального турбулентного обмена.

После выполнения процедуры дифференцирования правой части уравнения (6) уравнение турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы примет вид

$$u \frac{\partial S}{\partial a} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial k(z)}{\partial z} \cdot \frac{\partial S}{\partial z} + k(z) \frac{\partial^2 S}{\partial z^2}. \quad (7)$$

Решение дифференциального уравнения (7) относительно поля аэрозольных загрязнений можно получить, например, методом конечных разностей (МКР) [7]. При этом мы условно разбиваем плоскость aOz на определенное число дискретных участков с шагом Δa вдоль подвижной оси a и шагом Δz вдоль оси z . При составлении конечно-разностного аналога уравнения (7) были использованы следующие аппроксимирующие выражения для первых и вторых частных производных:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right)_p &= \frac{1}{\Delta z} (S_{p+1} - S_p); \\ \left(\frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right)_p &= \frac{1}{\Delta z^2} (S_{p+1} - 2S_p + S_{p-1}); \\ \left(\frac{\partial S}{\partial a} \right)_m &= \frac{1}{\Delta a} (S_{m+1} - S_m). \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом использования аппроксимирующих выражений (8) конечно-разностный аналог системы дифференциальных уравнений (7) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{u}{\Delta a} (S_p^{m+1} - S_p^m) - \frac{w}{\Delta z} (S_{p+1}^m - S_p^m) = \\ = \frac{1}{\Delta z^2} (k_{p+1} - k_p) \cdot (S_{p+1}^m - S_p^m) + \frac{k_p}{\Delta z^2} (S_{p+1}^m - S_p^m + S_{p-1}^m), \end{aligned} \quad (9)$$

где $m = 0, 1, \dots, M$ – количество шагов вдоль подвижной оси a с интервалом Δa ; $p = 0, 1, \dots, P$ – количество шагов вдоль оси z с интервалом Δz .

На основании аппроксимирующего уравнения (9) поле аэрозольных загрязнений S можно определить следующим образом:

$$S_p^{m+1} = \frac{\Delta a}{u} \left[\frac{1}{\Delta z^2} (k_{p+1} - k_p) \cdot (S_{p+1}^m - S_p^m) + \frac{k_p}{\Delta z^2} (S_{p+1}^m - S_p^m + S_{p-1}^m) + \frac{w}{\Delta z} (S_{p+1}^m - S_p^m) \right] + S_p^m. \quad (10)$$



Использованная в работе схема МКР представлена на рис. 2.

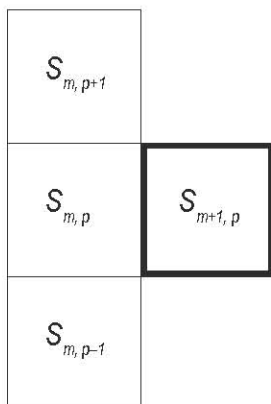


Рисунок 2 – Схема МКР

Для получения численного решения данной задачи необходимо дополнить выражение (6) естественными граничными условиями. В случае рассмотрения явления формирования поля аэрозольных выпадений вдоль автомобильной дороги (от линейного источника) в качестве граничных условий следует использовать интенсивность выбросов отработанных газов автомобилей, проезжающих по дороге ($a=0$, $z=0$). Для определения поля аэрозольных выпадений на придорожных территориях необходимо рассматривать поле аэрозольных загрязнений при $p=0$, т. е. S_0^m .

ВЫВОДЫ

Загрязнение почв придорожного пространства ТМ на фоне увеличения интенсивности автотранспортных потоков вызывает необходимость решения данной проблемы с целью сохранения почв сельскохозяйственного назначения.

Предложенная модель дает возможность определить и спрогнозировать уровень загрязненности почв

Розглянута математична модель якісного стану придорожного ґрунту. Запропоновано спосіб визначення поля аерозольних випадань від автотранспортних засобів уздовж автомобільних магістралей на основі розв'язання напівемпіричного рівняння турбулентної дифузії у приземному шарі атмосфери методом кінцевих різностей [МКР].

на придорожних територіях за определенный период времени.

Анализируя уравнение (3), можно сделать вывод, что качественное состояние почв придорожной зоны зависит от направленного увеличения функции защиты $F(t)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Балтренас, П.** Исследование загрязненности тяжелыми металлами почвы вдоль магистрали Виа – Балтика [Текст] / П. Балтренас, А. Янкайте / Экология и промышленность России. – Москва, 2003. – С. 41–44.
2. **Батурин, В.К.** Техногенное химическое воздействие автомобильных дорог на экосистемы придорожной полосы [Текст] / В.К. Батурин: Монография. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2003. – 112 с.
3. **Головач, О.** Забруднення сільськогосподарських ґрунтів важкими металами та характер їхнього перерозподілу у рослинах кукурудзи [Текст] / О. Головач, В. Козловський, О. Демків // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. – 2004. – С. 205–211.
4. **Мануйлов, М.Б.** Теоретические и технологические аспекты управления качеством рекреационных зон водных объектов [Текст] / М.Б. Мануйлов, А.К. Шевченко // Механізм регулювання економіки. – 2003. – С. 37–41.
5. **Рапуга, В.Ф.** Математические модули длительного загрязнения окрестностей автотрасс [Текст] / В.Ф. Рапуга, В.В. Коковин, О.В. Шуваева // Труды Международной конференции RDAMM. – 2001. – Т. 6, ч. 2. Спец. выпуск. – С. 348–350.
6. **Берлянд, М.Е.** Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы [Текст] / М.Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
7. **Самарский, А.А.** Теория разностных схем [Текст]. / А.А. Самарский. – 3-е изд., испр. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 616 с.

Поступила в редакцию 04.06.07 г.

Mathematical model of qualitative soil condition along highways is considered. The way of determining the fields of aerosol fall-out from automobiles along highways is suggested based on solution of the semiempirical equation of turbulent diffusion in the bottom atmosphere with finite difference method (FDM).