

УДК 57.087.3

О. В. КАРАСЬ, С. В. ТИМЧИК, Ю. Й. САЛДАН,
КИМБАТ МОМИНЖАНОВА, Д. К. МОЙСЕЄВ

АНАЛІЗ ЗОБРАЖЕНЬ ОЧНОГО ДНА НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна, e-mail: Karas2014.o.11@gmail.com

Вінницький національний медичний університет ім. М.Пирогова, Вінниця, Україна

Казахський національний університет, факультет інформаційних технологій, Алмати, Республіка Казахстан

Анотація. В даній роботі розглянуто систему аналізу зображень очного дна на основі машинного навчання. Для покращення якості класифікації було використано значну попередню обробку зображень, а саме: адаптивна бінаризація, підвищення контрасту за допомогою методу CLAHE та морфологічні операції.

Ключові слова: нейромережа, попередня обробка зображень, згортоква нейронна мережа, діабетична ретинопатія.

Abstract. In this work, a system for analyzing images of the fundus based on machine learning was developed. Extensive image pre-processing including adaptive binarization, CLAHE contrast enhancement, and morphological operations were used to improve the classification quality.

Keywords: neural network, image preprocessing, convolutional neural network, diabetic retinopathy.

DOI: 10.31649/1681-7893-2024-47-1-140-147

ВСТУП

У сучасній офтальмології технологічні інновації відіграють ключову роль у вдосконаленні методів діагностики та лікування захворювань очей [1]. Одним із найважливіших аспектів офтальмологічного обстеження є аналіз зображень очного дна, який надає вичерпну інформацію про стан сітківки, зорового нерва та інших структур. Традиційні методи аналізу зображень часто залежать від досвіду і суб'єктивної оцінки лікаря, що може призводити до неточностей і помилок [2].

Розвиток машинного навчання (ML) відкриває нові перспективи в автоматизації та підвищенні точності аналізу зображень очного дна [3, 4]. Алгоритми машинного навчання можуть аналізувати великі обсяги даних, виявляти приховані закономірності та робити прогнози з високою точністю, що є надзвичайно важливим для раннього виявлення та моніторингу захворювань, таких як діабетична ретинопатія, глаукома та вікова макулодистрофія [5,6].

У цій статті розглядаються сучасні підходи до аналізу зображень очного дна на основі машинного навчання. Будуть обговорені основні методи та алгоритми, використовувані для обробки та інтерпретації зображень, а також їх переваги та недоліки. Особливу увагу буде приділено питанням якості даних, необхідних для навчання моделей, та етичним аспектам застосування штучного інтелекту в медицині.

Метою даної роботи є підвищення достовірності діагностування хвороб ока за допомогою використання відомих методів обробки зображень із подальшим аналізом їх на основі нейронних мереж.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗОБРАЖЕНЬ ОЧНОГО ДНА

Аналіз зображень очного дна є важливою складовою діагностики, яка дозволяє виявляти різноманітні захворювання на ранніх стадіях, що має визначальну важливість у подальшому лікуванні патологій [7]. Існує декілька основних методів дослідження зображень очного дна, що використовуються в медичній практиці.

Традиційні методи включають офтальмоскопію (рис. 1) та флуоресцентну ангіографію (Рис. 2), які потребують високої кваліфікації лікаря для правильної інтерпретації отриманих зображень. Офтальмоскопія дозволяє лікарю оглядати внутрішню поверхню ока, включаючи сітківку та зоровий нерв, тоді як флуоресцентна ангіографія використовується для дослідження кровоносних судин ока за допомогою введення флуоресцентного барвника.

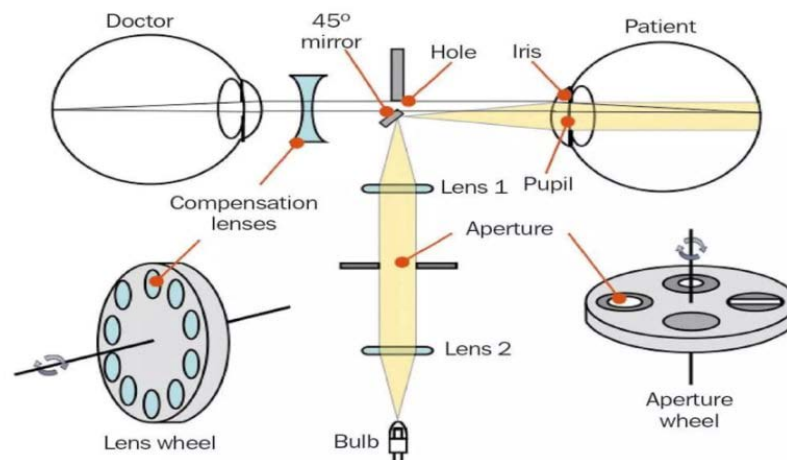


Рисунок 1 – Схема прямої офтальмоскопії

З розвитком технологій, автоматизовані системи на основі машинного навчання почали займати все важливіше місце в цій галузі. Одним з найпоширеніших підходів є використання методів глибокого навчання, зокрема згорткових нейронних мереж (Convolutional Neural Networks, CNN). Ці моделі здатні автоматично виділяти характерні ознаки зображень, що дозволяє значно підвищити точність діагностики. CNN використовують багатопшарову архітектуру, яка дозволяє моделі навчитися розпізнавати складні візуальні структури, що є критичним для аналізу медичних зображень.

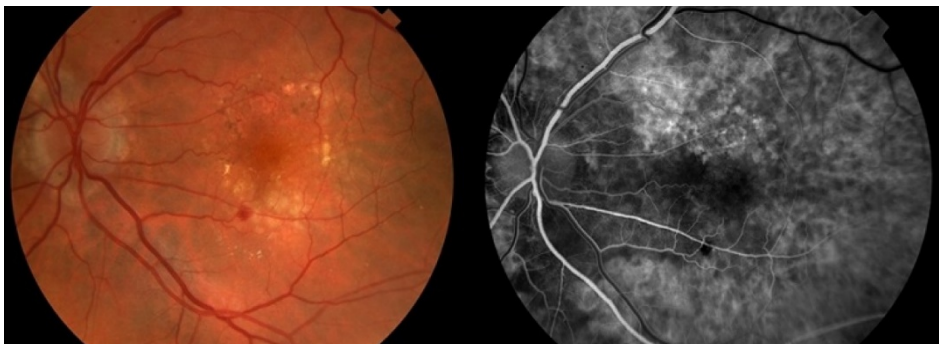


Рисунок 2 – Зображення сітківки ока при флуоресцентній ангіографії

Серед популярних систем можна виділити такі, як DeepDR та IDx-DR, які спеціалізуються на виявленні діабетичної ретинопатії. Ці системи демонструють високу ефективність у клінічних умовах та отримали схвалення регуляторних органів, таких як FDA (Food and Drug Administration) у Сполучених

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Штатах. DeepDR використовує багаторівневий підхід до аналізу зображень, включаючи передобробку даних, виділення ознак та класифікацію, що дозволяє досягти високої точності та чутливості при виявленні патологій. IDx-DR є першою автономною системою діагностики, яка отримала схвалення FDA, і може використовуватися без залучення лікаря для аналізу результатів.

Крім діабетичної ретинопатії, існують інші програмні продукти, які орієнтовані на діагностику глаукоми, макулодистрофії та інших захворювань. Наприклад, системи на базі глибокого навчання використовуються для автоматичного вимірювання товщини шару нервових волокон сітківки, що є важливим показником для діагностики глаукоми. Такі системи, як Retinalyze та VoxelCloud, розроблені для аналізу різних аспектів очного дна та надання рекомендацій лікарям щодо подальших кроків у лікуванні пацієнтів.

Значну увагу також приділяють питанням підготовки даних для навчання моделей. Використання великих анотованих баз даних з високоякісними зображеннями є критичним для досягнення високої точності та надійності автоматизованих систем. Збір та анотація таких даних вимагають тісної співпраці між лікарями та інженерами, що дозволяє створювати більш досконалі алгоритми. Крім того, розробка та впровадження стандартів для зберігання та обміну медичними зображеннями також сприяє покращенню якості даних.

Системи, що використовують машинне навчання, дозволяють не лише прискорити процес діагностики, але й забезпечити більш об'єктивну оцінку стану очного дна, що є надзвичайно важливим для своєчасного виявлення патологій. Це, у свою чергу, сприяє покращенню результатів лікування та зниженню ризику виникнення серйозних ускладнень. Ефективне використання таких систем також допомагає зменшити навантаження на медичних працівників, дозволяючи їм зосередитися на більш складних випадках та прийнятті клінічних рішень.

СИСТЕМА АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕНЬ ОЧНОГО ДНА

Для дослідження роботи даної системи було обрано загальноступні бази даних зображень очного дна [8], які є відповідним чином зібрані та промарковані згідно із патологіями (Рис. 3).

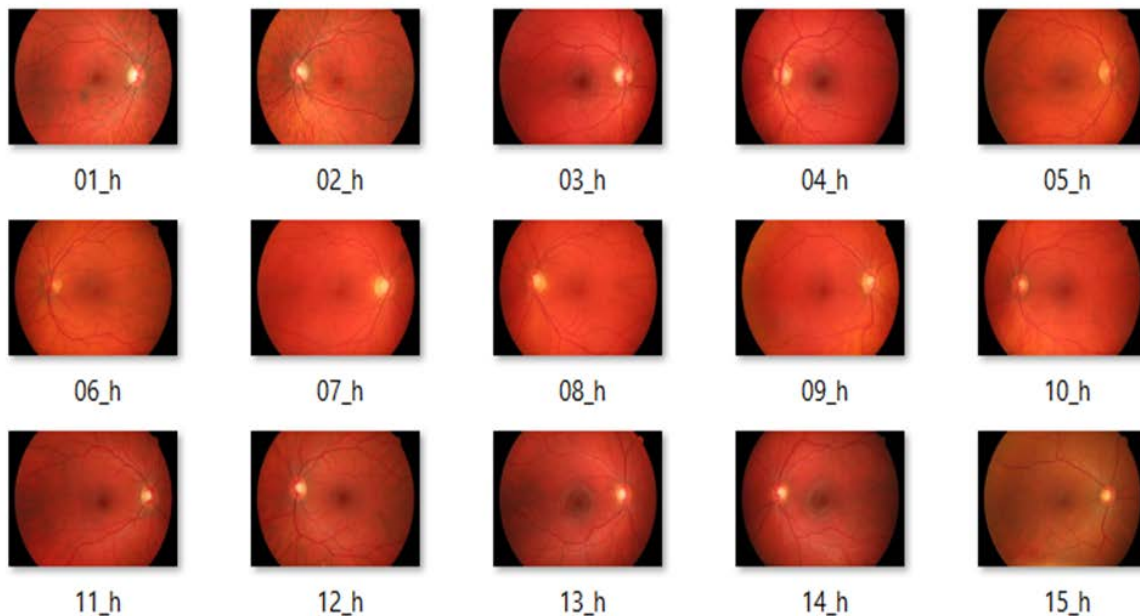
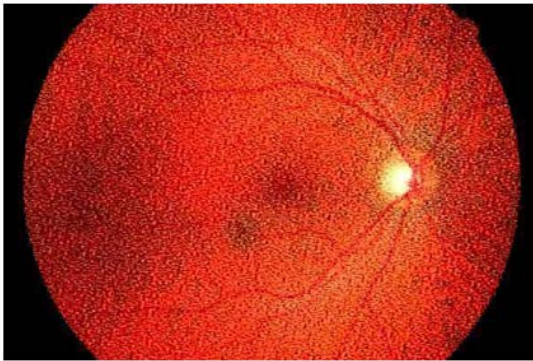


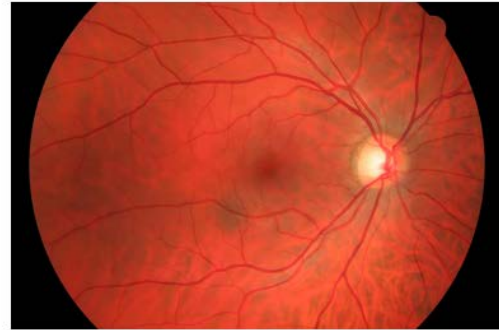
Рисунок 3 – Демонстрація підібраних зображень очного дна

Для покращення якості досліджуваних даних було проведено наступну попередню обробку зображень, деякі з них наведені на рисунку 4:

- Нормалізація даних;
- Зменшення шуму на основі гауссової та медіанної фільтрації;
- Виділення контурів;
- Сешментація.



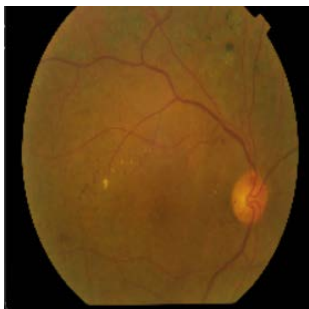
Original image



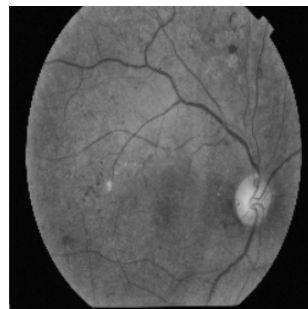
After noise reduction

Рисунок 4 – Зменшення шуму на досліджуваному зображенні очного дна

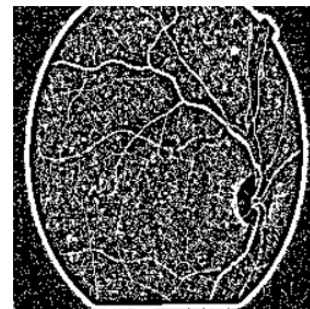
Щоб покращити виділення контурів кровоносних судин на зображенні очного дна, можна використати додаткові методи попередньої обробки зображення, такі як адаптивна бінаризація, підвищення контрасту за допомогою методу CLAHE та морфологічні операції (рис. 5).



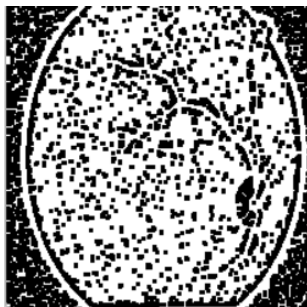
а)



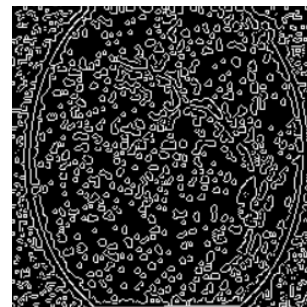
б)



в)



г)



д)

Рисунок 5 – Зображення очного дна: а – початкове зображення, б - зображення після підвищення контрасту; в - зображення після адаптивної бінаризації; г - зображення після застосування морфологічних операцій; д - виділені контури на зображенні

Попередня обробка зображень значно покращує результати класифікації, оскільки зменшує шум, підвищує контраст та виділяє важливі особливості. Перетворення зображення у відтінки сірого зменшує обсяг даних і прискорює обробку. Метод CLAHE підвищує контраст, роблячи деталі, як-от кровоносні судини, більш помітними. Адаптивна бінаризація і морфологічні операції допомагають сегментувати зображення та видаляти шум, покращуючи якість виділених контурів. Використання оператора Canny дозволяє точно виділити контури, що покращує розпізнавання структур і підвищує точність класифікації. Загалом, ці методи попередньої обробки забезпечують більш стабільні і точні результати аналізу.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Наступним етапом у задачі класифікації є навчання нейронної мережі та підбір необхідних та достатніх параметрів, що дають змогу досягти визначеної точності. Навчання нейронної мережі — це процес, який використовується для створення моделі, яка може виконувати певну функцію на основі вхідних даних. Нейронна мережа складається з великої кількості штучних нейронів, які взаємопов'язані та можуть навчатися з даних. На рисунку 6 представлена схема згорткової нейронної мережі, яка була вибрана вирішальним правилом для даного дослідження [9].

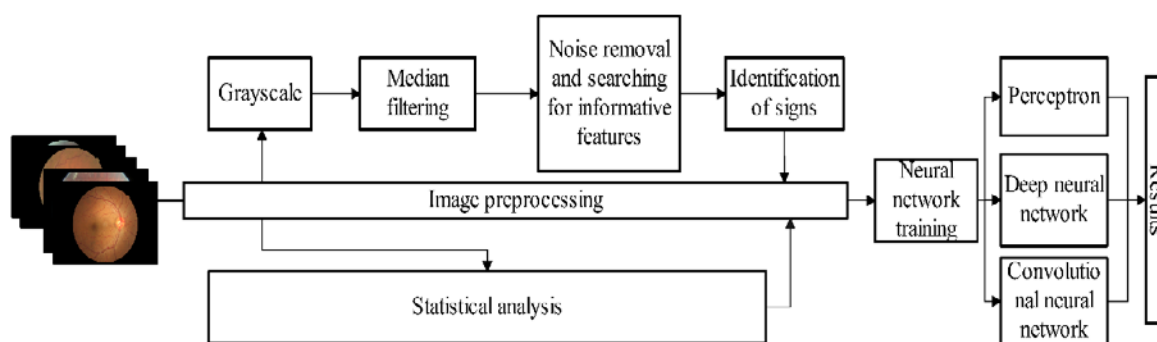


Рисунок 6 – Схема згорткової нейронної мережі

Наступним етапом є аналіз отриманих результатів для вибору найкращого правила системи підтримки прийняття рішень.

Для оцінки достовірності класифікації розглянутого методу аналізу зображень скористаємось класичними характеристиками інформативності діагностичних медичних систем [21]: Accuracy, Precision, Recall та Specificity (1)–(4):

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} 100\%, \quad (1)$$

$$PRE = \frac{TP}{TP + FP} 100\%, \quad (2)$$

$$REC = \frac{TP}{TN + FN} 100\%, \quad (3)$$

$$SP = \frac{TN}{TN + FN} 100\%, \quad (4)$$

- де Acc – точність;
- PRE – чутливість;
- REC – відкликання;
- SP – специфічність;
- TP – правильні позитивні результати;
- TN – виправити негативні результати
- FP – хибнопозитивні результати;
- FN – хибно негативні результати.

Таблиця 1

Оцінка якості класифікації

Тип нейронної мережі	Accuracy		Precision		Recall		Specificity	
	Training dataset	Testing dataset	Training dataset	Testing dataset	Training dataset	Testing dataset	Training dataset	Testing dataset
Згорткова нейронна мережа	85.3	83.1	86	84.3	87.9	86	84.2	82.2

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Ґрунтуючись на наданій таблиці 1, яка оцінює якість класифікації моделі як для навчальних, так і для тестових наборів даних, ми можемо зробити наступні висновки: згортовка нейронна мережа показує високу якість класифікації, що свідчить про хорошу продуктивність у правильному визначенні негативних екземплярів.

Підсумовуючи, слід зазначити, що застосування сучасних діагностичних підходів, зокрема моделей нейронних мереж, представляє трансформаційну можливість у клінічній практиці. Інтеграція таких передових технологій має потенціал для підвищення точності діагностики, оптимізації робочих процесів і, зрештою, покращення результатів лікування пацієнтів, відкриваючи нову еру точної медицини.

ВИСНОВКИ

Варто зазначити, що підвищення якості класифікації методу ранньої діагностики пов'язане з ретельним підходом до завдання попередньої обробки вхідних зображень, що дозволяє сформувати більш якісну базу даних для подальшої роботи з нею.

Результати, отримані в цьому дослідженні, базуються на ретельному підході до попередньої обробки досліджуваних зображень. Результати цього дослідження мають багатообіцяючі наслідки в реальному застосуванні, зокрема в інтеграції розроблених моделей нейронної мережі в клінічну практику. Здатність глибокої нейронної мережі досягати високої точності, чутливості та специфічності підкреслює її потенційну корисність у різних діагностичних програмах.

Дослідження виконано за підтримки гранту Національного фонду досліджень України 2022.01/0135.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Abramoff, 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(1), 1-8.
2. 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.
3. Ting, D. S. W., Cheung, C. Y. L., Lim, G., Tan, G. S. W., Quang, N. D., Gan, A., ... & Wong, T. Y. (2017). Development and validation of a deep learning system for diabetic retinopathy and related eye diseases using retinal images from multiethnic populations with diabetes. *JAMA*, 318(22), 2211-2223.
4. Gargeya, R., & Leng, T. (2017). Automated identification of diabetic retinopathy using deep learning. *Ophthalmology*, 124(7), 962-969.
5. Bellemo, V., Lim, G., Rim, T. H., Tan, G. S. W., Cheung, C. Y., Sadda, S. R., & Ting, D. S. W. (2019). Artificial intelligence screening for diabetic retinopathy: the real-world emerging application. *Current Diabetes Reports*, 19(9), 1-7.
6. Yan, Q., Peng, Y., Shen, Y., Zhao, L., Cheng, Y., Zheng, F., ... & Wu, X. (2020). The global prevalence of diabetic retinopathy and its risk factors: a meta-analysis. *Journal of Diabetes Research*, 2020.
7. Wong, T. Y., Sun, J., Kawasaki, R., Ruamviboonsuk, P., Gupta, N., Lansingh, V. C., ... & Lamoureux, E. L. (2018). Guidelines on diabetic eye care: The International Council of Ophthalmology recommendations for screening, follow-up, referral, and treatment based on resource settings. *Ophthalmology*, 125(10), 1608-1622.
8. Diabetic Retinopathy Detection | Kaggle. <https://www.kaggle.com/c/diabetic-retinopathy-detection/data>.
9. Mamyrbayev, O., Pavlov, S., Karas, O., Saldan, Y., Momynzhanova, K., & Zhumagulova, S. (2024). Increasing the reliability of diagnosis of diabetic retinopathy based on machine learning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(9 (128), 17-26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297849>.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

10. Pavlov S.V., Martianova T.A., Saldan Y.R., and etc., “Methods and computer tools for identifying diabetes-induced fundus pathology”, Information Technology in Medical Diagnostics II. CRC Press, Balkema book, Taylor & Francis Group, London, UK, 87-99, 2019.
11. SaldanYosyp, Sergii Pavlov, Vovkotrub Dina, Waldemar Wójcik, and etc., “Efficiency of optical-electronic systems: methods application for the analysis of structural changes in the process of eye grounds diagnosis,” Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 104450S (2017).
12. Lytvynenko, V., Lurie, I., Voronenko, M., etc., “The use of Bayesian methods in the task of localizing the narcotic substances distribution,” *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*, 2, 8929835, 60–63 (2019).
13. Friedman, Jerome, Trevor Hastie, and Robert Tibshirani., “The elements of statistical learning,” hastie.su.domains/ElemStatLearn (2009).
14. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). Information Technology in Medical Diagnostics II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>, eBook ISBN 9780429057618.
15. Perspectives of the application of medical information technologies for assessing the risk of anatomical lesion of the coronary arteries / Pavlov S. V., Mezhiievska I. A., Wójcik W. [et al.]. *Science, Technologies, Innovations*. 2023. №1(25), 44-55 p.
16. Wójcik, W.; Mezhiievska, I.; Pavlov, S.V.; etc. Medical Fuzzy-Expert System for Assessment of the Degree of Anatomical Lesion of Coronary Arteries. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023.

REFERENCES

1. 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(1), 1-8.
2. 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.
3. Ting, D. S. W., Cheung, C. Y. L., Lim, G., Tan, G. S. W., Quang, N. D., Gan, A., ... & Wong, T. Y. (2017). Development and validation of a deep learning system for diabetic retinopathy and related eye diseases using retinal images from multiethnic populations with diabetes. *JAMA*, 318(22), 2211-2223.
4. Gargeya, R., & Leng, T. (2017). Automated identification of diabetic retinopathy using deep learning. *Ophthalmology*, 124(7), 962-969.
5. Bellemo, V., Lim, G., Rim, T. H., Tan, G. S. W., Cheung, C. Y., Sadda, S. R., ... & Ting, D. S. W. (2019). Artificial intelligence screening for diabetic retinopathy: the real-world emerging application. *Current Diabetes Reports*, 19(9), 1-7.
6. Yan, Q., Peng, Y., Shen, Y., Zhao, L., Cheng, Y., Zheng, F., ... & Wu, X. (2020). The global prevalence of diabetic retinopathy and its risk factors: a meta-analysis. *Journal of Diabetes Research*, 2020.
7. Wong, T. Y., Sun, J., Kawasaki, R., Ruamviboonsuk, P., Gupta, N., Lansingh, V. C., & Lamoureux, E. L. (2018). Guidelines on diabetic eye care: The International Council of Ophthalmology recommendations for screening, follow-up, referral, and treatment based on resource settings. *Ophthalmology*, 125(10), 1608-1622.
8. Diabetic Retinopathy Detection | Kaggle. <https://www.kaggle.com/c/diabetic-retinopathy-detection/data>.
9. Mamyrbayev, O., Pavlov, S., Karas, O., Saldan, Y., Momynzhanova, K., & Zhumagulova, S. (2024). Increasing the reliability of diagnosis of diabetic retinopathy based on machine learning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(9 (128), 17–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297849>.
10. Pavlov S.V., Martianova T.A., Saldan Y.R., and etc., “Methods and computer tools for identifying diabetes-induced fundus pathology”, Information Technology in Medical Diagnostics II. CRC Press, Balkema book, Taylor & Francis Group, London, UK, 87-99, 2019.
11. SaldanYosyp, Sergii Pavlov, Vovkotrub Dina, Waldemar Wójcik, and etc., “Efficiency of optical-electronic systems: methods application for the analysis of structural changes in the process of eye grounds diagnosis,” Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 104450S (2017).

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

12. Lytvynenko, V., Lurie, I., Voronenko, M., etc., “The use of Bayesian methods in the task of localizing the narcotic substances distribution,” *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*, 2, 8929835, 60–63 (2019).
13. Friedman, Jerome, Trevor Hastie, and Robert Tibshirani., “The elements of statistical learning,” hastie.su.domains/ElemStatLearn (2009).
14. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). *Information Technology in Medical Diagnostics II*. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>. eBook ISBN 9780429057618.
15. Perspectives of the application of medical information technologies for assessing the risk of anatomical lesion of the coronary arteries / Pavlov S. V., Mezhiievska I. A., Wójcik W. [et al.]. *Science, Technologies, Innovations*. 2023. №1(25), 44-55 p.
16. Wójcik, W.; Mezhiievska, I.; Pavlov, S.V.; etc. Medical Fuzzy-Expert System for Assessment of the Degree of Anatomical Lesion of Coronary Arteries. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023.

Надійшла до редакції 15.02.2024 р.

КАРАСЬ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ – PhD, старший викладач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [e-mail: karas2014.O.II@gmail.com](mailto:karas2014.O.II@gmail.com)

ТИМЧИК СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ – к.т.н., доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [e-mail: tymchyk@vntu.edu.ua](mailto:tymchyk@vntu.edu.ua)

САЛДАН ЮЛІЯ ЙОСИПІВНА – к.м.н., доцент кафедри очних хвороб вінницького національного медичного університету ім. М.Пирогова, [e-mail: saldanyulia@gmail.com](mailto:saldanyulia@gmail.com)

МОМИНЖАНОВА КИМБАТ, аспірант, Казахський національний університет, факультет інформаційних технологій, алмати, Республіка Казахстан, [e-mail: kymbat_momynzhanova87@mail.ru](mailto:kymbat_momynzhanova87@mail.ru)

МОЙСЕЄВ ДМИТРІЙ КОСТЯНТИНОВИЧ – студент групи БМІ-206, факультету інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна [e-mail: dmytro.moisseev@gmail.com](mailto:dmytro.moisseev@gmail.com)

O.V. KARAS, S.V. TYMCHYK, YU.YO. SALDAN, KYMBAT MOMYNZHANOVA, D.K. MOISEEV

ANALYSIS OF FUNDUS IMAGES BASED ON MACHINE LEARNING

Vinnitsa National Technical University
Vinnitsa Pirogov National Medical University
Kazakh National University, Faculty of Information Technology, Almaty, Kazakhstan