

## МЕТОД ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ ГАЛИЦЬКОГО РАЙОНУ НА БАЗІ ТЕОРІЇ НЕЙРОМЕРЕЖ

<sup>1</sup>М.І.Горбійчук, <sup>1</sup>М.А.Шуфнарівич, <sup>2</sup>О.В.Пендеревський

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504521  
e-mail: gorb@nung.edu.ua

<sup>2</sup>Відкритий міжнародний університет розвитку людини "Україна", Івано-Франківська філія,  
76010, м. Івано-Франківськ, вул. Набережна ім. В. Стефаника, 15-а,  
тел. (0342) 583014, e-mail: pov@il.if.ua

*Разработан метод математического моделирования загрязнения почвы на основе теории нейронных сетей. Метод опробован на фактическом материале, полученном вследствие геохимических исследований загрязненной территории Галицкого района. В результате математического моделирования разработан алгоритм определения граничных допустимых концентраций элементов в почве для любой территории*

*The method of mathematical modeling of pollution of ground on the basis of the neural networks theory is developed. The method is tested on an actual material received owing to geochemical researches of Halych area territory. As a result of mathematical modeling the algorithm of definition of boundary allowable concentration of elements in ground for any territory is developed*

У своїй діяльності людина активно змінює середовище свого існування, наслідком чого є виникнення техносфери. Техносфера – це все те, що людина створила на Землі за сотні тисячоліть своєї діяльності: народногосподарський комплекс із заводами та фабриками, транспортними артеріями і водосховищами, мільйонами гектарів розораних земель. Це також мільярди тон твердих промислових і побутових відходів, сотні мільйонів кубометрів забруднених скидів у ріки та моря, небезпечних викидів у повітря. Це - теплове, шумове, радіаційне, електромагнітне забруднення навколишнього середовища. Одним словом, – це все те, що створено людиною і що тепер повернулося проти неї, її здоров'я, її спадковості, її життя та існування як біологічного виду на Землі.

Щоб визначити екологічний стан тієї чи іншої природно-техногенної системи, спрогнозувати її подальший розвиток, запобігти негативним наслідкам її впливу на людей – необхідно вивчити динаміку природних змін всіх зазначених компонентів та вплив на них антропогенних чинників.

Одним із способів вирішення поставлених проблем є математичне моделювання екологічної ситуації тієї чи іншої території. Як приклад такого моделювання було обрано Галицький район Івано-Франківської області.

Площу близько 722 км<sup>2</sup> було розбито мережею із 220 точок спостереження, які більш-менш рівномірно охоплюють весь полігон. Робочий масштаб польових досліджень – 1:50000. Географічні координати і абсолютні висоти (альтитуди) точок спостережень визначені з допомогою ГІС MAP INFO з топографічної карти масштабу 1:100 000.

Виходячи з особливостей геологічної будови, геоморфології, розповсюдження ґрунтів різних типів, ландшафтної структури території та існуючих вимог до масштабу досліджень,

було розроблено мережу екологічного моніторингу, яка включає 12 профілів і 220 геоecологічних полігонів – точок спостережень [1], де відбирались проби на різні аналізи (рис. 1).

Організація маршрутів здійснювалась за двома способами: паралельних маршрутів та петель [2]. Спосіб паралельних маршрутів застосовувався для картування ландшафтно-екологічних зон, які в досліджуваному районі мають північно-західне – південно-східне простягання. І тому маршрути проходили з південного сходу (ПдСх) на північний захід (ПнЗх) і навпаки – з південного заходу (ПдЗх) на північний схід (ПнСх). Маршрути були приурочені до стежок, просік у лісі, польових меж та інших ліній на карті. Точки спостережень та відбору проб на різні аналізи були розташовані на лінійях маршрутів через 100-500 м.

Спосіб петель (радіально-петлевий) полягав у тому, що територія досліджень ділилася на окремі ділянки, які вивчалися в радіальних та кругових напрямках. Спосіб петель дає змогу детально обстежити ландшафтні виділи складної форми, оконтурити вплив джерел забруднення на деградацію геологічного середовища, ґрунтового та рослинного покривів.

Таким чином, з допомогою маршрутів було більш-менш рівномірно вивчено всю територію досліджуваного полігону в межах Галицького району.

На території Галицького району розвинутий природний та техногенно трансформований ґрунтовий покрив. Хоча ґрунт і має деякі особливості біологічного самоочищення – розщеплює і мінералізує відходи, які в нього потрапили, однак механізм такого самоочищення внаслідок його перевантаження (фізичного, хімічного, механічного) порушується, що призводить до деградації. Але найгірше ґрунти справляються з токсичними хімічними елементами: Hg, As, Cu, Pb, F, Mn та іншими, які накопичу-

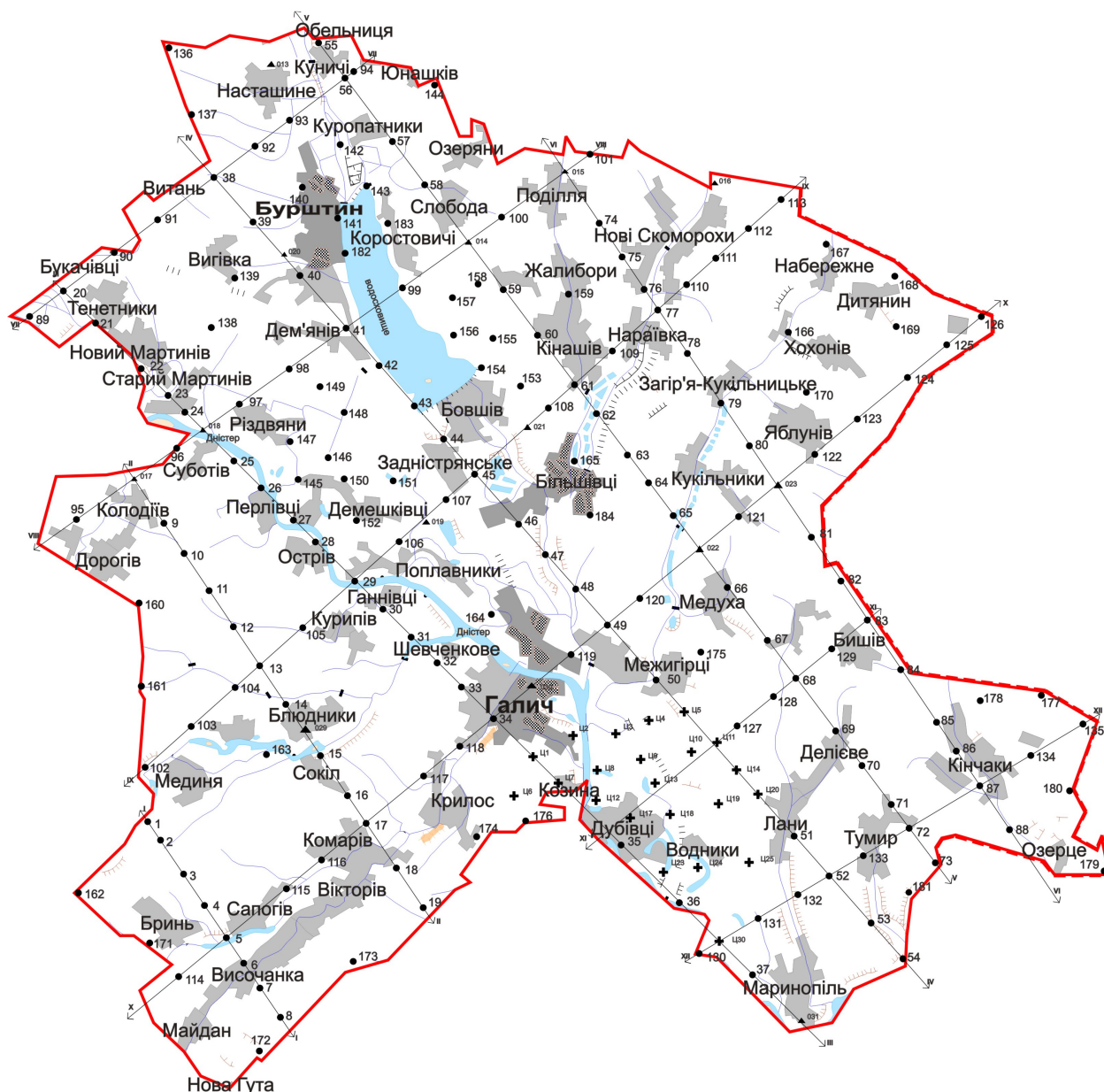


Рисунок 1 — Карта фактичного матеріалу

ються поблизу промислових джерел викидів, а також поступово розповсюджуються по площі всього ґрунтового покриву.

Методику математичного моделювання екологічного стану Галицького району розглянемо на прикладі вмісту свинцю (Pb) у ґрунті. Метою математичного моделювання було знаходження залежності між концентрацією Pb і координатами відбору відповідних проб

$$C_{Pb} = f(X, Y), \quad (1)$$

де:  $C_{Pb}$  – концентрація свинцю у ґрунті,  $mg/kg$ ;  $X$  і  $Y$  – координати точок відбору проб (рис. 1).

Аналіз різних способів апроксимації залежності (1) засвідчив, що найбільшої уваги заслуговує спосіб функціонального наближення до  $f(X, Y)$  за допомогою нейромереж.

Загалом сформовану задачу можна звести до реалізації деякого складного функціонального багатомірного перетворення [3]. В результаті відображення  $(X, Y) \rightarrow C_{Pb}$  необхідно забезпечити формування адекватного вихідного сигналу у відповідності із всіма прикладами навчальної вибірки і зі всіма можливими вхідними сигналами, які не ввійшли до навчальної вибірки. Друга умова значно ускладнює формування навчальної вибірки. В загальному випадку ця задача не розв'язана, але в кожному конкретному випадку можна знайти її часткове вирішення.

В основі розв'язку задачі функціонального наближення лежить теорема Хехт-Нільсена, яка доводить можливість апроксимації експериментальних даних функцією багатьох змінних достатньо загального вигляду за допомогою двохшарової нейромережі з прямими повними зв'язками. Така мережа має  $n$  нейронів у вхідному

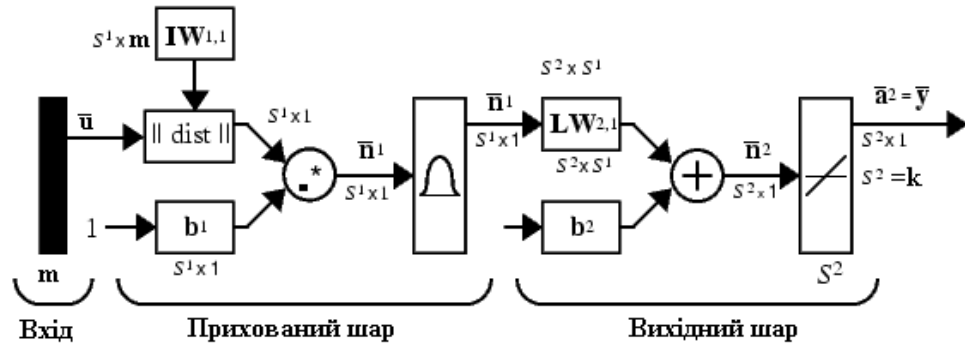


Рисунок 2 — Радіальна нейромережа для апроксимації залежності (1)

шарі,  $2n+1$  нейрон в прихованому шарі з наперед відомими функціями активації (наприклад, сигмоїдальними) і  $m$  нейронів у вихідному шарі з невідомими функціями активації.

Ця теорема є неконструктивною, оскільки вона визначає тільки представлення будь-якої багатовимірної функції кількох змінних за допомогою нейромережі фіксованого розміру. Невідомими залишаються характеристики функції активації прихованого шару та вид функції активації нейронів вихідного шару.

На практиці вимоги теореми Хехт-Нільсена до функцій активації задовольняють так. В нейронах прихованого шару використовують сигмоїдальні функції, а для нейронів вихідного шару вибирають лінійні функції активації. В процесі навчання індивідуально для кожного нейрона визначають його параметри.

Одною із проблем, що може виникнути під час навчання нейромережі, є неприйняття. Суть цієї проблеми полягає в тому, що мережа може бути досить добре навчена на навчальній послідовності, тобто середньоквадратичне відхилення між виходом мережі і експериментальними даними має дуже мале значення, але коли представлені нові дані, що не входять до навчальної послідовності, похибка стає великою. Одним із способів усунення неприйняття є збільшення розмірності нейромережі, інший – регуляризація мережі [4]. Дослідження свідчать, що регуляризація значно зменшує несприйнятливості мережі, але при цьому зростають затрати часу на її навчання.

З точки зору усунення несприйнятливості більш ефективними є радіальні мережі [5], які, на відміну від мереж зі зворотним поширенням, вимагають більшої кількості нейронів.

Основою радіальних мереж є функція *radbas* (Radial Basis Neuron)

$$radbas(n) = \exp(-n^2). \quad (2)$$

Сигнал  $n$  є добутком величини  $w\bar{x}^T$  на мережевий зсув, де  $w = [w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1k}]$  – матриця-рядок ваг нейрона;  $\bar{x}$  – вектор-рядок значень вхідних величин  $x_i$ . Отже,

$$n = radbas(\|w\bar{x}\| \cdot b), \quad (3)$$

де  $\|w\bar{x}\|$  – функція ваги віддалі між векторами  $w$  і  $\bar{x}$  та позначається як *dist*.

Функція *radbas*( $n$ ) має одиницю, коли її вхід – нуль, тобто нейрон працює як детектор, що видає одиницю щоразу, як тільки вектори  $w^j$  і  $\bar{x}$  ортогональні.

Радіальна мережа для апроксимації результатів моніторингу зображена на рис. 2. Вона складається із двох шарів – прихованого і вихідного. Виходом прихованого шару є величина  $\bar{a}^{(1)}$ , яка генерується функцією *radbas*

$$\bar{a}^{(1)} = radbas\left(\|IW^{(1,1)} \cdot \bar{u}\| \cdot \bar{b}^{(1)}\right), \quad (4)$$

де через  $\|\cdot\|$  позначено функцію *dist*. Вектор зміщення  $\bar{b}^{(1)}$  і вихід *dist* поелементно перемножуються, так що на виході першого шару отримуємо вектор  $\bar{a}^{(1)}$ .

На виході другого шару (вихідного) як функцію активації взято лінійну функцію – *purelin*( $\bar{n}^{(2)}$ ) (у термінах середовища MatLab), тобто

$$\bar{y} = purelin\left(LW^{(2,1)}\bar{a}^{(1)} + b^{(2)}\right). \quad (5)$$

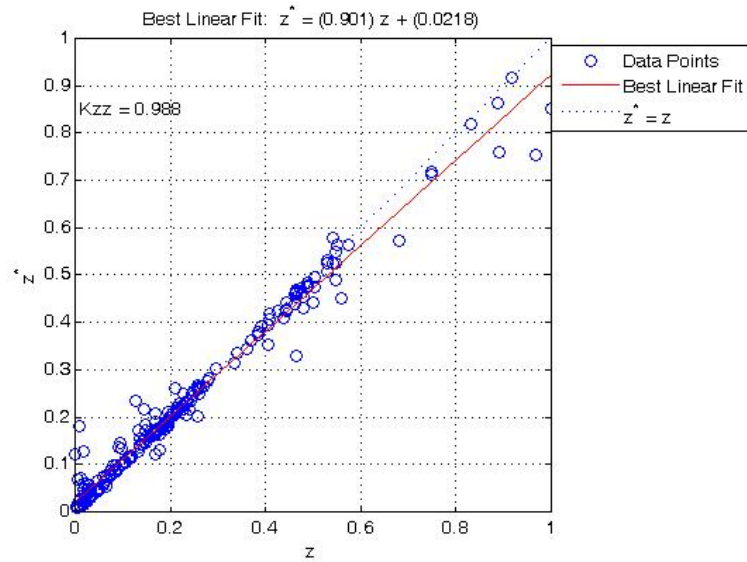
На рис. 2 прийняті такі позначення:  $IW_{1,1}$  – матриця вхідного шару нейромережі;  $LW_{i,i-1}$  – матриця шару, де  $i$ -номер шару, а  $i-1$  – номер векторного входу для  $i$ -го шару;  $s^1, s^2$  – розмірності відповідних векторів (матриць).

Рисунок 3 відображає результати апроксимації залежності (1) за допомогою радіальної нейромережі. На вхід мережі подавались координати точок відбору проб, які були приведені до безрозмірних величин, за такими формулами

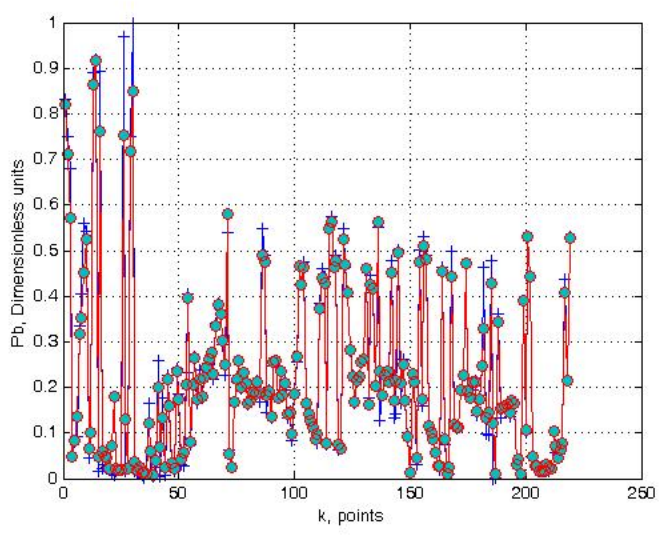
$$x_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}, \quad (6)$$

$$y_i = \frac{Y_i - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}}, \quad (7)$$

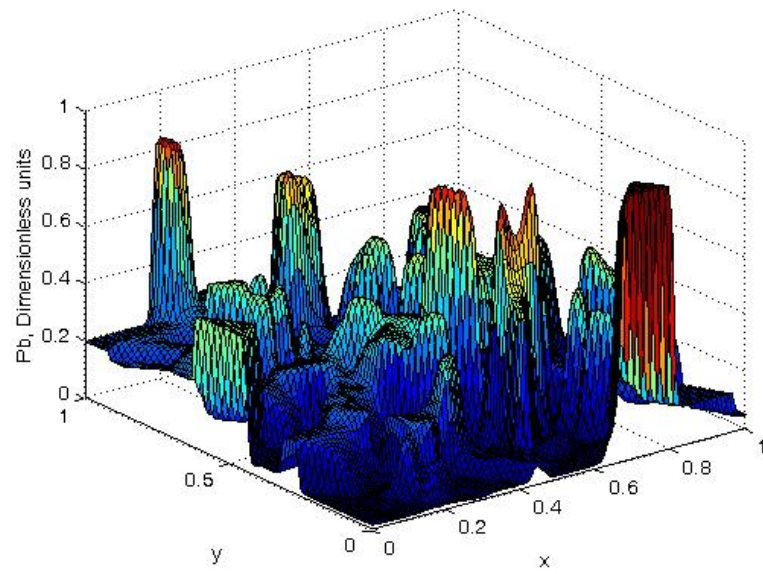
де:  $x_i, y_i$  – координати  $i$ -тої проби,  $i = \overline{1, N}$ ;  $X_{min}, Y_{min}$  – мінімальні значення координат  $X_i$  та  $Y_i$ ;



a)



b)



в)

**Рисунок 3 — Результати математичного моделювання вмісту свинцю у ґрунтах Галицького району**

$X_{max}$ ,  $Y_{max}$  – максимальні значення координат  $X$  та  $Y$ ;

$N$  – кількість проб відбору.

Як навчальна послідовність використовувались значення концентрацій свинцю у ґрунті  $C_{Pb}^{(i)}$ , які визначались за результатами аналізу проб з координатами  $X$ ,  $Y$ . Величини  $C_{Pb}^{(i)}$ , також були приведені до безрозмірного вигляду

$$z_i = \frac{C_{Pb}^{(i)} - C_{Pb}^{(min)}}{C_{Pb}^{(max)} - C_{Pb}^{(min)}}. \quad (8)$$

Останнім етапом побудови моделі є перевірка її на адекватність, суть якої є перевірка отриманої моделі на придатність для розв'язку задачі за кінцевим результатом. Як критерій адекватності використано коефіцієнт кореляції [6]

$$K_{zz} = \frac{\sum_{i=1}^N z_i^* z_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (z_i^*)^2 \sum_{i=1}^N z_i^2}},$$

де  $z_i^*$  – отримані за моделлю і дійсні значення концентрацій свинцю (у відносних одиницях) в  $i$ -тій точці.

Граничне значення коефіцієнта кореляції, коли  $z_i = z_i^*$  дорівнює одиниці (рис. 3, а). Для випадку, який розглядається  $K_{zz} = 0,988$ , що свідчить про високий ступінь збіжності експериментальних значень  $z_i$  до значень  $z_i^*$ , які отримані у відповідності з моделлю (рис. 3, б). Зміна концентрації свинцю (у відносних одиницях) як функції координат  $x$ ,  $y$  зображена на рис. 3, в, із якого видно, що просторова поверхня має яскраво виражені піки, а це свідчить про неоднорідність розподілу свинцю у ґрунтах Галицького району.

Склад ґрунту конкретної місцевості вміщує велику кількість елементів, які до певних концентрацій не є шкідливими для людини, а навіть корисними, необхідними. Середній вміст елементів у земній корі називають кларком. Їх значення розраховані для кожного хімічного елемента земної кори [7]. Але у кожному регіоні у залежності від геологічної будови, типу ґрунтів, географічної зональності та інших чинників будуть свої, характерні тільки для цього району, середні вмісти того чи іншого елемента. Такий середній вміст створює регіональний фон елемента. Для свинцю кларк  $C_{Pb}^{(k)} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ мг/кг}$ ; фон свинцю для ґрунтів Галицького району  $C_{Pb}^{(\phi)} = 16,3 \text{ мг/кг}$ . Знаючи  $C_{Pb}^{(k)}$  і  $C_{Pb}^{(\phi)}$ , можна визначити аномальний вміст свинцю  $C_{Pb}^{(a)}$ , для будь-якої місцевості Галицького району

$$C_{Pb}^{(a)} = C_{Pb}^{(i)} - C_{Pb}^{(\cdot)} - C_{Pb}^{(\phi)}. \quad (9)$$

У формулу (9) входить невідома величина  $C_{Pb}^{(i)}$  – вміст свинцю у ґрунті для даної території. Визначивши за картою місцевості координати певної ділянки за формулами (6) і (7), обчислюємо їх безрозмірні значення. Потім за допомогою навченої радіальної нейромережі знаходимо значення концентрації свинцю  $z_i^*$  у безрозмірних одиницях. Використавши формулу (8), визначаємо

$$C_{Pb}^{(i)} = C_{Pb}^{(min)} + z_i^* (C_{Pb}^{(max)} - C_{Pb}^{(min)}).$$

Розроблену методику можна використати для визначення аномального вмісту у ґрунтах і інших елементів, таких як Hg, As, Cu, F, Mn.

Таким чином, тільки ті концентрації елементів, які перевищують сумарне значення фону і кларку, можуть бути аномальними, а значить і шкідливими для нормального функціонування геоекосистем. Якщо аномальний вміст того чи іншого елемента у досліджуваному районі перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК), то цей елемент є токсичним, тобто шкідливим для здоров'я людини.

### Література

- 1 Пендерецький О. В. Екологія Галицького району: Монографія. – Івано-Франківськ: Нова зоря, 2004. – 198 с.
- 2 Адаменко О. М., Рудько Г. І. Екологічна геологія. – К.: Манускрипт, 1998. – 349 с.
- 3 Горбань А.Н., Дунин-Барковский В.Л., Кидрин А.Н. и др. Нейроинформатика – Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 296 с.
- 4 Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
- 5 Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
- 6 Ивахненко А.Г., Коппа Ю.В., Степашко В.С. и др. Справочник по типовым программам моделирования / Под ред. А.Г.Ивахненко. – К.: Техника, 1980. – 184 с.
- 7 Виноградов А.П. Среднее содержание элементов в земной коре // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555-557.