

С. І. МЕЛЬНИК¹, С. С. МЕЛЬНИК¹, Г. Л. ФЕДОРЕНКО²,
В. С. ХАРЧЕНКО², В. І. КОХАНОВСЬКИЙ³

¹ Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
Національної академії наук України, Харків, Україна

² Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

³ ТОВ «Дослідне конструкторське бюро шліфувальних верстатів», Харків, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ТЕПЛОВОЇ ТОМОГРАФІЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗАНУРЕНИХ У ҐРУНТ ОБ'ЄКТІВ

Предметом дослідження в статті є процеси розповсюдження теплових хвиль, збуджених добовою сонячною активністю, у ґрунті із наявністю локальних неоднорідностей (включень). **Метою** є розробка математичної моделі цих процесів та алгоритмів виявлення та ідентифікації цих неоднорідностей на фоні структурних та приладових шумів високого рівня. **Завдання:** проаналізувати стан розробок з теплової томографії ґрунту та виявлення прихованих у ньому об'єктів; побудувати чисельно-аналітичну модель розповсюдження теплових хвиль у ґрунті із включеннями в умовах макетного та натурного експериментів; розробити алгоритм компенсації артефактів, що викликані неоднорідністю розподілу коефіцієнта випромінювання ґрунту, та алгоритм придушення приладових шумів за критерієм мінімізації втрат інформації про параметри неоднорідності; проаналізувати адекватність розроблених моделей та ефективність алгоритмів у комп'ютерному експерименті. **Методи дослідження** базуються на: теорії теплопровідності, теорії інформації, чисельному моделюванні засобами пакету COMSOL MULTIPHYSICS. **Наукові результати.** Основними перешкодами широкому застосуванню методу теплової томографії є структурні шуми, пов'язані із неоднорідністю коефіцієнта випромінювання поверхні (зокрема, ґрунту). Загалом граничним вважають відношення глибини залягання об'єкту до його характерного розміру, як 1/3. Розроблено два алгоритми відновлення розсіяної за рахунок наявності шумів інформації, що дозволяють на порядок поліпшити ефективність теплового методу. Перший з них ефективно знижує рівень структурного шуму, а другий – шуму матриці тепловізора. Саме їх поєднання і дозволяє одержати чітке зображення ґрунту навіть при 50% структурного та 200 мК приладового шуму при значенні критерія глибини 3/2. Попередні висновки підтверджено на комп'ютерній моделі тепловізійних вимірювань зануреного у ґрунт об'єкту при пасивному методі контролю (за рахунок добової сонячної активності). Проаналізовано низку особливостей, які теоретично можуть вплинути на ефективність алгоритмів у реальному експерименті. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: розроблено нову методику теплової томографії неоднорідностей у ґрунті, що ґрунтується на алгоритмі порівняння двох термограм поверхні ґрунту, знятих у фіксовані моменти часу, які залежать від метеорологічних умов на протязі доби, та поєднання двох алгоритмів обробки цих термограм, що дозволяють нівелювати артефакти, викликані структурними шумами, та придушити приладові шуми із мінімальними втратами корисної інформації про неоднорідність.

Ключові слова: тепла томографія; фільтрація шумів; тепловізійний контроль ґрунту; термографічні дані.

1. Вступ

1.1. Мотивація дослідження

Сучасні концепції виявлення та розпізнавання предметів, прихованих у ґрунті, базуються на комбінованих методах, які характеризуються одночасним застосуванням декількох методів на різних фізичних принципах [1] і застосуванням

безпілотних апаратів [2]. Відповідно до концепції гарантованого виявлення [3], ймовірність виявлення має прямо пропорційну залежність від ймовірності виявлення окремого фізичного методу. У даному дослідженні розглядаються теплофізичні методи виявлення та ідентифікації неоднорідностей у середовищі, які мають багато переваг у порівнянні із іншими. Це такі властивості, як швидкодія, неруйнівність, дистанційність, дешевизна,



універсальність та багато інших. Всі ці властивості є й у звичайного візуального методу контролю. Але для непрозорих середовищ за рахунок розповсюдження тепла вглиб об'єкту вдається вирішити зворотну некоректну задачу та відтворити внутрішню структуру об'єкту контролю, а не тільки стан його поверхні. Тобто, одержати томографічне об'ємне зображення зануреного у ґрунт об'єкту або іншої неоднорідності.

Зазначимо, що більшість інших методів томографічного дослідження (зокрема, ультразвукового, рентгенівського, радіохвильового, магнітно-резонансного) ґрунтується на явищі проникнення випромінювання у середовище. Але глибина проникнення теплової частини спектру електромагнітних хвиль не перевищує декілька мікрон. Тому й алгоритми теплової томографії суттєво відрізняються від стандартних [4].

Властивості ґрунту (його тепло- та температуропровідність) визначають й можливості виявлення тих чи інших особливостей у залежності від глибини. Так, наприклад, відомо, що річні коливання температури експоненціально затухають із глибиною та на глибині більше за 1-2 метра майже непомітні. Аналогічно, добові коливання температури проникають на глибини порядку 5-20 см (у залежності від їх інтенсивності та властивостей ґрунту).

Тому дослідження і розробка нових алгоритмів вимірювань та обробки тепловісійних зображень з метою підвищення точності виявлення дрібних або слабконтрастних занурених у ґрунт об'єктів є актуальною науково-практичною задачею.

1.2. Сучасний стан

Сучасні дослідження термографічних методів в домені пошуку занурених у ґрунт об'єктів направлені на розробку методів обробки термографічних зображень, які дозволять гарантовано виявляти об'єкти в складних умовах оточуючого середовища та на більших глибинах. Так, наприклад, у роботі [5] наведено результати виявлення занурених у ґрунт об'єктів на глибинах 6, 12 та 18 см. Вже на глибинах 12 см виявлення можливе тільки на заздалегідь підготовлених поверхнях ґрунту, а на більших глибинах не дає достовірних результатів.

Так, навіть професійні високоякісні тепловісійні камери із термографічними матрицями (612x480) та їх відносно великою чутливістю (до 40 мК) не дозволяють розраховувати на безпосереднє (без додаткової обробки даних вимірювань) виявлення підповерхневих структур на глибині, більшій за 0.3 від їх характерного розміру [6].

Це пов'язано насамперед із низьким температурним перепадом над об'єктом, який виникає в умовах періодичної (добової) зміни сонячного опромінення поверхні. За нашими оцінками, проведеними за допомогою комп'ютерної моделі, для відношення (глибина/діаметр), що дорівнює 4/3, максимальний температурний перепад становить близько 130 мК. Тобто всього втричі перевищує граничну чутливість матриці тепловізора.

Але навіть таке мале відношення (сигнал/шум), яке могло б забезпечити надійність виявлення до 90%, не може бути реалізовано через інший, сильніший фактор – неоднорідність коефіцієнта випромінювання поверхні. Для спеціально підготовлених поверхонь така неоднорідність може бути знижена до 0.005, що дає додаткову похибку результату вимірювання близько 100 мК, але в реальних умовах вона досягає 5% і більше, що дає похибку 1 К та перевищує рівень корисного сигналу у 8 разів! На тлі таких шумів корисний сигнал не виявляється без застосування спеціальних алгоритмів.

Крім того, до артефактів слід віднести наявність «сміття» на поверхні, що спостерігається. Це може бути листя, аркуші паперу, пластик та інші сторонні об'єкти. Вони не тільки відрізняються коефіцієнтом випромінювання, але й можуть призвести до реальної зміни температури поверхні через інший характер теплопередачі (як її збільшення, так і зменшення). Такі перепади можна порівняти і навіть перевищувати корисний сигнал від підповерхневих неоднорідностей.

Враховуючи зростаюче значення технологій розпізнавання образів продовжується вдосконалення існуючих методів і пошук нових. Розглянемо основні методи обробки зображень, у тому числі термографічних.

Метод аналізу градієнтів і контурів (Edge Detection, Phase Stretch Transform) це традиційні алгоритми виявлення контурів, які постійно вдосконалюються та часто застосовуються для обробки термознімків завдяки здатності виокремлювати контури аномалій, які свідчать про об'єкти під поверхнею [7].

Метод пошуку локальних особливостей (Histogram of Oriented Gradients) використовує розподілення напрямків градієнтів у локальних клітинках зображення [8]. Цей метод часто комбінується з іншими для розпізнавання об'єктів із врахуванням їх локального контрасту.

Метод фільтрації та перетворення. Фільтрації/псевдокольорове відображення (Density Slicing): використовується для покращення візуалізації термознімків за допомогою кольорів, що відповідають різним значенням температури

(псевдокольори), що допомагає у виявленні локальних аномалій. В роботах [9, 10] запропоновано метод покращення інфрачервоних зображень, який виконується в частотній області, що є вигідним з точки зору обчислювальних витрат. Обробка реальних інфрачервоних зображень з БПЛА демонструє покращення ізотропної піксельної розрізненості у 1,9–2,1 рази.

При застосуванні **гіперспектральної термографії** (Thermal Infrared Hyperspectral Imaging) кожен піксель містить спектр довгохвильового інфрачервоного випромінювання, що дозволяє не лише виявляти об'єкти, а й ідентифікувати матеріали за їх спектральною характеристикою (наприклад, геологічні структури, нафтопродукти, органіку) [11, 12].

Значний розвиток останнім часом отримали **методи машинного навчання**, які, використовуючи широкий спектр алгоритмів класифікації об'єктів на термознімках, досягають високої ймовірності розпізнавання. Наприклад, дистанційне визначення типу ґрунту досягає точності до 97 %. [13, 14]. Одним з обмежень цих методів виявлення та розпізнавання занурених у ґрунт об'єктів є недостатня кількість наборів даних, які містять необхідний набір видимих та інфрачервоних зображень.

Тому велику актуальність мають нові методи вимірювання та пов'язані із ними методи обробки (вирішення некоректної задачі теплової томографії) [15]. Специфіка цієї задачі дозволяє розраховувати на значне (у декілька раз) підвищення як розрізняювальної здатності методу, так і максимальної глибини виявлення об'єктів, за рахунок розробки специфічних алгоритмів, що враховують властивості об'єкту контролю та пов'язаних задач його виявлення та ідентифікації.

У цій роботі ми запропонували декілька алгоритмів вимірювань та обробки результатів термографічного обстеження ґрунту, що значно (на порядок) поліпшують можливості термографічного методу та значно розширюють межі його застосування, зокрема, в задачах виявлення та ідентифікації занурених у ґрунт об'єктів.

Ефективність запропонованих методів та алгоритмів доведено результатами комп'ютерного та макетного моделювання. Проаналізовано основні перешкоди, що обмежують застосування цих алгоритмів на практиці та запропоновано шляхи їх подолання.

1.3. Постановка задачі

З урахуванням особливостей процесу розповсюдження тепла у ґрунті та обмежень на

можливість проведення тепловізійних вимірювань виливає така постановка задачі цього дослідження:

Розробити методику тепловізійних вимірювань та алгоритми обробки їх результатів, що забезпечують надійне виявлення та ідентифікацію занурених у ґрунт об'єктів навіть при надвисокому рівні шумів (що на порядок перевищують рівень корисного сигналу – максимального температурного перепаду над об'єктом). При цьому бажано максимально спростити саму процедуру вимірювань, з урахуванням необхідної швидкодії та великих площ ґрунту, що потребують контролю.

1.4. Мета та підхід

Метою дослідження є створення математичної моделі процесів розповсюдження теплових хвиль, збуджених добовою сонячною активністю, у ґрунті із наявністю локальних неоднорідностей (включень) з розробкою алгоритмів виявлення та ідентифікації цих неоднорідностей на фоні структурних та приладових шумів високого рівня.

Завдання дослідження:

- проаналізувати стан розробок в напрямку теплової томографії ґрунту та виявлення прихованих у ньому об'єктів;

- побудувати чисельно-аналітичну модель розповсюдження теплових хвиль у ґрунті із включеннями в умовах макетного та натурального експериментів;

- розробити алгоритм компенсації артефактів, що викликані неоднорідністю розподілу коефіцієнта випромінювання ґрунту;

- розробити алгоритм придушення приладових шумів за критерієм мінімізації втрат інформації про параметри неоднорідності;

- проаналізувати адекватність розроблених моделей та ефективність алгоритмів у комп'ютерному експерименті.

Методами, що використано для досягнення мети роботи, є:

- теорія теплопровідності,

- теорія інформації,

- чисельне моделювання,

- засоби пакету комп'ютерного моделювання фізичних процесів COMSOL MULTIPHISICS

Об'єктом дослідження є проблема вирішення зворотних некоректних задач теплової томографії, що виникають за наявності структурного та приладового шумів.

Предметом дослідження є процеси розповсюдження теплових хвиль, збуджених добовою сонячною активністю, у ґрунті із наявністю локальних неоднорідностей (включень).

Структура роботи: у розділі 2 розглянуто теоретичні моделі розповсюдження тепла у ґрунті із локальними включеннями та аналіз можливостей термографічного методу їх виявлення; у розділі 3 - результати комп'ютерного моделювання динаміки розповсюдження тепла у ґрунті із інерційними об'єктами; розділ 4 містить приклад реалізації розроблених алгоритмів теплової томографії на комп'ютерних моделях; розділ 5 – дискусію та аналіз одержаних результатів у порівнянні із аналогічними дослідженнями у світі; розділ 6 - висновки та перспективи подальших досліджень.

2. Теоретичні моделі розповсюдження тепла у ґрунті із локальними включеннями та аналіз можливостей термографічного методу їх виявлення

2.1. Моделювання динаміки температурного розподілу у ґрунті під час макетного або натурального експериментів

Специфіка задачі пошуку та ідентифікації занурених у ґрунт об'єктів передбачає обмеженість часу вимірювань та неможливість застосування на великих площах активного методу контролю. Тому й теоретичний аналіз динаміки розповсюдження тепла та його випромінювання поверхнею ґрунту спрямовано на випадок нестационарного прогріву ґрунту за рахунок добової сонячної активності. На відміну від відомих методів [5, 16, 17], у яких розподіл температури поверхні вимірюється за допомогою тепловізійної камери у заздалегідь розрахований момент найбільшого контрасту, ми пропонуємо узагальнити його.

А саме – вимірювати цей розподіл двічі на добу, що дозволить частково компенсувати неоднорідність розподілу коефіцієнту випромінювання поверхні ґрунту, яка є основною перешкодою до коректного визначення температури та вирішення задачі томографії.

Відповідно до розробленого алгоритму вимірювань, потрібно наперед розрахувати моменти часу, коли температурний перепад над зануреним у ґрунт об'єктом досягне максимальної або мінімальної величини. З достатньою для поставленої задачі томографії точністю це можна зробити аналітично.

При незначних температурних контрастах (до 10 К проти 300 К) закон перетворення теплового потоку, що потрапляє на кожен піксель матриці, лінійний. У найпростішому випадку (без урахування специфічних умов перевідображення) він виглядає, як

$$\Delta T^*(x, y, t) = \varepsilon(x, y) \cdot \Delta T(x, y, t), \quad (1)$$

де $\Delta T(x, y, t) = T(x, y, t) - T_0(t)$ – різниця між температурою поверхні ґрунту та температурою навколишнього середовища $T_0(t)$;

$\Delta T^*(x, y, t) = T^*(x, y, t) - T_0^*(t)$ – «виміряна» різниця між температурою поверхні ґрунту та температурою навколишнього середовища;

$\varepsilon(x, y)$ – коефіцієнт випромінювання поверхні ґрунту у вимірюваній області (пікселі).

Неоднорідність ґрунту під час вирішення нестационарного рівняння теплопровідності у решті області можна замінити еквівалентним джерелом тепла. У найпростішому наближенні його можна досить точно подати, як суму теплових полів розподіленого джерела тепла і розподіленого теплового диполя, розташованих на глибині розшарування або геометричного центру неоднорідності h [18].

Для неоднорідностей, що є тонкими розшаруваннями (товщина набагато менше ширини) отримані наближені формули:

$$q_h(x, y, t) = \left[\frac{\Delta(c_p)\lambda - (c_p)\Delta\lambda}{\lambda} \right] \cdot \delta(x, y) \frac{\partial}{\partial t} T_h(z, t), \quad (2)$$

$$p_h(x, y, t) = \left[\Delta\lambda \frac{\lambda_0}{\lambda} \right] \cdot \delta(x, y) \frac{\partial}{\partial z} T_h(z, t), \quad (3)$$

де $T_h(z, t)$ – температура однорідного ґрунту в залежності від глибини та часу;

h – глибина розташування розшарування;

$m_1 = \left[\frac{\Delta(c_p)\lambda - (c_p)\Delta\lambda}{\lambda} \right]$ та $m_2 = \left[\Delta\lambda \frac{\lambda_0}{\lambda} \right]$ – теплофізичні характеристики матеріалу неоднорідності щодо матеріалу ґрунту;

$\delta(x, y)$ – товщина розшарування.

Для об'єктів, що використовуються в експериментах $\delta(x, y) = \delta$.

При ступінчастому нагріванні у макетному експерименті маємо (щодо початкової температури):

$$T_h(z, t) = z \frac{2q_0}{\lambda} \left(\frac{z}{\sqrt{at}} \right)^{-1} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{z}{\sqrt{at}} \right)^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{\sqrt{at}} \right) \left[1 - \operatorname{erf} \frac{1}{2} \left(\frac{z}{\sqrt{at}} \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

Підставляючи (2) і (3) у (4), знаходимо залежну від часу потужність еквівалентного розподіленого джерела і диполя тепла, розташованих на глибині $z = h$. Як q_h , так і p_h , мають максимум, час досягнення якого залежить від глибини h квадратично.

Це означає, що максимальний перепад над неоднорідністю буде досягнутий, через деякий час після початку нагріву. Але його точний розрахунок складний аналітично і не потрібний на практиці. Нам

достатньо знати приблизне значення запізнення максимуму

$$\Delta t_h \approx k \frac{h^2}{a}, \quad (5)$$

де k – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від форми неоднорідності (ширина, товщина).

Амплітуда температурного перепаду над неоднорідністю, що виникає, залежить як від її форми, так і від теплофізичних параметрів неоднорідності m_1, m_2 .

2.2. Алгоритми обробки вимірювальних даних

Попередні комп'ютерні розрахунки та аналітичні оцінки показали, що максимальний температурний перепад над підповерхневим об'єктом незначно (у 2 рази) перевищує паспортну чутливість тепловізійної матриці (60 мК).

Однак неоднорідність розподілу коефіцієнта випромінювання поверхні викликає на зображенні артефакти, що в десятки разів перевищують цей рівень (до 1 К й більше). Припущення про те, що цей фактор практично не змінюється за час між двома тепловізійними зйомками, дозволяє віднести його до класу систематичних похибок і дає можливість розробити метод їх компенсації.

Багатопараметричність цієї задачі потребує використання кількох алгоритмів на різних етапах обробки вимірювальних даних. Ці алгоритми розроблені нами як на основі класичних методів, так і оригінальних процедур, що ґрунтуються на врахуванні специфіки об'єкта та умов отримання вимірювальних даних.

У цьому розділі ми опишемо використані алгоритми та ті результати, які вони забезпечують.

Алгоритм компенсації артефактів, пов'язаних з неоднорідністю коефіцієнта випромінювання поверхні ґрунту.

Сутність алгоритму використовує методику зйомки термограм у задалегідь розраховані моменти часу та зниження амплітуди артефактів шляхом математичної обробки. Аналогічний метод динамічної теплової томографії має значну перевагу над альтернативними методами неруйнівного контролю виробів у промисловості [19].

Як відомо, температурний перепад над підповерхневим об'єктом $\delta T(x, y, t)$ може бути визначений, як різниця температури над його геометричним центром і температури поверхні на достатньому віддаленні від нього. В алгоритмі розрахунку зручно вважати температуру у віддаленій точці, як усереднену по кадру температуру всієї

поверхні, що вносить неістотну похибку алгоритм розрахунку. Тоді для кожного пікселя кадру отримаємо:

$$\begin{aligned} \delta T(x, y, t) &= \Delta T(x, y, t) - \iint \Delta T(x, y, t) dx dy = \\ &= \Delta T(x, y, t) - \Delta T_r(t), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_r(t) &= \iint \Delta T(x, y, t) dx dy = \\ &= \frac{1}{\varepsilon_r} \iint \Delta T^*(x, y, t) dx dy, \end{aligned} \quad (7)$$

де ε_r – середній по кадру коефіцієнт випромінювання поверхні ґрунту;

$\Delta T_r(t)$ – середня по кадру температура поверхні ґрунту (відносно температури повітря).

Відповідно до алгоритму слід розрахувати (або підібрати в чисельному експерименті) моменти максимального температурного перепаду над об'єктом при потоці тепла у ґрунт (ранок – t_1), та назовні (вечір – t_2). У ці моменти часу, згідно з (1), отримаємо такі результати вимірювань у кожному з пікселів кадру:

$$\Delta T_1^*(x, y, t_1) = \varepsilon(x, y) \cdot \Delta T_1(x, y, t_y), \quad (8)$$

$$\Delta T_2^*(x, y, t_2) = \varepsilon(x, y) \cdot \Delta T_2(x, y, t_b). \quad (9)$$

Зауважимо, що з гармонічним нагріванням залежність температурного перепаду від часу дуже слабо змінюється поблизу максимуму. Тому похибка у визначенні моментів оптимального виміру практично не впливає на кінцеву чутливість методу. За нашими оцінками, для добового гармонічного нагрівання помилка в одну годину цілком допустима.

При цьому температурні перепади як для теплопровідного об'єкта (метал), так і для теплоізолюючого (пластик) будуть мати різні знаки. Над теплоізолюючим об'єктом ґрунт швидше нагрівається, але й швидше остигає; над теплопровідним (метал) – навпаки.

Для максимально чіткого прояву об'єкта та компенсації неоднорідності $\varepsilon(x, y)$ пропонується такий алгоритм обробки даних вимірювань $T^*(x, y, t_y)$ та $T^*(x, y, t_b)$.

Для кожного пікселя обчислюємо відносну амплітуду часових коливань вимірюваної температури, використовуючи для цього дані лише двох моментів часу (вечір-ранок)

$$\theta(x, y) = \frac{\Delta T_2^* - \Delta T_1^*}{\Delta T_2^* + \Delta T_1^*} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\Delta T_2 + \Delta T_1}. \quad (10)$$

З формул (7), (8) випливає, що в рамках прийнятих наближень вона дорівнюватиме аналогічному критерію для реальної температури

(коефіцієнт випромінювання скорочується в кожному пікселі).

При цьому для малих або глибоко розташованих об'єктів амплітуда коливань $\delta T_2 - \delta T_1$ температурного перепаду над ними мала порівняно з амплітудою добових коливань усередненої по кадру температури поверхні ґрунту $\Delta T_B - \Delta T_Y$ (відносно температури повітря).

Тоді для критерія $\theta(x, y)$ одержимо наближений вираз:

$$\begin{aligned} \theta(x, y) &= \frac{\Delta T_B - \Delta T_Y}{\Delta T_B + \Delta T_Y} = \\ &= \frac{\delta T_2 + \Delta T_r(t_2) - \delta T_1 - \Delta T_r(t_1)}{\delta T_2 + \Delta T_r(t_2) + \delta T_1 + \Delta T_r(t_1)} \approx \\ &\approx \frac{\delta T_2 - \delta T_1 + [\Delta T_r(t_2) - \Delta T_r(t_1)]}{[\Delta T_r(t_2) + \Delta T_r(t_1)]}. \end{aligned} \quad (11)$$

Звідси випливає, що найближчим до параметрів підповерхневих об'єктів та таким, що дозволяє найбільш чітко їх візуалізувати, є критерій

$$\begin{aligned} \theta^*(x, y) &= \delta T_2(x, y) - \delta T_1(x, y) \approx \\ &\approx [\Delta T_r(t_2) + \Delta T_r(t_1)]\theta(x, y) - [\Delta T_r(t_2) - \Delta T_r(t_1)] = \\ &= C_1^* \theta(x, y) - C_2^*, \end{aligned} \quad (12)$$

де $C_1^* = \frac{\Delta T_r^*(t_2) + \Delta T_r^*(t_1)}{\varepsilon_r}$, та $C_2^* = \frac{\Delta T_r^*(t_2) - \Delta T_r^*(t_1)}{\varepsilon_r}$, які обчислюються з урахуванням (6).

Зауважимо, що значення середнього за ґрунтом коефіцієнта ε_r входить як множник в обидва доданки. Тому його точне значення не має ролі для виявлення та візуалізації підповерхневих об'єктів, і його можна задавати приблизно (наприклад, 0.5).

У результаті використання алгоритму вдається виключити систематичні похибки та знизити неоднорідність «перерахованого» коефіцієнта випромінювання поверхні в кілька разів.

Після компенсації спотворюючого фактора неоднорідності коефіцієнта випромінювання поверхні ґрунту відношення «сигнал – шум» для об'єктів з критерієм глибини $(d/h) \leq 1$ (відношення ефективного діаметра об'єкта до глибини розташування його верхньої поверхні) не перевищить 2. А з урахуванням неточності виведених вище співвідношень (11), (12) виявиться порядку 1.

Такий мінімальний рівень корисного сигналу $\theta_M^*(x, y)$ не дозволяє надійно виявляти об'єкти і тим більше, розраховувати на можливість їх ідентифікації. Імовірність помилок 1-го та 2-го роду становитиме не менше 30%.

У зв'язку з цим потрібне застосування додаткових алгоритмів обробки, що дозволяють суттєво підвищити ефективне значення цього коефіцієнта. Це виявляється можливим за рахунок

апріорно відомої форми (або набору таких форм) об'єкта.

Алгоритм виявлення та ідентифікації одного з кінцевого набору об'єктів зводиться до послідовності наступних процедур:

- моделювання теплового відгуку від об'єкта заданої форми, що знаходиться на заданій глибині;
- розрахунок розподілу критерію $\theta_M^*(x, y)$ для змодельованого відгуку за формулами;
- розрахунок розподілу критерію $\theta_R^*(x, y)$ для реально виміряного відгуку;
- порівняння розподілів $\theta_M^*(x, y)$ та $\theta_R^*(x, y)$ з використанням одного з інтегральних критеріїв перевірки гіпотези про невинуватість їх відповідності;
- оцінка ймовірності помилок 1-го та 2-го роду для аналізованої аномалії.

Аналогічний підхід був неодноразово використаний під час вирішення аналогічних завдань теплової томографії. Однак у нашому випадку такий алгоритм вимагає великих обчислювальних та часових ресурсів і є надмірним. Тому практично доцільно застосовувати його спрощені варіанти. Ми розробили алгоритм «фокусування» зображення, який суттєво простіше, ніж описаний вище загальний метод, але водночас практично не пов'язаний із втратами корисної інформації про форму та розташування об'єкта.

Алгоритм "фокусування" теплового зображення. В основі алгоритму «фокусування» лежить математичний апарат функцій Гріна у застосуванні до аналізу теплового відгуку у формі $\theta_R^*(x, y)$. Зокрема, підповерхневий об'єкт може бути описаний деяким еквівалентним розподілом миттєвих точкових та дипольних джерел тепла в його об'ємі та часі.

При цьому тепловий відгук на поверхні ґрунту від кожного такого джерела (його функція Гріна) може бути з великою точністю апроксимований гаусоїдою, ширина якої пропорційна глибині його розташування, а амплітуда змінюється відповідно до відомої аналітичної залежності.

Таким чином, у першому наближенні (вважаємо всі джерела розташованими на однаковій глибині) тепловий відгук є згорткою шуканої функції розподілу точкових джерел (і диполів) за координатами поверхні та часу.

Розв'язання задачі теплової томографії (визначення геометричних та теплофізичних параметрів об'єкта) відноситься до класу зворотних некоректних задач, для яких розроблені спеціальні методи, і є досить складною математичною проблемою.

Однак цей алгоритм може бути спрощений і адаптований під задачу виявлення та ідентифікації підповерхневих об'єктів. Він аналогічний алгоритму синтезованої апертури, який широко застосовується

при вирішенні задач георадіолокації та є граничним випадком алгоритму зворотної згортки. Спрощена версія алгоритму «фокусування» зводиться до послідовності наступних процедур:

- у розподілі $\theta^*(x, y)$, розрахованому за формулою (12), віднімаємо середнє по кадру значення

$$\theta'(x_i, y_k) = \theta^*(x_i, y_k) - \frac{1}{N_x \cdot N_y} \sum_{i,k} \theta^*(x_i, y_k). \quad (13)$$

Ця процедура усуває деякі систематичні помилки, пов'язані з некоректним калібруванням тепловізора і дає симетричну картину розподілу $\theta^{**}(x_i, y_k)$, в якій візуально розділені об'єкти, що «добре» або «погано» проводять тепло;

- розраховуємо приблизно ширину D теплового відгуку над точковим джерелом на заданій глибині «фокусування» h за приблизною аналітичною формулою, або таблицею;

- для кожного пікселя розраховуємо зважену нормовану суму (дискретний аналог інтеграла типу згортки) розподілу $\theta'(x_i, y_k)$ з ядром, заданим у вигляді гаусоїди заданої ширини

$$\theta''(x_i, y_k) = \frac{\sum_{j,l} \theta^*(x_j, y_l) \exp\left[-\frac{(x_i-x_j)^2 + (y_k-y_l)^2}{2D^2}\right]}{\sum_{j,l} \exp\left[-\frac{(x_i-x_j)^2 + (y_k-y_l)^2}{2D^2}\right]}, \quad (14)$$

- варіюючи глибину h , повторюємо процедуру, і знаходимо набір значень h_f , у якому «фокусування» дає найбільш локалізоване зображення кожної з виявлених аномалій;

- межі об'єкта визначаємо приблизно на рівні $\frac{1}{2}$ від максимального значення «сфокусованого» розподілу $\theta''(x_i, y_k)$ поблизу кожної з виявлених аномалій.

Зауважимо, що рівень визначення границь об'єкта може бути уточнений за рахунок його теплофізичних властивостей та урахування критерію D/h . Проте для задачі виявлення це не принципово, а ідентифікація об'єктів проводиться за іншим алгоритмом, що не використовує ці дані.

Додатково на наступних етапах досліджень (після отримання повнішого об'єму вимірювальних даних) планується розробка алгоритму оцінки ймовірності помилкового виявлення підповерхневого об'єкта. Набір перерахованих алгоритмів повністю забезпечує методику виявлення та ідентифікації занурених у ґрунт об'єктів у рамках поставленої задачі.

3. Результати комп'ютерного моделювання динаміки розповсюдження тепла у ґрунті із інерідними об'єктами

3.1. Модель експерименту у реальних умовах (натурного)

Для моделювання було використано пакет інженерно-технічного моделювання COMSOL MULTYPHYSICS. Було розроблено 2 комп'ютерні моделі експериментів на макеті та тепловізійного сканування в реальних умовах. Їх основна відмінність у геометричному масштабуванні (1 до 5) та різних граничних умовах (нагрівання та охолодження). У макетних експериментах не вдається реалізувати динаміку нагріву, аналогічну до сонячної активності.

Умови проведення натурного експерименту:

- нагрів поверхні ґрунту задано рівнянням, що запрограмоване в інструменті пакету для вирішення теплофізичних нестационарних задач у твердому тілі. В ньому враховано гармонічні коливання температури повітря

$$293.15[K] + AT * \sin(2 * \pi * t/t_0), \quad (15)$$

та коливання потужності сонячного випромінювання

$$ATs * \sin(2 * \pi * (t - dt)/t_0), \quad (16)$$

які випереджують повітряні на проміжок часу d . При цьому замість потужності випромінювання задаємо еквівалентну температуру ATs (різницю температур у тіні та на сонці);

- на глибині l_z задаємо постійну температуру.

Для глибин понад 1 м добові коливання температури майже не впливають на результати моделювання температури на поверхні нульового рівня;

- на бічних стінках моделі задаємо теплоізоляцію (для зменшення похибки розмір області можна збільшити та перевірити, як це впливає на результати розрахунку);

- матеріали взяті з таблиці матеріалів пакету моделювання COMSOL MULTYPHYSICS (піщаний ґрунт, мідь та повітряна порожнина). Але питома теплоємність ґрунту додана вручну;

- розрахунки проводилися для динаміки загальним часом 2 доби з інтервалом 0.05 доби (близько 1 години);

- результати розрахунку було одержано у вигляді контурної діаграми (у кожному кадрі).

На рис. 1 показані кадри з максимальним і мінімальним температурним перепадом над об'єктом, що погано проводить тепло (повітря).

Різниця температури над центром об'єкта та середньою по кадру температурою становить

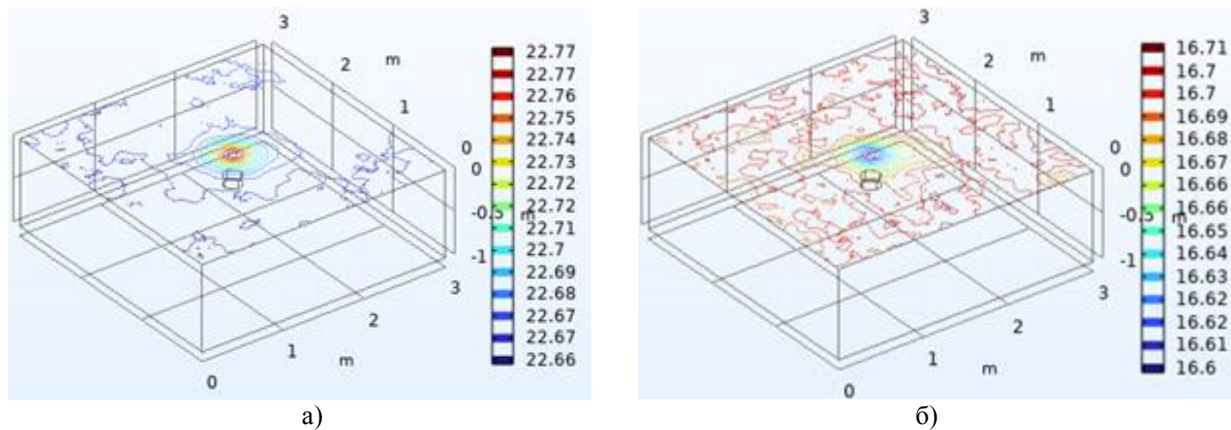


Рис. 1. Кадри температурного перепаду над нетеплопровідним об'єктом:
а – з максимальним значенням; б – з мінімальним значенням

0.12 K і - 0.11 K через 0.4 доби та 0.95 доби після початку розрахунку. Тобто різниця в часі приблизно дорівнює 0.5 доби, як і слід очікувати для гармонічного режиму нагріву. Ці результати підтверджують попередні оцінки максимального перепаду температури над об'єктом. Такі малі перепади температур можуть бути зафіксовані тепловізором лише в ідеальних умовах (однорідна поверхня та нагрівання). Тому потрібна додаткова математична обробка результатів тепловізійної зйомки поверхні, відповідно описаним вище алгоритмам.

Модель може бути адаптована до тепловізійної зйомки в реальних умовах та допускає уточнення в наступних напрямках:

- завдання реальних кліматичних умов з урахуванням їх динаміки,
- завдання реальних параметрів ґрунту та підповерхневих об'єктів, що підлягають виявленню та ідентифікації;
- можливість синхронізації тепловізійного та видимого зображення поверхні (для оцінки розподілу коефіцієнта випромінювання по поверхні та подальшого його обліку).

3.2. Модель макетного експерименту

Чисельна модель макетного експерименту відрізняється від чисельної моделі реальних (натурних) вимірювань параметрами геометрії та граничними умовами на поверхні об'єкту. Далі описано ці відмінності.

Геометрія (рис. 2, а):

- Розміри ящика 450x450x150;
- діаметри дисків 60 та 30 мм (замість 300 та 150);
- глибина верхньої поверхні дисків варіюється (10, 20, 30 мм, що відповідає 50, 100, 150 мм у моделі натурального експерименту);

- матеріал об'єктів – «повітря» та «мідь».

Граничні та початкові умови:

- початкова температура 20 [C°] = 293.15 [K];
- на всіх гранях ящика, крім верхньої – ідеальна теплоізоляція;
- між піском та дисками – теплопередача за законом теплопровідності з урахуванням властивостей матеріалу;
- верхня поверхня – нагрівання у вигляді прямокутної функції

$$-n \cdot q = h(T_{\text{ext}} - T), \quad (17)$$

де h – коефіцієнт тепловіддачі поверхні 30 [W/m²/K].

$$T_{\text{ext}} = AT_s \cdot \text{rect1}(t/t_0) + 293.15[\text{K}], \quad (18)$$

де $AT_s = 20[\text{K}]$ - амплітуда коливання температури навколишнього повітря T_{ext} , еквівалентної впливу нагрівача постійної потужності $h \cdot T_{\text{ext}}$;

Значимо, що коефіцієнт тепловіддачі (конвекція) залежить від стану поверхні і вітру. Його зазвичай задають від 5 до 30 [W/m²/K]. У експерименті взято його максимальне значення, яке забезпечить максимальний температурний перепад над об'єктом.

Як ілюстрація характерних результатів розрахунку динаміки нагріву на рис. 2, б показані термопрофілі на поверхні моделі макета. Вони відповідають теоретично розрахованим профілям температурних перепадів над об'єктами (через 10-30 хвилин після початку нагрівання). На рис. 2, в показано розрахований за допомогою чисельної моделі розподіл температури по глибині поблизу нетеплопровідного (ліворуч) та металевий (праворуч) об'єктів. Перший об'єкт «відштовхує» ізотермічні поверхні, а металевий – «притягує» їх.

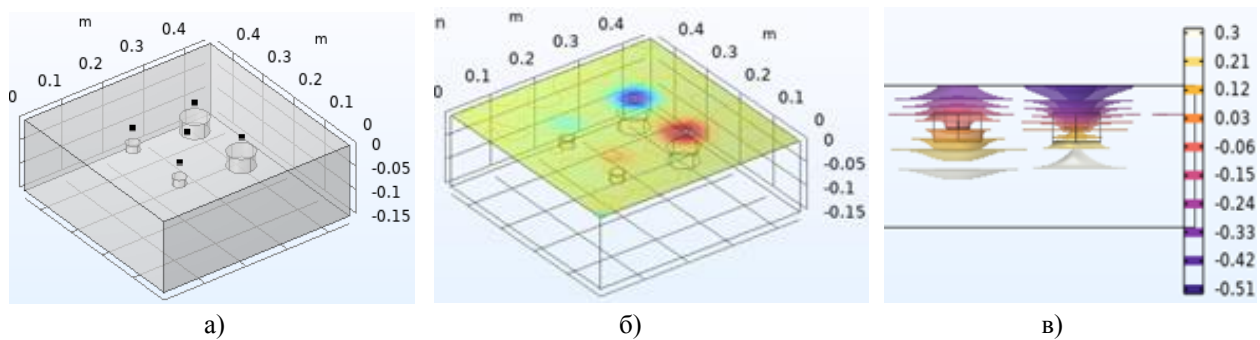


Рис. 2. Характерні результати розрахунку динаміки нагріву на моделі макета:
 а – схема макету; б – чисельно розраховані профілі температурних перепадів над об'єктами;
 в – розподіл температури по глибині поблизу нетеплопровідного (ліворуч) та металевого (праворуч) об'єктів

4. Результати застосування розроблених алгоритмів теплової томографії на комп'ютерних моделях

4.1. Моделювання шумів та неоднорідностей коефіцієнту чорноти

Основними витоками помилок при інтерпретації вимірювальних тепловізійних даних є шуми тепловізійної матриці та неоднорідність коефіцієнту випромінювання («чорноти») поверхні ґрунту. Ще одним суттєвим витоком помилок є неоднорідність матриці, що сягає десятків відсотків від одержаного її пікселями сигналу. Але завдяки процедурі калібровки, що виконується у процесі її виготовлення, та додаткових регламентних процедур цей фактор вдається значно знизити. Будемо вважати, що його остаточний вплив вже враховано у паспортних даних тепловізора. А саме – параметри чутливості матриці, що дорівнює у стандартних зразках відомих фірм 40 мК.

Перші два фактори ми моделюємо двома доданками випадкових функцій до точно розрахованої температури поверхні ґрунту. Тобто, вимірювальними даними вважаємо часово-координатний розподіл, що задається як

$$\Delta T_m = \Delta T * \frac{\delta k}{k} + \Delta T_0, \quad (19)$$

де $\Delta T = T - 293.15[K] - AT \sin(2 * \pi * \frac{t}{t_0}) * 293.15[K] - ATs * \sin(2 * \pi * (t - dt)/t_0)$ – точно розраховане у моделі перевищення температури поверхні ґрунту над температурою повітря (з урахуванням еквіваленту сонячного випромінювання);

$\frac{\delta k}{k} = 1 + 0.05 * \text{rn2}(1, x, y)$ – випадкове розподілення коефіцієнту випромінювання ділянок поверхні ґрунту з амплітудою відхилень 5% від базового значення (залежить від координат (x,y) та не залежить від часу);

$\Delta T_0 = 0.040 * \text{rn2}(t, x, y)$ – випадкові шуми матриці тепловізора з амплітудою 40 мК (залежать, як від координат пікселя, так і від номеру кадру – часу)

4.2. Результати апробації розроблених алгоритмів окремо та загалом

Для аналізу було використано модель із «підграничним» нетеплопровідним об'єктом на глибині 30 см (верхня границя), що у 1.5 рази перевищує його більший характерний розмір (диск діаметром 20 см та товщиною 10 см). Найбільший температурний перепад над центром цього диску сягає 0.12 К, що зазвичай вважають недостатнім для виявлення об'єкту. Хоча при ідеальному моделюванні можна чітко побачити цей перепад (рис. 3, а), при наявності шумів обох типів теплове зображення візуально не проявляється (рис. 3, б та 3, в). Амплітуда шуму сягає 1 К та 2 К відповідно для 5% та 10% структурного шуму (неоднорідності коефіцієнта випромінювання), що у 8-16 разів перевищує рівень корисного сигналу.

Застосування алгоритму компенсації артефактів дозволяє повністю видалити навіть 50% структурних шумів (рис. 4, а) при відсутності шуму тепловізійної матриці (рис. 4, б), але навіть при малому рівні приладового шуму 40 мК дає набагато гірші результати (рис. 4, в).

Застосування алгоритму "фокусування" теплового зображення. Згідно алгоритму ми можемо застосувати перетворення типу «згортки» для кадру із максимальним температурним перепадом над об'єктом заради поліпшення його зображення на поверхні ґрунту. Параметри ядра згортки можуть бути заздалегідь розраховані (у відповідності до параметрів шуканого об'єкту), або підібрані при застосуванні алгоритму. На рис. 5, б показано результат «фокусування» для кадру максимального перепаду із шумами 5% та 40 мК (рис. 5, а). При таких «мінімальних» параметрах шуму алгоритм дає можливість значно поліпшити зображення та виявити

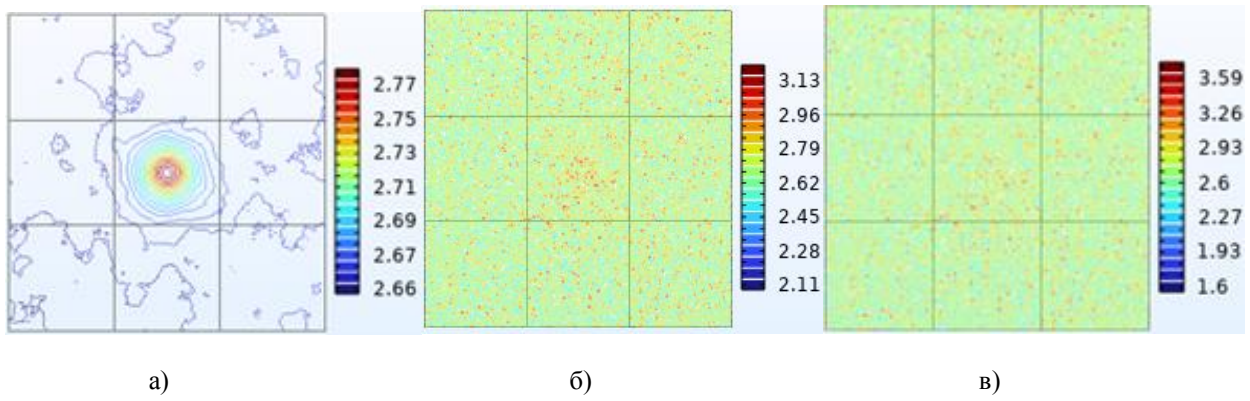


Рис. 3. Змодельовані результати вимірювань температурного перепаду над об'єктом:
а – при відсутності шумів; б – шуми 5% та 40 мК; в – шуми 10% та 40 мК

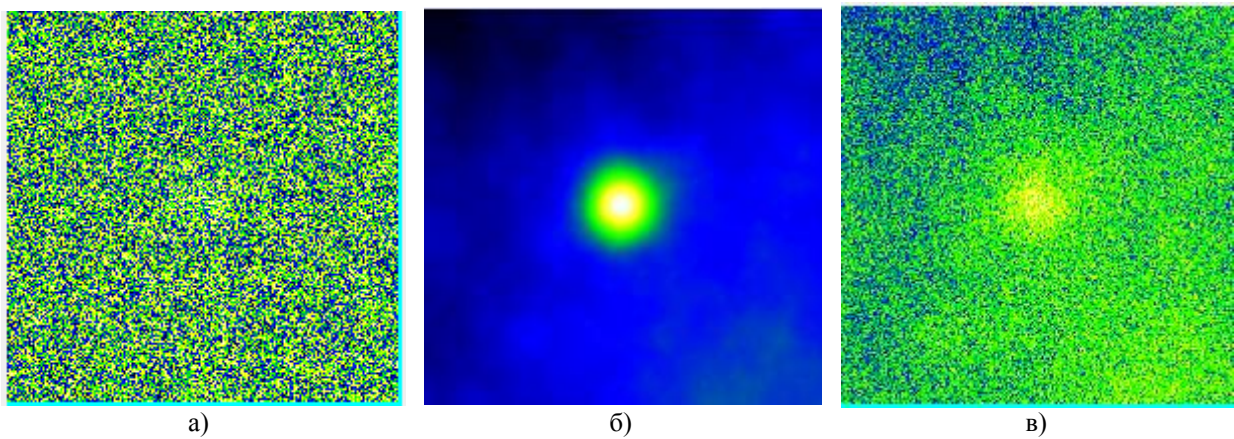


Рис. 4. Змодельовані результати застосування алгоритму компенсації артефактів:
а – кадр (200x200) максимального температурного перепаду над об'єктом (тільки структурні шуми 50%);
б – результат застосування алгоритму повністю компенсує артефакти; в – при наявності додаткового шуму 40 мК той самий алгоритм дає набагато гірші результати

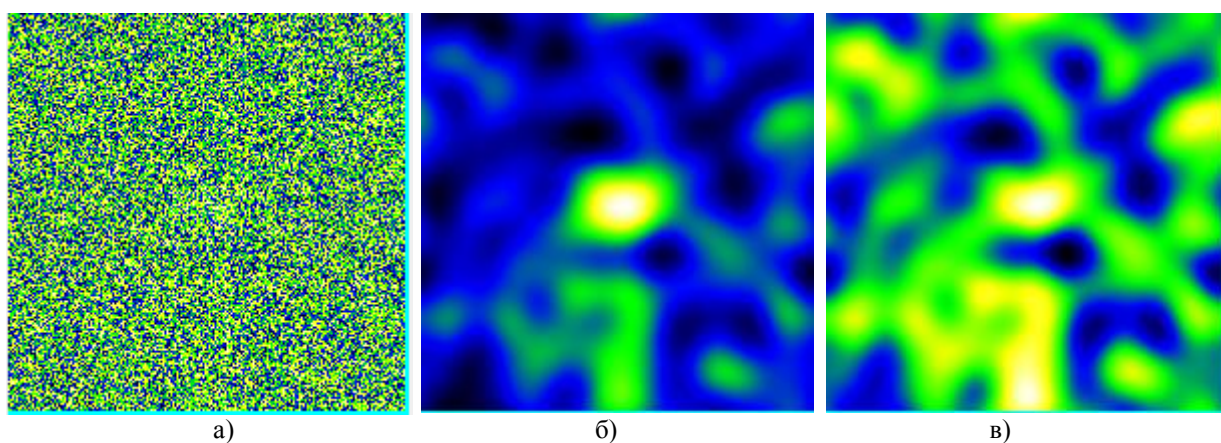


Рис. 5. Змодельовані результати застосування алгоритму «фокусування»:
а – кадр (200x200) максимального температурного перепаду (шуми 5% та 40 мК);
б – результат застосування алгоритму «фокусування» для кадру максимального перепаду;
в – при шумах 20% та 40 мК з'являється множина артефактів, що знецінюють результат

об'єкт. Але вже на рівні структурних шумів 20% (при мінімальному шумі матриці тепловізора 40 мК) з'являється безліч артефактів, що знецінюють результат (рис. 5, в).

Сумісне застосування алгоритмів компенсації артефактів та "фокусування" теплового зображення.

Два розроблених алгоритма можна вважати «ортогональними» у тому сенсі, що вони спрямовані на компенсацію шумів двох різних типів. Перший компенсує артефакти неоднорідностей коефіцієнту «чорноти», але не впливає на приладовий шум.

Другий (алгоритм «фокусування») навпаки, згладжує шуми матриці, але не впливає на рівень структурного шуму. Це наявно проілюстровано на рис. 4 та 5. Саме тому сумісне застосування цих алгоритмів дає велику перевагу та дозволяє на порядок поліпшити умови виявлення неоднорідностей у ґрунті.

На рис. 6 показано результати послідовного застосування двох алгоритмів для випадку з дуже великим рівнем шумів обох типів (50% структурного шуму та 200 мК приладового). Рівень таких шумів, відповідно, у 40 та 2 рази перевищують рівень корисного сигналу (максимальний температурний перепад над об'єктом, що дорівнює 120 мК). Зазвичай результати термографічних досліджень з таким рівнем шумів вважають недостовірними. Але застосування алгоритму компенсації артефактів (рис. 6, а) дає трохи більшу інформацію про ґрунт, аніж первинний термографічний кадр. Застосування алгоритму «фокусування» вже для цього зображення дає можливість надійно виявити об'єкт, занурений на глибині 30см (рис. 6, б).

Додатково, у рамках загального алгоритму виявлення та ідентифікації, ми можемо врахувати рівень шумів та визначити межу «відсічки»

недостовірних артефактів знизу. Тобто, залишити на зображенні тільки достовірні (більше за 95% по критерію відсутності помилок) неоднорідності. Це дає кінцеве зображення термографічної проекції неоднорідностей у ґрунті, виявлених із заданим рівнем достовірності (рис. 6, в). Воно майже не відрізняється від «ідеального» зображення максимального температурного перепаду над зануреним у ґрунт об'єктом (див. рис. 3, а; 4, б).

5. Дискусія

Проблема теплової томографії ґрунту є однією із актуальніших задач теплового контролю, що пов'язано як із інженерними, так і соціальними проектами (зокрема, розмінування великих територій). Але вона є й однією із найскладніших задач цього напрямку. Це пов'язано, перш за все, із великим рівнем структурного шуму (неоднорідність коефіцієнта випромінювання поверхні ґрунту).

Якщо у модельних або лабораторних дослідженнях вдається понизити рівень цих шумів до 5% або менше, то обробка великих площ (декілька гектарів) на практиці неможлива. Тим не менш, цей шум можна у першому наближенні віднести до систематичного і майже повністю компенсувати його спеціально розробленими алгоритмами (що й зроблено нами у цій роботі).

Та навіть цей алгоритм дає великі хиби при наявності навіть малого приладового (випадкового) шуму матриці тепловізора (на рівні його чутливості). Тому основним результатом роботи слід вважати те, що ми уперше поєднали алгоритми боротьби із цими шумами таким чином, що вони не заважають один одному.

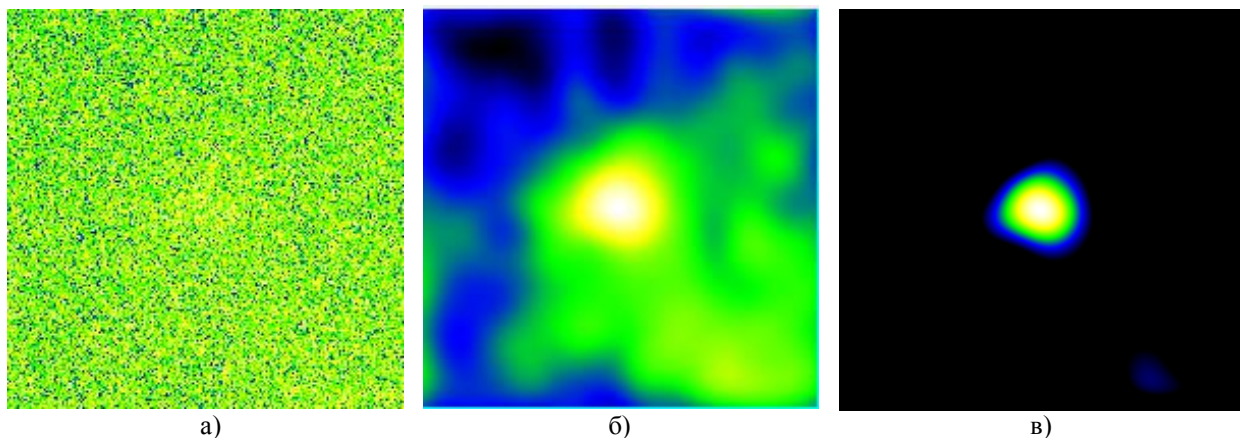


Рис. 6. Результати сумісного застосування алгоритмів компенсації артефактів та «фокусування»: а – результат застосування алгоритму компенсації артефактів (шуми 50% та 200мК); б – результат застосування алгоритму «фокусування» після обробки термографічного зображення попереднім алгоритмом; в – додаткове застосування алгоритму «відсічки» недостовірних неоднорідностей

Попередні дослідження на комп'ютерній моделі показали, що запропонована методика їх застосування може на порядок підвищити ефективність виявлення та ідентифікації неоднорідностей, занурених у ґрунт по основним параметрам (відношення глибини до характерних розмірів об'єкта, рівень структурних та приладових шумів, та інше).

Ми усвідомлюємо, що застосування розроблених методів та алгоритмів на практиці потребують подальших досліджень та уточнень, але вже зараз можна передбачити великий обсяг застосування результатів цієї роботи, що відповідає світовому рівню аналогічних досліджень, а по деяких параметрах перевищує його.

Висновки

У роботі показано, що основними перешкодами широкому застосуванню методу теплової томографії є структурні шуми, пов'язані із неоднорідністю коефіцієнта випромінювання поверхні, що спостерігається (зокрема, ґрунту). Тому загалом границею можливостей вважають відношення глибини залягання неоднорідності до її характерного розміру, як 1/3. Тим не менш, розсіяна по поверхні та спотворена інформація про структуру ґрунту зберігається в одержаних термограмах поверхні майже без втрат при набагато більшому значенні цього параметру.

Нами розроблено два алгоритми відновлення цієї інформації, що дозволяють на порядок поліпшити ефективність теплового методу дослідження ґрунту. Перший з них ефективно знижує рівень структурного шуму, а другий – приладового (шуму матриці тепловізора). Саме їх поєднання і дозволяє одержати чітке зображення ґрунту навіть при 50% структурного та 200 мК приладового шуму при значенні критерія глибини 3/2.

Попередні висновки підтверджено на комп'ютерній моделі тепловізійних вимірювань зануреного у ґрунт об'єкта при пасивному методі контролю (за рахунок добової сонячної активності). Слід зазначити, що у реальному експерименті треба врахувати низку особливостей, які теоретично можуть вплинути на ефективність роботи алгоритмів. Зокрема, це:

- неоднорідність спектру структурних шумів;
- необхідність точного відстеження як параметрів температури повітря, швидкості вітру, так і сонячної активності вздовж 2-3 діб (метеорологічні дані);

- неоднорідність шарів ґрунту без включень, що треба виявити;

- специфіку алгоритмів вимірювань та обробки первинних даних, що надходять з тепловізійної матриці, її калібровки, та інше.

Загалом ці задачі складні як з математичної, так і з експериментальної точки зору, та потребують окремого розгляду. Ми плануємо представити результати цих досліджень, що нами проведено на макеті та у натурному експерименті, у наступних публікаціях.

Внесок авторів: огляд та аналіз інформаційних джерел - Г. Л. Федоренко, В. І. Кохановський; формулювання мети і постановки задачі досліджень - Г. Л. Федоренко, В. С. Харченко; розроблення концептуальних положень дослідження - С. І. Мельник, Г. Л. Федоренко, В. С. Харченко, С. С. Мельник; розроблення методів, математичних моделей та аналіз результатів дослідження - С. І. Мельник, С. С. Мельник; вибір та використання програмно-технічних засобів для моделювання та представлення результатів - С. С. Мельник, В. І. Кохановський; проведення та обробка отриманих результатів дослідження - С. І. Мельник, С. С. Мельник; формулювання висновків - С. І. Мельник, В. С. Харченко; написання статті - С. І. Мельник, С. С. Мельник, Г. Л. Федоренко, В. С. Харченко, В. І. Кохановський.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Федоренко, Г. Аналіз методів і розроблення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів [Текст] / Г. Федоренко, Г. Фесенко, & В. Харченко // Сучасний стан наукових

досліджень та технологій в промисловості. – 2023. – № 4 (22). – С. 20-31. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.22.020.

2. Yeom, S. *Thermal Image Tracking for Search and Rescue Missions with a Drone [Text]* / S. Yeom // *Drones*. – 2024. – Vol. 8, no. 2. – Article no. 53. DOI: 10.3390/drones8020053.

3. *Robotic-biological systems for detection and identification of explosive ordnance: concept, general structure, and models [Text]* / G. Fedorenko, H. Fesenko, V. Kharchenko, I. Kliushnikov, & I. Tolkunov // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2023. – No. 2. – P. 143-159. DOI: 10.32620/reks.2023.2.12.

4. *Thermal tomography 3D imaging of additively manufactured metallic structures [Text]* / A. Heifetz, D. Shribak, X. Zhang, J. Saniie, Z. L. Fisher, T. Liu, J. G. Sun, T. Elmer, S. Bakhtiari, & W. Cleary // *AIP Advances*. – 2020. – Vol. 10, no. 10. – Article no. 105318. DOI: 10.1063/5.0016222.

5. Thanh, N. T. *Infrared Thermography for Buried Landmine Detection: Inverse Problem Setting [Text]* / N. T. Thanh, H. Sahli, & D. N. Hao // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2008. – Vol. 46, no. 12. – P. 3987-4004. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2000926.

6. *Thermographic Evaluation of Defects in Composite Materials [Text]* / B. S. Wong, C. G. Tui, W. Bai, P. H. Tan, B. S. Low, & K. S. Tan // *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. – 1999. – Vol. 41, no. 8. – P. 504.

7. Грицик, В. В. *Дослідження теорії зображень: попередня обробка – виділення країв [Текст]* / В. В. Грицик, & В. І. Задорожній // *Прикладні питання математичного моделювання*. – 2023. – Т. 6, № 1. – С. 20–29. DOI: 10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-2.

8. Sedeeq, I. *Image Forgery Detection Using Histogram-Oriented Gradients (HOG) [Text]* / I. Sedeeq // *Iraqi Journal of Science*. – 2025. – Vol. 66, no 5. – P. 2048-2058. DOI: 10.24996/ijs.2025.66.5.22.

9. *Ітеративне покращення інфрачервоних зображень у частотній області [Текст]* / С. А. Станкевич, О. М. Кондратов, М. І. Герда, О. В. Масленко, & Є. Ю. Саприкін // *Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка*. – 2024. – Т. 67, № 6. – С. 311-322. DOI: 10.20535/S0021347024070045.

10. Li, H. *Thermal Infrared-Image-Enhancement Algorithm Based on Multi-Scale Guided Filtering [Text]* / H. Li, S. Wang, S. Li, H. Wang, S. Wen, & F. Li // *Fire*. – 2024. – Vol. 7, iss. 6. – Article no. 192. DOI: 10.3390/fire7060192.

11. *Airborne Thermal Infrared Hyperspectral Imaging of Buried Objects [Text]* / M.-A. Gagnon, P. Lagueux, J.-P. Gagnon, S. Savary, P. Tremblay, V. Farley, E. Guyot, & M. Chamberland // *SPIE Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XX*. – Baltimore, 2015. – Vol. 9454. – Article no. 94540K. DOI: 10.1117/12.2177182.

12. *Improvement of Temperature and Emissivity Separation Algorithm for Thermal Infrared Hyperspectral Imaging Based on Airborne Data [Text]* / X. Zhang, C. Liu, R. Chen, B. Zeng, H. Xiong, K. Wang,

& S. Zhao // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2025. – Vol. 63. – P. 1-15. DOI: 10.1109/TGRS.2024.3520865.

13. *Infrared Thermography Image Based Classification of Soil Dirt and Fabric [Text]* / M. Deniz, M. Seçkin, Ç. Gençer, & D. Koç // *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. – 2023. – Vol. 7, iss. 3. – P. 441-455. DOI: 10.46519/ij3dptdi.1339049.

14. Wu, X. *UIU-Net: U-Net in U-Net for Infrared Small Object Detection [Text]* / X. Wu, D. Hong, & J. Chanussot // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2023. – Vol. 32. – P. 364-376. DOI: 10.1109/TIP.2022.3228497.

15. Мельник, С. І. *Метрологічні аспекти вимірювань у задачах теплової томографії [Текст]* / С. І. Мельник, Г. І. Петріченко, & І. Г. Тулузов // *Метрологія та прилади*. – 2017. – № 5(67). – С. 38-47.

16. Мельник, С. *Нові методи теплової томографії, а також фільтрації тепловізіонних зображень [Текст]* / С. Мельник, Г. Петріченко, & І. Тулузов // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2016. – № 77. – С. 48-57.

17. *Tomographic reconstruction from planar thermal imaging using convolutional neural network [Text]* / D. Ledwon, A. Sage, J. Juszczyk, & P. Badura // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – Article no. 2347. – DOI: 10.1038/s41598-022-06076-z.

18. *Математичне моделювання процесів теплопровідності у багатошарових середовищах із тонкими включеннями [Текст]* / С. І. Мельник, Л. Дяконюк, В. Кухарський, & Я. Савула // *Математичні проблеми механіки неоднорідних структур*. – 2000. – Т. 1. – С. 212–215.

19. Melnyk, S. I. *Method of projection dynamic thermal tomography (PDTT) [Text]* / S. I. Melnyk, S. S. Melnyk, & S. G. Tuluzov // *11 International Conference on Quantitative Infrared Thermography: QIRT-2012*. – Naples, 2012. – P. 1-6. DOI: 10.21611/qirt.2012.308.

References

1. Fedorenko, G., Fesenko, H., & Kharchenko, V. *Analiz metodiv i rozroblennya kontseptsiyi harantovanoho vyyavlennya ta rozpoznavannya vybukhonebezpechnykh predmetiv [Analysis of methods and development of the concept of guaranteed detection and recognition of explosive objects]. Suchasnyy stan naukovykh doslidzhen' ta tekhnolohiy v promyslovishti – Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2022, no. 4 (22), pp. 20-31. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.22.020. (In Ukrainian).

2. Yeom, S. *Thermal Image Tracking for Search and Rescue Missions with a Drone. Drones*, 2024, vol. 8, no. 2, article no. 53. DOI: 10.3390/drones8020053.

3. Fedorenko, G., Fesenko, H., Kharchenko, V., Kliushnikov, I., & Tolkunov, I. *Robotic-biological systems for detection and identification of explosive ordnance: concept, general structure, and models. Radioelectronic and*

Computer Systems. 2023, no. 2, pp. 143-159. DOI: 10.32620/reks.2023.2.12.

4. Heifetz, A., Shribak, D., Zhang, X., Saniie, J., L. Fisher, Z., Liu, T., Sun, J. G., Elmer, T., Bakhtiari, S., & Cleary, W. Thermal tomography 3D imaging of additively manufactured metallic structures. *AIP Advances*, 2020, vol. 10, iss. 10, article no. 105318. DOI: 10.1063/5.0016222.

5. Thanh, N. T., Sahli, H., & Hao, D. N. Infrared Thermography for Buried Landmine Detection: Inverse Problem Setting. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, vol. 46, no. 12, pp. 3987-4004. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2000926.

6. Wong, B. S., Tui, C. G., Bai, W., Tan, P. H., Low, B. S., & Tan K. S. Thermographic Evaluation of Defects in Composite Materials. *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 1999, vol. 41, no. 8, p. 504.

7. Hrytsyk, V. V., & Zadorozhnyi, V. I. Doslidzhennya teoriiy zobrazen': poperednya obrobka – vydilennya krayiv [Research of image theory: preprocessing – edge detectors]. *Prykladni pytannya matematychnoho modelyuvannya – Applied questions of mathematical modelling*, 2023, no 1, pp. 20–29. DOI: 10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-2 (In Ukrainian).

8. Sedeeq, I. Image Forgery Detection Using Histogram-Oriented Gradients (HOG). *Iraqi Journal of Science*, 2025, vol. 66, no 5, pp. 2048-2058. DOI: 10.24996/ijs.2025.66.5.22.

9. Stankevych, S. A., Kondratov, O. M., Herda, M. I., Maslenko, O. V., & Saprykin, Ye. Yu. Iteratyvne pokrashchennya infrachervonykh zobrazen' u chastotniy oblasti [Iterative enhancement of infrared images in the frequency domain]. *Visti vyshchykh uchbovykh zakladiv. Radioelektronika – Visnyk of Higher Educational Institutions. Radioelectronics*, 2024, vol. 67, no 6, pp. 311-322. DOI: 10.20535/S0021347024070045. (In Ukrainian).

10. Li, H., Wang, S., Li, S., Wang, H., Wen, S., & Li, F. Thermal Infrared-Image-Enhancement Algorithm Based on Multi-Scale Guided Filtering. *Fire*. 2024, vol. 7, iss. 6, article no. 192. DOI: 10.3390/fire7060192.

11. Gagnon, M.-A., Lagueux, P., Gagnon, J.-P., Savary, S., Tremblay, P., Farley, V., Guyot, E., & Chamberland, M. Airborne Thermal Infrared Hyperspectral Imaging of Buried Objects. *SPIE Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XX*, Baltimore, 2015, vol. 9454, article no. 94540K. DOI: 10.1117/12.2177182.

12. Zhang, X., Liu, C., Chen, R., Zeng, B., Xiong, H., Wang, K., & Zhao, S. Improvement of Temperature and Emissivity Separation Algorithm for Thermal Infrared Hyperspectral Imaging Based on Airborne Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2024, vol. 63, pp. 1-15. DOI: 10.1109/TGRS.2024.3520865.

13. Deniz, M., Seçkin, M., Gençer, Ç. & Koç, D. Infrared Thermography Image Based Classification of Soil Dirt and Fabric. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. 2023, vol. 7, iss. 3, pp. 441-455. DOI: 10.46519/ij3dptdi.1339049.

14. Wu, X., Hong, D., & Chanussot, J. UIU-Net: U-Net in U-Net for Infrared Small Object Detection. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2023, vol. 32, pp. 364–376. DOI: 10.1109/TIP.2022.3228497.

15. Melnyk, S. I., Petrychenko, H. I., & Tuluzov, I. H. Metrolohichni aspekty vymiryuvan' u zadachakh teplovoyi tomografiiy [Metrological aspects of measurements in thermal tomography problems]. *Metrolohiya ta prylady – Metrology and Instruments*, 2017, vol. 67, no 5, pp. 38–47. (In Ukrainian).

16. Melnyk, S., Petrychenko, H., & Tuluzov, I. Novi metody teplovoyi tomografiiy, a takozh fil'tratsiyi teplovizyinykh zobrazen' [New methods of thermal tomography and filtering of thermographic images]. *Vymiryval'na tekhnika ta metrolohiya – Measurement Technology and Metrology*, 2016, vol. 77, pp. 48–57. (In Ukrainian).

17. Ledwon, D., Sage, A., Juszczak, J. & Badura, P. Tomographic reconstruction from planar thermal imaging using convolutional neural network. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, article no. no. 2347. DOI: 10.1038/s41598-022-06076-z.

18. Melnyk, S. I., Diakoniuk, L., Kukharskyi, V., & Savula, Ya. Matematychno modelyuvannya protsesiv teploprovodnosti u bahatosharovykh seredovyschakh iz tonkymy vklyuchennyamy [Mathematical Modeling of Heat Conduction Processes in Multilayer Media with Thin Inclusions]. *Matematychni problemy mekhaniky neodnorodnykh struktur – Mathematical Problems of the Mechanics of Inhomogeneous Structures*, 2000, vol. 1, pp. 212–215. (In Ukrainian).

19. Melnyk, S. I., Melnyk, S. S., & Tuluzov, I. G. Method of projection dynamic thermal tomography (PDTT). *11 International Conference on Quantitative Infrared Thermography: QIRT-2012*, Naples, 2012, pp. 1-6. DOI: 10.21611/qirt.2012.308.

Надійшла до редакції 16.08.2025, розглянута на редколегії 22.09.2025

APPLICATION OF THERMAL TOMOGRAPHY METHOD FOR DETECTION OF OBJECTS IMMERSSED IN THE GROUND

Sergiy I. Melnyk, Serhii S. Melnyk, Gennadiy Fedorenko,
Vyacheslav Kharchenko, Volodymyr Kokhanovsky

The **subject matter** of the article is the processes of propagation of thermal waves excited by daily solar activity in soil with local inhomogeneities (inclusions). The **goal** is to develop a mathematical model of these processes and algorithms for detecting and identifying these inhomogeneities against a background of high-level structural and instrumental noise. The **tasks** to be solved are: to analyze the state of developments in thermal tomography of the soil and the detection of objects hidden within it; to build a numerical-analytical model of the propagation of thermal

waves in soil with inclusions under model and full-scale experimental conditions; to develop an algorithm for compensating artifacts caused by the inhomogeneity of soil emissivity distribution, and an algorithm for suppressing instrument noise based on the criterion of minimizing the loss of information about inclusion parameters; and to analyze the adequacy of the developed models and the effectiveness of the algorithms in a computer experiment. The **methods** used include thermal conductivity theory, information theory, numerical modeling using the COMSOL MULTIPHISICS software package. The following **results** were obtained: The main obstacles to the widespread use of the thermal tomography method are structural noise associated with the inhomogeneity of surface emissivity (particularly in soil). Typically, the ratio of the depth of the object to its characteristic size is considered to be 1/3. Two algorithms have been developed for restoring information lost due to the presence of noise, which enable an order-of-magnitude improvement in the efficiency of the thermal method. The first algorithm effectively reduces the level of structural noise, and the second reduces the noise of the thermal imager matrix. Their combination allows obtaining a clear image of the subsoil even with 50% structural and 200 mK instrumental noise at a depth criterion value of 3/2. These preliminary conclusions were confirmed in a computer model of thermal imaging measurements of an object immersed in the subsoil using a passive control method (driven by daily solar activity). Several features that could theoretically affect the efficiency of the algorithms in a real experiment were analyzed. **Conclusions:** the scientific novelty of the results obtained is as follows: a new method of thermal tomography of soil inhomogeneities has been developed, which is based on an algorithm for comparing two thermograms of the soil surface, taken at fixed points in time dependent on meteorological conditions during the day, and a combination of two algorithms for processing these thermograms, which enable the elimination of artifacts caused by structural noise and suppression of instrumental noise with minimal loss of useful information about the inhomogeneity.

Keywords: thermal tomography; noise filtering; thermal imaging soil monitoring; thermographic data.

Мельник Сергій Іванович – канд. техн. наук, доц., старш. наук. співроб. відділу статистичної радіофізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, Харків, Україна.

Мельник Сергій Сергійович – канд. фіз.-мат. наук, старш. досл. (звання), старш. наук. співроб. відділу теоретичної фізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, Харків, Україна.

Федоренко Геннадій Леонідович – канд. техн. наук, старш. наук. співроб. каф. комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Харченко Вячеслав Сергійович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Кохановський Володимир Ілліч – канд. техн. наук, директор ТОВ «Дослідне конструкторське бюро шліфувальних верстатів», Харків, Україна.

Sergiy I. Melnyk – Candidate of Technical Sciences, Assoc. Prof., Senior Scientific Fellow at the Department of Statistical Radiophysics O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, Kharkiv, Ukraine, e-mail: melnyksergiy72@gmail.com, ORCID: 0009-0002-9885-4380.

Serhii S. Melnyk – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Senior Scientific Fellow at the Department of Theoretical Physics O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, Kharkiv, Ukraine, e-mail: melnik.teor@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9848-9198.

Gennadiy Fedorenko – Candidate of Technical Sciences, Senior Scientific Fellow at the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: g.fedorenko@csn.khai.edu; ORCID: 0000-0003-0162-7422.

Vyacheslav Kharchenko – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.kharchenko@csn.khai.edu, ORCID: 0000-0001-5352-077X, Scopus Author ID: 22034616000.

Volodymyr Kokhanovskyi – Candidate of Technical Sciences, Director of LLC "Research Design Bureau of Grinding Machines", Kharkiv, Ukraine, e-mail: vladik1910@gmail.com, ORCID: 0009-0006-2057-8872.