

УДК 687.016.6, 62-932.2

doi:10.20998/2413-4295.2025.02.01

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КАМУФЛЯЖНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВИДИМОМУ ТА ІЧ-ДІАПАЗОНАХ

А. І. ДОБРОЖАН, К. Д. РІЯКО, К. О. МІНАКОВА, Р. В. ЗАЙЦЕВ, М. В. КІРІЧЕНКО

Кафедра Мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків, УКРАЇНА
e-mail: Kseniia.Minakova@khpi.edu.ua

АНОТАЦІЯ Досліджено оптичні властивості камуфляжних тканин з різними патернами через знімки віддзеркаленого випромінювання при різних довжинах хвиль (синє 440 нм, зелене 663 нм та інфрачервоне 1100 нм). Для кожного зразка були побудовані графіки, що відображають відсоток відбитої та поглинутої енергії променів. У синьому та зеленому діапазонах результати відбивання світла для всіх тканин майже однакові, що свідчить про схожі властивості відображення цих променів. Однак у спектрі інфрачервоного випромінювання спостерігаються значні відмінності між тканинами. Патерн «Woodland» має яскраві відображення, з різкими градієнтами, де світлі частини патерну мають коефіцієнт відбиття менший за рівень відбиття білого кольору фону. Це свідчить про активне нагрівання темних ділянок тканини, що перевипромінюють ІЧ-випромінювання і можуть бути помітними для інфрачервоних засобів виявлення. У той же час тканина з патерном «ММ-14» демонструє кращі маскувальні властивості завдяки більшій кількості світло-сірого та світло-зеленого кольорів, що сприяє меншому відображенню ІЧ-випромінювання. Натурні дослідження показали, що тканина «Woodland» більш ефективна на більшості природних фонів, тоді як тканина «ММ-14» демонструє високу помітність на урбаністичних фонах, таких як міська забудова. Результати дослідження можуть бути корисними для розробників та виробників камуфляжних тканин, а також для Збройних сил України, з огляду на важливість маскування в умовах військового стану. Подальші дослідження в цьому напрямку є актуальними для покращення маскувальних властивостей військової форми.

Ключові слова: камуфляжні тканини; оптичні властивості; ефективність маскування; інфрачервоне виявлення; військові текстилі; натурні дослідження; оптичний аналіз.

RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF CAMOUFLAGE MATERIALS IN THE VISIBLE AND IR RANGES

A. DOBROZHAN, K. RIYAKO, K. MINAKOVA, R. ZAITSEV, M. KIRICHENKO

Micro- and Nanoelectronics Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Investigates the optical properties of camouflage fabrics with different patterns by analyzing reflected radiation images at various wavelengths (blue 440 nm, green 663 nm, and infrared 1100 nm). Graphs were constructed for each sample showing the percentage of reflected and absorbed energy for each wavelength. The reflection results for all fabrics were nearly identical in the blue and green ranges, indicating similar light reflection properties. However, significant differences were observed in the infrared spectrum. The "Woodland" pattern exhibited bright reflections with sharp gradients, where the light sections of the pattern had a lower reflection coefficient than the white background. This indicates active heating of the dark sections of the fabric, which re-radiates infrared radiation and may be visible to infrared detection systems. In contrast, the "MM-14" pattern demonstrated better camouflage properties due to the increased presence of light gray and light green colors, which reduce infrared reflection. Field studies showed that "Woodland" was more effective on most natural backgrounds, while the "Pixel" fabric showed high visibility against urban backgrounds such as city buildings. The results of this study could be useful for developers and manufacturers of camouflage fabrics, as well as for the Armed Forces of Ukraine, considering the importance of camouflage in the context of the ongoing military situation. Further research in this area is crucial for enhancing the camouflage properties of military uniforms.

Keywords: camouflage fabrics; optical properties; camouflage effectiveness; infrared detection; military textiles; field study; optical analysis.

Вступ

Камуфляжні матеріали відіграють важливу роль у забезпеченні невидимості та маскування об'єктів у різноманітних умовах навколишнього середовища [1]. Вони активно використовуються в армії, охоронних структурах, а також в різних

галузях, де важливо знизити видимість об'єкта для спостерігачів, що використовують різні сенсори. Камуфляж може застосовуватися не лише в оптичному діапазоні, а й у інфрачервоному (ІЧ) діапазоні, що визначає його універсальність і ефективність у різних умовах. Враховуючи сучасний розвиток технічних засобів спостереження, таких як

термальні камери та інфрачервоні датчики, важливість маскування в ІЧ спектрі зростає. Ці технології дозволяють виявляти теплові сліди, що залишають об'єкти, і стають особливо актуальними в умовах бойових дій, коли камуфляж має забезпечити захист не лише від видимого спектру, але й від інфрачервоних датчиків.

Одним із важливих аспектів дослідження ефективності камуфляжних матеріалів є їхня здатність зменшувати відображення та поглинання випромінювання в різних діапазонах спектра [2]. Для того, щоб оцінити ефективність тканин з різними камуфляжними патернами, необхідно провести аналіз їхніх оптичних характеристик у видимому та ІЧ спектрі. Це дозволяє визначити, наскільки матеріал здатний маскувати об'єкти на фоні природного середовища в умовах різного освітлення та температурних коливань.

У даній роботі проведено дослідження оптичних властивостей камуфляжних матеріалів, зокрема їхнього відбиття та поглинання випромінювання в синьому, зеленому та ІЧ діапазонах. Для цього було обрано три зразки тканин з різними камуфляжними патернами, що активно використовуються в Україні [3,4]. Завданням дослідження є порівняти ефективність камуфляжів у контексті маскування об'єктів в умовах різного освітлення та температурних впливів, а також визначити, який камуфляж забезпечує найкраще приховування в ІЧ спектрі.

Отримані результати дозволяють оцінити, які саме камуфляжні патерни є найбільш ефективними в умовах сучасних технологій виявлення об'єктів, що може бути корисним для подальшої розробки та вдосконалення матеріалів для військового використання, зокрема для Збройних сил України.

Мета роботи

Дослідження ефективності камуфляжних матеріалів у видимому та інфрачервоному діапазонах спектра для оцінки їхніх маскувальних властивостей у різних умовах навколишнього середовища. Зокрема, робота спрямована на порівняння відбиття та поглинання випромінювання від тканин з різними камуфляжними патернами (Woodland та MM-14) в синьому (440 нм), зеленому (663 нм) та інфрачервоному (1100 нм) діапазонах.

Оптичні властивості маскувальних тканин

Оптичні властивості тканин, особливо тих, що використовуються у військовій сфері, є критично важливими для маскування і зниження видимості. Основні аспекти, які впливають на те, як тканини відбивають світло і як далеко їх видно, включають:

1. Відбивання світла

Тканини можуть відбивати світло різною мірою залежно від їх структури, кольору та покриття.

- Матеріал: Гладкі і блискучі поверхні, такі як нейлон чи поліестер, можуть відбивати більше світла, що робить їх більш видимими. Військові тканини зазвичай мають матову текстуру, щоб мінімізувати рефлексію.
- Покриття: Деякі тканини можуть бути оброблені спеціальними антибліковими покриттями, що знижують рівень відбитого світла, наприклад, з використанням спеціальних матових фарб або просочень.

2. Колір і спектр видимого світла

- Камуфляж: Військові тканини зазвичай використовують кольори, які допомагають їм зливатися з навколишнім середовищем (зелений, сірий, коричневий), що знижує їх видимість для неозброєного ока.
- Інфрачервоний спектр: Для уникнення виявлення за допомогою тепловізорів, використовуються тканини з низьким інфрачервоним випромінюванням. Це досягається спеціальними волокнами або покриттями, які поглинають чи розсіюють теплові хвилі.

3. Розсіювання світла

- Текстура тканини: Нерівні поверхні краще розсіюють світло в різних напрямках, зменшуючи рівень прямого відбиття. Наприклад, тканини з грубою текстурою або додатковими нашивками мають кращі маскувальні властивості, оскільки розсіюють світло.
- Ворсисті або м'які поверхні: Тканини з ворсом можуть поглинати більше світла, що знижує їхню видимість, особливо в умовах слабого освітлення.

4. Видимість у різних умовах

- Видимість вдень: Тканини для військових зазвичай мають кольори, які дозволяють їм залишатися непомітними при денному світлі, зливаючись з природним фоном.
- Видимість вночі: Вночі, при слабкому освітленні, видимість залежить від наявності місяця, зірок або штучних джерел світла. Також тканини можуть бути малопомітними для приладів нічного бачення, якщо мають низький рівень інфрачервоного випромінювання.

5. Відстань видимості

- Звичайне освітлення: У середньому за нормального денного освітлення і за відсутності спеціальних маскувальних заходів, військовий одяг можна побачити на відстані до 200-500 метрів. Це залежить від контрасту з фоном, руху і рефлексивних властивостей.
- Прилади нічного бачення і тепловізори: Тканини з низьким тепловим випромінюванням

мають низьку видимість для тепловізорів, але за високої температури або активної діяльності (наприклад, руху) можуть стати помітними на відстані до 1-2 км.

Таким чином, завдяки різним технологіям, військові тканини розробляються таким чином, щоб мінімізувати їх видимість як для людського ока, так і для різних технічних засобів (тепловізорів, приладів нічного бачення) [5,6].

Зважаючи на ці результати, для розробки та виробництва камуфляжних матеріалів для військових та інших спеціалізованих застосувань, необхідно враховувати їхню ефективність не тільки в умовах видимого освітлення, але й у застосуванні інфрачервоних сенсорів. Це підкреслює важливість комбінованого підходу до розробки матеріалів, які можуть забезпечити ефективне маскування в різних спектральних діапазонах та умовах [7].

Методика дослідження

Зразки тканин для одягу військовослужбовців досліджувались на відбиття світла за адаптованою методикою. Джерелом світла був світлодіодний сонячний симулятор G2V Sunbrick Base [8], який за своїми параметрами дозволяє спрямувати плоскопаралельний потік світла на тестовий зразок великої площі. Калібрована площа джерела освітлення становить 400 см^2 , загальна 625 см^2 , що дозволяє досліджувати не тільки окремі ділянки матеріалу, але і загалом середній коефіцієнт відбиття та вплив камуфляжного забарвлення різного типу на матеріалі.

Світлодіодні сонячні симулятори G2V Sunbrick були розроблені для найвищого ступеня точності та одноманітності для використання під час тестування фотоелектричних систем, фотохімічних дослідів та тестування навколишнього середовища. Прилад перевищує вимоги класу AAA, як визначено стандартами, що регулюють моделювання сонячної енергії, зокрема JIS-C8912, IEC 60904-9 та ASTM-E927. Характеристики стандартної моделі сонячного імітатора Sunbrick: максимальна освітленість $1,1$ сонячний еквівалент - $83,5 \text{ мВт/см}^2$ базового спектру від 400 нм до 1100 нм ; просторова рівномірність опромінення – клас А, 36 світлодіодних каналів для налаштування спектру випромінювання. Для отримання монохроматичного випромінювання використовувались канали з довжиною хвилі 440 нм – синє світло, 663 нм – зелене світло, 1000 нм – ІЧ випромінювання. Відбите від матеріалу світло фіксувалось під кутом 30° на камеру мобільного телефону чи тепловізійної камери FLIR ONE Pro для подальшої математичної обробки.

Тепловізійна камера FLIR ONE Pro [9] застосовувалась для візуальної фіксації теплового потоку від матеріалу при опроміненні ІЧ світлом. FLIR ONE Pro оснащена мініатюрною тепловізійною

камерою FLIR з температурною роздільною здатністю 160×120 і може вимірювати температуру до 400°C для великих площ зображених елементів (рис. 1). В якості базового шару для отримання референсної інформації використовувався лист білого крейдового паперу.

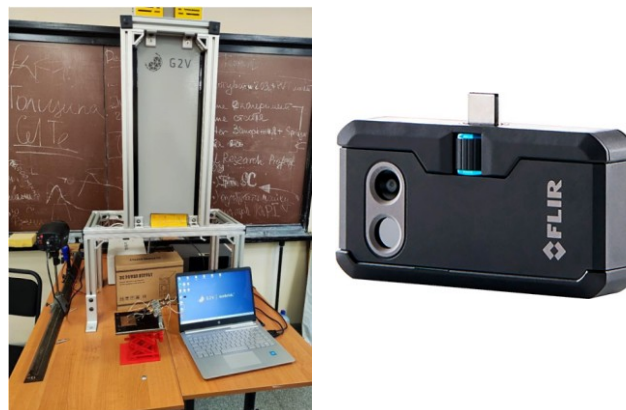


Рис. 1 - Загальний вигляд сонячного імітатора G2V Sunbrick та тепловізійної камери FLIR ONE Pro

Для обробки цифрових зображень результатів дослідження було використано пакет програмного забезпечення TourView, в якому реалізовано можливість розділення вкладу інтенсивності та складових базових кольорів у формуванні зображення. Після побудови відповідних графіків, дані було проаналізовано та згруповано.

Результати та їх обговорення

1. Дослідження оптичних властивостей сучасних камуфляжних матеріалів.

Для оцінки ефективності камуфляжних матеріалів у видимому та інфрачервоному спектрах було проведено низку експериментів, що дозволили визначити їх оптичні характеристики, зокрема рівень відбиття та поглинання світла. Усі експерименти проводилися в лабораторних умовах та в натурних умовах на різних фонах для симуляції реальних ситуацій.

У лабораторії були використані камуфляжні матеріали з різними патернами «Woodland» та «ММ-14». Вимірювання проводилися за допомогою спектрофотометра, що дозволяло визначити відсоток відбитої та поглинутої енергії для кожного матеріалу при освітленні різними хвилями світла: синім (440 нм), зеленим (663 нм) та інфрачервоним (1100 нм). Для кожного типу тканини було отримано ряд даних, що характеризують ефективність її відбиття і поглинання при різних умовах освітлення.

Були досліджені 3 відрізи тканини з матеріалу, який використовується для пошиву одягу військовослужбовців. Місто походження тканини – Черкаси, Україна. Відрізи тканин були

пронумеровані та відрізнялися камуфляжним забарвленням різного типу: Зразок 1 – малюнок типу «ММ-14» («піксель», «український піксель» - неофіційні назви), Зразок 2, Зразок 3 – малюнок типу «Woodland» різних малюнків. Відрізи тканин взяли з цілого рулону, не піддавались додатковим обробкам перед проведенням дослідження (носіння, прання, хімічстка), не потрапляли під прямі сонячні промені чи ультрафіолетове випромінювання. Подібні впливи могли б змінити результати дослідження, спричинивши пошкодження матеріалу та/або візерунок малюнка. Час, за який відбувалися виміри віддзеркалення матеріалу тканини і камуфляжного патерну були ≤ 1 хв і не могли спричинити їх пошкодження та/або спотворення результатів дослідження.

Аналітична обробка спектрографічних результатів дослідження була проведена шляхом підрахунку інтенсивності в спектральних полосах R – червона, G – зелена, B – синя та параметру інтенсивності A за прямою лінією, яка була проведена через весь зразок. Лінія була проведена так, щоб захоплювати крайніми частинами шар білого паперу який слугував фоном та базовим шаром, від якого відштовхувався подальший аналіз. В результатах досліджень відбиття синього 440 нм та зеленого світла 663 нм на краях графіків можна побачити рівну ділянку залежності – саме вона відповідає рівню випромінювання яке надходить від білого паперу. В результатах досліджень відбиття ІЧ світла довжиною хвилі 1100 нм білий папір розсіює тепло і слугує базисом рівня розсіювання теплового випромінювання.

З огляду на отримані спектрографічні результати (рис. 2) можна стверджувати, що Зразок 1 – «ММ-14» в синьому спектрі випромінювання візуально дискретний з огляду на чіткі границі кольорів патерну, світлі частини патерну мають коефіцієнт відбиття на рівні білого кольору та не відрізняються одна від одної, темні частини маскують (поглинають та/або пропускають) 20% випромінювання. Середня інтенсивність віддзеркаленого випромінювання низька – на рівні 10-15% для цього зразка.

В зеленому спектрі випромінювання Зразок 1 візуально дискретний з близької відстані, світлі частини патерну мають коефіцієнт відбиття на рівні білого кольору та майже не відрізняються одна від одної, темні частини маскують (поглинають та/або пропускають) 50-60% випромінювання. Середня інтенсивність віддзеркаленого випромінювання для всього зразка на рівні 30%.

В інфрачервоному спектрі випромінювання Зразок 1 візуально аморфний з плавними градієнтами, світлі частини патерну мають коефіцієнт відбиття на рівні білого кольору, активно розсіюють випромінювання, але їх площа менша, аніж темних частин. Темні частини малюнку

активно поглинають ІЧ випромінювання та розігріваються, що візуально можна зареєструвати. Рівень розсіювання в цих областях в 2 рази менший, порівняно з білим кольором.

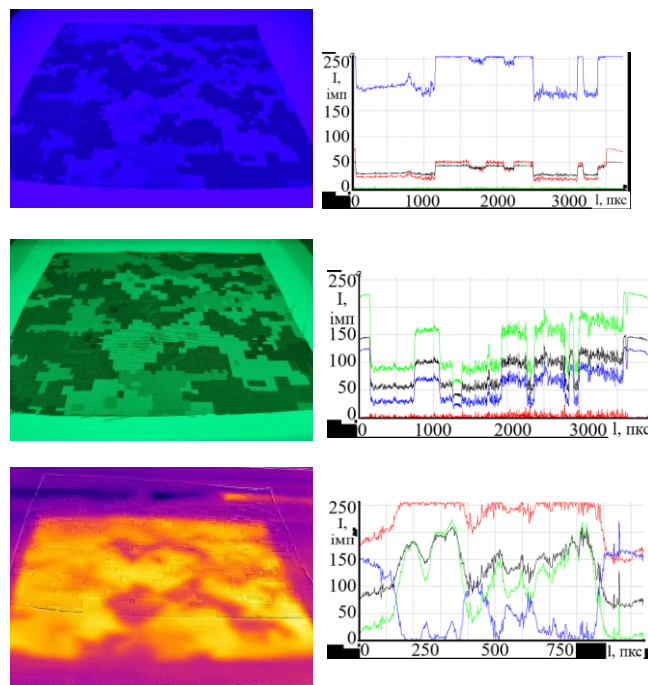


Рис. 2 – Результати дослідження середнього віддзеркалення Зразка 1 – «ММ-14» у випромінюванні (зверху вниз) 440 нм – синє світло, 663 нм – зелене світло, 1100 нм – ІЧ світло та відповідні їм графіки інтенсивності відбиття у відповідній спектральній полосі (R, G, B – червоні, зелені та сині криві відповідно) та інтенсивності випромінювання (чорні криві)

Спектрографічні результати (рис. 3) Зразка 2 – «Woodland» в синьому спектрі випромінювання показують, що матеріал повністю зливається з білим фоном в межах похибки вимірювання. Це вказує на повне приховування силуету та об'єму об'єкта в монохроматичному випромінюванні 440 нм.

В зеленому випромінюванні 663 нм усереднене значення віддзеркалення становить 25%. Білі плями патерну віддзеркалюють випромінювання на рівні білого фону 78-80%, але присутність їх на малюнку камуфляжного візерунку мінімальна ($\approx 5\%$ від загальної площі досліджуваного зразка).

В інфрачервоному спектрі випромінювання Зразок 2 яскравий з різкими градієнтами, світлі частини патерну мають коефіцієнт відбиття менше, аніж рівень відбиття білого кольору фону. Переважна частина малюнку патерну займає темні кольори, які активно перевипромінюють ІЧ випромінювання та розігріваються, що візуально можна зареєструвати. Рівень розсіювання в цих

областях в 4 рази менший, порівняно з білим кольором. Це може вказувати на повне демаскування для інфрачервоних засобів виявлення об'єктів, які використовують камуфляж даного типу.

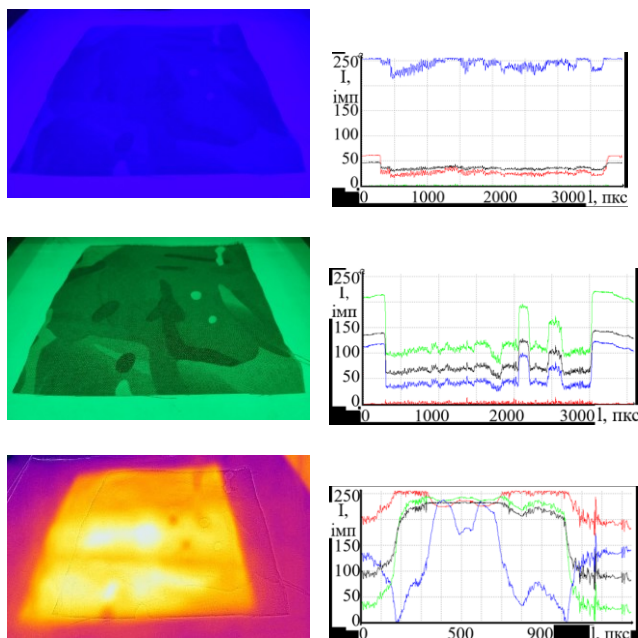


Рис. 3 – Результати дослідження середнього віддзеркалення Зразка 2 – «Woodland» у випромінюванні (зверху вниз) 440 нм – синє світло, 663 нм – зелене світло, 1000 нм – ІЧ світло та відповідні їм графіки інтенсивності відбиття у відповідній спектральній полосі (R, G, B – червоні, зелені та сині криві відповідно) та інтенсивності випромінювання (чорні криві)

Спектрографічні результати (рис. 4) Зразка 3 – «Woodland» в синьому спектрі випромінювання показують подібний до Зразка 2 результат. Матеріал зливається з білим фоном в межах похибки вимірювання. Це вказує на повну відтворюваність результатів для побідних камуфляжних рисунків в однакових експериментальних умовах.

У випромінюванні 663 нм дожині хвилі усереднене значення віддзеркалення становить 22%. Камуфляжний малюнок добре проглядається і відповідає природнім кольорам, які повинні зливатися з місцевістю зони змішаних лісів. Білі плями мають середній коефіцієнт віддзеркалення на рівні – 50 %, нижчий за білий фон – 60 %.

Дослідження ІЧ спектру віддзеркалення Зразка 3 показало подібний до Зразка 2 результат. Зареєстровано значний рівень випромінювання в ІЧ області спектра, якій віддзеркалювався від усієї площини зразка. Незначні частини малюнку білого кольору не впливають на сприйняття об'єкта, зберігається видимість силуету та об'єму замаскованого даним матеріалом.

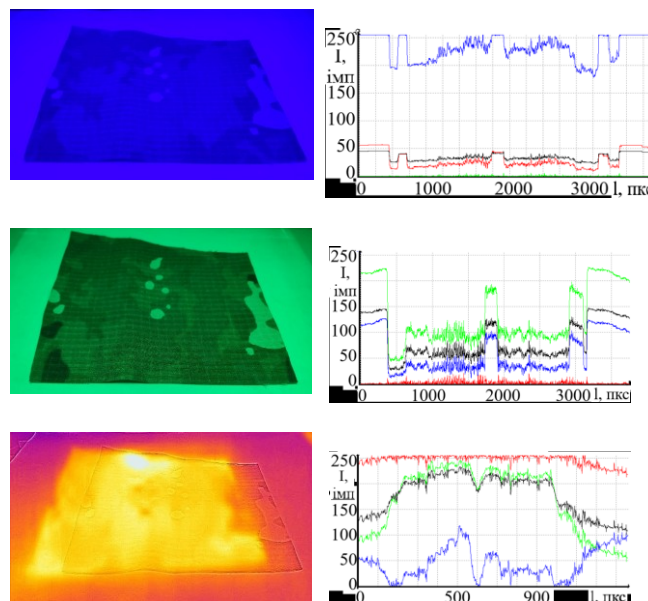


Рис. 4 – Результати дослідження середнього віддзеркалення Зразка 3 – «Woodland» у випромінюванні (зверху вниз) 440 нм – синє світло, 663 нм – зелене світло, 1000 нм – ІЧ світло та відповідні їм графіки інтенсивності відбиття у відповідній спектральній полосі (R, G, B – червоні, зелені та сині криві відповідно) та інтенсивності випромінювання (чорні криві)

2. Натурні дослідження ефективності матеріалів у різних середовищах (ліс, степ, міські локації).

Для дослідження ефективності камуфляжних матеріалів в реальних умовах було проведено серію польових тестів на різних фонах: природний ландшафт (ліс, трава) та урбаністичний фон (міська забудова, асфальт). Зразки тканин були розташовані на землі в умовах змінного освітлення протягом дня, зокрема при природному сонячному освітленні (рис. 5).

Природні умови (ліс, трава): Тканини були розміщені в лісі, серед трави та чагарників. Спостереження показали, що «Woodland» добре інтегрується в природне середовище, зливаючись з кольорами фону та створюючи ефективне маскування. Тканина з патерном «ММ-14», завдяки наявності світло-сірих та світло-зелених відтінків, також показала гарні результати, але її ефективність була дещо меншою за «Woodland».

Урбаністичні умови (міська забудова): В умовах міського середовища тканина з патерном «ММ-14» виявилася значно менш ефективною, оскільки її чітко визначені елементи контрастують з різноманітними текстурами урбаністичних фонів. Тканина «Woodland» на міському фоні продовжувала демонструвати добру здатність до маскування завдяки своєму варіативному кольоровому забарвленню, що дозволяє краще пристосовуватися до мінливих умов.



*Рис. 5 – Результати типових натурних досліджень
приведених для Зразка 1 – «ММ-14» у різних умовах
навколишнього середовища*

Головна ціль натурних досліджень є оцінка маскувальної ефективності різних патернів малюнків в умовах, наближених до реальних, з урахуванням специфіки різних середовищ (ліс, степ, урбанізовані зони). Це дозволило перевірити, як ці тканини вписуються в навколишнє середовище.

Зйомки проводилися звичайною телефонною камерою при різному освітленні. Провести оцінювання відбивної характеристики матеріалів тканин за допомогою таких фотографій можна, однак треба враховувати, що зразок на фотографії статичний та меншої площі, аніж реальний зразок військової форми. Враховуючи значну різницю між розміром зразка тканини і силуета людини, нерухомість зразка, неможливість умов симулювати статуру та покрій форми, дані результати можливо примінити на реальні зразки з обмеженою екстраполяцією описових даних.

Завдяки нерівномірному розміщенню піксельних плям малюнок розбивається на декілька частин і чудово маскується під навколишнє середовище. Особливо якщо навколишнє середовище не занадто яскраве або світле. За таких умов маскувальний ефект проявляється слабкіше. Піксельний патерн показав себе ефективним в багатьох середовищах, включно з міськими локаціями. Піксельний камуфляж досить гарно адаптується завдяки маленьким пікселям.

Woodland за рахунок розмитих плям зеленувато-коричневих відтінків, асиметричності та неупорядкованості візерунка, погано видно на зеленій рослинності або сухій траві, на фоні бетону.

Різноманітність забарвлення сприяє її ефективності у різних ландшафтах. Завдяки більшій кількості кольорів, Woodland краще маскується в різних оточеннях, тобто розширює ареал можливого використання. Проте цей патерн також може бути менш ефективним у специфічних українських ландшафтах, таких як густі ліси або степи, де фон буде дещо світліший. Для природних умов України ММ-14 підходить не гірше, особливо у весняно-літній період. А от у міських та зимових умовах його цифровий візерунок може бути менш ефективним, де потрібні інші маскувальні властивості. Обмежена кольорова гама знижує універсальність використання у різних ландшафтах.

Якщо акцентувати саме на тому, які мають Woodland і ММ-14 відмінності, то останній розроблений спеціально для умов України, враховуючи особливості місцевого ландшафту та кліматичні умови. Але хоч на деяких фонах малюнок пікселя був і менш помітний, все ж у більшості випадків MultiCam проявляв кращі маскувальні властивості, особливо зразок 3.

З вищевикладеного можна зробити висновок, що використання камуфляжного малюнка «ММ-14» значно покращує маскування об'єкта, його силуету у ІЧ спектрі випромінювання, порівняно з Woodland, через збільшену присутність областей світло-сірого та світлого-зеленого кольорів. З іншої сторони використання камуфляжу типу Woodland може бути доцільним у вигляді маскувальних сіток для техніки, пунктів постійної дислокації у зоні змішаних лісів.

Висновки

Результати лабораторних та натурних експериментів дозволили зробити висновки про ефективність кожного камуфляжного матеріалу за різних умов. Виявилося, що тканина з патерном «Woodland» є найефективнішою у видимому спектрі, однак в інфрачервоному діапазоні її ефективність значно зменшується через випромінювання темних ділянок малюнка. Тканина «ММ-14» має кращі характеристики маскування в ІЧ-діапазоні, що робить її більш придатною для використання в умовах інфрачервоних засобів виявлення.

Таким чином, експерименти дозволяють стверджувати, що ефективність маскування камуфляжних тканин залежить від їхніх оптичних властивостей у різних спектральних діапазонах. Використання правильного камуфляжного матеріалу залежить від конкретних умов, в яких планується його застосування [10].

В результаті проведених наукових досліджень була отримана серія знімків віддзеркаленого випромінювання від тканин з різними камуфляжними патернами. Після обробки цифрових зображень були побудовані графіки, за якими наочно можна оцінити відсоток відбитої та поглинутої енергії променів

різної довжини хвилі: синього 440 нм, зеленого світла 663 нм та ІЧ світла довжиною хвилі 1100 нм. Результати відбивання світлових променів всіх трьох зразків у синьому та зеленому діапазонах порівняні між собою, жодна з тканин не має значних переваг, а от освітлення інфрачервоним випромінюванням виявило значну різницю між зразками. Піксельний малюнок відбиває значно менше теплової енергії. А от патерн «Woodland» в інфрачервоному світлі яскравий з різкими градієнтами, світлі частини патерну мають коефіцієнт відбиття менше, ніж рівень відбиття білого кольору фону. Переважна частина малюнку патерну займає темні кольори, які активно перевипромінюють ІЧ випромінювання та розігріваються, що візуально можна зареєструвати. Рівень розсіювання в цих областях в 4 рази менший, порівняно з білим кольором. Це може вказувати на повне демаскування для інфрачервоних засобів виявлення об'єктів, які використовують камуфляж даного типу. Тобто, використання камуфляжного малюнку «ММ-14» значно покращує маскування об'єкта, його силуету у ІЧ спектрі випромінювання, порівняно з «Woodland», через збільшену присутність областей світло-сірого та світлого-зеленого кольорів.

Натурні дослідження виявило, що на більшості фонів менш помітною тканиною були саме зразки з патерном «Woodland». На відміну від патерну «Woodland», зразок «ММ-14» майже повністю демаскується у випадку урбаністичного фону міської забудови різного типу.

Проведені дослідження показали, що кожен з тестованих камуфляжних матеріалів має свої особливості відбиття та поглинання світла в різних спектрах. Всі тканини демонструють схожі результати в видимому спектрі (синє та зелене світло), але значні відмінності спостерігаються при впливі інфрачервоного випромінювання. Для синього (440 нм) та зеленого (663 нм) спектрів всі три камуфляжні тканини мають схожі показники відбиття, що свідчить про їх загальну ефективність у видимому діапазоні. Немає значної переваги в ефективності маскування серед цих матеріалів у природних умовах освітлення. Під час тестування в інфрачервоному спектрі (1100 нм) тканини продемонстрували значні відмінності. Тканина з патерном «ММ-14» показала менший рівень розсіювання теплової енергії, що може призвести до її виявлення при використанні інфрачервоних засобів виявлення. Натомість тканина «ММ-14», завдяки своєму кольоровому малюнку з світло-сірими та світло-зеленими відтінками, показала кращу ефективність у маскуванні в ІЧ-діапазоні. Тканина з патерном «Woodland» має високий рівень відбиття в ІЧ-діапазоні, що робить її помітною для інфрачервоних засобів виявлення. Проте в природних умовах, таких як ліс чи трава, вона демонструє гарні результати

маскування завдяки своїй здатності зливатися з оточенням. Результати досліджень можуть бути корисними для виробників та розробників камуфляжних матеріалів, зокрема для Збройних сил України. Оскільки ефективність маскування залежить від спектральних характеристик тканини, для конкретних завдань, зокрема в умовах інфрачервоних засобів виявлення, рекомендується використовувати тканини з більш збалансованими оптичними властивостями, такими як «ММ-14». Для подальшого вдосконалення маскувальних матеріалів варто продовжити дослідження в напрямку створення тканин, які забезпечують ефективне маскування в широкому спектрі, враховуючи не тільки видимий та ІЧ-діапазони, але й ультрафіолетовий спектр та інші технічні аспекти, що дозволяють покращити їх маскувальні властивості.

Враховуючи результати проведених експериментів, подальші дослідження в сфері камуфляжних матеріалів можуть охоплювати кілька важливих напрямів, спрямованих на вдосконалення їх маскувальних властивостей. Один із головних аспектів полягає в необхідності подальшого аналізу матеріалів у більш широкому спектрі довжин хвиль, включаючи ультрафіолетове (UV) випромінювання, оскільки сучасні системи виявлення та спостереження можуть працювати в цих діапазонах. Дослідження ультрафіолетових властивостей тканин дозволить оцінити їх здатність до маскування в умовах, коли традиційні інфрачервоні системи не є ефективними.

Крім того, варто приділити увагу впливу зовнішніх факторів на ефективність камуфляжних матеріалів, таких як вологість, температура та рівень освітлення. Це важливо для того, щоб отримати більш точні результати, які відображають реальні умови експлуатації. Наприклад, під впливом вологи матеріал може змінювати свої відображаючі властивості, що може вплинути на маскувальний ефект. Окрім того, дослідження на різних типах фонів (міський, лісовий, гірський) також допоможе глибше зрозуміти, як тканини різних камуфляжних патернів взаємодіють з навколишнім середовищем.

Подальший розвиток досліджень може включати використання новітніх матеріалів, таких як наноматеріали або фотонні структури, що мають потенціал значно покращити ефективність маскування. Використання таких технологій дозволяє створювати матеріали, що можуть динамічно змінювати свої оптичні характеристики в залежності від умов навколишнього середовища, що значно підвищить рівень маскування.

Також варто звернути увагу на можливість застосування композитних матеріалів, що поєднують в собі різні камуфляжні патерни для маскування не

лише в різних спектрах, але й для різних видів спостереження (помітність на далеких дистанціях, здатність відбивати мінімальну кількість теплової енергії тощо). Використання комбінованих матеріалів може забезпечити багатофункціональні властивості, що є важливим для сучасних військових технологій.

З іншого боку, проведення польових випробувань у різних географічних зонах та кліматичних умовах допоможе визначити, наскільки ефективно камуфляжні матеріали виконують свої функції в реальних бойових або спостережних умовах. Це дозволить адаптувати розробки для специфічних регіонів і поліпшити їх ефективність у різних природних та урбаністичних середовищах.

Таким чином, подальший розвиток досліджень в галузі камуфляжних матеріалів має значний потенціал для покращення маскувальних властивостей тканин і забезпечення високої ефективності їх використання у складних умовах спостереження та виявлення.

Подяка

Хочемо висловити щиру вдячність компанії G2V Optics (Канада) за їхню великодушну підтримку та благодійний внесок у наші дослідження. Обладнання LED Solar Simulator SunBrick, та комплект програмного забезпечення, надані компанією, виявилися важливим інструментом для наших експериментів та високоточних вимірювань. Ця технологія визначає новий стандарт у галузі імітування сонячного випромінювання, і ми вдячні за можливість використовувати її у нашій роботі.

Надане обладнання не тільки полегшило наші дослідження, а й розширило можливості лабораторії «Оптики та фотоніки» НТУ «ХПІ». Ми впевнені, що результати отриманих даних стануть важливим внеском у розвиток науки та допоможуть у розумінні ключових аспектів в області розробки вискоелективних сонячних елементів. Ще раз велика подяка G2V Optics за їхню високоякісну продукцію та партнерство.

Список літератури

1. Військова форма 2015: проект польової форми. URL: https://www.ukrmilitary.com/2015/03/2015_2.html (дата звернення: 20.03.2025).
2. NFM Group R&D. URL: <https://nfm.no/rd> (дата звернення: 20.03.2025).
3. Офіційний камуфляж Збройних Сил України. URL: <https://www.ukrmilitary.com/2015/02/patern-ua.html> (дата звернення: 20.03.2025).
4. Про затвердження Зразків військової форми одягу та загальних вимог до знаків розрізнення

- військовослужбовців та ліцеїстів військових ліцеїв Міністерства Оборони України; Наказ від 18.07.2017 № 370.
5. PROF1Group®. 20 років успіху. URL: <https://proflgroup.ua/proflgroup-20-let-uspeha> (дата звернення: 20.03.2025).
6. P1G-Tag. Наші розробки. URL: <https://p1gtac.com/developments-uk> (дата звернення: 20.03.2025).
7. Камуфляж українського війська: від "Бутана" до ММ-14. URL: <https://mil.in.ua/uk/articles/kamuflaz-ukrayinskogo-vijska-vid-butana-do-mm-14/> (дата звернення: 20.03.2025).
8. Кіриченко М. В., Зайцев Р. В., Мінакова К. О., Воробієв Б. В., Шкода Д. С., Лелюк С. Ю. Експериментальна апробація робочих режимів імітатора сонця Sunbrick. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*, 2023. вип. 2. № 7. С. 34-41. doi:10.20998/2224-0349.2023.02.13.
9. FLIR ONE® Pro. URL: <https://www.flir.eu/products/flir-one-pro/> (дата звернення: 20.03.2025).
10. Камуфляж - (майже) всі види і забарвлення. URL: <https://www.psdinfo.pro/post/kamuflaz-mayzhe-vsi-vidi-i-zabarvleniya> (дата звернення: 20.03.2025).

References (transliterated)

1. Viiskova forma 2015: proekt polovoi formy. Available at: https://www.ukrmilitary.com/2015/03/2015_2.html (accessed: 20.03.2025).
2. NFM Group R&D. Available at: <https://nfm.no/rd> (accessed: 20.03.2025).
3. Ofitsiyni kamufliazh Zbroinykh Syl Ukrainy. Available at: <https://www.ukrmilitary.com/2015/02/patern-ua.html> (accessed: 20.03.2025).
4. Pro zatverdzhennia Zrazkiv viiskovoi formy odiahu ta zahalnykh vymoh do znakov rozriznennia viiskovosluzhbovtiv ta litseistiv viiskovykh litseiv Minoborony Ukrainy; Nakaz vid 18.07.2017 № 370.
5. PROF1Group®. 20 rokiv uspikhu. Available at: <https://proflgroup.ua/proflgroup-20-let-uspeha> (accessed: 20.03.2025).
6. P1G-Tag. Nashi rozrobky. Available at: <https://p1gtac.com/developments-uk> (accessed: 20.03.2025).
7. Kamufliazh ukrainskoho viiska: vid "Butana" do MM-14. Available at: <https://mil.in.ua/uk/articles/kamuflaz-ukrayinskogo-vijska-vid-butana-do-mm-14/> (accessed: 20.03.2025).
8. Kirichenko M. V., Zaitsev R. V., Minakova K. O., Vorobiov B. V., Shkoda D. S., Leliuk S. Yu. Eksperymentalna aprobatsiia robochykh rezhymiv imitatora sontsia Sunbrick. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist*, 2023. vyp. 2, 7, pp. 34-41, doi:10.20998/2224-0349.2023.02.13.
9. FLIR ONE® Pro. Available at: <https://www.flir.eu/products/flir-one-pro/> (accessed: 20.03.2025).
10. Kamufliazh - (maizhe) vsi vydy i zabarvleniia. Available at: <https://www.psdinfo.pro/post/kamuflaz-mayzhe-vsi-vidi-i-zabarvleniya> (accessed: 20.03.2025).

Відомості про авторів (About authors)

Доброжан Андрій Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри мікро-та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8830-0942>; e-mail: dobr.abs@gmail.com.

Andrii Dobrozhan – PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Micro- and Nanoelectronic Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8830-0942>; e-mail: dobr.abs@gmail.com.

Ріяко Катерина Дмитрівна – учениця, КЗ Харківський ліцей 142 Харківської області Харківської міської ради, м. Харків, Україна; e-mail: rikate08@gmail.com.

Kateryna Riiko – student, Kharkiv Lyceum 142 of Kharkiv region of Kharkiv city council, Kharkiv, Ukraine; e-mail: rikate08@gmail.com.

Мінакова Ксенія Олександрівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри Мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8869-1082; e-mail: Kseniia.Minakova@khpi.edu.ua.

Kseniia Minakova – PhD of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Micro- and Nanoelectronics Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8869-1082; e-mail: Kseniia.Minakova@khpi.edu.ua.

Зайцев Роман Валентинович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри Мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2286-8452; e-mail: zaitsev.poman@gmail.com.

Roman Zaitsev – D.Sc. of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of Micro- and Nanoelectronics; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2286-8452; e-mail: zaitsev.poman@gmail.com.

Кіріченко Михайло Валерійович – кандидат технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-4847-506X; e-mail: kirichenko.mv@gmail.com.

Mykhailo Kirichenko – PhD of Technical Sciences, senior researcher, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor of the Micro- and Nanoelectronics Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4847-506X; e-mail: kirichenko.mv@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Доброжан А. І., Ріяко К. Д., Мінакова К. О., Зайцев Р. В., Кіріченко М. В. Дослідження ефективності камуфляжних матеріалів у видимому та ІЧ-діапазонах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 2 (24). С. 3-11. doi:10.20998/2413-4295.2025.02.01.

Please cite this article as:

Dobrozhan A., Riyako K., Minakova K., Zaitsev R., Kirichenko M. Research on the effectiveness of camouflage materials in the visible and IR ranges. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 2(24), pp. 3-11, doi:10.20998/2413-4295.2025.02.01.

Надійшла (received) 25.03.2025

Прийнята (accepted) 01.06.2025