

## МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІ НЕБЕЗПЕК ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ У РАЗІ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ СПОЛУКАМИ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

У статті проаналізовано причини виникнення небезпек, які призводять до техногенних надзвичайних ситуацій із забруднення ґрунтів сільськогосподарського призначення, поверхневих і підземних вод. Наведено наслідки для здоров'я населення у разі вживання води та продуктів із забруднених джерел. Запропоновано метод ідентифікації небезпек та прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій у разі забруднення ґрунту сполуками важких металів. Джерелом виникнення надзвичайних ситуацій можуть стати ділянки довготривалого зберігання відходів виробництва. Початкова необхідна умова формування поля математичної моделі – наявність у поверхневому шарі ґрунту хімічних сполук шкідливих елементів з концентрацією, яка перевищує граничнодопустиму, а також інформація про структуру ґрунту та його характеристики (коефіцієнт молекулярної дифузії, об'ємна вологість), та умови зберігання шламів на території підприємства. Реалізація методу дає змогу оцінити змінення в часі рівня засоленості ґрунтів та глибини проникнення хімічних сполук. Практичне використання методу дало змогу виявити головні небезпеки під час довготривалого зберігання відходів гальванічного виробництва на відкритих ділянках. Визначена динаміка збільшення рівнів засолення ґрунту та глибини проникнення важких металів за двадцять років зберігання, а також оцінена можливість потрапляння небезпечних сполук до ґрунтових вод. Наведено рекомендації щодо способів запобігання виникнення надзвичайних ситуацій та обґрунтовано потребу у впровадженні методів вторинної переробки відходів виробництва та покращення утилізації шкідливих відходів.

**Ключові слова:** виробничі відходи, математичне моделювання, глибина і рівень засоленості ґрунту.

**1. Вступ.** Проблеми забруднення ґрунтів та водних ресурсів є домінуючими в питаннях екологічної безпеки Європейського континенту [1]. Для обмеження поширення забруднення доквілля впроваджено рішення Ради національної безпеки та оборони України від 19 березня 2021 року «Про заходи щодо підвищення рівня хімічної безпеки на території України», уведеного в дію Указом Президента України від 19 березня 2021 року № 104/2021 [2]. В Україні щорічно накопичується велика кількість відходів (табл. 1) [3].

Таблиця 1. Щорічний обсяг відходів.

Рік	2010	2015	2017	2018	2019
Обсяг відходів, млн.т.	425,9	312,2	352,1	441,5	462,4

98,7 % відходів в Україні утворюється від економічної діяльності та лише 1,3 % від діяльності домогосподарств. Через сировинну орієнтацією економіки зафіксовано високу частку відходів від підприємств добувної промисловості (розкривних порід та продуктів збагачення корисних копалин – шламів, хвостів тощо), яка становить до 84,6 %. На інші види діяльності припадає 16,4%. Найбільша кількість відходів утворюється на підприємствах гірничої, металургійної, вугільної, машинобудівної, хімічної промисловості та енергетики.

Суттєвої екологічної шкоди зазнають ґрунти внаслідок їхнього забруднення рідкими та твердими викидами промислового виробництва. Зберігання твердих відходів часто відбувається в непорядкованих складах, без якісного упакування, на землях сільськогосподарського призначення. Забруднення поверхні ґрунтів призводить до низки проблем, пов'язаних із засоленням ґрунту [4], забрудненням ґрунтових вод та підвищенням рівня мінералізації води в поверхневих водоймах через потрапляння рідких відходів у водні ресурси. За результатами узагальненого державного обліку водокористування 2020 року у річки скинуто 5 159 млн. м<sup>3</sup> стічних вод: без очистки – 3215,7 млн. м<sup>3</sup> (62,3 %); нормативно-очищені – 1425 (27,7%); забруднені – 518 (10 %) [3]. Такі відходи є джерелом токсичних речовин та елементів, які потрапляють в атмосферу, ґрунти, поверхневі та підземні води, завдаючи їм непоправної шкоди. В Україні поверхневі води забруднено переважно нафтопродуктами, фенолами та важкими металами. Найбільш забруднені води реєструють у басейні Дніпра, у річках Рось, Горинь, Случ, Тетерів та інших, на берегах

яких розташовано великі промислові підприємства та міста. За результатами визначення хімічного стану поверхневих вод у 2020 році 84 % масивів відноситься до другого класу «недосягнення доброго» хімічного стану та 16 % масивів характеризуються першим класом «добрим» хімічним станом. Перелік забруднюючих речовин, які перевищують гранично-допустимі концентрації (ГДК) у річках, налічує більш як 60 найменувань. Найбільш поширені це нафтопродукти, органічні сполуки (ізодрину, бензо(к), флуорантену, цибутрину, хлороформу, ДДТ, дикофолу, пентахлорбензолу), солі важких металів (свинець, нікель, кадмій та ртуть, цинк, залізо, фосфор, хром, мідь) [3, 5]. Проблема техногенного забруднення з кожним роком зростає, що спричинено низьким рівнем впровадження технологій очищення та перероблення. Очевидно, що ситуація буде погіршуватися через військові дії.

В Україні розповсюджено використання підземних вод для господарсько-питного водопостачання та промислового використання. Загальний видобуток підземних питних (до 84 %) і технічних вод (до 12,4%) 2020 року становив 2 275,1 тис. м<sup>3</sup> за добу та відповідно 830,4 млн. м<sup>3</sup> за рік [3]. Ділянки забруднення міжпластових підземних вод розміщуються переважно в міських зонах, на території промислових підприємств. Концентрація та вміст шкідливих речовин зазвичай залежить від поверхневого комплексу утилізації та наявності невпорядкованих складів зберігання промислових відходів. Підземні води в основних осередках забруднені хлоридами, сульфатами, нітратами, аміаком, фенолами, нафтопродуктами, марганцем, свинцем, стронцієм у кількостях, що в окремих випадках у декілька раз перевищують ГДК.

**2. Постановка (актуальність) проблеми.** Щорічно в Україні реєструють надзвичайні ситуації (НС) техногенного характеру. За 10 років з 2011 до 2020 років зареєстровано 728 НС, п'ять відсотків яких спричинено забрудненням ґрунтів і водних ресурсів шкідливими та радіоактивними речовинами, концентрація яких перевищує ГДК [6]. Аналіз виникнення НС такого типу засвідчив, що збільшення кількості малотоннажних виробництв призводить до зростання кількості техногенних НС [7]. Першочергово така ситуація зумовлена комплексом чинників, пов'язаних з використанням технічно-застарілого та зношеного устаткування, а також недостатніми матеріальними ресурсами для впровадження маловідходних екологічно-безпечних технологій.

Особливу небезпеку становить накопичення в ґрунті та потрапляння до водних горизонтів «важких» металів. Головними джерелами «важких» металів є відходи підприємств металургії, машинобудування, приладобудування, електронної техніки, які не застосовують ефективні методи вторинної переробки.

До «важких» металів зазвичай відносять метали, питома щільність яких у п'ять разів перевищує щільність води (5 г / см<sup>3</sup>). Деякі з таких металів можуть бути корисними для людини (мідь, залізо, цинк), якщо не перевищують встановлених норм. Але вони стають токсичними, якщо їх хімічне видоутворення або концентрації перевищують допустимі значення [8]. Важкі метали, такі як миш'як (As), марганець (Mn), свинець (Pb), кадмій (Cd) і ртуть (Hg), мають сильну токсичність навіть за низьких концентрацій [9]. В умовах забруднення ґрунтів важкими металами овочі, які є в раціоні кожної людини, поглинають з ґрунту одночасно з корисними та токсичні елементи. Важкі метали (Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg) у великій кількості накопичуються в популярних овочах таких як *Solanum tuberosum* (картопель), *Solanum lycopersicum* (помідор), *Solanum melongena* (баклажан), *Chenopodium album* L. (лобода Біла), *Spinacia oleracea* (шпинат), *Coriandrum sativum* (коріандр) [10–13]. Водопостачання у всьому світі стикається з серйозними проблемами через підвищення концентрації важких металів [14, 15]. Особливу небезпеку становлять важкі метали, які потрапляють у джерела питної води та річки, де поглинаються фітопланктоном, і безпосередньо потрапляють в їжу людини [16]. Потрапляння важких металів до їжі створює серйозні проблеми для здоров'я населення та особливо для дітей, котрі вживають більше води та овочів на масу тіла, ніж дорослі [17]. Про потенційні ризики для здоров'я людини в результаті споживання забруднених овочів важкими металами наведено у [18–20].

Одним з основних джерел потрапляння важких металів у ґрунт є відходи від гальванічних цехів. Гальванічне виробництво належить до матеріаломістких, в якому обсяги сировини та допоміжних матеріалів у кілька разів перевищують вихід готової продукції. Як наслідок, у результаті виробництва утворюються відходи: електроліти та травильні розчини з солями важких металів. Під час змішування з водою у ході очищення виробів електроліти та травильні розчини потрапляють у стічні води [21]. Сухі відходи (шлам), які утворюються під час очищення стічних вод, містять речовини 2 і 3 класів небезпеки. Такі промислові відходи є основними джерелами надходження важких металів у навколишнє середовище через відсутність на більшості підприємств безпечних сховищ до їхнього зберігання. Довготривале складування відходів гальванічного виробництва дозволено на спеціальних майданчиках в обладнаних сховищах. Однак, як показує практика, штучні сховища мають обмежену місткість та терміни використання. Нині шлам часто зберігають на відкритих майданчиках із застосуванням захисних облицюваних матеріалів з глини, поліетилену, полівінілхлориду (ПВХ).

Тверді відходи під впливом опадів, особливо кислотних дощів, переходять у рідкий стан, що призводить до витоку хімічно-активних елементів в навколишнє середовище. Забруднення ґрунтів солями важких металів створює додаткову проблему через засоленість ґрунтів. Встановлено, що на слабо

солонцюватих ґрунтах врожай культур у середньому знижується до 25 %, на середньо солонцюватих – до 50 %, на сильно солонцюватих – до 75 %. Ґрунти за рівнем засолення, який перевищує 75 %, стають практично непридатні для рослин усіх видів [22]. Акумуляція солей в поверхневих шарах ґрунтів призводить до деградації рослинного покриву і є однією з причин загибелі зелених насаджень у місті [23]. Обводнені території, пухкі водопроникні ґрунти в Україні сприяють проникненню молекул важких у глибину ґрунту. В результаті виникають забруднення важкими металами не тільки прилеглих до місць складування ґрунтових покривів і поверхневих вод, а й підземних водних горизонтів [24].

НС, які спричинено виробничими відходами, виникають у разі засолення ґрунтів і потрапляння їх у поверхневі, ґрунтові або підземні води, які є джерелами питного водопостачання. У питній воді 2018 року зафіксовано перевищення ГДК заліза, міді, свинцю, марганцю, кадмію [5].

Забруднення ґрунтів, поверхневих і ґрунтових вод оцінюють різними математичними та фізико-хімічними методами. Оцінювання відбувається за одним чи групою параметрів, на підставі великих масивів експериментальних даних. Більшість методів, які використовують для визначення забруднення природних водних басейнів, потребують великих масивів експериментальних даних, витратних лабораторних випробувань, коштовного спеціального обладнання та спеціальних комп'ютерних пакетів програм [25, 26]. Процес попередження НС потребує дієвих методів прогнозування та завчасної ідентифікації небезпек. Враховуючи рівень небезпек для населення та суттєві матеріальні витрати, які пов'язані з ліквідацією наслідків техногенних НС, створення інженерно-технічних методів попередження НС екологічного характеру є актуальною проблемою та її розв'язання є важливим етапом з точки зору зменшення ризиків виникнення важких захворювань у дітей і дорослих, підвищення безпеки суспільства та довкілля.

**3. Мета та завдання.** Метою статті є розробка методу ідентифікації небезпек та прогнозування можливості виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру, яка спричинена поширенням у ґрунті сполук з важкими металами під час довготривалого зберігання гальванічного шламу на відкритих ділянках.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати експериментальні данні щодо якісного та кількісного складу шламу, які утворюються в цеху гальваніки під час виробництва печатних плат і мікросхем.

2. Розробити математичну модель процесу поширення у ґрунтах молекул важких металів, які призводять до засолення ґрунтів і забруднення водних горизонтів. На підставі моделі створити метод прогнозування небезпек виникнення НС.

3. Перевірити достовірність розробленої математичної моделі та методу.

4. Запропонувати пропозиції щодо впровадження отриманих результатів.

**4. Матеріал і результати досліджень.** Умовою виникнення НС першого типу є глибинне засолення ґрунту, НС другого типу є потрапляння молекул важких металів у водні горизонти. Моделювання процесу переміщення молекул важких металів у багат шарових ґрунтах передбачає кілька етапів. Початкова необхідна умова формування поля математичної моделі – наявність у поверхневому шарі ґрунту хімічних сполук важких металів з концентрацією, яка перевищує ГДК.

$$\rho_i(x_0, y_0, z_0, t) \geq \text{ГДК}_i \quad (1)$$

де  $\rho$  – концентрація хімічної сполуки, до складу якої входить елемент важкого металу;  $x_0, y_0, z_0$  – початкові координати джерела забруднення;  $t$  – тривалість переміщення молекул;  $i$  – хімічно-небезпечна сполука, яка досягла ГДК.

Переміщення важких металів відбувається в зоні аерації через водопроникні пори, які не заповнені водою. Зону аерації характеризують як фізично неоднорідну гетерогенну багатокомпонентну систему зі складними поверхнями розділу між окремими зонами з твердими мінералами та розчинами, які заповнюють пори та тріщини ґрунтів.

Нелінійна нестаціонарна модель базується на використанні теорії фізико-хімічної гідродинаміки пористих середовищ [27]. Рівняння міграції молекул важких металів розраховано на основі балансу їх маси. За неповного насичення порід концентрація сполуки в середовищі з порами залежить від вологості. Процес руху солей металів можна описати диференціальним рівнянням вертикального руху вертикального для перенесення маси речовини

$$D_m(\theta) \frac{d^2 c}{dx^2} = \theta \frac{dc}{dt} \quad (2)$$

де  $D_m(\theta)$  – коефіцієнт молекулярної дифузії,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $C$  – засоленість порід, %;  $\theta$  – об'ємна вологість, %;  $X$  – просторова координата, м;  $T$  – часова координата, с.

Аналітичне вирішення рівняння (2) має вигляд [28]:

$$C_{hx} = (C_{\Pi} - C_0) \operatorname{erfc} \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{h_x}{\sqrt{\frac{D_m(\theta) \cdot t}{\theta}}} \right], \quad (3)$$

де  $C_{hx}$  – прогнозний рівень засоленості на глибині  $h_x$ , %;  $C_{\Pi}$  – поверхнева засоленість зони аерації в точках поверхні  $(x_0, y_0, z_0)$  при  $h = 0$ ;  $C_0$  – початковий рівень засоленості в точках поверхні  $(x_0, y_0, z_0)$  ґрунту до

початку складування при  $t = 0$ ;  $h_x$  – відстань розрахункових точок від точок поверхні ( $x_0, y_0, z_0$ ), тобто від поверхні землі, м;  $t$  – термін прогнозного розрахунку, рік;  $\text{erfc}$  – табульована функція.

Коефіцієнт молекулярної дифузії  $D(\theta)$  є змінним параметром, характеризує переміщення молекул важких металів в ґрунті та залежить від властивостей молекул металів, температури та тиску, але головним чином визначається концентрацією речовини та вологістю [27].

Об'ємна вологість  $\theta$  визначається вмістом вологи у ґрунті та залежить від механічних властивостей ґрунту, пористості, капілярності, вмісту домішок

$$\theta = \frac{V_B}{V_{\text{ГР}}}, \quad (4)$$

де  $V_B$  – об'єм води в ґрунті;  $V_{\text{ГР}}$  – об'єм всього ґрунту з урахуванням води та газів.

Коефіцієнт молекулярної дифузії та об'ємна вологість залежать від сезону року та є імовірними параметрами. Для запропонованої нелінійної детермінованої моделі імовірні параметри в моделі характеризуються величинами математичного очікування.

Небезпека виникнення НС та оцінка можливих наслідків у моделі надані як додаткові граничні умови:

- НС, яка спричинена підвищенням рівня глибинного засолення ґрунту

$$C_x < q(C_x, t, h_x) < 0,35 \quad (5)$$

- НС, яка зумовлена потраплянням хімічно-небезпечної сполуки з важкими металами у ґрунті або підземні води

$$h_0 \leq q(C_x, t, h_x) \leq H \quad (6)$$

де  $h_x$  – глибина проникнення хімічно-небезпечних сполук у ґрунті;  $q(C_x, t)$  – показник, який у подальшому визначає характер поширення небезпеки засоленості ґрунту та відображає можливі наслідки;  $H$  – глибина залягання водоносного горизонту в межах території можливого поширення.

Показник  $q(C_x, t, h_x)$  для такого виду НС характеризує можливі наслідки з поширення хімічно-небезпечних речовин за ділянку зберігання

$$q(C_x, t) = q_n + q_{\text{пм}} + q_{\text{нм}} + q_l + q_c \quad (7)$$

де  $q_n$  – матеріальні витрати на нормалізацію умов життєдіяльності певної кількості осіб;  $q_{\text{пм}}$  – прямі матеріальні збитки від ліквідації аварії та виконання після аварійних заходів;  $q_{\text{нм}}$  – непрямі матеріальні збитки від ліквідації наслідків НС;  $q_l$  – витрати на лікування та оздоровлення постраждалих,  $q_c$  – негативні наслідки від засолення ґрунтів.

**4.1 Експериментальна інформація.** Верифікація запропонованого методу прогнозування виникнення НС під час зберігання шламу на відкритій ділянці здійснена на базі підприємства з виробництва печатних плат і мікросхем, яке розташовано в Черкаській області в передмісті міста Корсунь. На підприємстві використовують процеси «травлення міді», який дає можливість закріпити малюнки на поверхнях мікросхем. Оброблення окремих деталей супроводжується використанням великої кількості води, що спричиняє до утворення відходів. Відпрацьовані технологічні розчини хімічного та електрохімічного знежирення, а також лужні стічні води після каскадного промивання потрапляють у кислотні стоки. Відпрацьований електроліт лінії міднення частково скеровують на регенерацію розчину, який повторно використовують у технологічному процесі. На території підприємства, продуктивність якого коливається від 2 000 до 4 000 м<sup>2</sup> мікросхем і печатних плат, накопичується від 30 до 48 тон сухих відходів щорічно. У попередні роки шлам зберігали на території підприємства у звалищах на відкритих ділянках. Останні 20 років шлам зберігають у ПВХ-упакуваннях.

Джерелом виникнення НС можуть стати ділянки довготривалого зберігання шлам. Гальванічний шлам зберігають у формі пасти гідроксидів важких металів. Відповідно до наданої інформації шлам містить такі компоненти: мідь (Cu) – (12...16) %; кальцій (Ca) – (6...8) %; залізо (Fe) (8...10) %; хром (Cr), нікель (Ni), цинк (Zn) – до 2 %.

Небезпека НС першого типу виникає через засолення ґрунту, оскільки 69,6 % площі ґрунту в Черкаській області мають сільськогосподарське призначення. Під час зберігання шламів з розмірами часток (0,1...50) мкм, який містить солі важких металів, ґрунти засолюються і це призводить до відповідних негативних наслідків [29]. НС другого типу з більш негативними наслідками виникають через потрапляння важких металів до водних басейнів. Під впливом атмосферних опадів молекули важких металів, через легке розчинення у кислому середовищі, вимиваються та переходять у ґрунті води, а з часом у підземні води [30].

**4.2. Методи досліджень.** Відповідно до запропонованого методу, прогнозування глибини проникнення солей важких металів та рівнів засоленості ґрунту визначено за таких постановок задачі:

1. Складування та зберігання шламів на відкритій ділянці впродовж двадцяти років;
2. Складування шламів та зберігання в ПВХ упакуваннях на відкритій ділянці впродовж двадцяти років.

У ході прогнозування прийняті такі допущення: процес накопичення металів є кумулятивний; перенос солей відбувається в процесі вільного просочування та нормальної інфільтрації; коливання вологості ґрунту відбувається сезонно (зимово-весняний та літньо-осінній) [27]. За розрахунковий період

прийнято один рік (365 дів). Загальний час прогнозування становить 20 років. Процесів неусталеного руху вологи в ґрунтах під впливом випаровування не враховано.

#### 4.2.1. Складування шламу на відкритій ділянці без упакування

За першої постановки задачі прийнято такі вихідні показники:

- засоленість поверхні ґрунту до початку складування становить  $C_o = 0,15 \%$ ;
- рух молекул важких металів відбувається тільки у пористому середовищі;
- коефіцієнт молекулярної дифузії може змінюватися в інтервалі  $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{доба} \leq D_m \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{доба}$ ;
- об'ємна вологість з урахуванням сезонних коливань може змінюватися в інтервалі  $0,20 \leq \Theta \leq 0,27$ ;
- під час прогнозування глибини проникнення важких металів розрахункові точки вибрано з кроком 0,2 м від поверхні.

Зона аерації в передмісті Корсуні має таку структуру: поверхневий шар (трава) – 0,3 м; суглинок – (0,8...2,0) м; пісок – (0,5...0,8) м; глина – (0,8...1,1) м; ґрунтові води  $\leq 0,8$ м; глина  $\leq 1,2$  м; далі починається підземна вода. Відповідно до структури ґрунту на місці складування пори становлять до 40 відсотків об'єму ґрунтового шару. Приймаємо максимальне значення засоленості  $C_s = 40 \%$  на межі «повітря – поверхня ґрунту», що відповідає постійному шару шлаку в точках поверхні ( $x_0, y_0, z_0$ ). Наявність на поверхні ґрунту шламу з концентрацією, яка перевищує ГДК, відповідає граничній умові першого роду. Прогнозування з якісними та кількісними показниками реалізовано з використанням прикладного забезпечення Microsoft Excel.

Розрахунки за математичною моделлю (1) – (7) виконано після першого року складування зі змінними значеннями об'ємної вологості в межах  $0,20 \leq \Theta \leq 0,27$ . Максимальна глибина проникнення важких металів становила до 0,6 м (Рис. 1).

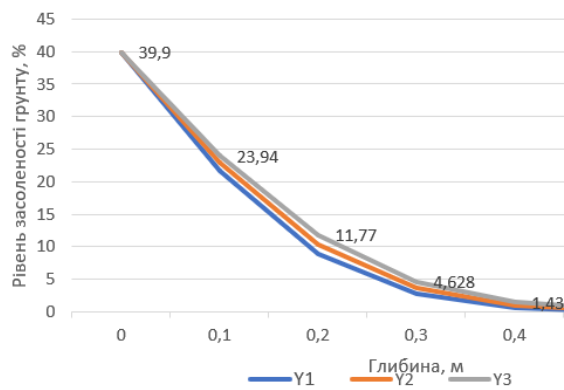


Рис. 1 – Змінення рівня засоленості ґрунту за глибиною після першого року зберігання за різних значень об'ємної вологості: Y1 – об'ємна вологості 0,20; Y2 – 0,23; Y3 – 0,27.

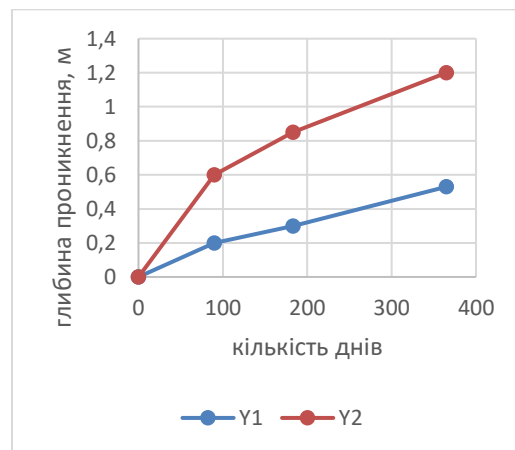


Рис. 2 – Залежність глибини проникнення молекул важких металів від часу впродовж першого року зберігання за різних значень коефіцієнту молекулярної дифузії: Y1 –  $D_m = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{доба}$ ; Y2 –  $D_m = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{доба}$

Як випливає з рис. 1, сезонні зміни об'ємної вологості не впливають суттєво на глибину проникнення важких металів і рівень засоленості ґрунтів. Через те в подальших розрахунках приймаємо середньорічне значення об'ємної вологості  $\Theta = 0,23$ .

Коефіцієнт молекулярної дифузії змінюється у широкому діапазоні залежно від сезону року. Розрахунки за наведеним алгоритмом виконано після першого року складування зі змінними значеннями коефіцієнту молекулярної дифузії  $1 \cdot 10^{-5} \leq D_m \leq 5 \cdot 10^{-5}$  (рис. 2).

Криві Y1, Y2 апроксимовано лінійними залежностями виду:

$$h_1 = 0,0014t + 0,0346; h_2 = 0,0031t + 0,0146.$$

Виходячи з положення, що вологопроникність ґрунтів не може змінюватися стрибкоподібно, визначено еквівалентне значення коефіцієнту молекулярної дифузії  $D_m = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{доба}$ , яке відповідає середній упродовж року швидкості проникнення молекул важких металів у ґрунт. За такого значення  $D_m$  зміна глибини проникнення має вигляд

$$h_3 = 0,0022t + 0,0102.$$

Поширення важких металів у глибину ґрунту призводить до його засолення. На рис. 3 наведено змінення за глибиною рівня засолення зони аерації після першого року складування шламу за різних значень коефіцієнту молекулярної дифузії.

Прогнозування глибини проникнення важких металів і рівня засоленості ґрунту у місяць зберігання в часі виконано за середніх значень об'ємної вологості  $\Theta = 0,23$  і коефіцієнту молекулярної дифузії  $D_m = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{доба}$  (рис. 4).

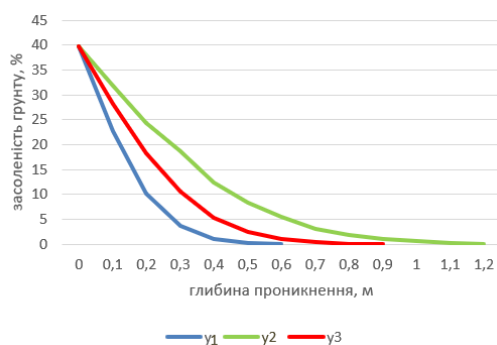


Рис. 3. Зміння рівня засоленості ґрунту за глибиною впродовж першого року зберігання за різних значень коефіцієнту молекулярної дифузії:  $Y1 - D_m = 1 \cdot 10^{-5}$ ;  $Y2 - D_m = 2,3 \cdot 10^{-5}$ ;  $Y3 - D_m = 5 \cdot 10^{-5}$ .

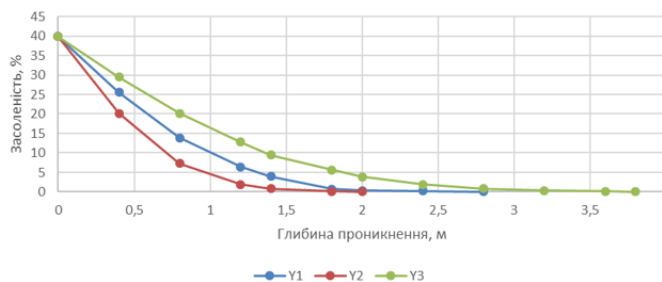


Рис. 4 – Зміння рівня засоленості ґрунту за глибиною впродовж двадцяти років зберігання:  $Y1$  – після п'ятого року зберігання;  $Y2$  – після десяти років зберігання;  $Y3$  – після двадцяти років зберігання.

Розрахунки дали змогу визначити щорічне збільшення глибини проникнення важких металів і показали, що вже після 5 років зберігання відбувається середнє засолення на глибині до 1 м, що може створити загрозу для виникнення НС першого типу, після (10...12) років зберігання може виникнути небезпека НС другого типу, яка спричинена потраплянням шкідливих речовин у ґрунтові води.

4.2.2. Складування шламів та зберігання в ПВХ упаковуваннях на відкритій ділянці впродовж двадцяти років.

За другої постановки задачі прогнозування глибини проникнення та рівнів засоленості за 20 років під час складування шламів в упакованні на відкритій ділянці має певні особливості. Потрібно враховувати зміння рівнів засоленості поверхні впродовж розрахункового періоду, тобто  $C_{s|h=0} \rightarrow \text{var}$ .

Зберігання шламу в упаковуваннях ПВХ призводить до поступового забруднення поверхневого шару. Це зумовлено псуванням упакувань, першочергово через руйнування з'єднувальних швів, які отримано у спосіб високочастотного зварювання. Шви під впливом механічних навантажень, зміння зовнішніх температур, ультрафіолетового опромінення та опадів розтріскуються, що призводить до утворення постійного шару шламу на ділянках для зберігання. Потрібно також враховувати, що гарантований термін використання такого виду упакувань не перевищує 10 років.

Аналітична залежність, яка описує процес засолення поверхневого шару ґрунту та трансформації хімічного складу води в елементах ґрунту залежно від часу зберігання шламу, має вигляд

$$\frac{dc}{dt} = C_0(\rho_i, x_0, y_0, z_0, t) \cdot K_1(\exp K_2 t), \quad (8)$$

де  $t$  – час зберігання шламу;  $\rho_i$  – ГДК  $i$ -тої шкідливої сполуки;  $K_1, K_2$  – константи швидкості процесу.

Попередня оцінка в лабораторних умовах швидкості руйнування упакувань ПВХ на відкритих і закритих ділянках дала можливість визначити зміння концентрації шламу на поверхні в часі, і побудувати аналітичну залежність швидкості засолення поверхні ґрунту (рис. 5).

$$C_{II} = C_0 \cdot \exp(K_2 \cdot t) = 0,15 \cdot \exp(275 \cdot t). \quad (9)$$

З рис. 5 випливає, що вплив атмосферних опадів суттєво впливає на процес руйнування упакувань. Можливо рекомендувати зберігання упакувань на відкритих ділянках під навісом (тентом), який забезпечує захист від опадів, вологості та вітру.

Довгостроковий прогноз забруднення ґрунтів під час зберігання шламу в ПВХ упакуванні на відкритій ділянці, отримано як результат ітераційного розрахунку за формулами (1 – 9), результати наведено на рис. 6. наведено зміння за глибиною рівня засолення за перші п'ять років, на рис. 7 – до 20 років зберігання

Як випливає з рис. 6, під час зберігання шламу в упакуванні ПВХ, рівень засоленості ґрунту несуттєво зменшується в перші п'ять років зберігання, однак повний захист ґрунту не забезпечено. Відповідно до діючих нормативних документів рівень засоленості, який перевищує 0,3%, становить вже небезпеку для довкілля. На рис. 7 наведено глибину ґрунту з рівнем засоленості в межах (0,3...0,344) % під час двадцятилітнього періоду зберігання шламу на відкритих ділянках.

Як випливає з рис. 6, 7, під час розміщення шламу на відкритій поверхні ґрунт товщиною 0,65 м упродовж одного року переходить у категорію слабозасолених, за п'ять років – глибина досягає 1,6 метрів, що становить небезпеку виникнення НС першого типу. У разі зберігання до десяти років глибина проникнення важких металів досягає 2,2 м, за п'ятнадцять років – 2,7 м, що може спричинити забруднення ґрунтових і підземних вод, і створює небезпеку виникнення НС другого типу. Під час збереження шламу в упакуванні процес забруднення відбувається повільніше. Однак, якщо тривалість зберігання перевищує п'ятнадцять років, відбувається процес деструкції полімерного упакувань та подальше зберігання призводить до забруднення підземних вод.

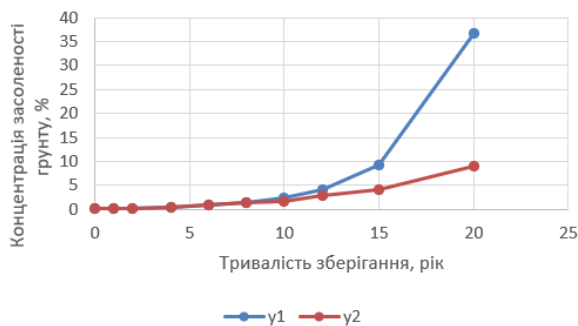


Рис. 5 – Змінення засолення поверхні  $C_{II}$  залежно від тривалості зберігання: Y1 – упакування розміщено на відкритій площадці; Y2 – упакування розміщено на закритій ділянці.

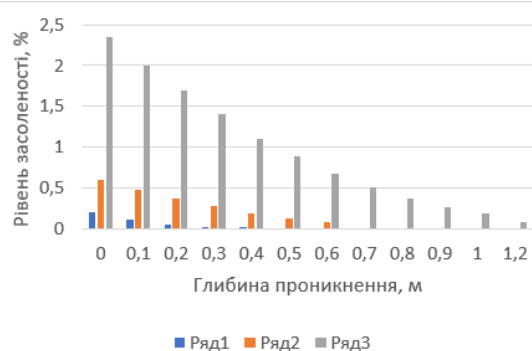


Рис. 6 – Змінення глибини проникнення важких металів залежно від тривалості зберігання: Ряд 1 – один рік зберігання; Ряд 2 – п'ять років зберігання; Ряд 3 – п'ятнадцять років зберігання.

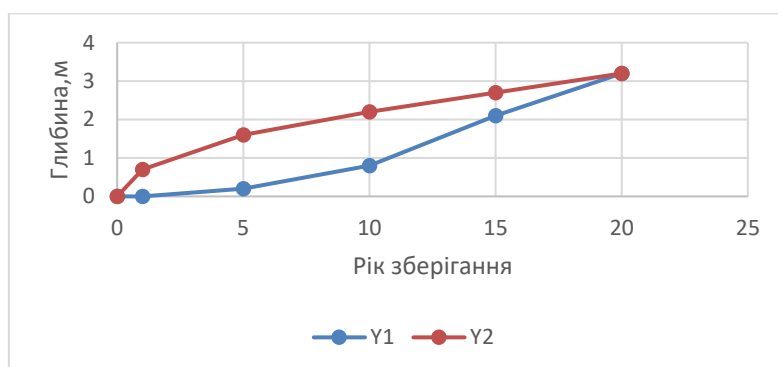


Рис. 7 – Глибина розповсюдження засоленості ґрунту в межах  $C_{IIX} = (0,31 \dots 0,346) \%$  за двадцятирічний період зберігання на відкритій ділянці: Y1 – зберігання шламу в ПВХ упакуванні; Y2 – зберігання шламу без упакувань

За результатами прогнозування можна стверджувати, що зберігання у звалищах на відкритих ділянках відходів гальванічного виробництва більш як 15 років призводить до суттєвого засолення ґрунту та створює умови до виникнення НС, яка зумовлена потраплянням шкідливих речовин у водні горизонти. Використання упакувань для збереження шламу доцільно у закритих сховищах, що дає можливість запобігти їх швидкому руйнуванню.

#### Висновки

У статті запропоновано метод ідентифікації небезпек та прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій у разі забруднення ґрунту сполуками важких металів. Аналіз літературних джерел засвідчив, що потрапляння важких металів у ґрунт призводить до негативних екологічних наслідків, які створюють небезпеки для населення та довкілля. Проникнення солей важких металів призводить до глибинного засолення ґрунту, втрати його родючості, до вторинного забруднення рослин, які повсюдно використовують в їжу, до забруднення поверхневих та глибинних шарів водних горизонтів, які часто використовують як джерела питної води. Важкі метали негативно впливають на здоров'я людей, підвищуючи ризики захворювання внутрішніх органів на рак.

Запропонований метод прогнозування надзвичайних ситуацій базується на математичній моделі, яка дає змогу оцінити глибину проникнення шкідливих сполук і рівні засоленості ґрунту в місцях зберігання шламу та прилеглих територіях. Як вихідні дані для моделі використано інформацію про концентрацію сполук, структуру ґрунту та його характеристики (пористість, поверхневий рівень засоленості, коефіцієнт молекулярної дифузії, об'ємна вологість), умови зберігання шламу на території підприємства.

Практичне використання запропонованого методу реалізовано для оцінки процесів забруднення ґрунту під час зберігання шламу гальванічного виробництва на відкритих ділянках. На підставі натурних досліджень на території підприємства з виготовлення мікросхем і печатних плат визначено, що у ході роботи ліній «травлення міді» накопичуються великі обсяги шламу, який містить: мідь, кальцій, залізо, хром, нікель, цинк. Шлам зберігають на території підприємства у звалищах на відкритих ділянках. Останні 20 років шламу зберігають у ПВХ упакуваннях.

За результатами розрахунків, які наведено в статті, встановлено:

- зберігання шламу на відкритих ділянках спричиняє два види небезпек: глибинне засолення ґрунту та забруднення підземних водних горизонтів важкими металами;
- під час розміщення та зберігання шламу на відкритій ділянці без упакувань упродовж п'яти років рівень засоленості 0,35 % досягає глибину 1,6 метрів, що становить небезпеку виникнення НС першого типу. Щорічно збільшення рівня засолення та глибини проникнення важких металів (від 0,5 м за перший рік до 2,4 м після двадцяти років зберігання) створює умови до виникнення НС другого типу, які зумовлені забрудненням водних горизонтів на глибині (2,6...3,0) м;
- використання ПВХ упакувань уповільнює процес забруднення, однак якщо термін зберігання перевищує 10 років, відбувається процес деструкції полімерного упакування та подальше зберігання призводить до НС першого та другого типу.

Впровадження ефективних методів очищення стічних вод, вторинної переробки шламу та досконалих умов зберігання відходів дає можливість запобігти забрудненню ґрунту, поверхневих і підземних вод. Створення умов до унеможливлення виникнення техногенних надзвичайних ситуацій дає можливість запобігти витрачання великих матеріальних і фінансових ресурсів, які потрібно скерувати на практичну реалізацію науково-технічних розробок щодо утилізації вторинного використання відходів промислових виробництв, а також на регенерацію та відновлення земельних та водних природних ресурсів.

#### Список використаної літератури

1. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*. L. 327, vol.43, 22.12.2000. 72 p.
2. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 19 березня 2021 року "Про заходи щодо підвищення рівня хімічної безпеки на території України". *Указ президента України № 104/2021*. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/1042021-37417>.
3. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2020 році. URL: <https://mepr.gov.ua/news/38840.html>
4. Польовий А.М., Гуцал А.І., Дронова О.О. Ґрунтознавство: підручник. Одеса: Екологія, 2013. 668 с.
5. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2018, 2019 році. URL: <https://mepr.gov.ua/news/38840.html>
6. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2019 році. 47 с. URL: <https://www.dsns.gov.ua/ua/Zvitni-materiali-Derzhavnoyi-sluzhbi-Ukrayini-z-nadzvichaynih-situaciy.html>
7. Лобойченко В.М. Розробка процедури ідентифікації факторів небезпеки на об'єктах малотонажного хімічного виробництва. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2019. № 2(30). С. 176-186.
8. Adamu C.I., Nganje T.N., Edet A. (2014). Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment Associated with Abandoned Barite Mines in Cross River State, Southeastern Nigeria. *Journal of Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2014. 3. P. 10-21.
9. Toxicological profile of lead. *The Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR)*. 2020. URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13.pdf> Toxicological Profile for Lead
10. Ali H. Khan E. Trophic Transfer, Bioaccumulation and Biomagnification of Non-Essential Hazardous Heavy Metals and Metalloids in Food Chains. *Concepts and Implications for Wildlife and Human Health. Human and Ecological Risk Assessment*. 2018. 25. P. 1353-1376. URL: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1469398>.
11. Chen Y., Yuan L., Xu C. The Accumulation Characteristics and Potential Health Risks of Heavy Metals in Vegetables from Reclaimed Area of China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2018. 24. P. 949-960. URL: <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1403281>.
12. Khan K., Khan H., Lu Y., Ihsanullah I., Nawab J. Evaluation of Toxicological Risk of Foodstuffs Contaminated with Heavy Metals in Swat, Pakistan. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014. 108. P. 224-232. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.05.014>
13. Корнелюк Н.М., Хоменко О.М. Особливості біоаккумуляції важких металів деревною рослинністю в зоні локальної дії Черкаської теплоелектроцентралі (на прикладі м. Черкаси). *Український екологічний журнал*. 2018. 8(1). С. 953-960. doi: 10.15421/2018\_298.
14. Ayantobo O.O., Awomeso J.A., Oluwasanya G.O., Bada B. S., Taiwo A. M. Non-Cancer Human Health Risk Assessment from Exposure to Heavy Metals in Surface and Groundwater in Igun-Ijesha, Southwest, Nigeria. *American Journal of Environmental Sciences*. 2014. 10, P. 301-311. URL: <https://doi.org/10.3844/ajessp.2014.301.311>.
15. Lemos D.H., Camargo C.A., Camargo M.A., Landgraf M.D. *Evaluation on the Concentration of Heavy Metals in Surface Waters in the Municipality of Pratápolis-MG*. *Open Access Library Journal* 2019. 6(5). P. 1-12. doi: [10.4236/oalib.1105427](https://doi.org/10.4236/oalib.1105427).



16. Al-Musharafi S.K., Mahmoud I. Y., Al-Bahry S. N. *Environmental Contamination by Industrial Effluents and Sludge Relative to Heavy Metals*. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2014. Vol. 2. No. 2. P. 22-28. doi: [10.4236/gep.2014.22003](https://doi.org/10.4236/gep.2014.22003).
17. *Children's health and the environment in Europe: a baseline assessment*. *European Environment and Health Information System (ENHIS)*. 2007. Fact Sheet No. 4.4. CODE. RPG4\_Food\_EXI, World Health Organization. URL: <http://worldcat.org/identities/lccn-n2008180852/>
18. Baseline Human Health Risk Assessment. *US Environmental Protection Agency (USEPA)*. 2001. Vasquez Boulevard and 1-70 Superfund Site, Denver. URL: <http://www.epa.gov/region8/superfund/sites/VB-170-Risk.pdf>
19. Zarazúa G., Girón-Romero K., Tejada S., Carreño-De León C., Ávila-Pérez P. *Total Reflection X-Ray Fluorescence Analysis of Toxic Metals in Fish Tissues*. *American Journal of Analytical Chemistry*. 2014. 5 (12). P. 806-811. doi: [10.4236/ajac.2014.512089](https://doi.org/10.4236/ajac.2014.512089)
20. Rumana S., Nazimah M., Bader-Un-Nisa. *Vulnerability of Sunflower Germination and Metal Translocation under Heavy Metals Contamination*. *American Journal of Plant Sciences*. 2019. Vol. 10, No. 5, doi: [10.4236/ajps.2019.105054](https://doi.org/10.4236/ajps.2019.105054).
21. Nester A.A., Nikitin O.O., Romanishina O.V., Mitiuk L.O., Polukarov Yu.O. Achieving environmental security with economic impact. *Journal of Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 6. C. 115-120 URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506170646>
22. Zhongchen H., Jianwu Li, Hailong W., Zhengqian Ye, Xudong W., Yongfu Li, Dan L., Zhaoliang S. *Soil Contamination with Heavy Metals and Its Impact on Food Security in China*. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2019. Vol. 7. No. 5. doi: [10.4236/gep.2019.75015](https://doi.org/10.4236/gep.2019.75015)
23. Мислюк О.О., Хоменко О.М., Єгорова О.В. Екологічна оцінка кислотно-основних властивостей ґрунтоземів м. Черкаси. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2019. Вип. 4 (117). С. 53-59. doi: [10.30929/1995-0519.2019.4.53-59](https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.4.53-59)
24. Насирова Н. К., Мухамедов К. Г., Муталов Ш. А., Мухамедов Ж. К. Утилизации шламов гальванического производства. *Universum: технические науки*. 2021, 12 (93). URL: [https://7universum.com/pdf/tech/12\(93\)%2015.12.2021/Nasirova1.pdf](https://7universum.com/pdf/tech/12(93)%2015.12.2021/Nasirova1.pdf)
25. Tretiakova L., Mitiuk L. Prediction of soil salinity from galvanic sludge. *Actual Problems of Renewable Power Engineering, Construction and Environmental Engineering: IV International Scientific-Technical Conference*, 6-8 February 2020, Kielce (Poland, Ukraine, Croatia, Slovakia, Sweden, USA): Book of Abstracts. Kielce, Politechnika Świętokrzyska, 2020. P. 150-153. URL: [https://books.google.com.ua/books/about/Actual\\_Problems\\_of\\_Renewable\\_Power\\_Engin.html?id=Mc94zQEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/Actual_Problems_of_Renewable_Power_Engin.html?id=Mc94zQEACAAJ&redir_esc=y)
26. Лобойченко В.М. Формування методики ідентифікації передумов поширення надзвичайних ситуацій унаслідок накопичення шкідливих речовин на хімічних об'єктах. *Комунальне господарство міст*. 2020. 1(154). С. 298-305. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10924>
27. Шевченко О.Л., Бублясь В.М., Коломієць С.С. Основи перенесення вологи в зоні аерації: навч. посібник. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2014. 270 с. URL: [www.geol.univ.kiev.ua > lib > moisture\\_transfer](http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/moisture_transfer)
28. Nester A.A., Tretiakova L., Mitiuk L., Prakhovnik N., Husiev A. Remediation of Soil Containing Sludge Generated by Printed Circuit Board Production and Electroplating. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*. 2020. Vol. 76. No. 4. P. 68-75. doi: [10.5755/j01.erem.76.4.25460](https://doi.org/10.5755/j01.erem.76.4.25460)
29. Балюк С. А., Дрозд О. М. Оцінювання продукційних екосистемних послуг засоленних і солонцюватих ґрунтів півдня України. *Вісник аграрної науки*. 2019. №1. С. 60-67. URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201901-09> [http://agrovisnyk.com/pdf/ua\\_2019\\_01\\_09.pdf](http://agrovisnyk.com/pdf/ua_2019_01_09.pdf) 55.
30. Tretiakova L., Mitiuk L., Panasiuk I., Rebuell E. Mathematical model building for predicting the dissemination of hazardous substances in the soil. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2022. N. 1 (38). P. 12-22. doi: [10.21303/2461-4262.2022.002231](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002231)

I. Panasiuk Dr. Eng. Sc., Prof. ORCID 0000-0001-6671-4266

Kyiv National University of Technologies and Design

L. Tretiakova, Dr. Eng. Sc., Prof. ORCID 0000-0001-5244-746X

L. Mitiuk, Cand. Sc., Assis. Prof. ORCID 0000 0003 4914 2387

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

#### METHOD OF IDENTIFYING HAZARDS AND PREDICTING THE EMERGENCY SITUATIONS IN CASE OF SOIL CONTAMINATION BY HEAVY METAL COMPOUNDS

**Purpose.** The goal of the article is to develop a method for identifying hazards and predicting the possibility of a technogenic emergency caused by the spread of compounds with heavy metals in the soil during long-term storage of galvanic sludge in open areas.

**Methodology.** The method is developed on the basis of a mathematical model that allows estimating changes in the depth of distribution and level of soil salinity over time using initial information about soil structure and its characteristics (molecular diffusion coefficient, volume humidity), annual volumes and conditions of sludge storage in the enterprise. Restrictions are set: the presence of harmful substances on the soil surface with a concentration that exceeds the permissible level; inadmissibility of harmful substances to aquifers.

**Results.** The practical use of the method made it possible to identify the main dangers and predict the possibility of an emergency situation with negative environmental consequences during long-term storage of galvanic waste in open areas. The dynamics of soil salinity levels and the depth of penetration of heavy metals increase over twenty years of conservation has been determined, as well as the possibility of hazardous compounds entering groundwater has been assessed.

**Originality.** The non-linear, non-stationary mathematical model is based on the theory of physico-chemical hydrodynamics of cellular media. The process of motion of metal salts has been described by the differential equation of motion and conservation of mass of matter for vertical mass transfer of matter.

**Practical value.** Formalization of information about the hazards arising during the storage of industrial waste with chemically active elements allows to consider the subject area as a complex dynamic system consisting of objects of different nature, the totality of which determines the level of danger of emergencies with environmental consequences. The developed method makes it possible to transfer the obtained results to decision-making support systems, predicting possible consequences and material costs associated with post-emergency measures, motivating the management to take measures in advance.

**Keywords:** industrial waste, mathematical modelling, depth and level of soil salinity.

#### References

1. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*. L. 327, vol.43, 22.12.2000. 72 p.
2. On Decision of the National Security and Defence Council of Ukraine of 19 March 2021 "On Measures to Improve Chemical Safety on the Territory of Ukraine". *Decree of the President of Ukraine* № 104/2021. [Online]. Available: <https://www.president.gov.ua/documents/1042021-37417>.
3. National report on the state of the environment in Ukraine in 2020. [Online]. Available: <https://mepr.gov.ua/news/38840.html>
4. Polevoy A.M., Gutsal A.I., Dronova O.A. *Soil Science: textbook*. Odessa: Ecology, 2013.
5. National report on the state of the environment in Ukraine in 2018, 2019. [Online]. Available: <https://mepr.gov.ua/news/38840.html>
6. Report on the main results of the State Emergency Service of Ukraine in 2019. [Online]. Available: <https://www.dsns.gov.ua/ua/Zvitni-materiali-Derzhavnoyi-sluzhbi-Ukrayini-z-nadzvichaynih-situacij.html>
7. Loboichenko, V. Development of a hazard identification procedure for low-tonnage chemical production facilities. *Problems of emergencies*, No 2(30), pp. 176-186, 2019.
8. Adamu C.I., Nganje T.N., Edet A. (2014). Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment Associated with Abandoned Barite Mines in Cross River State, Southeastern Nigeria. *Journal of Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 3, pp. 10-21, 2014
9. Toxicological Profile for Lead. *The Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR)*. 2020. [Online]. Available: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13.pdf>
10. Ali H. Khan E. Trophic Transfer, Bioaccumulation and Biomagnification of Non-Essential Hazardous Heavy Metals and Metalloids in Food Chains. *Concepts and Implications for Wildlife and Human Health. Human and Ecological Risk Assessment*, 25, pp. 1353-1376, 2018. URL: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1469398>.
11. Chen Y., Yuan L., Xu C. The Accumulation Characteristics and Potential Health Risks of Heavy Metals in Vegetables from Reclaimed Area of China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24, pp. 949-960, 2018. URL: <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1403281>.
12. Khan K., Khan H., Lu Y., Ihsanullah I., Nawab J. Evaluation of Toxicological Risk of Foodstuffs Contaminated with Heavy Metals in Swat, Pakistan. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 108, pp. 224-232, 2014. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.05.014>
13. Kornelyuk N.M., Khomenko O.M. Bioaccumulation of heavy metals by the urban trees around Cherkassy thermal power plant. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), pp. 953-960, 2018. doi: 10.15421/2018\_298.
14. Ayantobo O.O., Awomeso J.A., Oluwasanya G.O., Bada B. S., Taiwo A. M. Non-Cancer Human Health Risk Assessment from Exposure to Heavy Metals in Surface and Groundwater in Igun-Ijesha, Southwest, Nigeria. *American Journal of Environmental Sciences*, 10, pp. 301-311, 2014. URL: <https://doi.org/10.3844/ajessp.2014.301.311>.
15. Lemos D.H., Camargo C.A., Camargo M.A., Landgraf M.D. *Evaluation on the Concentration of Heavy Metals in Surface Waters in the Municipality of Pratápolis-MG*. *Open Access Library Journal*, 6(5), pp. 1-12. 2019. doi: [10.4236/oalib.1105427](https://doi.org/10.4236/oalib.1105427).

16. Al-Musharafi S.K., Mahmoud I. Y., Al-Bahry S. N. [Environmental Contamination by Industrial Effluents and Sludge Relative to Heavy Metals](#). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol. 2, No. 2, pp. 22-28, 2014. doi: [10.4236/gep.2014.22003](#).
17. [Children's health and the environment in Europe: a baseline assessment](#). *European Environment and Health Information System (ENHIS)*. 2007. Fact Sheet No. 4.4. CODE. RPG4\_Food\_EXI, World Health Organization. [Online]. Available: <http://worldcat.org/identities/lccn-n2008180852/>
18. Baseline Human Health Risk Assessment. *US Environmental Protection Agency (USEPA)*. 2001. Vasquez Boulevard and 1-70 Superfund Site, Denver. [Online]. Available: <http://www.epa.gov/region8/superfund/sites/VB-170-Risk.pdf>
19. Zarazúa G., Girón-Romero K., Tejada S., Carreño-De León C., Ávila-Pérez P. [Total Reflection X-Ray Fluorescence Analysis of Toxic Metals in Fish Tissues](#). *American Journal of Analytical Chemistry*, 5 (12), pp. 806–811, 2014. doi: [10.4236/ajac.2014.512089](#)
20. Rumana S., Nazimah M., Bader-Un-Nisa. [Vulnerability of Sunflower Germination and Metal Translocation under Heavy Metals Contamination](#). *American Journal of Plant Sciences*, Vol. 10, No. 5, 2019. doi: [10.4236/ajps.2019.105054](#).
21. Nester A.A., Nikitin O.O., Romanishina O.V., Mitiuk L.O., Polukarov Yu.O. Achieving environmental security with economic impact. *Journal of Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No 6. pp. 115–120, 2020. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506170646>
22. Zhongchen H., Jianwu Li, Hailong W., Zhengqian Ye, Xudong W., Yongfu Li, Dan L., Zhaoliang S. [Soil Contamination with Heavy Metals and Its Impact on Food Security in China](#). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol. 7, No. 5, 2019. doi: [10.4236/gep.2019.75015](#)
23. Myslyuk O., Khomenko O., Yehorova O. Ecological assessment for the acid-base properties of urban soils in cherkasy city. *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyyi State Polytechnic University*, Vol. 4 (117), pp. 53-59, 2019. doi: [10.30929/1995-0519.2019.4.53-59](#)
24. Nasirova N. K., Mukhamedov K. G., Mutalov Sh. A., Mukhamedov J. K. Electroplating sludge utilization. *Universum: technical sciences*, 12 (93), 2021. URL: [https://7universum.com/pdf/tech/12\(93\)%20\[15.12.2021\]/Nasirova1.pdf](https://7universum.com/pdf/tech/12(93)%20[15.12.2021]/Nasirova1.pdf)
25. Tretiakova L., Mitiuk L. Prediction of soil salinity from galvanic sludge. *Actual Problems of Renewable Power Engineering, Construction and Environmental Engineering: IV International Scientific-Technical Conference*, 6-8 February 2020, Kielce (Poland, Ukraine, Croatia, Slovakia, Sweden, USA): Book of Abstracts. Kielce, Politechnika Świętokrzyska, pp. 150-153, 2020. [Online]. Available: [https://books.google.com.ua/books/about/Actual\\_Problems\\_of\\_Renewable\\_Power\\_Engin.html?id=Mc94zQEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/Actual_Problems_of_Renewable_Power_Engin.html?id=Mc94zQEACAAJ&redir_esc=y)
26. Loboichenko V. Methodology for identifying prerequisites for the expansion of emergencies resulting from the accumulation of hazardous substances in chemical facilities. *Urban Public Utilities*, 1(154), pp. 298-30, 2020. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10924>
27. Shevchenko O.L., Bubljas V.M., Kolomiets S.S. Bases of transference of moisture are in the zone of suspend water. Kyiv: A Publishing-polydiene center is the "Kyiv university", 2014. URL: [https://www.geol.univ.kiev.ua/lib/moisture\\_transfer](https://www.geol.univ.kiev.ua/lib/moisture_transfer).
28. Nester A.A., Tretiakova L., Mitiuk L., Prakhovnik N., Husiev A. Remediation of Soil Containing Sludge Generated by Printed Circuit Board Production and Electroplating. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, Vol. 76, No. 4, pp. 68–75, 2020. doi: [10.5755/j01.arem.76.4.25460](#)
29. Baliuk S.A., Drozd O.M. Assessment of production eco-system services of the salted and solonetzic soils of South of Ukraine. *Visnik agrarnoyi nauki*, 1, pp. 60–67, 2019. doi.org/10.31073/agrovisnyk201901-09
30. Tretiakova L., Mitiuk L., Panasiuk I., Rebuél E. Mathematical model building for predicting the dissemination of hazardous substances in the soil. *EUREKA: Physics and Engineering*, No. 1 (38), pp. 12-22, 2022. doi: [10.21303/2461-4262.2022.002231](#)

Надійшла 31.07.2022  
Received 31.07.2022