

**І.В. СУРОВЦЕВ**, д-р техн. наук, ст. науковий співробітник, Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України, просп. Академіка Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна, [dep175@irtc.org.ua](mailto:dep175@irtc.org.ua); [igorsur52@gmail.com](mailto:igorsur52@gmail.com)

**О.В. БАБАК**, канд. тех. наук, ст. науковий співробітник, Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України, просп. Академіка Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна, [dep175@irtc.org.ua](mailto:dep175@irtc.org.ua); [babak@irtc.org.ua](mailto:babak@irtc.org.ua)

**В.М. ГАЛІМОВА**, канд. хіміч. наук, в.о. доцента, Національний університет біоресурсів та природокористування України (НУБтаП України), вул. Героїв Оборони, 17, корпус № 2, 16, 18, Київ, 03041, Україна, [galimova2201@gmail.com](mailto:galimova2201@gmail.com)

## **МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ СТУПЕНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ ҐРУНТІВ ПРИ ТОЧНОМУ ЗЕМЛЕРОБСТВІ**

*Створено методи грубого і тонкого оцінювання стану області ґрунту забрудненої важкими металами при точному землеробстві. Для грубого оцінювання розроблена конструкція узагальненого параметра, що враховує всі фактори забруднення. При тонкому оцінюванні ступеня забруднення розроблено принцип побудови математичної моделі об'єкта і кваліметричної шкали.*

**Ключові слова:** *точне землеробство, важкі метали, оцінювання, узагальнений параметр, індекс забруднення, математична модель, кваліметрична шкала.*

### **Вступ**

Точне землеробство являє собою новий етап у розвитку прецизійних технологій виробництва сільськогосподарської продукції [1]. У зв'язку з цим цілком природним є прагнення впровадити передові інформаційні технології в існуюче землеробство і цим сприяти підвищенню врожайності, а також екологічній безпеці продуктів сільського господарства в широкому сенсі цього слова. Однією з проблем, що супроводжують технічний прогрес, є зростаюче забруднення ґрунтів важкими металами (ВМ), особливо в промислових районах Донбасу, Дніпропетровської та Запорізької областей.

Очевидно, що зондування ґрунтів великих площ сільськогосподарських угідь на забруднення ВМ набуває першочергового значення. Попри все це поряд з класифікацією забруднених ділянок ґрунту [2] виникає супутня задача оцінювання ступеня їх забруднення. Важливість її вирішення пов'язана з оптимізацією фінансових витрат на детоксикацію землі, яка передбачає проведення недешевих агротехнічних та агрохімічних заходів.

По суті задачею оцінювання забруднення ділянок ґрунту є оцінка якості об'єктів, що характеризуються деяким числом параметрів, значення яких носять випадковий характер. При великому числі об'єктів, що досліджують-

ся, підхід до вирішення зазначеної задачі є достатньо відомий. Він визначається створенням певної кваліметричної психофізичної шкали бажаності, побудованої на основі експонентної функції бажаності Харрінгтона [3].

Оскільки принцип створення такої функції дуже близький до запису стандартного закону нормального розподілу, то є можливість ефективного застосування його на практиці. А саме, ця функція придатна для оцінки якості порівняно великого числа об'єктів різної природи не тільки технічної (масова продукція), а наприклад, і медико-біологічної [4] та ін. І це природно, тому що з теорії ймовірності випливає, що розподіл суми великого числа незалежних випадкових величин близький до нормального. Однак це означає, що будувати методи оцінювання забруднення ділянок ґрунту ВМ за цим принципом неперспективно, оскільки зазвичай число таких ділянок є незначне і вимірюється не сотнями і тисячами, а десятками. Реалізація зазначеного підходу оцінювання якості об'єктів була б неможлива без запропонованої Харрінгтоном так званої узагальненої функції бажаності або, іншими словами, узагальненого інформаційного показника, що являє собою середнє геометричне від різних інформаційних показників (характеристик) об'єкта.

В основі цієї пропозиції лежить плідна ідея перетворення властивостей об'єкта, отриманих в різних одиницях виміру, в безрозмірну шкалу. Ця ідея використана, наприклад, при побудові узагальненого параметра оптимізації [5]. У запропонованій статті вона отримала свій розвиток у вигляді індексу забруднення об'єкта ВМ, що дало змогу запропонувати два методи грубого оцінювання якості об'єктів, а також більш тонкий метод оцінювання якості об'єктів на основі побудови математичної моделі. Розроблено також принцип побудови кваліметричної психофізичної шкали, яка подібна таблиці Харрінгтона.

## Постановка задачі

Розробити методи грубого оцінювання забруднення ВМ ділянки ґрунту, використовуючи

інтегральний показник забруднення. Створити метод оцінювання якості на основі математичної моделі забрудненого ВМ об'єкта та розробити принцип побудови кваліметричної шкали, що подібна шкалі Харрінгтона.

## Розв'язання задачі

*Перший метод.* Нехай при наземному зондуванні область ґрунту, забрудненого  $N$  металами, поділена на  $l$  ділянок  $x_{ij}$ . Зауважимо, що геометрична форма ділянок в загальному випадку залежить від рельєфу і принципового значення не має. В результаті комп'ютерного експерименту отримана вибірка  $x_{ij}$  випадкових значень концентрацій на  $i$  ділянці для  $j$  металу, фрагмент якої відображено в табл. 1

$$x_{ij}, \quad i = \overline{1, l}, \quad j = \overline{1, N}, \quad (1)$$

де  $l = 10$ ,  $N = 4$ .

Відповідно, кожне значення індексу  $j$  має своє фізико-хімічне пояснення, а саме:  $x_{j1}$  — свинець (Pb),  $x_{j2}$  — кадмій (Cd),  $x_{j3}$  — мідь (Cu),  $x_{j4}$  — цинк (Zn). Всі значення  $x_{ij}$  нормовані за величиною гранично допустимої концентрації кожного із  $j$  металів.

Введемо поняття «індексу забруднення ділянки» у вигляді узагальненого параметра

$$P_{ij} = \sqrt[l]{\prod_{j=1}^N x_{ij}}, \quad i = \overline{1, l}. \quad (2)$$

У нашому випадку

$$P_{ij} = \sqrt[4]{\prod_{j=1}^4 x_{ij}}. \quad (3)$$

Встановимо  $P_{ij}$  у відповідність з найпростішим стандартом шкали, який містить тільки два значення: 1 — незабруднена ділянка, 0 — забруднена ділянка. Для цього виберемо деякий критерій концентрації  $C_k$ , який у нашому випадку має значення  $C_k = 0,8$  [2]. Відразу зауважимо, що це значення може бути іншим в залежності від характеру поставленої задачі дослідження (1).

Тоді, при  $x_{ij} < C_k$  — незабруднена ділянка, а при  $x_{ij} \geq C_k$  — забруднена ділянка. Відповідно до обраної шкали у першому випадку всі  $x_{ij}$  в формулі (2) і (3) мають значення 1, а в другому — хоча б один з них дорівнює 0. У табл. 1,

згідно графі P1 об'єкти 2, 7, 1 — незабруднені, а всі решта — забруднені.

Для оцінки у процентному співвідношенні всієї області за кількістю забруднених ділянок  $l_1$  індекс забруднення дорівнює

$$P = \frac{100l_1}{\ell} \%.$$

Цілком очевидно, що такий підхід є занадто грубим і придатним лише для попередньої оцінки забруднення земельної ділянки.

*Другий метод.* Менш грубим є підхід, коли на досліджуваній ділянці відомі значення концентрації кожного ВМ, які є «ідеальними»  $x_{0j}$ . При цьому в якості метрики, що задає близькість до  $x_{0j}$ , зручно застосувати величину  $(x_{ij} - x_{0j})$ . Використаємо поняття «індекс забруднення ділянки», який в даному випадку приймає вигляд

$$P_i = \sum_{j=1}^N \left( \frac{x_{ij} - x_{0j}}{x_{0j}} \right)^2, i = \overline{1, \ell}. \quad (4)$$

Якщо для деякої ділянки має місце ситуація, коли  $x_{ij} = x_{0j}$ , то значення  $P_i$  стане рівним нулю. Таким чином, чим менше  $P_i$  тим краще, тобто до цього треба прагнути. Однак слід звернути увагу на те, що у формулі (4) всі значення  $x_{ij}$  вважаються рівноправними і ця обставина є недоліком. Особливо це проявляється при оцінці ступеня забруднення ділянок ґрунту, коли ВМ з точки зору екологічної безпеки да-

леко нерівноправні. Тому формулу (4) слід інформаційно посилити введенням в неї вагового показника  $k_j > 0$

$$P_i = \sum_{j=1}^N k_j \left( \frac{x_{ij} - x_{0j}}{x_{0j}} \right)^2, i = \overline{1, \ell}. \quad (5)$$

Тут

$$\sum_{j=1}^N k_j = 1. \quad (6)$$

У спрощеному випадку  $k_j$  можна ранжувати за ступенем токсичності або за атомною вагою ВМ. Однак, коли це стосується біології, медицини та інших областей, потрібно скористатися послугами експертів.

Для прикладу, в табл. 1 наведено розрахунок індексу забруднення ділянки P2:

$$x_{i1} = 0,356 (Pb), x_{i2} = 0,630 (Cd), \\ x_{i3} = 0,579 (Cu), x_{i4} = 0,469 (Zn).$$

З огляду на значення атомної ваги (Pb = 207, Cd = 112, Zn = 65, Cu = 63) встановимо вагові коефіцієнти (6). Відповідно:  $k_1 = 0,46$ ,  $k_2 = 0,25$ ,  $k_3 = 0,15$ ,  $k_4 = 0,14$ . Беручи  $x_{02} = 0,5$  згідно з виразом (5), знаходимо  $P_2 \approx 0,06$ . Таким чином, визначивши  $P_i$  ( $i = 10$ ) і упорядкувавши значення, можна оцінити ступінь забруднення всіх ділянок (див. табл. 1, графа P2). Отже, найбільш забрудненою є ділянка 20 ( $P20 = 0,61$ ).

*Третій метод.* Для більш тонкого вирішення задачі оцінювання ступеня забруднення ділян-

Таблиця 1. Фрагмент даних комп'ютерного експерименту

Код	Найменування	Pb-Свинець	Cd - Кадмій	Cu-Мідь	Zn-Цинк	P1	P2	M	L
23	Об'єкт_23	0,316	0,820	0,375	0,479	0	0,24	4,6	3
2	Об'єкт_2	0,356	0,630	0,579	0,469	1	0,06	4,0	4
8	Об'єкт_8	0,496	0,910	0,139	0,593	0	0,23	5,9	3
3	Об'єкт_3	0,866	0,370	0,660	0,100	0	0,01	5,2	3
7	Об'єкт_7	0,708	0,290	0,700	0,761	1	0,26	4,2	4
1	Об'єкт_1	0,322	0,750	0,724	0,244	1	0,25	4,3	4
20	Об'єкт_20	0,954	0,550	0,142	0,955	0	0,61	6,4	3
5	Об'єкт_5	0,513	0,360	0,801	0,943	0	0,19	4,6	3
28	Об'єкт_28	0,931	0,550	0,338	0,766	0	0,40	6,0	3
10	Об'єкт_10	0,804	0,300	0,972	0,135	0	0,41	4,6	3

Таблиця 2. Значення лінгвістичних оцінок

№	$x_{\max 1}$	$x_{\max 2}$	$x_0^k$	$x_1^k$	$x_2^k$	$P_i$	$M_i$	Лінгвістичні оцінки (L)
1	1	0,9	+1	+1	+1	0,95	8,82	погано (2)
2	0,2	0,9	+1	-1	+1	0,42	3,9	добре (4)
3	1	0,3	+1	+1	-1	0,55	5	задовільно (3)
4	0,2	0,3	+1	-1	-1	0,25	2,32	відмінно (5)

ки ґрунту ВМ спробуємо розробити її математичну модель. При цьому в якості незалежних змінних приймаємо значення концентрації ВМ.

Вважаємо, що рішенням задачі може служити лінійна модель

$$y = \sum_{j=0}^N b_j x_j, \quad (7)$$

де  $b_j$  — коефіцієнти моделі, а  $y$  — залежна змінна, сенс якої буде розкрито далі.

Будемо шукати значення невідомих коефіцієнтів (7) шляхом обробки методом найменших квадратів деякої системи лінійних рівнянь, що має в матричній формі вигляд

$$Y = XB. \quad (8)$$

Причому для спрощення розрахунків підставимо  $X$  у вигляді ортогональної матриці, де елементи її приймають кодовані значення  $\pm 1$ . Зауважимо, що по суті  $X$  являє собою матрицю планування повного факторного експерименту [5]  $m = 2^N$  ( $m$  — число дослідів,  $N$  — число факторів).

Рішення системи (8) знаходимо у вигляді наступної формули

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y,$$

де  $T$  — знак транспонування матриці  $X$ .

В результаті рішення, при ортогональності  $X$ , співвідношення для визначення коефіцієнтів регресії будуть наступними

$$b_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} y_i, \quad ij = m. \quad (9)$$

Нагадаємо, що в (9)  $x_{ij} = \pm 1$ . Причому  $x_{ij}$  приймає знак (+) або (-) в залежності від положення в матриці  $X$ .

З огляду на вказані теоретичні передумови, розглянемо питання побудови методу по суті. Як вже розглядалося у вступі, число забруднених ділянок зазвичай порівняно мале, тому

шкалу бажаності на основі закону нормального розподілу не будують.

У даному випадку шкала бажаності у першому наближенні може бути описана прямою, рівняння якої має вигляд  $y = kx$ . При цьому, на осі абсцис розташовуються деякі вузлові значення узагальненого параметра  $P_i(2)$ , а на осі ординат — цифрова оцінка  $M_i$ .

Принцип реалізації запропонованого методу оцінювання якості забруднення об'єкта  $i$ , відповідно, побудови психофізичної таблиці, розглянемо тільки для двох ВМ —  $Pb$  і  $Cd$ . Природно, що подібним чином цей підхід можна використати і при створенні методу оцінювання для більшого числа ВМ.

Із даних комп'ютерного експеримента випливає, що  $x_{\max 1} \approx 1$ ,  $x_{\min 1} \approx 0,2$  і  $x_{\max 2} \approx 0,9$ ,  $x_{\min 2} \approx 0,3$  (в кодованому вигляді  $x_{\max 1}^k = 1$ ,  $x_{\min 1}^k = -1$  і  $x_{\max 2}^k = 1$ ,  $x_{\min 2}^k = -1$ ).

Зведемо в табл. 2 всі можливі сполучення  $x$  в кодованому та некодованому вигляді і визначимо значення узагальненого параметра відповідно до співвідношення (2)

$$P_i = \sqrt[2]{\prod_{j=1}^2 x_{ij}}, \quad i = \overline{1,4}.$$

Вибираємо чотиризначну систему лінгвістичних оцінок  $L=2,3,4,5$ . Впорядкувавши  $P_i$ , створимо лінійну цифрову шкалу оцінок

$$M_i = kP_i = 9,28P_i, \quad k = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \frac{L_j}{P_j}.$$

М: 2,32; 3,11; 3,9; 4,45; 5; 6,91; 8,82, де підкреслені вузлові точки, що відповідають графі лінгвістичних оцінок.

З огляду на кодовані значення  $i$  вузлові точки  $M$ , відповідно до процедури, описаної в [6],

знаходимо коефіцієнти лінійної моделі (9), яка має такий вигляд

$$M = 5 + 1,9x_1^k + 1,35x_2^k. \quad (10)$$

Остаточні отримані результати приведені в психофізичній табл. 3.

**Приклад.** Оцінимо ступінь забруднення ділянки 20 (табл. 1) при  $x_1 = 0,954, x_2 = 0,55$ . Використовуючи формулу кодування [5]

$$x_j^k = (x_j - x_{0j}) / I,$$

де  $x_{0j} = 0,5(x_{\max j} + x_{\min j})$ ,  $I = 0,5(x_{\max j} - x_{\min j})$ , отримаємо  $x_1^k = 0,93, x_2^k = -0,3$ . Підставляючи  $x_1^k$  і  $x_2^k$  в (10), отримаємо значення  $M = 6,4$ , яке на підставі табл. 3 відповідає лінгвістичній оцінці «задовільно».

В табл. 1 у графах  $M$  і  $L$  наведені значення для 10 об'єктів.

Цілком очевидно, що подібну психофізичну таблицю можна розробити для області забруднення з більшим числом ВМ при ( $N > 2$ ). У цьому випадку доцільно враховувати вагові показники металів ( $k_j > 0$ ), які підпорядковуються умові (6). Тоді співвідношення (2) набуває вигляду

$$P_i = \sqrt[N]{\prod_{j=1}^N k_j x_{ij}}, i = \overline{1, \ell}.$$

Однак розгляд цього питання виходить за рамки даної роботи.

## Висновки

У статті наведено три методи оцінювання ступеня забруднення важкими металами ґрунту при точному землеробстві. Інструментом

Таблиця 3. Психофізична таблиця оцінювання

№	Лінгвістичні оцінки (L)	Інтервал зміни функції
1	відмінно	$2,32 \leq M \leq 3,11$
2	добре	$3,11 < M \leq 3,90$
3	добре	$3,90 < M \leq 4,45$
4	задовільно	$4,45 < M \leq 5,00$
5	задовільно	$5,00 < M \leq 6,91$
6	погано	$6,91 < M \leq 8,82$

реалізації методів є запропонований індекс забруднення ділянки ґрунту у вигляді узагальненого параметра, що враховує значення концентрацій всіх важких металів, що містяться в об'єкті.

Розроблено оригінальний алгоритм побудови математичної моделі забруднення ділянки ґрунту та психофізичної таблиці лінгвістичних оцінок. Підсумовуючи викладений матеріал, можна констатувати, що ефективність розроблених методів підтверджується обробкою даних, отриманих на основі комп'ютерного експерименту. Застосування запропонованих методів сприятиме оптимізації матеріальних витрат, пов'язаних із заходами стосовно агротехнічної та агрохімічної детоксикації ділянок забрудненого ґрунту.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Якушев В.В. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 364 с.
2. Суrowцев И.В., Бабак О.В. Классификация загрязнения участков почвы тяжелыми металлами по результатам компьютерного эксперимента. УСиМ. 2019. № 1. С. 88–94. <https://doi.org/10.15407/usim.2019.01.088>
3. Harrington E.C. The desirability function industrial quality control. 1965. April. P. 494–498.
4. Королева С.В. Практические аспекты использования функции желательности в медико-биологических экспериментах. Современные проблемы науки и образования. 2011. № 6. С. 32–38.
5. Адлер Ю.В., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука. 1976. 277 с.
6. Бабак О.В. О синтезе математической модели объекта на основе мысленного эксперимента. Кибернетика и вычислительная техника. 1997. Вып. 108. С. 76–83.

Надійшла 03.07.2019



## REFERENCES

1. Yakushev, V.V., 2016. *Tochnoe zemledelie: teoriya i praktika. Precision farming: theory and practice*. Saint-Petersburg: FGBIUAFI, 364 p. (in Russian).
2. Surovtsev, I.V., Babak, O.V., 2019. "Classification of soil plots pollution with heavy metals by the results of a computer experiment". *Control Systems and Computers*, 1, pp. 88–94. (in Russian), <https://doi.org/10.15407/usim.2019.01.088>.
3. Harrington, E.C., 1965. "The desirability function industrial quality control", pp. 494–498.
4. Koroleva, S.V., 2011. "Prakticheskiye aspekty ispol'zovaniya funktsii zhelatel'nosti v mediko-biologicheskikh eksperimentakh". *Practical aspects of using the function of desirability in biomedical experiments. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 6, pp. 32–38. (in Russian).
5. Adler, Yu.V., Markova, E.V., Granovsky, Y.V., 1976. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy. Planning an experiment when searching for optimal conditions*. M.: Nauka, 277 p. (in Russian).
6. Babak, O.V., 1997. "On the synthesis of a mathematical model of an object based on a mental experiment". *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika*, 108, pp. 76–83. (in Russian).

Received 03.07.2019

I.V. Surovtsev, Dr (Eng.), Senior Researcher, International Research and Training Centre of Information Technologies and Systems of the NAS and MES of Ukraine, Acad. Glushkov ave., 40, Kiev, 03187, Ukraine, dep175@irtc.org.ua; igorsur52@gmail.com

O.V. Babak, PhD (Eng.), Senior Researcher, International Research and Training Centre of Information Technologies and Systems of the NAS and MES of Ukraine, Acad. Glushkov ave., 40, Kiev, 03187, Ukraine, dep175@irtc.org.ua; babak@irtc.org.ua

V.M. Galimova, PhD (Chem.), Associate Professor, Senior Lecturer, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroiv Oborony Str.17, building 2, of. 16, 18, Kyiv, 03041, Ukraine, Galimova2201@gmail.com

## METHODS ESTIMATING THE DEGREE OF SOIL CONTAMINATION BY HEAVY METALS IN PRECISION FARMING

**Introduction.** Precision farming is a new stage in the development of crop technology, especially in industrial areas, where soil pollution with heavy metals is steadily increasing. Its implementation requires the development and putting into practice modern information technologies, including ground-based sensing of the soil for the maintenance of the various toxic elements. At the same time, the task of assessing the quality of the contaminated soil objects requires an exact solution, since optimization of the material resources necessary for soil detoxification for agrotechnical and agrochemical measures depends on it.

**Purpose.** The purpose of the article is to create the methods for a rough and subtle assessment of a soil area contaminated with heavy metals, as well as the development of a principle for constructing a qualimetric scale similar to the Harrington scale.

**Methods.** When creating a rough estimation tool, the developed design of a generalized parameter has been used, taking into account the factors of contamination with heavy metals. For fine estimation, a mathematical model has been developed, which allows to assess the degree of contamination by them.

**Results.** The developed evaluation methods have shown sufficient efficiency in the processing of computer experiment data.

**Conclusions.** The developed methods can be used not only for precision farming in agriculture, but also in other areas of science and technology, where it is necessary to assess the quality of objects that do not have a mass character.

**Keywords:** *precision farming, heavy metals, estimation, generalized parameter, pollution index, mathematical model, qualimetric scale.*

*И.В. Суrowцев*, доктор технических наук, ст. научный сотрудник,  
Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН  
и МОН Украины, просп. Академика Глушкова, 40, Киев, 03187, Украина,  
dep175@irtc.org.ua; igorsur52@gmail.com

*О.В. Бабак*, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник,  
Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН  
и МОН Украины, просп. Академика Глушкова, 40, Киев, 03187, Украина,  
dep175@irtc.org.ua; babak@irtc.org.ua

*В.М. Галимова*, кандидат химических наук, и.о. доцента,  
Национальный университет биоресурсов та природопользования Украины  
(НУБиП Украины), ул. Героев Обороны, 17, корпус № 2, 16, 18, Киев, 03041, Украина,  
galimova2201@gmail.com

#### МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОЧВЫ ПРИ ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

**Введение.** Точное земледелие — новый этап развития технологии растениеводства, особенно в промышленных районах, где неуклонно растет загрязнение почвы тяжелыми металлами. Реализация его требует разработки и внедрения современных информационных технологий, в том числе и при наземном зондировании почвы на содержание различных токсичных элементов. При этом, задача оценивания качества состояния загрязненных объектов почвы требует точного решения, поскольку от него зависит оптимизация материальных средств, необходимых для детоксикации почвы на агротехнические и агрохимические мероприятия.

**Цель статьи** — создание методов грубой и тонкой оценки состояния области почвы, загрязненной тяжелыми металлами, а также разработка принципа построения квалитметрической шкалы подобной шкале Харрингтона.

**Методы.** При создании инструмента грубого оценивания использована разработанная конструкция обобщенного параметра, учитывающая факторы загрязнения тяжелыми металлами. Для тонкого оценивания разработана математическая модель, позволяющая оценивать степень загрязнения ими.

**Результаты.** Разработанные методы оценки показали достаточную эффективность при обработке данных компьютерного эксперимента.

**Выводы.** Разработанные методы могут быть использованы не только при точном земледелии в сельском хозяйстве, но и в других областях науки и техники, где нужно оценить качество объектов, не имеющих массовый характер.

**Ключевые слова:** точное земледелие, тяжелые металлы, оценивание, обобщенный параметр, индекс загрязнения, математическая модель, квалитметрическая шкала.