
СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 004.8

Ю.Є. ПОУДАНЕН, А.В. КОЖЕМ'ЯКО

КЛАСИФІКАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОПТИКО-ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ПРИ ПРОВЕДЕНІ ЕНДОСКОПІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

*Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
e-mail: kvantron@vntu.edu.ua*

Анотація: Захворювання шлунково-кишкового тракту (ШКТ) залишаються однією з найактуальніших проблем сучасної медицини, а вплив зовнішніх факторів на життя людини погіршує ситуацію зі здоров'ям. Стрімкий розвиток штучного інтелекту та комп'ютерного зору спрямований на вдосконалення наявних способів виявлення захворювань шляхом аналізу біомедичних зображень. Представлена робота узагальнює останні наукові напрацювання в галузі ендоскопії з використанням машинного навчання у поєднанні з цифровими та оптико-цифровими методами покращення зображень. В роботі проаналізовані джерела, у яких оцінювалося застосування білого світла WLI та режимів покращення візуалізації, як NBI, BLI, i-Scan, FICE. Також було проведено класифікацію підгрупи методів ендоскопічного покращення зображення та описано рекомендації щодо їх застосування відповідно до відділу ШКТ. Крім того, було проведено опис використання методів ендоскопії з покращеним зображенням та комбінації цих методів з комп'ютерним зором для збільшення параметрів точності, специфічності та чутливості за результатами отриманих даних у ході дослідження шлунково-кишкового тракту. У середньому чутливість підвищується на 17%, а специфічність — на 39% у порівнянні з результатами недосвідчених лікарів. Досліджено тенденцію розвитку нових архітектурних підходів до використання оптико-цифрових та цифрових методів у машинному навчанні та порівняння метрик якості, специфічності і точності між ШІ системою та лікарями ендоскопістами. Проведений аналіз поточного стану застосування методів разом із машинним навчанням та розглянуті перспективи розвитку машинного навчання для автоматизованих систем комп'ютерної діагностики. Були визначені проблеми падіння показників класифікації, визначені причини та надані рекомендації щодо покращення метрик специфічності, чутливості і точності. Автоматизовані системи комп'ютерної діагностики розглядаються як ефективний інструмент підтримки молодих лікарів при визначенні патології, які покликані зменшити час обстеження пацієнта та допомогти уникати пропусків важливих ділянок, що потребують особливої уваги.

Ключові слова: Класифікація, згорткові нейронні мережі, розпізнавання зображень, ендоскопія, нейронні мережі, штучний інтелект.

Abstract. Gastrointestinal tract (GIT) diseases remain among the most pressing challenges in modern medicine, with external environmental factors affecting human health negatively. The rapid development of artificial intelligence and computer vision is aimed at improving existing methods for disease detection through the analysis of biomedical images. This study summarizes recent scientific advances in endoscopy that integrate machine learning with both digital and opto-digital image enhancement technologies. The paper reviews sources evaluating the use of white light imaging (WLI) and various enhancement modes such as NBI, BLI, i-Scan, and FICE. A classification of endoscopic image enhancement methods is provided, along with recommendations for their application based on anatomical regions of the GIT. In addition, the study presents an overview of the use of enhanced endoscopic imaging and its combination with computer vision for increasing diagnostic parameters such as accuracy, specificity, and sensitivity based on data obtained during gastrointestinal examinations. On average, sensitivity increased by 17%, and specificity by 39% compared to results from novice endoscopists. The study also explores the trend of developing new architectural approaches for integrating opto-digital and digital methods into machine learning, as well as a comparison of diagnostic quality between AI systems and human endoscopists.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

An analysis of the current state of such technologies is presented, along with prospects for the development of machine learning in automated computer-aided diagnosis (CAD) systems. Challenges related to classification accuracy degradation are identified, their causes analyzed, and recommendations for performance improvement are provided. Automated CAD systems are viewed as an effective support tool for young physicians in pathology detection, helping to reduce examination time and minimize the risk of missing critical areas that require focused attention.

Keywords: classification, convolutional neural networks, image recognition, endoscopy, neural networks, AI

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-135-146

ВСТУП

Захворювання шлунково-кишкового тракту (ШКТ), такі як пухлини, доброякісні утворення, хвороба Крона, стравохід Барретта, гастрит викликаний бактерією *Helicobacter pylori* (*H. pylori*) займають більшу частку серед хвороб ШКТ людини. Актуальність теми дослідження і покращення методів обстеження обумовлене останніми дослідженнями, що вказують на значне збільшення кількості випадків захворювання ШКТ. Патології ШКТ впливають на якість життя громадян та можуть мати значні економічні наслідки в масштабі країни. Крім того, значний вплив на показники здоров'я мали події всесвітньої пандемії COVID-19 та повномасштабне вторгнення в Україну[1].

Останні роки спостерігається стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту (ШІ), які знаходять широке застосування в медицині. Зокрема, в ендоскопії ШІ використовується для підвищення точності діагностики та виявлення патологій на ранніх стадіях. Використання ШІ в ендоскопічних дослідженнях дозволяє автоматизувати процес аналізу зображень, що сприяє своєчасному виявленню аномалій та знижує ризик людської помилки. Оскільки ШКТ відіграє ключову роль в житті людини та нормальному функціонуванні організму, основною задачею в діагностиці захворювання є якісне визначення проблеми та постановки правильного діагнозу. Існують вивчені та дієві способи обстеження черевної порожнини, такі як: магнітно-резонансна томографія (МРТ), ангіографія, комп'ютерна томографія (КТ), рентгенографія, ультразвукова діагностика та зондова ендоскопія. Як описано в роботах авторства[2,3] та в інших наукових роботах, золотим стандартом обстеження ШКТ залишається ендоскопічний огляд.

Однак такий підхід до обстеження пацієнта завжди залежить від досвіду та уважності лікаря-ендоскопіста. Як наслідок, людський фактор відіграє важливу роль у встановленні остаточного діагнозу. Незважаючи на можливості комп'ютерної діагностики (КД), яка інтегрована і готова до використання в ендоскопічному пристрої, інтерес до ендоскопії та біомедичної обробки зображень все ще залишається актуальним і викликає підвищений інтерес у науковій спільноті. Проведені дослідження [4] висвітлюють основну проблему запальних захворювань кишечника, які досі характеризуються суттєвими розбіжностями в оцінці ступеня ураження слизової оболонки під час ендоскопії — як між різними фахівцями, так і при повторному перегляді зображень одним і тим самим лікарем. В останні кілька років зріс інтерес до комп'ютерного зору зі штучним інтелектом для розпізнавання та класифікації біомедичних зображень. Поєднання оптико-цифрових методів зі згортковими нейронними мережами (CNN) та машинним навчанням (МН) може поліпшити підготовку молодих ендоскопістів і зробити їх значно ефективнішими під час обстеження пацієнтів.

Для аналізу поточного стану застосування ШІ в ендоскопії за основу були визначені наукові статті за попередні п'ять років, а також перші наукові статті про огляд конкретної технології ендоскопічного приладу, як правило, такі статті виходили в рік випуску нового ендоскопічного приладу. Основним критерієм при виборі джерел було наявність одного або декількох з методів ендоскопічного покращення зображень, включаючи наявність згадки про використання обробки зображень за допомогою нейронних мереж. Пошук проводився за допомогою таких відкритих джерел як ResearchGate та Google Scholar, в період з 2020 по 2025 рік з використанням ключових слів.

Виявлення ранніх стадій раку потребує від ендоскопістів високого рівня кваліфікації та уваги, навіть до малопомітних деталей при обстеженні пацієнта. У більшості випадків рак шлунка виникає на фоні атрофічного гастриту та кишкової метаплазії, спричинених інфекцією *Helicobacter pylori* (*H. pylori*)[3]. Зазвичай ендоскопісти звертали увагу на зміни кольору, такі як почервоніння або знебарвлення, а також на морфологічні особливості, такі як незначне підвищення або заглиблення, які часто складно відрізнити від навколишньої слизової з хронічними запальними змінами. Найпоширенішим та доступним методом обстеження ШКТ є ендоскопічне дослідження з використанням білого кольору світла або WLE(white light endoscopy), тобто застосовується ксенонова лампа, як джерело освітлення [3]. Як додаток до світла білого кольору існують оптико-цифрові методи для покращення зображення на виході, а саме вузькосмугова візуалізація або відсікання певного спектру кольорів для

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

покращення та насичення видимості контурів поверхні слизової оболонки, включаючи видалення вен і капілярів [2].

WLE демонструє низький рівень контрастності кольорів, навіть за наявності морфологічних змін, що ускладнює відрізнєння ранніх стадій раку ШКТ від запаленої слизової оболонки [3]. Низька насиченість кольору, неоднорідність структури слизової оболонки та недостатність освітлення в порожнинних органах, може викликати ускладнення при обстеженні і це в свою чергу призводить до пропусків неоплазій навіть досвідченими ендоскопістами[3].

Покращення зображення досягається за рахунок використання оптико-цифрових методів інтегрованих в ендоскоп. Основний перелік методів [3, 5, 6]: NBI - Narrow Band Imaging, LCI - Linked Color Imaging, BLI-LED та BLI-Laser - Blue Laser/LED Imaging, FICE - Flexible Spectral Imaging Color Enhancement, та i-Scan технологія включає в собі комплекс з 3 цифрових методів покращення зображення [7]:

- покращення деталізації поверхні (ПДП);
- покращення контрастності зображення (ПКЗ);
- покращення кольорового тону (ПКТ).

Методи та їх назва залежать від виробника, проте функціонально вони можуть виконувати однакові функції.

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є визначення основних проблем та напрямків вдосконалення наявних способів класифікації зображень для виявлення наявності захворювань шлунково-кишкового тракту. Для вирішення поставленої мети був проведений аналіз літературних джерел та проведена оцінка сучасних досліджень із використанням цифрових та оптико-цифрових методів у поєднанні з автоматизованими системами на базі штучного інтелекту.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ендоскопічні апарати вже тривалий час мають у собі готові рішення для якісної візуалізації внутрішніх органів ШКТ. Але проблема пропусків важливих ділянок як молодими так і досвідченими ендоскопістами все ще залишається актуальною і на сьогоднішній день. Зменшення кількості пропусків, може допомогти уникнути розвитку хвороби та поставити точний діагноз.

Аналіз останніх наукових досліджень демонструє ріст використання автоматизованих асистентів на базі ШІ для покращення визначення патологій та допомозі лікарям у виділенні ділянок які потребують особливої уваги. Все частіше пропонуються нові архітектурні рішення до тренування моделей, порівняння ШІ-систем і лікарів та опис наявних проблем, які все ще потребують вирішення.

МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕНДОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Для обстеження ШКТ пацієнта зазвичай використовуються класичні підходи і як основне джерело світла застосовується ендоскопія з використанням світла білого кольору (ЕБС, WLI). Зазвичай, як джерело світлового випромінювання використовуються ксенонові лампи з довжиною хвилі 400-700 нм [4, 6]. Як правило, проводиться поверхневий огляд слизової оболонки та оцінка стану ШКТ, яка базується на професійному досвіді лікаря ендоскопіста. До ключових переваг використання ЕБС слід віднести:

- Поширене використання як базового компонента для обстеження [2, 6];
 - Використовується як еталон для порівняння з покращеними методами візуалізації [6];
 - Можливість проведення постобробки і використання CAD допоміжних систем [8];
 - Активне застосування досвідченими ендоскопістами для виявлення ранніх стадій захворювань [9];
 - Широке використання вихідних даних в вигляді фото та відео для порівняння і тренування нейронних мереж.
- Не зважаючи на очевидні переваги, слід розглянути і недоліки стандартного методу освітлення:
- Низька ефективність у виявленні патологічних змін, пропуски на етапі обстеження [10, 11];
 - Застосування хромоендоскопії за допомогою барвників, що в свою чергу збільшує час виконання процедури та має побічні ефекти для пацієнта [2, 6];
 - Затрата часу на оцінку барвників п.2;
 - Низький рівень контрастності [2, 6];

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

З очевидних причин недосконалості використання білого світла, вченими і інженерами були розроблені і впроваджені методи покращення візуалізації як додаток до вже широко використовуваного методу ЕБС. Ці технології, об'єднані під загальною назвою як ендоскопія з покращеним зображенням (ЕПЗ), дозволяють підвищити візуальний контраст між нормальною та патологічно зміненою тканиною, покращити виявлення судинних структур і мікроскопічних змін слизової оболонки [2, 6].

До ЕПЗ належать як оптичні технології, що базуються на зміні спектра освітлення:

- Вузькоспектральна візуалізація NBI (Narrow Band Imaging) — метод, що використовує вузькі смуги синього та зеленого світла для кращої візуалізації судинної сітки та поверхневих структур.
- Зображення на основі синього лазера/світлодіода BLI (Blue Laser/LED Imaging) — система, яка використовує лазерне джерело синього світла для посилення зображення капілярів та слизової в режимі збільшення.
- Зв'язана кольорова візуалізація LCI (Linked Color Imaging) — метод, який підсилює відмінності кольору між нормальними та ураженими ділянками, особливо між червоними та білими тонами, що полегшує раннє виявлення запальних змін.

Цифрові методи постобробки відеозображення:

- Гнучке спектральне підсилення кольорового зображення FICE (Flexible Spectral Imaging Color Enhancement) — алгоритм, який перетворює зображення з білого світла на спектрально модифіковане, підвищуючи контраст без зміни джерела світла.
- Технологія цифрового підсилення ендоскопічного зображення i-Scan — цифрова технологія, яка в режимі реального часу підсилює рельєф, контраст і колір зображення за допомогою трьох режимів: поверхневого (SE), контрастного (CE) та тонального підсилення (TE) [5].

Вищеописані методи відносяться до ЕПЗ та на основі [11] представлені на рис. 1.

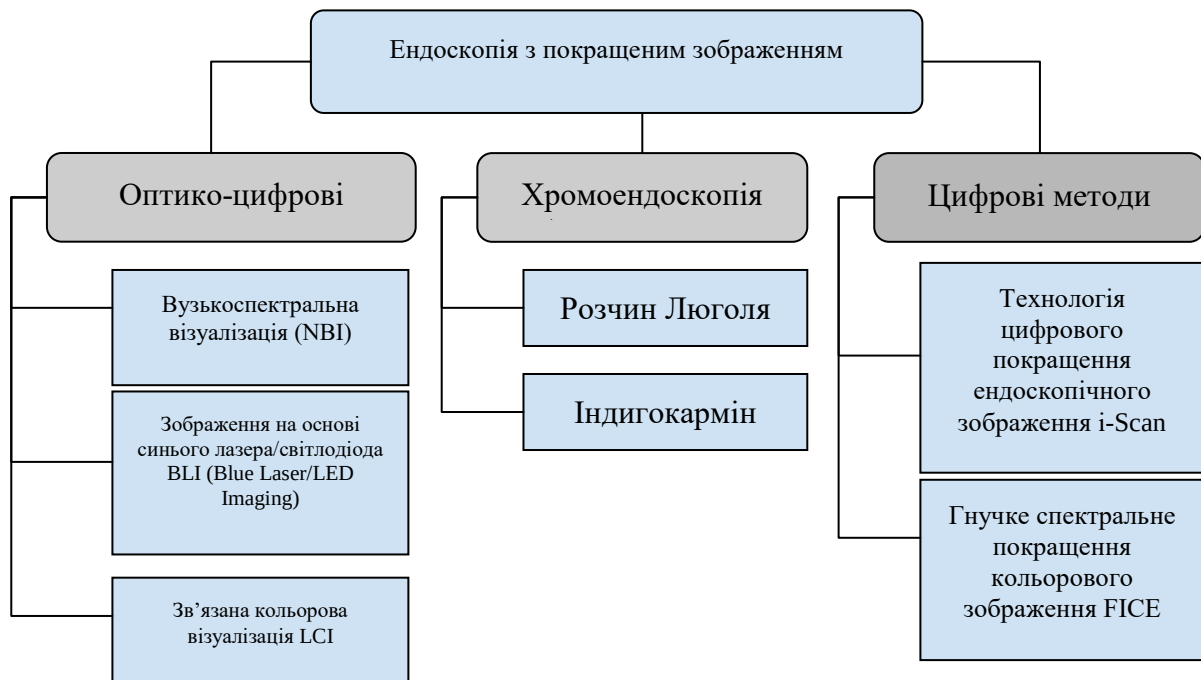


Рисунок 1 – Класифікація підгрупи ЕПЗ

Завдяки цим методам стало можливим раннє виявлення передракових та ракових уражень слизової оболонки ШКТ навіть на етапі, коли зміни непомітні в звичайному білому світлі.

МОЖЛИВОСТІ МЕТОДІВ ЕПЗ ДЛЯ ЕНДОСКОПІЧНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Вузькоспектральна візуалізація (Narrow Band Imaging, NBI) є інноваційною ендоскопічною технологією, що використовує два вузькі діапазони світла: синій (приблизно 415 нм) та зелений (приблизно 530 нм) [3, 12]. Ці довжини хвиль спеціально підібрані для підсилення контрасту між судинами та слизовою оболонкою, оскільки вони сильно поглинаються гемоглобіном і слабо

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

відбиваються від поверхневого шару слизової. В результаті, NBI забезпечує значно кращу візуалізацію судинної архітектури та поверхневих структур слизової оболонки шлунково-кишкового тракту порівняно зі звичайним білим світлом [3].

Ця покращена візуалізація є особливо цінною для чіткого відображення патологічних змін, таких як ділянки дисплазії та онкологічні утворення, дозволяючи ендоскопістам більш точно визначати їхні межі, глибину інвазії та проводити якісну діагностику без необхідності рутинного використання хімічних барвників у багатьох випадках [2]. Зокрема, ендоскопія зі збільшенням картини у використанні з NBI стала важливим інструментом для характеристики колоректальних утворень та ранніх неоплазій у різних відділах шлунково-кишкового тракту [12].

Зображення на основі синього лазера/світлодіода (BLI) — це високоточна ендоскопічна технологія, розроблена компанією Fujifilm, яка використовує лазерне або світлодіодне джерело синьо-фіолетового світла з вузьким спектром, зокрема довжини хвиль 410 ± 10 нм та 450 ± 10 нм [12, 13]. Світло з довжиною хвилі 410 нм активно поглинається гемоглобіном, що дозволяє посилено візуалізувати мікросудинну архітектуру слизової оболонки, тоді як 450 нм стимулює фосфор для формування білого світла, необхідного для створення збалансованого ендоскопічного зображення. У результаті BLI забезпечує чіткий контраст між судинами та навколишньою слизовою, що дозволяє виявляти патологічні утворення на ранніх стадіях без потреби у барвниках. Система продемонструвала ефективність у деталізації папілярних петель при раку стравоходу, а також у визначенні меж уражень та глибини інвазії при колоректальних неоплазіях. Як лазерна (Laser-BLI), так і світлодіодна (LED-BLI) версії цієї технології показали високу узгодженість у клінічній діагностиці, зокрема при класифікації поліпів за системою JNET (узгодженість 92.5%, $\kappa=0.99$) [12].

Зв'язана кольорова візуалізація (LCI) — це сучасна оптико-цифрова технологія покращення ендоскопічного зображення, розроблена компанією Fujifilm, яка комбінує вузькоспектральне освітлення з цифровим підсиленням кольору [13, 11, 3]. Система працює з високою інтенсивністю короткохвильового світла (410–450 нм), яке дозволяє підсилювати незначні кольорові відмінності в слизовій, зберігаючи при цьому природну палітру зображення. Ключовою особливістю LCI є здатність візуалізувати атрофічні зміни, запалення та метapлазію (відтінки фіолетового), а також чітко окреслювати ранні ракові ураження (відтінки помаранчевого) ще до появи морфологічних змін [13, 11, 3]. LCI особливо ефективна для огляду великих анатомічних структур, таких як шлунок, завдяки підвищеній яскравості в порівнянні зі звичайним білим світлом (WLE) [11, 3]. У клінічній практиці ця технологія дозволяє підвищити чутливість діагностики гастриту, кишкової метapлазії та раннього раку шлунку, зменшуючи потребу в інвазивних процедурах [11, 3].

Гнучке спектральне покращення кольорового зображення (FICE) — це цифрова технологія спектральної реконструкції, що дозволяє формувати віртуальні зображення із вузьким діапазоном хвиль шляхом обробки звичайного білого світла без застосування оптичних фільтрів [13]. У FICE використовуються визначені довжини хвиль (зокрема 470, 500, 530–550 нм), які дозволяють виявити зміни у спектрі відбиття світла між нормальною та патологічною слизовою, особливо при гастритах або неоплазіях [13, 3].

Хоча візуалізація мікросудин у FICE поступається методам на кшталт NBI чи BLI, система дозволяє підвищити контраст зображення навіть на відстані та особливо корисна при виявленні раннього раку шлунку, зокрема за допомогою капсульної ендоскопії або при використанні ендоскопів малого діаметру [13]. Крім того, завдяки підвищеному контрасту та зручності використання, FICE може допомогти уникнути пропущених уражень у випадках, коли WLE не є інформативним [3, 13].

Технологія цифрового покращення ендоскопічного зображення i-Scan — це цифрова технологія покращення зображення від компанії Pentax, яка працює на основі постобробки білого світла у реальному часі та включає три режими підсилення: покращення деталізації поверхні (ПДП), покращення контрастності зображення (ПКЗ), покращення кольорового тону (ПКТ) [5, 7]. Режими ПДП і ПКЗ дозволяють візуалізувати дрібні морфологічні зміни на поверхні слизової, включно з мікроструктурними нерівностями, без втрати яскравості і кольору.

Натомість ПКТ розкладає зображення на RGB-компоненти та модифікує кожну з них індивідуально, дозволяючи підсилити незначні зміни кольору, характерні для онкологічних трансформацій. Система дозволяє налаштовувати режим відповідно до ділянки (стравохід, шлунок, товста кишка), а також поєднувати режими ПДП+ПКЗ для скринінгу або ПКТ — для деталізованого дослідження [7]. У порівнянні з NBI, i-Scan дає яскравіше зображення на великій відстані й не вимагає збільшення, що робить її ефективною альтернативою для рутинного скринінгу, особливо у шлунку [7].

Описані вище методи оптико-цифрового та цифрового покращення зображення мають різні технічні властивості та клінічну ефективність. Їх застосування до окремих анатомічних зон ШКТ дозволяє оптимізувати як скринінгові процедури, так і деталізовану діагностику. У таблиці 1 наведено

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

узагальнення найбільш релевантних методів для конкретних клінічних задач у межах окремих відділів ШКТ.

На основі роботи [3] та даних, які були зосереджені тільки на верхніх відділах ШКТ, було доповнено представлення табл. 1, шляхом включення нижнього відділу ШКТ опираючись на наукові праці [3, 7, 11, 12, 13], які демонструють використання методів залежно від відділу ШКТ під час огляду пацієнта.

Підсумувавши дані, можна зробити висновок, що жоден із методів не є універсальним, а їх ефективність визначається анатомічною ділянкою, клінічною метою (скринінг, оцінка глибини, меж чи характеру ураження) та технічними характеристиками самої технології. Наприклад, деякі підходи забезпечують високу точність лише у вузьких порожнинах (як NBI у стравоході), тоді як інші ефективні при огляді великих анатомічних структур завдяки яскравості та контрастності (як LCI або FICE у шлунку).

Таблиця 1

Застосування методів в залежності від клінічної задачі

	Скринінг (виявлення)	Діагноз: глибина ураження	Діагноз: бічне поширення пухлини	Діагноз: доброякісна чи злоякісна пухлина
Стравохід	BLI	BLI	BLI	BLI
	NBI	NBI + збільшення	NBI	NBI
	-	-	-	i-Scan TE
	LCI		Використання барвнику	Використання барвнику
Шлунок	LCI	-	BLI	BLI
	TXI	-	NBI	NBI
	FICE	-	FICE	-
	i-Scan	i-Scan	i-Scan	i-Scan
Дванадцяти пала кишка	-	-	-	BLI
	-	-	-	NBI
Товста кишка	BLI	BLI	-	BLI
	-	-	NBI	-
	i-Scan	i-Scan TE	i-Scan CE	i-Scan TE

Окремі методи, такі як i-SCAN, дозволяють ефективно адаптувати параметри до органу який досліджується, що підвищує їхню універсальність.

КЛАСИФІКАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Наявні методи ЕПЗ дали суттєвий прогрес для діагностування захворювань ШКТ людини та покращуються для збільшення точності і зменшення пропуску ранніх стадій розвитку раку. Останні 5 років спостерігається відчутна тенденція впливу ШІ на сьогодення як звичайного користувача так і науковців, це дало поштовх до покращення і впровадження нових методів для діагностування хвороб в ендоскопії. Машинний зір, який зазвичай будується на згорткових нейронних мережах, покликаний вирішити питання наявних складнощів забору біопсії, оскільки, як було зазначено у роботі [14] згідно

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Сієтлського протоколу, біопсія має проводитися кожні 2 см, що в свою чергу займає багато часу і може бути порушене дотриманням правил проведення процедури. Крім того, основна проблема в ранньому виявленні малопомітних уражень, як при дисплазії стравоходу та раку шлунку [15] все ще залишається актуальною. Це підштовхує дослідників до розробки автоматизованих асистентів та КД для полегшення і пришвидшення постановки діагнозу або його виключення.

Згорткові нейронні мережі, як правило застосовуються для класифікації зображень та виділення ознак за допомогою шарів згортки [16]. Було розроблено базову схему нейронної мережі, яка представлена на рисунку 2, що являє собою послідовність п'яти ключових компонентів: спершу вхідний шар приймає оригінальне зображення та передає його далі, після чого згортковий шар застосовує набір фільтрів для виділення локальних ознак, таких як краї, текстури чи прості форми. Далі шар групування (pooling) зменшує розмір карт ознак, зберігаючи найважливішу інформацію й знижуючи ризик перенавчання мережі [16].

Отримані ознаки надходять до прихованих (fully-connected) шарів, які узагальнюють їх у високорівневі представлення та приймають рішення. Нарешті, вихідний шар формує кінцевий прогноз, наприклад, генеруючи ймовірності належності зображення до певного класу через визначену функцію активації. Таким чином, мережа проходить шлях «зображення → ознаки → скорочення → інтерпретація → результат». Отримані дані інтерпретуються і порівнюються з «прогнозованими даними» і «очікуваними даними» через матрицю невідповідностей, яка представлена в таблиці 2.

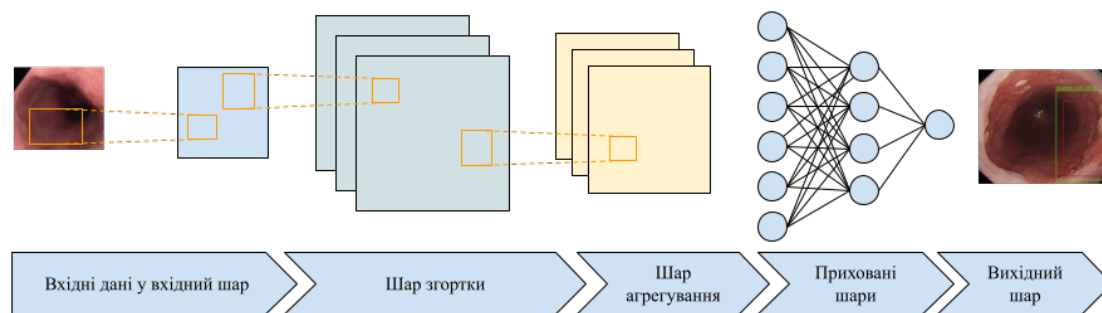


Рисунок 2 – Базова схема згорткової нейронної мережі для обробки ендоскопічних зображень

Зазвичай, як згадано в роботі [16] для оцінки роботи нейромережі, використовують метрики, які демонструють рівень помилки, чим менше помилки, тим краще нейромережа виконує свою задачу. Для кращого розуміння критерії оцінки, які зазвичай користуються для оцінки роботи моделі для біомедичних зображень, слід оглянути розрахунок і їх короткий опис. Для повноцінної інтерпретації результатів необхідно звернутися до ключових метрик: чутливості, специфічності та точності, які попередньо обчислюються на основі отриманих даних та порівнюються зі значенням які очікуються від ШІ. Обраховані дані з матриці невідповідностей, можуть допомагати тренувати мережу, за допомогою коригування вхідних параметрів, які можуть вплинути на якість визначення, проводять декілька ітерацій і зупиняються на оптимальному результаті роботи.

Таблиця 2

Матриця невідповідностей

Прогноз	Позитивний стан	Негативний стан
Позитивний	Істинно позитивний	Хибно позитивний
Негативний	Хибно негативний	Істинно негативний

Параметри чітко описують результат тренування моделі, тож для більш загального розуміння оцінки, наведемо опис формул, за якими розраховуються попередньо описані три параметри.

Чутливість - здатність правильно ідентифікувати присутність хвороби і визначається за формулою (1):

$$\text{чутливість} = \frac{ІП}{ІП + ХН}, \quad (1)$$

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

де: $П$ - число істинно позитивних класифікацій, $ХН$ - число хибно негативних класифікацій

Специфічність - здатність правильно ідентифікувати відсутність хвороби і розраховується за формулою (2).

$$\text{специфічність} = \frac{ІН}{ІН + ХП}, \quad (2)$$

де: $ІН$ - число істинно негативних класифікацій, $ХП$ - число хибно позитивних класифікацій

Точність - загальна частка правильних класифікацій на основі попередньо розрахованих прогнозів, що в свою чергу враховує позитивні і негативні випадки і виконується за формулою (3).

$$\text{точність} = \frac{ІП + ІН}{ІП + ІН + ХП + ХН}, \quad (3)$$

де: $П$ - число істинно позитивних класифікацій, $ХН$ - число хибно негативних класифікацій, $ХП$ - число хибно позитивних класифікацій, $ІН$ - число істинно негативних класифікацій

Описані формули, можна зустріти в різних інтерпретаціях у багатьох наукових роботах, де оглядаються або розробляються нові архітектури і моделі для нейронних мереж. Завдяки формулам можна оцінити продуктивність роботи моделі по визначенню поліпів, ранніх стадій раку стравоходу Барретта [9, 24,25] та запалень.

Сучасні ендоскопічні комплекси все частіше інтегрують допоміжні модулі КД, а стрімкий розвиток методів МН, зокрема згорткових нейронних мереж [3], дозволяє оперативно виявляти підозрілі ділянки слизової оболонки ШКТ, підвищуючи точність діагностики пацієнта [3]. Наявність одного або декількох методів ЕПЗ дозволило науковцям відкривати нові можливості для дослідження і розвитку нових підходів до виділення дефектів і прогнозування захворювань. У роботі [14] описано застосування методу i-scan у поєднанні з WLI для виявлення ранньої неоплазії при стравоході Барретта. Дослідження показало, що нейромережа, навчена на відео даних та статичних зображеннях, отриманих із використанням режиму i-Scan SE (покращення поверхневої структури), досягає високої чутливості та специфічності у виявленні дисплазії, а також здатна локалізувати ділянки для прицільної біопсії. В іншому дослідженні [18] продемонстровано ефективність використання нейронної мережі у поєднанні з LCI для діагностики стравоходу Барретта. Результати, наведені в таблиці 3, вказують на високі значення чутливості та специфічності. Не дивлячись на наявність методів покращення зображення, наукова праця [10] наголошує на важливості використання ендоскопії білого світла (WLI) для тренування нейромережі і оцінки результатів не гірших, ніж з використанням методів ЕПЗ. Ще одне дослідження [19] було присвячене верифікації наявності *H. pylori* за допомогою КД, у якому використовувались зображення, отримані в режимах LCI та WLI. Нейронна мережа досягла точності 82.5% для інфікованого стану та 79.2% — після терапії.

Яскравим прикладом дослідження з використанням великої кількості даних продемонстровано в статті [20], яке включає в собі три тестових набори із використанням високоякісних зображень та відео матеріалу з використанням методу i-Scan-3 зі збільшенням. В результаті система дозволяє працювати в режимі реального часу протягом обстеження і продемонструвала результати в 92% чутливості та 84% специфічності при великому наборі даних в 49,726 кадрів.

Оскільки крім наукових робіт, які порівнюють і пропонують нові методи для роботи існують готові та інтегровані системи КД, можна стверджувати, що машинний зір активно досліджується і покращуються нові підходи до виділення ділянок для фокусування уваги ендоскопіста під час обстеження. Один з таких прикладів наведений на рисунку 3, де можна побачити два прямокутники виділені досвідченим ендоскопістом і натренованою згортковою нейромережею. Крім того, що область виділена як підозріла, вона до того ж класифікована як дисплазія з вірогідністю в 56% [9].

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

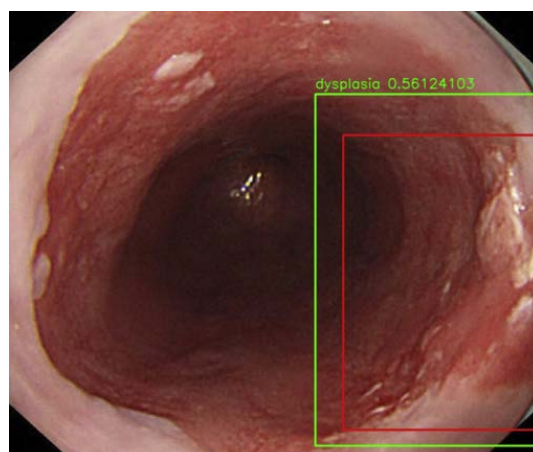


Рисунок 3 – Приклад класифікації ураженої ділянки. Червоний прямокутник оцінка експерта. Зелений прямокутник - оцінка ШІ

Загальна задача нейронних мереж в контексті ендоскопічних досліджень полягає у асистуванні лікарю. Якість тренування ШІ пропорційно впливає на результати виявлення хвороби і швидкості асистуванню як досвідченим лікарям так інтернам початківцям.

Результати дослідження демонструють продовження зростання наукових напрацювань в напрямку поєднання оптико-цифрових та цифрових методів у поєднанні з ШІ. Основним джерелом формування відео та статичних зображень для тренування та роботи з КД є використання ЕПЗ. Якість отриманих результатів залежить від вибраного методу ЕПЗ та органу, який будуть обстежувати з використанням одного з методів покращення ендоскопічного зображення. Результати аналізу демонструють можливості застосування методів для обстеження чотирьох відділів ШКТ з використанням ЕПЗ, враховуючи особливості ЕПЗ відповідно до кожного відділу.

Авторами [14, 18] у своїх дослідження підкреслили важливість оптико-цифрових методів у поєднанні з глибоким навчання. Було виявлено тенденцію до кращої продуктивності ШІ класифікатора на зображеннях застосовуючи оптико-цифрові методи i-Scan та LCI, порівнявши результати, як окремо так і разом для ендоскопістів і ШІ системи. У дослідженні [18], застосування LCI для діагностики стравоходу Барретта показало вищу точність роботи ШІ-системи (90.5%) порівняно з використанням лише WLI (84.1%). При цьому, результати ШІ з LCI були порівняні з точністю досвідчених ендоскопістів.

Представлені результати в табл. 3, були опрацьовані на основі робіт [14, 18] та представляють узагальнену картину поточного розвитку ШІ в сфері дослідження дисплазії при стравоході Барретта. Така патологія ставить перед ендоскопістом складне завдання при дослідженні пацієнта. Оскільки наявність даного захворювання потребує постійного обстеження та перевірки, доцільно проводити відеофіксацію з подальшим аналізом системою ШІ за прогресом ходу лікування.

Таблиця 3

Порівняння метрик ШІ системи і лікаря ендоскопіста

	Метод ЕПЗ	Чутливість	Специфічність	Точність
Недосвідчений ендоскопіст	WLI+i-Scan-1	79%	49%	-
Система ШІ	WLI+i-Scan-1	96%	88%	-
Ендоскопісти	WLI	88.2%	88.3%	86.3%
	LCI	91%	88.6%	90%
Система ШІ	WLI	89.6%	75.5%	84.1%
	LCI	90.1%	91.1%	90.5%

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Результати дослідження підтверджують і доповнюють висновки представлені в статті [21] щодо розвитку підходів до обробки отриманого матеріалу в ході ендоскопічного обстеження. Було продемонстровано зростання якості тренування нейромереж, а саме за основними матриками точність коливається в діапазоні (66% до 95%), чутливість (76% до 96.4%) та специфічність (42% до 100%). Також слід зазначити, що на кінцеві значення впливають вхідні параметри для нейромережі, а саме: розмір, кількість, якість зображень, кількість датасетів в залежності від числа пацієнтів. Робота була зосереджена лише на результатах і не брала до уваги деталі вхідних даних. Крім того, було визначено стійку тенденцію з покращення оцінки здатності моделей до прийняття рішень та створення нових архітектурних підходів до вирішення задач, які покладено на автоматичну КД.

Вище було описано успіхи в підвищенні чутливості, специфічності і якості класифікації зображень, але існують також дослідження [22], де на прикладі визначення захворювання стравоходу Барретта, акцентують увагу на проблематиці впливу певних чинників на якість класифікації визначення наявності хвороб. Так було досліджено, як ІІІ система втрачає показники класифікації при обробці зображень різної вхідної якості. Були відібрані зображення із звичайної клінічної практики і порівнянні на високоякісному наборі зображень. Це призвело до зниження показників класифікації з 83% до 71%, а втрата чутливості показала з 85% до 47%. Автори наголосили на проблематиці навчання ІІІ тільки якісними зображеннями, що в свою чергу може дати неочікуваний негативний результат в метриках специфічності, чутливості та якості. Натомість пропозиція в покращенні різноманіття тренувальних даних для майбутніх досліджень залишається актуальною. Отримані результати узгоджуються з даними, наведеними в таблиці 3, де спостерігається зростання метрик якості класифікації залежно від якості вхідних даних. Це, у свою чергу, підкреслює актуальну проблему недостатньої кількості та неоднорідної якості даних, які безпосередньо впливають на ефективність роботи моделей. Слід зазначити, що науковою роботою [23] також було описано основні недоліки тренування ІІІ, які полягають в неоднорідності та кількості даних для тренування, а також основна проблема як обчислювальна потужність апаратних засобів для тренування моделей.

Підсумовуючи отримані результати, можна визначити тенденцію зміни метрик класифікації в сучасних моделях ІІІ залежно від якості даних, проте ефективність таких метрик прив'язані до вхідних даних у вигляді відео і фото матеріалів обстежень пацієнтів, а також до споживання значних обчислювальних ресурсів на тренування моделі.

ВИСНОВКИ

ІІІ та машинний зір переконливо демонструють свою ключову роль у сучасній медицині: алгоритми глибокого навчання не лише зменшують вплив людського фактору, а й формують нові підходи до обробки зображень отриманих оптико-цифровими методами.

У роботі було проведено класифікацію оптико-цифрових методів, яка демонструє роль і місце ЕПЗ в загальній структурі методів покращення. Проведений аналіз існуючих методів ЕПЗ та визначення оптимальності методів в залежності від клінічної задачі визначає можливість їх застосування в рамках обстеження різних відділів ШКТ у відповідності “метод-відділ ШКТ”.

Проведений аналіз визначив, що поєднання режиму білого світла та оптико-цифрових методів ЕПЗ (NBI, BLI, i-scan, FICE, LCI) та КД із ІІІ підвищує чутливість у середньому на 17% і специфічність на 39 % у порівнянні з лікарями ендоскопістами з початковим досвідом. Отримані результати є основою щодо впровадження КД, як засобу асистентування для підвищення досвіду молодих ендоскопістів. Незважаючи, на покращення показників, результати можуть давати і негативний ефект при використанні занадто якісних даних. Так ІІІ може демонструвати гірші результати при обробці результатів звичайної клінічної практики, де зображення мають шуми, та є менш чіткими та контрастними. Отримані в результаті аналізу дані відображають сучасний стан розвитку ІІІ в сфері дослідження дисплазії стравоходу Барретта. Можливості згорткових нейромереж при застосуванні КД із ІІІ та поєднання світла білого кольору із методами ЕПЗ покращують результати для діагностування шляхом виділення ділянок які потребують найбільшої уваги лікаря.

Крім того, визначено основне обмеження, яке досі залишається - це брак великих репрезентативних датасетів: є потреба в неоднорідних статичних зображеннях та відео матеріалів для тренування ІІІ. Розв'язання цієї проблеми (шляхом використання даних з різних клінічних установ та стандартизовані протоколи збору вхідних відеоматеріалів) критично важливе для подальшого зростання точності та узагальненості моделей. Попри це, навіть при наявних обмеженнях, системи ІІІ вже можуть ефективно виступати асистентом для лікарів-інтернів, звертаючи їх увагу на підозрілі ділянки, зменшуючи кількість пропусків уражених ділянок, а також представляють собою інтерактивний навчальний інструмент.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Таким чином, інтеграція оптико-цифрових режимів з алгоритмами глибокого навчання формує новий етап розвитку ендоскопічної діагностики, підвищуючи її відтворюваність, чутливість та безпеку для пацієнтів. В свою чергу персоналізований підбір або комбінація методів ЕПЗ залежно від конкретного клінічного завдання є доцільним завданням.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Volosovets, O., Kryvopustov, S., Kuzmenko, A., Prokhorova, M., Chernii, O., Khomenko, V., Iemets, O., Gryshchenko, N., Kovalchuk, O., & Kupkina, A. (2024). Deterioration of health of infants during the war and COVID-19 pandemic in Ukraine. *CHILD'S HEALTH*, 19(6), 337–347. <https://doi.org/10.22141/2224-0551.19.6.2024.1737>
2. Poudanien, Y. E., & Kozhemiako, A. V. (2023). Optical-digital narrowband methods for registration and improvement of biomedical images during endoscopy. *Optoelectronic Information-Power Technologies*, 46(2), 44–54. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2023-46-2-44-54>
3. Miura, Y., Osawa, H., & Sugano, K. (2024). Recent Progress of Image-Enhanced Endoscopy for Upper Gastrointestinal Neoplasia and Associated Lesions. *Digestive diseases (Basel, Switzerland)*, 42(2), 186–198. <https://doi.org/10.1159/000535055>
4. Ali, S. (2022). Where do we stand in AI for endoscopic image analysis? Deciphering gaps and future directions. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41746-022-00733-3>
5. PENTAX Medical. (2017, February 16). PENTAX Medical's i-SCAN and Optical Enhancement (OE) Technology for the GI Tract. Pentax Medical. <https://blog.pentaxmedical.com/i-scan-optical-enhancement-technology-for-gi-tract>
6. Yang, Y. J. (2023). Current status of image-enhanced endoscopy in inflammatory bowel disease. *The Korean Society of Gastrointestinal Endoscopy*. <https://doi.org/10.5946/ce.2023.070>
7. Kodashima, S. (2010). Novel image-enhanced endoscopy with i-scan technology. Baishideng Publishing Group Inc. <https://doi.org/10.3748/wjg.v16.i9.1043>
8. Jin, Z., Gan, T., Wang, P., Fu, Z., Zhang, C., Yan, Q., ... Ye, X. (2022). Deep learning for gastroscopic images: computer-aided techniques for clinicians. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1186/s12938-022-00979-8>
9. Hashimoto, R., Requa, J., Dao, T., Ninh, A., Tran, E., Mai, D., ... Samarasena, J. B. (2020). Artificial intelligence using convolutional neural networks for real-time detection of early esophageal neoplasia in Barrett's esophagus (with video). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2019.12.049>
10. Zhang, J.-Q., Mi, J.-J., & Wang, R. (2023). Application of convolutional neural network-based endoscopic imaging in esophageal cancer or high-grade dysplasia: A systematic review and meta-analysis. Baishideng Publishing Group Inc. <https://doi.org/10.4251/wjgo.v15.i11.1998>
11. Umegaki, E., Misawa, H., Handa, O., Matsumoto, H., & Shiotani, A. (2023). Linked Color Imaging for Stomach. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13030467>
12. Okada, M., Yoshida, N., Kashida, H., Hayashi, Y., Shinozaki, S., Yoshimoto, S., ... Yamamoto, H. (2023). Comparison of blue laser imaging and light-emitting diode-blue light imaging for the characterization of colorectal polyps using the Japan narrow-band imaging expert team classification: The LASEREO and ELUXEO COLonoscopy study. Wiley. <https://doi.org/10.1002/deo2.245>
13. Osawa, H., Miura, Y., Takezawa, T., Ino, Y., Khurelbaatar, T., Sagara, Y., ... Yamamoto, H. (2018). Linked Color Imaging and Blue Laser Imaging for Upper Gastrointestinal Screening. *The Korean Society of Gastrointestinal Endoscopy*. <https://doi.org/10.5946/ce.2018.132>
14. Hussein, M., González-Bueno Puyal, J., Lines, D., Sehgal, V., Toth, D., Ahmad, O. F., ... Haidry, R. (2022). A new artificial intelligence system successfully detects and localises early neoplasia in Barrett's esophagus by using convolutional neural networks. Wiley. <https://doi.org/10.1002/ueg2.12233>
15. Shibata, T., Teramoto, A., Yamada, H., Ohmiya, N., Saito, K., & Fujita, H. (2020). Automated Detection and Segmentation of Early Gastric Cancer from Endoscopic Images Using Mask R-CNN. *Applied Sciences*, 10(11), 3842. <https://doi.org/10.3390/app10113842>

16. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2017). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Association for Computing Machinery (ACM). <https://doi.org/10.1145/3065386>
17. Lin, C.-H., Hsu, P.-I., Tseng, C.-D., Chao, P.-J., Wu, I.-T., Ghose, S., ... Lee, T.-F. (2023). Application of artificial intelligence in endoscopic image analysis for the diagnosis of a gastric cancer pathogen - Helicobacter pylori infection. Research Square Platform LLC. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2843263/v1>
18. Takeda, T., Asaoka, D., Ueyama, H., Abe, D., Suzuki, M., Inami, Y., ... Nagahara, A. (2024). Development of an Artificial Intelligence Diagnostic System Using Linked Color Imaging for Barrett's Esophagus. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jcm13071990>
19. Yoshida, N., Dohi, O., Inoue, K., Yasuda, R., Murakami, T., Hirose, R., ... Itoh, Y. (2019). Blue Laser Imaging, Blue Light Imaging, and Linked Color Imaging for the Detection and Characterization of Colorectal Tumors. The Editorial Office of Gut and Liver. <https://doi.org/10.5009/gnl18276>
20. Hussein, M., Lines, D., González-Bueno Puyal, J., Kader, R., Bowman, N., Sehgal, V., ... Haidry, R. (2023). Computer-aided characterization of early cancer in Barrett's esophagus on i-scan magnification imaging: a multicenter international study. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2022.11.020>
21. Swied, M. Y., Alom, M., Daaboul, O., & Swied, A. (2024). Screening and Diagnostic Advances of Artificial Intelligence in Endoscopy. Innovative Healthcare Institute. <https://doi.org/10.36401/iddb-23-15>
22. Jong, M. R., Jaspers, T. J. M., Kusters, C. H. J., Jukema, J. B., van Eijck van Heslinga, R. A. H., ... Fockens, K. N. (2025). Challenges in Implementing Endoscopic Artificial Intelligence: The Impact of Real-World Imaging Conditions on Barrett's Neoplasia Detection. Wiley. <https://doi.org/10.1002/ueg2.12760>
23. Nie, Z., Xu, M., Wang, Z., Lu, X., & Song, W. (2024). A Review of Application of Deep Learning in Endoscopic Image Processing. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jimaging10110275>
24. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
25. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

Надійшла до редакції: 10.03.2025

ПОУДАНСЬ ЮРІЙ ЄВГЕНОВИЧ – аспірант кафедри БМІОЕС, Вінницький національний технічний університет, 21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, **e-mail: mcpchip@gmail.com**
ORCID:0009-0004-4252-0511

КОЖЕМ'ЯКО АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент кафедри ОТ, Вінницький національний технічний університет, 21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, **e-mail: kvantron@vntu.edu.ua**, ORCID: 0000-0001-7323-7146

YURII Eu. POUDANIEN, ANDRII V. KOZHEMIAKO

**IMAGE CLASSIFICATION USING OPTICAL-DIGITAL IMAGE ENHANCEMENT METHODS AND
DEEP LEARNING IN ENDOSCOPIC EXAMINATIONS**

Vinnytsia National Technical University, 21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine