

**ДОРОВСЬКИЙ ВОЛОДИМИР**

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

<https://orcid.org/0009-0008-7816-4546>e-mail: [volodymyr.Dorovskyi@e-u.edu.ua](mailto:volodymyr.Dorovskyi@e-u.edu.ua)**ДОРОВСЬКИЙ ДМИТРО**

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

<https://orcid.org/0009-0008-7816-4546>e-mail: [dmytro.dorovskyi@e-u.edu.ua](mailto:dmytro.dorovskyi@e-u.edu.ua)**ДОРОВСЬКА ІРИНА**

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

<https://orcid.org/0000-0001-8694-5395>e-mail: [i.dorovska@e-u.edu.ua](mailto:i.dorovska@e-u.edu.ua)**ПАШОРІН ВАЛЕРІЙ**

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

<https://orcid.org/0000-0001-6165-1147>e-mail: [v.pashorin@e-u.edu.ua](mailto:v.pashorin@e-u.edu.ua)**КІБЕРБЕЗПЕКА ОПТИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ В ЗАДАЧАХ РОЗПІЗНАВАННЯ  
ОБ'ЄКТІВ БЕЗПЛОТНИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ**

Запропонований у статті підхід до формування кібербезпеки у інформаційній технології ідентифікації оптичних образів передбачає побудову підпрограм виділення об'єктів на зображенні сцени, створення еталонних зображень і порівняння об'єкта з еталоном. Завдання розпізнавання об'єктів безпілотних підводних апаратів вимагають нових підходів і рішень. Мета дослідження визначалася оптимізацією ідентифікації оптичних образів у завданнях розпізнавання об'єктів безпілотних підводних апаратів. Методи досліджень встановлювались оптимізаційними методами ідентифікації у завданнях розпізнавання об'єктів безпілотних підводних апаратів. Розглянуті в роботі питання оптимізації ідентифікації оптичних образів у завданнях розпізнавання об'єктів безпілотних підводних апаратів дають наступні висновки: критерій мінімуму взаємної інформації між об'єктом у сцені та еталоном є подвійним до критерію мінімуму витрат управління еталоном. Таким чином, однією з найбільш складних задач, вирішуваних при забезпеченні стійкості інформаційної технології ідентифікації оптичних образів до збурень у просторі об'єктів, є задача побудови алгоритму генерації еталонних зображень.

**Ключові слова:** оптимальна ідентифікація, оптичні образи, задачі розпізнавання, об'єкти безпілотних підводних апаратів.

DOROVSKY VOLODYMYR, DOROVSKY DMYTRO, DOROVSKA IRYNA, PASHORIN VALERY

Private higher educational institution "European University"

**CYBERSECURITY OF OPTICAL IMAGES IN TASKS OF RECOGNIZING OBJECTS BY UNMANNED  
UNDERWATER VEHICLES**

The approach to cybersecurity in the information technology of optical image identification proposed in this paper involves the construction of subroutines for selecting objects in a scene image, creating reference images, and comparing the object with the reference. Object recognition tasks for unmanned underwater vehicles require new approaches and solutions. The purpose of the study was to optimize the identification of optical images in the tasks of recognizing objects of unmanned underwater vehicles. The research methods were established by optimization methods of identification in the tasks of recognizing objects of unmanned underwater vehicles.

The dual problem generates a combination of images, and the direct problem is related to the information approach to the identification problem. When using the information approach, the flow of information from the external environment  $I_w$  and the flow of information from the reference generator  $I_w^*$  are considered, and the mutual information  $I_w/w^*$  is used as a measure of their proximity, which defines the method as a method of compensating for information flows. One of the significant advantages of this method is the simplicity of assessing the system's performance based on the principle of compensation - the system is operational on the alphabet  $W$  under any disturbances if its reference generator can reproduce any image from  $W$ .

The issues of optimizing the identification of optical images in the tasks of recognizing objects of unmanned underwater vehicles considered in this paper lead to the following conclusions: the criterion of minimum mutual information between the object in the scene and the reference is double to the criterion of minimum control costs of the reference. Thus, one of the most difficult tasks to be solved in ensuring the robustness of the information technology for identifying optical images to perturbations in the space of objects is the task of constructing an algorithm for generating reference images.

**Keywords:** optimal identification, optical images, recognition tasks, objects of unmanned underwater vehicles.

**Актуальність і проблеми досліджень**

Формування інформаційної технології ідентифікації оптичних образів вимагає визначення понять про сцену, зображення сцени і об'єкт у зображенні сцени для побудови алгоритму і програми, що реалізують процес ідентифікації. Запропонований у роботі підхід до формування інформаційної технології ідентифікації оптичних образів передбачає побудову підпрограм виділення об'єктів на зображенні сцени, створення еталонних зображень і порівняння об'єкта з еталоном. Завдання розпізнавання об'єктів безпілотних підводних апаратів вимагають нових підходів і рішень.

**Мета** досліджень визначалася оптимізацією ідентифікації оптичних образів у завданнях розпізнавання об'єктів безпілотних підводних апаратів.

**Методи** досліджень встановлювались оптимізаційними методами ідентифікації у завданнях розпізнавання об'єктів безпілотних підводних апаратів.

**Результати досліджень**

Для вхідного алфавіту  $D$  об'єктів  $d_i$ , що породжують множину образів  $\Omega$ , розглядаємо випадок відомих ймовірностей  $p_i$  появи на вході системи образів  $\omega_i$ . Враховуючи, що в реальній ситуації образ  $\omega_i$  формує у просторі вхідних координат  $X$  вхідний сигнал системи  $f_i(x)$ , вважаємо заданим алфавіт  $F^*$  еталонних сигналів  $f_i^*(x)$ . Враховуючи, що при переході від множини  $D$ , де завдяки властивостям об'єктів визначена своя норма і міра, до множини образів  $\Omega$ , необхідно визначити правила вимірювання величини елемента і відстані між елементами множини. При визначенні норми  $\|\omega\|$  доцільно розглядати тільки  $\Omega$ , що не звужує завдання.

У цьому випадку, норма образу  $\|\omega_i\| = p_i$ , а метрика визначається як взаємна інформація між еталоном і образом  $d(w^*, w) = Iw^*/w$ . Таким чином, задача формалізується як проста задача: для образу  $w_k \in W$  знайти еталон  $w_i \in W$ .

У реальності ж доводиться мати справу з сигналами образів, а тут все набагато складніше. Для породжуваного об'єктами  $D$  простору сигналів  $F$  при всьому різноманітті підходів можна, вибравши метрику  $r = r(a, u)$ , поставити задачу формування керуючої послідовності  $u$ , що забезпечує мінімум функціонала цілі. Коректність задачі у загальному випадку порушена. Дійсно, якщо умова  $A$  виконується у будь-якому розумно поставленому завданні, то умова збіжності будь-якої мінімізуючої послідовності  $\{u_k\}$  до множини  $U^*$  є власне проблемою. У загальному випадку задача не є коректною за Тихоновим, оскільки питання про вигляд і існування мінімізуючої послідовності  $\{u_k\}$  вирішується у кожному випадку індивідуально. Власне проблема полягає в тому, що образу  $\omega_i$  у загальному випадку відповідає не одна функція  $f_i(x)$ , а множина функцій  $F\omega_i(x)$ , що пов'язано з різницею умов пред'явлення, змінністю і перешкодами у просторі об'єкта. Отже, уникнути регуляризації задачі у загальному випадку не видається можливим. Дотримуючись [9], введемо стабілізатор  $W(u)$ , де існує множина допустимих керувань  $U$  і  $u \in U$ . Власне ми перейшли до задачі:

$$\begin{aligned} \omega^*_i &\rightarrow \inf I_{\omega_k/\omega_i} \\ \omega^*_i &\in \Omega^* \\ \omega_k &\in \Omega \end{aligned} \quad (1)$$

Враховуючи, що ми маємо справу з сигналами на  $x$ , вплив стабілізуючої функції визначається як  $x = x(W(u))$ , тоді

$$\{u_k\}^* \rightarrow \inf J(f(x), f^*(x(\Omega(u_k)))) \quad k = 1, 2, \dots, n < \infty \quad (2)$$

Стабілізатор  $W(u) \subseteq W$  введено в еталон, що дозволяє не висувати додаткових вимог до сигналу об'єкта. Тоді вид функціонала і тип оптимуму  $J$  не визначає завдання вибору метрики. Дійсно, достатньо врахувати, що сигнали об'єктів сприймаються одним і тим же пристроєм, ми вправі в загальному випадку вважати, що існує послідовність управлінь  $\{u_k\}$ , яка перетворює будь-який еталон  $f_i$  у будь-який сигнал  $f_j$  даного класу. Слід враховувати, що для невід'ємних керувань витрати на управління будуть суттєво відрізнятися. Витрати на управління регулятора відповідають аксіомі симетрії і аксіомі трикутника відповідно, витрати на управління стабілізатора  $W(u)$  відповідають вимогам метрики у просторі сигналів. У такому випадку для множини еталонів і сигналу існують послідовності:

$$\bar{u}(f_i, f_j) = \sum_{k=1}^n u_k \rightarrow \text{extr} J(f_i(x), f_j^*(x(\Omega(u_k)))) \quad k = 1, 2, \dots, n < \infty \quad (3)$$

$$\bar{u}(f_i, f_i) = 0, \quad (4)$$

$$\bar{u}(f_i, f_j) = \bar{u}(f_j, f_i), \quad (5)$$

$$\bar{u}(f_i, f_j) \leq \bar{u}(f_i, f_k) + \bar{u}(f_k, f_j), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_1^*(f(x), f^*_1(x(\Omega(u_k)))) &\rightarrow \text{extr} J(f(x), f^*_1(x(\Omega(u_k)))) \\ \bar{u}_2^*(f(x), f^*_2(x(\Omega(u_k)))) &\rightarrow \text{extr} J(f(x), f^*_2(x(\Omega(u_k)))) \\ &\dots \end{aligned} \quad (7)$$

$$\bar{u}_n^*(f(x), f^*_n(x(\Omega(u_k)))) \rightarrow \text{extr} J(f(x), f^*_n(x(\Omega(u_k))))$$

Причому, природньо, мінімальні витрати управління визначають найбільш близькі функції у просторі сигналів і найбільш близькі образи у просторі образів.

$$\inf \bar{u}(f_i, f_j) \leftrightarrow \inf I_{\omega_i/\omega_j}, \quad (8)$$

Ураховуючи, що ми маємо справу з сигналами на  $x$ , вплив стабілізуючої функції визначається як  $x = x(W(u))$ , тоді стабілізатор  $W(u) \in W$  введений в еталон, що дозволяє не висувати додаткових вимог до сигналу об'єкта. Тоді вигляд функціонала і тип оптимуму  $J$  не визначає задачу вибору метрики. Дійсно,

досить врахувати, що сигнали об'єктів сприймаються одним і тим же пристроєм, ми в праві у загальному випадку вважати, що існує послідовність керувань  $\{u_k\}$ , що перетворює будь-який еталон  $f_i$  в будь-який сигнал  $f_j$  даного класу. Слід врахувати, що для невід'ємних керувань витрати на керування будуть суттєво відрізнятися. Витрати на керування регулятора відповідають аксіомі симетрії і аксіомі трикутника.

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_1^*(f(x), f_1^*(x(\Omega(u_k)))) &\rightarrow \text{extr}J(f(x), f_1^*(x(\Omega(u_k)))) \\ \bar{u}_2^*(f(x), f_2^*(x(\Omega(u_k)))) &\rightarrow \text{extr}J(f(x), f_2^*(x(\Omega(u_k)))) \\ &\dots \\ \bar{u}_n^*(f(x), f_n^*(x(\Omega(u_k)))) &\rightarrow \text{extr}J(f(x), f_n^*(x(\Omega(u_k)))) \end{aligned} \right\} \rightarrow \inf \bar{u}_j^*(f(x), f_j^*(x(\Omega(u_k)))) \rightarrow \inf I_{\omega/\omega_j}.$$

Отже, витрати на керування стабілізатора  $W(u)$  відповідають вимогам метрики у просторі сигналів. Причому, мінімальні витрати на керування визначають найбільш близькі функції у просторі сигналів і найбільш близькі образи у просторі образів. Таким чином, задача ідентифікації набуває вигляду пошуку еталона, що потребує мінімальних витрат на управління, чим забезпечується мінімальна взаємна інформація, а отже, максимальна близькість образу та еталона. Суттєвим моментом у даному випадку є зв'язність еталона та відповідного зображення, компактність і опуклість, що забезпечується регуляризацією. Оскільки вибір функціоналу  $J$  тепер диктується лише міркуваннями зручності, розглянемо як  $J$  перші члени регресії образу та еталона.

$$J = \rho(f(x), f_i^*(x(\Omega(u_k)))) \tag{9}$$

Для тимчасового сигналу, виходячи з методу допустимих перетворень, врахуємо управління еталоном як  $J = \rho(f(x), f_i^*(x(\Omega(u_k))))$ . задачу виконання необхідних умов оптимуму максимізації взаємної кореляції  $R$

$$J_i = R(f(t), f_i^*(t, u)) \tag{10}$$

Враховуючи, що у даному випадку управління еталоном зводиться до методу допустимих перетворень, припускаючи відповідність еталона та об'єкта, введемо обмеження, яке веде до тривіального поєднання сигналів  $f(t) = f^*(t)$ . З іншого боку, враховуючи, що у випадку виконання обмеження взаємна умовна інформація прагне до мінімуму [5], можемо розглядати задачу як задачу з обмеженням типу рівності.

$$\begin{aligned} \omega_i^*, u^* &\rightarrow \inf I_{\omega/\omega_i^*} \\ R(f(t), f_i^*(t, u)) &= 1. \end{aligned} \tag{11}$$

Завдяки регуляризації при ідентичності образу еталону задача є опуклою, а функція Лагранжа в даній задачі має вигляд.

$$L(\omega^*, u, \lambda) = I_{\omega/\omega_i^*} - \lambda(R(f(t), f_i^*(t, u)) - 1). \tag{12}$$

Множник Лагранжа в даній задачі визначає чутливість взаємної інформації до нормованої взаємної кореляційної функції сигналів об'єкта та еталона.

$$\lambda(u) = \frac{\partial I_{\omega/\omega_i^*}}{\partial R(f(t), f_i^*(t, u))} \tag{13}$$

Оскільки множник Лагранжа природно пов'язаний з управлінням, подвійною змінною є управління еталоном. Виходячи з умов Куна-Таккера, отримуємо пряму та подвійні задачі у вигляді:

$$\begin{aligned} \omega^* &\rightarrow \inf_{u=u^*} L(\omega, u, \lambda); \\ u^* &\rightarrow \sup_{\omega=\omega^*} L(\omega, u, \lambda). \end{aligned} \tag{14}$$

Враховуючи структуру функції Гамільтона в даній задачі, можна записати

$$\begin{aligned} \omega^* &\rightarrow \inf_{u=u^*} I(\omega, \omega^*(u)) = 0, \\ u^* &\rightarrow \sup_{\omega=\omega^*} R(\omega, \omega^*(u)) = 1. \end{aligned} \tag{15}$$

В результаті отримуємо прості умови управління

$$\begin{aligned} \omega^* &\rightarrow \inf_{u=u^*} I(\omega, \omega^*(u)) = 0; \\ u^* &\rightarrow \sup_{\omega=\omega^*} (f - f^*(\omega, \omega(u))) = 0; \\ f - f^*(\omega, \omega(0)) &< 0. \end{aligned} \tag{16}$$

При цьому подвійна умова вказує на монотонність наближення з області  $f < f^*$ , що важливо при реалізації системи. Подвійна задача породжує поєднання зображень, а пряма задача пов'язана з інформаційним підходом до задачі ідентифікації. При використанні інформаційного підходу розглядається

потік інформації з зовнішнього середовища  $I_w$  і потік інформації від генератора еталонів  $I_w^*$ , а як міра їх близькості використана взаємна інформація  $I_w/w^*$ , що і визначає метод як метод компенсації інформаційних потоків. Однією з суттєвих переваг цього методу є простота оцінки працездатності системи, що базується на принципі компенсації - система працездатна на алфавіті  $W$  при будь-яких збуреннях, якщо її генератор еталонів може відтворити будь-який образ з  $W$ . З іншого боку, виконання умови передбачає оптимальну за критерієм  $J$  систему управління компенсацією сигналу вхідного образу сигналом, породженим гіпотезою (рис. 1).

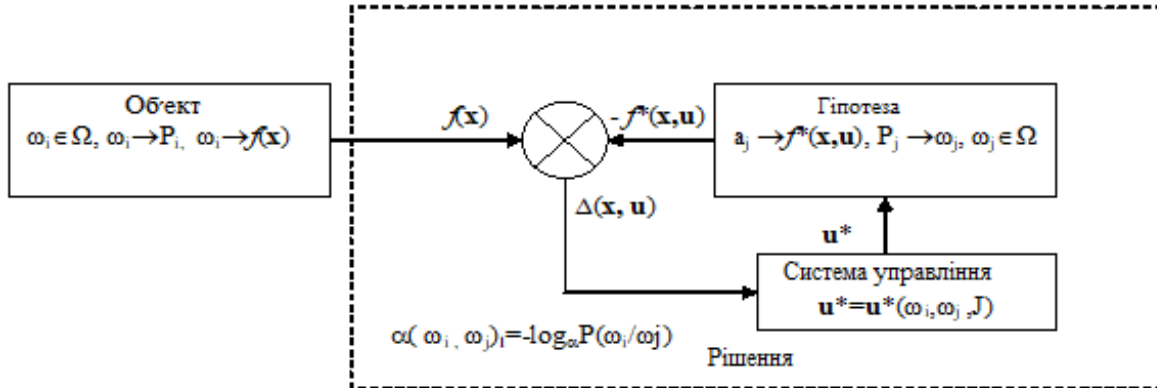


Рис. 1. - Використання оптимальної компенсаційної системи

Реакцію системи розглядаємо як управління  $u$  і як реакцію на наявність умовної взаємної інформації між гіпотезою системи та вхідним образом, і в найпростішому випадку можемо припустити.

$$u = u_0 + \frac{\partial u}{\partial I_{j/i}} \Delta I_{j/i} + \dots + r; \tag{17}$$

Припускаючи лінійність та стаціонарність

$$\frac{\partial u_k}{\partial I_{j/i}} = \gamma_k, \quad \gamma_k = const, \quad k = \overline{1, m} \tag{18}$$

Тоді

$$I(a_j / a_i) = \frac{1}{\gamma_k} u_k, \quad k = \overline{1, m} \tag{19}$$

В результаті отримуємо можливість зв'язати витрати управління з метрикою в інформаційному просторі.

$$\log_\alpha P(a_j / a_i) = \frac{1}{\gamma_k} u_k, \quad k = \overline{1, m} \tag{20}$$

Умову відсутності взаємної умовної інформації можна звести до спостережуваної умови  $u = 0$ . Завдання ідентифікації оптичних образів вимагає компенсації помилок, викликаних контрольованими збуреннями. З іншого боку, неконтрольовані збурення також викликають помилки, які можуть бути усунені введенням зворотного зв'язку за відхиленням. Розглянемо ідентифікуючу процедуру, процедуру корекції за збуренням і введемо асоціативну пам'ять

$$I_{y_i} \rightarrow I_{\omega^*i} \tag{21}$$

і процедуру нормалізації зображення.

$$I_{\omega/\omega^*i} \rightarrow I_{\omega_i} \tag{22}$$

У цьому випадку структура системи ідентифікації в інформаційному просторі набуває вигляду, наведеного на рис. 2.



Рис. 2. Структура системи ідентифікації з нормалізацією зображення в інформаційному просторі

Нормалізація зображення вимагає впевненості у допустимості перетворень у просторі сигналів, що далеко не завжди здійснено. Ввівши процедуру управління еталоном, отримуємо структуру з корекцією еталону (рис. 3). При нормалізації еталону вона дозволяє використовувати синтез еталону і передбачає знання допустимих збурень об'єкта, що природньо при побудові еталону.

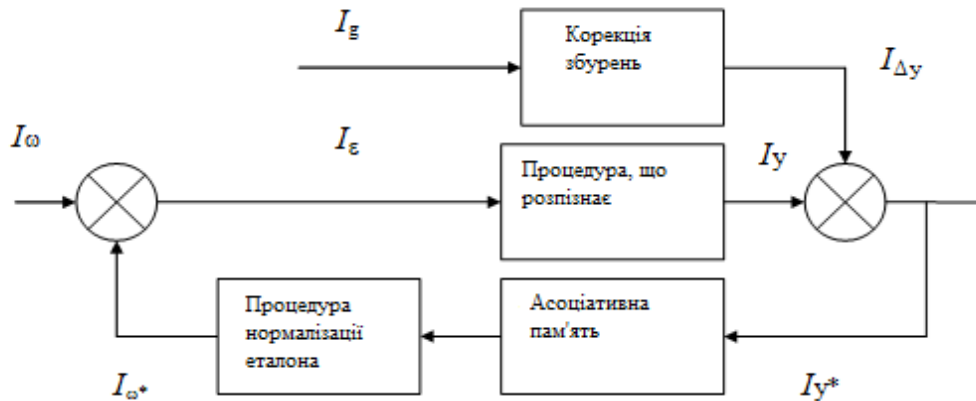


Рис. 3. - Структура системи ідентифікації з нормалізацією еталону в інформаційному просторі

Отже, структури системи ідентифікації на рис. 2 і рис. 3 визначені як реалізація прямої задачі і принципово допускають побудову інваріантної до збурень системи ідентифікації в оптичному діапазоні. Однак, необхідно врахувати, що принципово  $I_w$  не може дорівнювати нулю, якщо в контурі зворотного зв'язку немає накопичення інформації, що вимагає розглянути моделі з мінімізацією накопиченої, середньо – очікуваної інформації.

### Висновки

Розглянуті в роботі питання оптимізації ідентифікації оптичних образів у завданнях розпізнавання об'єктів безпілотних підводних апаратів дають наступні висновки: критерій мінімуму взаємної інформації між об'єктом у сцені та еталоном є подвійним до критерію мінімуму витрат управління еталоном. Таким чином, однією з найбільш складних задач, вирішуваних при забезпеченні стійкості інформаційної технології ідентифікації оптичних образів до збурень у просторі об'єктів, є задача побудови алгоритму генерації еталонних зображень.

### Література

1. Lakhno, V.A., Kasatkin, D.Y., Skliarenko, O.V., Kolodinska, Y.O. Modeling and Optimization of Discrete Evolutionary Systems of Information Security Management in a Random Environment // Machine Learning and Autonomous Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 269. Springer, Singapore. – 2022 – p. 9-22.
2. Ніколаєвський О.Ю., Склярєнко О.В., Сидорчук А. Analysis and comparison of face detection Apis // Телекомунікаційні та інформаційні технології. - 2019.- № 4 (65) –С.121-133
3. Склярєнко О.В., Ніколаєвський О.Ю., Біометричні системи безпеки: розпізнавання облич // Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації. Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції 24–27 лютого 2021 р.- Київ-2021.- Видавництво Європейського університету. – С. 85-87.
4. Пашорін В. І., Склярєнко О.В., Милашенко В.М. Аналіз технологій захисту комп'ютерних мереж на базі систем виявлення вторгнень. Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації: колективна монографія / за заг. наук. ред. А.М. Давиденко, Київ: Європейський університет, 2023. – С. 93-108.
5. Zhang, W., Shen, J., Zhang, L., Liu, L., & Li, X. (2020). Глибоке навчання в оптичному зображенні: принципи та застосування. *Advanced Photonics*, 2(2), 026002.
6. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Глибоке навчання. *Видавництво MIT*.
7. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Глибоке навчання. *Nature*, 521(7553), 436-444.
8. Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Конволюційні мережі для сегментації біомедичних зображень. Міжнародна конференція з обробки медичних зображень та комп'ютерно-підтриманої інтервенції (стор. 234-241). Springer, Cham.
9. Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., ... & Sánchez, C. I. (2017). Огляд глибокого навчання в медичному аналізі зображень. Аналіз медичних зображень, 42, 60-88.
10. Zhou, Z., Siddiquee, M. M. R., Tajbakhsh, N., & Liang, J. (2018). UNet++: Вкладена архітектура U-Net для сегментації медичних зображень. Глибоке навчання в медичному аналізі зображень та багатомодальному навчанні для клінічного прийняття рішень (стор. 3-11). Springer, Cham.
11. Wang, S., Zhou, M., Liu, Z., Gu, D., Zang, Y., ... & Feng, R. (2019). Центральні фокусовані зворотні зв'язки конволюційних нейронних мереж: розробка моделі, заснованої на даних, для сегментації пухлин легень. Аналіз медичних зображень, 55, 88-101.

---

**References**

1. Lakhno, V.A., Kasatkin, D.Y., Skliarenko, O.V., Kolodinska, Y.O. Modeling and Optimization of Discrete Evolutionary Systems of Information Security Management in a Random Environment // Machine Learning and Autonomous Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 269. Springer, Singapore. – 2022 – p. 9-22.
2. Nikolaievskiy O.Iu., Skliarenko O.V., Sydoruk A. Analysis and comparison of face detection Apis // Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii. - 2019.- № 4 (65) –S.121-133
3. Skliarenko O.V., Nikolaievskiy O.Iu., Biometrychni systemy bezpeky: rozpoznavannia oblych // Aktualni pytannia zabezpechennia kiberbezpeky ta zakhystu informatsii. Materialy VII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii 24–27 liutoho 2021 r.- Kyiv-2021.- Vydavnytstvo Yevropeiskoho universytetu. – S. 85-87.
4. Pashorin V. I., Skliarenko O.V., Mylashenko V.M. Analiz tekhnolohii zakhystu kompiuternykh mrezh na bazi system vyavlenia vtornhen. Aktualni pytannia zabezpechennia kiberbezpeky ta zakhystu informatsii: kolektyvna monohrafiia / za zah. nauk. red. A.M. Davydenko, Kyiv: Yevropeyskyi universytet, 2023. – S. 93-108.
5. Zhang, W., Shen, J., Zhang, L., Liu, L., & Li, X. (2020). Hlyboke navchannia v optychnomu zobrazheni: pryntsyipy ta zastosuvannia. *Advanced Photonics*, 2(2), 026002.
6. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Hlyboke navchannia. Vydavnytstvo MIT.
7. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Hlyboke navchannia. *Nature*, 521(7553), 436-444.
8. Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Konvoliutsiini mrezhzi dlia sehmentatsii biomedychnykh zobrazhen. *Mizhnarodna konferentsiia z obrobky medychnykh zobrazhen ta kompiuterno-pidtrymanoii interventsii* (stor. 234-241). Springer, Cham.
9. Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciampi, F., Ghafoorian, M., ... & Sánchez, C. I. (2017). Ohliad hlybokoho navchannia v medychnomu analizi zobrazhen. *Analiz medychnykh zobrazhen*, 42, 60-88.
10. Zhou, Z., Siddiquee, M. M. R., Tajbakhsh, N., & Liang, J. (2018). UNet++: Vkladena arkhitektura U-Net dlia sehmentatsii medychnykh zobrazhen. *Hlyboke navchannia v medychnomu analizi zobrazhen ta bahatomodalnomu navchanni dlia klinichnogo pryiniattia rishen* (stor. 3-11). Springer, Cham.
11. Wang, S., Zhou, M., Liu, Z., Gu, D., Zang, Y., ... & Feng, R. (2019). Tsentralni fokusovani zvorotni zviazky konvoliutsiinykh neironnykh mrezh: rozrobka modeli, zasnovanoi na danykh, dlia sehmentatsii pukhlyn lehen. *Analiz medychnykh zobrazhen*, 55, 88-101.