

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ МІН НА ПОЛЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ЗНАРЯДДЯ.

О. О. Опришко, кандидат технічних наук, доцент

Н. О. Пасічник, кандидат сільськогосподарських наук, доцент

С. А. Шворов, доктор технічних наук, доцент

М. О. Кіктєв, кандидат технічних наук, доцент

А.О. Дудник, кандидат технічних наук, доцент

В. І. Сович, студент магістратури

Національний університет біоресурсів і природокористування

України

E-mail: ozon.kiev@gmail.com

Анотація. *Робота присвячена питанню гуманітарного розмінування сільськогосподарських угідь. Відмінністю гуманітарного розмінування від військового є як відсутність жорстких термінів щодо проведення заходів, так і порівняно малими людськими та технічними ресурсами і великими площами моніторингу. Особливо складна ситуація склалася на маргінальних землях, які погано відстежуються місцевим населенням і відповідно встановлення мінних полів може виявитись несподіваним для аграріїв. Маргінальні землі є потенційним джерелом енергетичної сировини для біоенергетики, значення якої зростає в сучасних умовах руйнації традиційних логістичних ланцюгів постачання енергетичних ресурсів. Метою роботи стала розробка методики експрес моніторингу щодо наявності мін на полях. Оперативне дослідження великих площ можливе саме завдяки технологіям дистанційного моніторингу, зокрема тепловізійному. Було перевірено гіпотезу щодо можливості ідентифікації мін завдяки відмінності щодо динаміки нагрівання та охолодження вибухонебезпечних предметів під сонячним опромінюванням впродовж доби. Дослідження проводились на базі полігону військової кафедри НУБіП України. Досліджувались протитанкові міни ТМ-62М, фугасні снаряди калібр 125 мм тощо. При постановці експерименту частина боєприпасів згідно настанов з мінування було закопано в ґрунт на глибину 2-5 см.*

Було встановлено, що для тепловізійного моніторингу придатні лише сонячні дні, а зразки встановлені в тіні не було ідентифіковано. Максимальна різниця температур для мін була зафіксована з ранку, а для масивних снарядів надвечір. Щодо закопаних мін та снарядів при тепловізійному моніторингу фіксувалися виключно заглиблення та бугори на ділянці. Виходячи з низької вибірковості

тепловізійного моніторингу для індикації мін, розкладених механічним способом на ґрунті, було використано нейронні мережі. Були отримані позитивні результати.

Ключові слова: *тепловізійний моніторинг, гуманітарне розмінування, БПЛА, нейронні мережі, навчання, пошук місця розташування, аналіз графічних об'єктів*

Актуальність. Проблема гуманітарного розмінування, а також пошук боєприпасів, що не розірвалися (НВБ) є нині дуже актуальними. За даними оглядових робіт М. К. Habib (2008) [1] та Carolay Camacho-Sanchez et al (2023) [2] в світі кількість встановлених та неактивованих мін становить десятки мільйонів одиниць. Оскільки проблема знешкодження мін є вкрай актуальною з часів другої світової війни, певним чином було відпрацьовано технології розмінування, проте маргінальним землям традиційно приділяли менше уваги. У 21 сторіччі як потенційна загроза логістичним ланцюгам поряд з орієнтацією ряду країн на відновлювальні джерела енергії призвела до зростання цікавості щодо біогазу та паливних брикетів. При побудові стратегій розвитку енергетичної незалежності громад за даними Giuseppe Pulighe et al (2019) [3] з Індії, Sheikh Adil Edrisi et al (2022) [4] з ЄС та S.A. Shvorov et al (2021) [5] в Україні підкреслюють, що навіть в умовах зростання потреби в продовольстві саме маргінальні землі є реальним джерелом для вирощування біоенергетичної сировини.

Навіть в районах відносно віддалених від фронту чи ліній бойового зіткнення загроза появи мінних полів, у тому числі на маргінальних землях є достатньо значною. За даними Matthew Bolton (2015) [6] для сучасних армій змінюється концепція мінної війни, коли від мінних загороджень переходять до мінних просторів. Це пояснюється тим, що на озброєнні армії та парамілітарних формувань масово з'явилися колісна та гусенична техніка, здатна відносно легко пересуватися по бездоріжжю, в наслідок чого стали можливим глибокі прориви мобільних підрозділів. Для парирування цієї загрози армії застосовують мінні загородження, що просто розкладаються на ґрунті. Для цього розроблено спеціальне устаткування, а саме Tracked minelayer GMZ-3 (USSR), Minenverleger 85 (BRD) тощо. Такі загородження відносно погано виявляються саме на маргінальних землях, оскільки

вони, як правило, є віддаленими від населених пунктів і відповідно їх встановлення місцевими мешканцями візуально не фіксується.

Враховуючи нагальну потребу в введенні в аграрні практики маргінальних земель для потреб біогенерації, розробка методики експрес моніторингу щодо наявності мін на полях є актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У війнах 20-го сторіччя мінами передусім посилювали лінію оборони і відповідно для підвищення її ефективності міни закопувались в ґрунт і маскувались різноманітними засобами. Відповідно з дистанційно використанням супутників та літаків визначали ймовірні локації мінних полів, виходячи з розташування фортифікаційних споруд. Наземні засоби моніторингу передусім розраховувались на закопані міни. Для цього було розроблено багато фізичних та біологічних методів, описаних в оглядовій роботі Yossef Kabessa et al (2016) [7], де показано основні проблеми, а саме погана масштабованість фізичних методів і вибірковість (електромагнітна індукція тощо) та низька точність біологічних методів пошуку. Авторами не виділено єдиний найбільш перспективний підхід для моніторингу мін, оскільки усі методи розвиваються і вдосконалюються. Розглянемо ці методи.

Біологічні методи засновані на використанні запаху вибухівки. У роботі Adee Schoon et al (2022) [8] описано досвід використання собак для пошуку мін в Камбоджі, де були отримані позитивні результати, проте час на підготовку тварин є чималим і додатково потрібний кінолог, що буде керувати твариною. До того ж закинуті в наслідок бойових дій поля заростають чагарниками, в яких працювати собакам фізично важко. Оскільки комахи позбавлені таких обмежень, то проводились роботи щодо їх використання для індикації вибухонебезпечних предметів. Так, у роботі N. Ross et al (2021) [9] оцінювали мед від спеціально адаптованих бджіл на наявність залишків вибухівки для оцінки кількості мін. Цю технологію розвинули в роботі Janja Filipi et al (2022) [10], де з допомогою вебкамер відслідковували напрям польоту бджіл для виявлення напряму вибухонебезпечних предметів. Такий підхід є цікавим, проте вимагає значного часу і його точність для герметичних боєприпасів може бути сумнівною. Для вуличних умов Aharon J.

Agranat et al (2021) [11] було розроблено спеціальний біосенсор, придатний для протидії терористам, що маскують вибухівку в одязі. Попри високу вибірковість масштабування цієї технології для площ в кілька десятків чи сотень гектарів навіть при використанні БПЛА за рахунок допустимої відстані моніторингу в кілька метрів буде складним з організаційних та суто технічних причин.

Фізичні методи включають активне електромагнітне зондування поверхневого шару ґрунту за допомогою електромагнітних імпульсів та синусоїдальних полів (такі як металошукачі в діапазоні 2 - 50 кГц та георадар в діапазоні 100 - 900 МГц), використання сейсмічних хвиль та нейтронного випромінювання, реєстрацію аномалій і фракцій інших фізичних методів. Фізичні методи, як правило, розроблялися для потреб військових, яким необхідно за максимально короткий термін знайти чи знешкодити міні на певних ділянках. Гуманітарне розмінування не має жорстких обмежень за часом чи погодними умовами, проте йому притаманні великі площі і намагання задіяти мінімум руйнувань.

На жаль, пошук вибухонебезпечних пристроїв традиційними фізичними методами пов'язаний з впливом значних похибок. Як показано в роботі S. M. Shrestha and I. Arai (2003) [12] похибки викликані масовою присутністю на дослідних ділянках сторонніх металевих предметів, що фіксуються детекторами. Для вирішення цього питання в розробці X. Yan et al (2009) [13] запропоновано метод металевого еквіваленту, що дозволяє виділити металеві предмети за масою та складом. Аналогічний підхід показано в роботі O.A.Abdel-Rehim et al (2016) [14], де індикацію здійснювали на базі тензору поляризованості магнітного диполя (The magnetic dipole polarizability tensor), завдяки чому визначали розмір, вагу та матеріал об'єкту. З метою зменшення кількості хибних результатів можливо поєднати кілька різних сенсорів в єдиному пристрої, як показано в роботі H. Frigui et al (2010) в [15], проте і в цьому випадку потрібно забезпечити присутність обладнання безпосередньо на дослідній ділянці. З урахуванням масштабів полів постає питання енергозабезпечення, оскільки витрати енергії чималі, для наземного обладнання частковим рішенням може стати імпульсні режими роботи детекторів, як показано H. Çıtak (2020) в [16].

Тобто прилади, розроблені для військових, хоч і мають високу чутливість, виявляються дуже неспритними та повільними, часто порушуються та потребують фізичної присутності на мінному полі, що створює значні ризики для життя та майна особового складу та техніки. Для гуманітарного розмінування потрібно розробляти як організаційні, так і нові методики моніторингу, так в роботі Carolay Camacho-Sanchez et al (2023) [17] з аналізу практичного досвіду показано, що необхідно розробляти навіть оптимальні маршрути бригад для моніторингу завдяки надто великим обсягам робіт. У роботі Guillermo Rein et al (2017) [18] для потреб гуманітарного розмінування навіть пропонується контрольоване випалювання місцевості, при практичному використанні автори відзначили, що відбувались підриви пластикових мін, що є небажаним. Окрім цього факту випалення значних площ може спричинити і екологічні проблеми.

Отже, виходячи з аналізу літературних джерел, можна зробити висновок про необхідність розробки нових нетрадиційних методів для гуманітарного розмінування, які можуть масштабуватись на великі площі і діяти в умовах перешкод, обумовлених наявністю на полях сторонніх металевих об'єктів. За досвідом війни в Україні було зроблено припущення про можливість ідентифікації мін та снарядів на полях з допомогою тепловізорів. Фізично метод базується на тому, що теплоємність металу і вибухівки відрізняється від ґрунту і, відповідно, при нагріванні впродовж дня під сонячним промінням температура цих об'єктів буде різною, що можна зафіксувати в тому числі дистанційно. За даними з інтернет джерел волонтерів з фронту максимальна різниця могла фіксуватись надвечір у сутінках та вночі. Такий підхід при умові застосування тепловізорів, встановлених на БПЛА, може бути потенційно придатним і для великих площ аграрних підприємств. Для перевірки цієї ідеї було поставлено натурний експеримент.

Мета дослідження - розробка методики експрес моніторингу щодо наявності мін на полях.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проводилися 8-9 вересня 2023 року на базі військової кафедри Національного університету біоресурсів і природокористування України. На полігоні кафедри фахівцями було встановлено

протитанкові міни ТМ-62М із вилюченими детонаторами як безпосередньо на ґрунті, так і закопані на глибину 2-5 см, згідно настанов з мінно-вибухової справи. Обидва зразки перебували під прямим сонячним опромінюванням. Паралельно досліджувались тані зразки (рис.1):

- Постріл 125-мм навчально-тренувального осколково-фугасного танкового снаряда (вага 23 кг). 2 одиниці під прямими сонячними променями, де 1 зразок безпосередньо на поверхні а інший закопали на глибину 2- 5 см.
- Навчально-тренувальні гранати Ф1 (вага 0,5 кг). 3 одиниці - на поверхні, та закопані на глибину 2-5 см, а також зразок в тіні.
- Гільзи від снарядів 23 та 30 мм (як можливого металевого забруднення)



Рис. 1 Полігон військової кафедри НУБіП із імітаторами вибухонебезпечних пристроїв де:

1 та 2 – локації закопаних протитанкових мін та осколково-фугасного снаряду, відповідно

Впродовж 8 вересня 2023 року була сонячна безхмарна погода. За даними метеорологічних спостережень пориви вітру становили 2-3 м/с. Дослідні об'єкти було встановлено о 10 ранку. Дослідження продовжувались з 9 до 22 години. З використанням пенетрометру безконтактним способом фіксували температури об'єктів. Поряд із температурою поверхні визначали інтенсивність сонячного випромінювання (рис. 2). Тепловізійні дослідження здійснювали із використанням приладу TROTECT модель IC085LV.



Рис. 2 Проведення тепловізійних досліджень о 22 годині (ліворуч) виміри сонячного випромінювання о 12 годині (праворуч)

Результати досліджень та їх обговорення. При проведенні експериментальних досліджень ідентифікацію міни чи снаряду, закопаних в ґрунт на глибину в 2-5 см, здійснити не вдалось. При тепловізійній зйомці аномалії для заглиблених боєприпасів фактично фіксувались нерівномірність саме рельєфу (рис.3). Ці данні певним чином корелюють з даними інших дослідників, отриманих з мережі інтернет (рис. 4)

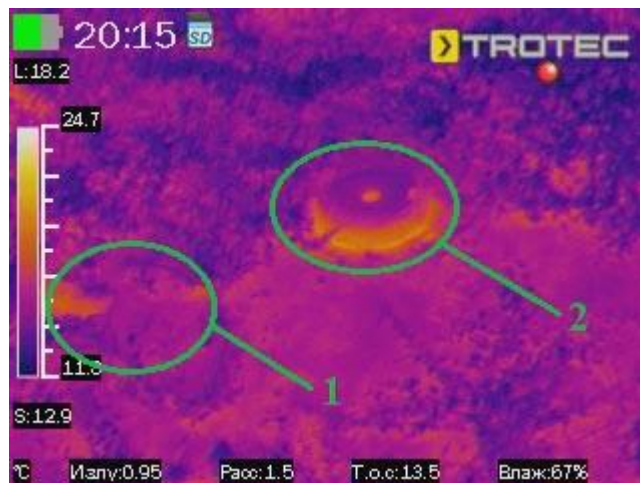


Рис. 3 Тепловізійна зйомка в 20.15 8.09.2023 протитанкових мін, де цифрою 1 та 2 позначено місце, де закопана міна та міна на поверхні, відповідно



Рис. 4 Знімки поля із воронками від вибухів мін та снарядів у видимому та тепловізійному діапазонах спектру ліворуч та праворуч, відповідно

(Джерело

https://censor.net/ru/video_news/3437668/vsu_ispolzuyut_teplovizory_dlya_obnaruzheniya_min_cnn_video)

Тобто, для закопаних згідно настанов з мінно-вибухової справи боєприпасів моніторинг тепловізійними засобами виявився неефективним. Аналогічні результати на полігоні було отримано і для фугасного снаряду, який не фіксувався тепловізійніми засобами.

Отримані результати моніторингу об'єктів наведено в таблиці.

Результати теплового моніторингу об'єктів

Час	Снаряд на сонці, °C	Снаряд в ґрунті, °C	Міна, °C	Граната на сонці, °C	Граната в тіні, °C	Ґрунт на сонці, °C	Освітлення, люмен
12,19	26,6	30,9	35	32,5	22	31	73500
14,53	30,0	30,2	38	33,0	23	30,4	65300
17,14	29,7	23,4	31,7	29,7	21,5	24,2	26800
18,14	26,8	21,0	23,2	22,8	20,1	20,4	3640
20,10	17,7	15,4	15,1	15,4	15,2	15,3	0

Виходячи з отриманих результатів, в хмарну погоду (зразок в тіні) моніторинг є недоцільним. Було експериментально встановлено, що при тепловізійному моніторингу наявність металевого забруднення на відміну від класичних

металошукачів не становить проблеми. Завдяки тонкому металу гільз та порівняно великій площі їх поверхні у них теплоємність невисока, завдяки чому відбувається швидке охолодження (рис.4).

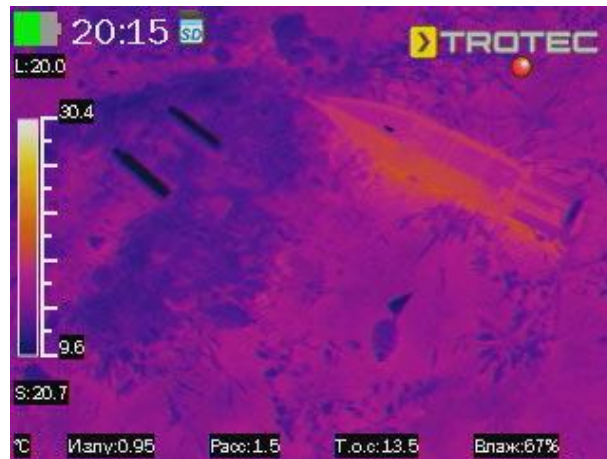


Рис. 4 Результати тепловізійної зйомки снаряду, гранати та гільз. Мінімальна температура відповідає гільзам, максимальна снаряду, у гранати приблизно відповідає ґрунту (зйомка в 20.15 8.09.2023.)

Припущення про доцільність моніторингу надвечір чи вночі виявилось хибним, максимальна різниця температур між міною та ґрунтом була зафіксована вдень.

Перспективи практичного використання тепловізійного моніторингу для гуманітарного розмінування. Місця інтенсивних бойових дій легко ідентифікуються за масовими воронками від вибухів і, відповідно, потребують класичного розмінування. Місця, зокрема маргінальні сільськогосподарські угіддя, можуть бути досліджені тепловізійними засобами, проте навіть за відсутності воронки можуть фіксуватися сторонні предмети, такі як автомобільні гумові скати тощо. Тобто можлива наявність безпечних штучних об'єктів, що спричинить похибки ідентифікації. Оскільки основну загрозу для випадкових мінних загороджень становить саме площадні мінні поля, можливим є ідентифікація на базі характеру встановлення загороджень GMZ-3 чи його аналогів. Так за нормативами у таких мінних загородженнях може бути від 2 до 6 рядів мін. Ряд мін зазвичай не строго прямолінійний. При встановленні ряду за допомогою мінного розкладника в залежності від місцевості ряд може плавно згинатися у будь який бік приблизно на 5-30 градусів. Мінімальна відстань між рядами 35 метрів, а максимальна 115 метрів.

Схема міного поля встановленого самохідним укладником мін представлено на рис. 4.

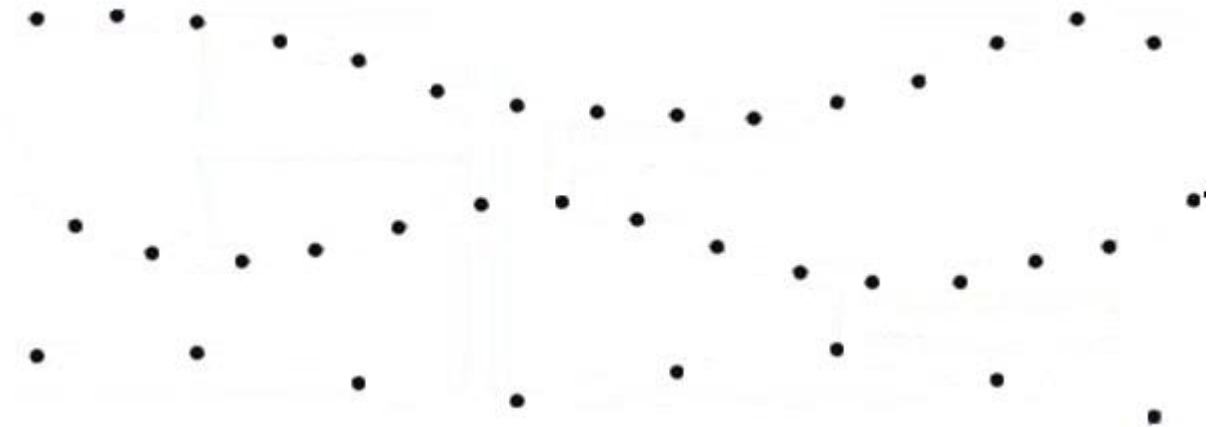


Рис. 4 Карта мінного загородження встановленого мінним укладником, що складається з 3-х рядів мін

Аналогічні задачі аналізу графічних об'єктів на прикладі карт розподілу вегетаційних індексів вирішувались щодо ідентифікації стресів технологічного характеру в роботі N. Pasichnyk et al (2022) [19]. Аналогічно можуть використовуватись і технології ідентифікації за допомогою нейронних мереж.

Розпізнавання об'єктів виокремлюється як одне з найпоширеніших застосувань у галузі комп'ютерного бачення. Дослідники вкладали значні зусилля у вдосконалення розпізнавання об'єктів протягом багатьох років. Важливо розуміти різні види завдань розпізнавання об'єктів, оскільки потрібна архітектура нейронної мережі значно залежить від завдання. Завдання розпізнавання об'єктів можна загалом поділити на три основні типи:

1. Класифікація зображень.
2. Виявлення об'єктів.
3. Сегментація екземплярів.

У завданні виявлення об'єктів для навчання мережі використовуються зображення, і модель повинна встановити, де знаходяться об'єкти, намалювавши навколо них рамки. Це схоже на більш вдосконалену версію класифікації зображень. Замість того, щоб припускати, що на зображенні є тільки один об'єкт, модель здатна враховувати, що там може бути багато різних об'єктів. Тому мережі потрібно

виявити і намалювати контури кожного об'єкта на зображенні. Ця задача є складною для алгоритмізації і написання програмного забезпечення, проте може бути вирішена за допомогою нейронних мереж, які вже були застосовані для подібних завдань і впоралися з ними досить ефективно. З цією задачею вдало впорались саме згорткові нейронні мережі (CNN) поряд із необхідною оптимізацією їх налаштувань чи завдання змінних зображень, або уточнення параметрів навчання. Принцип згорткових нейронних мереж працює за принципом вказування потенційних областей, де можуть бути об'єкти, і потім використовує навчену модель, щоб визначити, які об'єкти знаходяться всередині кожної області, тобто які категорії є найбільш ймовірними для кожної з них.

З метою навчання такої мережі були використані схеми розташування мін за рис.4, також було задано ймовірну відстань між об'єктами в діапазоні 35-50 м та пошук об'єктів у напрямі поширення під кутом 180°. На рис.5 вказано фрагмент даних для навчання мережі.

1	20	90	1
2	10	20	0
3	30	40	0
4	20	50	0
5	80	50	1
6	30	80	1

Рис.5. Фрагмент вхідної інформації для навчання нейронної мережі (CNN)

Для навчання та тестування мережі було використано мову Python, бібліотеку TensorFlow, яка дозволяє легко побудувати та навчити нейронні мережі. Частина коду навчання мережі наведено на рис.6.

```

training_data_generator = ImageDataGenerator(rescale = 1./255)
testing_data_generator = ImageDataGenerator(rescale = 1./255)

training_set = training_data_generator.flow_from_directory(src+'Train/',
                                                         target_size = (INPUT_SIZE, INPUT_SIZE),
                                                         batch_size = BATCH_SIZE,
                                                         class_mode = 'binary')

test_set = testing_data_generator.flow_from_directory(src+'Test/',
                                                      target_size = (INPUT_SIZE, INPUT_SIZE),
                                                      batch_size = BATCH_SIZE,
                                                      class_mode = 'binary')

model.fit_generator(training_set, steps_per_epoch = STEPS_PER_EPOCH, epochs = EPOCHS, verbose=1)

score = model.evaluate_generator(test_set, steps=100)

for idx, metric in enumerate(model.metrics_names):
    print("{}: {}".format(metric, score[idx]))

```

Found 19997 images belonging to 2 classes.
 Found 5000 images belonging to 2 classes.
 Epoch 1/3
 200/200 [=====] - 101s 506ms/step - loss: 0.3754 - acc: 0.8225
 Epoch 2/3
 200/200 [=====] - 96s 481ms/step - loss: 0.3018 - acc: 0.8706
 Epoch 3/3
 200/200 [=====] - 106s 530ms/step - loss: 0.2681 - acc: 0.8862
 loss: 0.2706282425299287
 acc: 0.880625

Рис.6. Навчання та тестування мережі

У результаті тестування мережі отримано точність ідентифікації об'єктів на рівні 88 %, що дозволяє припустити можливість застосування цього підходу до задачі виявлення потенційно небезпечних об'єктів на ділянках земель гуманітарного спрямування. Структуру мережі зображено на рис. 7. Із наведених значень мережі до та після оптимізації видно покращення пошуку об'єктів (рис.7, а та рис.7, б).

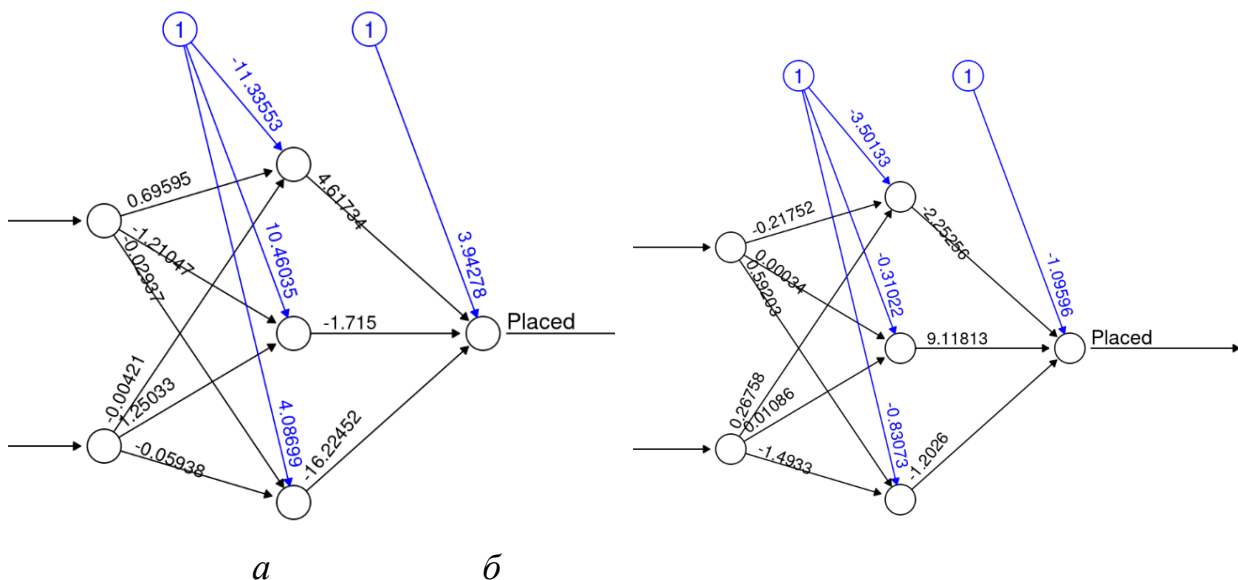


Рис.7. Структура нейронної мережі для ідентифікації об'єктів

Висновки та перспективи.

Ідентифікація мінних полів, розкладених на поверхні землі, тепловізійними засобами для потреб гуманітарного розмінування можлива.

При тепловізійному моніторингу мін та снарядів наявність випадкових металевих предметів на прикладі гільз калібрів до 30 мм не створює істотних перешкод для моніторингу.

Ідентифікація мін тепловізійними засобами можлива лише в безхмарну погоду, закопані боєприпаси фіксуються лише за непрямими ознаками завдяки нерівностям ґрунту.

Застосування згорткових нейронних мереж має певні перспективи щодо виявлення потенційних розташувань мін та вибухонебезпечних засобів, і може бути корисним у проблемі гуманітарного розмінування.

Точність визначення таких об'єктів згідно тестування мережі становить 88 %, що є підтвердженням можливості сумісного використання тепловізійного обстеження та нейронної мережі.

References

1. M. K. Habib (2008). "Humanitarian demining: Difficulties, needs and the prospect of technology," 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan, 2008, pp. 213-218, <https://doi.org/10.1109/ICMA.2008.4798754>.
2. Carolay Camacho-Sanchez, Ruben Yie-Pinedo, Gina Galindo (2023). "Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas" Socio-Economic Planning Sciences, Vol 88, August 2023, 101611, <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101611>,
3. Giuseppe Pulighe, Guido Bonati, Marco Colangeli, Maria Michela Morese, Lorenzo Traverso, Flavio Lupia, Cosette Khawaja, Rainer Janssen, Francesco Fava (2019). "Ongoing and emerging issues for sustainable bioenergy production on marginal lands in the Mediterranean regions" Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 103, April 2019, pp. 58-70, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.043>.
4. Sheikh Adil Edrisi, Pradeep Kumar Dubey, Rajiv Kumar Chaturvedi, Purushothaman Chirakkuzhyil Abhilash (2022). "Bioenergy crop production potential and carbon mitigation from marginal and degraded lands of India" Renewable Energy, Vol. 192, June 2022, pp. 300-312, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.109>.
5. S. A. Shvorov, N. A. Pasichnyk, O. A. Opryshko, D. S. Komarchuk, A. O. Dudnyk and F. V. Hluhan (2022). "The Methodological Foundations of Building an Energy Efficient Community," 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in

Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 297-300, <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766956>.

6. Matthew Bolton (2015). "From minefields to minespace: An archeology of the changing architecture of autonomous killing in US Army field manuals on landmines, booby traps and IEDs". Political Geography, Vol. 46, May 2015, pp. 41-53, <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2014.11.002>.

7. Yossef Kabessa, Ori Eyal, Ofer Bar-On, Victor Korouma, Sharon Yagur-Kroll, Shimshon Belkin, Aharon J. Agranat (2016). "Standoff detection of explosives and buried landmines using fluorescent bacterial sensor cells. Biosensors and Bioelectronics", Vol. 79, 15 May 2016, pp. 784-788, <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.01.011>.

8. Adee Schoon, Michael Heiman, Håvard Bach, Terje Groth Berntsen, Cynthia D. Fast (2022). "Validation of technical survey dogs in Cambodian mine fields", Applied Animal Behaviour Science, Vol. 251, June 2022, 105638, <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2022.105638>.

9. Ross N. Gillanders, James ME. Glackin, Zdenka Babić, Mario Muštra, Mitar Simić, Nikola Kezić, Graham A. Turnbull, Janja Filipi (2021). "Biomonitoring for wide area surveying in landmine detection using honeybees and optical sensing". Chemosphere, Vol. 273, June 2021, 129646, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129646>.

10. Janja Filipi, Vladan Stojnić, Mario Muštra, Ross N. Gillanders, Vedran Jovanović, Slavica Gajić, Graham A. Turnbull, Zdenka Babić, Nikola Kezić, Vladimir Risojević (2022). "Honeybee-based biohybrid system for landmine detection", Science of The Total Environment, Vol. 803, 10 January 2022, 150041, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150041>.

11. Aharon J. Agranat, Yossef Kabessa, Benjamin Shemer, Etai Shpigel, Offer Schwartzglass, Loay Atamneh, Yonatan Uziel, Meir Ejzenberg, Yosef Mizrachi, Yehudit Garcia, Galina Perepelitsa, Shimshon Belkin (2021). "An autonomous bioluminescent bacterial biosensor module for outdoor sensor networks, and its application for the detection of buried explosives. Biosensors and Bioelectronics", Vol. 185, 1 August 2021, 113253, <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113253>.

12. S. M. Shrestha and I. Arai (2003). "High resolution image reconstruction by GPR using MUSIC and SAR processing method for landmine detection," IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477), Toulouse, France, 2003, pp. 2921-2923 vol.4, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294632>.

13. X. Yan, P. Li, Z. Liu and F. Xu (2009). "Metal Equivalent Measurement Based on Low-Frequency Electromagnetic Induction Method," 2009 IEEE Circuits and Systems International Conference on Testing and Diagnosis, Chengdu, China, 2009, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/CAS-ICTD.2009.4960838>.

14. O. A. Abdel-Rehim, J. L. Davidson, L. A. Marsh, M. D. O'Toole and A. J. Peyton (2016). "Magnetic Polarizability Tensor Spectroscopy for Low Metal Anti-Personnel Mine Surrogates," in IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 10, pp. 3775-3783, May15, 2016, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2535346>.

15. H. Frigui, L. Zhang and P. D. Gader (2010). "Context-Dependent Multisensor Fusion and Its Application to Land Mine Detection," in IEEE Transactions on Geoscience

and Remote Sensing, vol. 48, no. 6, pp. 2528-2543, June 2010, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2039936>.

16. H. Çitak, "Pulse Induction Metal Detector: A Performance Application (2020). " In IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 48, no. 6, pp. 2210-2223, June 2020, <https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2996182>.

17. Carolay Camacho-Sanchez, Ruben Yie-Pinedo, Gina Galindo (2023). "Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas". Socio-Economic Planning Sciences, Vol. 88, August 2023, 101611, <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101611>.

18. Guillermo Rein, Xinyan Huang, Francesco Restuccia, Thomas McArdle (2017). "Detection of landmines in peat soils by controlled smouldering combustion: Experimental proof of concept of O-Revealer". Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 88, November 2017, pp. 632-638, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.07.016>

19. N.Pasichnyk, D.Komarchuk, H.Korenkova, S. Shvorov, O.Opryshko, N.Kiktev (2021). "Spectral-Spatial Analysis of Data of Images of Plantings for Identification of Stresses of Technological Character", CEUR Workshop Proceedings this link is disabled, 2021, 3126, pp. 305–312. <https://ceur-ws.org/Vol-3126/paper47.pdf>

REMOTE MONITORING OF MINES IN FIELDS WITH USING NEURAL NETWORKS

O. Opryshko, N. Pasichnyk, S. Shvorov, N. Kiktev, A. Dudnyk, V. Sovych

Abstract. *The work is devoted to the issue of humanitarian demining of agricultural lands. The difference between humanitarian demining and military demining is the lack of strict deadlines for the implementation of measures, as well as relatively small human and technical resources and large areas of monitoring. The situation is particularly difficult on marginal lands, which are poorly monitored by the local population and, accordingly, the establishment of minefields may be unexpected for farmers. Marginal lands are a potential source of energy raw materials for bioenergy, the importance of which is increasing in the modern conditions of the destruction of traditional logistics chains of supply of energy resources. The purpose of the work was to develop a method of express monitoring regarding the presence of mines in the fields. Operational research of large areas is possible precisely thanks to remote monitoring technologies, in particular thermal imaging. The hypothesis about the possibility of identifying mines due to the difference in the dynamics of heating and cooling of explosive objects under solar radiation during the day was tested. The research was conducted on the basis of the training ground of the military department of the National Academy of Sciences of Ukraine. TM-62M anti-tank mines, high-explosive shells caliber 125 mm, etc. were studied. When setting up the experiment, part of the ammunition was buried in the soil to a depth of 2-5 cm in accordance with the instructions for demining.*

It was established that only sunny days are suitable for thermal imaging monitoring, and samples installed in the shade were not identified. The maximum temperature difference for mines was recorded in the morning, and for massive shells in the evening. With regard to buried mines and projectiles, during thermal imaging monitoring, only depressions and bumps on the site were recorded. Based on the low selectivity of thermal

imaging monitoring, neural networks were used to indicate mechanically laid mines on the ground. Positive results were obtained.

Key words: *thermal imaging monitoring, humanitarian demining, UAV, neural networks, training, location search, graphic object analysis*