

**Шандиба О.Б., Шпетний Д.М., Курило А.О.**

## **ПРОГНОЗУВАННЯ МІГРАЦІЇ ТОКСИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ НА ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЯХ**

*Сумський національний аграрний університет*

### **Вступ**

Присутність рухомих компонентів хімічних речовин на землях сільськогосподарського використання та в місцях складування промислових відходів пов'язана зі значним ризиком для здоров'я людей та довкілля. Удосконалення регіональних систем моніторингу передбачає розвиток технічних засобів контролю стану навколишнього середовища та комп'ютеризованих систем моделювання екологічних ситуацій з побудовою ґрунтово-геохімічних карт забруднення [1 – 5]. Застосування порівняно недорогого кондуктометричного експрес-аналізу ґрунтово-водних систем сприятиме отриманню вірогідних прогнозів для прийняття адекватних інженерних, агрономічних або адміністративних рішень.

### **1. Математична модель міграції рухомих компонентів**

Передбачається, що на горизонтальних ділянках контрольованої території мають місце лише вертикальні зміни концентраційного профілю при рівномірному початковому розподілі лімітованого забруднення. Воно може потрапити в ґрунтові води при контакті ґрунтово-водної та капілярної зон, причому остання при малому діаметрі капілярів значно перевищує рівень ґрунтових вод. На похилих ділянках рухомі компоненти забруднень також можуть мігрувати вздовж градієнту рельєфу зі швидкістю, що залежить від періодичності та інтенсивності опадів, геогідродинамічних параметрів ґрунтів, тощо.

В попередніх роботах [2, 3, 5] запропонована двовимірна модель міграції розчинних компонентів, що враховує градієнт рель'єфу (гідравлічний нахил) як

основну причину руху води в поверхневих шарах ґрунту непромивного або періодично промивного типу

$$C = C_0 + \frac{C_p - C_0}{B\varepsilon} [1 - \exp(-Bkt)] \exp\left(-\frac{k}{\varepsilon_1} \tau\right), \quad (1)$$

де  $C$  – осереднена концентрація забруднення в ґрунтовому розчині інфільтраційного шару;

$C_0$ ,  $C_p$  – початкові концентрації забруднення відповідно в інфільтраційному потоці та застійних зонах ґрунту;

$B = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon}$  – структурний параметр ґрунту;

$\varepsilon$ ,  $\varepsilon_1$  – відносні об'єми проточних і застійних зон;

$k$  – об'ємний коефіцієнт масовіддачі;

$t$  – інтегральний час просування (руху) концентраційного фронту забруднення від вододілу до контрольної точки;

$\tau$  – інтегральний час випадання опадів за контрольний період.

На рис. 1 – 2 представлено фрагменти рельєфу та профілю контрольної ділянки з горизонталями геодезичних висот  $H$  відносно деякої локальної площини порівняння. На рис. 3 – 4 показано динаміку змін концентраційного фону з характерними ізолініями, що відображають акумуляцію забруднень на депресивних ділянках рельєфу і більш швидке їх вимивання з вододілу.

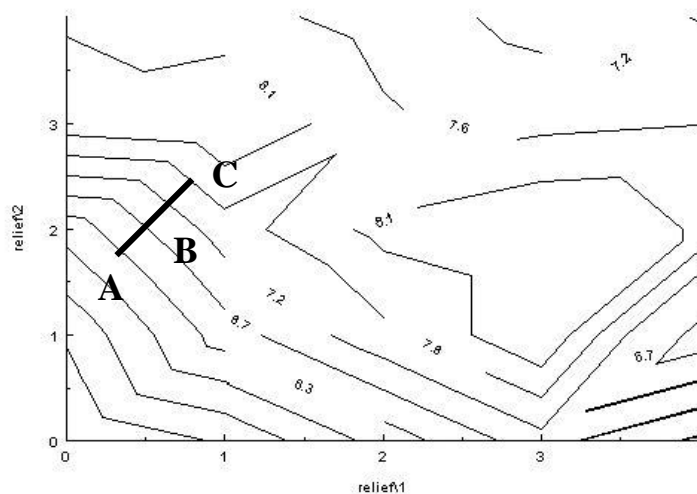
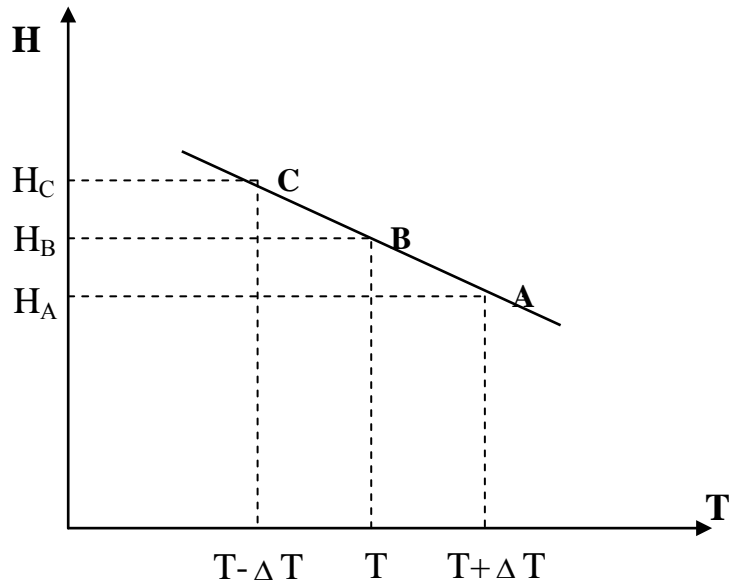
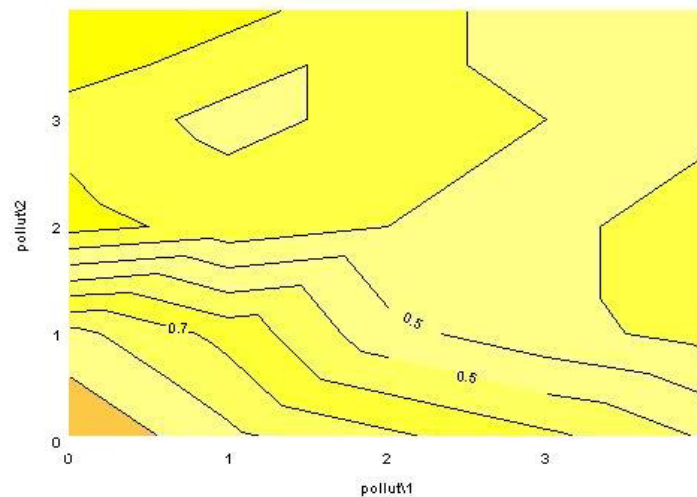


Рис. 1. Фрагмент рельєфу контрольної ділянки

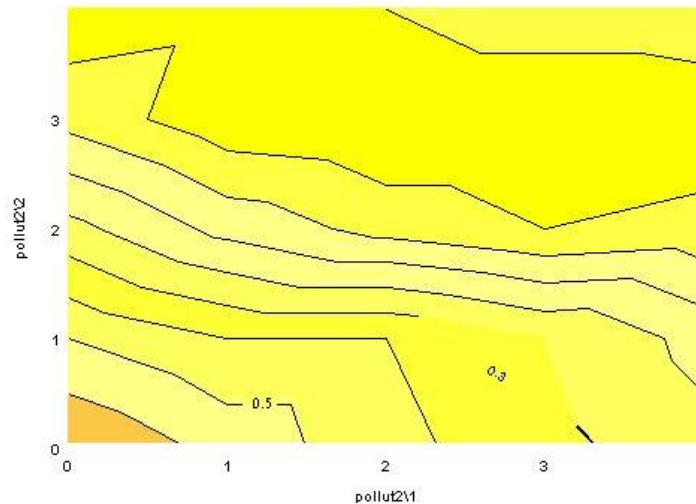


**Рис. 2. Фрагмент профілю контрольної ділянки по лінії градієнта ABC**



**Рис. 3. Концентраційний фон забруднення з ізоліями відносної електропровідності**

Просування забруднення вздовж градієнта рельєфу буде прискорюватись на більш крутому схилі. При цьому концентраційний фронт, спускаючись до підосви схилу, проходитиме спочатку через геодезично вище розташовані точки, зокрема С (рис.2). Слід також зауважити, що кінетичні прямі для кожної з точок, незалежно від висоти розташування, матимуть однаковий кут нахилу (рис. 5).



**Рис. 4. Динаміка зміни концентраційного фону через 30 днів після попереднього моніторингу**

Для визначення геогідродинамічних параметрів за умови відносної чистоти атмосферних опадів  $C_0 = 0$  рівняння (1) можна записати у вигляді :

$$-\ln \frac{C}{C_p} = -\ln \frac{1 - \exp(-Bkt)}{B\varepsilon} + \frac{k}{\varepsilon_1} \tau \quad (2)$$

Вважаючи ліву частину виразу лінійною функцією часу, можна прогнозувати динаміку зниження забрудненості в будь-якій контрольній точці, розташованій на відстані  $t$  від вододілу. Для цього необхідно визначити об'ємний коефіцієнт масовіддачі  $k$ , структурний параметр  $B$  або пов'язаний з ним відносний об'єм застійних зон  $\varepsilon_1$ .

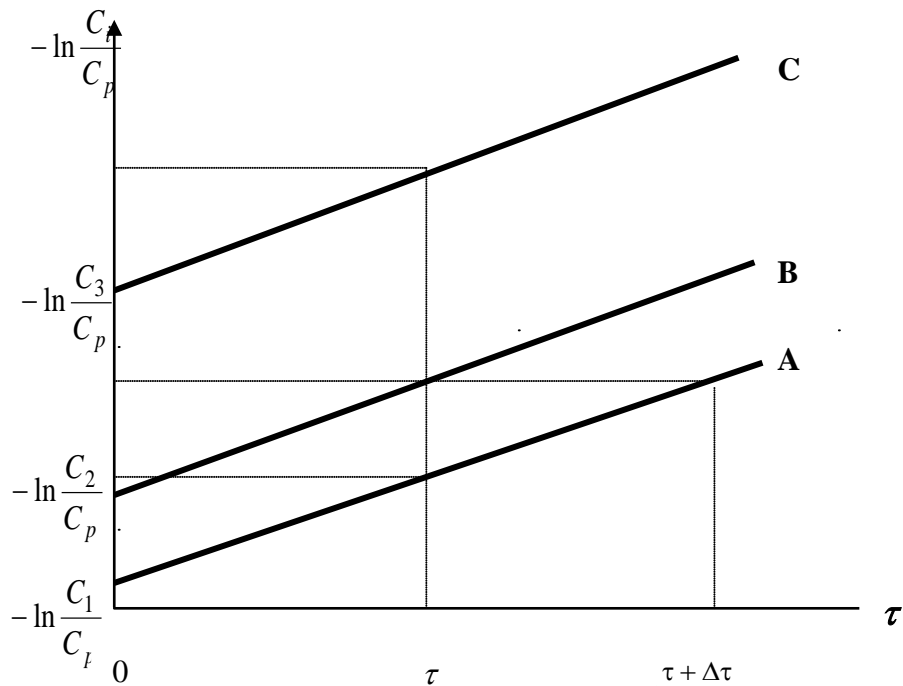
## 2. Методика визначення геогідродинамічних параметрів

Тангенс кута нахилу кінетичної прямої, що визначається рівнянням (2), може бути знайдений за двома, як мінімум, експериментальними концентраціями забруднення в ґрунтовому розчині (рис.5, кінетична пряма **A**), взятими з достатньо тривалим проміжком часу між відбором проб  $\Delta\tau$  :

$$\frac{k}{\varepsilon_1} = \frac{\ln \frac{C_1}{C_2}}{\Delta\tau} \quad (3)$$

Більш точне визначення кута нахилу проводиться методами статистичної обробки даних при наявності репрезентативної сукупності експериментальних замірів за тривалий часу відбору проб. Методика розрахунку структурних

параметрів ґрунту передбачає побудову трьох кінетичних прямих для трьох контрольних точок, розташованих на однаковій геометричній відстані одна від одної по лінії градієнта рельєфу за умови рівного перепаду геодезичних висот між ними. В польових умовах це можна забезпечити вибором середньої контрольної точки між двома іншими, що лежать на ділянці схилу з рівномірним зменшенням відносних геодезичних висот уздовж градієнта.



**Рис.5. До розрахунку геогідродинамічних параметрів ґрунту контрольної ділянки**

Наявність, як мінімум, трьох експериментальних даних забрудненості ґрунту в трьох точках **А, В, С**, що відповідають вказаним вимогам, дозволяє скласти відповідну систему рівнянь :

$$-\ln \frac{C_1}{C_p} = -\ln \frac{1 - \exp(-Bkt)\exp(-Bk\Delta t)}{B\varepsilon} + \frac{k}{\varepsilon_1} \tau, \quad (4)$$

$$-\ln \frac{C_2}{C_p} = -\ln \frac{1 - \exp(-Bkt)}{B\varepsilon} + \frac{k}{\varepsilon_1} \tau, \quad (5)$$

$$-\ln \frac{C_3}{C_p} = -\ln \frac{1 - \exp(-Bkt)\exp(Bk\Delta t)}{B\varepsilon} + \frac{k}{\varepsilon_1} \tau, \quad (6)$$

де виконується фізична умова розташування контрольних точок на одному схилі  $\Delta t \leq t$ , тобто час просування концентраційного фронту  $\Delta t$  від верхньої контрольної точки до середньої, і від середньої до нижньої, не перевищує час

просування концентраційного фронту від вододілу до середньої точки. Відповідно час просування для верхньої точки С становить  $t - \Delta t$ , для середньої  $t$ , а для нижньої  $t + \Delta t$  (рис.2).

Виключаючи ці невідомі, отримаємо рівняння для визначення відносного об'єму застійних зон:

$$\left[1 - B\varepsilon \frac{C_2}{C_p} \exp\left(\frac{k}{\varepsilon_1} \tau_1\right)\right]^2 = \left[1 - B\varepsilon \frac{C_1}{C_p} \exp\left(\frac{k}{\varepsilon_1} \tau_1\right)\right] \left[1 - B\varepsilon \frac{C_3}{C_p} \exp\left(\frac{k}{\varepsilon_1} \tau_1\right)\right], \quad (7)$$

або, позначаючи відомі функції буквами  $A_1, A_2, A_3$

$$(1 - B\varepsilon A_2)^2 = (1 - B\varepsilon A_1)(1 - B\varepsilon A_3), \quad (8)$$

звідки

$$B\varepsilon = 1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} = \frac{2A_2 - A_1 - A_3}{A_2^2 - A_1 A_3}. \quad (9)$$

Очевидно, відносний об'єм проточних та застійних зон пов'язаний з пористістю ґрунту  $m$  рівнянням  $\varepsilon = m - \varepsilon_1$ , коефіцієнт масовіддачі – рівнянням (3), а невідомі  $t$  і  $\Delta t$  знаходяться з системи рівнянь (4 – 6).

Таким чином, на підставі експериментальних досліджень міграційних властивостей рухомих форм забруднень і визначення геогідродинамічних характеристик ґрунтів можна прогнозувати динаміку змін концентраційного фону та наслідки техногенного впливу на стан земельних угідь.

### 3. Оцінювання захисної здатності водоохоронних зон

Основними факторами захисту малих водойм від техногенного впливу прийнято:  $x_1$  - ширина водоохоронної зони,  $x_2$  – крутизна схилу,  $x_3$  – характеристика рослинного шару. Для оцінювання функції відносного забруднення водойми (% від загальної кількості рухомих забруднень, що потрапили на площу водоохоронної зони) фактори впливу теж враховувались у безрозмірному вигляді. Ширина водоохоронної зони відносно нормативної прийнята за +1, половинна ширина характеризується 0, а її відсутність (крайка води) характеризується параметром -1. Крутизна схилу вимірюється в %, або у відносному перепаді геодезичної висоти до ширини водоохоронної зони. Характеристика рослинного шару прийнята за +1

(наявність рослинності), за 0,5 (помірна рослинність) або за 0 (відсутність рослинності).

Теоретично відносна кількість забруднень  $Y$ , що пройдуть через нижню межу водоохоронної зони води, визначиться інтегруванням поточної концентрації забруднення по тривалості опадів та довжині крайки води  $XX'$ , прилеглої до контрольованої водоохоронної зони, за формулою:

$$Y = \frac{\int_{XX'} \int_{\tau} \psi qb C dx d\tau}{m_0 S} \quad (10)$$

в якій  $b$  – ширина водоохоронної зони;

$\psi$  – параметр гідравлічного виносу;

$q$  – інтенсивність опадів,  $m^3 / HaS$ ;

$m_0$  – початковий вміст рухомих компонентів,  $Kg/Ha$ ;

$S = bXX'$  – площа контрольної ділянки в межах водоохоронної зони,  $Ha$ .

В таблиці 1 наведені осереднені експериментальні дані затримуючої здатності водоохоронних зон  $Y$  в залежності від впливаючих факторів, нормованих відповідно методиці планування експерименту.

**Таблиця 1.**

**Фактори впливу на затримуючу здатність водоохоронних зон**

| № | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $Y$  |
|---|-------|-------|-------|------|
| 1 | 1     | -1    | 1     | 0.1  |
| 2 | 1     | 0     | 1     | 0.3  |
| 3 | 1     | 1     | 1     | 0.5  |
| 4 | 0     | -1    | 1     | 0.3  |
| 5 | 0     | 0     | 1     | 0.4  |
| 6 | 0     | 1     | 1     | 0.6  |
| 7 | -1    | -1    | 1     | 0.9  |
| 8 | -1    | 0     | 1     | 0.95 |

Продовження таблиці 1.

| №  | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | Y    |
|----|----------------|----------------|----------------|------|
| 9  | -1             | 1              | 1              | 1    |
| 10 | 1              | -1             | 0              | 0.2  |
| 11 | 1              | 0              | 0              | 0.4  |
| 12 | 1              | 1              | 0              | 0.7  |
| 13 | 0              | -1             | 0              | 0.5  |
| 14 | 0              | 0              | 0              | 0.55 |
| 15 | 0              | 1              | 0              | 0.78 |
| 16 | -1             | -1             | 0              | 0.98 |
| 17 | -1             | 0              | 0              | 1    |
| 18 | -1             | 1              | 0              | 1    |

Обробка даних згідно методики планування експерименту дозволила записати функцію множинної лінійної регресії у вигляді:

$$Y = 0,67 - 0,29X_1 + 0,12X_2 - 0,11X_3. \quad (11)$$

Отримана модель є якісною за всіма критеріями, результати роботи (а саме основні статистичні показники моделі) представлено в таблиці 2.

**Таблиця 2.**

**Оцінка залежності затримуючої здатності водоохоронних зон  
від пояснюючих факторів**

| Статистичні показники               | Числове значення      |
|-------------------------------------|-----------------------|
| <i>Регресійна статистика:</i>       |                       |
| Множинний R (коефіцієнт кореляції)  | 0,95                  |
| R-квадрат (коефіцієнт детермінації) | 0,90                  |
| <i>Дисперсійний аналіз:</i>         |                       |
| F (критерій Фішера)                 | 66,87                 |
| Значущість F                        | $1,64 \cdot 10^{-11}$ |
| Критичне значення F                 | 3,03                  |
| <i>Параметри рівняння регресії:</i> |                       |
| Y - перетин                         | 0,67                  |



Продовження таблиці 2.

| Статистичні показники          | Числове значення |
|--------------------------------|------------------|
| Змінна $x_1$                   | -0,29            |
| Змінна $x_2$                   | 0,12             |
| Змінна $x_3$                   | -0,11            |
| <i>t-статистика Стьюдента:</i> |                  |
| Y - перетин                    | 23,17            |
| Змінна $x_1$                   | -12,567          |
| Змінна $x_2$                   | 5,037            |
| Змінна $x_3$                   | -2,37            |
| Критичне значення $t$          | 2,07             |

\*Джерело: власні розрахунки авторів

Дані, наведені в таблиці 2, показують, що отриманий коефіцієнт кореляції (0,95) свідчить про правильну специфіку обраної моделі та про дуже тісний лінійний зв'язок ширини водоохоронної зони, крутизни схилу та характеристики рослинного шару з затримуючою здатністю водоохоронних зон. На якість знайденого рівняння вказує й коефіцієнт детермінації (в нашому дослідженні він склав 0,90), що доводить правильність обраних для дослідження факторів та їх вагомий вплив на результуючий показник. З іншого боку, якість рівняння підтверджує й критерій Фішера, розрахований з довірчою ймовірністю 95%, значення якого в десятки разів більше від критичного (3,03). Для кожного оціненого параметра регресії проведено окрему перевірку його статистичної значущості за допомогою t-тесту (критерію) Стьюдента. Абсолютні величини фактичних значень t-статистики за пояснюючими факторами переважають критичне (2,07), що знайдене за спеціальними таблицями t-статистики, а це означає, що оцінки параметрів рівняння регресії не випадково відрізняються від нуля, а є статистично значущими. Цим ще раз підтверджується правильність вибору специфіки побудованої моделі.

Виходячи з цього, ми можемо стверджувати, що модель адекватна реальній дійсності, якісна, й отримані оцінки параметрів рівняння регресії не випадкові, а сформовані під впливом вагомих пояснюючих факторів. Отже, знайдену функцію регресії можна застосовувати для подальших досліджень, аналізу та прогнозування впливу на затримуючу здатність водоохоронних зон вказаних пояснюючих факторів, а саме – ширини водоохоронної зони, крутизни схилу та характеристики рослинного шару.

Кожний коефіцієнт в рівнянні регресії свідчить про ступінь впливу відповідного пояснюючого фактора на результативний показник при фіксованому положенні іншого фактора, а саме, як зі зміною кожного окремого фактора на одиницю змінюється результативний показник. Аналіз рівняння регресії (11) підтвердив вирішальний вплив ширини водоохоронної зони  $x_1$  на рівень захисту водойми від забруднення в порівнянні навіть з впливом крутизни рельєфу (схилу)  $x_2$  та стану рослинного покриву  $x_3$ .

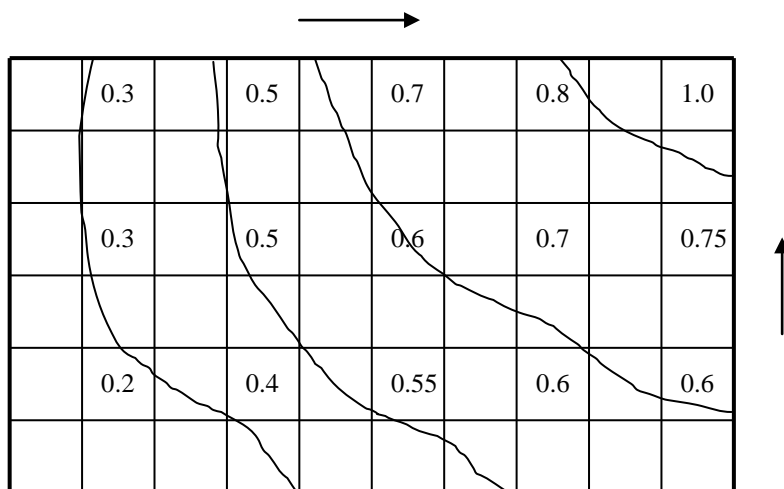
#### **4. Методика експериментальних досліджень**

Для експрес-аналізу концентраційного фону рухомих компонентів забруднень був використаний кондуктометр спеціального призначення, в конструкцію якого входили джерело струму, гальванометр, дросель, компенсаційна система, штанга з електродами. З метою розширення діапазону вимірювань та урахування впливу дестабілізуючих факторів і нелінійної залежності електропровідності проводилась термокомпенсація відібраних проб лізіметричної рідини і автоматичне тарування аналітичних даних. Застосування мікропроцесора дозволило надати приладу ряд додаткових функціональних можливостей.

Дослідний варіант кондуктометра передбачав вимірювання максимальної концентрації забруднення (відповідно електропровідності розчину NaCl) до 4000 мг/л з температурою до 45° С та відносною похибкою 3%. [3, 5].

Розподіл ізоліній відносної електропровідності ґрунтового розчину в тонкошаровому дослідному лотку розмірами 100×60×10 см (рис.6) свідчить не тільки про вплив ширини та рельєфу водоохоронних зон на міграцію рухомих

сольових забруднень до крайки води (нижньої межі водоохоронної зони), але й про можливості кондуктометричних методів експрес-аналізу [9].



**Рис. 6. Розподіл ізолій відносній електропровідності ґрунтового розчину в залежності від кута нахилу дослідного лотка**

## **5. Міграція рухомих компонентів мінеральних добрив**

Фізико-хімічні властивості гранульованих мінеральних добрив, зокрема, їх розчинність в ґрунтово-водних системах сільськогосподарських угідь грають надзвичайно важливу роль як в процесі підживлення рослин, так і у вирішенні екологічних проблем забруднення водних джерел біогенними компонентами. Занадто висока розчинність гранул суттєво збільшує частку рухомих компонентів, що виносяться в ґрунтові або поверхневі води. З іншого боку, низькі показники розчинності добрив є причиною неефективного засвоєння поживних речовин в процесі вегетації. Таким чином, регулювання взаємодії гранульованих засобів живлення та хімічного захисту рослин в ґрунтово-водних системах сільгоспугідь є актуальною проблемою агровиробництва. Для її вирішення запропонована низка заходів, серед яких виробництво органо-мінеральних добрив пролонгованої дії з оптимальним монодисперсним гранскладом, причому дія модифікованих добрив повинна бути синхронізована з вегетаційними строками розвитку рослин.

Проблеми міграції рухомих забруднюючих компонентів постали і при використанні гранульованих мінеральних добрив. Кінетичні параметри

процесу при цьому визначаються не лише типом ґрунтів, інтенсивністю зволоження та їх сорбційною здатністю, але й, значною мірою, рельєфом контрольної ділянки та гранулометричним складом добрив.

Аналіз теоретичної моделі міграції (1) показав, що на контрольній межі (зазвичай, береговій крайці водойми) концентрація забруднення спочатку буде експоненційно зростати до деякого максимуму  $C_{\max}$ , що відповідає появі найбільш концентрованих крапель промивної води з опадів, що випали на вододілі (рис.7). Ці краплі на протязі свого шляху від вододілу до контрольної межі поглинають більшу кількість забруднюючих компонентів в порівнянні з краплями, що випали нижче по схилу. Дійсно, шлях крапель зі схилу буде коротшим, а час їхнього контакту із забрудненим ґрунтом, відповідно, меншим. Слід також зауважити, що лінії току крапель промивного потоку будуть перпендикулярні ізолініям контрольної ділянки, тобто рух транспортного потоку міграції забруднень відбуватиметься по лініям градієнта рельєфу (рис.8). В подальшому процесі вимивання, після досягнення максимуму, пов'язаного з прибуттям на контрольну межу перших крапель з вододілу, починається поступове зниження забрудненості лізиметричного фільтрату від атмосферних опадів, що теоретично апроксимується експоненційною функцією часу та параметром акумулюючої здатності ґрунту.

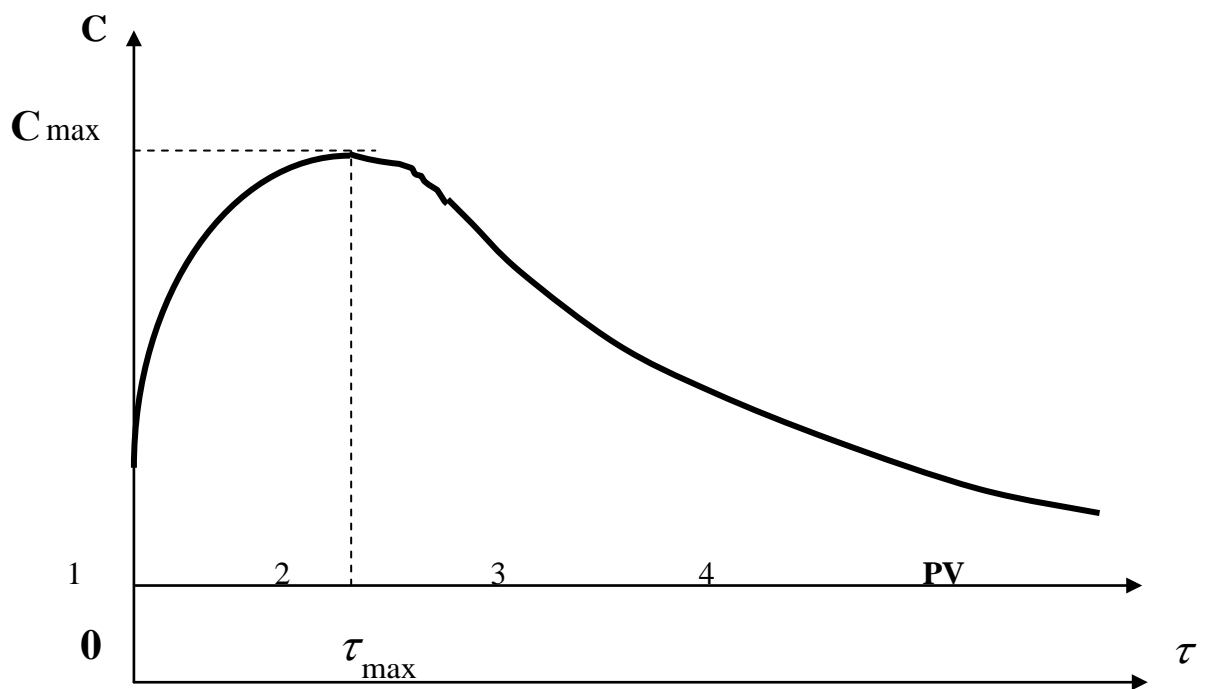
Вплив гранулометричного складу міндобрив на пікову висоту  $C_{\max}$  кривих вимивання теоретично ілюструється порівняльною таблицею 3, де показана залишкова маса гранул різного діаметру (пропорційна його кубу) при однаковій агротехнічній нормі внесення та тривалості опадів.

**Таблиця 3**

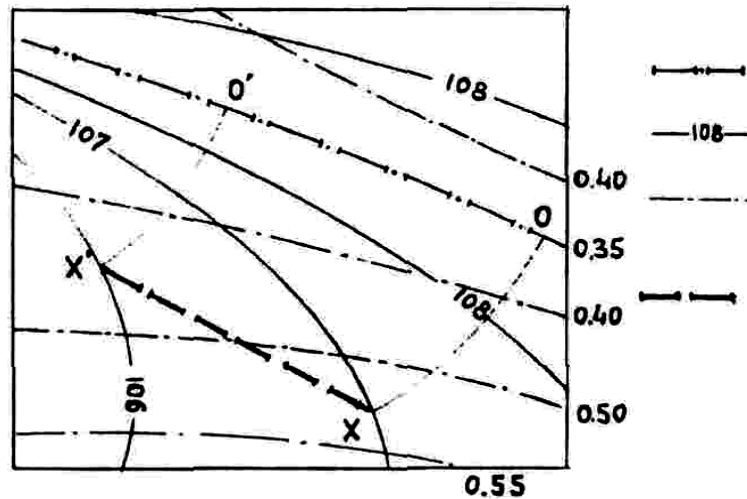
**Вплив гранулометричного складу міндобрив  
на залишкову та розчинену масу гранул**

| Діаметр гранул, мм        | 10  | 8    | 6    | 4    | 2    | 1    |
|---------------------------|-----|------|------|------|------|------|
| Залишкова маса гранули, % | 100 | 51,2 | 21,6 | 6,4  | 8,0  | 1,0  |
| Розчинена маса, %         | 0   | 48,8 | 78,4 | 93,6 | 92,0 | 99,0 |

Неважко помітити, що при однаковій тривалості опадів і пропорційному зменшенні діаметра однієї гранули з 10 мм до 8 мм вимивається майже половина її маси 48,8 %. В той же час, при однаковій нормі внесення (2 гранули діаметром 8 мм замість однієї діаметром 10 мм) та однаковій швидкості розчинення з 8 мм до 6 мм залишається  $21,6 \cdot 2 = 43,2$  % внесеної маси гранул, а вимивається, відповідно 56,8 % . Ця тенденція стає ще помітнішою при порівнянні добрив найбільш поширеного грануляційного складу в діапазоні 2 - 4 мм. Тобто пікова висота  $C_{\max}$  при збільшенні гранул зменшується, а права гілка кривої вимивання підвищується, приводячи до більш тривалого впливу міндобрива.



**Рис.7. Типова крива забрудненості промивної води в пункті лізіметричного контролю в залежності від тривалості випадання опадів  $\tau$  та об'ємних витрат PV**



**Рис.8. Ізолінії відносної забрудненості в залежності від рельєфу контрольної ділянки: 00\* - вододіл; XX\* - контрольна межа; — 108 – ізолінії рель'єфу**

## **Висновки**

На підставі геогідродинамічного обґрунтування запропонована інтегральна модель масопереносу та міграції рухомих компонентів забруднень на схилових землях та методика визначення геогідродинамічних параметрів.

Дослідженнями міграційних властивостей рухомих форм забруднень визначені статистичні характеристики впливу параметрів водоохоронних зон на їх захисні функції. Збереження водоохоронних зон в належному стані є надзвичайно актуальним в умовах зростання техногенного навантаження на водойми та негативного впливу глобального потепління.

Геогідродинамічні параметри забруднень і, зокрема, гранулометричний склад міндобрив суттєво впливає на пікову концентрацію  $C_{\max}$  кривих вимивання та інтенсивність міграції.

## **Література:**

1. Кац Д.М., Пашковский И.С. Мелиоративная гидрогеология. - М.: Агропромиздат, 1988.- 256 с.
2. Барбашев С.В., Пристер Б.С. Применение экспертных систем для управления окружающей средой в районах расположения АЭС - .- 3б.

наук. статей VI Міжнародної науково-практичної конференції “Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення”, т. 2 /УКРНДІЕП.-Х., Райдер, 2010.- с. 70 - 75.

3. Шандиба О.Б., Кузема О.С. Застосування кондуктометрії для моніторингу ґрунтово-водних систем забруднених територій.- Зб. наук. статей IV Міжнародної науково-практичної конференції “Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення”, т. 2 /УКРНДІЕП.-Х., Райдер, 2008.- с. 255-260.

4. Rasig H. Editing Environmental Data with a PC-based GIS,- UTA Technology & Environment N 2, December 1996, Intern. Ed.,- p.190-192.

5. Shandyba A.B. Ecology Forecast for Migration of the Chemical Substances into Ground and Surface Water.- Fresenius Environ. Bulletin., vol.4, Basel, Switzerland, 1995.- pp.80-85.

6. Веригин Н.Н. Основы теории растворения и вымыва солей при фильтрации воды в горных породах и грунтах.- В кн.: Инженерно-геологические свойства горных пород и методы их изучения.- М.: Изд-во АН СССР, 1962, С.59-70.

7. Мистецкий Г.Е. Автоматизация расчета массопереноса в почвогрунтах.- К.: Будівельник, 1985.- 136 с.

8. Шандиба О.Б., Визначення геогідродинамічних параметрів міграції рухомих забруднень в ґрунті.- Зб. наук. статей III Міжнародної науково-практичної конференції “Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення”, Т. 2 /УкрНДІЕП.-Х., Райдер, 2007.- С. 208-211.

9. Денисов Д.Г. Экспериментальное исследование процесса растворения гранулированного коагулянта.- “Вестник ИГЭУ”, Вып.2, 2008.- С.1 – 4.

## **ЗМІСТ**

Вступ

1. Математична модель міграції рухомих компонентів
2. Методика визначення геогідродинамічних параметрів
3. Оцінювання захисної здатності водоохоронних зон
4. Методика експериментальних досліджень
5. Міграція рухомих компонентів мінеральних добрив

Висновки