

УДК 004.9:528.9:623.674

*Ю. Ю. Дідовець, PhD, викл. каф. (ORCID 0009-0003-2757-7299)**О. О. Кожем'яка, ст. викл. каф. (ORCID 0009-0008-1064-9213)**О. Ю. Лазоренко, викл. каф. (ORCID 0009-0005-3569-2208)**Ю. В. Михайловська, PhD, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0003-1090-5033)**Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

ІНТЕГРАЦІЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ У ПРОЦЕСИ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ

Обґрунтовано науково-прикладний підхід до інтеграції цифрових технологій і геоінформаційних систем у процеси гуманітарного розмінування. Показано, що перехід від фрагментарного використання окремих цифрових інструментів до цілісної цифрово-геоінформаційної екосистеми дає змогу істотно підвищити обґрунтованість рішень на етапах нетехнічного обстеження, технічного обстеження, очищення, контролю якості та передачі територій. Визначено ключові компоненти такої інтеграції: стандартизовані цифрові дані, геопросторові моделі, супутникове та аерознімання, безпілотні платформи, мобільні засоби польового збору інформації, аналітичні панелі, алгоритми просторової пріоритезації та системи підтримки прийняття рішень. Запропоновано математичний апарат для оцінювання рівня цифрово-геоінформаційної зрілості оператора, просторової пріоритезації ділянок і прогнозування продуктивності робіт залежно від якості даних, часової затримки оновлення інформації, невизначеності контамінації та доступності місцевості. Обґрунтовано, що практичний ефект інтеграції полягає у скороченні часу на оброблення польових даних, підвищенні точності контурів небезпечних територій, зменшенні дублювання маршрутів, покращенні розподілу ресурсів і підвищенні прозорості звітності. Наукова новизна полягає у розробленні інтегрованої моделі, що поєднує коефіцієнт цифрово-геоінформаційної зрілості, індекс якості даних, просторовий індекс пріоритету та функцію очікуваної операційної ефективності. Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованих положень під час організації робіт з гуманітарного розмінування, підготовки персоналу, вибору цифрової архітектури та вдосконалення процедур управління інформацією в умовах масштабного забруднення територій вибухонебезпечними предметами. в Україні.

Ключові слова: цифрові технології, геоінформаційні системи, гуманітарне розмінування, просторовий аналіз, безпілотні платформи

1. Вступ

Гуманітарне розмінування у сучасних умовах дедалі більше залежить не лише від технічних спроможностей операторів, а й від якості управління інформацією, швидкості оновлення просторових даних і здатності інтегрувати результати польових робіт у цифровий контур прийняття рішень. Міжнародні стандарти з інформаційного менеджменту у протимінній діяльності наголошують, що саме якісні, своєчасні та просторово прив'язані дані забезпечують обґрунтованість рішень щодо land release, планування обстеження, контролю якості та передачі територій [1, 2].

У практиці гуманітарного розмінування цифрові технології вже охоплюють супутниковий моніторинг, аерофотознімання з безпілотних платформ, мобільний польовий збір даних, геопортали, аналітичні панелі, хмарні сховища, алгоритми просторового аналізу та системи інформаційного менеджменту типу IMSMA Core [6, 7]. Однак сам факт наявності цих інструментів ще не означає високої операційної ефективності. Критичним стає питання їх інтеграції в єдиний цикл «збір даних – валідація – картографування – пріоритезація – рішення – перевірка результатів».

Для України ця проблематика має особливу актуальність з огляду на великі масштаби забруднення територій вибухонебезпечними предметами, потребу швидкого планування обстеження земель, визначення пріоритетів очищення для

населення, інфраструктури й агровиробництва, а також необхідність узгодженого обміну даними між державними органами, операторами, донорами та міжнародними партнерами [12, 17]. За таких умов інтеграція цифрових технологій і ГІС переходить із категорії допоміжних інструментів у категорію системоутворюючих механізмів управління процесами гуманітарного розмінування.

Таким чином, попри активне впровадження цифрових технологій і геоінформаційних систем у сферу протимінної діяльності, залишається недостатньо дослідженим питання їх комплексної інтеграції у єдину інформаційно –аналітичну систему підтримки управлінських рішень. У наявних дослідженнях переважно розглядаються окремі цифрові інструменти або окремі етапи інформаційного забезпечення гуманітарного розмінування, тоді як цілісна модель оцінювання ефективності інтеграції цифрових технологій і геоінформаційних систем у процеси планування, обстеження та очищення територій потребує подальшого наукового обґрунтування.

Постановка питання дослідження полягає у визначенні підходів до інтеграції цифрових технологій та геоінформаційних систем у процеси гуманітарного розмінування, а також у розробленні моделі оцінювання впливу такої інтеграції на ефективність управління інформацією та прийняття управлінських рішень.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У міжнародній літературі підкреслюється, що інформаційний менеджмент у протимінній діяльності є не окремою службовою функцією, а наскрізною системою забезпечення якості рішень. IMAS 05.10 встановлює принципи якості даних, простежуваності джерел, своєчасності оновлення, ролей і відповідальності суб'єктів, а також інтеграції стандартів, процедур та інформаційних потоків [1]. Стандарти IMAS 07.11; 08.10; 08.20 і 09.10 безпосередньо пов'язують рішення щодо скорочення небезпечних територій, нетехнічного і технічного обстеження та очищення з доказовою базою, отриманою з геопросторово прив'язаних даних [2–5].

GISCHD у своїх методичних матеріалах послідовно наголошує, що сучасний розвиток IMSMA Core і побудованих на GIS платформах переводить інформаційний менеджмент від архівування звітів до середовища оперативної аналітики, де карти, дашборди, растрові та векторні шари, засоби image processing і workflow automation прямо впливають на пріоритетність завдань, координацію операторів та вимірювання результатів [6–8]. Окремі дослідження демонструють, що поєднання ГІС, машинного навчання та експертних знань дає змогу покращувати прогнозування небезпечних зон, класифікацію ділянок і вибір сценаріїв обстеження [10, 11, 18–24].

У вітчизняному нормативному полі Закон України «Про протимінну діяльність в Україні» закріплює правові та організаційні засади функціонування системи протимінної діяльності, а СОП ДСНС для технічного обстеження і очищення територій визначають порядок документування результатів, просторового позначення ділянок та передачі інформації про хід робіт [12–14]. Національна стратегія протимінної діяльності України на 2024–2033 роки також пов'язує розвиток спроможностей у цій сфері з удосконаленням інформаційної системи, узгодженням даних і цифровою підтримкою управлінських рішень [17].

Разом із тим аналіз доступних публікацій показує, що значна частина робіт описує або окремі цифрові інструменти, або окремі етапи просторового аналізу. Значно менше досліджень пропонують цілісну формалізовану модель, яка дозво-

ляє оцінити рівень інтеграції цифрових технологій і ГІС, зіставити різні організаційні архітектури, розрахувати вплив якості даних на продуктивність очищення та визначити математично обґрунтований просторовий пріоритет ділянок. Саме ця прогалина зумовлює постановку проблеми.

Аналіз міжнародних стандартів, наукових публікацій і нормативних документів показав, що цифрові технології та геоінформаційні системи відіграють ключову роль у забезпеченні інформаційного менеджменту протиміної діяльності. Водночас більшість досліджень зосереджені на окремих інструментах або етапах оброблення даних, що обумовлює необхідність розроблення інтегрованої моделі використання цифрових технологій і ГІС у процесах гуманітарного розмінування.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розроблення науково обґрунтованої моделі інтеграції цифрових технологій і геоінформаційних систем у процеси гуманітарного розмінування з урахуванням вимог міжнародних стандартів, національного регулювання, просторової пріоритезації та оцінювання очікуваної операційної ефективності.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Розробити інтегровану цифрово-геоінформаційну модель гуманітарного розмінування, яка поєднує джерела просторових даних, аналітичні інструменти та механізми підтримки прийняття управлінських рішень.

2. Формалізувати систему показників оцінювання інтеграції цифрових технологій і геоінформаційних систем, зокрема коефіцієнт цифрово-геоінформаційної зрілості оператора, індекс якості даних і просторовий індекс пріоритету ділянок.

3. Оцінити ефективність інтеграції цифрових технологій у процеси гуманітарного розмінування шляхом аналізу впливу цифрової зрілості, якості даних і швидкості оновлення інформації на очікувану операційну ефективність.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процеси інформаційного забезпечення гуманітарного розмінування територій, забруднених вибухонебезпечними предметами.

Предметом дослідження є інтеграція цифрових технологій та геоінформаційних систем у систему управління даними та підтримки прийняття рішень під час планування і виконання робіт з гуманітарного розмінування.

Сформульовані мета, об'єкт, предмет і завдання дослідження визначають наукову логіку роботи та спрямовані на розроблення інтегрованої моделі використання цифрових технологій і геоінформаційних систем у процесах гуманітарного розмінування з урахуванням факторів якості даних, просторової пріоритезації та операційної ефективності.

Методологічною основою дослідження є системний, процесний і геоінформаційний підходи. Для побудови моделі використано методи структурно – функціонального аналізу, експертного зважування, нормування показників, багатокритеріального оцінювання, просторової пріоритезації та графічної інтерпретації результатів. Вихідною базою стали міжнародні стандарти IMAS, аналітичні матеріали GICHD, національні нормативні документи України та сучасні наукові публікації у сфері ГІС, remote sensing, data management і decision support for humanitarian demining [1–17].

Під цифровими технологіями у статті розуміються програмні, апаратні та

організаційні засоби, що забезпечують цифрове представлення, передавання, оброблення, аналіз і візуалізацію даних протимінної діяльності. Під геоінформаційною системою розуміється інтегроване середовище управління просторово прив'язаними даними, яке підтримує моделювання, картографування, накладання шарів, просторові запити, аналіз доступності, пріоритезацію та формування звітності.

Для кількісного оцінювання запропоновано чотири пов'язані між собою показники: коефіцієнт цифрово-геоінформаційної зрілості оператора I_{dg} , індекс якості даних Q_d , просторовий індекс пріоритету ділянки P_s та функцію очікуваної операційної ефективності E_o . Їх поєднання дає змогу перейти від описового аналізу цифрової трансформації до кількісного порівняння управлінських сценаріїв.

У дослідженні використано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів дослідження, зокрема:

- метод системного аналізу – для дослідження структури інформаційного забезпечення гуманітарного розмінування;
- метод структурно-функціонального аналізу – для визначення ролі цифрових технологій і ГІС на різних етапах протимінної діяльності;
- методи багатокритеріального оцінювання – для формування інтегральних показників цифрово-геоінформаційної зрілості та просторового пріоритету ділянок;
- методи математичного моделювання – для побудови функції очікуваної операційної ефективності;
- методи геоінформаційного аналізу – для дослідження просторових характеристик небезпечних територій і формування критеріїв їх пріоритезації;
- метод експертного оцінювання – для визначення вагових коефіцієнтів показників моделі.

Використання системного підходу, методів геоінформаційного аналізу, математичного моделювання та багатокритеріального оцінювання дозволяє сформулювати науково обґрунтований інструментарій дослідження інтеграції цифрових технологій і ГІС у систему управління даними гуманітарного розмінування.

5. Інтегрована цифрово-геоінформаційна модель гуманітарного розмінування

Інтеграція цифрових технологій і ГІС у гуманітарному розмінуванні повинна розглядатися як багаторівнева архітектура, у якій дані проходять послідовний ланцюг перетворень: від джерел спостереження до аналітичного продукту, а від нього – до управлінського рішення. На рис. 1 відображено запропоновану архітектуру такої інтеграції. Її центральною ланкою є контур управління даними, який забезпечує стандартизацію атрибутів, геоприв'язку, валідацію, версіонування, контроль якості та синхронізацію між польовими і штабними середовищами.

На першому рівні архітектури перебувають джерела даних: супутникові знімки, ортофотоплани з БПЛА, результати нетехнічного обстеження, цифрові форми технічного обстеження, треки команд, фотофіксація, результати маркування ділянок, топографічні підоснови, адміністративні шари, відомості про населення, критичну інфраструктуру, землекористування та історичні дані щодо бойових дій. На другому рівні дані проходять валідацію, очищення, уніфікацію класифікаторів і логічний контроль. На третьому рівні виконується просторовий аналіз, формування індикаторів пріоритетності, побудова карт, аналітичних панелей і звітів. На

четвертому рівні результати інтегруються у рішення щодо пріоритезації, маршрутизації, виділення ресурсів, контролю якості та передачі звільнених територій [1, 6, 7].

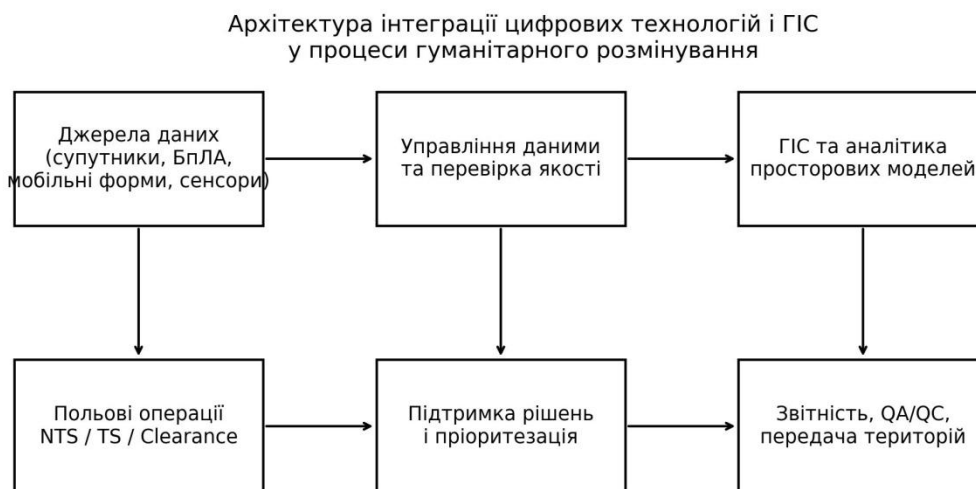


Рис. 1. Архітектура інтеграції цифрових технологій і ГІС у процесі гуманітарного розмінування

Ключовою вимогою до такої архітектури є інтероперабельність. Якщо різні оператори, державні органи та донори використовують неузгоджені цифрові форми, різні коди класифікації, різну топологію шарів або не синхронізують координатні системи, то навіть сучасне програмне забезпечення не забезпечить єдиного інформаційного поля. Тому у статті інтеграція розглядається не тільки як технічне з'єднання сервісів, а як упорядкована система (табл. 1) правил даних, атрибутивних стандартів, частоти оновлення та процедур контролю якості.

Табл. 1. Функціональні ролі цифрових технологій і ГІС на основних етапах гуманітарного розмінування

Етап процесу	Ключові цифрові інструменти	ГІС-функції	Управлінський результат
Нетехнічне обстеження	мобільні форми, геотеги, фотофіксація, бази свідчень	прив'язка джерел, кластеризація повідомлень, аналіз близькості	уточнення меж підозрюваних ділянок
Технічне обстеження	GNSS – приймачі, БПЛА, планшети, сенсорні журнали	оновлення контурів, векторизація, накладання трас і ортофото	підтвердження або скорочення небезпечних зон
Очищення	системи трекінгу, електронні журнали, польові панелі	контроль покриття, аналіз маршрутів, моніторинг прогресу	планування навантаження команд
QA/QC і передача територій	цифрові акти, дашборди, геопортал	порівняння контурів, архівація доказів, картографування статусів	прозора звітність і простежуваність рішень

Для формалізації рівня інтеграції цифрових технологій і ГІС пропонується коефіцієнт цифрово-геоінформаційної зрілості оператора I_{dg} . Він визначається як зважена сума нормованих оцінок за сімома складовими, наведеними у табл. 2 і табл. 3.

$$I_{dg} = \sum (w_i * z_i), \quad (1)$$

де $\sum w_i = 1$, z_i – нормована оцінка її складової цифрово-геоінформаційної зрілості; w_i – її ваговий коефіцієнт. Чим ближче I_{dg} до 1, тим повніше цифрові інструменти інтегровані у виробничий цикл оператора.

Табл. 2. Складові коефіцієнта цифрово-геоінформаційної зрілості оператора

Показник	Позначення	Сутність	Діапазон
Стандартизація даних	z_1	Єдність атрибутів, класифікаторів і структур форм	0–1
Просторове покриття	z_2	Частка процесів, що мають геопросторові дані	0–1
Оперативність оновлення	z_3	Швидкість синхронізації польових і штабних даних	0–1
Аналітична спроможність	z_4	Наявність моделей, дашбордів, геоаналітики	0–1
Автоматизація workflow	z_5	Ступінь автоматизації маршрутів узгодження і звітності	0–1
Інтероперабельність	z_6	Сумісність із національними та донорськими системами	0–1
Цифрова компетентність персоналу	z_7	Готовність персоналу працювати з даними та ГІС	0–1

Табл. 3. Вагові коефіцієнти складових цифрово-геоінформаційної зрілості

Складова	Вага
z_1 Стандартизація даних	0,16
z_2 Просторове покриття	0,15
z_3 Оперативність оновлення	0,14
z_4 Аналітична спроможність	0,17
z_5 Автоматизація workflow	0,12
z_6 Інтероперабельність	0,13
z_7 Цифрова компетентність персоналу	0,13

Якість даних оцінюється через індекс Q_d , що відображає придатність наборів даних для просторового аналізу, документування рішень і відтворюваності результатів.

$$Q_d = \sum (\alpha_k * q_k), \quad (2)$$

де $\sum \alpha_k = 1$, q_k – нормована оцінка компонента якості даних; α_k – його вага. Характеристика складових індексу якості даних подана у табл. 4. Низьке значення Q_d означає, що навіть за наявності сучасної цифрової платформи рішення будуть спиратися на ненадійний інформаційний базис.

Табл. 4. Компоненти індексу якості даних

Компонент якості даних	Позначення	Зміст	Вага
Точність	a_1	Геометрична і атрибутивна коректність	0,25
Повнота	a_2	Відсутність пропусків у критичних полях	0,20
Актуальність	a_3	Відповідність фактичному часовому стану	0,20
Узгодженість	a_4	Логічна сумісність наборів і шарів	0,15
Верифікованість	a_5	Наявність підтвердження джерела та історії змін	0,20

Просторова пріоритезація ділянок виконується через індекс P_s . Він дозволяє сформулювати рейтинг територій для нетехнічного або технічного обстеження, а також для очищення, коли ресурси обмежені. Основні критерії, що використовуються для розрахунку індексу, наведені у табл. 5.

$$P_s = 0,30h_1 + 0,20h_2 + 0,10h_3 + 0,25h_4 + 0,15(1 - h_s), \quad (3)$$

де h_1 – ймовірність контамінації; h_2 – соціально – економічна вразливість; h_3 – доступність; h_4 – очікуваний ефект звільнення; h_5 – рівень інформаційної невизначеності. У такій формі невизначеність зменшує підсумковий пріоритет, якщо дані недостатньо надійні.

Табл. 5. Критерії просторової пріоритезації ділянок

Критерій просторового пріоритету	Позначення	Інтерпретація	Вага
Ймовірність контамінації	h_1	Результати NTS/TS, історичні дані, ознаки боїв	0,30
Соціально – економічна вразливість	h_2	Населення, агровикористання, критична інфраструктура	0,20
Доступність	h_3	Логістична досяжність, сезонність, стан доріг	0,10
Очікуваний ефект звільнення	h_4	Користь для населення й відновлення територій	0,25
Штраф за невизначеність	h_5	Неповнота або суперечливість інформації	0,15

Для пов'язання цифрової зрілості, якості даних і оперативного ефекту пропонується функція очікуваної операційної ефективності:

$$E_0 = E_0 * (1 + \alpha I_{dg}) * (1 + \beta Q_d) * e^{(-\gamma t)} + k, \quad (4)$$

де E_0 – базова ефективність процесу за традиційної організації; α і β – коефіцієнти чутливості до цифрової зрілості та якості даних; t – нормована затримка оновлення польових даних; γ – коефіцієнт штрафу за часовий лаг; k – коефіцієнт складності місцевості.

Формула (4) демонструє, що ефект від цифрової інтеграції послаблюється за значних затримок оновлення інформації. Для ілюстрації впливу рівня цифровізації на ключові показники діяльності оператора проведено порівняння альтернативних варіантів.

вних сценаріїв організації робіт, результати якого наведено у табл. 6.

Якщо окремі цифрові інструменти впроваджуються модульно, сумарний ефект від їх використання можна подати як мультиплікативний коригувальний коефіцієнт:

$$K_t = (1 + k_m) * (1 + k_u) + (1 + k_i) * (1 + k_g) * (1 + k_d), \quad (5)$$

де k_m – ефект мобільного польового збору даних; k_u – внесок БПЛА й ортофото-матеріалів; k_i – ефект інтегрованого IMSMA/геопорталу; k_g – ефект просторової аналітики; k_d – ефект аналітичних панелей моніторингу. Орієнтовні коефіцієнти впливу окремих цифрових технологій наведено у табл. 7.

Табл. 6. Порівняння сценаріїв цифрової організації гуманітарного розмінування

Сценарій організації	I_d	Q_d	Часова затримка, t	Очікувана ефективність, E_0
Базовий паперово – таблицний	0,32	0,54	0,80	0,61
Часткова цифровізація без інтегрованої ГІС	0,51	0,68	0,55	0,85
Інтегрована цифрово – геоінформаційна модель	0,79	0,84	0,25	1,21
Розвинена модель з аналітичними панелями та БПЛА	0,88	0,89	0,18	1,33

Табл. 7. Орієнтовні коефіцієнти впливу окремих цифрових технологій

Технологія	Позначення коефіцієнта	Типовий внесок у зменшення операційного циклу
Мобільний польовий збір даних	k_m	0,05–0,12
Безпілотні платформи та ортофото	k_u	0,08–0,18
Інтегрований IMSMA/геопортал	k_i	0,06–0,15
Просторова аналітика та моделі пріоритетизації	k_g	0,10–0,22
Аналітичні панелі моніторингу	k_d	0,03–0,09

У розділі запропоновано інтегровану цифрово – геоінформаційну модель гуманітарного розмінування, що описує багаторівневу архітектуру оброблення інформації від джерел збору даних до формування управлінських рішень. Визначено основні компоненти цифрового контуру управління даними, які включають стандартизацію атрибутів, геопросторову прив'язку, валідацію, аналіз та візуалізацію результатів. Показано, що поєднання мобільного збору польових даних, безпілотних платформ, геоінформаційних систем та аналітичних інструментів створює єдине інформаційне середовище, яке підвищує обґрунтованість рішень щодо пріоритетизації, планування та контролю робіт з розмінування.

6. Формалізація системи показників оцінювання інтеграції цифрових технологій

Для кількісного опису рівня інтеграції пропонується коефіцієнт цифрово-геоінформаційної зрілості оператора. Він відображає не лише наявність окремих інструментів, а й їх фактичне включення в цикл управління процесами розміну-

вання. До складу показника включено сім складових: стандартизацію даних, повноту геопросторового покриття, оперативність синхронізації, аналітичну спроможність, рівень автоматизації workflow, інтегрованість з галузевими системами та рівень цифрової підготовки персоналу.

Поряд із зрілістю інфраструктури вирішальне значення має якість даних. У практиці гуманітарного розмінування навіть незначні розбіжності у контурах полігонів, неправильні атрибути, відсутність metadata про джерело або часову прив'язку можуть призвести до помилкової пріоритизації, дублювання завдань чи заниження обсягу робіт. Тому пропонується індекс якості даних, який враховує точність, повноту, актуальність, узгодженість і верифікованість набору даних.

Наступним аналітичним блоком є просторовий індекс пріоритету ділянки. На відміну від простого ранжування за одним параметром, цей індекс поєднує ймовірність контамінації, щільність населення або соціально-економічну вразливість, близькість до критичної інфраструктури, транспортну доступність, очікувану суспільно-економічну віддачу від звільнення території та штраф за інформаційну невизначеність. Така логіка дозволяє переходити від декларативної пріоритизації до числового ранжування, придатного для формування черги завдань.

Для оцінювання практичного ефекту інтеграції розроблено функцію очікуваної операційної ефективності, яка пов'язує базову продуктивність робіт із цифрово-геоінформаційною зрілістю, якістю даних, часовою затримкою оновлення інформації та складністю місцевості. Ця функція не претендує на універсальне фізичне моделювання продуктивності, але є придатним управлінським інструментом для порівняння альтернативних сценаріїв цифрової організації робіт.

Для ілюстрації практичних можливостей моделі розглянемо умовний приклад оператора, для якого оцінки складових цифрово-геоінформаційної зрілості становлять: v ; $z_2 = 0,75$; $z_3 = 0,68$; $z_4 = 0,82$; $z_5 = 0,60$; $z_6 = 0,70$; $z_7 = 0,78$.

Тоді відповідно до формули (1) одержуємо:

$$I_{dg} = 0,16 * 0,80 + 0,15 * 0,75 + 0,14 * 0,68 + 0,17 * 0,82 + 0,12 * 0,60 + 0,13 * 0,70 + 0,13 * 0,78 = 0,739. \quad (6)$$

Якщо оцінки якості даних становлять $q_1 = 0,88$; $q_2 = 0,76$; $q_3 = 0,70$; $q_4 = 0,83$; $q_5 = 0,79$, то за формулою (2):

$$Q_d = 0,125 * 0,88 + 0,20 * 0,76 + 0,20 * 0,70 + 0,15 * 0,83 + 0,20 * 0,79 = 0,794. \quad (7)$$

Для ділянки з показниками $h_1 = 0,84$; $h_2 = 0,73$; $h_3 = 0,65$; $h_4 = 0,81$; $h_5 = 0,22$ просторовий індекс пріоритету за формулою (3) дорівнює:

$$P_s = 0,30 * 0,84 + 0,20 * 0,73 + 0,10 * 0,65 + 0,25 * 0,81 + 0,15 * (1 - 0,22) = 0,782. \quad (8)$$

Таким чином, за шкалою від 0 до 1 отримана ділянка належить до групи високого пріоритету. Це означає, що за інших рівних умов вона повинна бути включена до першої хвилі робіт або до розширеного технічного обстеження.

Припустимо, що базова ефективність E_0 дорівнює 0,72, коефіцієнти $\alpha = 0,45$, $\beta = 0,30$, $\gamma = 0,65$ затримка оновлення $t = 0,28$, а коефіцієнт складності місцевос-

ті $k = 0,93$. Тоді:

$$E_0 = 0,72 * (1 + 0,45 * 0,739) * (1 + 0,30 * 0,794) * e^{(-0,65 * 0,28)} * 0,93 = 1,128. \quad (9)$$

Одержане значення свідчить, що інтегрована цифрово-геоінформаційна модель забезпечує приріст ефективності відносно базового рівня. На рис. 2 показано, як із підвищенням I_{dg} цей ефект зростає, але за значної затримки оновлення даних частина цифрового потенціалу втрачається.

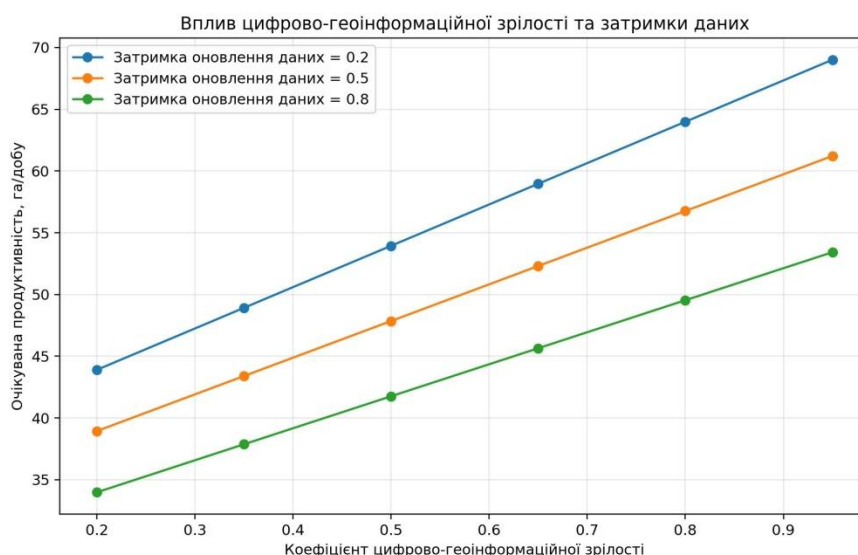


Рис. 2. Вплив цифрово-геоінформаційної зрілості та затримки даних на очікувану продуктивність

У розділі здійснено формалізацію системи показників, що дозволяють кількісно оцінювати рівень інтеграції цифрових технологій і геоінформаційних систем у діяльність операторів гуманітарного розмінування. Запропоновано коефіцієнт цифрово-геоінформаційної зрілості оператора, індекс якості даних та просторовий індекс пріоритету ділянок. Їх використання забезпечує можливість об'єктивного порівняння різних сценаріїв організації робіт, підвищує прозорість процесів планування та створює підґрунтя для застосування моделей підтримки прийняття рішень у системі інформаційного менеджменту протимінної діяльності.

7. Оцінювання ефективності інтеграції цифрових технологій

У попередніх розділах було обґрунтовано інтегровану цифрово-геоінформаційну модель гуманітарного розмінування та сформовано систему кількісних показників, що характеризують рівень її впровадження. Разом з тим практична цінність запропонованого підходу визначається не лише його структурною завершеністю, а й можливістю оцінювання реального впливу цифрової інтеграції на ефективність виконання робіт.

У зв'язку з цим актуальним є аналіз залежності операційної продуктивності від рівня цифрово-геоінформаційної зрілості, якості даних та оперативності їх оновлення. Це дозволяє перейти від концептуального опису цифрової трансформації до її кількісного оцінювання та обґрунтування управлінських рішень у сфері гуманітарного розмінування.

На рис. 2 наведено залежність очікуваної продуктивності від коефіцієнта цифрово-геоінформаційної зрілості та затримки оновлення даних. Як видно, при однаковій базовій продуктивності ефект від цифровізації суттєво знижується, якщо польові спостереження потрапляють у штабну аналітику із великим часовим лагом. Отже, цифрова інтеграція має оцінюватися не лише за фактом наявності платформи, а й за швидкістю циркуляції інформації.

На рис. 3 показано матрицю просторового пріоритету ділянок, де комбіновано ймовірність контамінації та соціально – економічну вразливість. Така матриця може використовуватися як попередній аналітичний модуль для районування територій, після чого остаточна черговість робіт уточнюється з урахуванням доступності, типу місцевості, сезонності та ресурсних обмежень.

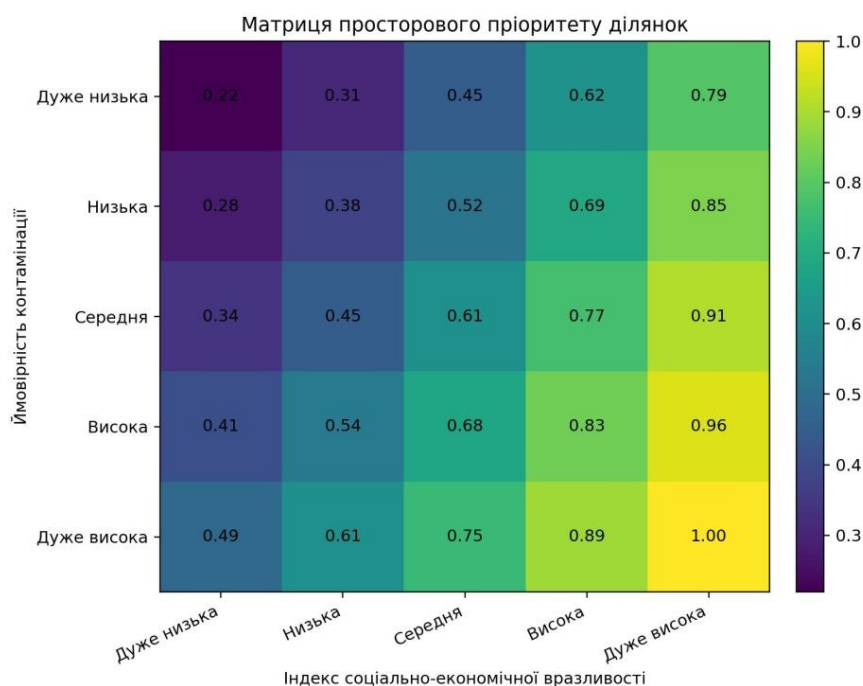


Рис. 3. Матриця просторового пріоритету ділянок залежно від ймовірності контамінації та соціально-економічної вразливості

На рис. 4 відображено орієнтовний внесок окремих цифрових інструментів у скорочення тривалості операційного циклу. Найбільший системний ефект дає просторово – аналітичний контур, який об'єднує стандартизовані польові дані, геопортал, дашборди та маршрутизацію рішень, тоді як ізольоване впровадження лише одного інструмента забезпечує обмежений ефект.

Для оцінювання стійкості моделі до невизначеності пропонується коефіцієнт інформаційного ризику:

$$R_i = 1 - Q_d * (1 - t), \quad (10)$$

Чим ближче R_i до 1, тим вищий ризик того, що управлінські рішення прийматимуться на основі просторово неповних або застарілих даних. Для наведеного вище прикладу $R_i = 1 - 0,794 * (1 - 0,28) = 0,428$. Це відповідає помірному інформаційному ризику і вказує на потребу зменшення часової затримки синхронізації польових матеріалів.

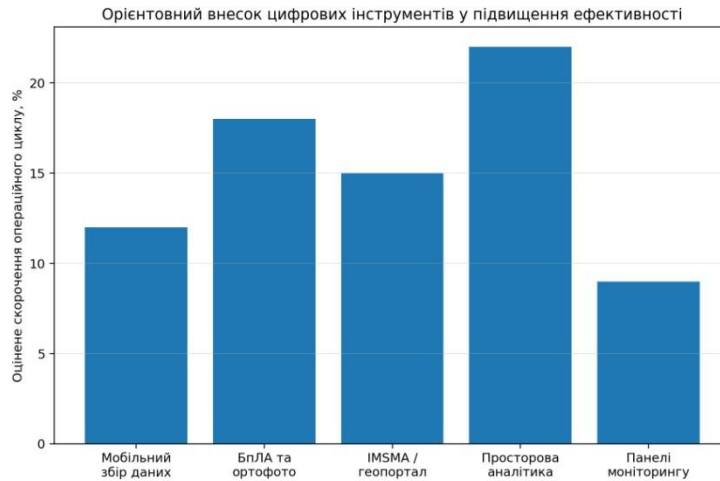


Рис. 4. Орієнтовний внесок окремих цифрових інструментів у скорочення тривалості операційного циклу

Оскільки гуманітарне розмінування виконується в умовах ресурсних обмежень, доцільно використовувати також задачу розподілу ресурсів за пріоритетними ділянками:

$$\max Z = \sum (x_j * P_{sj} * E_{0j}), \text{ за умови } \sum (c_j x_j) \leq B, \dots x_j \in \{0,1\}, \quad (11)$$

де x_j – рішення про включення j -ї ділянки до плану робіт; c_j – ресурсна вартість завдання; B – доступний ресурсний бюджет. Формула (11) не замінює повноцінних оптимізаційних моделей, але є придатною для штабного обґрунтування черговості завдань. Оцінка очікуваних змін ключових показників ефективності після впровадження інтегрованої цифрово-геоінформаційної моделі наведена у табл. 8.

Табл. 8. Орієнтовні зміни ключових показників після впровадження інтегрованої цифрово-геоінформаційної моделі

Показник результативності	До інтеграції	Після інтеграції	Зміна, %
Середній час оброблення польового звіту	48 год	12 год	-75,0
Частка ділянок із повним metadata-пакетом	46	87	+89,1
Середня похибка контуру небезпечної ділянки	1,00	0,62	-38,0
Частка дубльованих виїздів	14	6	-57,1
Частка задач, пріоритезованих на основі просторових критеріїв	28	82	+192,9

Проведений аналіз показав, що інтеграція цифрових технологій і геоінформаційних систем може суттєво підвищити ефективність процесів гуманітарного розмінування. Найбільший позитивний ефект спостерігається за умов високої цифрово-геоінформаційної зрілості операторів, належної якості даних та мінімальної затримки оновлення інформації. Використання просторової аналітики, безпілотних платформ, геопорталів і аналітичних панелей дозволяє скоротити тривалість операційного циклу, підвищити точність пріоритезації ділянок і забезпечити більш раціональний розподіл ресурсів під час планування робіт з розмінування.

8. Обговорення результатів дослідження процесів гуманітарного розмінування

Отримані результати дають підстави стверджувати, що цифрова трансформація гуманітарного розмінування повинна оцінюватися не за кількістю придбаного програмного забезпечення, а за ступенем перетворення даних на рішення. Якщо цифрові форми збору інформації не інтегровані з ГІС, а ГІС не інтегрована з плануванням виїздів, то продуктивність системи залишається близькою до традиційної паперово-табличної моделі. Натомість саме пов'язання польового збору даних, геоаналітики, картографування і звітності формує ефект масштабу та зменшує транзакційні втрати часу.

З погляду управління ризиками інтеграція цифрових технологій і ГІС має ще один важливий наслідок: вона зменшує невизначеність. У гуманітарному розмінуванні невизначеність проявляється у неповноті історичних даних, неузгодженості свідчень, розмитості меж підозрюваних небезпечних районів, затримках документування та втраті просторового контексту між етапами NTS, TS і clearance. Геоінформаційна інтеграція дозволяє накопичувати, уточнювати й просторово перевіряти свідчення, а цифрові сліди польових операцій підвищують прозорість доказової бази [2 –4; 8].

Разом із тим цифровізація не може розглядатися як безумовно позитивний процес без супутніх організаційних змін. Вона висуває підвищені вимоги до data governance, кібербезпеки, навчання персоналу, резервного копіювання, верифікації польових координат і дисципліни введення даних. Низька якість первинних записів або відсутність процедур валідації можуть призвести до «цифровізації помилки», коли хибні дані швидко масштабуються по всій системі. Саме тому індекс якості даних у запропонованій моделі має самостійне значення й не може підмінятися лише показником технологічної оснащеності.

Порівняння з міжнародними підходами дозволяє зробити висновок, що найбільш перспективною для українських умов є архітектура, у якій національна або відомча система інформаційного менеджменту сумісна зі стандартами IMAS, підтримує відкритий геопросторовий обмін у межах дозволеного режиму доступу, інтегрує польові мобільні форми й аналітичні панелі, а також забезпечує зберігання історії змін контурів небезпечних територій. Така архітектура створює основу не тільки для оперативного управління, а й для аналітики ефективності програм і відновлення територій [6, 7, 17].

Практичне впровадження запропонованої моделі доцільно здійснювати поетапно. На першому етапі формуються єдині класифікатори даних, цифрові форми польового збору та правила геоприв'язки. На другому етапі створюється інтегрований геопортал із ролями доступу, дашбордами та процедурами валідації. На третьому етапі впроваджуються модулі просторової пріоритизації, маршрутизації та аналітики результативності. На четвертому етапі система доповнюється механізмами міжвідомчого обміну, архівації доказової бази та оцінювання ефективності операторів за КРІ. Така послідовність дозволяє уникнути ситуації, коли складне програмне забезпечення впроваджується до появи зрілих даних і управлінських процедур.

Отже, обговорення полягає в тому, що цифрова трансформація гуманітарного розмінування має розглядатися як інституційний процес. Її результат визначається не стільки вартістю придбаних платформ, скільки здатністю організації перетворювати геопросторові дані на доказові управлінські рішення, синхронізовані з вимогами стандартів і потребами відновлення територій.

9. Висновки

1. У результаті проведеного дослідження розроблено інтегровану цифрово-геоінформаційну модель організації процесів гуманітарного розмінування, яка поєднує джерела отримання просторових даних, інструменти їх цифрового опрацювання та аналітичні засоби підтримки управлінських рішень. Запропонована модель відображає багаторівневу архітектуру управління інформаційними потоками, що включає етапи збору польових даних, їх валідації, просторового аналізу, картографування та подальшої інтеграції у систему планування робіт. Реалізація такого підходу дозволяє перейти від фрагментарного використання окремих цифрових інструментів до створення єдиного інформаційно –аналітичного середовища, у межах якого забезпечується узгодженість даних, підвищується точність визначення меж небезпечних територій та покращується обґрунтованість управлінських рішень у сфері протимінної діяльності.

2. Запропоновано систему кількісних показників оцінювання рівня інтеграції цифрових технологій і геоінформаційних систем у діяльність операторів гуманітарного розмінування. До складу цієї системи включено коефіцієнт цифрово – геоінформаційної зрілості оператора, індекс якості даних та просторовий індекс пріоритету ділянок. Використання зазначених показників дозволяє формалізувати процес оцінювання ефективності інформаційного забезпечення протимінної діяльності та перейти від описового аналізу до кількісного порівняння різних сценаріїв організації робіт. Запропонований підхід створює методичну основу для оцінювання рівня цифровізації операцій розмінування, визначення сильних і слабких сторін інформаційної інфраструктури та обґрунтування напрямів її подальшого розвитку.

3. Результати проведеного моделювання та аналітичних розрахунків засвідчили, що підвищення рівня інтеграції цифрових технологій і геоінформаційних систем, покращення якості просторових даних та скорочення часових затримок їх оновлення суттєво впливають на ефективність організації гуманітарного розмінування. Використання інтегрованого цифрового середовища сприяє підвищенню точності визначення контурів небезпечних територій, покращенню процедур просторової пріоритезації ділянок та оптимізації планування робіт. У практичному вимірі це проявляється у більш раціональному розподілі ресурсів операторів, скороченні тривалості операційного циклу виконання завдань і підвищенні загальної результативності заходів із очищення територій від вибухонебезпечних предметів.

Література

1. International Mine Action Standards. Information management in mine action (IMAS 05.10).
2. International Mine Action Standards. Land release (IMAS 07.11).
3. International Mine Action Standards. Non-technical survey (IMAS 08.10).
4. International Mine Action Standards. Technical survey (IMAS 08.20).
5. International Mine Action Standards. Clearance requirements (IMAS 09.10).
6. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Information management in mine action.
7. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Better information for better results: The impact of IMSMA Core.
8. Geneva International Centre for Humanitarian Demining, University of Gene-

va. Geographic information systems in mine action.

9. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. Geneva : International Organization for Standardization, 2018.

10. Saliba A., Sulis W., Oueidat M. Bridging human expertise with machine learning and GIS for mine type prediction and classification. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2024. Vol. 13. № 7. Article 259. doi: 10.3390/ijgi13070259

11. Camacho-Sanchez C., Caro F., Martinez-de-Dios J. R. Humanitarian demining for the clearance of landmine-contaminated areas: a decision support model for search planning. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. doi: 10.1016/j.seps.2023.101611

12. Про протимінну діяльність в Україні : Закон України від 06.12.2018 № 2642 –VIII. База даних «Законодавство України». Верховна Рада України.

13. Стандартна оперативна процедура 08.20/ДСНС. Порядок проведення органами та підрозділами цивільного захисту технічного обстеження територій.

14. Стандартна оперативна процедура 09.10/ДСНС. Порядок проведення органами та підрозділами цивільного захисту очищення (розмінування) територій, забруднених вибухонебезпечними предметами. Оперативне реагування.

15. Попов М. О., Станкевич С. А., Мосов С. П. Концепція геоінформаційної платформи для виявлення і картування мін та інших вибухонебезпечних об'єктів з використанням БПЛА. Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2024. № 4.

16. Геоінформаційні системи в гуманітарному розмінуванні: інновації та перспективи. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*.

17. National Mine Action Strategy of Ukraine for the period up to 2033.

18. Saliba A., Claramunt C., Zaki C., Tout K. Bridging Human Expertise with Machine Learning and GIS for Mine Type Prediction and Classification. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2024. Vol. 13(7). P. 259. doi: 10.3390/ijgi13070259

19. Hutsul T., Lishchuk I. M., Hladii R. M., Dmukh P. P. Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon*. 2024. Vol. 10(7). P. e29142. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29142

20. Мироненко М., Нестеренко С., Рай А., Фролов О. Геоінформаційне забезпечення розмінування територій Харківської області. Містобудування та територіальне планування. 2023. № 81. С. 56–63.

21. Ковальов П. А., Громов В. С. Роль стандартних операційних процедур (SOP) в управлінні якістю геопросторових даних при гуманітарному розмінуванні. *Вісник геодезії та картографії*. 2023. № 4(91). С. 45–52.

22. Зайцев Є. О. Інтеграція даних дистанційного зондування землі та ГІС – моделювання для нетехнічного обстеження територій, забруднених ВВП. *Геоінформатика*. 2023. № 3(87). С. 15–24.

23. Knežić S., Mladineo N. GIS-based decision support system for priority setting in humanitarian mine action. *International Journal of Geographical Information Science*. 2006. Vol. 20. № 5. P. 565–588. doi: 10.1080/13658810600607303

24. Mentus I., Yasko V., Saprykin I. Methods of mine detection for humanitarian demining: survey. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2024. Vol. 11. № 3. doi: 10.36023/ujrs.2024.11.3.271

Y. Didovets, PhD, Lecturer of the Department
O. Kozhemiaka, Senior Lecturer of the Department
O. Lazorenko, Lecturer of the Department
Yu. Mykhailovska, PhD, Senior Researcher of the Department
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

INTEGRATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS INTO HUMANITARIAN DEMINING PROCESSES

The article substantiates a scientific and applied approach to integrating digital technologies and geographic information systems into humanitarian demining processes. It shows that moving from fragmented use of individual digital tools to a coherent digital geospatial ecosystem significantly improves decision quality during non-technical survey, technical survey, clearance, quality assurance and land handover. The key components of such integration are identified as standardized digital data, geospatial models, satellite and aerial imagery, unmanned platforms, mobile field data collection tools, analytical dashboards, spatial prioritization algorithms and decision-support systems. A mathematical framework is proposed for assessing the digital-geospatial maturity of an operator, prioritizing hazardous areas and forecasting operational productivity depending on data quality, information latency, contamination uncertainty and terrain accessibility. It is argued that the practical effect of integration lies in reducing the time needed for field-data processing, increasing the precision of hazardous-area boundaries, decreasing duplicated routes, improving resource allocation and strengthening reporting transparency. The scientific novelty lies in the development of an integrated model combining a digital-geospatial maturity coefficient, a data –quality index, a spatial-priority index and an expected operational-efficiency function. The practical significance of the results lies in the possibility of applying the proposed provisions to humanitarian demining management, personnel training, digital architecture design and information-management improvement under conditions of large-scale contamination by explosive ordnance in Ukraine. The model is adaptable to national and operator-level workflows.

Keywords: digital technologies, geographic information systems, humanitarian demining, spatial analysis, unmanned platform

References

1. International Mine Action Standards. Information management in mine action (IMAS 05.10).
2. International Mine Action Standards. Land release (IMAS 07.11).
3. International Mine Action Standards. Non –technical survey (IMAS 08.10).
4. International Mine Action Standards. Technical survey (IMAS 08.20).
5. International Mine Action Standards. Clearance requirements (IMAS 09.10).
6. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Information management in mine action.
7. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Better information for better results: The impact of IMSMA Core.
8. Geneva International Centre for Humanitarian Demining, University of Geneva. Geographic information systems in mine action.
9. ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
10. Saliba, A., Sulis, W., Oueidat, M. (2024). Bridging human expertise with machine learning and GIS for mine type prediction and classification. *ISPRS International Journal of Geo –Information*, 13, 7, 259. doi: 10.3390/ijgi13070259
11. Camacho-Sanchez, C., Caro, F., Martinez-de-Dios, J. R. (2023). Humanitarian demining for the clearance of landmine –contaminated areas: a decision support model for search planning. *Socio-Economic Planning Sciences*. doi: 10.1016/j.seps.2023.101611

12. Pro protyminnu diialnist v Ukraini : Zakon Ukrainy vid 06.12.2018 № 2642 – VIII // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy.

13. Standartna operatyvna protsedura 08.20/DSNS. Poriadok provedennia orhanamy ta pidrozdilamy tsyvilnoho zakhystu tekhnichnoho obstezhennia terytorii.

14. Standartna operatyvna protsedura 09.10/DSNS. Poriadok provedennia orhanamy ta pidrozdilamy tsyvilnoho zakhystu ochyshchennia (rozminuvannia) terytorii, zabrudnenykh vybukhonebezpechnymy predmetamy. Operatyvne reahuvannia.

15. Popov, M. O., Stankevych, S. A., Mosov, S. P. (2024). Kontsepsiia heoinformatsiinoi platformy dlia vyivlennia i kartuvannia min ta inshykh vybukhonebezpechnykh ob'ektiv z vykorystanniam BPLA. Radioelektronni i kompiuterni systemy, 4.

16. Heoinformatsiini systemy v humanitarnomu rozminuvanni: innovatsii ta perspektyvy. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka.

17. National Mine Action Strategy of Ukraine for the period up to 2033.

18. Saliba, A., Claramunt, C., Zaki, C., Tout, K. (2024). Bridging Human Expertise with Machine Learning and GIS for Mine Type Prediction and Classification. ISPRS International Journal of Geo-Information, 13(7), 259. doi: 10.3390/ijgi13070259

19. Hutsul, T., Lishchuk, I. M., Hladii, R. M., Dmukh, P. P. (2024). Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. Heliyon, 10(7), e29142. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29142

20. Myronenko, M., Nesterenko, S., Rai, A., Frolov, O. (2023). Heoinformatsiine zabezpechennia rozminuvannia terytorii Kharkivskoi oblasti. Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia, 81, 56–63.

21. Kovalov, P. A., Hromov, V. S. (2023). Rol standartnykh operatsiinykh protsedur (SOP) v upravlinni yakistiu heoprosorovykh danykh pry humanitarnomu rozminuvanni. Visnyk heodezii ta kartohrafii, 4(91), 45–52.

22. Zaitsev, Ye. O. (2023). Intehratsiia danykh dystantsiinoho zonduvannia zemli ta HIS –modeliuvannia dlia netekhnichnoho obstezhennia terytorii, zabrudnenykh VNP. Heoinformatyka, 3(87), 15–24.

23. Knežić, S., Mladineo N. (2006). GIS-based decision support system for priority setting in humanitarian mine action. International Journal of Geographical Information Science, 20, 5, 565–588. doi: 10.1080/13658810600607303

24. Mentus, I., Yasko, V., Saprykin, I. (2024). Methods of mine detection for humanitarian demining: survey. Ukrainian Journal of Remote Sensing, 11, 3. doi: 10.36023/ujrs.2024.11.3.271

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 31.05.2026