

DOI <https://doi.org/10.15407/usim.2020.03.069>
УДК 004.942

О.В. БАБАК, канд. техн. наук, ст. науковий співробітник, Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України, 03187, м. Київ, просп. Акад. Глушкова, 40, Україна, dep175@irtc.org.ua; babak@irtc.org.ua

І.В. СУРОВЦЕВ, доктор техн. наук, ст. наук. співробітник, Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України, 03187, м. Київ, просп. Акад. Глушкова, 40, Україна, dep175@irtc.org.ua; igorsur52@gmail.com

В.М. ГАЛІМОВА, канд. хімічних наук, в.о. доцента, Національний університет біоресурсів та природокористування України (НУБтаП України), 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 17, корпус № 2, офіс 18, Україна, galimova2201@gmail.com

ОЦІНКА ВИТРАТ НА ДЕТОКСИКАЦІЮ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ

Розроблено метод оцінювання витрат з детоксикації ґрунтів при точному землеробстві. Математична модель оцінювання побудована на основі уявного повного факторного експерименту при експертних оцінках ситуацій, які плануються. Перевагою запропонованого методу є системний підхід до рішення вказаної задачі, що зменшує ризик отримання невдалого результату.

Ключові слова: уявний повний факторний експеримент, оцінювання, важкі метали, математична модель, цільова функція, точне землеробство, детоксикація.

Вступ

У статті запропоновано концепцію вирішення проблеми оцінювання матеріальних витрат, необхідних для диференційної детоксикації ґрунту на ділянках поля, забруднених важкими металами. Ідеться про мінімізацію матеріальних витрат, необхідних для відновлення нормального екологічного стану природних об'єктів.

У зв'язку з неухильним забрудненням ґрунту токсичними елементами, особливо у промислових районах, вагомим значення у виробництві рослинницької продукції набуває впровадження нової прецизійної технології, яка називається «точним землеробством» [1].

Точне землеробство передбачає впровадження новітніх технологій та інструментів для підвищення ефективності виробництва продукції рослинництва, реалізація яких є неможливою без вимірювання у ґрунті та в рослинах корисних і токсичних елементів за допомогою цифрової обробки інформації, що передбачає високий рівень автоматизації праці. Щоб забезпечити врожайність із оптимальним використанням ресурсів і високим рівнем рентабельності на полі, застосування інструментів або елементів точного землеробства має доповнювати поглиблений економічний аналіз. Адже точне сільське господарство — це оптимізація технології вирощування в межах поля

та культури з максимально ефективним використанням доступних матеріальних і природних ресурсів, що має на меті збільшення виробництва якісної продукції з низькою собівартістю [2].

В умовах інтенсифікації техногенних процесів оцінка екологічного стану ґрунтів є важливим фактором, який дає змогу зменшити ризики деградації ґрунтів та запропонувати способи відновлення їхньої продуктивної та екологічних функцій. Найчастіше ґрунт забруднюється сполуками важких металів (ВМ) та органічними речовинами, пестицидами, радіоактивними, біологічно активними горючими матеріалами та іншими шкідливими продуктами. Джерелом цих сполук є промислові або побутові відходи, захоронені у визначених місцях або несанкціонованих звалищах. Забруднення сільськогосподарських земель важкими металами призводить до зменшення врожаю та підвищення їхнього вмісту в продукції землеробства, що завдає непоправної шкоди рослинному і тваринному світу та є причиною збільшення онкологічних та інших небезпечних захворювань людини.

Однією з важливих проблем технології точного землеробства є оцінювання екологічної якості ґрунтів, яку можна встановити за показниками елементного забруднення $C_n = C_i / \text{ГДК}_n$, де C_i — фактичний вміст n металу, ГДК_n — гранично допустима концентрація цього металу в ґрунті [3]. Доведено існування зворотнього зв'язку між вмістом важких металів у ґрунті та врожаєм, при цьому просту оцінку міри елементного забруднення можна здійснити за шкалою, згідно з якою ґрунт вважається:

- незабрудненим, якщо $C_n < 1$ (зниження врожаю до 5 %);
- слабо забрудненим: $1 \leq C_n < 2$ (5–10 %);
- середньо забрудненим: $2 \leq C_n < 5$ (10–25 %);
- сильно забрудненим: $5 \leq C_n < 10$ (25–50 %);
- дуже сильно забрудненим: $C_n \geq 10$ (50–75 %) [4].

Достовірність оцінювання якості ґрунту нерозривно пов'язана з надійними вимірюваннями концентрацій ВМ. Вирішення цієї задачі стало можливим завдяки створенню в

Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій та систем НАН і МОН України високочутливої аналітичної системи «Аналізатор ІХП» [5], яка дає змогу визначити концентрацію 14 токсичних мікроелементів (ртуть, миш'як, свинець, кадмій, цинк, мідь, олово, нікель, кобальт, залізо, марганець, селен, йод і хром) із чутливістю до 0,05 мкг/дм³ та 6 макроелементів (калій, натрій, кальцій, фтор, амоній і нітрати) у різних об'єктах довкілля (вода, ґрунти, харчові продукти, продукція рослинництва та тваринництва).

За наявності забруднення землі важкими металами технологія точного землеробства передбачає необхідність здійснення детоксикації, тобто, відновлювання екологічної якості ґрунтів, причому цей процес може бути неоднаковим на конкретній ділянці поля, що залежить від рівня забрудненості та токсичності хімічного елемента [6].

Серед сучасних методів відновлювання (ремедіації) забруднених ґрунтів можна виокремити такі [7]:

- застосування неорганічних (вапна, глини, золи, шлаку, цементу) або органічних компонентів (компост, послід, органічні добрива), які зменшують розчинність ВМ і переводять їх у біологічно недоступні для рослин форми;
- різні види фіторемердіації (фітоекстракція, фітостабілізація, фітодеградація, фітостимуляція, ризофільтрація, ризодеградація, фітовипаровування тощо) з механізмом очищення, заснованим на використанні рослин-аккумуляторів, які здатні поглинати та накопичувати в собі значну частину ВМ із ґрунту;
- застосування ґрунтових мікроорганізмів або сорбентів, які здатні впливати на біологічну доступність і процес поглинання рослинами токсичних металів. Важливим екологічним та економічним питанням є утилізація рослин-фіторемердіантів після процесу вилучення ВМ із ґрунтів за допомогою переробки рослин на біоенергію або біопаливо [8–9].

Велика кількість підходів до детоксикації, залежність їх від рівня елементного забруднення та значна собівартість рекультиваци ґрунтового середовища ускладнює вибір найефектив-

нішого з екологічного й економічного погляду варіанта. Процес вибору оптимального варіанта можна спростити, якщо побудувати зручну математичну модель оцінювання матеріальних витрат на детоксикацію області ґрунту, забрудненого ВМ. Основою для її створення можуть бути експертні оцінки собівартості відновлення одиниці площі тим чи іншим варіантом детоксикації.

Постановка задачі

Нехай є поля, ґрунти яких забруднено n важкими металами. Кожне поле поділено на ділянки з числом m , і в них здійснено вимірювання n значень концентрацій $x = C$, причому

$$\{x_{jz}\}, j = \overline{1, n}, z = \overline{1, m}.$$

При цьому на кожній ділянці знайдено максимальні та мінімальні значення концентрацій, а також середньоарифметичні значення їх: $x_{j\max}, x_{j\min}$, тобто

$$\{\bar{x}_{j\max}, \bar{x}_{j\min}\}, j = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Нехай задачу класифікації розв'язано, наприклад, способом [10], та виокремлено M із m ділянок, у яких величина концентрацій окремих ВМ перевищує допустимі норми. Потрібно формалізувати процедуру оцінки матеріальних витрат для обраного варіанту детоксикації M ділянок за допомогою побудови математичної моделі оцінювання матеріальних витрат на базі системного підходу, використовуючи експертні оцінки собівартості відновлення одиниці площі. При цьому для більшої відповідності моделі можна використовувати оцінки двох або більше незалежних груп експертів [11].

Розв'язання задачі

Перш ніж приступити до вирішення задачі, необхідно визначити склад груп експертів, здатних оцінити величини собівартості відновлення M ділянок поля. Нехай визнано за потрібне створити дві незалежні групи експертів.

Розглянемо перебіг вирішення задачі в загальному випадку.

З огляду на (1) ухвалюється рішення скористатися ортогональною матрицею уявного пов-

ного експерименту (УПФЕ) $u = 2^n$ та при $n > 3$ для її побудови використовувати дробові репліки [12]. У її рядках знаки "+" і "-" відповідають $x_{j\max}$ та $x_{j\min}$, або в кодованих значеннях +1 та -1. Результати оцінок експертами значення собівартості матеріальних витрат детоксикації одиниці площі відображено в кожному рядку матриці стовпцем $s_i, i = \overline{1, u}$ та застосовуються як цільова функція моделі.

При цьому матеріальними витратами на детоксикацію у грошовому еквіваленті для кожного рядка матриці УПФЕ може слугувати величина

$$D_i = ds_i, i = \overline{1, u}, \quad (2)$$

де d — площа ділянки поля. Однак не виключаються й інші варіанти оцінювання матеріальних витрат. Таким чином, попередню підготовку до процедури побудови математичної моделі оцінювання завершено.

Оскільки процедура побудови зазначеної моделі здійснюється методом найменших квадратів (МНК), вона, як і всякий статистичний метод, може бути застосована лише за деяких припущень. Здебільшого вони зводяться до двох:

- вважаємо, що модель є завжди лінійною;
- цільова функція s є випадковою величиною з нормальним законом розподілу.

Якщо перше припущення якоюсь мірою є справедливим, адже йдеться лише про оцінювання матеріальних витрат, то друге доводиться приймати як постулат. З огляду на це зауваження, можна розпочати процедуру побудови лінійної моделі, а саме, визначення оцінок її коефіцієнтів a :

$$\hat{s} = \sum_{j=0}^n a_j x_j^k. \quad (3)$$

Якщо за умовою матриця УПФЕ є ортогональною, то коефіцієнти знаходимо за простою формулою [12]:

$$a_j = \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u x_{ji}^k s_i, i = \overline{1, u}. \quad (4)$$

Остаточно математична модель (3) матиме вигляд:

$$\hat{s} = a_0 + \sum_{j=1}^{(n-1)} a_j x_j^k. \quad (5)$$

Оскільки оцінювання матеріальних витрат здійснюється двома групами експертів, оцінки собівартості s_i , $i = 1, u$, цілком імовірно, відрізнятимуться між собою і, відповідно, різними будуть оцінки коефіцієнтів (4). Отже, по суті маємо дві моделі (5). Тому якщо після обговорення результатів роботи двох груп експертів виявиться, що оцінки s_i є близькими, то для побудови моделі цілком природно буде враховувати їхнє середнє значення

$$s_{icp} = \frac{1}{2}(s_{i1} + s_{i2}).$$

Далі необхідно перейти до перевірки гіпотези про адекватність моделі. Для цього в статистиці зазвичай використовують F -критерій Фішера [12]:

$$F = \frac{\delta_1^2}{\delta_2^2}. \quad (6)$$

Величина, що стоїть у чисельнику (6), є дисперсією адекватності:

$$\delta_1^2 = \frac{1}{f_1} \sum_{i=1}^u (s_{icp} - \hat{s}_i)^2 \quad (7)$$

де f_1 — число ступенів свободи.

Нагадаємо, що в разі ортогональної матриці УПФЕ $f_1 = u - n$.

Знаменником формули (6) є дисперсія відтворюваності зі своїм числом ступенів свободи — $f_2 = k - 1$, де k — число паралельних незалежних оцінок уявних дослідів. У нашому прикладі $f_2 = 1$. При ортогональності матриці УПФЕ та двох повторних уявних дослідів у її рядку

$$\delta_2^2 = \frac{2}{u} \sum_{i=1}^u (s_{icp} - \bar{s})^2, \quad (8)$$

де $\bar{s} = \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u s_{icp}$.

Отже, маємо все для розрахунку формули (6) та перевірки адекватності моделі в порівнянні з табличним значенням критерію Фішера — F_r . Причому, якщо $F < F_r$, то з відповідною довірою ймовірністю отриману модель можна вважати адекватною. В іншому разі ця гіпотеза відкидається і слід шукати причину негативного кінцевого результату.

Підбиваючи підсумки, можна говорити про те, що фактично розглянутий алгоритм побу-

дови лінійної моделі оцінювання матеріальних витрат складається з таких кроків:

К р о к 1. Визначення границь зміни значень вимірних концентрацій ВМ (1) в досліджуваній області ґрунту;

К р о к 2. Створення групи експертів з оцінювання матеріальних витрат з урахуванням забруднення ґрунту ВМ ділянки поля;

К р о к 3. Побудова ортогональної матриці УПФЕ [12] оцінювання матеріальних витрат;

К р о к 4. Отримання за допомогою МНК лінійної моделі оцінювання матеріальних витрат (5);

К р о к 5. Перевірка придатності отриманої лінійної моделі за допомогою F -критерію Фішера (6) з огляду на (7) та (8).

Розгляньмо реалізацію алгоритму.

Приклад. Нехай є область ґрунту, що забруднена $n = 4$ важкими металами, для якої потрібно оцінити матеріальні витрати на детоксикацію. Припустімо, що із загальної кількості ділянок $m = 30$, на які поділено область ґрунту, виокремлено певну кількість ділянок $M = 20$, у яких граничні середньоарифметичні значення x перевищують допустимі концентрації (1)

$$\{x_{jmax}, x_{jmin}\}, j = \overline{1, 4}.$$

Ці дані зведено в табл. 1.

Таблиця 1. Границі зміни x_j

x_j	x_1	x_2	x_3	x_4
x_{jmax}	1	0,9	1	0,9
x_{jmin}	0,8	0,7	0,8	0,5

Нехай ухвалено рішення створити дві незалежні групи експертів [11]. Далі, для обраного варіанту детоксикації складається ортогональна матриця планування ситуацій УПФЕ [12] і дві групи ухвалюють рішення щодо оцінювання матеріальних витрат s_1 та s_2 . Оскільки одержані собівартості є близькими, визначається s_{cp} . Їх відображено в табл. 2, в якій $\Delta_i = \hat{s}_i - s_{icp}$.

При цьому математична модель оцінювання матеріальних витрат після визначення МНК її коефіцієнтів (5) матиме вигляд

$$\hat{s} = 2,75 + 1,0x_1^k + 0,5x_2^k + 0,25x_3^k + 0,25x_4^k. \quad (9)$$

Таблиця 2. Ортогональна матриця УПФЕ

$u \setminus x$	x_0^k	x_1^k	x_2^k	x_3^k	x_4^k	s_{i1}	s_{i2}	$s_{i\text{ср}}$	\hat{s}_i	Δ_i	Δ_i^2
1	+	+	+	-	-	4,2	3,8	4	3,75	-0,25	0,0625
2	+	-	-	-	-	1	1	1	0,75	-0,25	0,0625
3	+	+	-	-	+	2,9	3,1	3	3,25	0,25	0,0625
4	+	-	+	-	+	2,8	1,9	2	2,25	0,25	0,0625
5	+	+	+	+	+	5	5	5	4,75	-0,25	0,0625
6	+	-	-	+	+	2,2	1,8	2	1,75	-0,25	0,0625
7	+	+	-	+	-	3,3	2,7	3	3,25	0,25	0,0625
8	+	-	+	+	-	1,9	2,1	2	2,25	0,25	0,0625

Перевірмо гіпотезу адекватності моделі за допомогою F -критерію (6). Визначмо дисперсію адекватності (7) при $f_1 = 8 - 5 = 3$

$$\delta_1^2 = \frac{1}{3} \cdot 8 \cdot 0,0625 \approx 0,17$$

та дисперсію відтворюваності (8) при $f_2 = 1$ і $s = 2,75$

$$\delta_2^2 = \frac{2 \cdot 10,3}{8} \approx 2,6.$$

Тоді матимемо $F \approx 0,07$.

З таблиці значень F -критерію Фішера при 5 відсотках рівні значущості [12] з огляду на $f_1 = 3$ та $f_2 = 1$ знаходимо $F = 10,1$. Оскільки $0,07 \ll 10,1$, то з відповідною довірчою ймовірністю отриману модель можна вважати адекватною. Нехай, наприклад, на ділянці № 18 визначено концентрації ВМ: $x_1 = 0,95$; $x_2 = 0,85$; $x_3 = 0,8$; $x_4 = 0,6$. Необхідно оцінити матеріальні витрати \hat{s}_{18} на детоксикацію цієї ділянки.

З огляду на табл. 1 і формулу кодування $x_j^k = (x_j - x_{0j}) \cdot I_j^{-1}$ [12], спочатку визначмо величини: $x_{0j} = (x_{j\text{max}} + x_{j\text{min}}) / 2$ та $I_j = (x_{j\text{max}} - x_{j\text{min}}) / 2$:

$x_{01} = 0,9$; $x_{02} = 0,8$; $x_{03} = 0,9$; $x_{04} = 0,7$; $I_1 = 0,1$; $I_2 = 0,1$; $I_3 = 0,1$; $I_4 = 0,2$.

Тоді маємо

$$x_1^k = \frac{1}{0,1} (0,95 - 0,9) = 0,5$$

$$x_2^k = \frac{1}{0,1} (0,85 - 0,8) = 0,5$$

$$x_3^k = \frac{1}{0,1} (0,8 - 0,9) = -1$$

$$x_4^k = \frac{1}{0,2} (0,6 - 0,7) = -0,5$$

$$\hat{s}_{18} = 2,75 + 1 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 0,5 - 0,25 \cdot 1 - 0,25 \cdot 0,5 = 3,125.$$

У подібний спосіб можна визначити \hat{s}_j для кожного варіанта детоксикації та обрати оптимальний варіант із мінімальною величиною \hat{s}_j .

Якщо для кожної ділянки відомі значення d_j та визначено величину оптимального варіанта, то остаточно можна оцінити загальні матеріальні витрати \hat{D} на детоксикацію всієї області ґрунту (2)

$$\hat{D} = \sum_{j=1}^M d_j \cdot \hat{s}_j$$

та розрахувати показники економічної ефективності агроекологічного процесу відновлення ґрунтів [4].

Висновки

Зазначмо, що розглянутий у статті системний та відносно простий підхід до оцінювання матеріальних витрат на детоксикацію ґрунту, забрудненого ВМ, на основі експертної оцінки планованих ситуацій при УПФЕ, має концептуальний характер і може застосовуватися не лише для розв'язання цієї задачі. Загалом такий підхід може бути використаний при розгляді широкого кола задач у різних царинах знань для різних типів цільової функції, але в цьому плані потрібні окремі дослідження.

З огляду на проблему детоксикації ділянок поля в умовах точного землеробства, на-

ступним етапом є створення інформаційної технології, яка використовуватиме попередньо розроблені математичні моделі оцінювання матеріальних витрат за експертними оцінками собівартості робіт для різних способів відновлення забруднених ґрунтів. Тоді в аграріїв

з'явиться можливість швидко оцінити та обрати оптимальний варіант матеріальних витрат на детоксикацію ґрунту полів залежно від наявних матеріальних ресурсів, обраного способу та конкретних значень концентрацій на різних ділянках.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гіс-технології у рослинництві. Лекція № 4 (Система точного землеробства). URL: <http://www.tsatu.edu.ua/ros/ wp-content/uploads/sites/20/lekcija-4.his-tehnolohiyi-u-roslynnytvi.pdf>.
2. Meteobot. Агрометеорологічна станція. Системи точного землеробства. URL: <https://meteobot.com/uk/>
3. Патентно-інформаційне забезпечення оцінювання екологічного стану ґрунтів / Самохвалова В. Л., Мандрика О. В., Фатеев А. І., Горякіна В. М. *Gruntoznavstvo*. 2015. № 16 (1-2). С. 36–51. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/grunt_2015_16_1-2_6.
4. Гололобова О. О., Кравченко Н. Б., Давидова Е. Д. Агроекологічна та еколого-економічна оцінка використання земель сільськогосподарського призначення фермерського господарства. Людина та довкілля. Проблеми неоекології. № 3–4. 2012. С. 102–112.
5. Суровцев І. В., Бабак О. В., Татарінов О. Е., Суровцева Т. В. Апаратно-програмний комплекс «Аналізатор ІХП» для вимірювання масової концентрації токсичних елементів. Наука та інновації. 2011. 7 (3). С. 45–46.
6. Dermont G. Metal-contaminated soils: remediation practices and treatment technologies. G. Dermont, M. Bergeron, G. Mercier, M. Richer-Lafl che. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. 2008. Vol. 12, № 3. P. 188–209.
7. Кляченко О. Л., Мельничук М. Д., Іванова Т. В. Екологічні біотехнології: теорія і практика : навчальний посібник. Вінниця, ТОВ «Нілан-ЛТД», 2015. 254 с. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/ekologichni_biotekhnologii_31-07-15.pdf
8. Самохвалова В. Л. Біологічні методи ремедіації ґрунтів, забруднених важкими металами. Біологічні студії. 2014. № 8 (1). С. 217–236. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bist_2014_8_1_21.
9. Ефремова С. Ю. Приемы детоксикации химически загрязнённых почв. Изв. ПГПУ им. В. Г. Белинского. *Естественные науки*. 2012. № 29. С. 379–382. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/priemy-detoksikatsii-himicheski-zagryaznennyh-pochv/viewer>
10. Суровцев И. В., Бабак О. В. Классификация загрязнения участков почвы тяжелыми металлами по результатам компьютерного эксперимента. Управляющие системы и машины. 2019. № 1. С. 88–94. DOI: 10.15407/usim.2019.01.088.
11. Пристрій для вибору оптимальних рішень : пат. 111567 Україна : Осипенко В.В., Бабак О.В., Степашко В.С. : заявл. 25.11.15 ; опубл. 20.05.16, Бюл. № 9. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=223077&chapter=description>
12. Адлер Ю. В., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 277 с.

Надійшла 12.03.2020

REFERENCES

1. His-tehnolohiyi u roslynnytstvi. Lektsiya № 4 (Systema tochnoho zemlerobstva) [Gis-technologies in crop production. Lecture 4 (Precision Farming System)]. [online] Available at: <http://www.tsatu.edu.ua/ros/ wp-content/uploads/sites/20/lekcija-4.his-tehnolohiyi-u-roslynnytvi.pdf> (in Ukrainian).
2. Meteobot. Ahrometeorolohichna stantsiya. Systemy tochnoho zemlerobstva [Agrometeorological station. Precision farming systems]. [online] Available at: <https://meteobot.com/uk/>. (in Ukrainian).
3. Samokhvalova, V. L., Mandryka, O. V., Fatyeyev, A. I., Horyakina, V. M., 2015. "Patentno-informatsiyne zabezpechennya otsynuyannya ekolohichnoho stanu gruntiv" ["Patent-information support of soil ecological status assessment"], *Gruntoznavstvo*, 16 (1–2), pp. 36–51. [online] Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/grunt_2015_16_1-2_6 (in Ukrainian).

4. *Hololobova, O.O., Kravchenko, N.B., Davydova, E.D.*, 2012. “Ahroekolohichna ta ekoloho-ekonomichna otsinka vykorystannya zemel silskohospodarskoho pryznachennya fermerskoho hospodarstva” [“Agroecological and ecological and economic evaluation of agricultural land use”], *Lyudyna ta dovkillya, Problemy neoekolohiyi*, 3–4, pp. 102–112. (in Ukrainian).
5. *Surovtsev, I.V., Babak, O.V., Tatarinov, O.E., Surovtseva, T.V.*, 2011. “Aparatno-prohrannyy kompleks “Analizator IKHP” dlya vymiryuvannya masovoyi koncentratsiyi toksychnykh elementiv” [“Hardware and Software Complex “ICP Analyzer” for Measurement of Mass Concentration of Toxic Elements”], *Nauka ta inovatsiyi*, 7 (3), pp. 45–46. (in Ukrainian).
6. *Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., Richer-Lafleche, M.*, 2008. “Metal-contaminated soils: remediation practices and treatment technologies”, *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 12 (3), pp. 188–209.
7. *Klyachenko, O.L., Melnychuk, M.D., Ivanova, T.V.*, 2015. *Ekolohichni biotekhnolohiyi: teoriya i praktyka. Navchalnyy posibnyk*. [Environmental biotechnology: theory and practice. Tutorial.], TOV “Nilan-LTD”, Vinnytsya, 254 p. [online] Available at: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/ekologichni_biotekhnologii_31-07-15.pdf (in Ukrainian).
8. *Samokhvalova V. L.*, 2014. “Biolohichni metody remediatsiyi ґruntiv, zabrudnennykh vazhkymy metalamy” [“Biological methods of remediation of soils contaminated with heavy metals”], *Biolohichni studiyi*, 8 (1), pp. 217–236. [online] Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bist_2014_8_1_21 (in Ukrainian).
9. *Yefremova S. Yu.*, 2012. “Priyemy detoksikatsii khimicheskii zagryaznonnykh pochv” [“Detoxification methods for chemically contaminated soils”], *Izv. PGPU im. V. G. Belinskogo. Yestestvennyye nauki*, 29, pp. 379–382. [online] Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/priemy-detoksikatsii-himicheskii-zagryaznennykh-pochv/viewer> (in Russian)
10. *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. [online] Available at: <https://doi.org/10.15407/usim.2019.01.088> (in Russian)
11. *Osyenko V. V., Babak O. V., Stepashko V. S.*, 2016. *Prystriy dlya vyboru optymalnykh rishen* [Device for choosing the best solutions], Ukraine, Patent 111567. [online] Available at: https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=vie_wdetails&IdClaim=223077&chapter=description (in Ukrainian).
12. *Adler, Yu.V., Markova, E.V., Granovsky, Y.V.*, 1976. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Planning an experiment when searching for optimal conditions], Nauka, Moscow, Russia, 277 p. (in Russian).

Received 12.03.2020

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

I.V. Surovtsev, Dr (Eng.), Senior Researcher, Department of ecological digital systems, 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

V.M. Galimova, PhD in Chemistry, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department of Analytical and Bioinorganic Chemistry and Water Quality, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroiv Oborony Str.15, building 2, of. 18, Kyiv, Ukraine, 03041, Galimova2201@gmail.com

ESTIMATING THE COST OF THE SOILS DETOXIFICATION CONTAMINATED WITH HEAVY METALS

Introduction. When conducting the research in various fields of science and technology, the problem arises of reducing the number of full-scale experiments, as well as completely eliminating their planning when constructing a mathematical model of an object. Its solution plays a particularly important role in evaluating the material costs of detoxifying soils contaminated with heavy metals.

Purpose. The purpose of the article is to create an algorithm for constructing a mathematical model for estimating the material costs for soil detoxification in precision farming, excluding full-scale experiments and their planning.

Methods. To solve the problem of estimating material costs in constructing a mathematical model, a systematic approach is used, based on a mental complete factor experiment (*MCFE*) at expert assessments of planned situations of the soil detoxification process.

Results. The developed estimation algorithm has shown the sufficient efficiency in the processing of *MCFE* data. The advantage of the algorithm is that it can be used not only in the field of precision farming, but also in other areas.

Conclusions. The developed algorithm can be used both for solving problems of estimating material costs and for assessing the state of various objects in order to create the intelligent systems.

Keywords: *mental full factor experiment, assessment, heavy metals, mathematical model, efficiency function, precision farming, detoxification.*

О.В. Бабак, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник, отдел экологических цифровых систем, Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, 03187, г. Киев, просп. Академика Глушкова, 40, Украина, dep175@irtc.org.ua; babak@irtc.org.ua

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

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

ОЦЕНКА ЗАТРАТ НА ДЕТОКСИКАЦИЮ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Введение. При проведении исследований в самых различных областях науки и техники возникает задача сокращения числа натуральных экспериментов, а также полного исключения их планирования при построении математической модели объекта. Особенно важную роль ее решение играет при оценивании материальных затрат по детоксикации почв, загрязненных тяжелыми металлами.

Цель статьи — создание алгоритма построения математической модели оценивания материальных затрат по детоксикации почвы при точном земледелии, исключающей натурные эксперименты и их планирование.

Методы. Для решения задачи оценивания материальных затрат при построении математической модели использован системный подход, мысленный полный факторный эксперимент (МПФЭ) при экспертных оценках планируемых ситуаций процесса детоксикации почвы.

Результаты. Разработанный алгоритм оценивания показал достаточную эффективность при обработке данных МПФЭ. Преимуществом алгоритма является то, что он может быть использован не только в области точного земледелия, но и в других сферах.

Выводы. Разработанный алгоритм может быть использован как для решения задач оценивания материальных затрат, так и оценивания состояния самых различных объектов с целью создания интеллектуальных систем.

Ключевые слова: мысленный полный факторный эксперимент, оценивание, тяжелые металлы, математическая модель, целевая функция, точное земледелие, детоксикации.