

# ГІДРОЛОГІЯ - ЕКОЛОГІЯ

УДК631.67:631.03

## УДОСКОНАЛЕННЯ КРИЗОВОГО МОНІТОРИНГУ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ

---

А.В. ГЕРУС

Інститут водних проблем і меліорації НААН

*Для вдосконалення кризового моніторингу запропоновано математичну модель поширення забруднюючих речовин у річках, що дозволяє проводити нормативно-пошукове прогнозування зміни якості вод у пунктах відбору при виникненні аварійних ситуацій.*

**Ключові слова:** поширення забруднень, якість поверхневих вод, нормативно-пошукове прогнозування, система різницевого рівнянь

**Постановка задачі.** Одним із видів спостереження за водними об'єктами є кризовий моніторинг [1], який здійснюється за кількісними та якісними параметрами цих об'єктів у зонах підвищеного ризику під час несанкціонованих чи аварійних викидів забруднень. З метою розроблення оперативних заходів щодо ліквідації їх наслідків та захисту населення, екосистем і власності необхідне вдосконалення кризового моніторингу на основі моделювання і прогнозування поширення забруднень у річках.

Особливо актуальним є розробка математичних моделей поширення забруднень у річках при аварійному прориві греблі, як це було в Стебнику в 1983 р., або при фільтрації в річковий потік забруднених ґрунтових вод. Нещодавно аварійна ситуація виникла в районі Домбровського кар'єру Калуш-Голинського родовища калійних солей [2]. За весь період експлуатації з кар'єру видобуто близько 35,4 млн м<sup>3</sup>

© А.В. Герус, 2014

Меліорація і водне господарство. 2014. Вип. 101

розкривних порід та 14,7 млн м<sup>3</sup> калійної руди. Останнім часом видобуток з кар'єру не проводиться, а поклади у ньому активно руйнуються карстовими процесами. Станом на грудень 2013р. заповнений простір становив вже 19,5 млн м<sup>3</sup> розсолів [3], незаповненим залишається близько 32,1 млн м<sup>3</sup> [2].

Основними факторами, що сприяють заповненню кар'єру, стало затоплення насосної станції у дренажній траншеї та прогресуючий розвиток карстових пустот.

Активізація карстово-суфозійних процесів суттєво зменшує геотехнічну стійкість порід у підґрунті тіла дамби, що може призвести до аварійного прориву в р. Лімниця.

Затоплення кар'єру та хвостосховищ активізує процеси забруднення ґрунтових вод, що є джерелом питних вод для навколишніх селищ Калуської гірничо-міської агломерації. Згідно з дослідженнями [2], площа засолення становить близько 1200 га, а швидкість пересування ореолу засолення в південному напрямку становить 200 м/рік. Загальна мінералізація вод у кар'єрі досягає 350 г/л [4], у межах ореолу змінюється від 1,8 г/л до 60 г/л. Існує загроза досягнення забруднень ґрунтових вод до р. Лімниця, фільтрації у річковий потік, а далі ширення до водозабору м. Калуш, що знаходиться на відстані біля 5 км від місця можливої аварії (рис. 1).



Рис. 1. Схема розташування об'єкта досліджень

Ставиться задача розробки адекватної моделі вдосконалення кризового моніторингу для нормативно-пошукового прогнозування наслідків впливу аварійного прориву греблі та аналізу впливу забруднених ґрунтових вод на якість води в р. Лімниця [5].

**Модель поширення забруднень.** На сьогодні відомо багато моделей, які дозволяють описати процеси переміщення забруднюючих речовин у водному середовищі. В цілому їх можна віднести до трьох

основних типів [6]. До першого типу відносять моделі, які враховують лише процеси розбавлення (В.А. Фролова, І.Д. Родзиллера, В.М. Макавєєва, А.В. Караушева та ін.). До другого типу відносять моделі, що враховують лише процеси самоочищення (нелінійні моделі Моно, Стрипера-Фелпса та ін.). Третім типом є такі моделі, що враховують як процеси розбавлення, так і процеси самоочищення (Доббінса-Кемпа, Бека-Янга, Томана та ін.). Останні вважаються найбільш точними, але вимагають високого рівня вхідних даних.

Враховуючи недосконалість проведення гідрологічних і гідрохімічних спостережень, а також недоліки системи кризового моніторингу, ставиться задача адекватного прогнозування та оцінювання впливу забруднюючих речовин у водному середовищі в разі виникнення аварійної ситуації. Нами було розроблено математичну модель поширення забруднюючих речовин, що базується на системі диференціальних рівнянь взаємодії забруднень у водному потоці із завислими наносами та донними відкладами [7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} a(x) \frac{\partial U}{\partial x} - V(x) \frac{\partial U}{\partial x} - \lambda(x)U + \mu_2(x)S + f(x, t); \\ \frac{\partial S}{\partial t} = \lambda(x)U - (\mu_1(x) + \mu_2(x))S; \\ \frac{\partial R}{\partial t} = \mu_1(x)S, \end{cases} \quad (1)$$

де  $U(x, t)$  – концентрація забруднюючої речовини у водотоці (мг/л);  $S(x, t)$  – концентрація забруднюючої речовини в завислих наносах (мг/л);  $V(x)$  – швидкість течії потоку, м/с;  $a(x)$  – коефіцієнт молекулярної або турбулентної дифузії;  $f(x, t)$  – функція джерела надходження забруднень у водний потік;  $R(x)$  – функція накопичення забруднюючих речовин у донних відкладах;  $\lambda(x)$  – коефіцієнт сорбції речовини, що знаходиться в потоці, у завислі наноси;  $\mu_1(x)$  – коефіцієнт сорбції в донні відклади;  $\mu_2(x)$  – коефіцієнт сорбції-десорбції в системі «вода-завислі наноси»;  $t$  – час;  $x$  – координата в напрямку руху. Функція джерела ( $f(x, t)$ ) є точковим джерелом скиду забруднюючих речовин в річку і має вигляд:

$$f(x, t) = \begin{cases} f(t), & \text{при } x = 0; \\ 0, & \text{при } x \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Систему диференціальних рівнянь (1) розв'язуємо методом скінченно-різницевої апроксимації. Інтегро-інтерполяційний метод [7]

дозволяє найбільш точно визначити значення балансу концентрацій та побудувати різницеву схему. Система одномірних різницевих рівнянь апроксимує неперервну задачу (1) з точністю  $O(|\Delta x|^2 + \tau)$  і має вигляд:

$$\begin{cases} U_i^{n+1} = U_i^n + \frac{\tau}{\Delta x} \left[ \left( a^2(x) \frac{U_{i+1}^n - U_i^n}{\Delta x} + VU_i^n \right) - \left( a^2(x) \frac{U_i^n - U_{i-1}^n}{\Delta x} - VU_{i-1}^n \right) \right] - \\ \quad - \tau \lambda U_i^n + \tau \mu_2 S_i^n \pm \tau f(x_i, t_n); \\ S_i^{n+1} = S_i^n + \tau \lambda U_i^n - \tau \mu_1(x) S_i^n + \tau \mu_2(x) S_i^n; \\ R_i^{n+1} = R_i^n + \tau \mu_1(x) S_i^n; \end{cases} \quad (3)$$

$$i = 0, 1, \dots, m; \quad n = 0, 1, \dots, N.$$

Крайові умови: при  $i = 0$  (вище входу забруднень у р. Лімницю)  $U_{\phi,0}^n = U_{\phi,0}^0, n = 0, 1, \dots, N$ ; початкові концентрації  $U_{\phi,i}^0 = U_{\phi,i}^0, i = 1, \dots, m$  задаються як фонові.

При змішуванні потоків концентрація забруднюючих речовин залежить від початкових значень забруднень у потоці, джерелі надходження (грунтових водах) та об'ємів, що змішуються. Отже, в зоні змішування концентрація розраховується за формулою:

$$U_1^{n+1} = \frac{U_{\phi}^n Q_1 \tau + U_3^n Q_2 \tau + (W - Q_1 \tau - Q_2 \tau) U_1^n}{W}, \quad (4)$$

де  $U_1^{n+1}$  – концентрація забруднень після змішування в першій комірці;  $U_{\phi}^n$  – концентрація забруднень у воді, що надходить до першої комірці з р. Лімниця (фонова концентрація);  $W$  – об'єм води в першій комірці;  $U_3^n$  – концентрація забруднень у ґрунтовій воді;  $U_3^n Q_2 \tau$  – об'єм ґрунтових вод, що потрапляє в першу комірку за час  $\tau$  (60с) з концентрацією  $U_3^n$ ;  $(W - Q_1 \tau - Q_2 \tau) U_1^n$  – об'єм води, що залишився в першій комірці в момент  $n$  з концентрацією  $U_1^n$ .

При поширенні сольових розчинів у річковому потоці вважаємо, що вони взаємодіють з завислими наносами, але не накопичуються в донних відкладах.

Результати сценарного моделювання. При проведенні імітаційного моделювання імітуються два сценарії надзвичайних ситуацій з потраплянням високомінералізованих вод у русло р. Лімниця.

За сценарієм 1 імітуються прорив борту кар'єру та залпового викиду забруднюючих речовин об'ємом  $1 \text{ млн м}^3$  з мінералізацією  $50 \text{ г/дм}^3$ . Згідно з проведеними розрахунками, при першому сценарії прориву греблі поле забруднень досягне водозабору м. Калуш через  $108 \text{ хв}$  з піковою концентрацією  $5 \text{ г/дм}^3$ . Пляма забруднюючих речовин

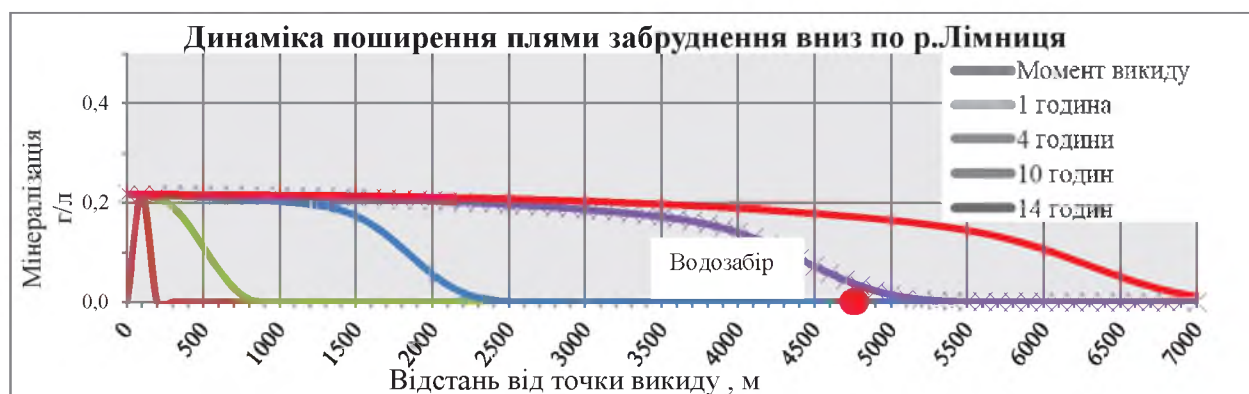
досягне р. Дністер через 15 годин з максимальною концентрацією 1,5 г/дм<sup>3</sup>, яка при змішуванні потоків річок знизиться до фоновій (рис. 2).



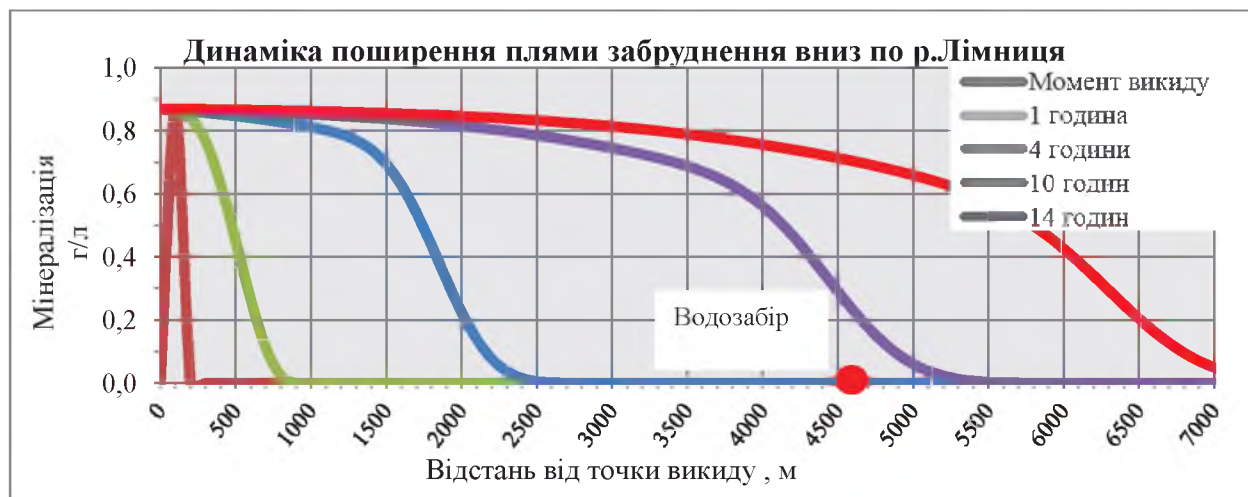
Рис. 2. Динаміка поширення мінералізації при залповому викиді

За сценарієм 2 імітується забруднення ґрунтовими водами концентрацією 10 г/дм<sup>3</sup> [2] з постійними витратами фільтруючих вод 0,5 м<sup>3</sup>/с та 2 м<sup>3</sup>/с на ділянці 100 м. Середня витрата річки 23 м<sup>3</sup>/с [8], середня швидкість течії приймається 1 м/с. Концентрація забруднюючих речовин в потоці р. Лімниця вище ділянки викиду забруднень рівна 0.

Нормативно-пошукове моделювання виявило встановлення режиму при заданих параметрах постійної швидкості ( $V = \text{const}$ ) та двох варіантів величини фільтрації з ґрунтових вод в р. Лімницю ( $Q_1, Q_2 = \text{const}$ ). Модель показує, що змішування потоків знижує мінералізацію до 0,217 г/дм<sup>3</sup> при витраті мінералізованих вод 0,5 м<sup>3</sup>/с та відповідно до 0,87 г/дм<sup>3</sup> (рис. 3 а) при фільтрації 2 м<sup>3</sup>/с (рис. 3 б).



а



б

Рис. 3. Динаміка поширення мінералізованих ґрунтових вод при постійній фільтрації: а) при  $Q_1 = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ; б) при  $Q_1 = 2 \text{ м}^3/\text{с}$

**Висновки.** Запропонована математична модель дозволяє в короткі терміни провести імітаційне моделювання різних сценаріїв поширення забруднень у результаті виникнення кризових ситуацій. Сценарне моделювання дозволяє прогнозувати динаміку поширення забруднюючих речовин у водному середовищі та прогнозувати якість води, що необхідно проводити в рамках кризового моніторингу. Використання запропонованої моделі з метою прийняття відповідних управлінських рішень для мінімізації негативних наслідків аварії дозволяє визначати оптимальні об'єми викидів забруднюючих речовин.

1. *Постанова КМУ № 815 від 20 липня 1996 року «Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод».*

2. *Матеріали виїзного засідання виконкому Ради ЗНЦ НАН України і МОН України. Режим доступу: [http://znc.com.ua/ukr/news/2013/201402\\_zasidannya.php](http://znc.com.ua/ukr/news/2013/201402_zasidannya.php)*

3. *Прогнозування екогідрогеохімічної ситуації при затопленні Домбровського кар'єру калійних руд / В.В Долін., Є.О. Яковлев, Е.Д. Кузьменко, Б.Т. Бараненко ; Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2010. – № 1. – С. 74–87.*

4. *Ковальчук П.І. Моделювання і прогнозування стану навколишнього середовища / Ковальчук П.І. – К.: Либідь, 2003. – 206с.*

5. *Головчак В.Ф. Стан гірничопромислових геокомплексів Калуш-Голинського родовища калійних солей та заходи для їх екологічної оптимізації / Головчак В.Ф. ; Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2010. – № 1. – С. 4–13.*

6. В.Б. Мокін Математичні моделі для контролю та управління якістю річкових вод / Мокін В.Б. ; Монографія. УІВЕРСУМ. – Вінниця 2005. – 172 с.

7. Ковальчук П.І. Математичне моделювання та прогнозування поширення забруднень в річках при аварійних ситуаціях / Ковальчук П.І., Герус А.В. ; Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2013. – № 1(7). – С. 119–123.

8. Русліві процеси річки Лімниця / О.Г. Ободовський, В.В. Онищук, В.В. Гребінь [та ін.]. – К.: Ніка-Центр, 2010. – 256 с.

*Для усовершенствования кризисного мониторинга предложена математическая модель распространения загрязняющих веществ в реках, которая позволяет проводить нормативно-поисковое прогнозирование изменения качества воды в пунктах отбора при возникновении аварийных ситуаций.*

*It is proposed a mathematical model of prevalence of pollutants in rivers to improve a crisis monitoring. The model allows making regulatory-searching forecasting the changes in water quality at the sampling points if a major emergency arises.*