

УДК 53.0

О.С. КОРНІЛЕНКО, О.В. КАРАСЬ

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ОПТИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ СІТКІВКИ ПРИ ДІАБЕТИЧНІЙ РЕТИНОПАТІЇ

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

Анотація. У статті розглядаються можливості застосування штучного інтелекту (ШІ) для автоматизованої інтерпретації оптичних зображень сітківки при діабетичній ретинопатії. Описано основні методи візуалізації, зокрема фундус-фотографію та оптичну когерентну томографію, а також проаналізовано алгоритми глибокого навчання, які застосовуються для виявлення ретинопатичних змін. Проведено оцінку ефективності сучасних автономних систем, таких як IDx-DR та EyeArt, та визначено основні обмеження їх використання. Особливу увагу приділено етичним, технічним і правовим аспектам впровадження ШІ в офтальмологічну практику. Стаття підкреслює потенціал ШІ як інструмента для раннього скринінгу та профілактики втрати зору у хворих на діабет.

Ключові слова: діабетична ретинопатія, штучний інтелект, глибоке навчання, фундус-зображення, автоматизована діагностика, офтальмологія

Abstract. This article explores the application of artificial intelligence (AI) for the automated interpretation of optical retinal images in diabetic retinopathy. It presents the main imaging methods, including fundus photography and optical coherence tomography, and analyzes deep learning algorithms used to detect retinopathic changes. The study evaluates the effectiveness of current autonomous systems, such as IDx-DR and EyeArt, and outlines key limitations of their use. Special attention is given to ethical, technical, and legal aspects of AI implementation in ophthalmic practice. The article highlights AI's potential as a tool for early screening and prevention of vision loss in diabetic patients.

Keywords: diabetic retinopathy, artificial intelligence, deep learning, fundus imaging, automated diagnosis, ophthalmology

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-209-216

ВСТУП

Цукровий діабет — одне з найпоширеніших хронічних захворювань сучасності, яке супроводжується низкою системних ускладнень, серед яких особливе місце посідає діабетична ретинопатія (ДР). Це ураження судинної системи сітківки, що без належного контролю може призвести до часткової або повної втрати зору. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, майже третина пацієнтів із діабетом має ті чи інші ознаки ретинопатії, а в багатьох випадках патологічні зміни залишаються непоміченими через відсутність симптомів на ранніх стадіях. З огляду на це, надзвичайно важливим стає завдання своєчасного виявлення ДР, що передбачає регулярне обстеження сітківки за допомогою оптичних методів візуалізації.

Однак у багатьох регіонах, особливо у сільських або малозабезпечених районах, спостерігається брак офтальмологів і відповідної технічної бази для систематичного скринінгу. Це створює потребу у впровадженні інноваційних технологічних рішень, зокрема систем автоматизованої діагностики на основі штучного інтелекту (ШІ). Завдяки сучасним алгоритмам глибокого навчання, зокрема згортковим нейронним мережам, з'явилась можливість точно і швидко інтерпретувати фундус-знімки без участі лікаря. Такі системи вже продемонстрували високу ефективність і навіть отримали регуляторне схвалення в деяких країнах.

Метою даної роботи є всебічне дослідження можливостей застосування штучного інтелекту для автоматизованої інтерпретації оптичних зображень сітківки у пацієнтів із діабетичною ретинопатією. У межах дослідження розглядаються принципи функціонування сучасних алгоритмів ШІ, методи візуалізації сітківки, ефективність і точність існуючих систем, а також аналізуються ключові виклики та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі.

Діабетична ретинопатія (ДР) — це мікросудинне ускладнення цукрового діабету, що вражає сітківку ока і є однією з провідних причин сліпоти серед працездатного населення у світі. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, майже кожна третя людина з діабетом має певну форму ураження сітківки, причому ризик зростає з тривалістю хвороби та рівнем глікемічного контролю [1].

Патогенез діабетичної ретинопатії пов'язаний із хронічною гіперглікемією, яка призводить до ушкодження ендотелію судин сітківки, порушення кровообігу, гіпоксії тканин і збільшення проникності судин. Це зумовлює утворення мікроаневризм, крововиливів, твердих ексудатів, набряку макули та неоваскуляризації — патологічного розростання нових судин, яке характерне для тяжких стадій захворювання. ДР класифікується на непроліферативну (початкову, середню, тяжку) та проліферативну форми. Найбільш небезпечною є проліферативна ретинопатія, оскільки новоутворені судини є крихкими та схильними до розривів, що призводить до значних крововиливів у склоподібне тіло та відшарування сітківки [2].

Сучасна офтальмологія використовує декілька методів візуалізації для діагностики ДР. Найпоширенішими є фундус-фотографія (кольорові знімки очного дна), флюоресцеїнова ангіографія (для оцінки кровоплину) та оптична когерентна томографія (ОКТ), яка дозволяє виявляти набряк макули та структурні зміни в сітківці з високою роздільною здатністю. Фундус-фотографія широко використовується у скринінгових програмах завдяки своїй неінвазивності, відносній дешевизні та можливості цифрового аналізу [3].

Згідно з рекомендаціями Американської діабетичної асоціації, щорічний огляд очного дна є обов'язковим для пацієнтів з діабетом, починаючи з моменту встановлення діагнозу для пацієнтів з діабетом 2 типу, або через 5 років після діагнозу для пацієнтів з діабетом 1 типу [4]. Раннє виявлення та інтерпретація змін у сітківці є критично важливими, оскільки діабетична ретинопатія може протікати безсимптомно до моменту настання незворотних змін.

Проте, незважаючи на доступність методів діагностики, у багатьох країнах з низьким і середнім рівнем доходу не вистачає кваліфікованих офтальмологів для масового скринінгу. Саме це підсилює потребу в автоматизованих інструментах виявлення патологій сітківки, зокрема з використанням методів штучного інтелекту.

Наукові джерела підтверджують ефективність раннього втручання та лікування при ДР. Наприклад, дослідження Early Treatment Diabetic Retinopathy Study (ETDRS) показали, що лазерна фотокоагуляція може знизити ризик втрати зору при проліферативній ретинопатії на 50% [5]. У випадках із набряком макули застосовуються ін'єкції анти-VEGF препаратів (vascular endothelial growth factor inhibitors), таких як ранібізумаб та афліберцепт, які зменшують судинну проникність і знижують набряк [6].

ОПТИЧНІ МЕТОДИ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ СІТКІВКИ

Оптичні методи візуалізації є ключовими в діагностиці та моніторингу діабетичної ретинопатії, оскільки дозволяють безконтактно та неінвазивно отримати високоякісні зображення структури сітківки, виявити патологічні зміни на ранніх стадіях та контролювати ефективність лікування. Серед найпоширеніших і найбільш клінічно значущих методів виділяють кольорову фундус-фотографію, оптичну когерентну томографію (ОКТ), флуоресцеїнову ангіографію (ФА), а також сучасні мультиспектральні технології.

Фундус-фотографія (Fundus Imaging) є одним із найбільш використовуваних методів, особливо в масових скринінгових програмах. Вона полягає у створенні двовимірного кольорового зображення очного дна, на якому видно диск зорового нерва, макулу, кровоносні судини та патологічні елементи — мікроаневризми, крововиливи, ексудати. Метод дозволяє швидко отримати цифрові знімки, які легко аналізувати вручну або за допомогою алгоритмів штучного інтелекту. Згідно з дослідженням Gulshan et al. (2016), саме фундус-фотографії є базовими для навчання та валідації глибоких нейронних мереж у задачах автоматичного виявлення діабетичної ретинопатії [7].

Оптична когерентна томографія (ОКТ, Optical Coherence Tomography) є сучасним методом, що забезпечує пошарове сканування сітківки з мікронною роздільною здатністю, подібно до гістологічного зрізу. ОКТ дозволяє виявити набряк макули, деструкцію внутрішніх шарів сітківки, субретинальні

рідини й інші морфологічні зміни, які не завжди видно на фундус-знімках. Цей метод особливо ефективний для діагностики та моніторингу діабетичного макулярного набряку (DME), одного з основних чинників втрати зору у пацієнтів з діабетом (Leuschen et al., 2013). ОКТ є обов'язковим у клінічній практиці при прийнятті рішень про лікування анти-VEGF препаратами[8].

Флуоресцеїнова ангіографія (FA, Fluorescein Angiography) — це називний метод, що потребує внутрішньовенного введення барвника (флуоресцеїну) і подальшого фотографування кровотоку в сітківці. Цей метод дозволяє виявити ділянки гіпоперфузії, витоки з судин, неоваскуляризацію та капілярну оклюзію. Хоча ФА менш застосовна в рутинному скринінгу, вона незамінна при детальному плануванні хірургічного або лазерного лікування. У дослідженні Silva et al. (2011) було показано, що комбінування ФА та ОКТ забезпечує найбільш повну візуалізацію ретинопатичних змін [9].

У сучасних умовах активно розвиваються мультиспектральна візуалізація та swept-source OCT, які поєднують переваги глибшого проникнення в тканини та швидшого збору інформації. Крім того, дедалі частіше використовуються портативні офтальмологічні камери, які можна підключити до смартфонів, що особливо корисно в умовах обмеженого доступу до медичних установ [10].

Завдяки цифровій природі отриманих зображень, ці методи добре інтегруються з алгоритмами глибокого навчання, що відкриває нові можливості для автоматизованої діагностики, підвищення доступності медичної допомоги та зменшення навантаження на лікарів.

АЛГОРИТМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОФТАЛЬМОЛОГІЇ

Штучний інтелект (ШІ), а зокрема глибоке навчання (deep learning), нині відіграє ключову роль у трансформації підходів до медичної діагностики, зокрема в офтальмології. Завдяки високій точності та здатності до масштабування, алгоритми ШІ успішно застосовуються для виявлення діабетичної ретинопатії (ДР), дозволяючи здійснювати автоматизовану інтерпретацію офтальмологічних зображень навіть без участі лікаря. Це особливо важливо в умовах дефіциту офтальмологів у багатьох країнах та необхідності регулярного скринінгу пацієнтів із діабетом.

У центрі таких систем — згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN), які показали надзвичайну ефективність у задачах комп'ютерного зору. Ці моделі здатні автоматично навчатися виявляти візуальні патерни патологій, не потребуючи попередньої ручної інженерії ознак (feature engineering). CNN аналізує фундус-зображення на піксельному рівні та створює багаторівневу абстракцію з метою виявлення ключових ознак ДР — таких як мікроаневризми, внутрішньосітківкові крововиливи, тверді та м'які ексудати, а також новоутворені судини. Наприклад, алгоритм, побудований на архітектурі Inception v3, тренований командою Google, виявив рівень чутливості 90,3% і специфічність 98,1% на незалежному датасеті EyePACS-1, перевершивши деяких лікарів-офтальмологів за точністю [7].

Для досягнення таких результатів ШІ-системи тренуються на великих датасетах із ручною розміткою, які використовуються як "золотий стандарт". Найвідомішими серед них є EyePACS (130 000+ зображень), Messidor (1200 зображень), APTOS, IDRiD, DDR (Diabetic Retinopathy Detection) та інші. Вказані набори містять фундус-знімки, розмічені лікарями-офтальмологами за ступенем ДР — від відсутності ретинопатії до проліферативної форми. Це дозволяє навчити моделі як на класифікацію за п'ятибальною шкалою, так і на бінарну діагностику (наявність/відсутність ураження).

Часто моделі створюються за принципом transfer learning — використовується попередньо навчена модель (наприклад, на ImageNet) з подальшим донавчанням на медичних даних. Такий підхід дозволяє уникнути надмірної витрати ресурсів та зменшити вимоги до кількості спеціалізованих медичних зображень. Найчастіше застосовуються архітектури ResNet, DenseNet, EfficientNet, які мають високу точність, стабільність під час навчання та гарну здатність до генералізації. У реальних клінічних умовах особливо цінними є моделі на основі MobileNet — вони дозволяють реалізовувати діагностику навіть на мобільних пристроях, таких як смартфони чи портативні офтальмологічні камери.

Важливим етапом розвитку стала поява перших автономних ШІ-систем, схвалених для клінічного використання. Найвідомішою серед них є IDx-DR, яка у 2018 році стала першою у світі автономною ШІ-системою, що отримала схвалення FDA (Food and Drug Administration, США) для самостійної діагностики діабетичної ретинопатії без участі лікаря. Вона працює як програмно-апаратний комплекс, до якого завантажуються фундус-знімки, і система виводить клінічне рішення — чи слід пацієнта направити до офтальмолога. Клінічні випробування IDx-DR показали чутливість 87,4% і специфічність 89,5%, що свідчить про її надійність у практичному застосуванні [3].

Окремої уваги заслуговують сегментаційні моделі, які не лише класифікують ступінь ураження, а й візуально виділяють уражені ділянки на зображенні сітківки. Найчастіше для цього використовується архітектура U-Net, яка дозволяє точно локалізувати патологічні утворення. Застосування **attention-**

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

механізмів (наприклад, SE-Net або Attention U-Net) покращує інтерпретованість моделі, фокусуючи обчислювальні ресурси на найбільш релевантних ділянках зображення.

З метою підвищення довіри лікарів до рішень моделей, в дослідженнях широко використовуються візуалізаційні техніки на кшталт Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping), які показують, на якій ділянці зображення модель "зосередилась" при прийнятті рішення. Такі інструменти роблять ШІ-моделі більш прозорими та зрозумілими, що є критично важливим для впровадження в медичну практику.

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ДІАГНОСТИКИ

Автоматизовані системи діагностики діабетичної ретинопатії, засновані на алгоритмах штучного інтелекту, поступово переходять із дослідницьких лабораторій до реального клінічного застосування. Їх основна мета — забезпечення раннього виявлення уражень сітківки у пацієнтів з діабетом, навіть у тих регіонах, де немає постійного доступу до лікарів-офтальмологів. Ці системи дозволяють автоматично аналізувати фундус-знімки, ідентифікувати на них характерні патологічні ознаки та класифікувати ступінь діабетичної ретинопатії відповідно до міжнародних стандартів.

Типова архітектура такої системи включає декілька ключових етапів: попередню обробку зображення (наприклад, нормалізацію освітлення, зменшення шуму, усунення артефактів), виділення ROI (областей інтересу), сегментацію структур (судини, макула, диск зорового нерва), а також класифікацію або ранжування за ступенем ураження. Деякі системи також інтегрують модулі для виявлення інших патологій, таких як глаукома або вікова макулодистрофія, що розширює їх функціональність [11].

Яскравим прикладом впровадження є автономна ШІ-система IDx-DR, схвалена FDA. Вона розроблена для використання в умовах первинної медичної допомоги, коли пацієнт без розширення зіниць проходить фундус-фотографію за допомогою спеціальної камери (наприклад, Topcon NW400). Отримане зображення завантажується в хмарну платформу, де ШІ аналізує його протягом хвилин і видає результат — або "діагностична ретинопатія не виявлена, перевірити знову через рік", або "виявлено ретинопатію, необхідна консультація офтальмолога" [3]. Таким чином, система закриває повний діагностичний цикл без потреби в спеціалізованому лікарі на місці.

Ще одним прикладом є система EyeArt, яка теж пройшла клінічну валідацію і наразі використовується у США, Індії та Великій Британії. У великому мультицентровому дослідженні EyeArt показала чутливість 91,3% та специфічність 91,1% при виявленні референтної діабетичної ретинопатії — показників, що порівнюювані з результатами кваліфікованих лікарів [13]. Система підтримує інтеграцію із медичними інформаційними системами (EMR), що важливо для зручної роботи в клініках.

Інші системи з відкритим кодом, як-от RetinaNet або DRInsight, дозволяють адаптувати і вдосконалювати архітектури під конкретні клінічні задачі. Наприклад, RetinaNet поєднує можливості класифікації та сегментації, а також дозволяє експериментувати з attention-механізмами для фокусування на мікроскопічних ураженнях. У публікаціях останніх років демонструється, що моделі, які використовують ensemble-методи (поєднання декількох моделей), досягають точності понад 94% [14].

Важливим аспектом сучасних систем є збереження інтерпретованості — можливості пояснити лікарю або пацієнту, чому система винесла саме таке рішення. Більшість сучасних рішень вбудовують Grad-CAM або аналогічні модулі візуалізації, які відображають теплові карти зонах уваги моделі. Це не тільки підвищує рівень довіри, але й дозволяє лікарям використовувати ШІ як інструмент підтримки прийняття клінічного рішення (CDSS — Clinical Decision Support System) [15].

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ДІАГНОСТИЦІ ДІАБЕТИЧНОЇ РЕТИНОПАТІЇ

Ефективність штучного інтелекту (ШІ) у діагностиці діабетичної ретинопатії (ДР) оцінюється за кількома ключовими показниками, зокрема: чутливістю (sensitivity), специфічністю (specificity), точністю (accuracy), часом обробки зображення та здатністю до узагальнення результатів на різні популяції пацієнтів. Дані численних клінічних випробувань та порівняльних досліджень свідчать про те, що сучасні системи ШІ досягають рівня ефективності, співставного з кваліфікованими офтальмологами, а іноді навіть перевершують їх за окремими показниками [7].

У фундаментальному дослідженні команди Google (Gulshan et al., 2016), глибока згортовка нейронна мережа, навчена на понад 128 тисячах фундус-знімків, досягла чутливості 90,3% та специфічності 98,1% у виявленні референтної діабетичної ретинопатії на незалежному датасеті

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

EyePACS-1. Це дозволило авторитетному журналу *JAMA* опублікувати статтю про потенціал ШІ у ранньому скринінгу ДР та підняти питання про масштабованість такого підходу [7].

У подальших незалежних клінічних випробуваннях, таких як випробування автономної системи IDx-DR, зафіксовано чутливість 87,4% і специфічність 89,5% у пацієнтів у реальних умовах первинної медичної допомоги [3]. Це підтверджує, що такі системи здатні функціонувати ефективно навіть поза умовами лабораторій, при цьому забезпечуючи високу діагностичну надійність.

Інше клінічне дослідження, проведене у Великій Британії на мультиетнічній вибірці з понад 300 000 пацієнтів, продемонструвало, що система DeepMind Health (Alphabet) забезпечила точність у 94,5% випадків для виявлення як ДР, так і інших ретинопатій (вікова макулодистрофія, глаукома) [17]. Результати були порівняні з «золотим стандартом» — діагнозами, виставленими групою з восьми консультантів-офтальмологів.

Також важливо відзначити, що системи на основі ШІ здатні аналізувати зображення з високою швидкістю — від 5 до 30 секунд на одне зображення залежно від архітектури моделі та використовуваного обладнання. Це забезпечує можливість масового скринінгу — наприклад, у країнах із високою поширеністю діабету, таких як Індія чи Китай, де ресурси офтальмологів обмежені [10].

Крім технічних показників, клінічна ефективність визначається також здатністю моделі правильно ідентифікувати пацієнтів, яким дійсно потрібно направлення до офтальмолога, та уникати хибнопозитивних результатів, які можуть перевантажити систему охорони здоров'я. У цьому контексті моделі з високою специфічністю мають більшу цінність для практичної охорони здоров'я.

Ще один важливий аспект — загальна узагальнювальність моделей, тобто здатність давати точні результати на зображеннях, зроблених за допомогою різних камер, у різних умовах освітлення та на пацієнтах різного етнічного походження. У багатьох дослідженнях було показано, що без належного fine-tuning моделі можуть втрачати точність на нових датасетах. Наприклад, у дослідженні Li et al. (2019), система ШІ показала точність 93% у Китаї, але лише 87% в Індонезії без перенавчання [14].

У клінічному сенсі, використання ШІ дозволяє зменшити витрати, скоротити черги до офтальмолога та знизити ризик втрати зору у пацієнтів завдяки своєчасному виявленню уражень сітківки. Багато клінік повідомляють про зростання охоплення скринінгом із 30–40% до понад 80% після впровадження автоматизованих систем [19].

ПРОБЛЕМИ ТА ОБМЕЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ДІАГНОСТИЦІ ДІАБЕТИЧНОЇ РЕТИНОПАТІЇ

Незважаючи на значні досягнення в розробці алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) для діагностики діабетичної ретинопатії (ДР), існує низка суттєвих проблем і обмежень, які вповільнюють або ускладнюють їх широкомасштабне впровадження в медичну практику. Ці обмеження можна умовно поділити на технічні, клінічні, етичні, правові та соціальні аспекти.

Однією з основних технічних проблем є недостатня узагальнювальна здатність моделей (generalizability). Моделі, які демонструють високі результати на внутрішніх тестових наборах, іноді суттєво втрачають точність при застосуванні до зображень, отриманих з інших джерел — наприклад, з камер іншого виробника, в умовах іншого освітлення або на популяції іншого етнічного походження [20]. Це явище відоме як domain shift, і воно часто потребує перенавчання або додаткової калібровки моделей, що ускладнює масштабування таких рішень.

Ще одна технічна проблема — якість вхідних зображень. ШІ-системи особливо чутливі до нечітких, пересвічених, розмитих або артефактних фундус-знімків. На практиці, понад 10–15% зображень можуть бути непридатними для аналізу, особливо в умовах використання недорогих портативних камер або недостатньо підготовленого персоналу [21]. Деякі моделі навчаються відкидати неякісні зображення, але це також призводить до втрати інформації та ризику пропустити патології.

На клінічному рівні значущим обмеженням є відсутність гнучкості у прийнятті рішень. Більшість нинішніх систем класифікують наявність або відсутність ДР, але не можуть адаптувати свої рекомендації до контексту — наприклад, враховувати інші медичні чинники, супутні хвороби чи індивідуальні особливості пацієнта. Це знижує корисність таких систем у багаточинній клінічній практиці [11].

Також слід відзначити, що більшість моделей поки не підтримують багатомовні інтерфейси, не інтегровані в національні електронні системи охорони здоров'я і не мають повноцінної підтримки локальних протоколів лікування, що обмежує їх використання у країнах, де ШІ ще не регламентовано на державному рівні [23, 26, 27].

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Етичні питання застосування ШІ пов'язані, насамперед, із відсутністю прозорості (black box issue). Навіть якщо система демонструє високу точність, лікар і пацієнт часто не знають, чому саме вона винесла певне рішення. Це викликає недовіру, особливо в умовах, коли йдеться про серйозні клінічні наслідки. Для вирішення цієї проблеми застосовуються інтерпретовані моделі або візуалізаційні підходи на кшталт Grad-CAM, але вони лише частково вирішують проблему [12, 28, 29].

Правові ризики пов'язані з відсутністю чіткої відповідальності у разі помилки. Якщо автономна система винесе хибний негативний результат (не виявить ДР), і пацієнт втратить зір, не зовсім зрозуміло, хто несе юридичну відповідальність — розробник, клініка, яка впровадила систему, чи оператор, який зробив знімок. Такі ситуації вже активно обговорюються в медико-правовій літературі, і вимагають створення нових нормативних механізмів [16, 30, 31].

З соціального боку важливим викликом є довіра пацієнтів та лікарів. Дослідження свідчать, що частина лікарів неохоче приймає рішення, які вони не можуть самостійно інтерпретувати або перевірити. Більше того, пацієнти у деяких культурах вважають неприйнятним отримання діагнозу без безпосереднього спілкування з лікарем [18, 32]. Тому впровадження ШІ супроводжується не лише технічними, а й культурними бар'єрами, які слід враховувати в процесі адаптації систем до локального контексту.

Нарешті, обмеженням залишається також вартість впровадження. Незважаючи на те, що використання ШІ потенційно знижує витрати в довгостроковій перспективі, початкові інвестиції в камери, сервери, програмне забезпечення, навчання персоналу й регуляторне погодження можуть бути високими, особливо для сільських або малозабезпечених клінік [22].

ВИСНОВКИ

Діабетична ретинопатія залишається однією з провідних причин втрати зору у світі, що вимагає своєчасного виявлення та ефективного моніторингу. На цьому тлі штучний інтелект (ШІ) демонструє високий потенціал як інструмент автоматизованої діагностики, здатний суттєво трансформувати офтальмологічну практику. Завдяки алгоритмам глибокого навчання, зокрема згортковим нейронним мережам, стало можливим з високою точністю ідентифікувати патологічні зміни на зображеннях сітківки, що відкриває нові горизонти для масового скринінгу, особливо в умовах обмеженого доступу до офтальмологів.

Дослідження показують, що автономні системи, такі як IDx-DR чи EyeArt, можуть досягати рівня ефективності, співставного з кваліфікованими лікарями. Це підтверджує можливість використання ШІ не лише як допоміжного інструмента, а як повноцінного автономного діагностичного рішення. Однак впровадження таких систем вимагає не лише технічного забезпечення, а й врахування етичних, правових і соціальних аспектів. Проблеми, пов'язані з інтерпретованістю, якістю зображень, доменною адаптацією та правовою відповідальністю, мають бути вирішені на міждисциплінарному рівні.

Незважаючи на існуючі виклики, напрям застосування ШІ в офтальмології є надзвичайно перспективним. Подальші дослідження мають бути зосереджені на підвищенні універсальності моделей, розробці гібридних клінічних протоколів із включенням ШІ, адаптації алгоритмів до реальних клінічних умов та розробці механізмів етичної відповідальності. Інтеграція ШІ в телемедичні платформи, мобільні додатки та національні програми скринінгу може стати ключем до зменшення глобального тягаря діабетичної сліпоти.

Отже, штучний інтелект — це не просто технологічне нововведення, а стратегічний ресурс для модернізації систем охорони зору. За умов належної регуляції, клінічної валідації та суспільного прийняття, такі системи мають потенціал покращити якість діагностики, зробити її більш доступною та персоналізованою, а також зменшити тягар діабетичних ускладнень у глобальному масштабі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. World Health Organization. (2016). Global report on diabetes. *World Health Organization*.
2. Cheung, N., Mitchell, P., & Wong, T. Y. (2010). Diabetic retinopathy. *The Lancet*, 376(9735), 124-136.
3. Abràmoff, M. D., Lavin, P. T., Birch, M., Shah, N., & Folk, J. C. (2018). Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *NPJ Digital Medicine*, 1, Article 39.
4. American Diabetes Association. (2023). Standards of Medical Care in Diabetes. *Diabetes Care*, 46(Supplement_1), S1-S290.
5. Early Treatment Diabetic Retinopathy Study Research Group. (1991). Early photocoagulation for diabetic retinopathy. *Ophthalmology*, 98(5), 766-785.

6. Brown, D. M., Schmidt-Erfurth, U., Do, D. V., Holz, F. G., Boyer, D. S., Vitti, R., ... & Heier, J. S. (2015). Intravitreal aflibercept for diabetic macular edema: 100-week results from the VISTA and VIVID studies. *Ophthalmology*, 122(10), 2044–2052.
7. Gulshan, V., Peng, L., Coram, M., Stumpe, M. C., Wu, D., Narayanaswamy, A., ... & Webster, D. R. (2016). Development and Validation of a Deep Learning Algorithm for Detection of Diabetic Retinopathy in Retinal Fundus Photographs. *JAMA*, 316(22), 2402–2410.
8. Leuschen, J. N., Schuman, S. G., Winter, K. P., McCall, M. N., Melia, M., & Friedman, S. M. (2013). Spectral domain optical coherence tomography in diabetic macular edema: a review of the literature. *Retina*, 33(5), 1110–1118.
9. Silva, P. S., Cavallerano, J. D., Sun, J. K., & Aiello, L. M. (2011). Nonmydriatic ultrawide field retinal imaging compared with dilated standard 7-field 35-mm photography and retinal specialist examination for evaluation of diabetic retinopathy. *American Journal of Ophthalmology*, 152(3), 528–536.
10. Rajalakshmi, R., Subashini, R., Anjana, R. M., Mohan, V. (2018). Automated diabetic retinopathy detection in smartphone-based fundus photography using artificial intelligence. *Eye*, 32, 1138–1144.
11. Ting, D. S. W., Pasquale, L. R., Peng, L., Campbell, J. P., Lee, A. Y., Raman, R., ... & Wong, T. Y. (2020). Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *British Journal of Ophthalmology*, 104(2), 167–175.
12. Holzinger, A., Biemann, C., Pattichis, C. S., & Kell, D. B. (2017). What do we need to build explainable AI systems for the medical domain? *Review of the state of the art and current challenges. arXiv preprint*, arXiv:1712.09923.
13. [13] Maa, A. Y., Bailey, S. T., et al. (2020). Validation of Artificial Intelligence-based Screening for Diabetic Retinopathy. *JAMA Network Open*, 3(3), e200783.
14. [14] Li, Z., He, Y., Keel, S., Meng, W., Chang, R. T., & He, M. (2019). Efficacy of a deep learning system for detecting diabetic retinopathy in community-based primary care settings. *NPJ Digital Medicine*, 2, 33
15. Holzinger, A., Carrington, A., & Müller, H. (2020). Measuring the quality of explanations: The system causability scale (SCS). *KI - Künstliche Intelligenz*, 34, 193–198.
16. Price, W. N., & Cohen, I. G. (2019). Privacy in the age of medical big data. *Nature Medicine*, 25(1), 37–43.
17. De Fauw, J., Ledsam, J. R., Romera-Paredes, B., et al. (2018). Clinically applicable deep learning for diagnosis and referral in retinal disease. *Nature Medicine*, 24(9), 1342–1350.
18. Blease, C., Kaptchuk, T. J., Bernstein, M. H., et al. (2019). Artificial intelligence and the future of primary care: Exploratory qualitative study of UK general practitioners' views. *Journal of Medical Internet Research*, 21(3), e12802.
19. Cuadros, J., & Bresnick, G. (2009). EyePACS: an adaptable telemedicine system for diabetic retinopathy screening. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 3(3), 509–516.
20. Beede, E., Baylor, E., Hersch, F., et al. (2020). A Human-Centered Evaluation of a Deep Learning System Deployed in Clinics for the Detection of Diabetic Retinopathy. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12.
21. Saha, S. K., Fernando, B., Cuadros, J., & Kanagasingam, Y. (2019). Automated Quality Assessment of Fundus Images for Diabetic Retinopathy Screening: A Deep Learning Approach. *International Journal of Medical Informatics*, 124, 105–112.
22. Reddy, R. K., Dwarakanathan, S., Kanagasingam, Y., & Yogesan, K. (2022). Challenges in AI implementation in eye care services in low-income countries. *Global Health Action*, 15(1), 2022782.
23. van der Heijden, A. A., Abramoff, M. D., Verbraak, F. D., et al. (2018). Validation of Automated Screening for Referable Diabetic Retinopathy With the IDx-DR Device in the Hoorn Diabetes Care System. *Acta Ophthalmologica*, 96(1), 63–68.
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.
26. Highly linear Microelectronic Sensors Signal Converters Based on Push-Pull Amplifier Circuits / edited by Waldemar Wojcik and Sergii Pavlov, Monograph, (2022) NR 181, Lublin, Comitet Inzynierii Srodowiska PAN, 283 Pages. ISBN 978-83-63714-80-2
27. Pavlov Sergii, Avrunin Oleg, Hrushko Oleksandr, and etc. (2021). System of three-dimensional human face images formation for plastic and reconstructive medicine // Teaching and subjects on bio-medical engineering Approaches and experiences from the BIOART-project Peter Arras and David Luengo

- (Eds.), Corresponding authors, Peter Arras and David Luengo. Printed by Acco cv, Leuven (Belgium). - 22 P. ISBN: 978-94-641-4245-7.
28. Pavlov S.V., Avrunin O.G., etc. (2019). Intellectual technologies in medical diagnosis, treatment and rehabilitation: monograph / [S. In edited by S. Pavlov, O. Avrunin. - Vinnytsia: PP "TD "Edelweiss and K", 260 p. ISBN 978-617-7237-59-3.
29. Romanyuk, O., Zavalniuk, Y., Pavlov, S., etc. (2023). New surface reflectance model with the combination of two cubic functions usage, Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska, , 13(3), pp. 101–10
30. Kukharchuk, Vasyl V., Sergii V. Pavlov, Volodymyr S. Holodiuk, Valery E. Kryvonosov, Krzysztof Skorupski, Assel Mussabekova, and Gaini Karnakova. (2022). "Information Conversion in Measuring Channels with Optoelectronic Sensors" Sensors 22, no. 1: 271. <https://doi.org/10.3390/s22010271>.
31. Vasyl V. Kukharchuk, Sergii V. Pavlov, Samoil Sh. Katsyv, and etc. (2021). Transient analysis in 1st order electrical circuits in violation of commutation laws”, Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 97 NR 9/2021, p. 26-29, doi:10.15199/48.2021.09.05.
32. Pavlov S.V, Petruk V.G., Kolesnik P.F. (2007). Photoplethysmographic technologies of the cardiovascular control: monography, Vinnitsa: Universum-Vinnitsa, 254 p

Надійшла до редакції 17.04.25 р.

КОРНИЛЕНКО ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна, **e-mail: okornilenko@vntu.edu.ua**

КАРАСЬ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ – PhD, старший викладач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, **e-mail: karas2014.O.11@gmail.com**

OLEKSANDR KORNILENKO, OLEKSANDR KARAS

**APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR AUTOMATED INTERPRETATION
OF OPTICAL RETINAL IMAGES IN DIABETIC RETINOPATHY**

Vinnytsia National Technical University