

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВОЛОСОВИЧ ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ

УДК 615.47: 616–072.7

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДИ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНА БІОТЕХНІЧНА СИСТЕМА
ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ УРАЖЕННЯ
КОРОНАРНИХ АРТЕРІЙ

163 – Біомедична інженерія

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О.С. Волосович

Науковий керівник:

доктор технічних наук,

професор Павлов Сергій Володимирович

Вінниця – 2026

АНОТАЦІЯ

Волосович О.С. Методи та інтелектуалізована біотехнічна система для оцінювання ризику ураження коронарних артерій». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 16 «Хімічна інженерія та біоінженерія» за спеціальністю 163 «Біомедична інженерія». – Вінницький національний технічний університет, МОН України, Вінниця, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню науково-прикладної задачі, яка полягає у необхідності вдосконалення методів та підвищення інформативності, достовірності оцінювання ризику ураження коронарних артерій шляхом використання методів нечітких множин та створення інтелектуалізованої біотехнічної системи стратифікації та прогнозування перебігу захворювання, що надає можливість проводити профілактику та запобігати дестабілізації перебігу захворювання та розвитку різних ускладнень хвороби з NSTEMI.

У даній роботі було вирішено такі задачі:

1. Проведено аналіз відомих сучасних оптико-електронних систем, методів і засобів аналізу та оброблення біомедичних зображень коронарних судин.
2. Здійснено критеріальне оцінювання якості та швидкодії просторових і частотних методів оброблення ангіографічних зображень коронарних судин.
3. Вдосконалено метод оброблення ангіографічних зображень коронарних судин.
4. Розроблено метод автоматичної сегментації динамічних ангіографічних зображень коронарних судин.

5. Кількісно оцінено інформаційні ознаки в контексті створення баз знань при оцінювання ризику ураження коронарних судин.
6. Розроблено і проведено апробацію системи для аналізу структурних змін при оцінювання ризику ураження коронарних судин з блоком нечіткого оброблення для діагностики.
7. Розроблено архітектуру інтелектуалізованої біотехнічної системи для оцінювання ризику ураження коронарних судин.

Об'єкт дослідження - процес дослідження методів та дослідження показників перебігу серцевих захворювань при ураженні коронарних артерій за допомогою інтелектуалізованої біотехнічної системи для оцінювання ризику ураження коронарних артерій.

Предмет дослідження - методи, характеристики показників перебігу серцевих захворювань, інтелектуалізована біотехнічна система для оцінювання ризику ураження коронарних артерій.

Методи дослідження базуються на основних положеннях системного аналізу та теорії біомедичних засобів, математичного моделювання для аналізу та обробки біомедичної інформації, математичної статистики та комп'ютерної обробки біомедичної інформації, теорії алгоритмів та оптико-електронних систем реєстрації біомедичної інформації

На основі теоретичних досліджень реалізовано інтелектуалізовану біотехнічну систему стратифікації та прогнозування перебігу захворювання, що надає можливість проводити профілактику та запобігати дестабілізації перебігу захворювання та розвитку різних ускладнень хвороби з NSTEMI, підвищення інформативності, достовірності оцінювання ризику ураження коронарних артерій шляхом використання

методів нечітких множин та створення створення інтелектуалізованої біотехнічної системи.

Основні наукові результати

1. Вперше одержано математичні моделі для оцінювання біомедичних зображень з використанням методів нечітких множин на основі експертних баз знань, що дозволило проводити комплексне оцінювання ризику ураження коронарних артерій, що підвищило достовірність оцінювання ризику ураження коронарних артерій до 97,7 %.
2. Вперше запропоновано комплексний підхід до сегментації коронарних судин на ангіографічних зображеннях, який базується на комбінованому використанні оператора Собеля, локальних статистичних характеристик та адаптивної медіанної фільтрації, що дозволило підвищити точність виділення меж судинних структур в умовах наявності шумів та низького контрасту ангіографічних зображень.
3. Удосконалено метод попередньої обробки ангіографічних зображень коронарних артерій за рахунок адаптивного коригування яскравості на основі локальних статистичних параметрів, що забезпечує зменшення впливу шумів при одночасному збереженні контурів судинного русла та підвищує інформативність медичних зображень для подальшої сегментації.
4. Отримав подальший розвиток метод оцінювання якості сегментації коронарних судин шляхом введення комплексного критерію ефективності, який інтегрує індекс структурної подібності SSIM, критерій Пратта FOM та відносну похибку визначення геометричних параметрів, що дозволяє здійснювати об'єктивне порівняння алгоритмів сегментації ангіографічних зображень.

5. Вперше запропоновано архітектуру інтелектуалізованої біотехнічної системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій, яка поєднує модулі попередньої обробки, сегментації судинного дерева, нейромережевого аналізу та підтримки прийняття клінічних рішень, що забезпечує автоматизоване визначення ступеня стенозу та підвищення достовірності оцінювання ризику ішемічної хвороби серця.

В практичному плані запропоновані нові технічні рішення реалізації інтелектуалізованої біотехнічної системи стратифікації та прогнозування перебігу захворювання, що надає можливість проводити профілактику та запобігати дестабілізації перебігу захворювання та розвитку різних ускладнень хвороби з NSTEMI для підвищення інформативності, достовірності оцінювання ризику ураження коронарних артерій шляхом використання методів нечітких множин.

1. Розроблений алгоритм процесу оброблення біомедичного зображення, який базується на обчисленні автокореляційної функції, що дозволяє визначати локально-різницевий поріг знаходження середнього модуля вибіркових середніх значень ознак біомедичних зображень.
2. Показано можливість використання інтелектуалізованої біотехнічної системи для вирішення задач медичної діагностики при оцінюванні ступеня анатомічного ураження коронарного русла у пацієнтів з різними формами ІХС.
3. Розроблені рекомендації щодо використання інтелектуалізованої біотехнічної системи для оброблення біомедичних зображень при оцінюванні ступеня анатомічного ураження коронарного русла.

Це має особливу цінність і мотивацію для подальшого розвитку медичних інформаційних систем і технологій, оскільки запропоновані

методи, моделі і технології, зменшуючи суб'єктивність дослідника, сприяють створенню нового класу медичних інформаційних технологій для дослідження стану коронарних судин.

Розроблено практичні рекомендації щодо використання результатів проведених досліджень: в навчальному процесі – створення на базі кафедри БМІОЕС ВНТУ інноваційного навчально-наукової лабораторії біомедичної оптики та фотоніки – в рамках підготовки фахівців за спеціальністю G22 – біомедична інженерія.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено в навчальні процеси підготовки студентів ВНТУ, які навчаються за спеціальністю G 22 – біомедична інженерія та в медичну діяльність Військово-медичного клінічного центру центрального регіону, м. Вінниця, що підтверджується відповідними актами та меморандумом та меморандумом про впровадження результатів роботи.

Ключові слова: біотехнічна система, медичні інформаційні системи, коронарні артерії, нечіткі множини, обробка біомедичних зображень, підтримка прийняття рішень, ІХС.

ABSTRACT

Volosovych Oleksandr. Methods and an Intelligent Biotechnical System for Assessing the Risk of Coronary Artery Disease. - Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 16 “Chemical Engineering and Bioengineering” in the specialty 163 “Biomedical Engineering. – Vinnytsia National Technical University, MES of Ukraine, Vinnytsia, 2026.

The dissertation is devoted to solving a scientific and applied problem, which consists in the need to improve methods and increase the informativeness, reliability of assessing the risk of coronary artery damage by using fuzzy set methods and creating an intellectualized biotechnical system for stratification and forecasting the course of the disease, which provides an opportunity to carry out prophylaxis and prevent destabilization of the course of the disease and the development of various complications of the disease with NSTEMI.

In this work, the following tasks were solved:

1. An analysis of known modern optoelectronic systems, methods and means of analyzing and processing biomedical images of coronary vessels was carried out.
2. A criterion-based assessment of the quality and speed of spatial and frequency methods for processing angiographic images of coronary vessels was carried out.
3. The method for processing angiographic images of coronary vessels was improved.
4. A method for automatic segmentation of dynamic angiographic images of coronary vessels was developed.
5. Transformation functions were developed for assessing the risk of coronary vessel damage in the context of creating a system.
6. Information features were quantitatively assessed in the context of creating knowledge bases for assessing the risk of coronary vessel damage.
7. A system for analyzing structural changes in assessing the risk of coronary vessel damage with a fuzzy processing unit for diagnostics was developed and tested.
8. The architecture of an intellectualized biotechnical system for assessing the risk of coronary vessel damage was developed.

The object of the study is the process of researching methods and researching indicators of the course of heart disease in coronary artery disease

using an intelligent biotechnical system for assessing the risk of coronary artery disease.

The subject of the study is methods, characteristics of indicators of the course of heart disease, an intelligent biotechnical system for assessing the risk of coronary artery disease.

The research methods are based on the basic principles of systems analysis and the theory of biomedical devices, mathematical modeling for the analysis and processing of biomedical information, mathematical statistics and computer processing of biomedical information, the theory of algorithms and optoelectronic systems for recording biomedical information.

On the basis of theoretical research, an intellectualized biotechnical system for stratification and prediction of the course of the disease has been implemented, which provides the opportunity to carry out prophylaxis and prevent destabilization of the course of the disease and the development of various complications of the disease with NSTEMI, increase the informativeness, reliability of assessing the risk of coronary artery damage by using fuzzy set methods and create an intellectualized biotechnical system.

Main scientific results

1. For the first time, mathematical models for evaluating biomedical images using fuzzy set methods based on expert knowledge bases were obtained, which allowed for a comprehensive assessment of the risk of coronary artery damage, which increased the reliability of assessing the risk of coronary artery damage to 97.7%.

2. For the first time, a comprehensive approach to segmentation of coronary vessels on angiographic images is proposed, which is based on the combined use of the Sobel operator, local statistical characteristics and adaptive median filtering, which allowed for increasing the accuracy of separating

intervascular structures in conditions of noise and low contrast of the angiographic image.

3. The method of preprocessing angiographic images of coronary arteries was improved by adaptive brightness adjustment based on local statistical parameters, which ensures a reduction in the influence of noise while simultaneously preserving the contours of the vascular bed and obtaining the informativeness of medical images for further segmentation.

4. The method for assessing the quality of coronary vessel segmentation was further developed by introducing a complex performance criterion that integrates the structural similarity index SSIM, the Pratt criterion FOM and the relative error of determining geometric parameters, which allows for an objective comparison of angiographic image segmentation algorithms.

5. For the first time, we propose the structure of an intelligent biotechnical system for assessing the risk of coronary artery damage, which consists of modules for preprocessing, vascular tree segmentation, neural network analysis and clinical decision support, which provide automated determination of the degree of stenosis and increase the reliability of coronary heart disease risk assessment.

In practical terms, new technical solutions for the implementation of an intelligent biotechnical system for stratification and prediction of the course of the disease are proposed, which provides the opportunity to carry out prophylaxis and prevent destabilization of the course of the disease and the development of various complications of the disease with NSTEMI to increase the informativeness, reliability of assessing the risk of coronary artery damage by using fuzzy set methods.

1. An algorithm for the biomedical image processing process has been developed, which is based on the calculation of the autocorrelation function, which allows determining the local-difference threshold for finding the average modulus of the sample average values of the features of biomedical images.

2. The possibility of using an intelligent biotechnical system to solve medical diagnostics problems when assessing the degree of anatomical damage to the coronary bed in patients with various forms of coronary artery disease has been shown.

3. Recommendations have been developed for the use of an intelligent biotechnical system for processing biomedical images when assessing the degree of anatomical damage to the coronary bed.

This is of particular value and motivation for the further development of medical information systems and technologies, since the proposed methods, models and technologies, reducing the subjectivity of the researcher, contribute to the creation of a new class of medical information technologies for studying the state of coronary vessels.

Practical recommendations have been developed for using the results of the research: in the educational process - creation of an innovative educational and scientific laboratory of biomedical optics and photonics on the basis of the Department of BMIOES of VNTU - within the framework of training specialists in the specialty G22 - biomedical engineering.

The results of the dissertation research have been implemented in the educational processes of training VNTU students studying in the specialty G 22 - biomedical engineering and in the medical activities of the Military Medical Clinical Center of the Central Region, Vinnytsia and the KNP "Vinnytsia City Clinical Hospital of Emergency Care", which is confirmed by the relevant acts of implementation.

Keywords: biotechnical system, medical information systems, coronary arteries, fuzzy sets, biomedical image processing, decision support, coronary artery disease.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Публікації в журналах, що входять до наукометричної бази Scopus

1. Oksana Korenivska, Vasyl Benedytskyi, Tetiana Nikitchuk, **Oleksandr Volosovych**, Ainur Kozbakova, and Waldemar Wójcik "Application of optical methods for measuring physiological parameters in the construction of telemedicine systems for the diagnosis of infants and children", Proc. SPIE 13400, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024, 134000I (16 December 2024);. <https://doi.org/10.1117/12.3058675>. (Scopus Q4).
2. Oleksandr Poplavskyi, Iryna Mezhiievskaya, Waldemar Wójcik, Timur Kartbayev, Sergii Pavlov, Valentyn Maslovskyi, Oksana Olenich, **Oleksandr Volosovych**, and Sholpan Zhumagulova "Hybrid deep neural networks for automated detection of coronary pathologies in angiographic video sequences", Proc. SPIE 14009, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2025, 140091E (30 December 2025); <https://doi.org/10.1117/12.3099150>. (Scopus Q4).
3. Waldemar Wójcik, Iryna Mezhiievskaya, Sergii V Pavlov, Tomasz Lewandowski, Oleh V Vlasenko, Valentyn Maslovskyi, Oleksandr Volosovych, Iryna Kobylanska, Olha Moskovchuk, Vasyl Ovcharuk, Anna Lewandowska Medical Fuzzy-Expert System for Assessment of the Degree of Anatomical Lesion of Coronary Arteries. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2023**, 20(2), 979; <https://doi.org/10.3390/ijerph20020979>. (Scopus Q1).

**Статті у журналах, що включені до переліку наукових фахових
видань України**

4. С. Пашковський, Ю. Пилипець, С. Павлов, Я. Ярославський, і **О. Волосович**, «Інтелектуальні системи обробки ехокардіографічних зображень для оцінки функціонального стану серця», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 49, вип. 1, с. 193–199, Чер 2025. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-49-1-193-199>.
5. Д. Милосердов, О. Колесницький, **О. Волосович**, Ш. Жумагулова, і О. Короленко, «Класифікація електрокардіограм як динамічного процесу на основі спайкінгової нейронної мережі», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 48, вип. 2, с. 68–77, Лис 2024. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-48-2-68-77>.
6. І. А.Межієвська, С.В. Павлов, Г.Б. Кашаганова, В. Ю. Масловський, Д. Х. Штофель, і **О.С. Волосович**, «Застосування інформаційної технології BLAST для пошуку мікроорганізмів, потенційних продуцентів біогенних магнітних наночасток, які призводять до серцевих захворювань», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 46, вип. 2, с. 117–123, Груд 2023. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2023-46-2-117-123>.
7. Ю. Пилипець, Я. Ярославський, і О. Волосович, «Особливості використання EXPLAINABLE AI у біомедичній обробці зображень: прозорість та інтерпретованість моделей», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 50, вип. 2, с. 210–214, Січ 2026. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-50-2-210-214>.

**Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях,
що не включені до переліку наукових фахових видань України**

8. С.В. Павлов, І.А. Межієвська, В. Вуйцік, О.В. Власенко, О.Г. Аврунін, В.Ю. Масловський, О.С. Волосович. Перспективність

- застосування медичних інформаційних технологій для оцінювання ризику анатомічного ураження коронарних артерій, Наука, технології, інновації. – № 1 (25), 2023. – С. 44-55. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/22603>.
9. Волосович, О.С. (2025). Особливості викладання дисципліни «Медична інформатика» здобувачам вищої медичної освіти: міжнародний досвід. *Вісник науки та освіти*, 11(41). [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-11\(41\)-1606-1616](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-11(41)-1606-1616).
 10. Волосович, О.С., Шеремета Р.О. (2025). Можливості застосування нейромереж для потреб патоморфології. Перспективи та інновації науки, 12(57). [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-12\(58\)-1979-1988](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-12(58)-1979-1988)
 11. С.В.Павлов, І.А. Межієвська, В.Войцік, О.В.Власенко, В.Ю. Масловський, О.С.Волосович, «Моделювання оцінювання ризику анатомічного ураження коронарних артерій на основі нечітких множин»
НТКП ВНТУ. Факультет інформаційних електронних систем (2023). <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/41226>.
 12. Mezhiievska Iryna, Pavlov Sergii, Kashaganova Gulzhan, MaslovskyI Valentyn, Shtofel Dmytro, Volosovych Oleksandr. Prospects for the use of blast information technology for the search of microorganisms which cause heart diseases, III науково-практична конференція з міжнародною участю «Медико-технічна співпраця заради перемоги: актуальні завдання медичної, біологічної фізики та інформатики» 5-6 квітня 2024 року м. Вінниця, С.24-28. <https://www.google.com/search?client=opera&q>

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	19
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНИХ БІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ УРАЖЕННЯ КОРОНАРНИХ АРТЕРІЙ...	28
1.1 Актуальність проблеми оцінювання ризику ураження коронарних артерій.....	28
1.2 Сучасні методи діагностики та оцінювання стану коронарних артерій.....	32
1.2.1 Коронарна ангіографія.....	34
1.2.2 Внутрішньосудинне ультразвукове дослідження.....	36
1.2.3 Оптична когерентна томографія.....	38
1.2.4 Порівняльний аналіз сучасних методів внутрішньосудинної візуалізації.....	40
1.3 Аналіз сучасних методів оброблення біомедичних зображень....	42
1.3.1 Просторові методи фільтрації.....	43
1.3.2 Частотні методи оброблення зображень.....	45
1.3.3 Методи сегментації судинних структур.....	46
1.3.4 Інтелектуалізовані методи та нейромережеві технології для аналізу стану коронарних артерій.....	47
1.3.5 Explainable AI у медичній візуалізації стану коронарних артерій.....	48
1.4 Аналіз інтелектуалізованих біотехнічних систем в кардіології...	49
1.4.1 Основні принципи побудови інтелектуалізованих біотехнічних систем.....	50
1.4.2 Основні функції інтелектуалізованих систем у кардіології	52
1.4.3 Експертні системи у кардіології.....	53

1.4.4 Використання нечіткої логіки та нечітких множин для оцінювання ризику ураження коронарних артерій.....	54
1.4.5 Особливості машинного навчання у кардіології.....	57
1.4.6 Телемедичні та дистанційні системи моніторингу.....	58
1.5 Постановка задач дослідження.....	59
1.6 Висновки до першого розділу	60
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ УРАЖЕННЯ КОРОНАРНИХ АРТЕРІЙ НА ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ОЗНАК	61
2.1 Інформаційні ознаки в контексті створення баз знань при оцінюванні ризику ураження коронарних судин.....	61
2.1.1 Клініко-анамнестичні ознаки.....	62
2.1.2 Лабораторні та інструментальні ознаки.....	64
2.1.3 Ангіографічні ознаки.....	65
2.1.4 Формалізація інформаційних ознак у базах знань.....	66
2.1.5 Значення інформаційних ознак для інтелектуального аналізу даних.....	67
2.2 Особливості розроблення біотехнічної експертної системи для оцінювання ризику ураження коронарних артерій	70
2.3 Рекомендації побудови біотехнічної інтелектуалізованої системи ангіографічного аналізу коронарних судин.....	73
2.3.1 Попередня обробка ангіографічних зображень.....	74
2.3.2 Методи сегментації коронарних судин.....	76
2.3.3 Особливості інтелектуалізованого аналізу стенозів коронарних артерій.....	83
2.4 Розробка математичних моделей для оцінювання біомедичних зображень з використанням методів нечітких множин щодо оцінювання ступеня анатомічного ураження коронарних артерій.....	85
2.5 Висновки до другого розділу.....	102

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЯКОСТІ ТА ШВИДКОДІЇ ОБРОБЛЕННЯ АНГІОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ КОРОНАРНИХ СУДИН ТА ПІДХОДИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ ПАТОЛОГІЙ	104
3.1 Критеріальне оцінювання якості та швидкодії просторових і частотних методів оброблення ангіографічних зображень коронарних судин.....	104
3.1.1 Характеристика досліджуваних методів.....	104
3.1.2 Методика проведення оцінювання якості та швидкодії просторових і частотних методів.....	106
3.2 Особливості автоматизованого аналізу коронарної ангіографії для автоматизованого при введенні ангіографічних відео послідовностей.....	111
3.3 Автоматизований аналіз ангіографічних зображень коронарних артерій.....	115
3.4 Опис схеми обробки та порівняльного аналізу моделей YOLO для автоматизованого виявлення патологій коронарних артерій.....	118
3.5 Висновки до третього розділу	123
 РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ АРХІТЕКТУРИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНОЇ БІОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ АНГІОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ КОРОНАРНИХ СУДИН ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ПАТОЛОГІЙ.....	 124
4.1 Рекомендації щодо реалізації архітектура інтелектуалізованої біотехнічної системи для аналізу ангіографічних відео послідовностей.....	124
4.1.1 Попереднє оброблення ангіографічних відеоданих.....	125

4.1.2 Навчання та оптимізація моделі.....	127
4.1.3 Оцінювання ефективності системи.....	128
4.1.4 Аналіз результатів ласифікації патологій.....	129
4.2 Рекомендації щодо створення інтелектуалізованої біотехнічної системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій.....	130
4.2.1 Загальна концепція побудови інтелектуалізовано технічної системи.....	130
4.2.2 Рекомендації щодо формування бази медичних даних.....	132
4.2.3 Рекомендації щодо попередньої обробки зображень.....	133
4.2.4 Рекомендації щодо сегментації коронарних артерій.....	134
4.2.5 Рекомендації щодо застосування інтелектуалізованого підходу для обробки агіографічних зображень.....	135
4.2.6 Рекомендації щодо системи підтримки прийняття рішень.	135
4.3 Рекомендації щодо створення біотехнічної системи аналізу потенційних продуцентів біогенних магнітних наночастинок на основі інформаційної технології BLAST.....	137
4.3.1 Особливості інформаційної технології Blast.....	140
4.3.2 Методика вирівнювання досліджуваного білка з необхідним мікроорганізмом – збудником захворювання.....	141
4.5 Перспективи розвитку інтелектуалізованих біотехнічних систем для аналізу коронарної ангіографії.....	145
4.4 Висновки до четвертого розділу	147
ВИСНОВКИ.....	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТКИ.....	175
Додаток А Акти впровадження та меморандум про впровадження результатів дисертаційної роботи.....	176

Додаток Б Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	182
Додаток В Програмний модуль на основі transfer learning з архітектурою ResNet-50 для автоматизованої класифікації ангіографічних зображень коронарних артерій за типами патологічних змін.....	184
Додаток Д Приклади ангіографічних зображень коронарних артерій з патологіями та приклад автоматизованої процедури їх оброблення за допомогою інтелектуалізованої біотехнічної системи	187

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

IXC	ішемічна хвороба серця(
NSTEMI	інфаркт міокарда без підйому сегмента ST
IVUS	внутрішньосудинне ультразвукове дослідження
ОКТ	оптична когерентна томографія
LSTM	рекурентні мережі
CNN-LSTM	гібридні нейронні мережі
СТО	хронічні оклюзії
БМН	біогенні магнітні наночастинки
BLAST	Basic Local Alignment Search Tool
ЗНМ	згорткові нейронні мережі
ШІ (AI)	штучний інтелект
ІЧ	інфрачервоне випромінювання
ФПГ	фотоплетізограма
ЕКГ	електрокардіограма
ЕКГ	ехокардіографія

ВСТУП

Актуальність роботи. На цей час ішемічна хвороба серця (ІХС) залишається однією з провідних причин тимчасової та стійкої втрати працездатності, інвалідизації та смертності населення в економічно розвинутих країнах і є однією з найактуальніших проблем кардіології. На сьогодні серцево-судинні захворювання викликають 47% усіх випадків смерті серед населення Європи, що становить 4 млн. випадків щороку. В Україні ІХС становить 65% у структурі смертності від захворювань системи кровообігу працездатного населення та є головною причиною інвалідизації [1-11,64,65].

Незважаючи на те, що в Європі рівень смертності, асоційованої з ІХС за останні десятиріччя знизився, дана патологія залишається однією з провідних причин смерті. Відносні показники рівня STEMI знижуються, в той час, як NSTEMI, відповідно, підвищуються. Незважаючи на зниження рівня смертності, асоційованої з STEMI, що супроводжується розширенням практики проведення реперфузійної терапії, смертність залишається значною. Госпітальна смертність у даних пацієнтів, згідно європейських реєстрів, коливається на рівні 4-12 % [12-21, 64,65].

Інфаркт міокарда є найчастішим проявом ішемічної хвороби серця та однією з основних причин інвалідності й смертності працездатного населення. Летальність при інфаркті міокарда становить 18,5 - 40%, значне число хворих вмирає від початку нападу й у більшості випадків до госпіталізації. Протягом останніх 10 років значно підвищилась частота виникнення NSTEMI (інфаркт міокарда без підйому сегмента ST). Важливим моментом введення хворих з NSTEMI є розробка стратифікації і прогнозування перебігу, використовуючи різноманітні клініко-інструментальні параметри [22-21,64,65].

Систематизовані дані про характер ураження коронарних артерій у пацієнтів з NSTEMI демонструють, що 10-20% пацієнтів мають інтактні

коронарні артерії, в 30-35% випадків наявне ураження однієї, в 25-30% - 2 артерій і в 5-10% - ураження стовбура лівої коронарної артерії різного ступеня. Низка досліджень демонструють менш значущі анатомічні зміни в коронарних артеріях у жінок порівняно з чоловіками в усіх вікових групах [22-35,64,65].

Виходячи з актуальності проблеми дисертаційної роботи пов'язано з недостатньою точністю розпізнавання та локалізації ризику ураження коронарних артерій, суб'єктивністю виявлення ризику ураження коронарних артерій, не завжди враховуються індивідуальні особливості пацієнта, ймовірністю лікарських помилок при інтерпретації біомедичних даних.

Дисертаційні дослідження перспективні для таких областей медицини, як:

- Клінічна кардіологія та кардіохірургія. Для підтримки прийняття лікарських рішень при діагностиці ішемічної хвороби серця, стенозів коронарних артерій, гострого коронарного синдрому.
- Відділення інтенсивної терапії та екстреної медицини. Для швидкої стратифікації ризику у пацієнтів із болем у грудях, аритміями, підозрою на інфаркт міокарда.
- Телемедицина та дистанційний моніторинг пацієнтів. У поєднанні з носимими біосенсорами для постійного збору фізіологічних даних.
- Профілактична медицина та скринінгові програми. Для раннього виявлення осіб із високою ймовірністю розвитку коронарних патологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, грантами, планами, темами.

Дисертаційні дослідження виконувались відповідно до наукового напрямку кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

Вінницького національного технічного університету, в межах виконання держбюджетних науково-дослідної робіт, проєктів та грантів, які пов'язані з розробкою інтелектуалізованих біотехнічних систем для діагностування ризиків ураження коронарних артерій, а саме «Розробка лазерно-фотонного лікувально-діагностичного комплексу медичної реабілітації пацієнтів з політравмами різного ступеня важкості» (Грант Національного фонду наукових досліджень України, № 209/0135 від 01.08.2023 року, ДР № 0123U101295), Розробка оптико-електронної системи тривимірної реконструкції в медицині катастроф для покращення медичної діагностики, лікування та реабілітації військовослужбовців № 61/0135 від 01.03.2024 року (ДР № 0124U001134).

Мета і задачі роботи. Метою роботи є підвищення інформативності, достовірності оцінювання ризику ураження коронарних артерій шляхом використання методів нечітких множин та створення інтелектуалізованої біотехнічної системи стратифікації та прогнозування перебігу захворювання, що надає можливість проводити профілактику та запобігати дестабілізації перебігу захворювання та розвитку різних ускладнень хвороби з NSTEMI.

У даній роботі було поставлено такі задачі:

1. Провести аналіз відомих сучасних інтелектуалізованих біотехнічних систем, методів і засобів аналізу та оброблення біомедичних зображень коронарних судин.
2. Забезпечити критеріальне оцінювання якості та швидкодії просторових і частотних методів оброблення ангіографічних зображень коронарних судин.
3. Вдосконалити метод оброблення ангіографічних зображень коронарних судин.

4. Розробити метод автоматичної сегментації динамічних ангіографічних зображень коронарних судин.
5. Кількісно оцінити інформаційні ознаки в контексті створення баз знань при оцінювання ризику ураження коронарних судин.
6. Розробити архітектуру інтелектуалізованої біотехнічної системи для оцінювання ризику ураження коронарних судин.
7. Розробити і провести апробацію системи для аналізу структурних змін при оцінювання ризику ураження коронарних судин з блоком нечіткого оброблення для діагностики.

Об'єкт дослідження - процес дослідження методів та дослідження показників перебігу серцевих захворювань при ураженні коронарних артерій за допомогою інтелектуалізованої біотехнічної системи для оцінювання ризику ураження коронарних артерій.

Предмет дослідження - методи, характеристики показників перебігу серцевих захворювань, інтелектуалізована біотехнічна система для оцінювання ризику ураження коронарних артерій.

Методи дослідження базуються на основних положеннях системного аналізу та теорії біомедичних засобів, математичного моделювання для аналізу та оброблення біомедичної інформації, математичної статистики та комп'ютерної обробки біомедичної інформації, теорії алгоритмів та оптико-електронних систем реєстрації біомедичної інформації.

Наукова новизна отриманих результатів

На основі теоретичних досліджень реалізовано інтелектуалізовану біотехнічну систему стратифікації та прогнозування перебігу захворювання, що надає можливість проводити профілактику та запобігати дестабілізації перебігу захворювання та розвитку різних ускладнень

хвороби з NSTEMI, підвищення інформативності, достовірності оцінювання ризику ураження коронарних артерій шляхом використання методів нечітких множин та створення створення інтелектуалізованої біотехнічної системи.

Основні наукові результати

1. Вперше одержано математичні моделі для оцінювання біомедичних зображень з використанням методів нечітких множин на основі експертних баз знань, що дозволило проводити комплексне оцінювання ризику ураження коронарних артерій, що підвищило достовірність оцінювання ризику ураження коронарних артерій до 97,7 %.
2. Вперше запропоновано комплексний підхід до сегментації коронарних судин на ангіографічних зображеннях, який базується на комбінованому використанні оператора Собеля, локальних статистичних характеристик та адаптивної медіанної фільтрації, що дозволило підвищити точність виділення меж судинних структур в умовах наявності шумів та низького контрасту ангіографічних зображень.
3. Удосконалено метод попередньої обробки ангіографічних зображень коронарних артерій за рахунок адаптивного коригування яскравості на основі локальних статистичних параметрів, що забезпечує зменшення впливу шумів при одночасному збереженні контурів судинного русла та підвищує інформативність медичних зображень для подальшої сегментації.
4. Отримав подальший розвиток метод оцінювання якості сегментації коронарних судин шляхом введення комплексного критерію ефективності, який інтегрує індекс структурної подібності SSIM, критерій Пратта FOM та відносну похибку визначення геометричних

параметрів, що дозволяє здійснювати об'єктивне порівняння алгоритмів сегментації ангіографічних зображень.

5. Вперше запропоновано архітектуру інтелектуалізованої біотехнічної системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій, яка поєднує модулі попередньої обробки, сегментації судинного дерева, нейромережевого аналізу та підтримки прийняття клінічних рішень, що забезпечує автоматизоване визначення ступеня стенозу та підвищення достовірності оцінювання ризику ішемічної хвороби серця.

Практична цінність роботи полягає в тому, що результати досліджень дозволили реалізувати нові технічні рішення реалізації інтелектуалізованої біотехнічної системи стратифікації та прогнозування перебігу захворювання, що надає можливість проводити профілактику та запобігати дестабілізації перебігу захворювання та розвитку різних ускладнень хвороби з NSTEMI для підвищення інформативності, достовірності оцінювання ризику ураження коронарних артерій шляхом використання методів нечітких множин.

1. Розроблений алгоритм процесу оброблення біомедичного зображення, який базується на обчисленні автокореляційної функції, що дозволяє визначати локально-різницевий поріг знаходження середнього модуля вибірових середніх значень ознак біомедичних зображень.
2. Показано можливість використання інтелектуалізованої біотехнічної системи для вирішення задач медичної діагностики при оцінюванні ступеня анатомічного ураження коронарного русла у пацієнтів з різними формами ІХС.
3. Розроблені рекомендації щодо використання інтелектуалізованої біотехнічної системи для оброблення біомедичних зображень при оцінюванні ступеня анатомічного ураження коронарного русла

Це має особливу цінність і мотивацію для подальшого розвитку медичних інформаційних систем і технологій, оскільки запропоновані методи, моделі і технології, зменшуючи суб'єктивність дослідника, сприяють створенню нового класу медичних інформаційних технологій для дослідження стану коронарних судин.

Розроблено практичні рекомендації щодо використання результатів проведених досліджень: в навчальному процесі – створення на базі кафедри БМІОЕС ВНТУ інноваційного навчально-наукової лабораторії біомедичної оптики та фотніки – в рамках підготовки фахівців за спеціальністю G22 – біомедична інженерія.

Реалізація та впровадження результатів роботи. Результати дисертаційних досліджень впроваджено в навчальні процеси підготовки студентів ВНТУ, які навчаються за спеціальністю G 22 – Біомедична інженерія та в медичну діяльність Вінницького національного медичного університету ім. М. Пирогова (Вінницький кардіологічний центр), Військово-медичного клінічного центру центрального регіону, м. Вінниця, що підтверджується відповідними актами та меморандумом про впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У 12 наукових працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать такі результати: [3,8,11] – запропоновано математичні моделі для оцінювання біомедичних зображень з використанням методів нечітких множин на основі експертних баз знань; [1,2,7] – запропоновано комплексний підхід до сегментації коронарних судин на ангіографічних зображеннях, який базується на комбінованому використанні оператора Собеля, локальних статистичних характеристик та адаптивної медіанної фільтрації; [4,5,6] - удосконалено метод попередньої обробки ангіографічних зображень коронарних артерій за рахунок адаптивного коригування яскравості на основі локальних

статистичних параметрів, що забезпечує зменшення впливу шумів при одночасному збереженні контурів судинного русла та підвищує інформативність медичних зображень для подальшої сегментації; [3,9,10] – запропоновано архітектуру інтелектуалізованої біотехнічної системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій; [6,12] – запропоновано застосування інформаційної технології BLAST для пошуку мікроорганізмів, потенційних продуцентів біогенних магнітних наночасток, які призводять до серцевих захворювань.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати, отримані в кваліфікаційній дисертаційній роботі, апробовано у провідному науковому-практичному журналі УкрІНТЕІ «Наука, технології, інновації» представлялись на III міжнародній науково-практичній конференції «Медико-технічна співпраця заради перемоги: актуальні завдання медичної, біологічної фізики та інформатики», м. Вінниця, на щорічних науково-технічних конференціях ВНТУ, тощо.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані: у 4 статтях наукових періодичних видань з переліку фахових видань України, 3 закордонних публікаціях у науковому виданні, яке входить до МНБ Scopus, зокрема 1 стаття опублікована в міжнародному журналі «*Int. J. Environ. Res. Public Health*» з квантилем Q1, 3 статтях в журналах, що не входять до переліку фахових видань України, 2 тезах доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків по роботі, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 189 сторінки, із них основного тексту – 151 сторінка, 39 рисунків та 35 таблиць, посилання на літературні джерела включає 182 найменування та займає 23 сторінки, а також 4 додатків на 15 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНИХ БІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ УРАЖЕННЯ КОРОНАРНИХ АРТЕРІЙ

1.1 Актуальність проблеми оцінювання ризику ураження коронарних артерій

Ішемічна хвороба серця (ІХС) є однією з найактуальніших проблем сучасної медицини та охорони здоров'я, оскільки посідає провідне місце серед причин смертності, інвалідизації та втрати працездатності населення у більшості країн світу. Незважаючи на значний прогрес у розвитку медичних технологій, удосконалення методів діагностики та лікування серцево-судинних захворювань, патології коронарних артерій залишаються основною причиною передчасної смертності населення працездатного віку. За даними міжнародних кардіологічних асоціацій, серцево-судинні захворювання щорічно спричиняють понад 17 мільйонів летальних випадків, значну частину яких становить саме ішемічна хвороба серця.

Особливістю ІХС є її багатofакторний характер розвитку, що пов'язаний із порушенням кровопостачання міокарда внаслідок атеросклеротичного ураження коронарних артерій. Поступове звуження просвіту судин призводить до недостатнього забезпечення серцевого м'яза киснем та поживними речовинами, що зумовлює розвиток ішемії, порушення функціонального стану серця та виникнення гострих коронарних синдромів. Найбільш небезпечними клінічними проявами ІХС є нестабільна стенокардія, гострий інфаркт міокарда та раптова серцева смерть [35,38,64].

В останні роки особливу увагу приділяють проблемі гострих коронарних синдромів без підйому сегмента ST (NSTEMI), частота виникнення яких має тенденцію до зростання. Це пов'язано як зі старінням

населення, так і з поширенням факторів ризику серцево-судинних захворювань, серед яких артеріальна гіпертензія, цукровий діабет, ожиріння, паління, гіподинамія та хронічний стрес. Пацієнти з NSTEMI характеризуються високим ризиком розвитку ускладнень, тому своєчасне оцінювання ступеня ураження коронарних артерій та прогнозування перебігу захворювання є надзвичайно важливим завданням сучасної кардіології [36,37,64].

В Україні серцево-судинні захворювання займають перше місце у структурі смертності населення. Частка ІХС серед захворювань системи кровообігу є надзвичайно високою, а показники смертності від інфаркту міокарда значно перевищують середньоєвропейські значення. Особливо актуальною дана проблема є в умовах воєнного стану, значного психоемоційного навантаження населення, погіршення екологічних умов та зниження доступності своєчасної медичної допомоги. У зв'язку з цим підвищується потреба у створенні сучасних систем раннього виявлення та оцінювання ризику ураження коронарних артерій, здатних забезпечити швидке прийняття клінічних рішень[38,39,40].

На сучасному етапі розвитку кардіології для оцінювання стану коронарних артерій використовуються різноманітні методи візуалізації та аналізу біомедичної інформації. Найбільш поширеним методом є коронарна ангіографія, яка вважається «золотим стандартом» діагностики ішемічної хвороби серця. Даний метод дозволяє візуалізувати просвіт коронарних судин, визначити локалізацію стенозів та оцінити ступінь порушення кровотоку. Проте ангіографія має ряд суттєвих недоліків, серед яких обмежені можливості оцінювання морфологічних особливостей атеросклеротичних бляшок, недостатня інформативність щодо структури судинної стінки та залежність результатів від кваліфікації лікаря [41-45].

Для більш детального аналізу стану судинного русла застосовуються внутрішньосудинні методи візуалізації, зокрема внутрішньосудинне

ультразвукове дослідження (IVUS) та оптична когерентна томографія (ОКТ). Внутрішньосудинне ультразвукове дослідження дозволяє отримувати поперечні зображення судинної стінки та визначати морфологічні характеристики атеросклеротичних уражень. Метод IVUS є ефективним для оцінювання циркулярного поширення кальцієвих бляшок, аналізу геометрії судини та контролю результатів стентування. Разом із тим просторово-контрастна роздільна здатність даного методу є недостатньою для виявлення дрібних структурних змін [45-51].

Оптична когерентна томографія належить до найбільш перспективних методів внутрішньосудинної візуалізації. Метод базується на використанні інфрачервоного випромінювання та забезпечує надзвичайно високу просторову роздільну здатність, що дозволяє детально аналізувати структуру атеросклеротичних бляшок, товщину фіброзної капсули, наявність тромбів та кальцієвих відкладень. ОКТ є особливо ефективною при дослідженні морфологічних особливостей коронарних уражень та контролі ефективності ендovasкулярних втручань. Однак використання даного методу потребує складного програмного забезпечення для оброблення зображень та значних обчислювальних ресурсів [52,53,57].

Сучасні методи діагностики формують великі обсяги біомедичної інформації, аналіз якої потребує використання автоматизованих систем оброблення даних. Традиційні підходи до аналізу ангіографічних та томографічних зображень значною мірою залежать від суб'єктивної оцінки лікаря, що може призводити до виникнення діагностичних помилок. Крім того, складність морфологічних змін коронарних судин, наявність шумів на зображеннях та індивідуальні особливості пацієнтів ускладнюють процес оцінювання ризику ураження коронарних артерій [54,55].

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розроблення сучасних інтелектуалізованих біотехнічних систем для автоматизованого

аналізу біомедичних зображень. Такі системи дозволяють реалізувати комплексний підхід до оцінювання стану коронарного русла, використовуючи методи цифрової обробки сигналів, математичного моделювання, машинного навчання та штучного інтелекту.

Одним із перспективних напрямів розвитку медичних інформаційних технологій є використання методів штучного інтелекту для автоматизованого аналізу ангіографічних та томографічних зображень. Нейронні мережі та алгоритми глибокого навчання забезпечують можливість автоматичного виявлення патологічних змін, сегментації судинних структур та класифікації типів уражень. Використання технологій Explainable AI дозволяє підвищити прозорість та інтерпретованість результатів аналізу, що є важливим фактором для впровадження інтелектуальних систем у клінічну практику [56-61,64].

Особливий інтерес становлять методи нечіткої логіки та нечітких множин, які дозволяють враховувати невизначеність медичних даних та формалізувати експертні знання лікарів-кардіологів. Використання нечітких моделей є доцільним у задачах медичної діагностики, де значна частина параметрів має нечіткий або лінгвістичний характер. Нечіткі експертні системи дозволяють проводити комплексне оцінювання ризику ураження коронарних артерій на основі аналізу множини клінічних, лабораторних та інструментальних показників [62-64].

Сучасні інтелектуалізовані біотехнічні системи також активно інтегруються з телемедичними платформами та системами дистанційного моніторингу пацієнтів. Використання носимих біосенсорів дозволяє здійснювати безперервний контроль фізіологічних параметрів пацієнта, зокрема електрокардіографічних сигналів, частоти серцевих скорочень, рівня насичення крові киснем та інших показників функціонального стану серцево-судинної системи. Інтеграція таких даних із системами підтримки

прийняття рішень відкриває нові можливості для раннього виявлення патологій та персоналізованого прогнозування перебігу захворювання.

Важливим завданням є також підвищення швидкодії та точності алгоритмів оброблення біомедичних зображень. Для цього застосовуються методи просторової та частотної фільтрації, алгоритми сегментації, виділення контурів, аналізу текстурних характеристик та морфологічної обробки зображень. Використання сучасних математичних моделей дозволяє автоматизувати процес виявлення патологічних змін та підвищити інформативність діагностичних систем [65-71,64,178].

Таким чином, аналіз сучасного стану проблеми свідчить про необхідність створення нових методів та інтелектуалізованих біотехнічних систем для оцінювання ризику ураження коронарних артерій. Розроблення таких систем є важливим напрямом розвитку біомедичної інженерії, медичної інформатики та кардіології, оскільки дозволяє підвищити достовірність діагностики, мінімізувати вплив людського фактору та забезпечити підтримку прийняття клінічних рішень.

Отже, актуальність дисертаційного дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності оцінювання ризику ураження коронарних артерій шляхом використання сучасних методів аналізу біомедичних зображень, штучного інтелекту, нечіткої логіки та інтелектуалізованих біотехнічних систем підтримки прийняття рішень у кардіології.

1.2 Сучасні методи діагностики та оцінювання стану коронарних артерій

Сучасна кардіологія характеризується активним розвитком методів візуалізації та аналізу стану коронарних артерій. Висока поширеність ішемічної хвороби серця та гострих коронарних синдромів зумовлює необхідність використання високоточних діагностичних технологій,

здатних забезпечити раннє виявлення патологічних змін, оцінювання ступеня ураження судинного русла та підтримку прийняття клінічних рішень [72-75].

На сьогодні для діагностики патологій коронарних артерій використовуються інвазивні та неінвазивні методи дослідження. Найбільш інформативними серед інвазивних методів є коронарна ангіографія, внутрішньосудинне ультразвукове дослідження (IVUS) та оптична когерентна томографія (ОКТ). Кожен із цих методів має власні переваги, обмеження та сфери клінічного застосування (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

**Порівняльна характеристика сучасних методів діагностики
коронарних артерій [178,179]**

Метод дослідження	Основний принцип	Переваги	Недоліки
Коронарна ангіографія	Рентгенконтрастна візуалізація просвіту судин	Висока інформативність при оцінці стенозів, швидкість проведення	Обмежений аналіз стінки судини та бляшок
IVUS	Ультразвукова внутрішньосудинна візуалізація	Аналіз морфології судини, оцінка кальцифікації	Нижча роздільна здатність
ОКТ	Інфрачервона оптична томографія	Висока деталізація структури судин	Висока вартість та складність
КТ-коронарографія	Комп'ютерна томографія	Неінвазивність, швидкість	Вплив артефактів кальцифікації
МРТ серця	Магнітно-резонансна томографія	Відсутність іонізуючого випромінювання	Низька просторово-часова роздільна здатність

Сучасні методи внутрішньосудинної візуалізації дозволяють не лише оцінювати ступінь стенозу судин, але й аналізувати морфологію атеросклеротичних бляшок, наявність тромботичних мас, структуру судинної стінки та ступінь кальцифікації. Це є надзвичайно важливим для прогнозування ризику розвитку гострих коронарних подій та вибору оптимальної тактики лікування [76-81]

Для діагностики патологій коронарних артерій застосовуються різноманітні інструментальні методи дослідження, серед яких найбільш поширеними є коронарна ангіографія, внутрішньосудинне ультразвукове дослідження (IVUS) та оптична когерентна томографія (ОКТ).

1.2.1 Коронарна ангіографія

Основною метою проведення коронарної ангіографії є визначення локалізації та ступеня звуження коронарних артерій, оцінювання стану кровотоку та вибір оптимальної тактики лікування. Метод широко застосовується при гострих коронарних синдромах, підозрі на інфаркт міокарда, плануванні стентування та аортокоронарного шунтування.

Коронарна ангіографія є «золотим стандартом» оцінювання стану коронарного русла. Метод дозволяє візуалізувати просвіт судин та визначити ступінь стенозу коронарних артерій. Основною перевагою ангіографії є висока інформативність при оцінюванні гемодинамічно значущих звужень (рис. 1.1.) [64,65,82-85].

Перевагою коронарної ангіографії є можливість отримання зображень коронарного русла у реальному часі, що дозволяє оперативно оцінити функціональний стан судин. Метод забезпечує високу швидкість дослідження та ефективність при виявленні гемодинамічно значущих звужень (табл. 1.2) [86,87].

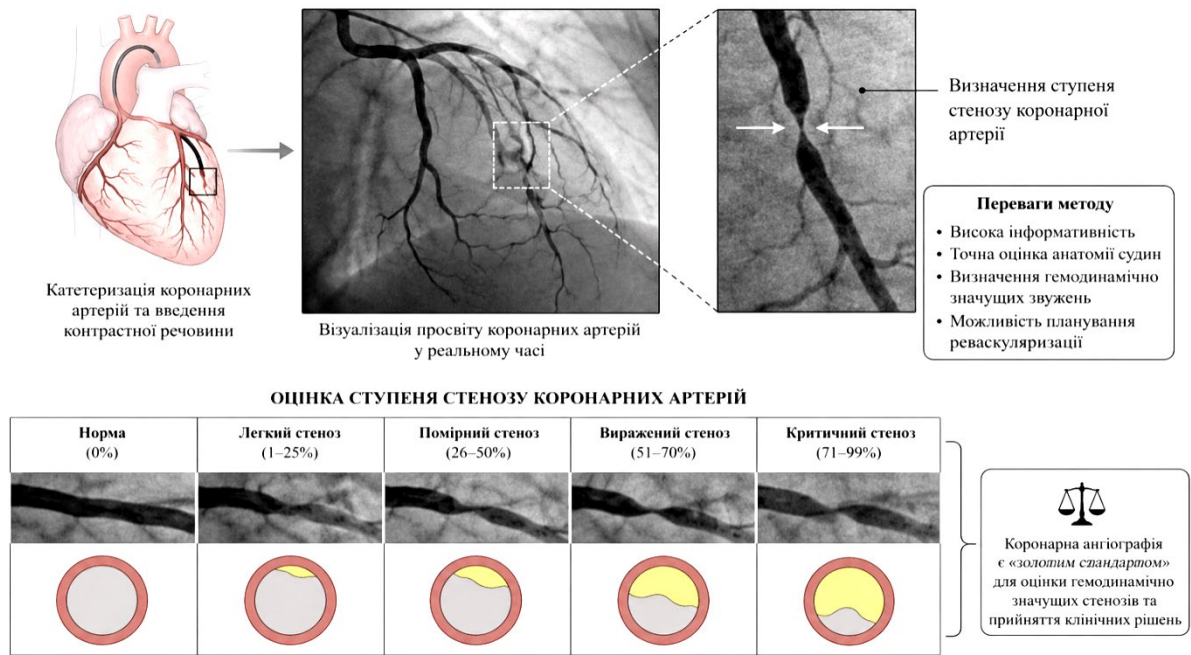


Рисунок 1.1 – Застосування коронарної ангіографії для оцінювання стану коронарного русла [64,88]

Таблиця 1.2

Основні переваги та недоліки коронарної ангіографії

Переваги	Недоліки
Висока інформативність при оцінюванні стенозів	Неможливість детального аналізу структури бляшки
Візуалізація судин у реальному часі	Обмежений аналіз судинної стінки
Висока швидкість проведення	Променеве навантаження
Можливість поєднання з лікувальними втручаннями	Використання контрастних речовин
Висока доступність у кардіологічних центрах	Залежність від кваліфікації лікаря

- Разом із тим ангіографія має низку недоліків, серед яких [86-90]:
- обмежена можливість оцінювання структури атеросклеротичної бляшки;
 - недостатня інформативність щодо товщини кальцієвих відкладень;

- складність оцінювання тромбозу та морфології судинної стінки;
- залежність результатів від досвіду лікаря.

Незважаючи на наявні обмеження, коронарна ангіографія залишається базовим методом діагностики ішемічної хвороби серця. Сучасні тенденції розвитку даного методу спрямовані на підвищення якості цифрових зображень, автоматизацію аналізу ангіографічних даних та інтеграцію з системами штучного інтелекту.

1.2.2 Внутрішньосудинне ультразвукове дослідження

Внутрішньосудинне ультразвукове дослідження (Intravascular Ultrasound, IVUS) є сучасним методом внутрішньосудинної візуалізації, який забезпечує отримання поперечних зображень судинної стінки за допомогою ультразвукових хвиль. Метод дозволяє детально оцінювати морфологію атеросклеротичних уражень, геометрію судини та структуру кальцієвих бляшок [64,91-95].

Принцип роботи IVUS базується на використанні мініатюрного ультразвукового датчика, розташованого на кінці катетера. Ультразвукові сигнали відбиваються від тканин судинної стінки та формують зображення поперечного перерізу судини.

Однією з головних переваг IVUS є можливість оцінювання не лише просвіту судини, але й морфологічних змін у судинній стінці. Метод дозволяє визначати ступінь кальцифікації, товщину атеросклеротичних бляшок та їх циркулярне поширення [96-101].

Метод IVUS забезпечує отримання поперечних зображень судинної стінки та дозволяє оцінювати морфологічні особливості атеросклеротичних уражень. Перевагами методу є можливість визначення циркулярного поширення кальцієвих бляшок, аналізу структури судини та оцінювання анатомічних змін коронарного русла (рис. 1.2).

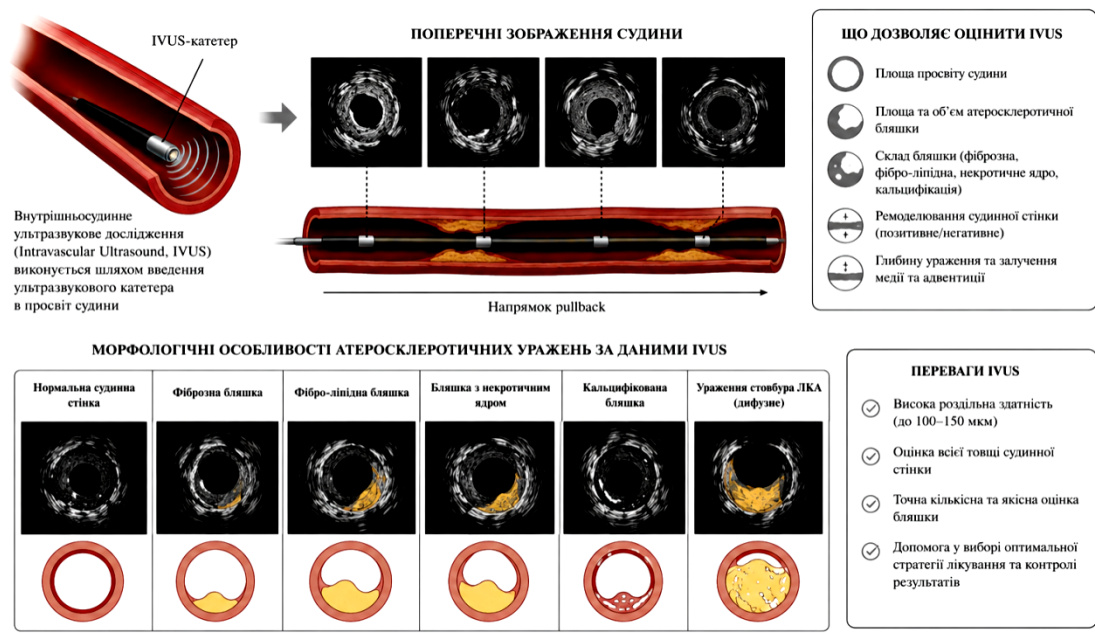


Рисунок 1.2. – Особливості застосування методу IVUS для оцінювання поперечних зображень судинної та морфологічних особливостей атеросклеротичних уражень [73,178]

IVUS широко використовується при проведенні ендоваскулярних втручань, контролі встановлення стентів та оцінюванні ефективності лікування. Метод забезпечує більш точну оцінку анатомічних особливостей коронарного русла порівняно з ангіографією (табл.. 1.3).

Таблиця 1.3

Характеристика можливостей методу IVUS

Діагностичний параметр	Рівень ефективності
Оцінка просвіту судини	Високий
Аналіз структури судинної стінки	Високий
Виявлення кальцифікації	Високий
Аналіз товщини бляшки	Середній
Виявлення тромбів	Середній
Просторова роздільна здатність	Середня

Разом із тим IVUS має ряд обмежень. Основним недоліком є нижча просторово-контрастна роздільна здатність порівняно з оптичною когерентною томографією. Це ускладнює виявлення дрібних тромбів та тонких структурних змін [105-110].

До недоліків IVUS належать:

- нижча просторово-контрастна роздільна здатність порівняно з ОКТ;
- складність виявлення дрібних тромбів;
- обмежена точність визначення товщини кальцієвих відкладень.

Важливою перевагою IVUS є можливість оцінювання ступеня кальцифікації коронарних артерій, що має суттєве значення при плануванні ендovasкулярних втручань. Метод дозволяє визначити глибину та поширеність кальцієвих відкладень, що впливає на вибір типу стента та тактики лікування.

Сучасні системи IVUS активно інтегруються з автоматизованими алгоритмами аналізу зображень та технологіями машинного навчання. Це дозволяє підвищити точність діагностики та зменшити вплив людського фактору.

1.2.3 Оптична когерентна томографія

Оптична когерентна томографія є сучасним високоточним методом внутрішньосудинної візуалізації, який базується на використанні інфрачервоного випромінювання. Метод забезпечує високу просторову роздільну здатність та дозволяє детально досліджувати структуру судинної стінки, тромботичні утворення та кальцієві бляшки [111-115].

Основною перевагою ОКТ є надзвичайно висока просторова роздільна здатність, яка значно перевищує можливості IVUS. Це дозволяє отримувати детальні зображення структури судинної стінки та проводити аналіз морфології атеросклеротичних бляшок на мікроскопічному рівні (табл. 1.4).

Метод ОКТ забезпечує можливість:

- виявлення тромботичних утворень;
- оцінювання товщини фіброзної капсули;
- аналізу структури атеросклеротичних бляшок;
- визначення ступеня кальцифікації;
- контролю результатів стентування.

Таблиця 1.4

Порівняння IVUS та ОКТ [64,65,73,111,115]

Характеристика	IVUS	ОКТ
Тип сигналу	Ультразвук	Інфрачервоне світло
Просторова роздільна здатність	Середня	Дуже висока
Глибина проникнення	Висока	Середня
Виявлення тромбів	Обмежене	Високе
Аналіз кальцифікації	Добрий	Відмінний
Оцінка товщини бляшки	Середня	Висока
Вартість обладнання	Висока	Дуже висока

Оптична когерентна томографія є особливо ефективною при оцінюванні нестабільних атеросклеротичних бляшок, які характеризуються високим ризиком розриву та розвитку гострого коронарного синдрому. Завдяки високій деталізації ОКТ дозволяє виявляти навіть мінімальні морфологічні зміни судинної стінки (рис. 1.3).

Разом із тим використання ОКТ має певні обмеження. Метод характеризується меншою глибиною проникнення порівняно з IVUS, а також потребує використання спеціалізованих алгоритмів цифрового оброблення зображень. Крім того, висока вартість обладнання обмежує широке впровадження даної технології у клінічну практику [115--20].

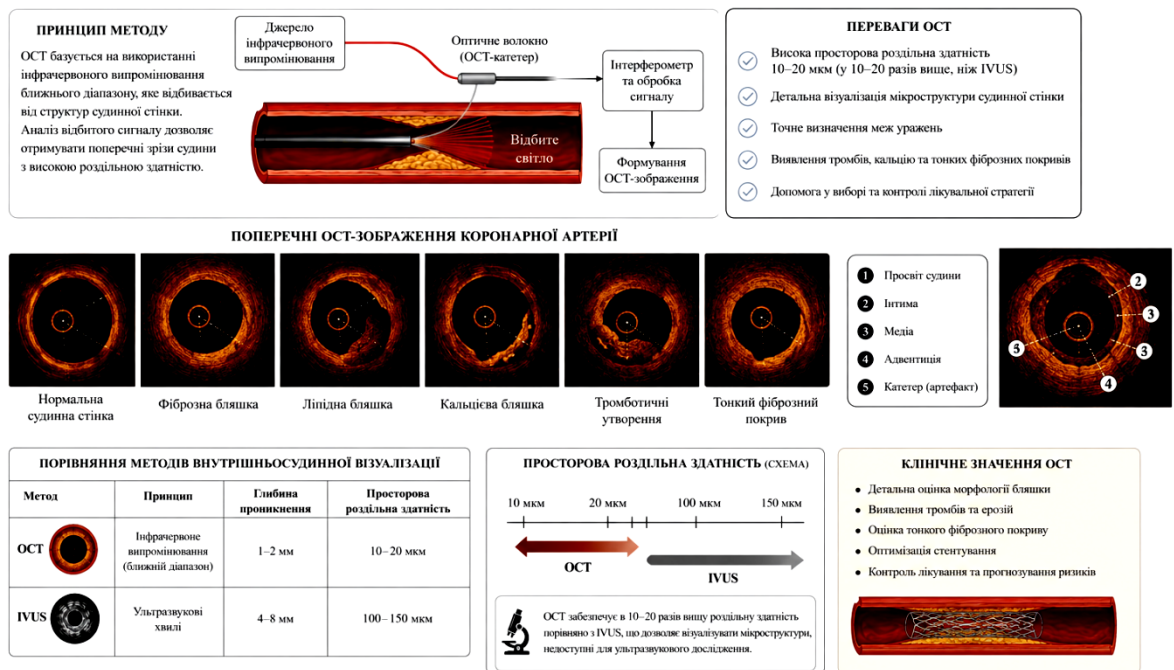


Рисунок 1.3 – Приклад застосування методу оптичної когерентної томографії для внутрішньосудинної візуалізації

Основними перевагами ОКТ є: висока точність виявлення тромбів; можливість оцінювання товщини та розподілу кальцієвих бляшок; висока інформативність при аналізі морфології уражень; можливість деталізованої візуалізації внутрішньосудинних структур.

Разом із тим використання ОКТ має певні обмеження. Метод характеризується меншою глибиною проникнення порівняно з IVUS, а також потребує використання спеціалізованих алгоритмів цифрового оброблення зображень. Крім того, висока вартість обладнання обмежує широке впровадження даної технології у клінічну практику.

1.2.4 Порівняльний аналіз сучасних методів внутрішньосудинної візуалізації

Сучасні методи внутрішньосудинної візуалізації мають різні діагностичні можливості та ефективність залежно від клінічної задачі. Коронарна ангіографія забезпечує оцінювання просвіту судини, IVUS

дозволяє аналізувати морфологію судинної стінки, а ОКТ забезпечує найвищу деталізацію внутрішньосудинних структур (табл.. 1.5).

Таблиця 1.5

Порівняльна оцінка можливостей методів

Параметр	Ангіографія	IVUS	ОКТ
Візуалізація просвіту судини	Висока	Висока	Висока
Аналіз структури бляшки	Низький	Середній	Високий
Виявлення тромбів	Середнє	Середнє	Високе
Оцінка кальцифікації	Низька	Висока	Висока
Аналіз судинної стінки	Обмежений	Високий	Високий
Просторова роздільна здатність	Середня	Середня	Дуже висока
Автоматизація аналізу	Обмежена	Середня	Висока

На рис. 1.4. представлений аналіз тромботичних і сильно кальцифікованих коронарних уражень за допомогою ангіографії та інтракоронарної візуалізації

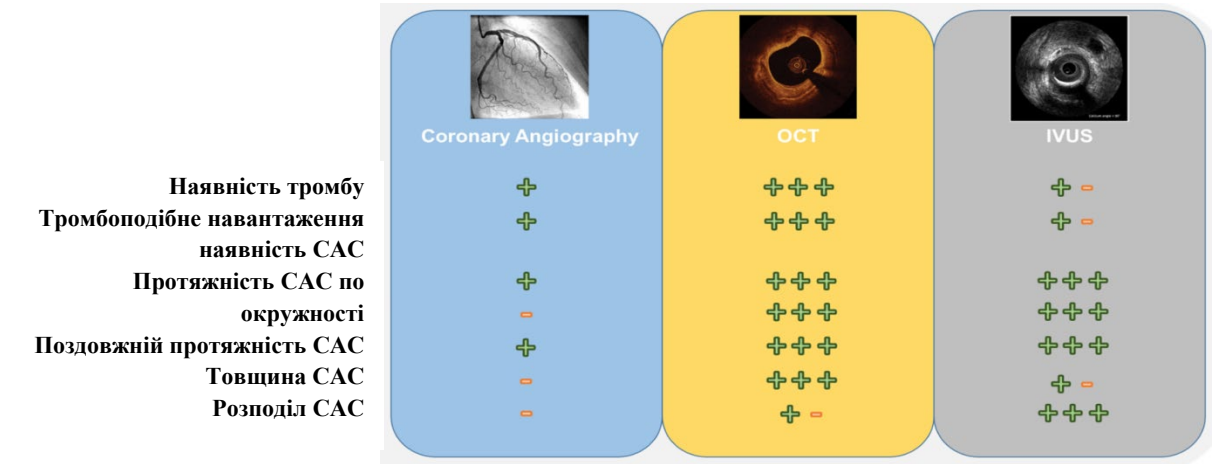


Рисунок 1.4. - Аналіз тромботичних і сильно кальцифікованих коронарних уражень за допомогою ангіографії та інтракоронарної візуалізації (Milzi, A.; Simonetto, F.; Landi, A. Percutaneous Revascularization of Thrombotic and Calcified Coronary Lesions. *J. Clin. Med.* **2025**, 14, 692. <https://doi.org/10.3390/jcm14030692> [178])

Таким чином, сучасні методи діагностики коронарних артерій мають значний потенціал для підвищення ефективності оцінювання ризику ураження судинного русла. Разом із тим для забезпечення високої достовірності діагностики необхідним є створення інтелектуалізованих систем аналізу біомедичних зображень, здатних інтегрувати результати різних методів дослідження та автоматизувати процес підтримки прийняття клінічних рішень.

1.3 Аналіз сучасних методів оброблення біомедичних зображень

Одним із ключових етапів оцінювання стану коронарних артерій є оброблення біомедичних зображень, оскільки саме якість цифрового аналізу ангіографічних та томографічних даних визначає точність діагностики, ефективність виявлення патологічних змін та достовірність оцінювання ризику розвитку серцево-судинних ускладнень. Сучасні системи медичної візуалізації формують великі обсяги цифрової інформації, аналіз якої потребує використання високопродуктивних алгоритмів оброблення сигналів, комп'ютерного зору, машинного навчання та штучного інтелекту [115-121].

Біомедичні зображення коронарних артерій характеризуються складною структурою, наявністю шумів, неоднорідністю контрасту та значною кількістю артефактів, що виникають під час реєстрації сигналів. Це ускладнює процес автоматичного аналізу та потребує використання спеціалізованих методів цифрового оброблення. Основними задачами аналізу біомедичних зображень є покращення якості зображення, сегментація судинних структур, виділення контурів, класифікація патологій та підтримка прийняття клінічних рішень (табл. 1.6).

Таблиця 1.6

Основні задачі оброблення біомедичних зображень [115]

Задача	Мета	Основні методи
Придушення шумів	Покращення якості зображення	Фільтрація, згладжування
Підвищення контрастності	Покращення видимості структур	Гістограмне вирівнювання
Сегментація	Виділення судинних структур	Порогові методи, неймережі
Виділення контурів	Аналіз меж судин	Градiєнтні алгоритми
Класифікація	Виявлення патологій	Машинне навчання
Розпізнавання	Автоматичний аналіз структур	CNN, гібридні моделі

Сучасні системи аналізу ангіографічних та томографічних зображень використовують комплексний підхід, який поєднує класичні алгоритми цифрової обробки сигналів із сучасними технологіями штучного інтелекту. Використання інтелектуалізованих алгоритмів дозволяє автоматизувати процес діагностики, мінімізувати вплив людського фактору та підвищити точність оцінювання стану коронарного русла.

1.3.1 Просторові методи фільтрації

Просторові методи оброблення є одними з найбільш поширених підходів до аналізу біомедичних зображень. Дані методи базуються на безпосередньому обробленні пікселів зображення у просторовій області та використовуються для придушення шумів, підвищення контрастності та покращення якості візуалізації судинних структур [120-126].

У медичних зображеннях часто присутні імпульсні, гаусові та мультиплікативні шуми, що виникають у процесі формування сигналів.

Для їх усунення використовуються різні типи фільтрів (табл. 1.7): середньозважені фільтри; медіанні фільтри; гаусові фільтри; адаптивні фільтри; морфологічні алгоритми.

Середньозважені фільтри забезпечують згладжування шумів шляхом усереднення значень сусідніх пікселів. Разом із тим такі методи можуть призводити до втрати дрібних структурних деталей судин.

Медіанні фільтри є більш ефективними при придушенні імпульсних шумів, оскільки зберігають межі об'єктів та не викликають значного розмиття контурів. Це особливо важливо при аналізі ангіографічних зображень коронарних артерій [10,127-135].

Гаусові фільтри використовуються для придушення високочастотних шумів та згладжування зображень. Дані методи забезпечують високу швидкодію та широко застосовуються у попередньому етапі цифрового аналізу.

Таблиця 1.7

Порівняння просторових методів фільтрації

Метод	Переваги	Недоліки	Основне застосування
Середньозважений фільтр	Простота реалізації	Розмиття контурів	Загальне згладжування
Медіанний фільтр	Збереження меж	Підвищена обчислювальна складність	Усунення імпульсних шумів
Гаусовий фільтр	Висока швидкодія	Втрата дрібних деталей	Придушення шумів
Адаптивний фільтр	Врахування локальних характеристик	Складність реалізації	Медичні зображення
Морфологічні методи	Аналіз форми структур	Чутливість до параметрів	Виділення судин

Одним із перспективних напрямів розвитку просторових методів є використання адаптивної фільтрації, яка враховує локальні характеристики зображення та дозволяє зберігати важливі анатомічні структури.

1.3.2 Частотні методи оброблення зображень

Частотні методи базуються на представленні зображення у спектральній області за допомогою математичних перетворень. Найбільш поширеними є перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення та косинусні перетворення [128,132].

Основною перевагою частотних методів є можливість ефективного аналізу спектральних характеристик сигналів та придушення шумових компонентів. У медичній візуалізації частотні методи використовуються для: фільтрації шумів; підвищення контрастності; виділення структурних елементів; аналізу текстурних характеристик; компресії зображень (табл.1.8).

Таблиця 1.8

Порівняння частотних методів оброблення

Метод	Переваги	Недоліки	Застосування
Перетворення Фур'є	Простота аналізу спектру	Втрата локальної інформації	Фільтрація шумів
Вейвлет-перетворення	Локалізація у просторі та часі	Складність реалізації	Медичні зображення
Косинусне перетворення	Висока ефективність компресії	Менша деталізація	Зберігання даних
Габор-фільтри	Аналіз текстур	Високі обчислювальні витрати	Аналіз судин

Перетворення Фур'є дозволяє аналізувати спектральний склад зображення та виділяти високочастотні й низькочастотні компоненти.

Високочастотні компоненти відповідають дрібним деталям та контурам, тоді як низькочастотні містять загальну структуру зображення.

Вейвлет-перетворення є більш сучасним методом аналізу, який забезпечує одночасне дослідження частотних та просторових характеристик сигналу. Це особливо важливо при обробленні ангіографічних та томографічних зображень [133,134].

Використання частотних методів дозволяє значно підвищити якість біомедичних зображень та покращити результати автоматизованої сегментації судинних структур.

1.3.3 Методи сегментації судинних структур

Сегментація є одним із найважливіших етапів аналізу біомедичних зображень. Основною метою сегментації є автоматичне виділення коронарних артерій та патологічних структур на зображеннях [135,140].

Сучасні методи сегментації можна поділити на (табл. 1.9):

- порогові методи;
- регіональні алгоритми;
- контурні моделі;
- морфологічні методи;
- нейромережеві алгоритми.

Порогові методи базуються на виділенні областей з певними значеннями яскравості. Дані методи є простими у реалізації, проте чутливі до шумів та неоднорідності освітлення.

Контурні методи використовують аналіз градієнтів та меж об'єктів. Найбільш поширеними є алгоритми Canny, Sobel та Laplacian.

Морфологічні алгоритми дозволяють аналізувати форму та структуру судинних елементів. Дані методи є ефективними при виділенні тонких судинних структур [142,144]

Таблиця 1.9

Порівняльний аналіз методів сегментації

Метод сегментації	Переваги	Недоліки
Пороговий	Простота реалізації	Чутливість до шумів
Регіональний	Висока точність	Значні обчислення
Контурний	Добре виділення меж	Чутливість до артефактів
Морфологічний	Аналіз структури судин	Складність налаштування
Нейромережевий	Висока точність	Потреба у великих базах даних

Особливого значення набувають методи автоматичної сегментації ангиографічних зображень, що дозволяють зменшити суб'єктивність аналізу та підвищити швидкодію систем діагностики.

1.3.4 Інтелектуалізовані методи та нейромережеві технології для аналізу стану коронарних артерій

Сучасний розвиток систем аналізу біомедичних зображень нерозривно пов'язаний із використанням штучного інтелекту та нейромережевих технологій. Глибокі нейронні мережі забезпечують можливість автоматичного аналізу великих масивів медичних даних та виявлення складних патологічних закономірностей [140-142].

Найбільш поширеними архітектурами є (табл. 1.10):

- Convolutional Neural Networks (CNN);
- U-Net;
- ResNet;
- DenseNet;
- Vision Transformers.

CNN-мережі широко використовуються для класифікації медичних зображень та виявлення патологій. Архітектура U-Net є однією з найбільш ефективних для задач сегментації судинних структур.

Таблиця 1.10

Порівняння нейромережових архітектур

Архітектура	Основне призначення	Переваги	Недоліки
CNN	Класифікація	Висока точність	Потреба у великих даних
U-Net	Сегментація	Точне виділення структур	Висока складність
ResNet	Глибокий аналіз	Усунення проблеми деградації	Високі обчислення
DenseNet	Повторне використання ознак	Ефективність навчання	Велике навантаження
Vision Transformer	Аналіз складних структур	Висока адаптивність	Потреба у потужному GPU

Важливим напрямом розвитку є використання гібридних нейронних мереж для автоматизованого виявлення патологій у відеопослідовностях коронарної ангіографії. Такі системи забезпечують можливість аналізу динамічних змін кровотоку та морфології судин.

1.3.5 Explainable AI у медичній візуалізації стану коронарних артерій

Однією з основних проблем сучасних систем штучного інтелекту є недостатня інтерпретованість результатів. У медичній сфері це має критичне значення, оскільки лікар повинен розуміти причини прийняття рішення системою (табл. 1.11) [144].

Технології Explainable AI (XAI) дозволяють: пояснювати результати класифікації; візуалізувати важливі ділянки зображення; підвищувати довіру до системи; забезпечувати контроль прийняття рішень.

Таблиця 1.11

Основні переваги Explainable AI

Перевага	Значення для медицини
Інтерпретованість	Пояснення результатів діагностики
Прозорість	Контроль роботи системи
Надійність	Зниження ризику помилок
Довіра лікарів	Підвищення прийнятності технологій
Валідація результатів	Можливість перевірки рішень

Таким чином, сучасні методи оброблення біомедичних зображень забезпечують високий рівень автоматизації аналізу ангіографічних та томографічних даних. Використання методів цифрової обробки сигналів, сегментації, нейромережових технологій та Explainable AI створює передумови для розроблення інтелектуалізованих біотехнічних систем підтримки прийняття рішень у кардіології.

1.4 Аналіз інтелектуалізованих біотехнічних систем в кардіології

Сучасні інтелектуалізовані біотехнічні системи поєднують методи аналізу біомедичних сигналів, експертні системи, математичне моделювання та технології штучного інтелекту [145-150] .

Основними функціями таких систем є:

- збір та оброблення біомедичної інформації;
- аналіз ангіографічних та томографічних зображень;
- оцінювання ризику розвитку патологій;
- підтримка прийняття лікарських рішень;
- прогнозування перебігу захворювання.

Особливе місце займають системи, що використовують методи нечіткої логіки та нечітких множин. Використання нечітких моделей

дозволяє враховувати невизначеність та неоднозначність медичних даних, що є характерним для клінічної практики.

Застосування нечітких експертних систем у кардіології дозволяє:

- формалізувати експертні знання лікарів;
- автоматизувати процес стратифікації ризику;
- підвищити точність діагностики;
- забезпечити адаптацію системи до індивідуальних особливостей пацієнта.

Інтелектуалізовані біотехнічні системи є складними програмно-апаратними комплексами, які поєднують методи аналізу біомедичних сигналів, цифрової обробки зображень, математичного моделювання, машинного навчання, експертних систем та технологій штучного інтелекту. Основною метою створення таких систем є підвищення ефективності медичної діагностики, мінімізація впливу людського фактору та забезпечення персоналізованого підходу до лікування пацієнтів [73].

У кардіології інтелектуалізовані системи використовуються для аналізу електрокардіографічних сигналів, ангиографічних і томографічних зображень, оцінювання гемодинамічних показників, прогнозування ризику розвитку серцево-судинних патологій та підтримки прийняття лікарських рішень. Особливо актуальним є використання таких систем при діагностиці ішемічної хвороби серця, гострих коронарних синдромів та оцінюванні ступеня ураження коронарних артерій.

1.4.1 Основні принципи побудови інтелектуалізованих біотехнічних систем

Сучасні інтелектуалізовані біотехнічні системи будуються за модульним принципом і включають декілька функціональних підсистем (табл. 1.12):

- систему збору біомедичних даних;

- модуль цифрової обробки сигналів та зображень;
- базу знань;
- експертну систему;
- модуль підтримки прийняття рішень;
- інтерфейс взаємодії з користувачем.

Основою функціонування таких систем є інтеграція апаратних засобів реєстрації біомедичної інформації з програмними алгоритмами інтелектуального аналізу даних.

Таблиця 1.12

Основні компоненти інтелектуалізованої біотехнічної системи

Компонент системи	Основне призначення
Система збору даних	Реєстрація біомедичних сигналів та зображень
Модуль оброблення	Фільтрація, сегментація, аналіз даних
База знань	Збереження медичних правил та моделей
Експертна система	Формування діагностичних висновків
Модуль прогнозування	Оцінювання ризику розвитку патологій
Інтерфейс користувача	Взаємодія лікаря із системою

Одним із головних принципів побудови інтелектуалізованих систем є забезпечення високої достовірності оброблення інформації. Для цього використовуються адаптивні алгоритми аналізу даних, методи машинного навчання та експертні правила [1].

Особливе значення має інтеграція різномірних типів медичної інформації, включаючи:

- електрокардіографічні сигнали;
- ангіографічні зображення;
- томографічні дані;
- лабораторні показники;
- клінічні характеристики пацієнта.

Комплексний аналіз таких даних дозволяє підвищити точність діагностики та забезпечити більш ефективне прогнозування перебігу захворювання [73].

1.4.2 Основні функції інтелектуалізованих систем у кардіології

Сучасні інтелектуалізовані біотехнічні системи виконують широкий спектр функцій, спрямованих на автоматизацію процесів медичної діагностики та підтримки прийняття рішень.

Основними функціями таких систем є:

- збір та оброблення біомедичної інформації;
- аналіз ангіографічних та томографічних зображень;
- автоматичне виявлення патологій;
- оцінювання ризику розвитку серцево-судинних ускладнень;
- підтримка прийняття лікарських рішень;
- прогнозування перебігу захворювання;
- моніторинг стану пацієнта у режимі реального часу.

Таблиця 1.13

Функції інтелектуалізованих систем у кардіології

Функція	Практичне значення
Аналіз ЕКГ	Виявлення аритмій та ішемії
Аналіз ангіографії	Оцінювання стенозів судин
Сегментація судин	Автоматичне виділення артерій
Прогнозування ризику	Визначення ймовірності ускладнень
Підтримка рішень	Допомога лікарю у виборі лікування
Моніторинг	Контроль стану пацієнта

Одним із найбільш важливих напрямів є автоматизований аналіз ангіографічних та томографічних зображень коронарних артерій.

Інтелектуалізовані системи дозволяють визначати ступінь стенозу, аналізувати морфологію атеросклеротичних бляшок та оцінювати ризик розвитку гострих коронарних синдромів [75,81] .

Сучасні системи також активно використовуються для дистанційного моніторингу пацієнтів із серцево-судинними захворюваннями. Інтеграція з телемедицинськими платформами дозволяє здійснювати безперервний контроль фізіологічних показників та своєчасно виявляти небезпечні зміни функціонального стану серцево-судинної системи.

1.4.3 Експертні системи у кардіології

Експертні системи є одним із найбільш важливих компонентів інтелектуалізованих біотехнічних систем. Вони являють собою програмні комплекси, здатні моделювати процес прийняття рішень лікарем-експертом [85,90].

Основу експертної системи складають: база знань; база правил; механізм логічного висновку; інтерфейс взаємодії з користувачем (табл. 1.14).

Таблиця 1.14

Основні переваги експертних систем

Перевага	Значення для медицини
Автоматизація аналізу	Зменшення навантаження на лікаря
Висока швидкість роботи	Оперативна діагностика
Формалізація знань	Збереження досвіду експертів
Мінімізація помилок	Підвищення точності
Стандартизація рішень	Уніфікація діагностики

База знань містить інформацію про медичні закономірності, клінічні критерії та діагностичні правила. Механізм логічного висновку забезпечує аналіз вхідних даних та формування діагностичних висновків.

У кардіології експертні системи використовуються для: оцінювання ризику інфаркту міокарда; аналізу ішемічних змін; прогнозування серцевої недостатності; оцінювання стану коронарних артерій; визначення тактики лікування. Сучасні експертні системи інтегруються з методами машинного навчання та нейронними мережами, що дозволяє підвищити точність діагностичних висновків.

1.4.4 Використання нечіткої логіки та нечітких множин для оцінювання ризику ураження коронарних артерій

Особливе місце серед інтелектуалізованих біотехнічних систем займають системи, що використовують методи нечіткої логіки та нечітких множин. У медичній практиці значна частина інформації має невизначений або нечіткий характер, тому класичні математичні моделі не завжди забезпечують достатню ефективність (1.15) [120,121].

Нечітка логіка дозволяє формалізувати лінгвістичні оцінки типу: «високий ризик»; «помірний стеноз»; «незначне ураження»; «низька ймовірність патології» [120,121].

Використання нечітких моделей дозволяє враховувати невизначеність та неоднозначність медичних даних, що є характерним для клінічної практики.

Таблиця 1.15

Порівняння класичної та нечіткої логіки

Характеристика	Класична логіка	Нечітка логіка
Тип значень	0 або 1	Діапазон 0–1
Робота з невизначеністю	Обмежена	Висока
Медичні застосування	Обмежені	Дуже широкі
Інтерпретація даних	Формальна	Лінгвістична
Адаптивність	Низька	Висока

Застосування нечітких експертних систем у кардіології дозволяє: формалізувати експертні знання лікарів; автоматизувати процес стратифікації ризику; підвищити точність діагностики; забезпечити адаптацію системи до індивідуальних особливостей пацієнта; здійснювати прогнозування перебігу захворювання [120,121].

Нечіткі системи особливо ефективні при оцінюванні ризику ураження коронарних артерій, оскільки дозволяють одночасно враховувати численні клінічні параметри, лабораторні показники та результати візуалізації.

У таблиці 1.16 представлено порівняльний аналіз сучасних наборів ангіографічних даних, які використовуються для навчання та тестування інтелектуалізованих систем автоматизованої діагностики патологій коронарних артерій.

Таблиця 1.16

Порівняльний аналіз сучасних наборів ангіографічних даних [73,178]

Джерело	Кількість пацієнтів (n)	Фрейми	Форма введення	Розмір зображення
Лі та і 202	213	500	Однокадрові фрейми	512 × 512
Чанг та і 2024	100	619	Однокадрові фрейми	512 × 512
Гао та і 2025	—	180	2-кадрові фрейми	512 × 512
Рамос-Кортес та і 2025	—	750	Однокадрові фрейми	300 × 300 512 × 512
Вей та і 2025	110	542	3-кадрова послідовність	800 × 800
Наші	374	739	Однокадрові фрейми	512 × 512

Наведені дані характеризують обсяг вибірок, кількість кадрів, форму подання ангіографічної інформації та розмір зображень, що застосовуються у дослідженнях різних авторів. Порівняння таких

характеристик є важливим етапом оцінювання ефективності моделей глибокого навчання, оскільки якість та структура навчального набору безпосередньо впливають на точність класифікації патологій.

Результати досліджень Лі та співавторів (2022), Чанга та співавторів (2024), Гао та співавторів (2025), Рамос-Кортеса та співавторів (2025), Вея та співавторів (2025), а також власний набір даних авторів дослідження. Для кожного набору вказано кількість пацієнтів, число ангіографічних кадрів, форму подання інформації та розмір вхідних зображень.

Аналіз представлених даних свідчить про суттєву варіативність структури наборів даних, які використовуються у сучасних системах комп'ютерного зору для кардіології. Зокрема, у роботі Лі та співавторів використано 213 пацієнтів та 500 кадрів ангіографії у форматі однокадрових зображень розміром 512×512 пікселів. Подібний підхід застосовано у дослідженні Чанга та співавторів, де використано 100 пацієнтів та 619 кадрів аналогічного розміру. Використання однокадрових фреймів є найбільш поширеним підходом у задачах автоматизованого аналізу ангіографічних зображень, оскільки дозволяє спростити процес навчання нейронних мереж та зменшити обчислювальну складність моделей.

У роботі Гао та співавторів використано інший підхід, заснований на двокадрових фреймах. Такий метод дозволяє частково враховувати часову динаміку руху контрастної речовини у коронарних судинах. Кількість кадрів у цьому дослідженні становить 180, а розмір зображень також дорівнює 512×512 пікселів. Використання багатокандрових послідовностей є перспективним напрямом розвитку інтелектуалізованих систем, оскільки забезпечує додаткову інформацію про гемодинамічні процеси.

Особливий інтерес становить дослідження Рамос-Кортеса та співавторів, у якому використано найбільшу кількість кадрів — 750. У

даному випадку застосовуються однокадрові фрейми з різними розмірами зображень — 300×300 та 512×512 пікселів. Зменшення розміру вхідного зображення дозволяє прискорити процес навчання моделей глибокого навчання, однак може призводити до втрати дрібних деталей судинної структури.

У роботі Вея та співавторів використано трьохкадрову послідовність ангіографічних даних, що дозволяє більш ефективно аналізувати часові зміни стану судин. Кількість пацієнтів у цьому дослідженні становить 110, а кількість кадрів — 542. Особливістю набору є використання зображень високої роздільної здатності 800×800 пікселів, що забезпечує кращу деталізацію коронарних артерій та підвищує точність виявлення патологічних змін.

Власний набір даних авторів дослідження містить 374 пацієнти та 739 ангіографічних кадрів у форматі однокадрових фреймів розміром 512×512 пікселів. Порівняно з іншими дослідженнями, сформована база даних характеризується найбільшою кількістю пацієнтів, що забезпечує високу репрезентативність вибірки та покращує здатність моделей до узагальнення. Значний обсяг клінічних даних дозволяє враховувати різноманітність анатомічних особливостей коронарного русла та варіативність патологічних змін.

1.4.5 Особливості машинного навчання у кардіології

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку інтелектуалізованих біотехнічних систем є використання технологій штучного інтелекту та машинного навчання (табл. 1.17).

Алгоритми машинного навчання дозволяють: автоматично виявляти патології; аналізувати великі масиви медичних даних; прогнозувати ризик ускладнень; класифікувати типи захворювань; формувати рекомендації щодо лікування.

Найбільш поширеними методами є: дерева рішень; Random Forest; Support Vector Machine; нейронні мережі; глибоке навчання.

Таблиця 1.17

Основні методи штучного інтелекту у кардіології

Метод	Основне застосування	Переваги
Random Forest	Класифікація патологій	Висока точність
SVM	Аналіз медичних даних	Робота з малими вибірками
CNN	Аналіз зображень	Висока ефективність
Deep Learning	Виявлення складних закономірностей	Автоматичне навчання
Hybrid AI	Комплексний аналіз	Інтеграція різних методів

Сучасні нейромережеві системи демонструють високу ефективність при автоматизованому аналізі ангіографічних та томографічних зображень коронарних артерій. Глибокі нейронні мережі здатні виявляти приховані закономірності, недоступні для традиційних методів аналізу.

1.4.6 Телемедичні та дистанційні системи моніторингу

Розвиток телемедицини сприяв активному впровадженню дистанційних систем моніторингу пацієнтів із серцево-судинними захворюваннями (табл.1.18) [145-151].

Такі системи дозволяють: здійснювати безперервний контроль ЕКГ; контролювати артеріальний тиск; оцінювати сатурацію кисню; передавати

дані у реальному часі; формувати автоматичні повідомлення про небезпечні стани.

Таблиця 1.18

Переваги телемедицини систем

Перевага	Практичне значення
Дистанційний моніторинг	Контроль пацієнтів вдома
Безперервність спостереження	Раннє виявлення патологій
Автоматизація аналізу	Швидке реагування
Зменшення навантаження на лікарні	Оптимізація ресурсів
Інтеграція з AI	Інтелектуальна діагностика

Особливе значення телемедицини технології мають для пацієнтів із високим ризиком розвитку гострих коронарних синдромів, а також у системах військової та катастрофічної медицини.

1.5 Постановка задач дослідження

Незважаючи на значний розвиток сучасних методів діагностики, існує низка невирішених проблем у сфері оцінювання ризику ураження коронарних артерій. Основними проблемами є: недостатня автоматизація процесів аналізу; суб'єктивність оцінювання результатів; складність інтеграції різнорідних медичних даних; обмежені можливості прогнозування перебігу захворювання; необхідність високої кваліфікації медичного персоналу.

Перспективними напрямками розвитку є: використання методів штучного інтелекту та машинного навчання; створення автоматизованих експертних систем; інтеграція телемедицини технологій; розроблення систем дистанційного моніторингу пацієнтів; використання носимих біосенсорів для безперервного контролю фізіологічних параметрів.

Особливу увагу приділяють створенню інтелектуалізованих біотехнічних систем, які поєднують аналіз біомедичних зображень, методи нечіткої логіки та алгоритми підтримки прийняття рішень.

На основі проведеного аналізу сучасного стану проблеми встановлено необхідність розроблення нових методів та інтелектуалізованих біотехнічних систем для оцінювання ризику ураження коронарних артерій.

1.6 Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану проблеми оцінювання ризику ураження коронарних артерій. Встановлено, що ішемічна хвороба серця та гострі коронарні синдроми залишаються одними з основних причин смертності населення.

Проаналізовано сучасні методи діагностики коронарних патологій, зокрема коронарну ангіографію, внутрішньосудинне ультразвукове дослідження та оптичну когерентну томографію. Визначено їх основні переваги та недоліки.

Розглянуто сучасні методи оброблення біомедичних зображень та особливості використання інтелектуалізованих біотехнічних систем у кардіології. Показано перспективність застосування методів нечіткої логіки та штучного інтелекту для підвищення достовірності оцінювання ризику ураження коронарних артерій.

На основі проведеного аналізу сформульовано основні задачі дисертаційного дослідження, спрямовані на розроблення методів та інтелектуалізованої біотехнічної системи для оцінювання ризику ураження коронарних артерій.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ УРАЖЕННЯ КОРОНАРНИХ АРТЕРІЙ НА ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ОЗНАК

2.1 Інформаційні ознаки в контексті створення баз знань при оцінюванні ризику ураження коронарних судин

Формування ефективних баз знань для оцінювання ризику ураження коронарних судин ґрунтується на визначенні та систематизації інформативних клініко-анамнестичних, лабораторних, інструментальних і ангіографічних ознак, які мають прогностичне значення щодо ступеня та поширеності атеросклеротичного ураження коронарного русла. Саме інформаційні ознаки виступають базовими елементами інтелектуальних систем підтримки прийняття клінічних рішень, експертних систем та моделей прогнозування ризику [64,65,73].

У медичних біотехнічних системах інформаційною ознакою вважають параметр або характеристику пацієнта, що може бути використана для диференціації ступеня ризику, прогнозування перебігу захворювання чи визначення ймовірності розвитку патологічного процесу. При оцінюванні ризику ураження коронарних судин інформаційні ознаки повинні відповідати таким критеріям:

- клінічна значущість;
- статистична достовірність;
- відтворюваність;
- доступність для реєстрації;
- можливість формалізації та подальшої комп'ютерної обробки.

У контексті побудови баз знань усі інформаційні ознаки доцільно поділяти на декілька основних груп.

На рисунку 2.1 представлено основні групи інформаційних ознак, що використовуються при формуванні баз знань для оцінювання ризику ураження коронарних судин. Виділено клініко-анамнестичні, лабораторні, інструментальні та ангіографічні показники, які мають найбільше прогностичне значення при стратифікації серцево-судинного ризику та прогнозуванні гемодинамічно значущих стенозів.

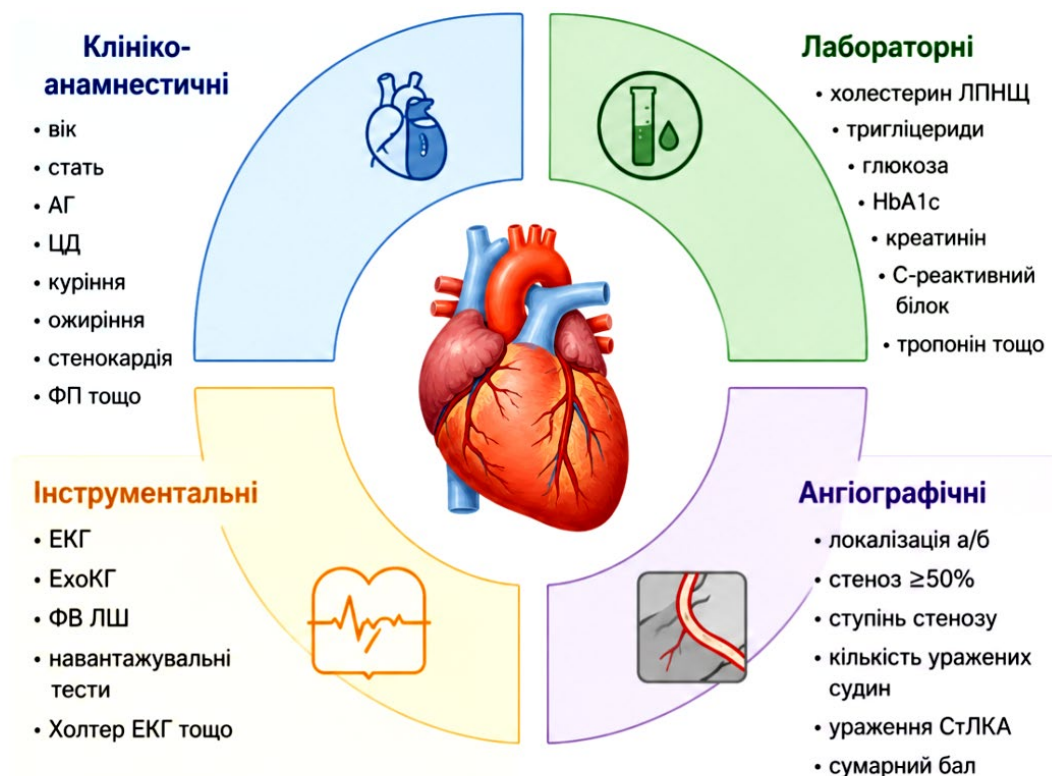


Рисунок 2.1 – Структура інформаційних ознак при оцінюванні ризику ураження коронарних судин

2.1.1 Клініко-анамнестичні ознаки

До цієї групи належать демографічні та клінічні характеристики пацієнтів, що мають доведений зв'язок із розвитком ішемічної хвороби серця та ураженням коронарного русла. Найбільш інформативними є: вік; стать; тривалість артеріальної гіпертензії; наявність цукрового діабету; куріння та його стаж; ожиріння й індекс маси тіла; обтяжений сімейний

анамнез; наявність стабільної стенокардії; перенесений інфаркт міокарда; фібриляція передсердь [64,65,121,178].

Встановлено, що поєднання кількох факторів ризику суттєво підвищує ймовірність гемодинамічно значущого стенозу коронарних артерій та багатосудинного ураження.

На рис. 2.2 наведено клінічні особливості діагностування пацієнта за серцевими захворюваннями шляхом використання інтелектуалізованих систем.

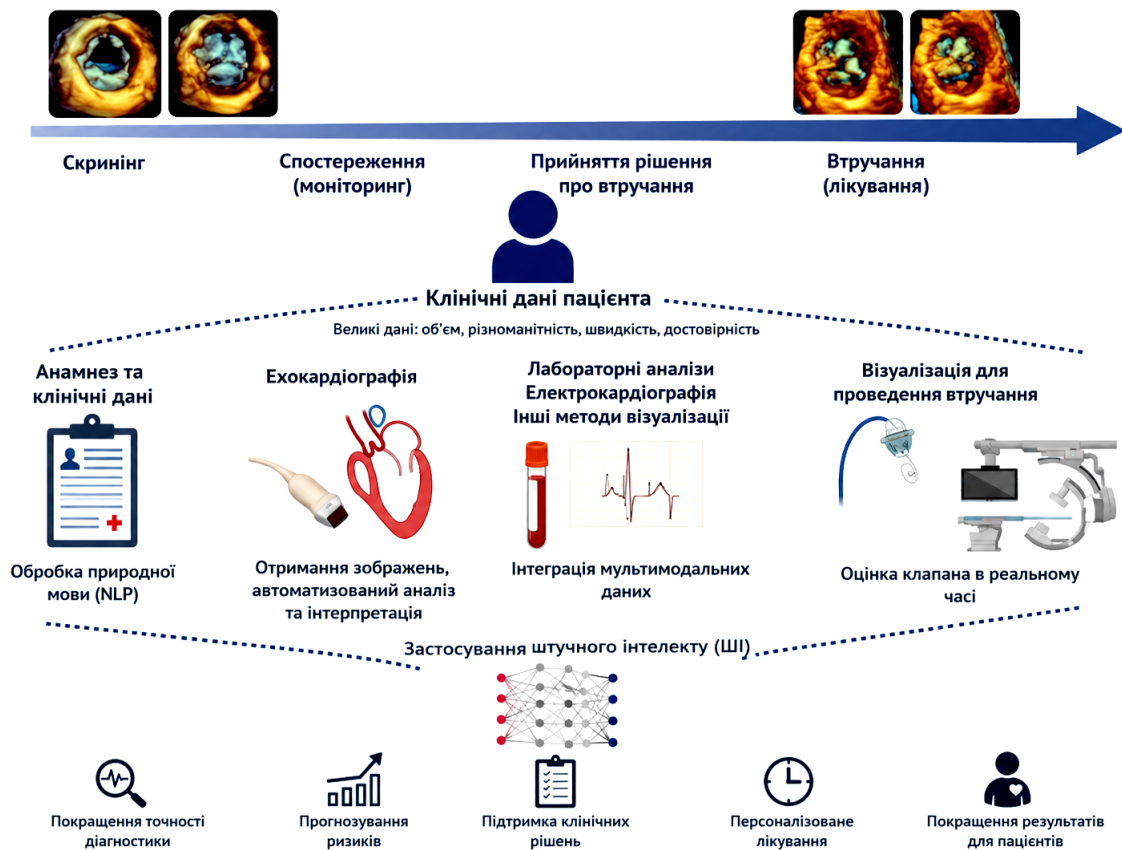


Рисунок 2.2 – Особливості діагностування пацієнта за серцевими захворюваннями

Рисунок 2.3 демонструє поширеність основних факторів ризику серед пацієнтів з ішемічною хворобою серця. Найчастіше виявлялись артеріальна гіпертензія (85,5%) та дисліпідемія (67,0%). Значну частку також становили куріння (42,0%), передінфарктна стенокардія (43,0%) та

ожиріння (36,5%). Отримані дані підтверджують мультифакторний характер розвитку атеросклеротичного ураження коронарних судин.

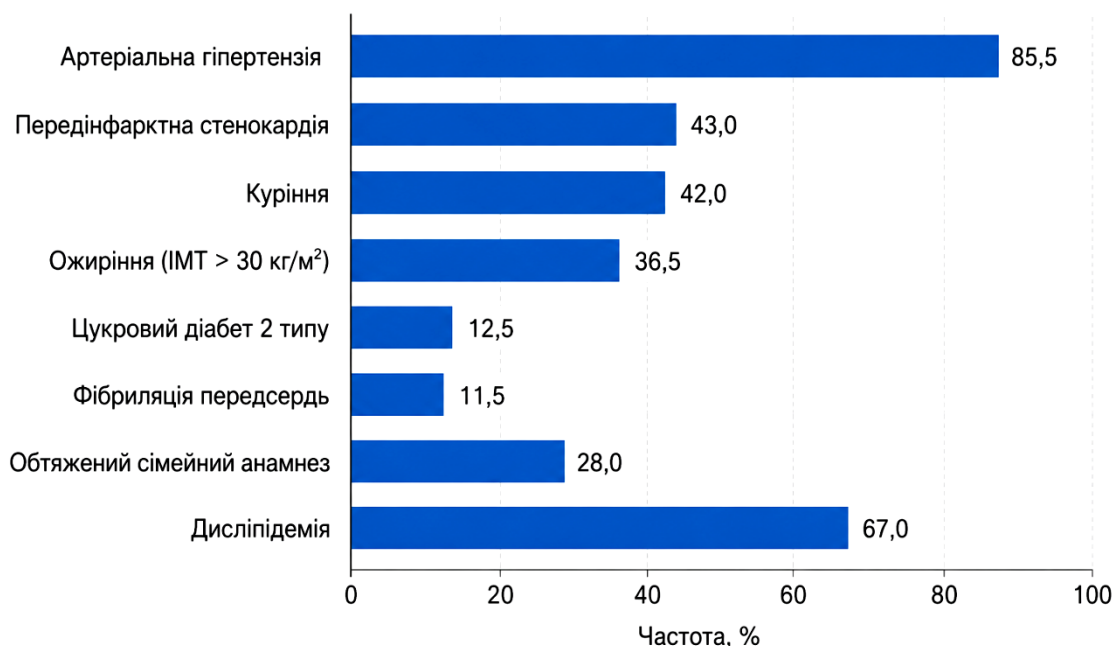


Рисунок 2.3 – Частота факторів ризику у пацієнтів з ішемічною хворобою серця

2.1.2 Лабораторні та інструментальні ознаки

Важливу роль у формуванні баз знань відіграють лабораторні показники, які характеризують метаболічний, запальний і тромботичний компоненти атеросклерозу. До найбільш інформативних лабораторних ознак належать: рівень загального холестерину; холестерин ліпопротеїнів низької щільності; холестерин ліпопротеїнів високої щільності; тригліцериди; глюкоза крові; глікований гемоглобін; креатинін; швидкість клубочкової фільтрації; С-реактивний білок; тропонін; показники коагулограми [64,65,178,179].

Використання лабораторних параметрів дозволяє підвищити точність стратифікації ризику та забезпечує персоналізований підхід до оцінювання стану пацієнта.

Інструментальні ознаки

До інструментальних ознак належать результати неінвазивних методів обстеження:

- електрокардіографічні зміни;
- ехокардіографічні показники;
- наявність зон гіпокінезії;
- фракція викиду лівого шлуночка;
- ознаки гіпертрофії міокарда;
- результати навантажувальних тестів;
- дані холтерівського моніторингу.

Особливе значення мають ознаки ішемії міокарда та порушень скоротливості, які можуть непрямо свідчити про тяжкість коронарного атеросклерозу.

2.1.3 Ангіографічні ознаки

Ангіографічні характеристики є ключовими інформаційними ознаками при оцінюванні ступеня ураження коронарного русла. До них належать: локалізація атеросклеротичної бляшки; наявність гемодинамічно значущого стенозу; ступінь стенозування судини; кількість уражених судин; ураження стовбура лівої коронарної артерії; ураження передньої міжшлуночкової гілки; ураження правої коронарної артерії; сумарний бал тяжкості ураження коронарних артерій [73,131]

Саме ангіографічні показники є найбільш специфічними предикторами несприятливого перебігу ішемічної хвороби серця та використовуються як еталонні критерії при створенні моделей прогнозування.

2.1.4 Формалізація інформаційних ознак у базах знань

Для побудови баз знань інформаційні ознаки повинні бути структуровані та формалізовані. Це передбачає: визначення типу даних (кількісні, якісні, бінарні); встановлення діапазонів значень; кодування категоріальних показників; стандартизацію термінології; створення логічних зв'язків між ознаками [64,65].

Наприклад, ознака «куріння» може бути представлена у вигляді бінарного параметра («так/ні»), а також деталізована за стажом куріння чи кількістю пачко-років. Аналогічно ступінь стенозу може бути поданий як категоріальна або кількісна змінна.

На рисунку 2.4 наведено структуру пацієнтів залежно від ступеня стенозування коронарних артерій. У половини обстежених виявлено гемодинамічно значущі стенози ($\geq 50\%$), що свідчить про високий ризик прогресування ішемічної хвороби серця та розвитку гострих коронарних подій.

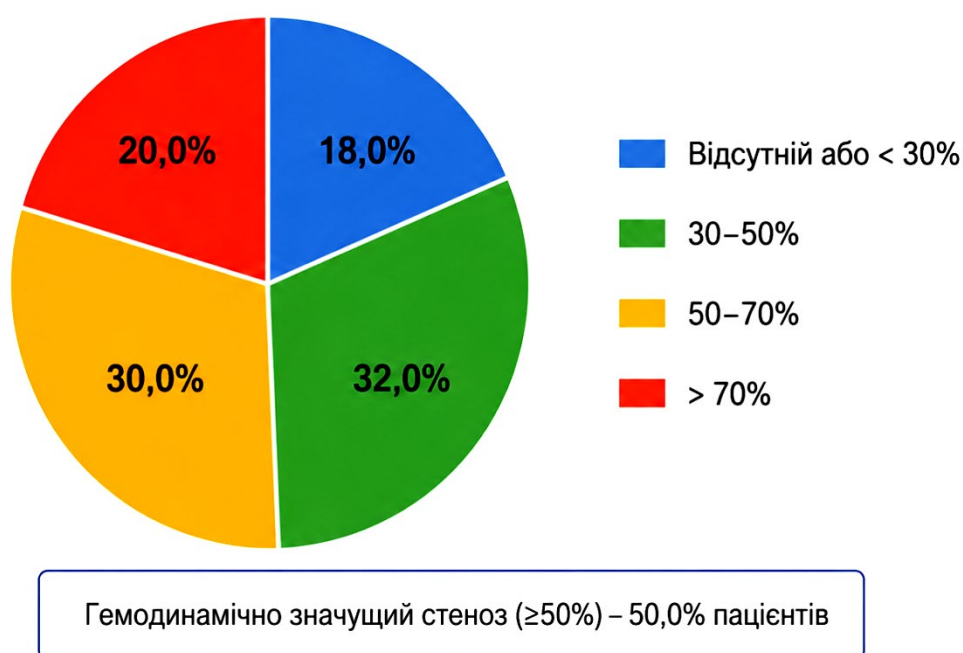


Рисунок 2.4 – Розподіл пацієнтів за ступенем стенозу коронарних судин (за ангіографічними даними)

Рисунок 2.5 ілюструє взаємозв'язок між кількістю факторів ризику та частотою багатосудинного ураження коронарного русла. Встановлено поступове зростання частоти багатосудинного ураження зі збільшенням кількості факторів ризику: від 10,0% у пацієнтів із 0–1 фактором ризику до 76,0% у пацієнтів із чотирма і більше факторами ризику.

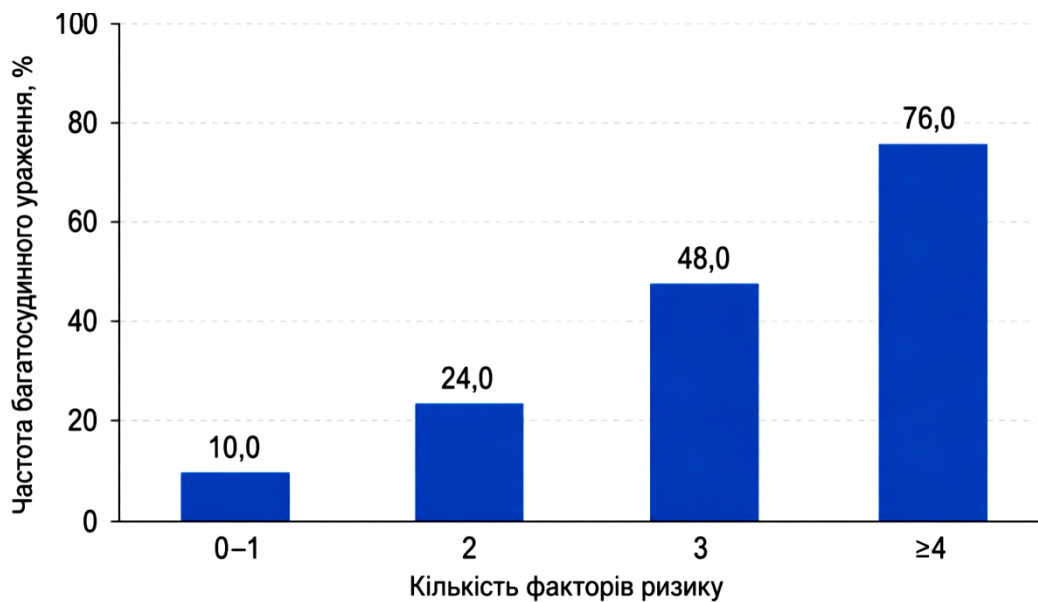


Рисунок 2.5 – Частота багатосудинного ураження залежно від кількості факторів ризику

2.1.5 Значення інформаційних ознак для інтелектуального аналізу даних

Використання структурованих інформаційних ознак дозволяє застосовувати сучасні методи інтелектуального аналізу даних: експертні системи; нейронні мережі; дерева рішень; байєсівські моделі; методи машинного навчання; нечітку логіку [120.121].

На основі аналізу інформаційних ознак система може автоматично визначати рівень ризику ураження коронарних судин, прогнозувати ймовірність багатосудинного ураження та формувати рекомендації щодо подальшої діагностики чи лікування.

На рисунку 2.6 представлено кореляційні зв’язки між основними інформаційними ознаками та сумарним балом стенозу коронарних артерій. Найбільш виражений зв’язок із тяжкістю ураження виявлено для рівня холестерину ліпопротеїнів низької щільності, віку, артеріальної гіпертензії та стажу куріння. Отримані результати підтверджують доцільність використання зазначених показників у моделях прогнозування ризику.

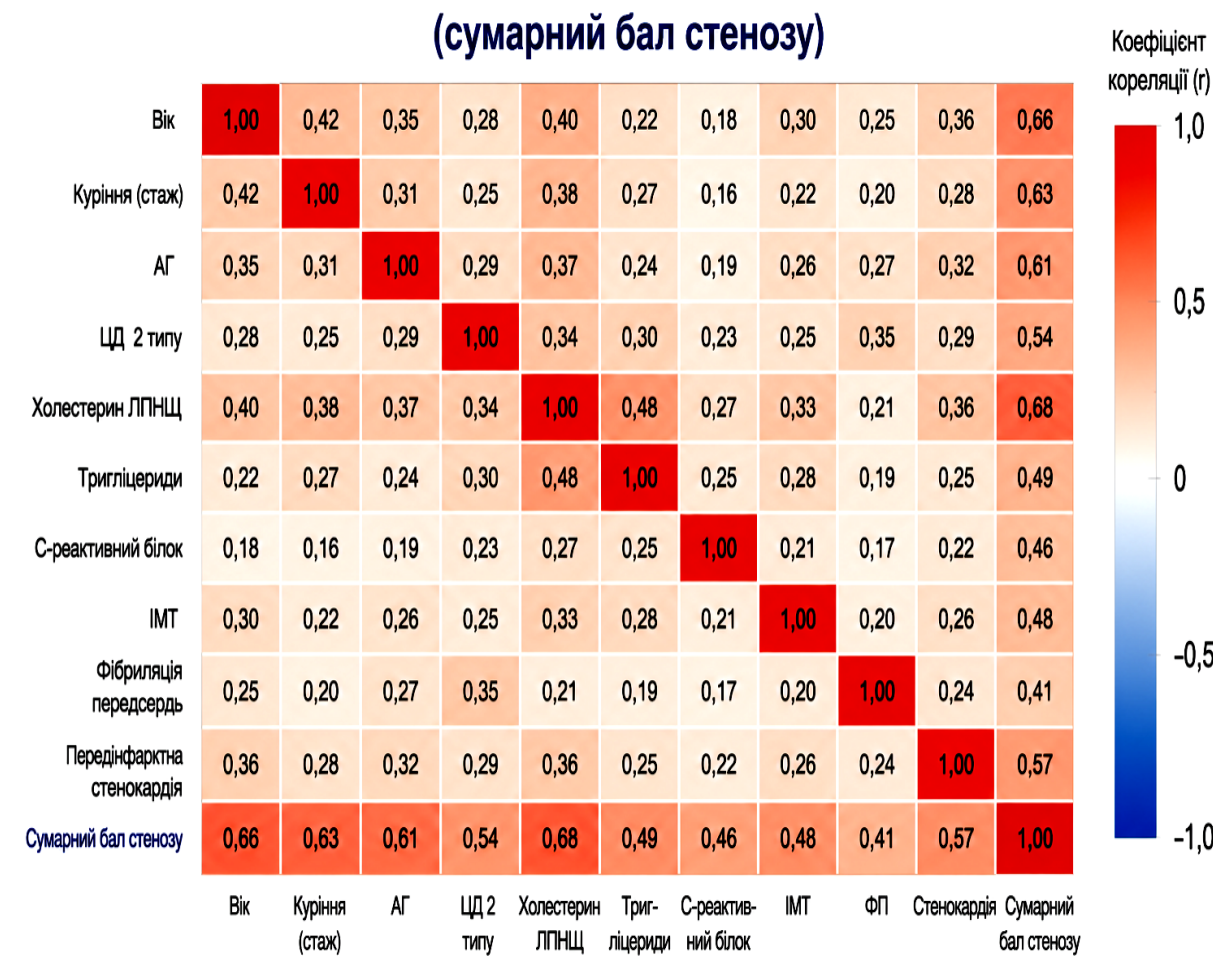


Рисунок 2.6 – Карта кореляцій інформаційних ознак із тяжкістю ураження коронарних артерій

На рисунку 2.7 наведено приклад алгоритму дерева рішень, що використовується для прогнозування ризику гемодинамічно значущого ураження коронарних судин. У моделі враховано такі інформаційні ознаки,

як вік, стаж куріння, артеріальна гіпертензія, рівень холестерину ЛПНЩ та наявність цукрового діабету 2 типу. Запропонований підхід дозволяє автоматизувати процес стратифікації ризику та підтримки клінічних рішень [78,130-135].

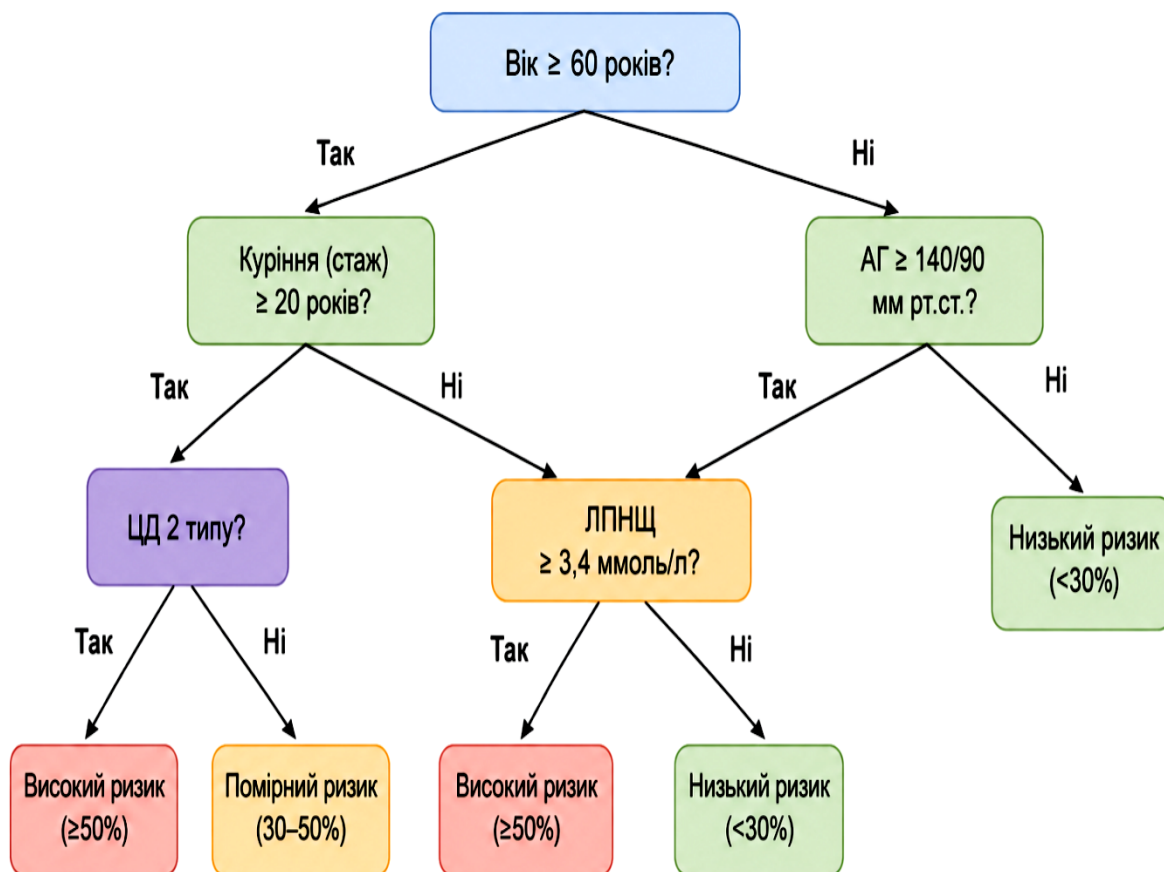


Рисунок 2.7 – Приклад дерева рішень для прогнозування гемодинамічно значущого стенозу ($\geq 50\%$)

Таким чином, інформаційні ознаки є фундаментальною складовою створення баз знань для оцінювання ризику ураження коронарних судин. Їх правильний вибір, стандартизація та формалізація забезпечують підвищення точності прогнозування, оптимізацію клінічних рішень і створюють підґрунтя для впровадження сучасних інтелектуальних технологій у кардіологічну практику [156-162].

2.2 Особливості розроблення біотехнічної експертної системи для оцінювання ризику ураження коронарних артерій

У біотехнічних інтелектуалізованих системах обробка даних та знань зводиться до трьох основних етапів [135-141]:

1. Елементи інформації розміщуються у певних рубриках, які мають вигляд параметрів та діагнозів;
2. Бази зібраних даних та теоретичних знань упорядковуються - формується їх структура, визначається порядок розміщення інформації та характер взаємозв'язку між елементами інформації;
3. Здійснюється вибір найбільш необхідної інформації, приймається рішення, редагується база знань та база даних.

По суті, прийняття рішення зводяться до ідентифікації нелінійних об'єктів з одним виходом та багатьма входами [135].

У БІС для обробки інформації використовуються два підходи до організації медичних даних [150]:

- Фрагментування;
- Комплексування.

При фрагментуванні задача обробки даних підрозділяється на окремі частини з метою більш ефективного її розв'язання.

При комплексуванні для вирішення окремих задач параметри об'єднуються в більш великі розділи.

На практиці в БІС знаходять застосування обидва підходи, оскільки дані різних досліджень тісно пов'язані між собою. Результати обробки використовуються для верифікації діагнозу, вибору методів лікування, прогностичних висновків тощо.

При розробці медичних діагностично-інформаційних систем велике значення має аналіз параметрів, які використовує сучасна медицина.

При розробці БІС необхідно розв'язати ряд завдань, а саме [135,136,160]:

- вибір та визначення призначення системи;
- вибір структурної схеми системи;
- формування та аналіз переліку нозологічних форм, які будуть вивчатись, збір статистично достовірної інформації про наявність симптоматики, а також про функціональний стан організму;
- вибір методу оброблення біомедичної інформації;
- побудова алгоритму для розв'язання задач оцінювання біомедичної інформації та формування діагностичного і прогностичного висновків.

Проектування МІС буде високоякісним лише у випадку, коли дослідження проводить досвідчений лікар-діагност. Таке дослідження може проектуватись групою кваліфікованих експертів у даній галузі діагностики.

Базова структура БІТ представлена на рис. 2.8, демонструє наявність у інтерфейсу комп'ютерної програми з двома функціями: отримання знань у експерта та ведення діалогу з користувачем.

У роботі будується БІС система шляхом проектування та налаштування нечітких баз знань, які являють собою сукупність лінгвістичних висловлювань типу: якщо <входи>, то <виходи>.

Захворювання проявляється у вигляді тих чи інших ознак. За наявністю, ступенем прояву та за сукупністю ознак приймається рішення про рівень ураження коронарних артерій серця.

При проведенні вимірів медичного характеру можна умовно виділити дві ситуації, відповідно до того, використовуються при вимірах фізичні моделі чи ні.

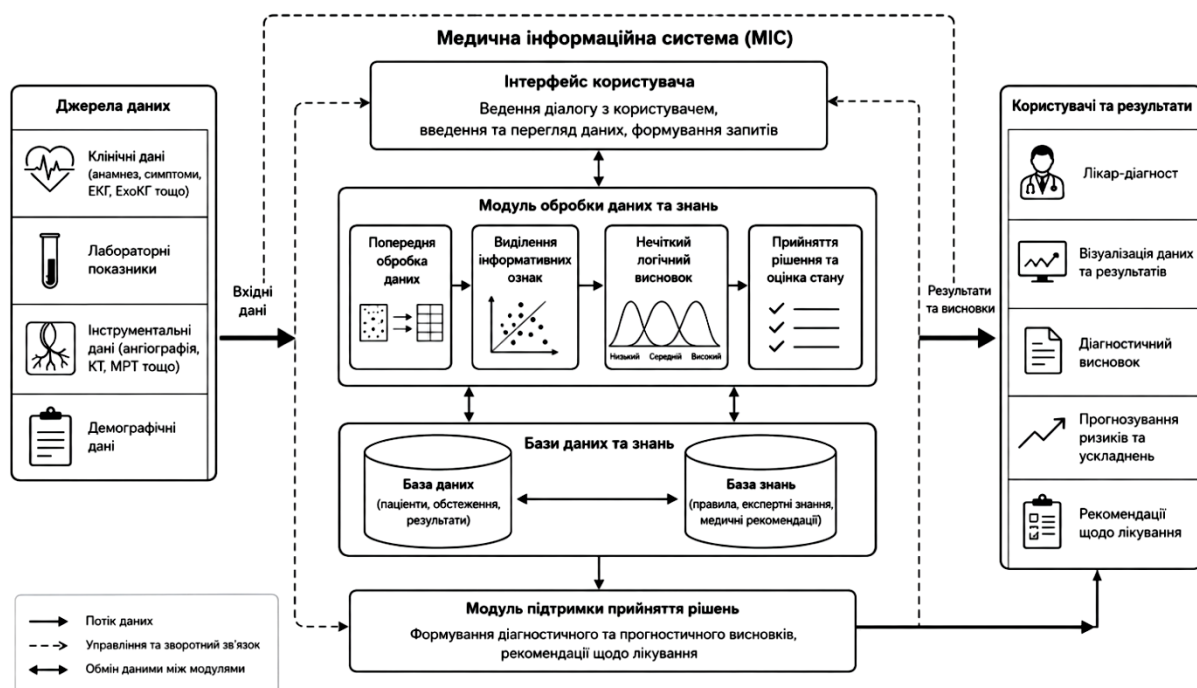


Рисунок 2.8 – Базова структура біотехнічної інтелектуалізованої системи

У медичних вимірах, проведених із застосуванням фізичних вимірювальних приладів, беруть участь чотири об'єкти: вимірювальний прилад, пацієнт, лікар, умови, при яких проводяться виміри.

Кожний з цих об'єктів є джерелом похибок вимірів, оскільки від точності вимірів фізіологічних характеристик залежить, у кінцевому рахунку, достовірність діагностування [140-147].

Таким чином, у статті розглянуто базову структуру БІС та висунуті основні рекомендації щодо її проектування, а саме: вибір та призначення системи; вибір структурної схеми системи; формування та аналіз переліку нозологічних форм, збір статистично достовірної інформації про вираженість симптоматики; вибір методу оброблення біомедичної інформації; побудова алгоритму для розв'язання задач оцінювання біомедичної інформації та формування діагностичного і прогностичного висновків [120,121].

2.3 Рекомендації побудови біотехнічної інтелектуалізованої системи ангіографічного аналізу коронарних судин

Основною проблемою аналізу ангіографічних зображень є наявність шумів, нерівномірного контрасту, артефактів руху та складної геометрії судинного дерева. Для підвищення точності діагностики використовуються методи цифрової обробки зображень, сегментації та штучного інтелекту. Ангіографія коронарних судин є одним із найбільш інформативних методів діагностики ішемічної хвороби серця та стенотичних уражень судинного русла. Метод базується на рентгенконтрастному дослідженні коронарних артерій після введення контрастної речовини, що дозволяє оцінити анатомічну структуру судин, локалізацію стенозів та ступінь порушення кровотоку [146-149].

Структура інтелектуалізованої біотехнічної системи підтримки прийняття рішень для оцінювання ризику ураження коронарних артерій наведена на рисунку 2.9.

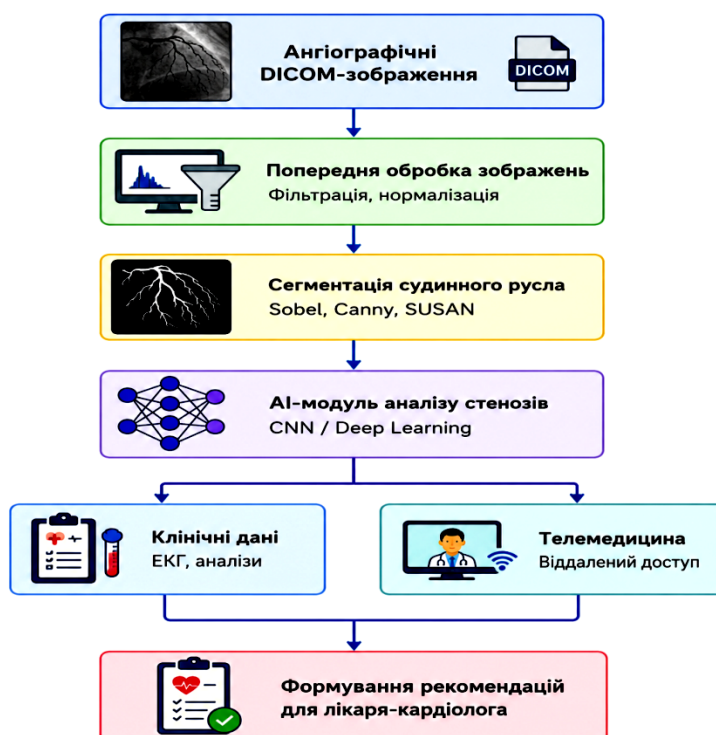


Рисунок 2.9 – Структура інтелектуалізованої біотехнічної системи для оцінювання ризику ураження коронарних артерій

2.3.1 Попередня обробка ангіографічних зображень

Попередня обробка ангіографічних зображень є необхідним етапом підвищення якості візуалізації коронарних судин та підготовки даних до сегментації. Основними задачами попередньої обробки є: зменшення шумів; підвищення контрастності; виділення меж судин; нормалізація яскравості; покращення локалізації стенозів.

На рис. 2.10 представлено основні етапи і методи обробки та розпізнавання біомедичних ангіографічних зображень

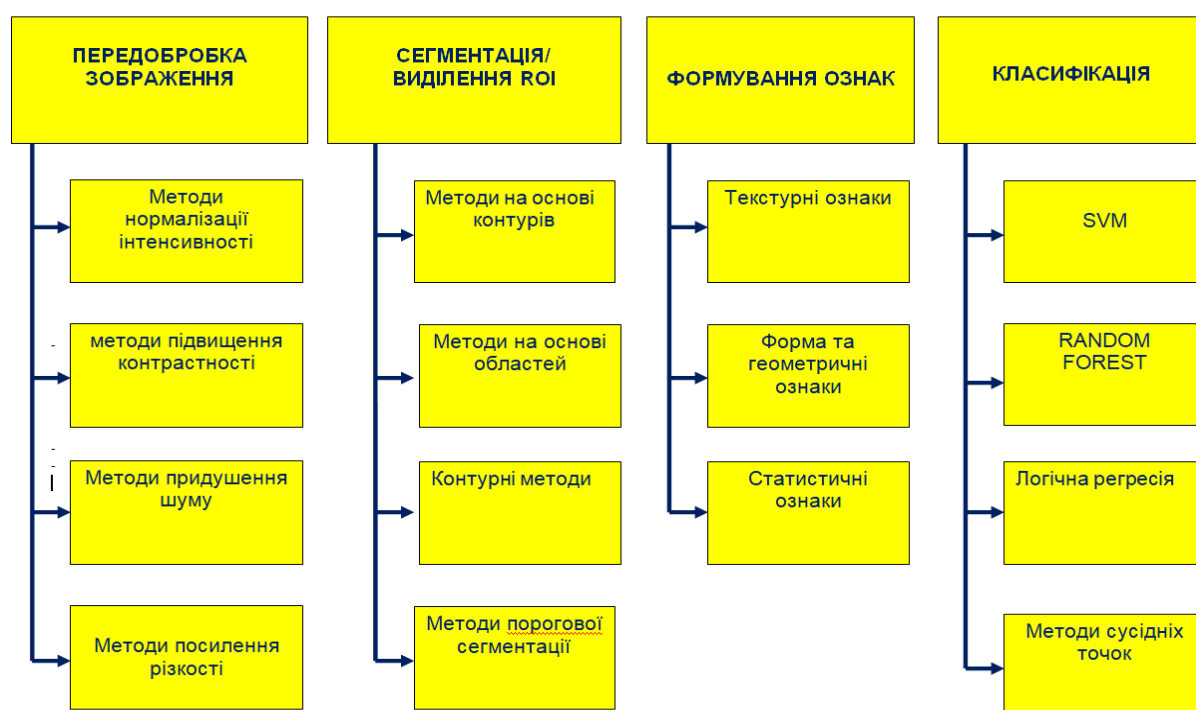


Рисунок 2.10 – Основні етапи і методи обробки та розпізнавання біомедичних ангіографічних зображень

Для оброблення біомедичних агіографічних зображень доцільно використовувати методи Собела, Робертса, Кирша, Уолесса та SUSAN.

Основні етапи попередньої обробки (рис. 2.11):

1. Фільтрація шумів.
2. Контрастування судин.
3. Виділення контурів.

4. Морфологічна обробка.
5. Сегментація судинного дерева.

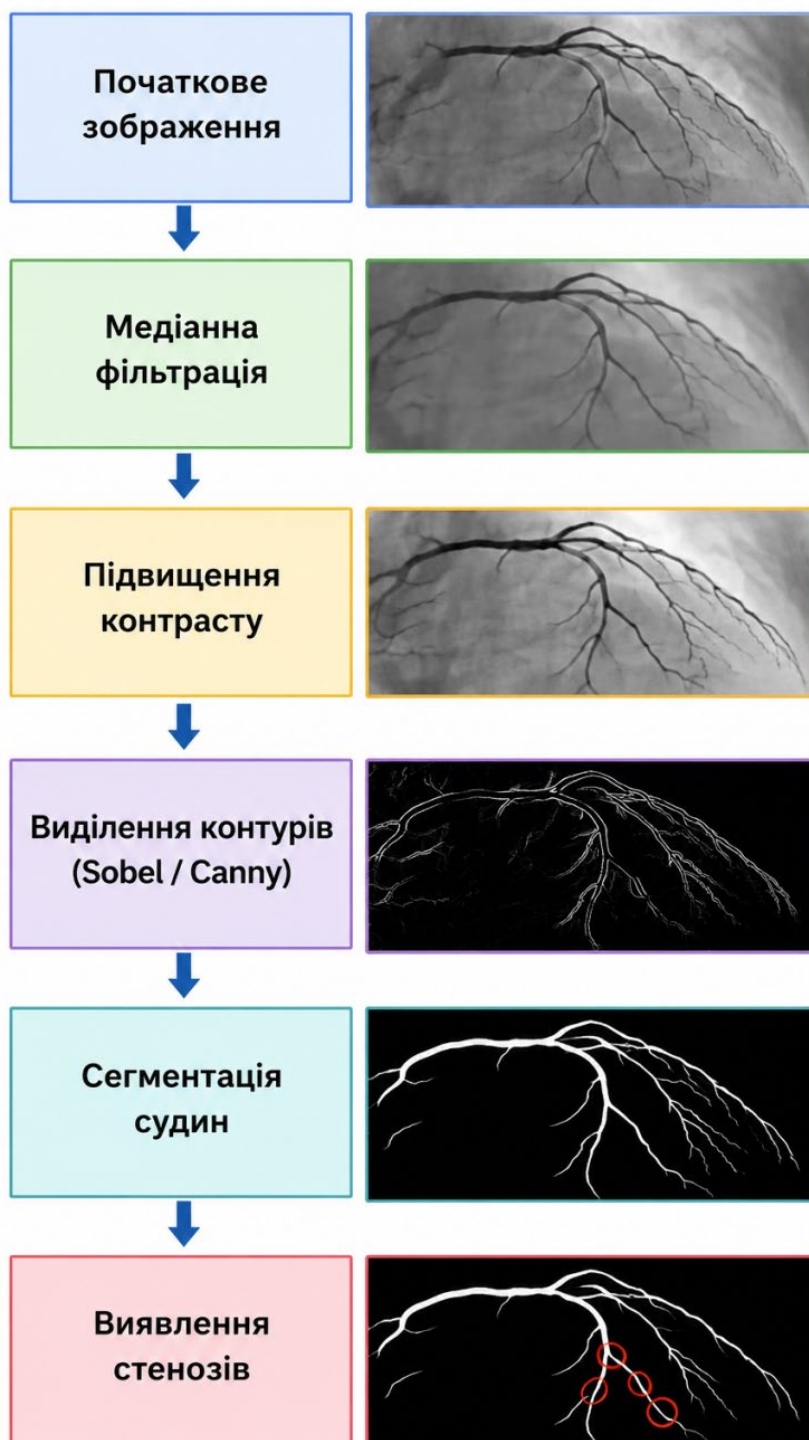


Рисунок 2.11 – Етапи цифрової обробки ангіографічного зображення

2.3.2 Методи сегментації коронарних судин

Одним із ключових етапів комп'ютерного аналізу ангіографічних зображень коронарних артерій є попередня обробка сигналу та фільтрація шумів. Якість вихідного зображення безпосередньо впливає на точність сегментації судинного русла, визначення меж стенозу та подальше оцінювання ступеня ураження коронарних артерій. У процесі отримання ангіографічних зображень можуть виникати різноманітні артефакти, спричинені особливостями рентгенівської системи, рухом пацієнта, неоднорідністю контрастування судин та впливом електронних шумів. Тому застосування ефективних методів фільтрації є необхідною умовою для підвищення інформативності медичних зображень [146-151].

Для виділення контурів коронарних судин широко використовується оператор Собеля. Даний метод належить до градієнтних фільтрів і дозволяє визначати різкі зміни яскравості між сусідніми пікселями зображення. Основною перевагою оператора Собеля є його простота реалізації та висока ефективність при виявленні меж судинних структур.

Фільтр Собеля задається матрицею згортки:

$$M_{Sobel} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

Застосування цієї матриці дозволяє оцінити градієнт зміни інтенсивності яскравості у горизонтальному або вертикальному напрямках. У результаті формується контурне зображення, на якому межі судин мають найбільші значення градієнта. Це особливо важливо при автоматизованому визначенні просвіту коронарної артерії та локалізації стенотичних ділянок.

Під час обробки ангіографічних даних також важливим є оцінювання локальних статистичних характеристик зображення. Для цього

у ковзному вікні визначаються середнє значення яскравості та дисперсія інтенсивності. Середнє значення яскравості обчислюється за формулою:

$$\mu = \frac{1}{mn} \sum_{x,y \in \eta} a(x, y),$$

де $a(x, y)$ — значення яскравості пікселя, m та n — розміри області аналізу, η — локальна область ковзного вікна.

Дисперсія яскравості визначається як:

$$\sigma^2 = \frac{1}{mn} \sum_{x,y \in \eta} a^2(x, y) - \mu^2.$$

Розрахунок цих параметрів дозволяє оцінювати локальну неоднорідність зображення та адаптивно змінювати параметри фільтрації. Використання статистичних характеристик є особливо ефективним для пригнічення шумів при збереженні меж судинних структур.

Для додаткового усунення імпульсних шумів застосовується медіанна фільтрація. Медіанний фільтр є нелінійним методом обробки сигналів, який забезпечує високу ефективність при видаленні випадкових шумів. На відміну від лінійних методів, медіанна фільтрація дозволяє зберігати контури та дрібні структурні елементи судинного русла.

Вихідний сигнал медіанного фільтра формується шляхом сортування значень яскравості у межах ковзного вікна та вибору медіанного значення:

$$y_m = \text{med}(x_{m-n}, x_{m-n+1}, \dots, x_{m-1}, x_m, x_{m+1}, \dots, x_{m+n})$$

У даному випадку y_m є результатом медіанної фільтрації, а x_m значеннями вхідного сигналу у межах локального вікна шириною $2n+1$.

Після визначення локальних статистичних параметрів здійснюється адаптивне коригування яскравості пікселів:

$$b(x, y) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2} (a(x, y) - \mu),$$

де $b(x,y)$ – скориговане значення яскравості, σ^2 – дисперсія шуму, μ – локальне середнє значення яскравості.

Застосування адаптивної фільтрації дозволяє суттєво покращити якість ангіографічних зображень, підвищити контрастність судин та зменшити вплив шумів. Це створює передумови для більш точного автоматизованого аналізу стану коронарного русла [178,179].

Комбіноване використання оператора Собеля, статистичної обробки та медіанної фільтрації дозволяє реалізувати багаторівневу систему попередньої обробки медичних зображень. Такий підхід забезпечує ефективне виділення судинних структур, зменшення рівня шумів та покращення якості сегментації коронарних артерій.

У сучасних інтелектуалізованих біотехнічних системах оцінювання ризику ураження коронарних судин попередня фільтрація зображень є одним із найважливіших етапів. Саме від якості обробки первинних ангіографічних даних залежить точність роботи алгоритмів машинного навчання, нейронних мереж та систем підтримки прийняття клінічних рішень. Високоякісна попередня обробка дозволяє підвищити достовірність визначення ступеня стенозу, локалізації атеросклеротичних бляшок та прогнозування ризику розвитку ішемічної хвороби серця.

Таким чином, використання сучасних методів фільтрації та адаптивної обробки ангіографічних зображень є важливою складовою побудови ефективних систем комп'ютерної діагностики у кардіології. Отримані результати використані для автоматизованого аналізу коронарного русла, підвищення точності діагностики та оптимізації лікувальної тактики у пацієнтів із серцево-судинними захворюваннями.

Для виділення меж коронарних артерій використовуються градієнтні методи, оператори диференціювання та інтелектуальні алгоритми сегментації (2.12). Найбільш поширеними є: оператор Собеля;

оператор Робертса; детектор Canny; метод SUSAN; активні контури (Snake-моделі).

Оператор Собела забезпечує ефективне виділення границь при помірному рівні шуму.

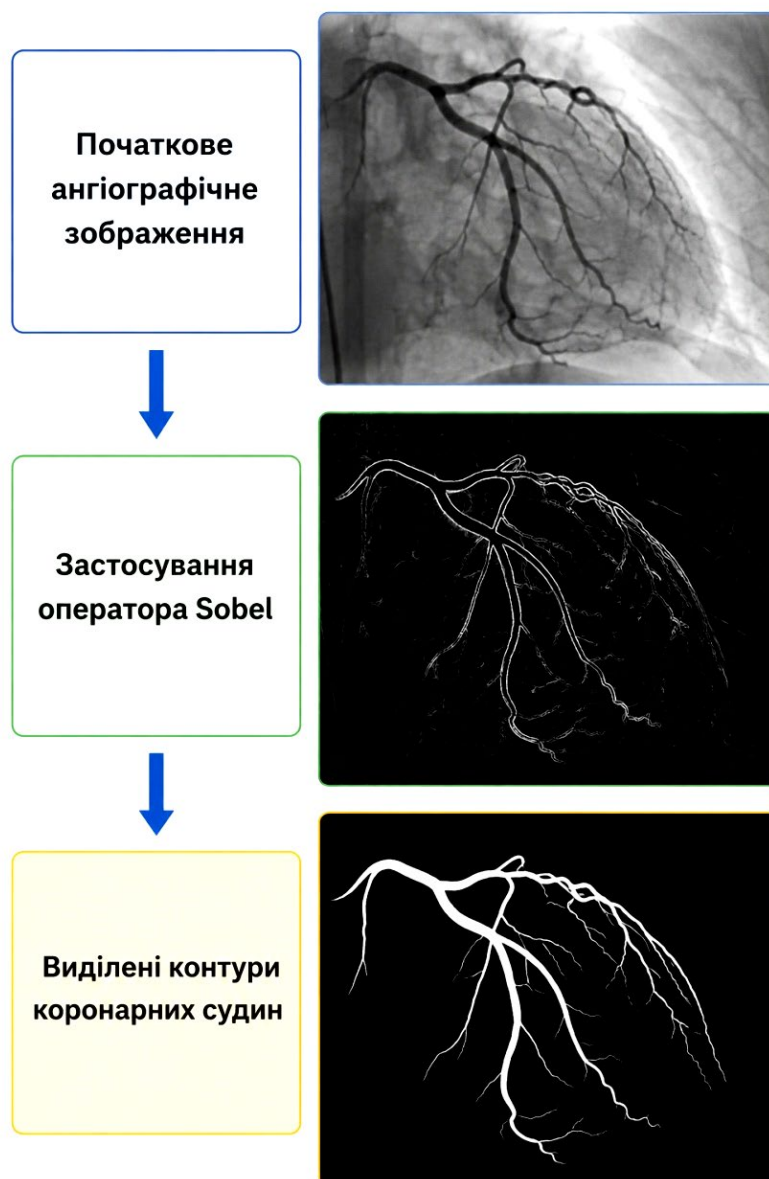


Рисунок 2.12 – Результат сегментації коронарних судин методом Sobel

Реалізація методів фільтрації при обробленні ангиографічних зображень коронарних судин представлена на рис. 2.13 на основі розробленої програми.

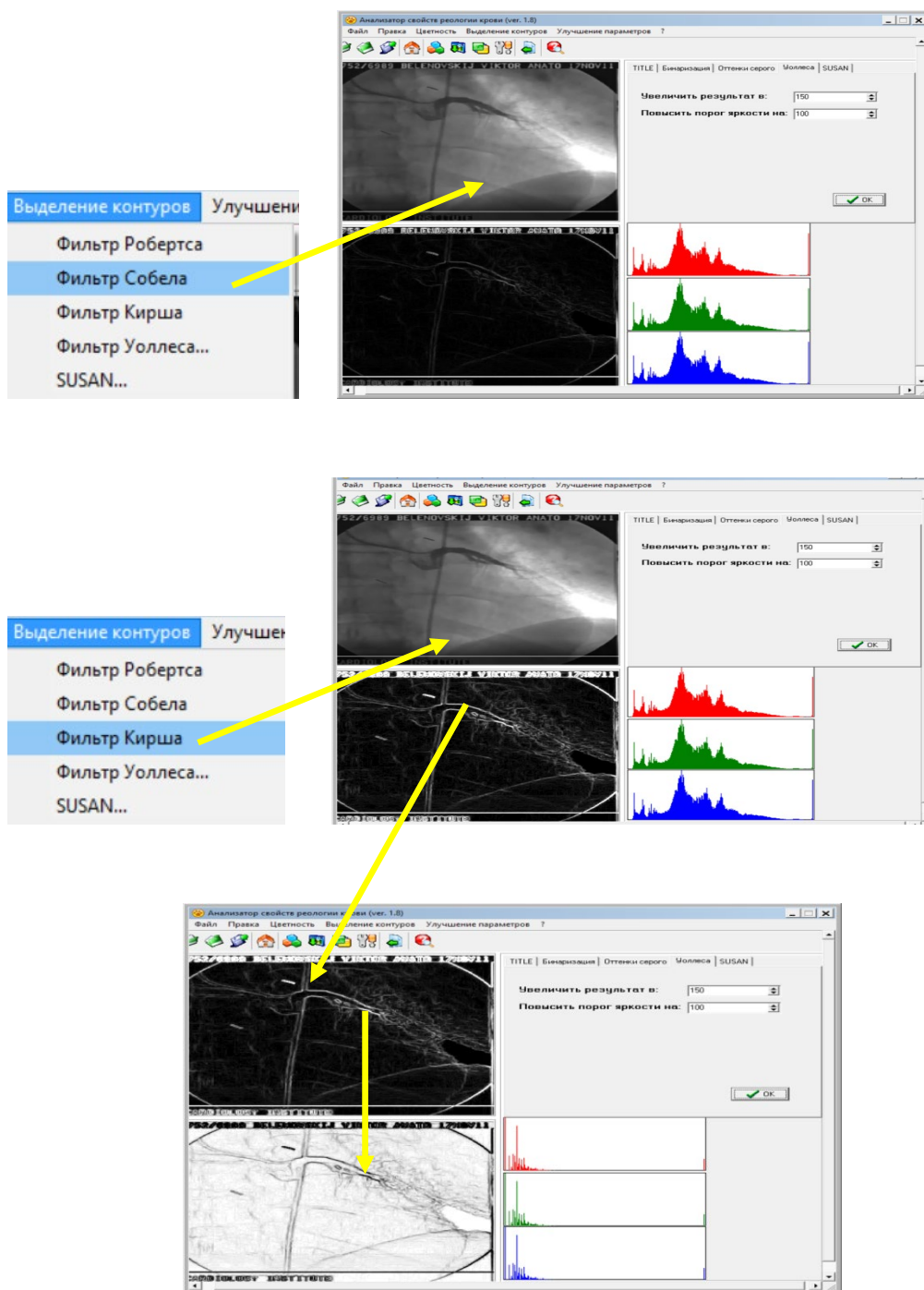


Рисунок 2.13 – Реалізація методів фільтрації при обробленні
ангіографічних зображень коронарних судин

Для оцінювання якості сегментації коронарних судин використовуються кількісні критерії, що дозволяють визначити точність виділення меж судинних структур, ступінь структурної подібності та

похибку визначення геометричних параметрів об'єктів. Комплексне застосування декількох критеріїв забезпечує об'єктивне оцінювання ефективності алгоритмів сегментації ангиографічних зображень.

Одним із найбільш поширених критеріїв оцінювання якості виділення контурів є критерій Пратта (Figure of Merit, FOM). Даний показник характеризує точність локалізації меж об'єктів та враховує відстань між еталонними і виявленими контурами.

Математично критерій Пратта визначається за формулою

$$FOM = \frac{1}{\max(N, N_{ideal})} \sum_{i=1}^N \frac{1}{1 + \alpha d_i^2},$$

де: N — кількість точок еталонного контуру; N_{ideal} — кількість точок ідеального контуру; $\dot{N}$ — кількість правильно визначених контурних точок; d_i — відстань між реальною та еталонною контурними точками; α — коефіцієнт масштабування похибки.

Значення критерію FOM знаходиться у межах від 0 до 1. Чим ближче значення до одиниці, тим вищою є точність сегментації та якість виділення меж коронарних судин.

Для оцінювання точності визначення розмірів сегментованих об'єктів використовується відносна похибка

$$T = \frac{|L_{em} - L_{ee}|}{L_{em}} \times 100\%,$$

де L_{em} — еталонне значення розміру об'єкта; L_{ee} — експериментально визначений розмір об'єкта.

Даний критерій дозволяє оцінити точність визначення діаметра судини, довжини стенозу або площі просвіту коронарної артерії. Менше значення похибки свідчить про вищу точність сегментації та кращу відповідність результатів еталонним даним.

Для оцінювання структурної схожості між сегментованим та еталонним зображенням використовується індекс структурної подібності SSIM (Structural Similarity Index Measure):

$$SSIM = \left(\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \right) \left(\frac{2\bar{X}\bar{Y}}{\bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right) \left(\frac{2\sigma_x \sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \right),$$

де: $\bar{X}$ та $\bar{Y}$ – середні значення яскравості зображень; σ_x та σ_y – середньоквадратичні відхилення; σ_{xy} – коваріація між зображеннями.

Індекс SSIM враховує яскравість, контраст та структурну подібність зображень. Значення критерію знаходиться в інтервалі від 0 до 1. Значення, близькі до одиниці, свідчать про високу якість сегментації та мінімальні структурні спотворення.

Для інтегрального оцінювання ефективності методів сегментації доцільно використовувати комплексний критерій

$$K = T^{-1} \times FOM \times SSIM$$

де T^{-1} – обернене значення похибки визначення розмірів; FOM – критерій Пратта; $SSIM$ – індекс структурної подібності.

Комплексний критерій дозволяє одночасно врахувати точність локалізації контурів, структурну відповідність сегментованого зображення та похибку визначення геометричних параметрів. Збільшення значення критерію K свідчить про підвищення ефективності алгоритму сегментації.

Використання наведених критеріїв є важливим етапом побудови інтелектуалізованих систем аналізу ангіографічних зображень. Комплексне оцінювання дозволяє порівнювати ефективність різних методів сегментації, оптимізувати параметри алгоритмів та підвищувати точність автоматизованого визначення патологічних змін коронарного русла.

Результати кількісної оцінки якості методів сегментації ангіографічних зображень оцінювання стану коронарних судин представлено в табл. 2.1

Таблиця 2.1

Кількісна оцінка якості методів сегментації ангіографічних зображень оцінювання стану коронарних судин

Метод	Критерій SSIM	Критерій FOM	Критерій T	Критерій k
Кірша	0,718	0,78	0,042	13,33
Робертса	0,60	0,73	0,041	10,69
Собеля	0,64	0,82	0,037	14,18
Уолесса	0,47	0,68	0,033	9,68
SUSAN	0,58	0,70	0,035	4,71

2.3.3 Особливості інтелектуалізованого аналізу стенозів коронарних артерій

Після сегментації судинного дерева виконується автоматизований аналіз ступеня звуження судин. Для цього використовуються методи машинного навчання та нейронні мережі (рис 2.14).

Система аналізує: діаметр судини; площу просвіту; довжину стенозу; гемодинамічні показники; ризик ішемії.

На основі отриманих параметрів формується висновок щодо ступеня стенозу та рекомендації для лікаря.



Рисунок 2.14 – Схема AI-аналізу коронарного стенозу

2.4 Розробка математичних моделей для оцінювання біомедичних зображень з використанням методів нечітких множин щодо оцінювання ступеня анатомічного ураження коронарних артерій

Концепція прогнозування характеру ураження коронарних артерій за допомогою клінічних та різних неінвазивних маркерів [64,65].

Вирізняють такі типи кровопостачання міокарда: лівокоронарний тип, за якого більша частина серця кровопостачається гілками лівої коронарної артерії (*arteria coronaria sinistra*); правий коронарний тип, за якого більша частина серця кровопостачається гілками правої коронарної артерії (*arteria coronaria dextra*); середній тип, за якого коронарні артерії рівномірно постачають кров до серця; проміжний тип, він може бути:

- центрально-правий;
- середньо-лівий.

У разі правого типу кровопостачання серця 75% крові, що живить міокард, проходить через стовбур лівої коронарної артерії (TrLCA), з лівої – майже 100%. У зв'язку з цим пацієнти з гемодинамічно значущим ураженням лівого шлуночка мають високий ризик смерті та дисфункції лівого шлуночка та аритмій. Анатомічно TrЛКА поділяється на гирлову, середню та дистальну частини. Середній діаметр ЛКА, за даними ангіографії, становить $4,5 \pm 0,5$ мм для чоловіків та $3,9 \pm 0,4$ мм для жінок. Однак описані спостереження, коли, за даними розтину, діаметр дефекту міжшлуночкової перегородки досягав 1 см у осіб зі здоровим серцем [1]. За даними коронарної ангіографії (КАГ), ураження TrЛКА зустрічаються у 4–8% пацієнтів з ішемічною хворобою серця (ІХС) [64, 65].

Більшість даних, представлених у літературі щодо ураження коронарних артерій у пацієнтів з інфарктом міокарда без підйому сегмента ST, свідчать про те, що у 10-20% пацієнтів є інтактні коронарні артерії, у 30-35% випадків спостерігається ураження однієї, у 25-30% - 2 артерій, а у 5-10% - ураження стовбура TrЛКА різного ступеня [8, 22, 64, 65]. З іншого

боку, низка досліджень демонструє менш значущі зміни коронарних артерій у жінок, порівняно з чоловіками, при різних формах гострого коронарного синдрому у всіх вікових групах [4, 25, 26]. Особливий інтерес представляють дослідження, які демонструють концепцію прогнозування характеру ураження коронарних артерій за допомогою клінічних та різних неінвазивних маркерів, що дозволяє стратифікувати ризики у пацієнтів щодо інвазивного лікування за допомогою простих та доступних методів дослідження [64,65]

На основі комплексного обстеження 165 пацієнтів з різними формами ішемічної хвороби серця (ІХС) з/та без гіпертензії (АГ) віком від 35 до 79 років (в середньому $60,7 \pm 0,8$, медіана – 61, міжквартильний розмах – 54 та 69) експерти проаналізували особливості анатомічного ураження коронарних артерій у пацієнтів з різними формами ІХС (див. таблицю 1). Серед обстежених пацієнтів 114 (69,1%) були чоловіками та 51 (30,9%) – жінками відповідно. Співвідношення чоловіків та жінок становило 2,2 до 1,0 ($\chi^2=48,1$; $p<0,0001$), що свідчить про значну перевагу пацієнтів чоловічої статі. (Дослідження проводилися на базі Вінницького національного медичного університету ім.. М. Пирогова) [64,65]

Як підстава для включення пацієнтів до дослідження враховувалися такі критерії:

1. стабільні та гострі форми захворювання коронарних артерій (стабільна стенокардія II-III ФК, нестабільна стенокардія та гострий інфаркт міокарда з підйомом сегмента ST та без нього);
2. гострий інфаркт міокарда лівого шлуночка (ЛШ), що виник вперше (за відсутності інфаркту міокарда в анамнезі);
3. вік пацієнтів від 30 до 80 років.

Таблиця 2.2

**Особливості анатомічного ураження коронарного русла в
пацієнтів з різними формами ІХС**

Особливості анатомічного ураження коронарного русла	Клінічні форми ІХС			
	1. ІМбелST	2. НС	3. ІМелST	4. СтН
1	2	3	4	5
Кількість хворих	90	25	25	25
Наявність а/б в басейні стовбуру ЛКА	9 (10,0%)	1 (4,0%)	4 (16,0%)	2 (8,0%)
Наявність ГЗС в стовбурі ЛКА	-	-	-	-
Наявність а/б в басейні ДГ або ПМШГ ЛКА	62 (68,9%)	8 (32,0%)	21 (84,0%)	8 (32,0%)
<i>P</i> за критерієм χ^2	p1-2=0,001; p1-4=0,001; p2-3<0,0001; p3-4<0,0001			
Наявність ГЗС в басейні ДГ або ПМШГ ЛКА	56 (62,2%)	8 (32,0%)	15 (60,0%)	6 (24,0%)
<i>P</i> за критерієм χ^2	p1-2=0,007; p1-4=0,001; p2-3=0,047; p3-4=0,01			
Тяжкість стенозу в балах	2,57±0,07	2,15±0,13	2,64±0,12	2,00±0,17
<i>One-way ANOVA & LSD test</i>	p1-2=0,006; p1-4=0,003; p2-3=0,008; p3-4=0,003			

Продовження таблиці 2.2

Наявність ГЗС в басейні ОГ ЛКА	32 (35,6%)	2 (8,0%)	12 (48,0%)	6 (24,0%)
<i>P за критерієм χ^2</i>	p1-2=0,0006; p2-3=0,002			
Наявність ГЗС в басейні ОГ ЛКА	32 (35,6%)	2 (8,0%)	7 (28,0%)	5 (20,0%)
<i>P за критерієм χ^2</i>	p1-2=0,008			
Тяжкість стенозу в балах	2,42±0,18	2,50±0,50	2,08±0,23	2,00±0,26
Наявність а/б в басейні ПКА	29 (32,2%)	2 (8,0%)	18 (72,0%)	6 (24,0%)
<i>P за критерієм χ^2</i>	p1-2=0,02; p1-3<0,0001; p2-3<0,0001; p3-4=0,001			
Наявність ГЗС в басейні ПКА	22 (24,4%)	0 (0)	16 (64,0%)	5 (20,0%)
<i>P за критерієм χ^2</i>	p1-2=0,006; p1-3<0,0001; p2-3<0,0001; p2-4=0,02; p3-4=0,002			
Тяжкість стенозу в балах	2,23±0,12	1,00±0	2,11±0,14	2,00±0,26
<i>One-way ANOVA & LSD test</i>	p1-2<0,0001; p2-3<0,0001; p2-4=0,0003			
Відсутність ГЗС КА	13 (14,4%)	16 (64,0%)	0 (0)	15 (60,0%)
<i>P за критерієм χ^2</i>	p1-2<0,0001; p1-3=0,04; p1-4<0,0001; p2-3<0,0001; p3-4<0,0001			
ГЗ односудинне ураження	55 (61,1%)	8 (32,0%)	14 (56,0%)	6 (24,0%)
<i>P за критерієм χ^2</i>	p1-2=0,01; p1-4=0,001 p3-4=0,02			
ГЗ двохсудинне ураження	16 (17,8%)	1 (4,0%)	9 (36,0%)	2 (8,0%)

Продовження таблиці 2.2

<i>P</i> за критерієм χ^2	<i>p</i> 1-3=0,05; <i>p</i> 2-3=0,005 <i>p</i> 3-4=0,02			
ГЗ трьохсудинне ураження	9 (10,0%)	0 (0)	2 (8,0%)	2 (8,0%)
Тяжкість ураження КА, сумарний бал	3,66±0,20	2,50±0,43	4,32±0,35	3,64±0,43
<i>P</i> заone-way ANOVA & LSD test	<i>p</i> 1-2=0,02; <i>p</i> 2-3=0,002			

Примітки

a/b – атеросклеротичні бляшки, *ІМбезST* – інфаркт міокарда без елевації сегменту *ST*, *НС* – нестабільна стенокардія, *ІМелST* – інфаркт міокарда з елевацією сегмента *ST*, *СтН* – стабільна стенокардія напруги, *КА* – коронарні артерії, *ГКЗ* – гемодинамічно значимий стеноз (> 50%), *ЛКА* – ліва коронарна артерія, *ДГ* – діагональна і *ПМШГ* – передня міжшлуночкова гілка лівої коронарної артерії, *ПКА* – права коронарна артерія, *ОГ ЛКА* – огинаюча гілка лівої коронарної артерії [64,65]

Аналіз основних клінічних характеристик пацієнтів з інфарктом міокарда без підйому сегмента *ST* (див. таблицю 2.2) показав, що у 85,5% обстежених спостерігалася ГШ тривалістю від 7 до 25 (в середньому 15,5±0,41) років. У 43,0% пацієнтів інструментально підтверджена (згідно з медичними документами) стабільна стенокардія напруги I-III ступеня з анамнезом від 1 до 15 (в середньому 7,0±0,44) років до гострого інфаркту міокарда спостерігалася. Постійна форма фібриляції передсердь зареєстрована у 11,5% обстежених, анамнез стійкості аритмії коливався від 1 до 7 років і в середньому становив 4,4±0,39 років. 12,5% пацієнтів з інфарктом міокарда без підйому сегмента *ST* мали в анамнезі цукровий діабет II типу, а 42,0% мали такий фактор ризику, як куріння. Водночас переважна більшість (80,0%) цих пацієнтів курили на момент інфаркту

міокарда, і лише 20,0% були курцями в минулому (період відмови від цієї звички не перевищував 2 років). Загальний стаж куріння коливався від 14 до 40 років і становив у середньому $29,5 \pm 0,84$ років [64,65].

Індекс маси тіла (ІМТ) досліджуваних пацієнтів варіювався від 19,3 до 47,6 і становив у середньому $28,6 \pm 0,36$ кг/м². Аліментарне ожиріння (ІМТ > 30 кг/м²) було визначено у 36,5% пацієнтів. Водночас ожиріння І ступеня (ІМТ - 30-35 кг/м²) було діагностовано у 25,5%, II (ІМТ - 35-40 кг/м²) - у 9,0% та III ступеня (ІМТ > 40 кг/м²) - лише у 2,0% випадків. У свою чергу, порівняльний аналіз основних характеристик пацієнтів залежно від статі (таблиця) показав, що серед чоловіків, порівняно з жінками, спостерігалось значне збільшення випадків куріння (52,1% проти 17,2%, $p < 0,0001$) та, відповідно, стажу куріння (29,6 проти 25,0 років, $p = 0,002$). З іншого боку, серед жінок, порівняно з чоловіками, спостерігалось значне збільшення випадків передінфарктної стенокардії (55,2% проти 38,0%, $p = 0,03$) та персистуючої фібриляції передсердь (22,4% проти 7,0%, $p = 0,002$). Останній факт не знайшов підтвердження в сучасній літературі, хоча ми вважаємо, що його можна пояснити значно більшою тривалістю життя жінок порівняно з чоловіками. Водночас існує тісний зв'язок між розвитком фібриляції передсердь з віком пацієнтів (табл. 2.3).

Таким чином, слід констатувати, що серед чоловіків з інфарктом миші без підйому сегмента ST частіше реєструється такий фактор ризику, як куріння, тоді як серед жінок – передінфарктна стенокардія та постійна форма фібриляції передсердь (ФП). На основі таблиці 2.2 сформована табл. 2.4 з визначенням мінімальних та максимальних значень факторів X1-X4. В нашому випадку X1 (Наявність а/б в басейні ДГ або ПМШГ ЛКА), X2 (Наявність а/б в басейні ОГ ЛКА), X3 (Наявність ГЗС в басейні ПКА), X4 (Відсутність ГЗС КА). Визначено основні клінічні форми ІХС (ІМ бел ST інфаркт міокарда без елевації сегменту ST $\mu^I(x_1x_2x_3x_4)$, НС – нестабільна стенокардія, $\mu^{II}(x_1x_2x_3x_4)$, ІМелST – інфаркт міокарда з елевацією сегмента ST $\mu^{III}(x_1x_2x_3x_4)$, СтН – стабільна стенокардія напруги $\mu^{IV}(x_1x_2x_3x_4)$) [64].

Таблиця 2.3

**Основні клінічні характеристики пацієнтів ІМбелСТ в цілому
по групі і залежно від статі**

Клінічні характеристики (n=200)	Чоловіки (n=142)	Жінки (n=58)	P
ГХ, к-ть (%) n=171 (85,5%)	120 (84,5%)	51 (87,9%)	0,53
Тривалість ГХ, роки [7-25] 15,5±0,41	15,3±0,50	15,8±0,71	0,63
Стенокардії напруги I-III ФК до ІМ, к-ть (%) n=86 (43,0%)	54 (38,0%)	32 (55,2%)	0,03
Тривалість стенокардії, роки [1-15] 7,0±0,44	6,8±0,60	7,3±0,63	0,67
Постійна форма ФП, к-ть (%) n=23 (11,5%)	10 (7,0%)	13 (22,4%)	0,002
Тривалість постійної ФП, роки [1-7] 4,4±0,39	4,4±0,66	4,3±0,50	0,98
ЦД II, к-ть (%) n=25 (12,5%)	16 (11,3%)	9 (15,5%)	0,40
Куріння, к-ть (%) n=84 (42,0%)	74 (52,1%)	10 (17,2%)	<0,0001
Стаж активного куріння, роки [14-40] 29,5±0,84	29,6±0,75	25,0±1,01	0,002
Аліментарне ожиріння, к-ть (%) n=73 (36,5%)	51 (35,9%)	22 (37,9%)	0,78
I ступеня (ІМТ- 30-35 кг/м ²) n=51 (25,5%)	37 (26,1%)	14 (24,1%)	0,77
II ступеня (ІМТ- 35-40 кг/м ²)	12 (8,5%)	6 (10,3%)	0,67

Продовження таблиці 2.3

III ступеня (ІМТ > 40 кг/м ²) n=4 (2,0%)	2 (1,4%)	2 (3,4%)	0,34
ІМТ, кг/м ² [19,3-47,6] 28,6±0,36	28,4±0,41	29,0±0,74	0,42

Примітки

- ГХ – гіпертонічна хвороба, ІМ – інфаркт міокарда, ФП – фібриляція передсердь, ЦД – цукровий діабет II типу, ІМТ – індекс маси
- У квадратних скобках наведені мінімальне – максимальне значення показника - [min – max];
- Достовірність різниці відсотків між чоловіками і жінками розрахована за критерієм χ^2 і між середніми значеннями показників - за T-test for independent samples by groups [64,65]

На основі таблиці 2.2 сформована табл. 2.4 з визначенням мінімальних та максимальних значень факторів X1-X4. В нашому випадку X1 (Наявність а/б в басейні ДГ або ПМШГ ЛКА), X2 (Наявність а/б в басейні ОГ ЛКА), X3 (Наявність ГЗС в басейні ПКА), X4 (Відсутність ГЗС КА). Визначено основні клінічні форми ІХС (ІМ бел ST інфаркт міокарда без елевації сегменту ST $\mu^I(x_1x_2x_3x_4)$), НС – нестабільна стенокардія, $\mu^{II}(x_1x_2x_3x_4)$, ІМелST – інфаркт міокарда з елевацією сегмента ST $\mu^{III}(x_1x_2x_3x_4)$, СтН – стабільна стенокардія напруги $\mu^{IV}(x_1x_2x_3x_4)$)

З урахуванням діапазонів факторів X1-X4 було сформовано базу знань експертів, що базується на базах знань експертів.

Такий підхід дозволяє отримати чіткий числовий вираз для тих критеріїв, які мають описові характеристики та, відповідно, якісний зміст, наприклад, такі характеристики, як: L – низький, LA – нижче середнього; A – середній; HA – вище середнього, H – високий [31, 33] (див. таблицю 2.5).

Таблиця 2.4

Формування мінімальних та максимальних значень факторів X1-X4

Клінічні форми ІХС	Особливості анатомічного ураження коронарного русла			
	Наявність а/б в басейні ДГ або ПМШГ ЛКА X1	Наявність а/б в басейні ОГ ЛКА X2	Наявність ГЗС в басейні ПКА X3	Відсутність ГЗС КА X4
ІМ бел ST інфаркт міокарда без елевації сегменту ST $\mu^I(X_1X_2X_3X_4)$	2,57±0,07	2,42±0,18	2,23±0,12	3,66±0,20
НС – нестабільна стенокардія $\mu^{II}(X_1X_2X_3X_4)$	2,15±0,13	2,50±0,50	1,00±0	2,50±0,43
ІМелST – інфаркт міокарда з елевацією сегмента ST $\mu^{III}(X_1X_2X_3X_4)$	2,64±0,12	2,08±0,23	2,11±0,14	4,32±0,35
СтН – стабільна стенокардія напруги $\mu^{IV}(X_1X_2X_3X_4)$	2,00±0,17	2,00±0,26	2,00±0,26	3,64±0,43
	min/max 1,83÷2,76	min/max 1,74÷3,0	min/max 1,0÷2,35	min/max 2,07÷4,67

Таблиця 2.5

Формування бази даних

Клінічні форми ІХС	Особливості анатомічного ураження коронарного русла			
	X1	X2	X3	X4
ІМ бел ST інфаркт міокарда без елевації сегменту ST $\mu^I(X_1X_2X_3X_4)$	HA	A	L	A
	HA	HA	L	A
	HA	HA	L	HA
НС – нестабільна стенокардія $\mu^{II}(X_1X_2X_3X_4)$	LA	A	L	H
	A	HA	L	LA
	LA	HA	L	LA
	A	L	L	LA
ІМелST – інфаркт міокарда з елевацією сегмента ST $\mu^{III}(X_1X_2X_3X_4)$	HA	LA	HA	HA
	HA	LA	HA	H
	L	A	HA	H
СтН – стабільна стенокардія напруги $\mu^{IV}(X_1X_2X_3X_4)$	L	L	A	A
	LA	L	A	A
	L	LA	LA	LA
	LA	LA	LA	LA

Враховуючи діапазони факторів $X_1 \div X_4$ сформовано базу знань експертів на основі баз знань експертів.

На основі теорії нечітких множин сформовано рівняння для визначення рівня ураження коронарного русла.

$$\begin{aligned}
 \mu^{d1}(X_1, X_2, X_3, X_4) = & \mu^{HA}(X_1) \cdot \mu^A(X_2) \cdot \mu^L(X_3) \cdot \mu^A(X_4) \cdot \cup \\
 & \mu^{HA}(X_1) \cdot \mu^{HA}(X_2) \cdot \mu^L(X_3) \cdot \mu^A(X_4) \\
 & \cup \mu^{HA}(X_1) \cdot \mu^{HA}(X_2) \cdot \mu^L(X_3) \cdot \mu^{HA}(X_4);
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d2}(X_1, X_2, X_3, X_4) &= \mu^{LA}(X_1) \cdot \mu^A(X_2) \cdot \mu^L(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cdot \\
&\cup \mu^A(X_1) \cdot \mu^{HA}(X_2) \cdot \mu^L(X_3) \cdot \mu^{LA}(X_4) \cup \\
&\mu^{LA}(X_1) \cdot \mu^{HA}(X_2) \cdot \mu^L(X_3) \cdot \mu^{LA}(X_4) \cup \mu^A(X_1) \cdot \mu^L(X_2) \cdot \mu^L(X_3) \cdot \mu^{LA}(X_4);
\end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d3}(X_1, X_2, X_3, X_4) &= \mu^{HA}(X_1) \cdot \mu^{LA}(X_2) \cdot \mu^{HA}(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cdot \\
&\cup \mu^{HA}(X_1) \cdot \mu^{LA}(X_2) \cdot \mu^{HA}(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cup \\
&\mu^L(X_1) \cdot \mu^A(X_2) \cdot \mu^{HA}(X_3) \cdot \mu^H(X_4);
\end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\begin{aligned}
\mu^{d4}(X_1, X_2, X_3, X_4) &= \mu^L(X_1) \cdot \mu^L(X_2) \cdot \mu^A(X_3) \cdot \mu^A(X_4) \cdot \\
&\cup \mu^{LA}(X_1) \cdot \mu^L(X_2) \cdot \mu^A(X_3) \cdot \mu^A(X_4) \cup \\
&\mu^L(X_1) \cdot \mu^{LA}(X_2) \cdot \mu^{LA}(X_3) \cdot \mu^{LA}(X_4) \cup \mu^{LA}(X_1) \cdot \mu^{LA}(X_2) \cdot \mu^{LA}(X_3) \cdot \mu^{LA}(X_4);
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Кожен із вищезгаданих термів є нечіткою множиною, що задається за допомогою спеціальних функцій належності та може бути представлений певним інтервалом, що має свої цифрові ступені від 0 до 1. Абсолютна нечітка належність до множини підтверджується 0, тоді як абсолютна належність підтверджується 1.

Відповідні функції належності для формалізації індексів були визначені [31, 37, 38]. Отже, логічні рівняння для оцінки ступеня анатомічного ураження коронарних артерій у пацієнтів з різними формами ішемічної хвороби серця матимуть наступний вигляд для факторів ($X_1 \div X_4$).

Для фактора X_1

$$\tilde{\mu}^L(X_1) = \begin{cases} 4.97 - 2.17x_1, x_1 \in [1.83; 2.06) \\ 1.97 - 0.71x_1, x_1 \in [2.06; 2.76] \end{cases};$$

$$\tilde{\mu}^{LA}(X_1) = \begin{cases} 2.17x_1 - 3.48, x_1 \in [1.83; 2.06) \\ 5.29 - 2.08x_1, x_1 \in [2.06; 2.3) \\ 3.0 - 1.09x_1, x_1 \in [2.3; 2.76] \end{cases};$$

$$\begin{aligned}\tilde{\mu}^A(X_1) &= \begin{cases} 2.13x_1 - 3.89, x_1 \in [1.83; 2.3) \\ 6 - 2.17x_1, x_1 \in [2.3; 2.76] \end{cases} ; \\ \tilde{\mu}^{HA}(X_1) &= \begin{cases} 1.06x_1 - 1.94, x_1 \in [1.83; 2.3) \\ 2.17x_1 - 4.5, x_1 \in [2.3; 2.53) \\ 6.5 - 2.17x_1, x_1 \in [2.53; 2.76] \end{cases} ; \\ \tilde{\mu}^H(X_1) &= \begin{cases} 0.71x_1 - 1.31, x_1 \in [1.83; 2.53) \\ 2.17x_1 - 5, x_1 \in [2.53; 2.76] \end{cases} .\end{aligned}$$

Для фактора X2

$$\begin{aligned}\tilde{\mu}^L(X_2) &= \begin{cases} 3.72 - 1.56x_2, x_2 \in [1.74; 2.06) \\ 1.6 - 0.53x_2, x_2 \in [2.06; 3.0] \end{cases} ; \\ \tilde{\mu}^{LA}(X_2) &= \begin{cases} 1.56x_2 - 2.22, x_2 \in [1.74; 2.06) \\ 4.3 - 1.61x_2, x_2 \in [2.06; 2.37) \\ 2.38 - 0.79x_2, x_2 \in [2.37; 3.0] \end{cases} ; \\ \tilde{\mu}^A(X_2) &= \begin{cases} 1.59x_2 - 2.76, x_2 \in [1.74; 2.3) \\ 4.76 - 1.59x_2, x_2 \in [2.3; 3.0] \end{cases} ; \\ \tilde{\mu}^{HA}(X_2) &= \begin{cases} 0.79x_2 - 1.38, x_2 \in [1.74; 2.37) \\ 1.56x_2 - 3.2, x_2 \in [2.37; 2.69) \\ 5.34 - 1.61x_2, x_2 \in [2.69; 3.0] \end{cases} ; \\ \tilde{\mu}^H(X_2) &= \begin{cases} 0.53x_2 - 0.92, x_2 \in [1.74; 2.53) \\ 1.61x_2 - 3.84, x_2 \in [2.53; 3.0] \end{cases} .\end{aligned}$$

Для фактора X3

$$\tilde{\mu}^L(X_3) = \begin{cases} 2.47 - 1.47x_3, x_3 \in [1.0; 1.34) \\ 1.16 - 0.495x_3, x_3 \in [1.34; 2.35] \end{cases} ;$$

$$\tilde{\mu}^{LA}(X_3) = \begin{cases} 1.47x_3 - 0.97, x_3 \in [1.0; 1.34) \\ 2.97 - 1.47x_3, x_3 \in [1.34; 1.68) \\ 1.75 - 0.74x_3, x_3 \in [1.68; 2.35] \end{cases};$$

$$\tilde{\mu}^A(X_3) = \begin{cases} 1.47x_3 - 1.47, x_3 \in [1.0; 1.68) \\ 3.5 - 1.49x_3, x_3 \in [1.68; 2.35] \end{cases};$$

$$\tilde{\mu}^{HA}(X_3) = \begin{cases} 0.73x_3 - 0.73, x_3 \in [1.0; 1.68) \\ 1.47x_3 - 1.97, x_3 \in [1.68; 2.02) \\ 4.06 - 1.52x_3, x_3 \in [2.02; 2.35] \end{cases};$$

$$\tilde{\mu}^H(X_3) = \begin{cases} 0.49x_3 - 0.49, x_3 \in [1.0; 2.02) \\ 1.52x_3 - 2.56, x_3 \in [2.02; 2.35] \end{cases}.$$

Для фактора X4

$$\tilde{\mu}^L(X_4) = \begin{cases} 2.59 - 0.769x_4, x_4 \in [2.07; 2.72) \\ 1.197 - 0.26x_4, x_4 \in [2.72; 4.67] \end{cases};$$

$$\tilde{\mu}^{LA}(X_4) = \begin{cases} 0.769x_4 - 1.09, x_4 \in [2.07; 2.72) \\ 3.09 - 0.769x_4, x_4 \in [2.72; 3.37) \\ 1.796 - 0.38x_4, x_4 \in [3.37; 4.67] \end{cases};$$

$$\tilde{\mu}^A(X_4) = \begin{cases} 0.769x_4 - 1.59, x_4 \in [2.07; 3.37) \\ 3.59 - 0.769x_4, x_4 \in [3.37; 4.67] \end{cases};$$

$$\tilde{\mu}^{HA}(X_4) = \begin{cases} 0.38x_4 - 0.796, x_4 \in [2.07; 3.37) \\ 0.769x_4 - 2.09, x_4 \in [3.37; 4.02) \\ 4.09 - 0.769x_4, x_4 \in [4.02; 4.67] \end{cases};$$

$$\tilde{\mu}^H(X_4) = \begin{cases} 0.25x_4 - 0.53, x_4 \in [2.07; 4.02) \\ 0.769x_4 - 2.59, x_4 \in [4.02; 4.67] \end{cases}.$$

Для побудови рівняння необхідно визначити функції належності $\mu_j(x_i)$ всіх нечітких термів j (Н, НА, А, LA, L) для всіх факторів X_i (у даному випадку j – значення коефіцієнта симетрії, i – інтервал дослідження). Якщо вважати високий рівень варіантом норми, то побудову рівнянь необхідно виконати для п'яти нечітких термів (Н, НА, А, LA, L).

Кожен фактор X_i повинен відповідати своїм п'яти функціям належності. Слід вжити певних заходів для спрощення моделювання. Нехай $\underline{X_i}$ – нижня та верхня межі діапазону змін фактора X_i . Виражаємо інтервал $[\underline{X_i}, \overline{X_i}]$ на інтервалі $U=[0, 4]$, де функції належності $\tilde{\mu}^j(u)$, $u \in U$, задаються для нечітких термів $j=N, NA, A, LA, L$) [120,121].

Графічний вигляд функцій належності показано на рисунку 2.15. Вибір подібних кривих зумовлений тим, що вони є сплайнами – лінійними апроксимаціями експертної функції належності $\mu^j(x_i)$, отриманої для факторів $x_1 \div x_4$ за допомогою методу парних порівнянь [120,121].

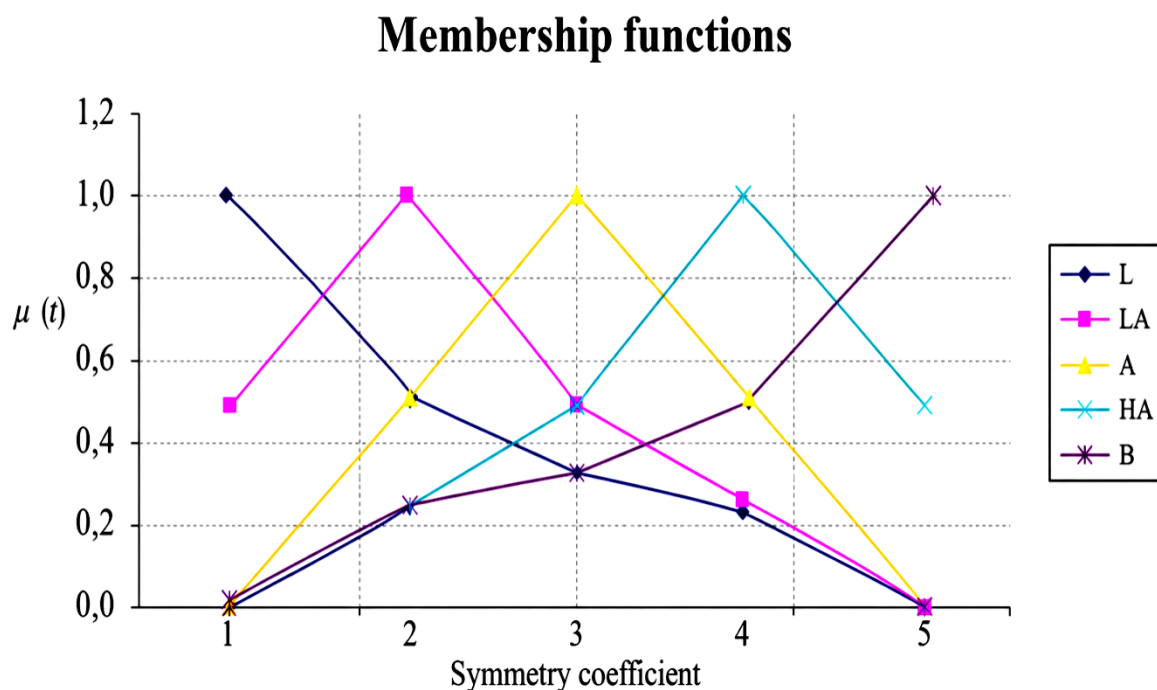


Рисунок 2.15 – Графічний вигляд функцій належності

Основна ідеологія реалізації медичної експертної системи для оцінки ступеня анатомічного ураження коронарних артерій у пацієнтів з різними формами ішемічної хвороби серця на основі формування блоків нечіткої логіки показана на рисунку 2.16.

В результаті реалізації цих блоків була розроблена програмна оболонка, після запуску якої користувачеві пропонується ввести значення верхньої та нижньої шкали значень, що є в базі даних для певної патології, які є основними факторами для визначення ступеня анатомічного ураження коронарних артерій. [39, 40, 41].

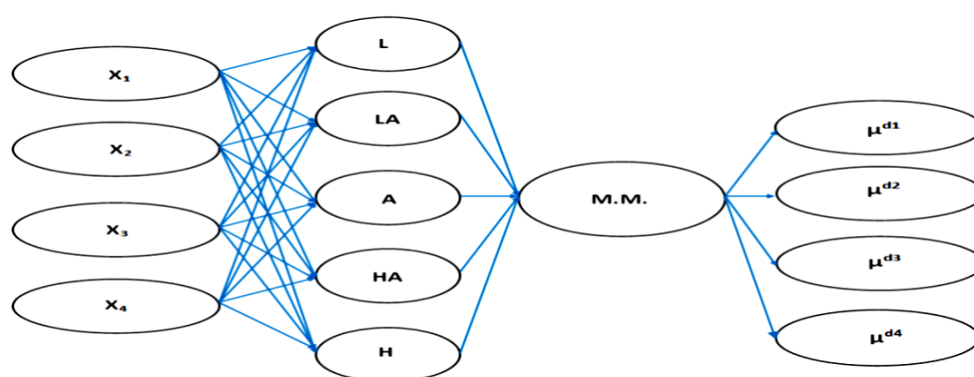


Рисунок 2.16 – Медична експертна система для визначення ступеня анатомічного ураження коронарних артерій

Розроблено інтерфейс користувача МІС для оцінювання біомедичної інформації (див. рисунки 2.17 та 2.18).

Після запуску програми користувачеві пропонується ввести значення верхньої та нижньої шкали значень, що є в базі даних на певній основі на основі показників розміру обличчя, у нашому випадку ми вводимо значення, які є основними при визначенні [120,121].

Щоб продовжити роботу з програмою, після заповнення всіх полів потрібно натиснути кнопку «Зберегти», для відновлення попередніх даних, які були введені раніше, користувачеві потрібно натиснути кнопку «Вихід».

	Lower value	Upper value
Scale for X1	1.83	2.76
Scale for X2	1.74	3.0
Scale for X3	1.0	2.35
Scale for X4	2.07	4.67

To save the entered scale values, press «Save» **SAVE**

To restore the previous scale values, press «Retire» **Retire**

Рисунок 2.17 – Функція введення мінімального та максимального значень для кожного фактора

Input values (x_i)	Output values (μ^{di})
2,3	y1=0,198
2,5	y2=0,264
1,2	y3=0,397
3,1	y4=0,074

Fuzzy Logic

Answer max ($\mu(x_1, x_2, x_3, x_4) = y_3$ whose value = 0,397

Calculate **Close the program**

Рисунок 2.18 – Приклад діалогового вікна програмної системи для визначення ступеня анатомічного ураження коронарних артерій

Валідність підтримки правильного прийняття рішень медичної експертної системи на основі нечітких множин для оцінки ступеня анатомічного ураження коронарної артерії у пацієнтів з різними формами ішемічної хвороби серця з оцінкою експертів склала 95%, що свідчить про високу ефективність прийняття рішень.

Таким чином, в результаті досліджень:

- Розроблено математичні моделі та алгоритми, що формалізують процес прийняття діагностичних рішень на основі нечіткої логіки з кількісними та якісними параметрами стану пацієнта; Розроблено математичні моделі функцій належності, що формалізують представлення кількісних та якісних параметрів стану пацієнта у вигляді нечітких множин, які використовуються в моделях та алгоритмах оцінки ступеня анатомічного ураження коронарних артерій у пацієнтів з різними формами ішемічної хвороби серця.
- Практична цінність роботи полягає в можливості використання автоматизованої експертної системи для вирішення задач медичної діагностики на основі нечіткої логіки при оцінці ступеня анатомічного ураження коронарних артерій у пацієнтів з різними формами ішемічної хвороби серця.

2.5 Висновки до другого розділу

- Проаналізовано інформаційні ознаки для оцінювання ризику ураження коронарних судин з метою оптимального вибору, стандартизації та формалізації, що дозволило забезпечити підвищення точності прогнозування, оптимізацію клінічних рішень.
- Запропоновано комплексний критерій, який одночасно дозволяє врахувати точність локалізації контурів, структурну відповідність сегментованого зображення та похибку визначення геометричних параметрів.. Збільшення значення критерію K свідчить про підвищення ефективності алгоритму сегментації. Комплексне оцінювання дозволяє порівнювати ефективність різних методів сегментації, оптимізувати параметри алгоритмів та підвищувати точність автоматизованого визначення патологічних змін коронарного русла.
- Розроблено метод використання нечітких множин для реалізації інформаційної експертної системи для вирішення задач медичної діагностики, зокрема, при оцінці ступеня анатомічного ураження коронарних артерій у пацієнтів з різними формами ішемічної хвороби серця.
- Проаналізовано основні напрямки застосування математичних методів у медичній діагностиці, сформульовано принципи діагностики на основі нечіткої логіки.
- Розроблено математичні моделі та алгоритми, що формалізують процес прийняття діагностичних рішень на основі нечіткої логіки з кількісними та якісними параметрами стану пацієнта; Розроблено математичні моделі функцій належності, що формалізують представлення кількісних та якісних параметрів стану пацієнта у вигляді нечітких множин, які використовуються в моделях та алгоритмах оцінки ступеня анатомічного ураження коронарних артерій у пацієнтів з різними формами ішемічної хвороби серця.

- Розроблені моделі та алгоритми медичної діагностики базуються на ідеях та принципах штучного інтелекту та інженерії знань, теорії планування експериментів, теорії нечітких множин та лінгвістичних змінних. Експертна система протестована на реальних даних.
- Практична цінність роботи полягає в можливості використання автоматизованої експертної системи для вирішення задач медичної діагностики на основі нечіткої логіки при оцінці ступеня анатомічного ураження коронарних артерій у пацієнтів з різними формами ішемічної хвороби серця.
- Визначено кореляційні зв'язки між основними інформаційними ознаками та сумарним балом стенозу коронарних артерій, що дозволило визначити зв'язок із тяжкістю ураження для рівня холестерину ліпопротеїнів низької щільності, віку, артеріальної гіпертензії та стажу куріння. Отримані результати підтверджують доцільність використання зазначених показників у моделях прогнозування ризику.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ЯКОСТІ ТА ШВИДКОДІЇ ОБРОБЛЕННЯ АНГІОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ КОРОНАРНИХ СУДИН ТА ПІДХОДИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ ПАТОЛОГІЙ

3.1 Критеріальне оцінювання якості та швидкодії просторових і частотних методів оброблення ангіографічних зображень коронарних судин

Оброблення ангіографічних зображень коронарних судин є важливим етапом автоматизованої діагностики серцево-судинних захворювань. Основною метою застосування методів цифрової обробки є підвищення контрастності судин, зменшення шумів, покращення локалізації стенозів та забезпечення високої точності сегментації [122,178].

Для оцінювання ефективності просторових та частотних методів оброблення доцільно використовувати систему критеріїв, яка враховує:

- якість візуального покращення зображення;
- ступінь пригнічення шуму;
- збереження контурів судин;
- швидкодію алгоритмів;
- обчислювальну складність;
- стійкість до варіацій яскравості та контрасту.

У даному розділі проведено порівняльний аналіз просторових та частотних методів оброблення ангіографічних зображень коронарних судин за критеріями якості та швидкодії.

3.1.1 Характеристика досліджуваних методів

Просторові методи оброблення

Просторові методи здійснюють перетворення безпосередньо у площині зображення. До найбільш поширених методів належать: медіанна

фільтрація; гаусове згладжування; адаптивна фільтрація; морфологічні операції; підвищення різкості за допомогою операторів Собеля та Лапласа.

Перевагами просторових методів є: простота реалізації; висока швидкодія; ефективність для локальної обробки.

Недоліками є: втрата дрібних деталей; недостатня ефективність при складних шумових спотвореннях.

Частотні методи оброблення

Частотні методи базуються на перетворенні Фур'є або вейвлет-перетвореннях. Основними методами є: низькочастотна фільтрація; високочастотне підсилення; смугові фільтри; вейвлет-фільтрація.

Переваги частотних методів: ефективне пригнічення шумів; можливість селективної обробки спектральних компонент; висока точність виділення контурів.

Недоліки: висока обчислювальна складність; більший час оброблення; необхідність спектрального перетворення.

Критерії оцінювання якості оброблення

Для оцінювання якості оброблення ангиографічних зображень використовувались такі критерії:

Відношення сигнал/шум (SNR)

Відношення сигнал/шум визначається як:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right),$$

де P_{signal} – потужність корисного сигналу; P_{noise} – потужність шуму.

Чим більше значення SNR, тим кращою є якість обробленого зображення.

Пікове відношення сигнал/шум (PSNR)

Для оцінювання ступеня спотворення зображення застосовується критерій PSNR:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right)$$

Де MAX – максимальне значення яскравості пікселі; MSE – середньоквадратична похибка.

Індекс структурної подібності (SSIM)

SSIM дозволяє оцінити ступінь структурного збереження деталей:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \sigma_x^2 + C_2)(\mu_y^2 + \sigma_y^2 + C_2)}$$

Критерій SSIM є особливо важливим для ангіографічних зображень, оскільки дозволяє оцінити збереження структури судин.

Час оброблення

Швидкодія алгоритмів оцінюється за середнім часом оброблення одного кадру:

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i,$$

t_i – час оброблення i -го кадру; N – кількість кадрів.

3.1.2 Методика проведення оцінювання якості та швидкодії просторових і частотних методів

Для проведення дослідження використовувались ангіографічні зображення коронарних судин у форматі DICOM (рис. 3.1).

Експериментальні дослідження включали такі етапи:

1. Попередня нормалізація зображень.
2. Застосування просторових методів фільтрації.
3. Застосування частотних методів.
4. Обчислення критеріїв якості.
5. Аналіз швидкодії.
6. Порівняльна оцінка результатів.

Дослідження виконувались на персональному комп'ютері з такими характеристиками: процесор Intel Core i7; оперативна пам'ять 16 ГБ; середовище MATLAB / Python OpenCV [135,168].

Результати критеріального оцінювання та порівняння якості оброблення наведено в табл.. 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняння показників якості

Метод	SNR, дБ	PSNR, дБ	SSIM
Медіанна фільтрація	18.2	28.5	0.81
Гаусове згладжування	19.4	29.8	0.84
Морфологічна обробка	20.1	31.2	0.87
FFT-фільтрація	22.8	33.6	0.91
Вейвлет- фільтрація	24.5	35.4	0.94

З аналізу результатів видно, що частотні методи забезпечують вищі показники якості порівняно з просторовими. Найкращі результати продемонструвала вейвлет-фільтрація (рис.3.2, 3.3).



Рисунок 3.1 – Початкове ангіографічне зображення



Рисунок 3.2 – Результат просторової фільтрації

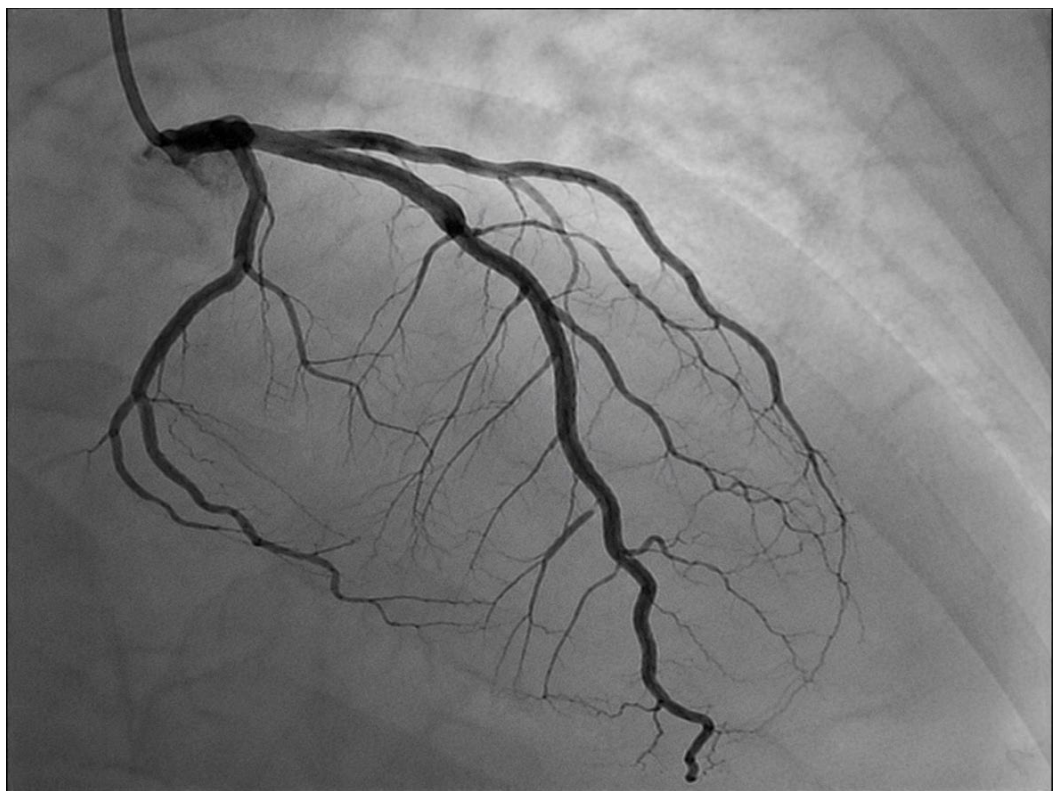


Рисунок 3.3 – Результат частотної фільтрації

Порівняння швидкодії

Таблиця 3.2

Оцінювання швидкодії алгоритмів

Метод	Час оброблення одного кадру, мс
Медіанна фільтрація	12
Гаусове згладжування	10
Морфологічна обробка	15
FFT-фільтрація	38
Вейвлет-фільтрація	45

Результати свідчать, що просторові методи мають значно менший час оброблення порівняно з частотними. Найшвидшим методом є гаусове згладжування (рис.3.4, 3.5).

Аналіз отриманих результатів

Проведене дослідження показало, що:

- Просторові методи характеризуються високою швидкістю та низькою обчислювальною складністю.
- Частотні методи забезпечують краще пригнічення шумів і вищу якість відновлення структури судин.
- Вейвлет-фільтрація є найбільш ефективною за критеріями PSNR та SSIM.
- Для систем реального часу доцільним є використання просторових методів.
- Для задач детальної діагностики та автоматичного аналізу коронарних судин більш ефективними є частотні методи.

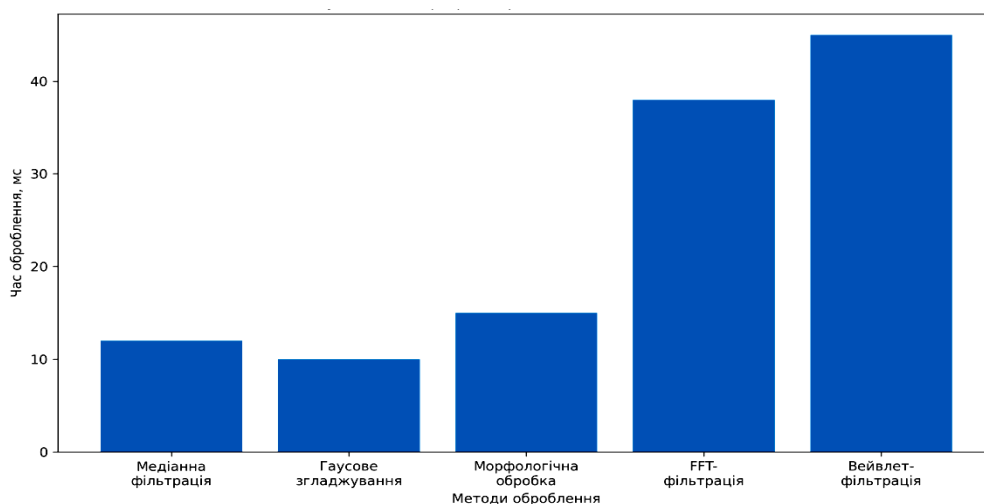


Рисунок 3.4 – Графік порівняння швидкодії методів

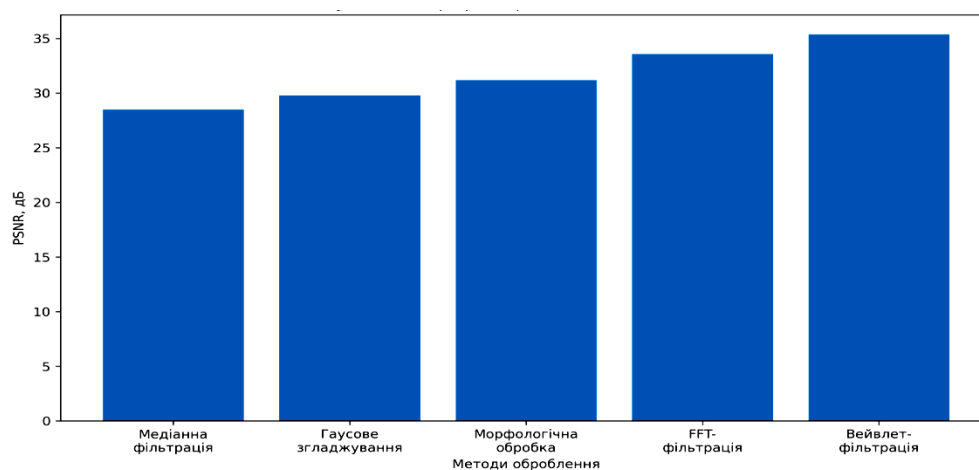


Рисунок 3.5 – Графік порівняння показників PSNR

У результаті проведеного критеріального оцінювання встановлено, що частотні методи оброблення ангіографічних зображень коронарних судин забезпечують вищу якість відновлення зображення та кращу деталізацію структури судин. Найкращі результати отримано при використанні вейвлет-фільтрації. Разом із тим просторові методи мають значну перевагу за швидкодією та можуть бути ефективно використані у системах оперативної обробки медичних зображень.

Отримані результати можуть бути використані для подальшої розробки інтелектуальних систем автоматизованого аналізу коронарної ангіографії.

3.2 Особливості автоматизованого аналізу коронарної ангіографії для автоматизованого при введенні ангіографічних відеопослідовностей

Ручна інтерпретація ангіографічних досліджень характеризується значною міжекспертною та внутрішньоекспертною варіабельністю. Відмінності в оцінюванні ступеня стенозу між лікарями можуть досягати 7–26 %, що негативно впливає на достовірність діагностики та вибір тактики лікування. Крім того, візуальна оцінка нерідко призводить до переоцінки ступеня стенозу та виконання необґрунтованих інвазивних втручань.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розроблення автоматизованих систем аналізу коронарної ангіографії на основі технологій глибокого навчання. Сучасні алгоритми штучного інтелекту дозволяють автоматизувати процес виявлення патологічних змін, підвищити об'єктивність діагностики та зменшити вплив людського фактору.

Одним із найбільш перспективних напрямів є використання гібридних нейронних мереж, що поєднують згорткові нейронні мережі (CNN) та рекурентні мережі типу LSTM (Long Short-Term Memory). Такі системи здатні одночасно аналізувати просторові та часові характеристики ангіографічних відеопослідовностей (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Основні проблеми традиційного аналізу ангіографії

Проблема	Характеристика
Суб'єктивність оцінювання	Залежність від досвіду лікаря
Міжекспертна варіабельність	Різні результати інтерпретації
Великий обсяг даних	Значна кількість кадрів відео
Наявність шумів	Погіршення якості зображень
Обмежена швидкодія	Тривалий аналіз дослідження
Складність локалізації патологій	Нечіткі межі стенозів

На рисунку 3.6. представлено архітектуру інтелектуалізованої біотехнічної системи автоматизованого аналізу ангіографічних відеоданих, призначеної для оцінювання патологічних змін коронарних артерій на основі методів глибокого навчання та інтелектуального аналізу медичних зображень. Запропонована архітектура реалізує повний цикл оброблення даних – від отримання відеопослідовності коронарографії до формування рекомендацій для підтримки лікарських рішень.

Першим етапом функціонування системи є отримання відеоданих коронарної ангіографії. У процесі проведення ангіографічного дослідження формується послідовність кадрів у форматі DICOM із частотою близько 15 кадрів за секунду. Відеопослідовність містить інформацію про стан просвіту коронарних судин, особливості гемодинаміки та ступінь ураження судинного русла. Використання DICOM-формату забезпечує стандартизоване збереження медичних даних та можливість їх подальшої автоматизованої обробки. На цьому етапі також здійснюється накопичення та архівування ангіографічних досліджень для формування навчальних вибірок системи штучного інтелекту [145,179].

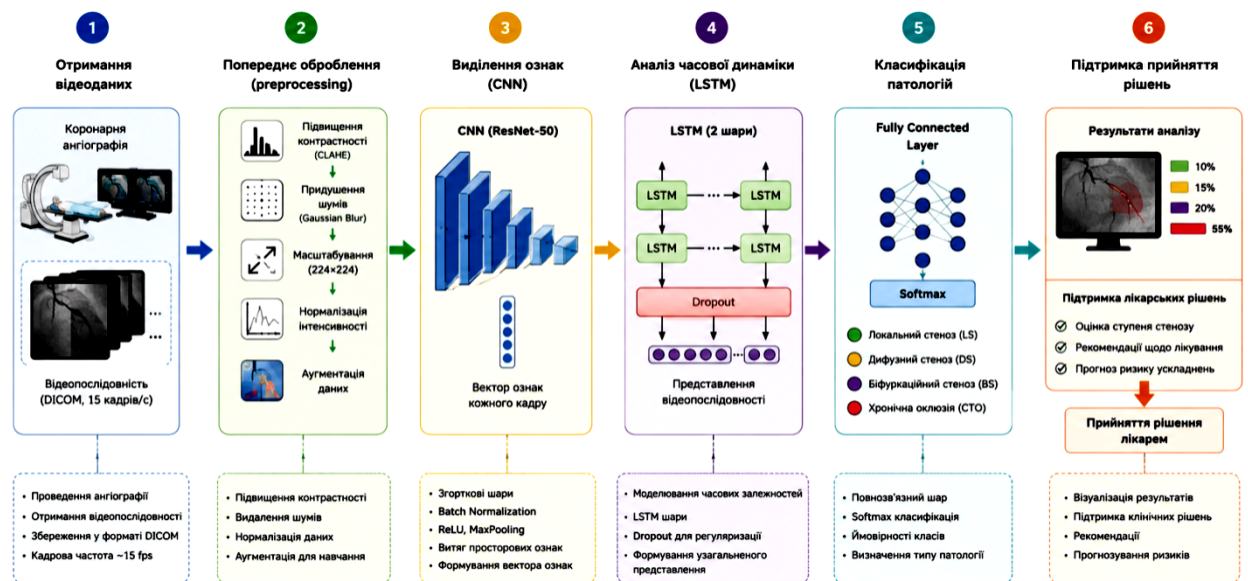


Рисунок 3.6 – Основні етапи автоматизованого аналізу коронарної ангіографії

Другий етап включає попереднє оброблення (preprocessing) ангиографічних даних. Основною метою попередньої обробки є покращення якості зображень і зменшення впливу шумів та артефактів, що можуть негативно впливати на результати класифікації. Для цього застосовується підвищення контрастності методом CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization), який забезпечує локальне вирівнювання гістограми та покращує візуалізацію судинних структур. Додатково виконується придушення шумів за допомогою Gaussian Blur, що дозволяє згладити високочастотні перешкоди та зменшити випадкові флуктуації яскравості.

Після фільтрації здійснюється масштабування зображень до стандартного розміру 224×224 пікселів, що відповідає вхідним параметрам згорткових нейронних мереж типу ResNet-50. Також проводиться нормалізація інтенсивності пікселів для забезпечення стабільності процесу навчання нейронної мережі. Важливою складовою preprocessing є аугментація даних, яка включає випадкові повороти, масштабування, зміни яскравості та віддзеркалення кадрів. Це дозволяє збільшити обсяг навчальної вибірки та підвищити стійкість моделі до варіативності медичних зображень.

Третій етап реалізує виділення ознак за допомогою згорткової нейронної мережі CNN на базі архітектури ResNet-50. Використання CNN забезпечує автоматичне виявлення складних просторових характеристик ангиографічних кадрів без необхідності ручного формування ознак. У процесі роботи мережі здійснюється послідовне проходження через згорткові шари, функції активації ReLU та шари підвибірки MaxPooling. На кожному рівні мережі формуються ознаки різного ступеня абстракції — від локальних контурів судин до складних патологічних структур [135, 140].

Особливістю використання ResNet-50 є наявність залишкових (residual) з'єднань, які дозволяють уникнути проблеми деградації глибоких нейронних мереж та забезпечують ефективне навчання великої кількості шарів. На виході CNN формується вектор ознак для кожного кадру

відеопослідовності, який містить інформацію про морфологічні особливості коронарних артерій, ступінь стенозу, наявність оклюзій та інші патологічні зміни.

Наступний етап передбачає аналіз часової динаміки за допомогою рекурентної нейронної мережі типу LSTM (Long Short-Term Memory). Оскільки коронарографія є відеопослідовністю, важливим є врахування часових залежностей між сусідніми кадрами. LSTM-мережа забезпечує моделювання змін стану судин у часі та дозволяє враховувати особливості проходження контрастної речовини по коронарному руслу.

У представленій архітектурі використовується двошарова LSTM-мережа, що забезпечує більш глибокий аналіз часових закономірностей. Для зменшення перенавчання використовується шар Dropout, який випадковим чином вимикає частину нейронів під час навчання. На виході LSTM формується узагальнене представлення відеопослідовності, яке враховує як просторові, так і часові характеристики ангіографічних даних.

П'ятий етап реалізує класифікацію патологій коронарних артерій. Для цього використовується повнозв'язний (Fully Connected) шар та функція Softmax, яка забезпечує обчислення ймовірностей належності дослідження до певного класу патологій. Система дозволяє визначати декілька типів патологічних станів, зокрема локальний стеноз, дифузний стеноз, біфуркаційний стеноз та хронічну оклюзію.

Класифікація здійснюється на основі комплексного аналізу морфологічних характеристик судин та часової динаміки руху контрастної речовини. Використання Softmax-класифікатора забезпечує отримання ймовірнісної оцінки для кожного класу, що дозволяє підвищити об'єктивність діагностичного процесу та оцінити рівень впевненості системи у прийнятому рішенні.

Заключний етап системи спрямований на підтримку прийняття лікарських рішень. На моніторі відображаються результати автоматичного аналізу ангіографічного дослідження, включаючи візуалізацію зон стенозу та

оцінку ступеня ураження коронарних артерій. Система формує рекомендації щодо подальшого лікування та прогнозує ризик розвитку ускладнень.

Запропонована інтелектуалізована система дозволяє підвищити точність, швидкість та об'єктивність діагностики коронарних патологій. Використання методів глибокого навчання забезпечує автоматизацію процесу аналізу ангіографічних даних і зменшує залежність результатів від суб'єктивного досвіду лікаря. Крім того, інтеграція CNN та LSTM дозволяє одночасно враховувати просторові та часові характеристики медичних відеоданих, що суттєво підвищує ефективність діагностичного процесу.

Таким чином, наведена на рисунку архітектура є перспективною основою для створення сучасних систем підтримки прийняття рішень у кардіології та інтервенційній медицині, орієнтованих на автоматизований аналіз ангіографічних досліджень із використанням технологій штучного інтелекту.

3.3 Автоматизований аналіз ангіографічних зображень коронарних артерій

Перші автоматизовані системи аналізу коронарної ангіографії базувалися на класичних методах цифрової обробки зображень, включаючи сегментацію судин, виділення контурів та аналіз геометричних параметрів артерій. Такі системи потребували значного обсягу ручної розмітки даних та характеризувалися складною багатоступеневою структурою [136].

Класичний підхід до автоматизованого аналізу ангіографії включає: сегментацію судин; побудову центральних ліній артерій; аналіз геометрії судин; оцінювання ступеня стенозу; класифікацію патологій.

Основним недоліком сегментаційно-орієнтованих методів є накопичення помилок на кожному етапі оброблення, що знижує загальну точність системи.

Сучасні підходи орієнтовані на використання end-to-end нейронних мереж, здатних виконувати автоматичний аналіз відеопослідовностей без необхідності попередньої сегментації судин (табл.3.4, рис. 3.7).

Таблиця 3.4

Порівняння класичних та сучасних AI-підходів

Характеристика	Класичні методи	Deep Learning
Необхідність сегментації	Так	Ні
Ручна розмітка	Значна	Помірна
Аналіз часової динаміки	Обмежений	Високий
Автоматизація	Часткова	Повна
Стійкість до шумів	Низька	Висока
Обчислювальна складність	Середня	Висока
Точність класифікації	Середня	Висока

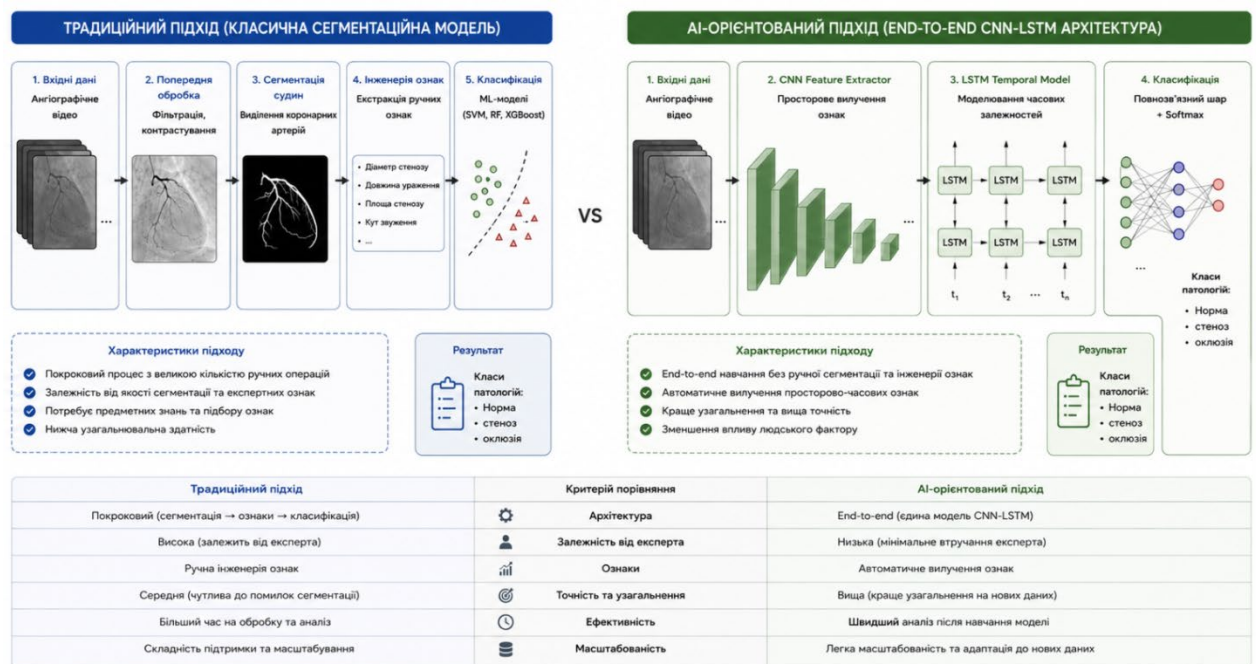


Рисунок 3.7 – Порівняння традиційного та AI-орієнтованого аналізу

Коронарна ангіографія є динамічним відеопроцесом, під час якого візуалізується поширення контрастної речовини через коронарне русло. На відміну від статичних медичних зображень, ангіографічні відеопослідовності

містять часову інформацію, яка є надзвичайно важливою для оцінювання функціонального стану судин.

Під час аналізу відеопослідовностей враховуються: динаміка поширення контрасту; рух серця та судин; зміна проєкцій; особливості гемодинаміки; часові характеристики наповнення судин (табл. 3.5).

Саме тому використання лише статичних CNN-класифікаторів не забезпечує достатньої ефективності аналізу. Для врахування часової динаміки використовуються рекурентні нейронні мережі типу LSTM (рис. 3.8).

Таблиця 3.5

Основні характеристики ангіографічних відеоданих

Параметр	Значення
Частота кадрів	15 кадрів/с
Тривалість відео	~5 секунд
Середня кількість кадрів	~75
Роздільна здатність	720×576
Типи патологій	LS, DS, BS, СТО
Формат даних	Динамічне відео

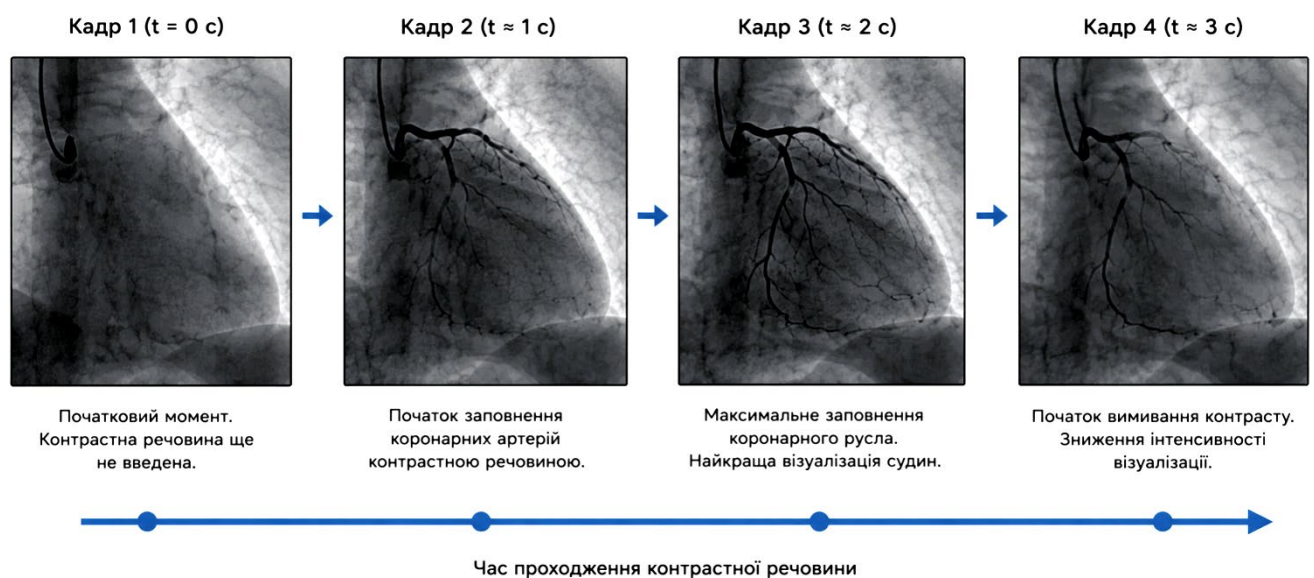


Рисунок 3.8 – Приклад послідовності кадрів коронарної ангіографії

3.4. Опис схеми обробки та порівняльного аналізу моделей YOLO для автоматизованого виявлення патологій коронарних артерій

На рисунку 3.9 представлено схему порівняльного аналізу сучасних архітектур сімейства YOLO (You Only Look Once), які використовуються для автоматизованого виявлення патологічних змін коронарних артерій на ангиографічних зображеннях. Схема демонструє результати оцінювання різних версій моделей YOLOv5, YOLOv8, YOLOv9, YOLOv10, YOLOv11 та YOLOv12 за показниками точності (Precision) та повноти виявлення (Recall). Представлена система є складовою інтелектуалізованої біотехнічної системи підтримки прийняття рішень у кардіології та спрямована на автоматизацію процесу аналізу ангиографічних досліджень.

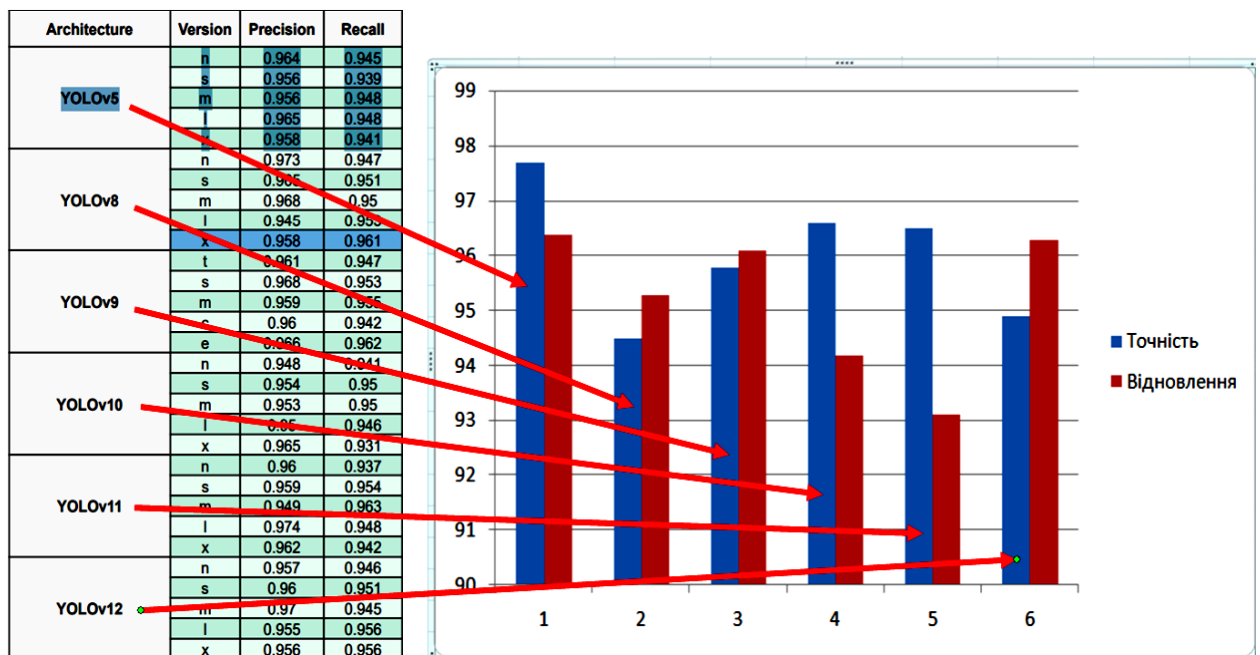


Рисунок 3.9 – Оцінювання ефективності моделей YOLO для автоматизованого виявлення патологій коронарних артерій

У лівій частині рисунка 3.9 наведено таблицю порівняльних характеристик моделей, яка містить інформацію про архітектуру нейронної мережі, версію моделі та отримані метрики Precision і Recall. У правій частині представлено гістограму, яка дозволяє візуально оцінити

ефективність різних архітектур при виконанні задачі класифікації та локалізації патологічних змін коронарних судин.

Сучасні системи автоматизованого аналізу медичних зображень базуються на використанні методів глибокого навчання, серед яких особливе місце займають згорткові нейронні мережі (CNN). Однією з найефективніших архітектур для задач комп'ютерного зору є сімейство моделей YOLO, яке забезпечує високу швидкість та точність детекції об'єктів у режимі реального часу. У контексті аналізу ангіографічних зображень це дозволяє автоматично виявляти ділянки стенозу, оклюзії та інші патологічні зміни коронарних артерій [64].

Основною перевагою архітектури YOLO є виконання задачі детекції за один прохід через нейронну мережу. На відміну від класичних двоетапних методів, таких як Faster R-CNN, де спочатку генеруються регіони-кандидати, а потім виконується їх класифікація, YOLO одночасно здійснює локалізацію та класифікацію об'єктів. Це суттєво зменшує час оброблення зображень та забезпечує можливість використання системи у режимі реального часу під час проведення інтервенційних втручань.

На першому етапі роботи системи здійснюється формування набору ангіографічних зображень для навчання та тестування моделей. Вхідні дані представлені кадрами коронарної ангіографії у форматі DICOM. Перед подачею у нейронну мережу виконується попередня обробка зображень, яка включає нормалізацію інтенсивності, масштабування, видалення шумів та підвищення контрастності. Основною метою preprocessing є підвищення інформативності судинних структур та мінімізація впливу артефактів.

Після попередньої обробки здійснюється анотація зображень. Для цього лікарі-експерти вручну визначають області патологічних змін коронарних судин, формуючи bounding boxes для ділянок стенозу або оклюзії. На основі сформованих анотованих даних створюється навчальна вибірка для тренування моделей YOLO.

На рисунку представлено результати дослідження декількох поколінь моделей YOLO. Модель YOLOv5 є однією з найбільш поширених архітектур для задач медичного комп'ютерного зору завдяки оптимальному співвідношенню між швидкістю та точністю. Архітектура YOLOv5 включає backbone для виділення ознак, neck для агрегації багаторівневих характеристик та detection head для класифікації та локалізації об'єктів. Згідно з представленими результатами, різні версії YOLOv5 демонструють показники Precision у межах 95–96 %, а Recall — близько 94–95 %.

Модель YOLOv8, яка характеризується вдосконаленими механізмами екстракції ознак та покращеною оптимізацією процесу навчання. Використання нових архітектурних рішень дозволило підвищити точність виявлення патологій коронарних артерій. Зокрема, окремі конфігурації YOLOv8 забезпечують Precision понад 97 %, що свідчить про високу ефективність локалізації патологічних ділянок. Показник Recall також демонструє стабільно високі значення, що підтверджує здатність системи виявляти більшість патологічних змін без пропусків.

Моделі YOLOv9 та YOLOv10 орієнтовані на подальше покращення узагальнювальної здатності мережі та підвищення стійкості до варіативності медичних даних. У контексті ангіографічних досліджень це особливо важливо, оскільки форма, контрастність та геометрія коронарних судин можуть суттєво відрізнятися у різних пацієнтів. Застосування удосконалених механізмів attention та оптимізованих блоків feature fusion дозволило підвищити якість виділення судинних структур навіть за наявності шумів та артефактів.

На рисунку 3.9 видно, що деякі версії YOLOv10 демонструють зниження Recall при одночасно високому значенні Precision. Це свідчить про те, що модель здатна дуже точно визначати патологічні області, однак може пропускати окремі малопомітні ураження. Така особливість є критичною у медичних системах, оскільки пропуск патології може призвести до

неправильного клінічного рішення. Саме тому при виборі оптимальної архітектури необхідно враховувати баланс між Precision та Recall.

Моделі YOLOv11 та YOLOv12 є найбільш сучасними представниками сімейства YOLO та характеризуються покращеною здатністю до виявлення дрібних об'єктів. Для задач аналізу коронарних артерій це має важливе значення, оскільки стенотичні зміни можуть мати дуже невеликі розміри та складну морфологію. Удосконалені алгоритми багатомасштабного аналізу дозволяють ефективно виділяти патологічні ділянки навіть у випадках низької контрастності або складного фону.

Гістограма у правій частині рисунка дозволяє порівняти узагальнені результати різних архітектур. Сині стовпчики відповідають показнику точності (Precision), а червоні — показнику повноти виявлення (Recall). Аналіз результатів показує, що найбільш збалансовані характеристики демонструють моделі YOLOv8 та YOLOv11, які забезпечують одночасно високі значення Precision та Recall. Це свідчить про їх високу придатність для використання у системах автоматизованої діагностики коронарних патологій.

Показник Precision характеризує частку правильно визначених патологічних об'єктів серед усіх виявлених системою. Високе значення Precision означає низький рівень хибнопозитивних результатів. Для медичних систем це дозволяє уникнути помилкової діагностики та зменшити кількість необґрунтованих клінічних рішень.

Показник Recall визначає здатність системи виявляти всі наявні патологічні зміни. Високий Recall є критично важливим у кардіології, оскільки пропуск навіть незначного стенозу може призвести до розвитку гострих коронарних синдромів або інфаркту міокарда. Саме тому при створенні інтелектуалізованих систем підтримки прийняття рішень необхідно забезпечувати оптимальний компроміс між Precision та Recall.

Отримані результати свідчать про високу перспективність використання архітектур сімейства YOLO для задач автоматизованого аналізу ангіографічних зображень. Використання глибоких нейронних мереж

дозволяє значно підвищити швидкість та об'єктивність діагностичного процесу, зменшити навантаження на лікаря та мінімізувати вплив людського фактора.

Таким чином запропоновано модель глибокої нейронної мережі, яка інтегрує згорткові нейронні мережі (ЗНМ) та одиниці довгої короткочасної пам'яті (ЛКМ) для аналізу відеопослідовностей коронарної ангіографії, що дозволило обробляти біомедичні показники на тестовому наборі, з точністю 88%, повнотою результатів 92% та площею ROC-кривої (AUC) приблизно 0,91. Модель ефективно розрізняє різні типи уражень, такі як фокальні, дифузні та оклюзійні патерни, з високим значенням специфічності та інтерпретованістю, про що свідчать показники візуалізації за допомогою градієнтно-зваженого картування активації класів (Grad-CAM).

Представлена схема демонструє ефективність сучасних моделей комп'ютерного зору у задачах медичної діагностики та підтверджує доцільність інтеграції архітектур YOLO у інтелектуалізовані системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого розвитку автоматизованих систем підтримки прийняття рішень у кардіології та інтервенційній медицині.

3.5 Висновки до третього розділу

- У результаті проведеного критеріального оцінювання встановлено, що частотні методи оброблення ангіографічних зображень коронарних судин забезпечують вищу якість відновлення зображення та кращу деталізацію структури судин. Найкращі результати отримано при використанні вейвлет-фільтрації. Разом із тим просторові методи мають значну перевагу за швидкістю та можуть бути ефективно використані у системах оперативної обробки медичних зображень.
- Отримані результати можуть бути використані для подальшої розробки інтелектуальних систем автоматизованого аналізу коронарної ангіографії.
- Запропонована інтелектуалізована система дозволяє підвищити точність, швидкість та об'єктивність діагностики коронарних патологій. Використання методів глибокого навчання забезпечує автоматизацію процесу аналізу ангіографічних даних і зменшує залежність результатів від суб'єктивного досвіду лікаря. Крім того, інтеграція CNN та LSTM дозволяє одночасно враховувати просторові та часові характеристики медичних відеоданих, що суттєво підвищує ефективність діагностичного процесу.
- Представлена схема демонструє ефективність сучасних моделей комп'ютерного зору у задачах медичної діагностики та підтверджує доцільність інтеграції архітектур YOLO у інтелектуалізовані системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого розвитку автоматизованих систем підтримки прийняття рішень у кардіології та інтервенційній медицині.

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ АРХІТЕКТУРИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНОЇ БІОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ АГІОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ КОРОНАРНИХ СУДИН ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ПАТОЛОГІЙ

4.1 Рекомендації щодо реалізації архітектура інтелектуалізованої біотехнічної системи для аналізу ангіографічних відеопослідовностей

Одним із найбільш перспективних підходів до аналізу ангіографічних відеопослідовностей є використання гібридних нейронних мереж CNN-LSTM. Дана архітектура поєднує переваги згорткових нейронних мереж для аналізу просторових характеристик зображень та рекурентних мереж LSTM для моделювання часової динаміки (рис. 4.1).

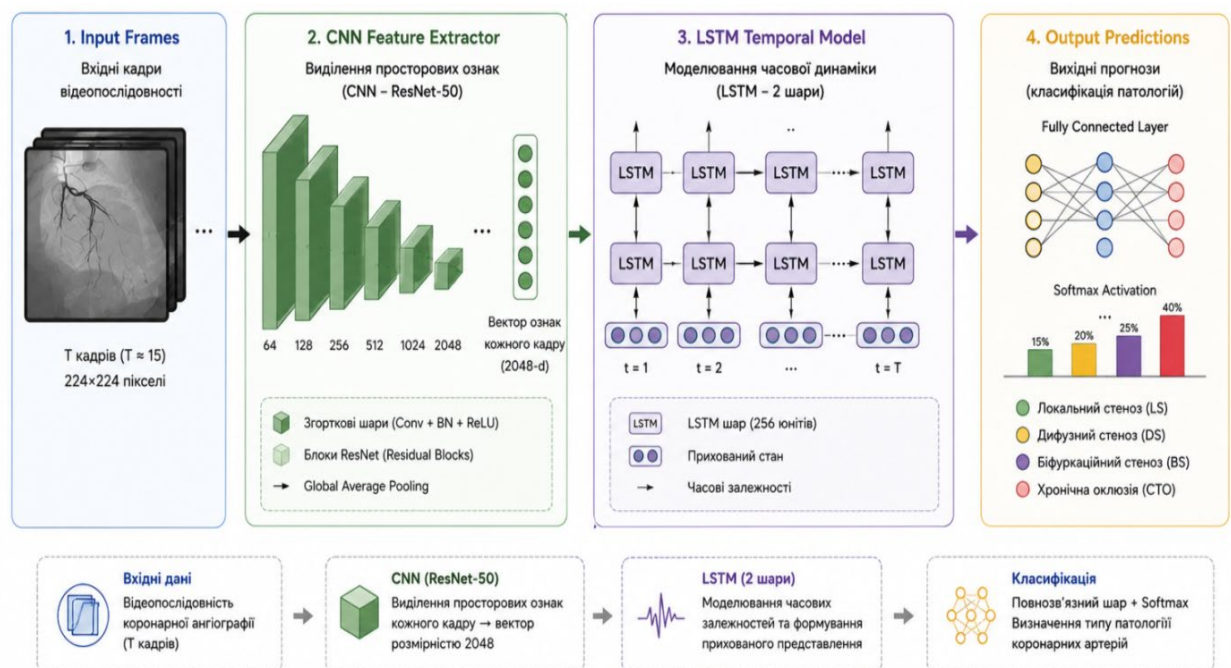


Рисунок 4.1 – Архітектура гібридної CNN-LSTM моделі

У запропонованій структурі CNN-модуль виконує функцію виділення ознак кожного кадру, після чого отримані вектори ознак передаються до LSTM-модуля для аналізу часових залежностей.

В таблиці 4.1 представлено основні етапи роботи системи:

1. Попереднє оброблення відео.
2. Виділення кадрів.
3. Нормалізація та підвищення контрастності.
4. CNN-аналіз кожного кадру.
5. LSTM-моделювання часової динаміки.
6. Класифікація патології.

Таблиця 4.1

Основні компоненти CNN-LSTM системи

Компонент	Функція
CNN	Виділення просторових ознак
LSTM	Аналіз часових залежностей
Fully Connected Layer	Класифікація
SoftMax	Багатокласова класифікація
Sigmoid	Бінарна класифікація

CNN-модуль базується на архітектурі типу ResNet-50, що дозволяє ефективно виділяти структурні ознаки судин та патологічних змін.

LSTM-модуль забезпечує аналіз послідовностей кадрів та враховує: динаміку контрастування; рух судин; часові зміни морфології.

4.1.1 Попереднє оброблення ангіографічних відеоданих

Перед навчанням нейронної мережі виконується попереднє оброблення ангіографічних відеопослідовностей (табл. 4.2).

Основними етапами preprocessing є: виділення кадрів із відео; покращення контрастності; придушення шумів; масштабування зображень; нормалізація інтенсивності (рис. 4.2).

Для підвищення контрастності використовується CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization), а для придушення шумів — Gaussian Blur.

Таблиця 4.2

Методи preprocessing ангиографічних даних

Метод	Призначення
CLAHE	Підвищення контрастності
Gaussian Blur	Придушення шумів
Resize 224×224	Уніфікація розмірів
Normalization	Нормалізація інтенсивності
Data Augmentation	Підвищення стійкості моделі

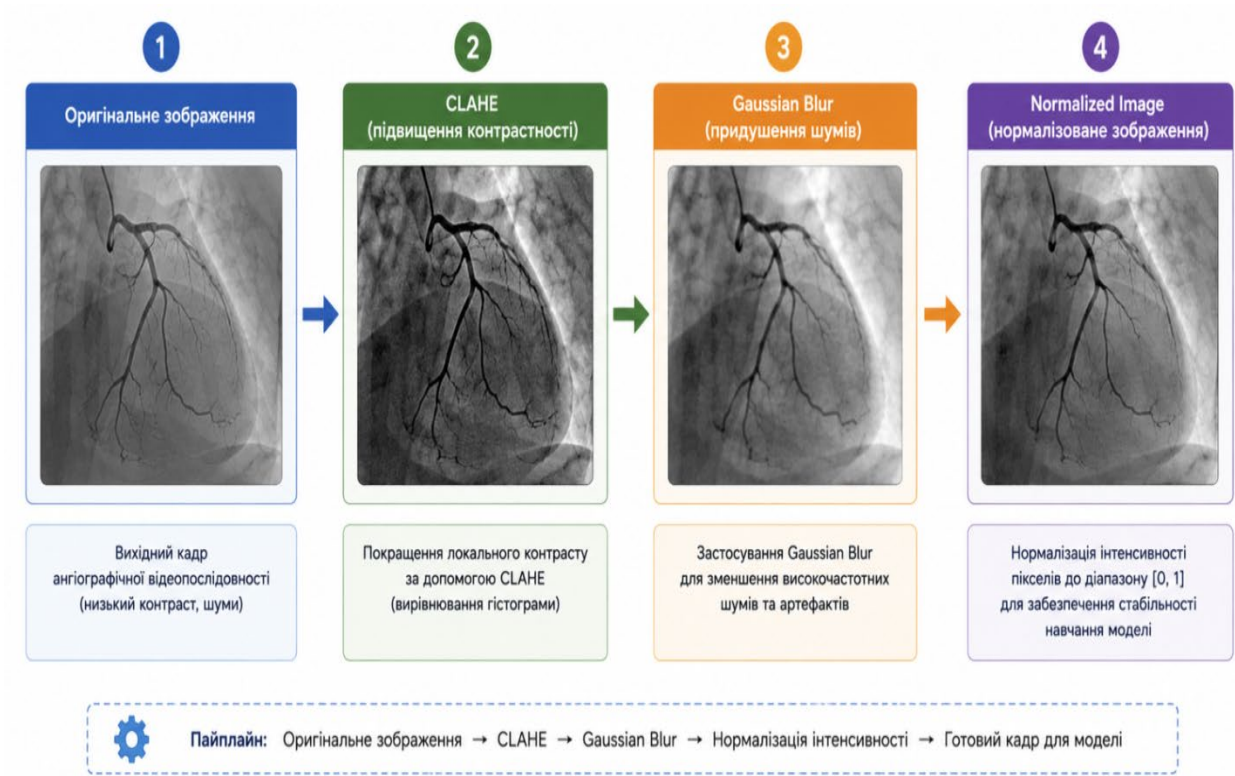


Рисунок 4.2 – Етапи попереднього оброблення ангиографічних кадрів

Для підвищення узагальнювальної здатності моделі застосовуються методи Data Augmentation: випадкові повороти; зміна яскравості; горизонтальне віддзеркалення.

4.1.2 Навчання та оптимізація моделі

Гібридна CNN-LSTM модель реалізується у середовищі PyTorch із використанням попередньо навчених ваг ImageNet (табл. 4.3)

Для навчання застосовується (рис. 4.3): Stochastic Gradient Descent (SGD); momentum = 0.9; learning rate = 0.001; dropout = 0.3; L2-регуляризація.

Таблиця 4.3

Основні параметри навчання моделі

Параметр	Значення
Optimizer	SGD
Learning Rate	0.001
Epochs	100
Dropout	0.3
Hidden Units LSTM	256
LSTM Layers	2

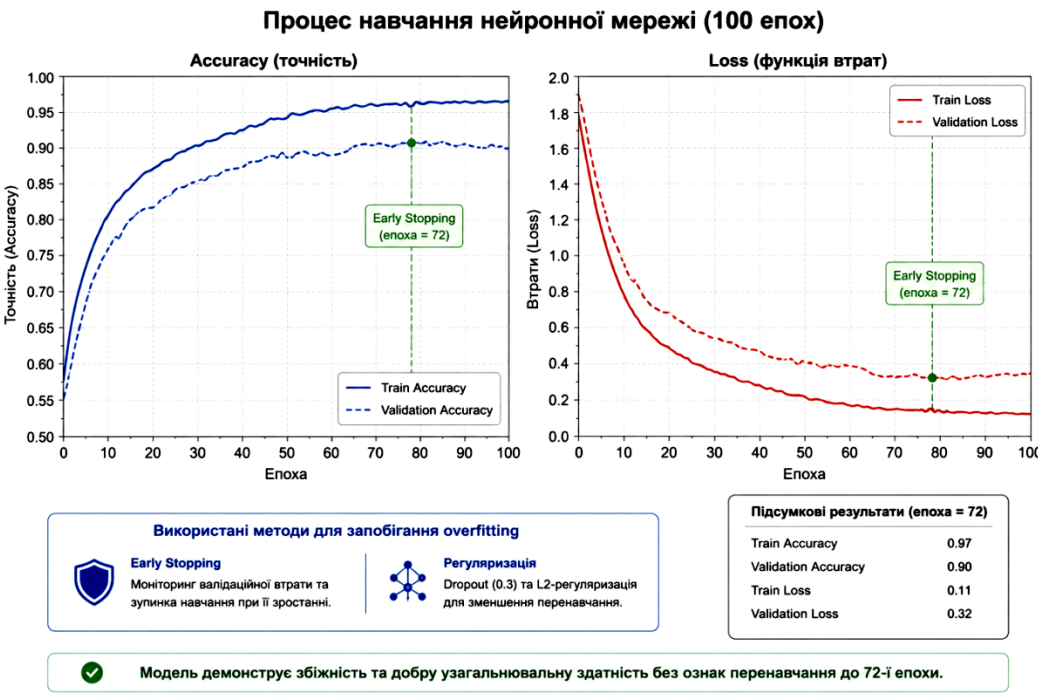


Рисунок 4.3 – Графік процесу навчання нейронної мережі

Для запобігання overfitting використовується Early Stopping та регуляризація.

4.1.3 Оцінювання ефективності системи

Для оцінювання ефективності CNN-LSTM моделі використовуються такі метрики: Accuracy; Precision; Recall; F1-score; ROC-AUC; Specificity. Результати оцінювання представлені в табл.. 4.4 та рис. 4.4.

Таблиця 4.4

Основні метрики оцінювання	
Метрика	Значення
Accuracy	0.88
Precision	0.85
Recall	0.92
F1-score	0.88
AUC ROC	0.91

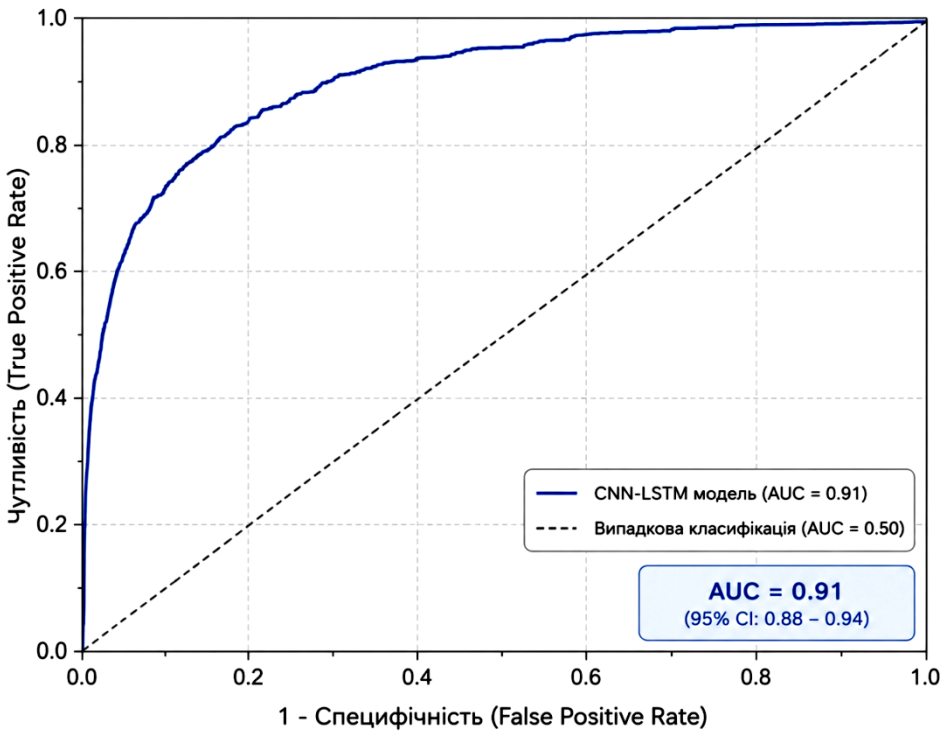


Рисунок 4.4 – ROC-крива запропонованої CNN-LSTM моделі

Отримані результати свідчать про високу ефективність запропонованої моделі при автоматизованому аналізі ангіографічних відеопослідовностей.

Особливо високі результати були отримані для:

- дифузних стенозів;
- хронічних оклюзій (СТО);
- протяжних уражень.

4.1.4 Аналіз результатів класифікації патологій

Проведений аналіз показав, що модель демонструє високу чутливість до складних патологій коронарних артерій (табл. 4.5, рис. 4.5).

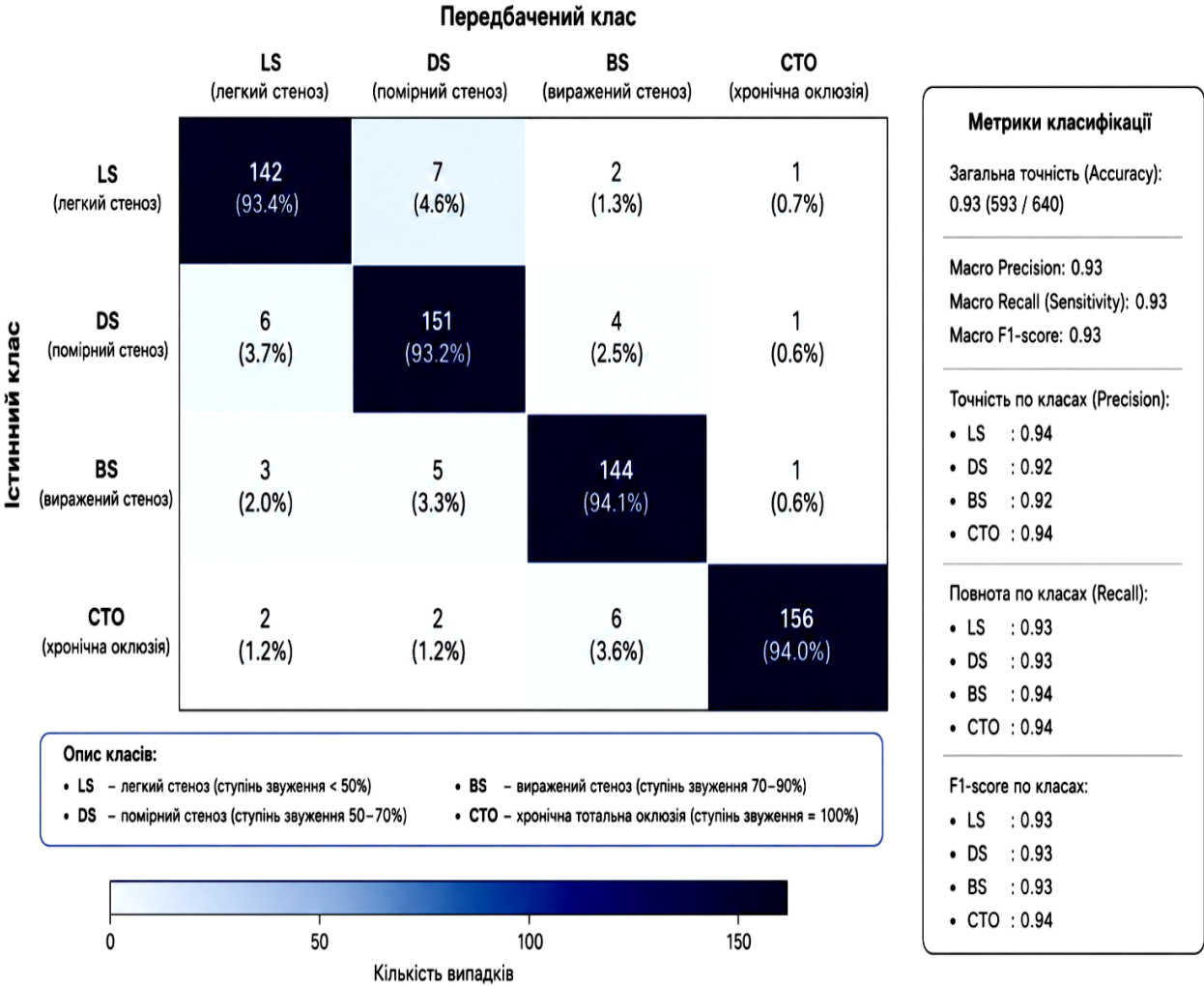


Рисунок 4.5 – Confusion Matrix класифікації патологій

Таблиця 4.5

Результати класифікації різних типів патологій

Тип патології	Recall	Precision
СТО	1.00	0.90
Diffuse Stenosis	0.95	0.90
Bifurcation Stenosis	0.83	0.85
Local Stenosis	0.80	0.80

Найкращі результати були отримані для СТО, що пояснюється характерною ангіографічною картиною повної оклюзії судини.

Складнішими для класифікації виявилися короткі локальні стенози, що можуть маскуватися шумами або анатомічними особливостями судин.

4.2 Рекомендації щодо створення інтелектуалізованої біотехнічної системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій

Розроблення інтелектуалізованої біотехнічної системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій є актуальним напрямком сучасної медичної інженерії, що поєднує методи цифрової обробки медичних зображень, штучного інтелекту, комп'ютерного зору та систем підтримки прийняття рішень. Основною метою такої системи є автоматизоване виявлення патологічних змін у коронарних судинах та підвищення точності ранньої діагностики ішемічної хвороби серця. Під час створення інтелектуалізованої системи доцільно враховувати комплекс технічних, програмних та інформаційних вимог, які забезпечують високу ефективність функціонування системи в умовах реальної клінічної практики.

4.2.1 Загальна концепція побудови інтелектуалізованої біотехнічної системи

Інтелектуалізована біотехнічна система повинна базуватись на модульному принципі побудови, що забезпечує можливість масштабування, модернізації та інтеграції нових алгоритмів аналізу.

Загальну концепцію інтелектуалізованої біотехнічної системи наведено на рис. 4.4.

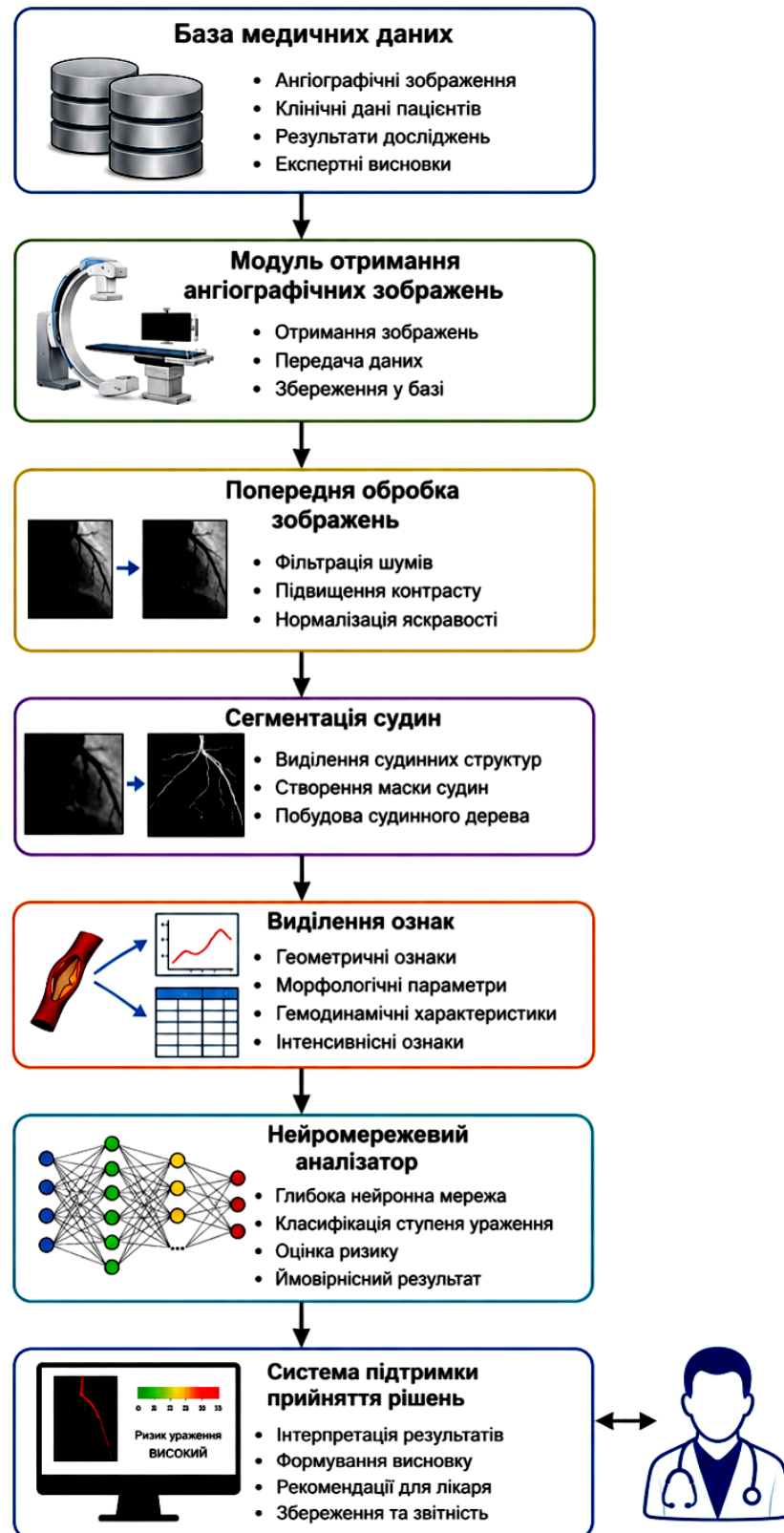


Рисунок 4.6 – Архитектура інтелектуалізованої біотехнічної системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій

Основою функціонування системи є інтеграція алгоритмів штучного інтелекту з медичними інформаційними технологіями. Це дозволяє автоматизувати аналіз ангіографічних зображень та формувати об'єктивну оцінку ризику ураження коронарних артерій.

4.2.2 Рекомендації щодо формування бази медичних даних

Одним із ключових етапів створення системи є формування якісної бази ангіографічних зображень. База даних повинна містити:

- ангіографічні зображення різних проекцій;
- клінічні параметри пацієнтів;
- результати коронарографії;
- інформацію про ступінь стенозу;
- експертні висновки кардіологів.

Рекомендована структура бази даних наведена на рис. 4.7.

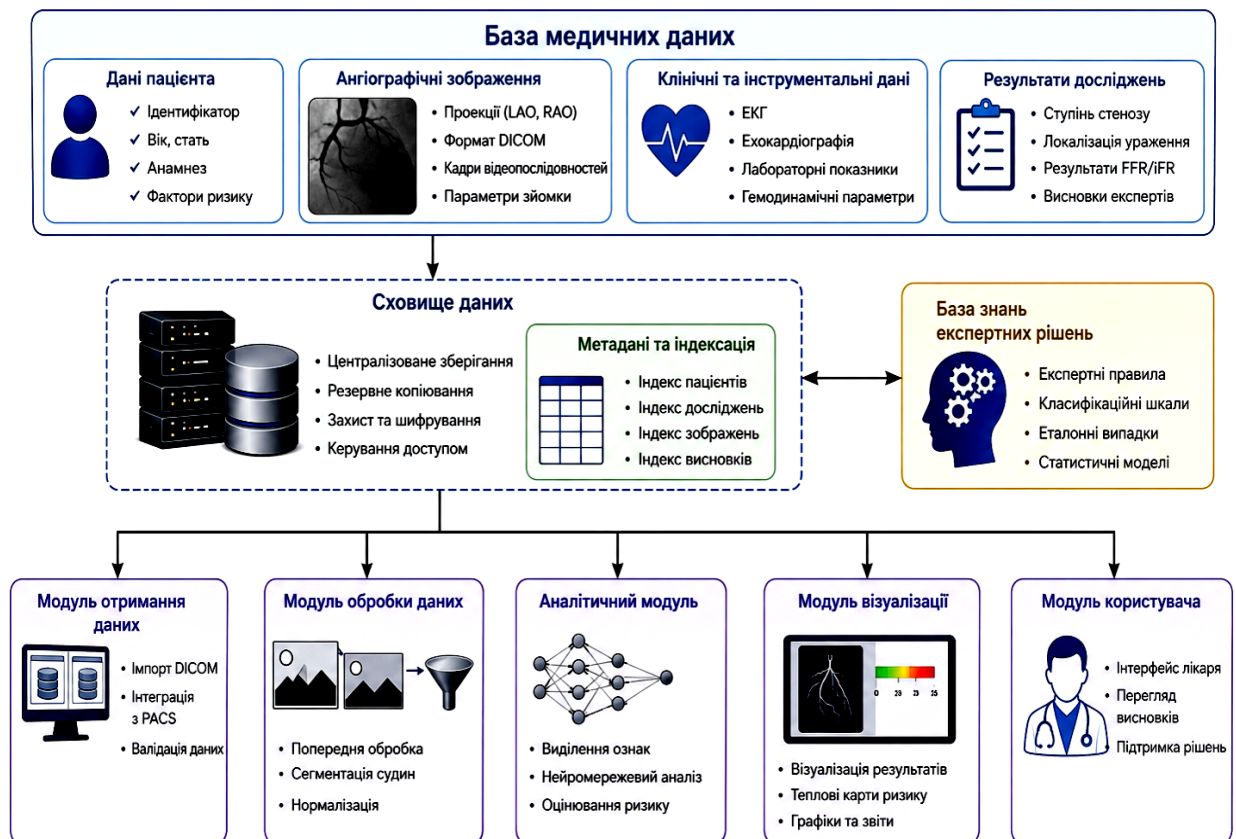


Рисунок 4.7 – Рекомендована структура бази медичних даних

Для забезпечення високої точності класифікації необхідно використовувати великі масиви медичних даних із різними ступенями патологій.

4.2.3 Рекомендації щодо попередньої обробки зображень

Ангіографічні зображення містять значну кількість шумів та артефактів, що ускладнює аналіз судинних структур. Тому важливим етапом є попередня цифрова обробка.

Доцільно застосовувати: медіанну фільтрацію; гаусову фільтрацію; адаптивне підвищення контрасту; морфологічні операції; частотну фільтрацію.

Алгоритм попередньої обробки наведено на рис. 4.8.

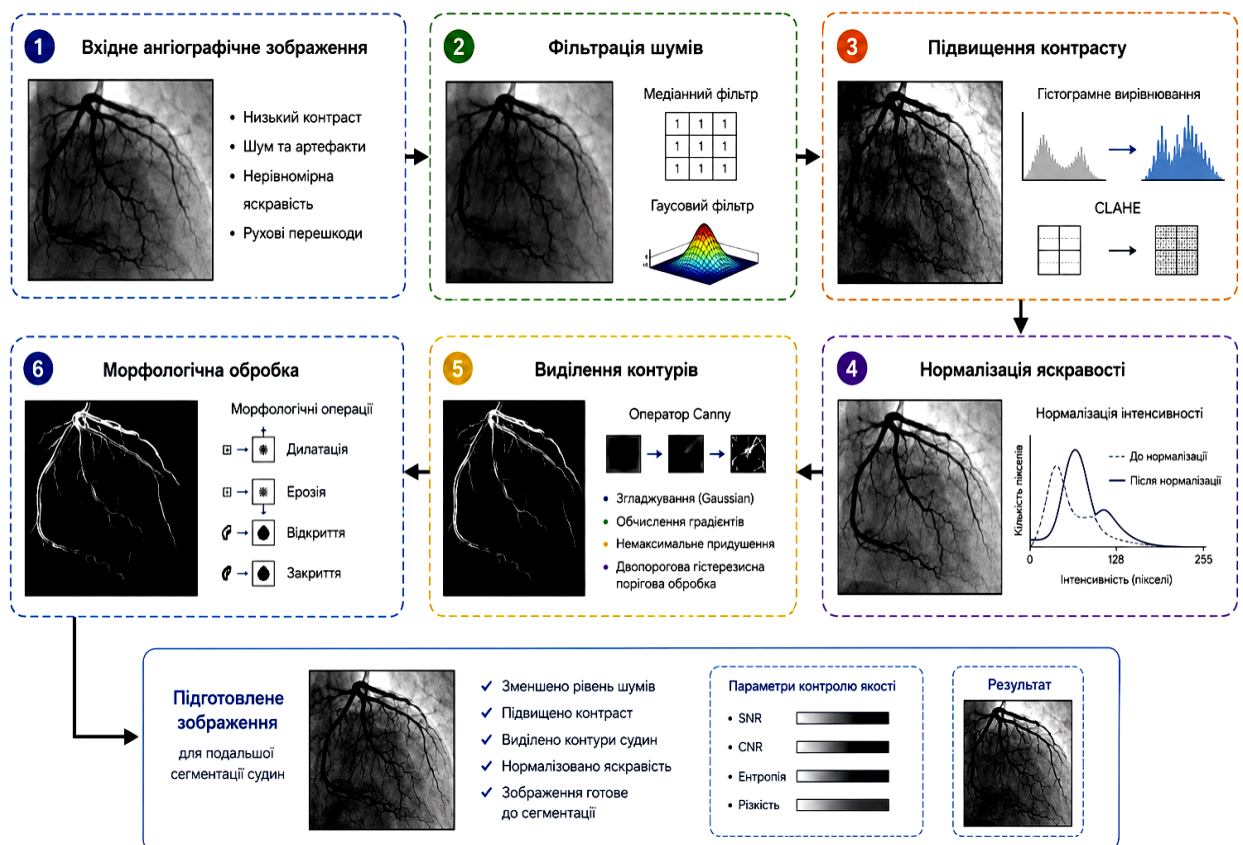


Рисунок 4.8 – Алгоритм попередньої обробки ангіографічних зображень

Попередня обробка дозволяє підвищити точність сегментації та зменшити кількість помилок при аналізі судинного русла.

4.2.4 Рекомендації щодо сегментації коронарних артерій

Сегментація є одним із найважливіших етапів аналізу ангіографічних даних. Для цього рекомендується використовувати:

- методи активних контурів;
- оператори Sobel і Canny;
- морфологічні алгоритми;
- згорткові нейронні мережі U-Net;
- глибокі CNN-моделі.

Схему сегментації наведено на рис. 4.9.

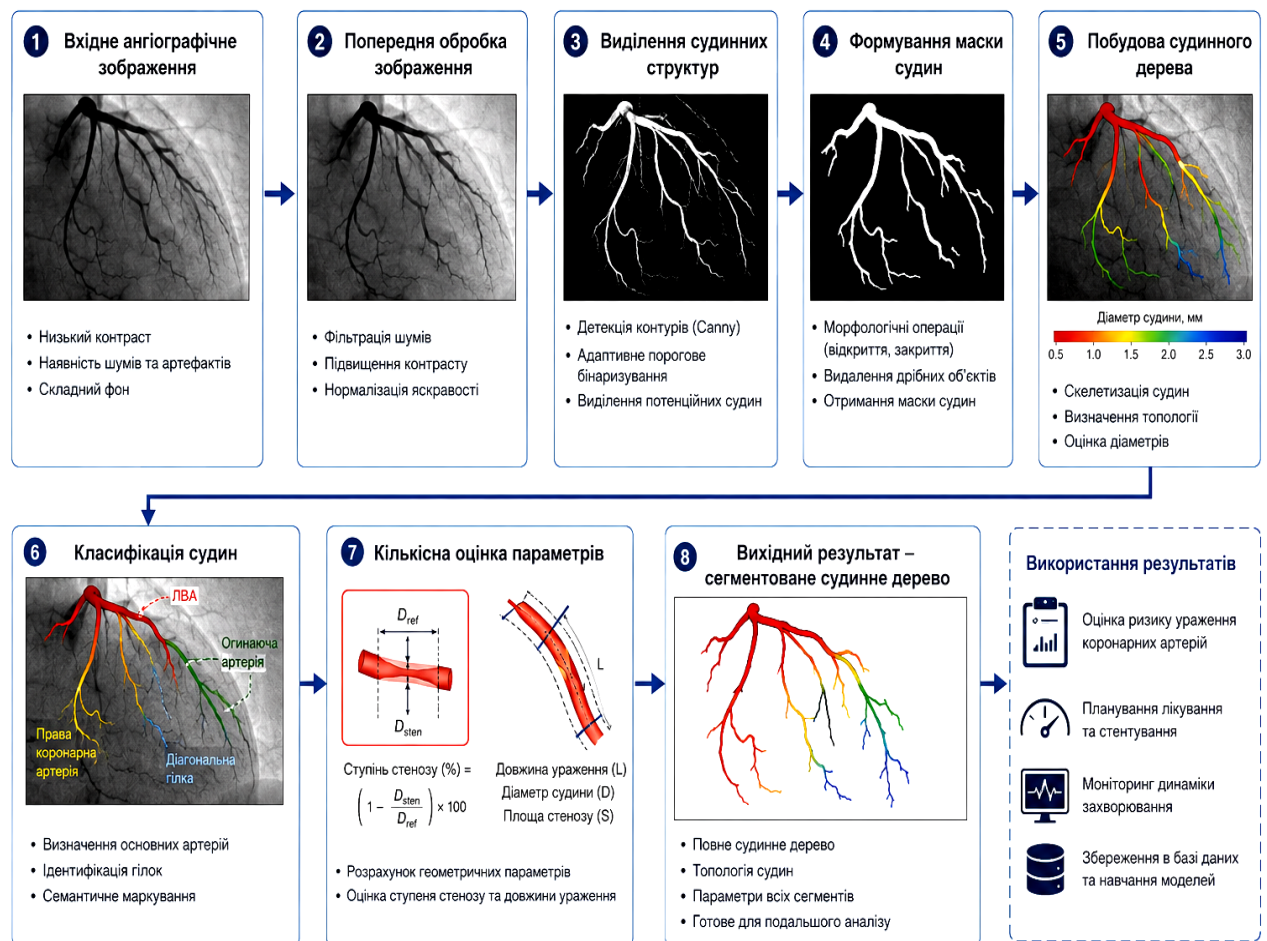


Рисунок 4.9 – Етапи сегментації коронарних артерій

Використання CNN-моделей дозволяє автоматично визначати межі судин навіть за низької якості ангіографічного зображення.

4.2.5 Рекомендації щодо застосування інтелектуалізованого підходу для обробки ангиографічних зображень

Для оцінювання ризику ураження коронарних артерій доцільно використовувати глибокі нейронні мережі, зокрема: CNN; ResNet; DenseNet; EfficientNet; U-Net.

Архітектуру інтелектуального аналізатора наведено на рис. 4.10.

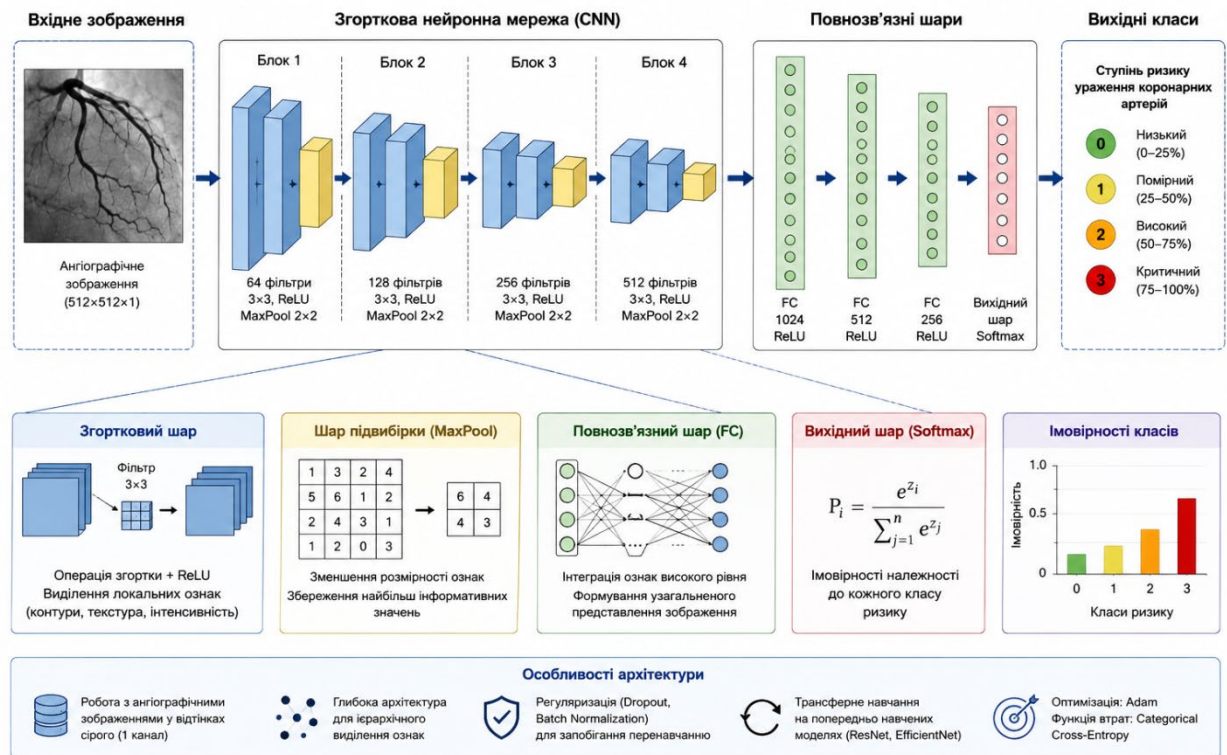


Рисунок 4.10 – Архітектура нейромережевого аналізатора

Для підвищення точності системи рекомендується використовувати трансферне навчання та аугментацію медичних зображень.

4.2.6 Рекомендації щодо системи підтримки прийняття рішень

Система підтримки прийняття рішень повинна забезпечувати:

- автоматичну оцінку ступеня стенозу;
- визначення ризику ішемічної хвороби серця;
- формування медичного висновку;
- підтримку лікаря-кардіолога.

Схему роботи інтелектуалізовано біотехнічної системи наведено на рис. 4.11.

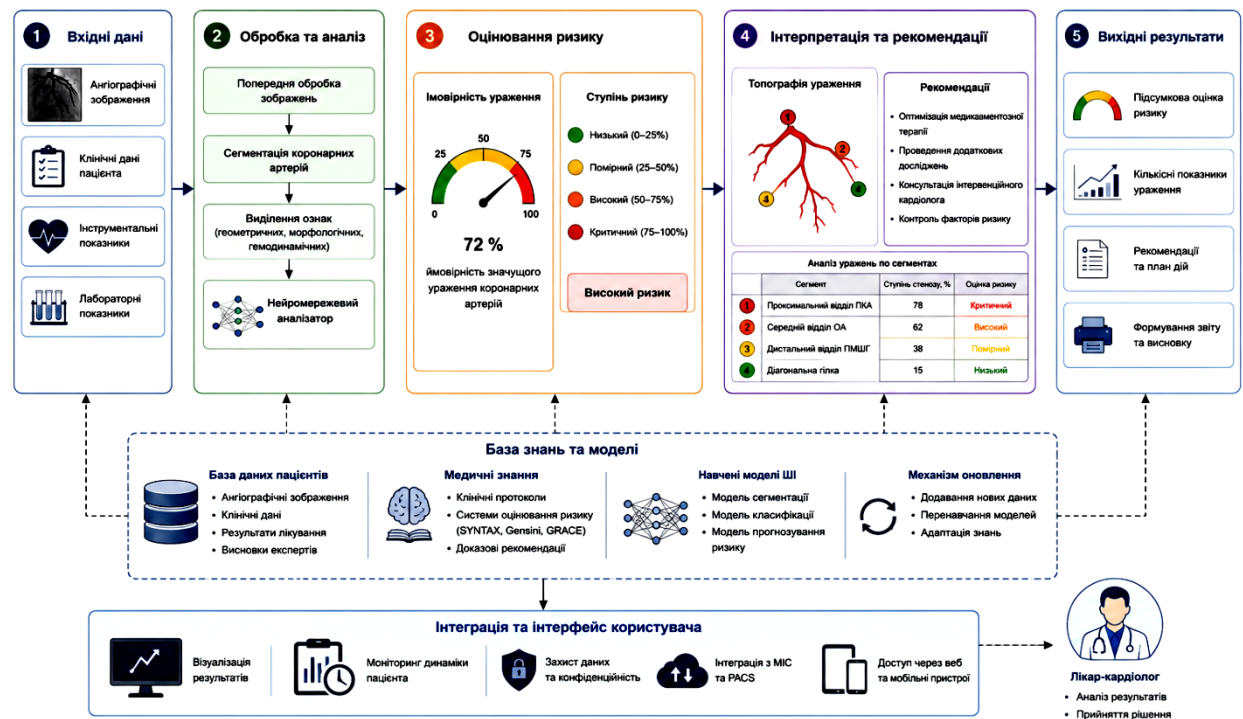


Рисунок 4.11 – Система підтримки прийняття діагностичних рішень

Інтелектуальна система повинна працювати в режимі реального часу та забезпечувати можливість інтеграції з медичними інформаційними системами лікувального закладу.

Таким чином, створення інтелектуалізованої біотехнічної системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій є перспективним напрямком розвитку медичних інформаційних технологій. Використання сучасних методів цифрової обробки зображень та штучного інтелекту дозволяє автоматизувати аналіз ангіографічних даних, підвищити точність діагностики та забезпечити підтримку лікаря при прийнятті клінічних рішень.

Особливу увагу при розробленні системи необхідно приділяти:

- якості медичних даних;
- ефективності алгоритмів сегментації;
- оптимізації неймережевих моделей;

- інтеграції системи з медичними базами даних;
- забезпеченню високої швидкодії та достовірності результатів.

Запропоновані рекомендації можуть бути використані при створенні сучасних інтелектуальних систем кардіологічної діагностики та автоматизованого оцінювання ризику розвитку серцево-судинних захворювань.

4.3 Рекомендації щодо створення біотехнічної системи аналізу потенційних продуцентів біогенних магнітних наночастинок на основі інформаційної технології BLAST

Сучасний розвиток біомедичної інженерії та біотехнічних систем характеризується активним впровадженням інформаційних технологій для аналізу біологічних об'єктів, молекулярної діагностики та підтримки прийняття рішень у медичній практиці. Особливого значення набувають системи, орієнтовані на дослідження патогенних мікроорганізмів, здатних до біомінералізації біогенних магнітних наночастинок (БМН), оскільки такі наноструктури можуть впливати на перебіг серцево-судинних захворювань та використовуватись у технологіях магнітокерованої терапії [61,62,63].

Серцево-судинні захворювання залишаються однією з провідних причин смертності у світі. Значну частину некоронарогенних патологій серця становлять міокардити та інфекційні ендокардити, етіологія яких пов'язана з вірусними, бактеріальними, грибковими та паразитарними агентами. До найбільш поширених патогенів належать *Staphylococcus aureus*, *Borrelia burgdorferi*, *Coxiella burnetii*, *Mycoplasma pneumoniae*, *Brucella sp.*, *Legionella pneumophila* та *Aspergillus fumigatus*. Дослідження механізмів їх взаємодії з організмом людини та здатності до утворення БМН є актуальним завданням сучасної біомедичної інженерії [61,62].

У межах дисертаційного дослідження запропоновано біотехнічну систему аналізу потенційних продуцентів біогенних магнітних наночастинок,

яка базується на використанні інформаційної технології BLAST (Basic Local Alignment Search Tool). Основним призначенням системи є автоматизований пошук та ідентифікація білкових гомологів, відповідальних за процеси біомінералізації магнетиту у патогенних та умовно-патогенних мікроорганізмах [61,62,63].

Біотехнічна система включає такі основні компоненти:

1. **Біологічний об'єкт дослідження** – білки магнітотактичних бактерій *Magnetospirillum gryphiswaldense*, зокрема білки групи Mam, що забезпечують синтез кристалічних магнітних наночастинок.
2. **Інформаційно-аналітичний модуль** – програмне середовище BLAST, реалізоване на базі ресурсів NCBI, яке виконує локальне вирівнювання амінокислотних послідовностей та визначає ступінь гомології між білками.
3. **Модуль обробки та оцінки результатів**, який аналізує параметри вирівнювання:
 - значення E-value;
 - рівень ідентичності (Ident);
 - покриття послідовності (Query Cover);
 - максимальний бал вирівнювання (Max Score).
4. **Модуль підтримки прийняття рішень**, що класифікує досліджувані мікроорганізми за потенційною здатністю до біомінералізації БМН та визначає перспективність їх використання у технологіях магнітокерованої доставки лікарських препаратів.

Функціональна схема біотехнічної системи передбачає послідовне виконання етапів збору геномних даних, вирівнювання білкових послідовностей, оцінювання параметрів гомології та формування висновків щодо наявності у мікроорганізмів білків, необхідних для синтезу магнетиту.

Основою роботи системи є алгоритм локального вирівнювання BLAST, який дозволяє виявляти ділянки подібності між білковими послідовностями навіть при частковій гомології. На відміну від глобального

вирівнювання, локальний пошук забезпечує підвищення чутливості системи при аналізі еволюційно віддалених мікроорганізмів [61,62,63].

У процесі дослідження було проведено порівняння амінокислотних послідовностей білків групи Mam з протеомами патогенних мікроорганізмів – збудників серцевих захворювань. Для аналізу використовувались критерії:

1. $E\text{-value} \leq 0,02$;
2. високий показник Ident;
3. значне покриття послідовності.

Отримані результати показали, що мікроорганізми *Staphylococcus aureus*, *Borrelia burgdorferi*, *Coxiella burnetii*, *Mycoplasma pneumoniae*, *Brucella sp.*, *Legionella pneumophila* та *Aspergillus fumigatus* мають гомологічні білки, пов'язані з процесами біомінералізації магнітних наночастинок. Найвищі показники подібності були отримані для *Staphylococcus aureus*, де рівень ідентичності становив 36,8% при $E\text{-value}$ $9e-46$.

Наявність гомологів білків MamA та інших білків магнітосомного комплексу дозволяє зробити висновок про потенційну здатність зазначених мікроорганізмів до синтезу кристалічного магнетиту. Це створює передумови для використання таких біологічних структур у складі біотехнічних систем магнітокерованої терапії, локальної гіпертермії та адресної доставки лікарських препаратів.

Запропонована біотехнічна система має такі переваги:

1. автоматизація процесу аналізу білкових послідовностей;
2. висока швидкість обробки геномних даних;
3. можливість раннього виявлення потенційних продуцентів БМН;
4. інтеграція біоінформатичних методів у медичні діагностичні технології;
5. перспективність використання у системах персоналізованої медицини.

Таким чином, використання інформаційної технології BLAST у складі біотехнічної системи дозволяє ефективно здійснювати аналіз патогенних мікроорганізмів та визначати їх потенціал до біомінералізації магнітних наночастинок. Отримані результати можуть бути використані при створенні інтелектуалізованих систем біомедичної діагностики, магнітокерованої терапії та розробці нових методів лікування серцево-судинних захворювань.

4.3.1 Особливості інформаційної технології Blast

BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) — це набір програм, розроблених для виконання пошуку подібності в базі даних послідовностей (рис.4.12).

Рисунок 4.12 – Програмний інтерфейс програми BLAST

Часто використовують такі пошуки, щоб отримати уявлення про еволюційні зв'язки та використовувати їх для висновку про функцію та

біологічну важливість генних продуктів. BLAST використовує алгоритм, який шукає локальне вирівнювання (вирівнювання деякої частини двох послідовностей) на відміну від глобального вирівнювання (вирівнювання двох послідовностей по всій їх довжині). Шляхом пошуку локальних вирівнювань BLAST може ідентифікувати області подібності в межах двох послідовностей [58,59,60].

4.3.2 Методика вирівнювання досліджуваного білка з необхідним мікроорганізмом – збудником захворювання

У дослідженні використано методи попарного та множинного вирівнювання з використанням програми “BLAST”, Національного центру біотехнологічної інформації (NCBI), яка відкрита у вільному доступі [27]. Проведено аналіз порівняння амінокислотних послідовностей білків групи Mam, без яких неможлива біомінералізація БМН у *Magnetospirillum gryphiswaldense* (16S rRNA pseudouridine(516) з протеомами бактерій *Staphylococcus aureus* (taxid:1280), *Borrelia burgdorferi* (taxid:139), *Coxiella burnetii*, *Mycoplasma pneumonia*, *Brucella sp*, *Legionella pneumophila*, *Aspergillus* (taxid:5052).

Пошук білка у мікроорганізмі *Magnetospirillum gryphiswaldense* здійснено шляхом активації Run Blast і вирівнявши його з необхідним мікроорганізмом – збудником серцевих захворювань (рис. 4.13,а,б).

При пошуку гомологів найбільш важливими параметрами є номери Ident і E-value. E-число – це очікуване число послідовностей у базі даних, яке має таке ж, або краще значення числа z (мережа не випадковості випадковостей при вирівнюванні послідовностей). Вибираються з рисунку 4.13,а,б ті гомологи, значення E-числа в яких $E \leq 0,02$. Крім числа E, необхідно також врахувати параметр Ident, за яким можна стверджувати про структуру та функції вирівнюваних послідовностей.

a)

6)

Рисунок 4.13 – Методика вирівнювання білка з необхідним мікроорганізмом – збудником серцевих захворювань

Таблиця 4.6

**Порівняння білків МТБ *Magnetospirillum gryphiswaldense* та
білків потенційних продуцентів кристалічних БМН, що є збудниками
серцевих захворювань**

<u>Description</u>	<u>Scientific Name</u>	<u>Max Score</u>	<u>Total Score</u>	<u>Query Cover</u>	<u>E value</u>	<u>Per. Ident</u>	<u>Acc. Len</u>	<u>Accession</u>
<u>pseudouridylate synthase</u> <u>[Staphylococcus aureus subsp. aureus CO-98]</u>	<u>Staphylococcus aureus subsp. aureus CO-98</u>	157	157	98%	9e-46	36.80%	230	<u>KDP54500.1</u>
<u>pseudouridine synthase</u> <u>[Borrelia burgdorferi]</u>	<u>Borrelia burgdorferi</u>	95.5	95.5	97%	6e-24	25.86%	249	<u>WP_002556731.1</u>
<u>pseudouridine synthase</u> <u>[Coxiella burnetii]</u>	<u>Coxiella burnetii</u>	92.0	92.0	99%	9e-23	31.80%	244	<u>WP_259430858.</u>
<u>RluA family pseudouridine synthase</u> <u>[Mycoplasmoides pneumoniae]</u>	<u>Mycoplasmoides pneumoniae</u>	33.1	33.1	73%	0.021	23.08%	309	<u>WP_014325446.1</u>
<u>pseudouridine synthase</u> <u>[Brucella sp.]</u>	<u>Brucella sp.</u>	67.8	67.8	93%	8e-14	32.61%	626	<u>WP_313031203.1</u>
<u>TPA: pseudouridine synthase</u> <u>[Legionella pneumophila]</u>	<u>Legionella pneumophila</u>	76.3	76.3	98%	1e-15	29.41%	248	<u>HEL8436968.1</u>
<u>hypothetical protein</u> <u>KXV85_003662</u> <u>[Aspergillus fumigatus]</u>	<u>Aspergillus fumigatus</u>	127	127	50%	1e-35	32.31%	131	<u>KAH2818792.1</u>

Наприклад, якщо дві білки мають ідентифікатор більше 45%, то вони мають схожу структуру та функції [62, 63, 64].

Методами порівняльної геноміки за допомогою інформаційної технології BLAST проведено вирівнювання білків МТБ з білками патогенних та умовно патогенних мікроорганізмів, збудників серцевих захворювань у людини. Показано, що такі штами, як *Staphylococcus aureus* (taxid:1280), *Borrelia burgdorferi* (taxid:139), *Coxiella burnetii*, *Mycoplasma pneumonia*, *Brucella sp*, *Legionella pneumophila*, *Aspergillus* (taxid:50520) є потенційними продуцентами саме кристалічного магнетиту і відносяться до 4-ї групи, оскільки мають гомологи всіх білків, і таким чином, без яких неможлива біомінералізація магнітних наночастинок, включаючи білок MamA, що відповідає за синтез кристалічних наночастинок [62,63].

Таким чином, за допомогою інтелектуалізовано технології BLAST методами порівняльної геноміки проведено вирівнювання білків МТБ з білками патогенних та умовно патогенних мікроорганізмів, збудників серцевих захворювань у людини. Показано, що такі штами, як *Staphylococcus aureus* (taxid:1280), *Borrelia burgdorferi* (taxid:139), *Coxiella burnetii*, *Mycoplasma pneumonia*, *Brucella sp*, *Legionella pneumophila*, *Aspergillus* (taxid:50520) потенційними продуцентами саме кристалічного магнетиту і відносяться до 4-ї групи, оскільки мають гомологи всіх білків, і таким чином, без яких неможлива біомінералізація магнітних наночастинок, включаючи білок MamA, що відповідає за синтез кристалічних наночастинок.

Показано [62], що саме патогенні мікроорганізми, які мають властивості накопичуватися, при впливі зовнішнього магнітного поля можуть знищуватися завдяки дії гіпертермії, і це дозволяє підвищити місцевий імунітет і тим самим прискорити певні регенеративні процеси.

4.4 Перспективи розвитку інтелектуалізованих біотехнічних систем для аналізу коронарної ангіографії

Подальший розвиток систем штучного інтелекту в кардіології пов’язаний із: використанням Vision Transformers; мультимодальним аналізом; інтеграцією клінічних даних; Explainable AI; автоматичною локалізацією уражень (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Перспективні напрями розвитку AI-систем

Напря́м	Очікуваний результат
Vision Transformers	Покращення аналізу відео
Explainable AI	Інтерпретованість рішень
Multimodal AI	Комплексна діагностика
3D CNN	Аналіз просторової динаміки
Cloud AI Systems	Телемедична інтеграція

Одним із найбільш перспективних напрямів є використання архітектур Vision Transformers (ViT), які забезпечують суттєве покращення аналізу складних ангіографічних відеопослідовностей. На відміну від класичних згорткових нейронних мереж, Vision Transformers здатні враховувати глобальні просторові взаємозв’язки між окремими ділянками зображення, що особливо важливо при аналізі складної топології коронарного русла. Завдяки механізму self-attention система може ефективно виявляти стенотичні ділянки, навіть за умов низької контрастності або часткового перекриття судинних структур.

Важливою перевагою Vision Transformers є їх здатність аналізувати не лише окремі кадри, а й часову динаміку проходження контрастної речовини по коронарних судинах. Це дозволяє оцінювати не тільки анатомічні, але й функціональні характеристики кровотоку, що підвищує точність оцінювання гемодинамічно значущих стенозів.

Перспективним напрямом розвитку також є використання мультимодального штучного інтелекту (Multimodal AI). У сучасній клінічній практиці діагностика ішемічної хвороби серця базується не лише на ангіографічних зображеннях, але й на великому обсязі клінічної інформації: електрокардіографії, ехокардіографії, лабораторних показниках, результатах КТ та МРТ, даних холтерівського моніторингу та історії захворювання пацієнта (рис. 4.14).

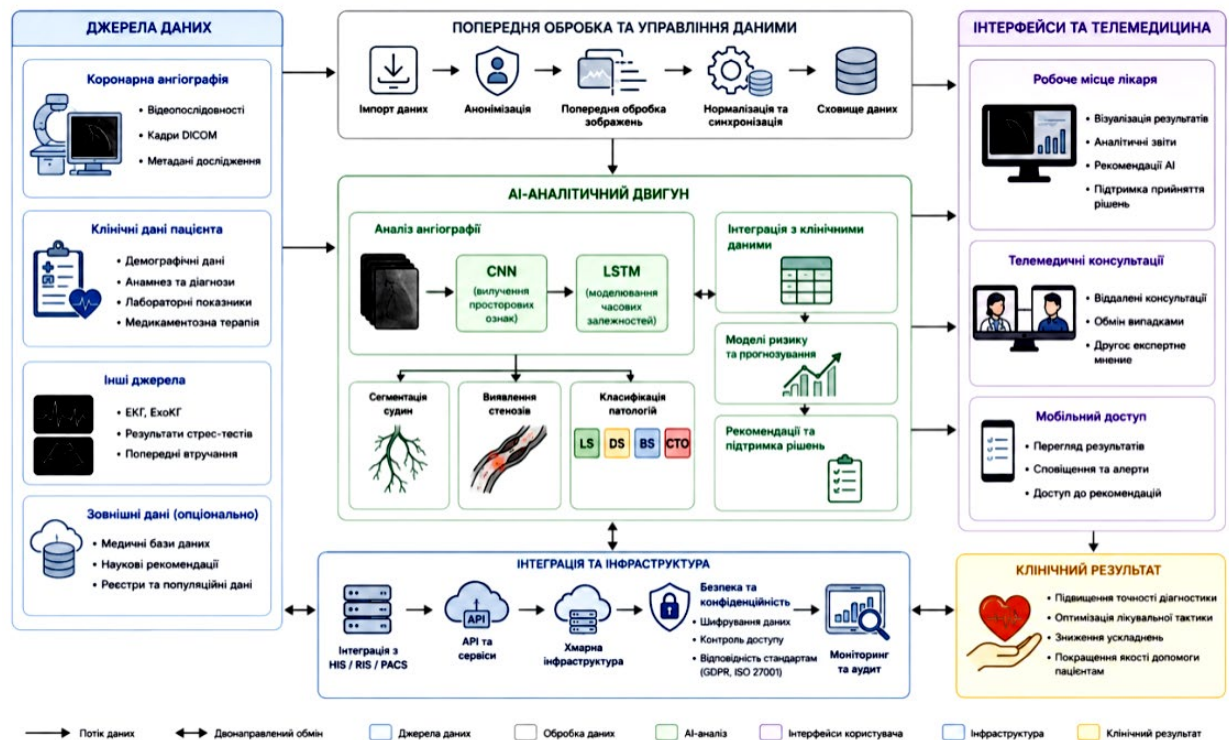


Рисунок 4.14 – Структура інтелектуалізованої системи підтримки прийняття рішень у кардіології

Мультимодальні AI-системи дозволяють інтегрувати різноманітні джерела інформації в єдину інтелектуальну модель. Такий підхід забезпечує більш повне оцінювання стану пацієнта та підвищує точність прогнозування ризику розвитку гострих коронарних подій. Наприклад, поєднання ангіографічних даних із біохімічними маркерами та параметрами ЕКГ дозволяє формувати комплексну модель ризику ішемії міокарда.

Особливо актуальним є розвиток Explainable AI (XAI) — пояснюваного штучного інтелекту. Однією з основних проблем сучасних нейромережевих систем є їх недостатня інтерпретованість для лікаря. У більшості випадків глибокі нейронні мережі функціонують як «чорна скринька», що ускладнює клінічну довіру до автоматизованих результатів.

Таким чином, подальший розвиток інтелектуалізованих біотехнічних систем для аналізу коронарної ангіографії пов'язаний із інтеграцією сучасних методів штучного інтелекту, глибокого навчання та мультимодального аналізу медичних даних. Використання Vision Transformers, Explainable AI, 3D CNN, CNN-LSTM архітектур та хмарних технологій дозволить суттєво підвищити точність автоматизованої діагностики, забезпечити підтримку клінічних рішень та створити нове покоління інтелектуальних систем кардіологічної діагностики.

4.5 Висновки до четвертого розділу

- Запропоновано модель глибокої нейронної мережі, яка інтегрує згорткові нейронні мережі (ЗНМ) та одиниці довгої короткочасної пам'яті (ЛКМ) для аналізу відеопослідовностей коронарної ангіографії, що дозволило обробляти біомедичні показники на тестовому наборі, з точністю 88%, повнотою результатів 92% та площею ROC-кривої (AUC) приблизно 0,91. Модель ефективно розрізняє різні типи уражень, такі як фокальні, дифузні та оклюзійні патерни, з високим значенням специфічності та інтерпретованістю, про що свідчать показники візуалізації за допомогою градієнтно-зваженого картування активації класів (Grad-CAM).
- Розроблено рекомендації щодо створення інтелектуалізованої біотехнічної системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій,

яка дозволяє автоматизувати аналіз ангіографічних даних, підвищити точність діагностики та забезпечити підтримку лікаря при прийнятті клінічних рішень.

- Особливу увагу при розробленні системи необхідно приділяти: якості медичних даних; ефективності алгоритмів сегментації; оптимізації нейромережевих моделей; інтеграції системи з медичними базами даних; забезпеченню високої швидкодії та достовірності результатів.
- Запропоновані рекомендації можуть бути використані при створенні сучасних інтелектуальних систем кардіологічної діагностики та автоматизованого оцінювання.
- Розглянуто подальший розвиток систем штучного інтелекту в кардіології, який пов'язаний із: використанням Vision Transformers; мультимодальним аналізом; інтеграцією клінічних даних; Explainable AI; автоматичною локалізацією уражень
- Представлено рекомендації щодо використання інформаційної технології BLAST у складі біотехнічної системи дозволяє ефективно здійснювати аналіз патогенних мікроорганізмів та визначати їх потенціал до біомінералізації магнітних наночастинок. Отримані результати можуть бути використані при створенні інтелектуалізованих систем біомедичної діагностики, магнітокерованої терапії та розробці нових методів лікування серцево-судинних захворювань.

ВИСНОВКИ

Розвинуто методологію розвитку інтелектуалізованих біотехнічних систем для оцінювання ризику ураження коронарних артерій шляхом вдосконалення методів та підвищення інформативності, достовірності оцінювання ризику ураження коронарних артерій шляхом використання методів нечітких множин та створення інтелектуалізованої біотехнічної системи стратифікації та прогнозування перебігу захворювання, що надає можливість проводити профілактику та запобігати дестабілізації перебігу захворювання та розвитку різних ускладнень хвороби з NSTEMI.

На основі теоретичних досліджень реалізовано інтелектуалізовану біотехнічну систему стратифікації та прогнозування перебігу захворювання, що надає можливість проводити профілактику та запобігати дестабілізації перебігу захворювання та розвитку різних ускладнень хвороби з NSTEMI, підвищення інформативності, достовірності оцінювання ризику ураження коронарних артерій шляхом використання методів нечітких множин та створення інтелектуалізованої біотехнічної системи.

Основні наукові результати

1. Вперше одержано математичні моделі для оцінювання біомедичних зображень з використанням методів нечітких множин на основі експертних баз знань, що дозволило проводити комплексне оцінювання ризику ураження коронарних артерій, що підвищило достовірність оцінювання ризику ураження коронарних артерій до 97,7 %.
2. Вперше запропоновано комплексний підхід до сегментації коронарних судин на ангиографічних зображеннях, який базується на комбінованому використанні оператора Собеля, локальних статистичних характеристик та адаптивної медіанної фільтрації, що дозволило підвищити точність виділення меж судинних структур в

умовах наявності шумів та низького контрасту ангіографічних зображень.

3. Удосконалено метод попередньої обробки ангіографічних зображень коронарних артерій за рахунок адаптивного коригування яскравості на основі локальних статистичних параметрів, що забезпечує зменшення впливу шумів при одночасному збереженні контурів судинного русла та підвищує інформативність медичних зображень для подальшої сегментації.
4. Отримав подальший розвиток метод оцінювання якості сегментації коронарних судин шляхом введення комплексного критерію ефективності, який інтегрує індекс структурної подібності SSIM, критерій Пратта FOM та відносну похибку визначення геометричних параметрів, що дозволяє здійснювати об'єктивне порівняння алгоритмів сегментації ангіографічних зображень.
5. Вперше запропоновано структуру інтелектуалізованої біотехнічної системи оцінювання ризику ураження коронарних артерій, яка поєднує модулі попередньої обробки, сегментації судинного дерева, нейромережевого аналізу та підтримки прийняття клінічних рішень, що забезпечує автоматизоване визначення ступеня стенозу та підвищення достовірності оцінювання ризику ішемічної хвороби серця.

В практичному плані запропоновані нові технічні рішення реалізації інтелектуалізованої біотехнічної системи стратифікації та прогнозування перебігу захворювання, що надає можливість проводити профілактику та запобігати дестабілізації перебігу захворювання та розвитку різних ускладнень хвороби з NSTEMI для підвищення інформативності, достовірності оцінювання ризику ураження коронарних артерій шляхом використання методів нечітких множин.

4. Розроблений алгоритм процесу оброблення біомедичного зображення, який базується на обчисленні автокореляційної функції, що дозволяє визначати локально-різницевий поріг знаходження середнього модуля вибірових середніх значень ознак біомедичних зображень.
5. Показано можливість використання інтелектуалізованої біотехнічної системи для вирішення задач медичної діагностики при оцінюванні ступеня анатомічного ураження коронарного русла у пацієнтів з різними формами ІХС.
6. Розроблені рекомендації щодо використання інтелектуалізованої біотехнічної системи для оброблення біомедичних зображень при оцінюванні ступеня анатомічного ураження коронарного русла.

Це має особливу цінність і мотивацію для подальшого розвитку медичних інформаційних систем і технологій, оскільки запропоновані методи, моделі і технології, зменшуючи суб'єктивність дослідника, сприяють створенню нового класу медичних інформаційних технологій для дослідження стану коронарних судин.

Розроблено практичні рекомендації щодо використання результатів проведених досліджень: в навчальному процесі – створення на базі кафедри БМІОЕС ВНТУ інноваційного навчально-наукової лабораторії біомедичної оптики та фотоніки – в рамках підготовки фахівців за спеціальністю G22 – біомедична інженерія.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено в навчальні процеси підготовки студентів ВНТУ, які навчаються за спеціальністю G 22 – біомедична інженерія та в медичну діяльність Військово-медичного клінічного центру центрального регіону, м. Вінниця, що підтверджується відповідними актами та меморандумом про впровадження результатів роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kovalenko, V.M.; Kornatskyi, V.M. (2018). Actual health problems and their minimization in the conditions of the armed conflict in Ukraine. Guide K.: NSC "Institute of Cardiology named after M. D. Strazheska", 191 p.
2. Ocheretyanaya, N. Sartans in the practice of a cardiologist: an alternative to ACE inhibitors or an optimal choice. Health of Ukraine of the XXI century 2012, 1(21), 62-63.
3. Townsend, N., Wilson, L., Bhatnagar, P., Wickramasinghe, K., Rayner, M., Nichols, M. Cardiovascular disease in Europe: epidemiological update. Eur Heart J 2016, 37(42), 3232-3245. doi: 10.1093/eurheartj/ehw334.
4. Borja, I., James, S., Agewall, S., Antunes, M. J., Bucciarelli-Ducci, C., Bueno, H., et al. 2017 ESC Guidelines for the management of acute myocardial infarction in patients presenting with ST-segment elevation: The Task Force for the management of acute myocardial infarction in patients presenting with ST-segment elevation of the European Society of Cardiology (ESC). Eur Heart J 2018, 39(2), 119-177. doi: 10.1093/eurheartj/ehx393.
5. Januzzi, J.L., Mebazza, A., Di Somma, S. ST2 and prognosis in acutely decompensated heart failure: the International ST2 Consensus Panel. Am J Cardiol 2015, 115(7):26B-31B. doi: 10.1016/j.amjcard.2015.01.037.
6. Kaminska, J., Koper, O. M., Siedlecka-Czykier, E., Matowicka-Karna, J., Bychowski, J., Kemon, H. The utility of inflammation and platelet biomarkers in patients with acute coronary syndromes. Saudi J Biol Sci 2018 25(7),1263-1271. doi: 10.1016/j.sjbs.2016.10.015.
7. Maslovskyi, V., Mezhiievska, I. Features of the coronary arteries anatomical lesions in NSTEMI patients depending on the association with the initial clinical characteristics. Georgian Med News 2021, 320, 85-89.
8. Choi, Y., Lee, J.H., Seo, J.I. Change in T/QRS ratio can be a supplementary

- diagnostic tool in predicting coronary artery disease in patients with NSTEMI. *Am J Emerg Med* 2021, 39, 48-54. doi: 10.1016/j.ajem.2020.01.013.
9. Shafiq, A., Jang, JS., Kureshi, F., Fendler, TJ., Gosch, K., Jones, PG., Cohen, DJ., Bach, R., Spertus, JA. Predicting Likelihood for Coronary Artery Bypass Grafting After Non-ST-Elevation Myocardial Infarction: Finding the Best Prediction Model. *Ann Thorac Surg* 2016, 102(4), 1304-11. doi: 10.1016/j.athoracsur.2016.03.090.
 10. Blondheim, DS., Kleiner-Shochat, M., Asif, A., Kazatsker, M., Frimerman, A., Abu-Fanne, R., Neiman, E., Barel, M., Levy, Y., Amsalem, N., Shotan, A., Meisel, SR. Characteristics, Management, and Outcome of Transient ST-elevation Versus Persistent ST-elevation and Non-ST-elevation Myocardial Infarction. *Am J Cardiol* 2018, 121(12), 1449-1455. doi: 10.1016/j.amjcard.2018.02.029.
 11. Maslovskiy, VI., Mezhiievskaya, IA. The level of growth stimulating factor expressed by gene 2 and troponin i in the blood plasma of NSTEMI patients depending on different clinical characteristics. *Wiad Lek* 2022, 75(1,2), 289-292.
 12. Lopez-de-Andres, A., Jimenez-Garcia, R., Hernández-Barrera, V., de Miguel-Yanes, JM., Albaladejo-Vicente, R., Villanueva-Orbaiz, R., Carabantes-Alarcon, D., Zamorano-Leon, JJ., Lopez-Herranz, M., de Miguel-Diez, J. Are there sex differences in the effect of type 2 diabetes in the incidence and outcomes of myocardial infarction? A matched-pair analysis using hospital discharge data. *Cardiovasc Diabetol* 2021, 20(1), 81. doi: 10.1186/s12933-021-01273-y.
 13. Stehli, J., Martin, C., Brennan, A., Dinh, DT., Lefkovits, J., Zaman, S. Sex Differences Persist in Time to Presentation, Revascularization, and Mortality in Myocardial Infarction Treated With Percutaneous Coronary Intervention. *J Am Heart Assoc* 2019, 8(10), e012161. doi: 10.1161/JAHA.119.012161.
 14. Caracciolo, EA., Davis, KB., Sopko, G., Kaiser, GC., Corley, SD., Schaff,

- H., Taylor, HA., Chaitman, BR. Comparison of surgical and medical group survival in patients with left main equivalent coronary artery disease. Long-term CASS experience. *Circulation* 1995, 91(9), 2335-44. doi: 10.1161/01.cir.91.9.2335.
15. Graham, G. Acute Coronary Syndromes in Women: Recent Treatment Trends and Outcomes. *Clinical Medicine Insights. Cardiology*, 2016, 10, 1-10. doi.org/10.4137/CMC.S37145.
 16. Dąbrowski, E.J., Kożuch, M., Dobrzycki, S. Left Main Coronary Artery Disease—Current Management and Future Perspectives. *J. Clin. Med* 2022, 11, 5745. <https://doi.org/10.3390/jcm11195745>.
 17. Maas, A.H., Appelman, Y.E. Gender differences in coronary heart disease. *Neth Heart J* 2010, 8(12), 598-602. doi: 10.1007/s12471-010-0841-y.
 18. Maslovskiy, V., Mezhiievska, I. Features of anatomical lesions of coronary arteries depending on the levels of ST2 and Troponin I in blood plasma in patients with NSTEMI. *Georgian medical news* 2022, 328-329, 118-121.
 19. Maslovskiy, V., Mezhiievska, I. Features of the coronary arteries anatomical lesions in NSTEMI patients depending on the association with the initial clinical characteristics. *Georgian medical news*, 2021, 320, 85-89.
 20. Nelson, A.J., Ardissino, M., Psaltis, P.J. Current approach to the diagnosis of atherosclerotic coronary artery disease: more questions than answers. *Ther Adv Chronic Dis* 2019, 1, 10:2040622319884819. doi: 10.1177/2040622319884819.
 21. Niccoli, G., Camici, P.G. Myocardial infarction with non- obstructive coronary arteries: what is the prognosis. *Eur Heart J Suppl* 2020, 22(Suppl E), E40–E45. doi: 10.1093/eurheartj/suaa057.
 22. Nordenskjöld, AM., Baron, T., Eggers, KM., Jernberg, T., Lindahl, B. Predictors of adverse outcome in patients with myocardial infarction with non-obstructive coronary artery (MINOCA) disease. *Int J Cardiol* 2018, 261, 18-23. doi: doi: 10.1016/j.ijcard.2018.03.056.

23. Tamis-Holland, J.E., Jneid, H., Reynolds, H.R. Contemporary diagnosis and management of patients with myocardial infarction in the absence of obstructive coronary artery disease: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 2019, 139, e891-908.
24. Abu, H.O., Ulbricht, C., Ding, E., Allison, J.J., Salmoirago-Blotcher, E., Goldberg, R.J., Kiefe, C.I. Association of religiosity and spirituality with quality of life in patients with cardiovascular disease: a systematic review. *Qual Life Res* 2018, 27, 2777-97. doi: 10.1007/s11136-018-1906-4.
25. Bahit, C. M., Kochar, A., Granger, C. B. Post-Myocardial Infarction Heart Failure. *JACC: Heart Failure* 2018, 6(3), 179-186. doi: 10.1016/j.jchf.2017.09.015
26. Moryś, JM., Bellwon, J., Höfer, S., Rynkiewicz, A., Gruchała, M. Quality of life in patients with coronary heart disease after myocardial infarction and with ischemic heart failure. *Arch Med Sci* 2016, 12(2), 326-33. doi: 10.5114/aoms.2014.47881.
27. Pinheiro, L.C., Reshetnyak, E., Sterling, M.R., Richman, J.S., Kern, L.M., Safford, M.M. Using health-related quality of life to predict cardiovascular disease events. *Qual Life Res* 2019, 28, 1465-75. doi: 10.1007/s11136-019-02103-1.
28. Wang, W., Chair, SY., Thompson, DR., Twinn, SF. Effects of home-based rehabilitation on health-related quality of life and psychological status in Chinese patients recovering from acute myocardial infarction. *Heart Lung* 2012, 41(1), 15-25. doi: 10.1016/j.hrtlng.2011.05.005.
29. Pandza, H., Masić, I. Expert systems in medicine. *Med Arh* 1999, 53(3 Suppl 3), 25-7.
30. Hayes-Rota, F. Construction of expert systems. www.sci.brooklyn.cuny.edu
31. Rotshtein A. Design and Tuning of Fussy IF – THEN Vuly for Medical Didicol Diagnosis. In *Fussy and Neuro-Fussy Systems in Medicine* (Eds: N. Teodorescu, A. Kandel, I. Lain.). USA. CRC-Press, 1998, pp. 235-295.
32. Kukharchuk, V.V.; Pavlov, S.V.; Holodiuk, V.S.; Kryvonosov, V.E.;

- Skorupski, K.; Mussabekova, A.; Karnakova, G. Information Conversion in Measuring Channels with Optoelectronic Sensors. *Sensors* 2022, 22, 271. doi: 10.3390/s22010271.
33. Information technologies for decision-making support in determining nasal breathing disorders: monograph / O. G. Avrunin, E. V. Bodyanskyi, V. V. Semenets, V. O. Filatov, N. O. Shushlyapina. – Kharkiv: Khnure, 2018, 132 p.
 34. Pavlov, S.V.; Martianova, T.A.; Saldan, Y.R.; Zagoruiko, L.V.; Pinaieva, O.Yu.; Omiotek, Z.; Dassibekov, K. Methods and computer tools for identifying diabetes-induced fundus pathology. Taylor & Francis Group, London, UK, 2019. pp. 87-99.
 35. Pavlov S.V. Multichannel system for recording myocardial electrical activity // O. Vlasenko, W. Wójcik, S.V. Pavlov, and etc. *Information Technology in Medical Diagnostics II*. CRC Press / Balkema book, 2019 Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 307-314; <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9780429615498/chapters/10.1201/9780429057618-35>.
 36. Serkova V., Pavlov S., Romanava V, and etc. Medical expert system for assessment of coronary heart disease destabilization based on the analysis of the level of soluble vascular adhesion molecules // *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017*, 104453O; doi: 10.1117/12.2280984.
 37. *Coronary Atrery Diseases*, edited by Illya Chakovsky and nataliia Sydorova, Janeza Trdine 9, 51000, Rijeka, Croatia, 2012, pp. 332.
 38. Rothstein A.P. Intelligent identification technologies: fuzzy logic, genetic algorithms, neural networks / A.P. Rothstein – Vinnytsia: Universum-Vynnytsia, pp. 1999-320.
 39. Kirklin J.K. Algorithm of the treatment to sharp heavy warmhearted insufficiency / J.K. Kirklin, J.W. Kirkli // *Ann. Thorac. sms.* – 1981. – Vol. 32. pp. 311-319.

40. The main tasks of medical cybernetics / [N.M. Amosov, A.A. Popov, V.G. Melnikov, etc.] - K .: Nauchn. council on cybernetics, pp. 1969. - 98.
41. Vorobyov E.I. Introduction to medical cybernetics / E.I. Vorobyov, A.I. Kitov - M.: Medicine, 1977. pp. 286.
42. Prokopchuk V.A. Development of the structure of the knowledge base of a medical intellectual system based on formalism / V.A. Prokopchuk // Artificial Intelligence, 2006, 4, 469-474.
43. Vesnenko A.I. Topo-typology of the structure of a detailed clinical diagnosis in modern medical information systems and technologies / A.I. Vesnenko, A.A. Popov, M.I. Pronenko // Cybernetics and system analysis. 2002, 6, 143-154.
44. On the infrastructure of information support for clinical medicine / [Lishchuk V.A., Gavrilov A.V., Shevchenko G.V. and others] // Medical technology. 2003, 4, 36-42.
45. Fainzilberg L.S. Mathematical methods for assessing the usefulness of diagnostic features /L.S. Fainzilberg - K .: Osvita Ukraine, 2010, pp. 152
46. Modern intellectual technologies of functional medical diagnostics: a monograph / O. G. Avrunin, E. V. Bodyanskyi, M. V. Kalashnyk, V. V. Semenets, V. O. Filatov. - Kharkiv: Khnure, 2018. pp. 236.
47. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). Information Technology in Medical Diagnostics II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. pp. 336.
48. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press. pp. 210.
49. Shkilniak L., Wójcik Waldemar, Pavlov S., Vlasenko O. Expert fuzzy systems for evaluation of intensity of reactive edema of soft tissues in patients with diabetes. IAPGOS, 2022, 3, 59-63. doi.org/10.35784/iapgos.3037.
50. Yang X., Gokulnath P., Lehmann H. I., & Shang H. RNA modifications in aging-associated cardiovascular diseases. Aging (Albany NY). 2022 Sep

- 29;14(19):8110-8136. doi: 10.18632/aging.204311. Epub 2022 Sep 29. PMID: 36178367; PMCID: PMC9596201.
51. Ammirati, E., Frigerio, M., Adler, E. D., & Camici, P. G. (2020). Management of Acute Myocarditis and Chronic Inflammatory Cardiomyopathy: An Expert Consensus Document. *Circulation. Heart failure*, 13(11), e007405. <https://doi.org/10.1161/CIRCHEARTFAILURE.120.007405>
 52. Lampejo, T., Durkin, S. M., Bhatt, N., & Guttman, O. (2021). Acute myocarditis: aetiology, diagnosis and management. *Clinical medicine (London, England)*, 21(5), e505–e510. <https://doi.org/10.7861/clinmed.2021-0121>
 53. Tschöpe, C., Cooper, L. T., Torre-Amione, G., & Van Linthout, S. (2019). Management of Myocarditis-Related Cardiomyopathy in Adults. *Circulation research*, 124(11), 1568–1583. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.118.313578>
 54. Iung B. (2019). Endocardite infectieuse. *Épidémiologie, physiopathologie et anatomopathologie [Infective endocarditis. Epidemiology, pathophysiology and histopathology]*. *Presse medicale (Paris, France : 1983)*, 48(5), 513–521. <https://doi.org/10.1016/j.lpm.2019.04.009>
 55. Vogkou, C. T., Vlachogiannis, N. I., Palaiodimos, L., & Kousoulis, A. A. (2016). The causative agents in infective endocarditis: a systematic review comprising 33,214 cases. *European journal of clinical microbiology & infectious diseases : official publication of the European Society of Clinical Microbiology*, 35(8), 1227–1245. <https://doi.org/10.1007/s10096-016-2660-6>
 56. Thompson, G. R., 3rd, Jenks, J. D., Baddley, J. W., & Hoenigl, M. (2023). Fungal Endocarditis: Pathophysiology, Epidemiology, Clinical Presentation, Diagnosis, and Management. *Clinical microbiology reviews*, 36(3), e0001923. <https://doi.org/10.1128/cmr.00019-23>

57. Victoria Delgado, Nina Ajmone Marsan, Suzanne de Waha, & Michael A Borger, ESC Scientific Document Group, 2023 ESC Guidelines for the management of endocarditis: Developed by the task force on the management of endocarditis of the European Society of Cardiology (ESC) Endorsed by the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS) and the European Association of Nuclear Medicine (EANM), *European Heart Journal*, Volume 44, Issue 39, 14 October 2023, Pages 3948–4042, <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehad193>
58. Pertsemlidis A; Fondon JW (2001). “Having a BLAST with bioinformatics (and avoiding BLASTphemy)”. *Genome Biology*. 2 (10): reviews2002.1. DOI:10.1186/gb-2001-2-10-reviews2002. PMID 11597340.
59. Altschul SF; Gish W; Miller W; Myers EW; Lipman DJ (1990). “Basic local alignment search tool”. *Journal of Molecular Biology*. 215 (3): 403—410. DOI:10.1016/S0022-2836(05)80360-2. PMID 2231712.
60. Boratyn GM; Schäffer AA; Agarwala R; Altschul SF; Lipman DJ; Madden TL (2012). “Domain enhanced lookup time accelerated BLAST”. *Biology Direct*. 7: 12. DOI:10.1186/1745-6150-7-12
61. S.V. Gorobets, O.Yu. Sparrow, K.O. Butenko. Potential producers of biogenic magnetic nanoparticles among pathogenic and opportunistic microorganisms, , *Innov Biosyst Bioeng*, 2018, vol. 2, no. 1, 33–41 doi: 10.20535/ibb.2018.2.1.127260
62. Gorobets SV, Gorobets OYu. Function of biogenic magnetic nanoparticles in organisms. *Functional Mater.* 2012;19(1):18-26. DOI: 10.1002/adfm.v22.24
63. Gorobets SV, Gorobets OYu. Biomineralization of biogenic magnetic nanoparticles and their possible functions in cells of prokaryotes and eukaryotes. In: *Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*. 3rd ed. Taylor&Francis; 2014. p. 300-6.
64. Межієвська Ірина Анатоліївна. Клініко-прогностичне значення рівня стимулюючого фактору росту, що експресується геном 2 у перебігу

гострого інфаркту міокарда без елевації сегмента ST : Доктор філософії : спец.. 222 - Медицина : дата захисту 2021-05-14; Статус: Захищена; Вінницький національний медичний університет імені М. І. Пирогова. – Вінниця, 0821U101051.

65. Масловський В.Ю. Прогностичне значення різних клініко-інструментальних маркерів і варіантів базової терапії для оцінки якості життя і характеру перебігу інфаркту міокарда без елевації сегменту ST, Доктор наук : спец.. Спеціальність 14.01.11 – Кардіологія, 27.01.2023, Івано-Франківський національний медичний університет. – Івано-Франківськ.
66. Abdolmanafi, A.; Duong, L.; Dahdah, N.; Adib, I.; Cheriet, F. Characterization of coronary artery pathological formations from OCT imaging using deep learning. *Biomed. Opt. Express*. 2018, 9, 4936–4960.
67. Retson, T.A.; Besser, A.H.; Sall, S.; Golden, D.; Hsiao, A. Machine Learning and Deep Neural Networks in Thoracic and Cardiovascular Imaging. *J. Thorac. Imaging* 2017, 34, 192–201.
68. Henglin, M.; Stein, G.; Hushcha, P.V.; Snoek, J.; Wiltschko, A.B.; Cheng, S. Machine Learning Approaches in Cardiovascular Imaging. *Circ. Cardiovasc. Imaging* 2017, 10, 005614.
69. Su, S.; Hu, Z.; Lin, Q.; Hau, W.K.; Gao, Z.; Zhang, H. An artificial neural network method for lumen and media-adventitia border detection in IVUS. *Comput. Med. Imaging Graph.* 2017, 57, 29–39.
70. Gao, Z.; Chung, J.; Abdelrazek, M.; Leung, S.; Hau, W.K.; Xian, Z.; Li, S. Privileged Modality Distillation for Vessel Border Detection in Intracoronary Imaging. *IEEE Trans. Med. Imaging* 2020, 39, 1524–1534.
71. Tearney, G.J.; Regar, E.; Akasaka, T.; Adriaenssens, T.; Barlis, P.; Bezerra, H.; Bouma, B.; Bruining, N.; Cho, J.; Chowdhary, S.; et al. Consensus standards for acquisition, measurement, and reporting of intravascular optical coherence tomography studies: A report from the International

- Working Group for Intravascular Optical Coherence Tomography Standardization and Validation. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2012, 59, 58–72.
72. Lee, J.; Prabhu, D.; Vladislav, N.; Zimin, H.G.; Wilson, D.L. Automated plaque characterization using deep learning on coronary intravascular optical coherence tomographic images. *Biomed. Opt. Express.* 2019, 10, 6497–6515.
 73. Kaba, S.; Haci, H.; Isin, A.; Ilhan, A.; Conkbayir, C. The Application of Deep Learning for the Segmentation and Classification of Coronary Arteries. *Diagnostics* 2023, 13, 2274. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13132274>.
 74. Malakar, A.K.; Choudhury, D.; Halder, B.; Paul, P.; Uddin, A.; Chakraborty, S. A Review on Coronary Artery Disease, Its Risk Factors, and Therapeutics. *J. Cell. Physiol.* 2019, 234, 16812–16823.
 75. Pandey, R.; Kumar, M.; Majdoubi, J.; Rahimi-Gorji, M.; Srivastav, V.K. A Review Study on Blood in Human Coronary Artery: Numerical Approach. *Comput. Methods Programs Biomed.* 2020, 187, 105243.
 76. Bit, A.; Suri, J.S.; Ranjani, A. Anatomy and physiology of blood vessels. In *Flow Dynamics and Tissue Engineering of Blood Vessels*; IOP Publishing Ltd: Bristol, UK, 2020.
 77. Taki, A.; Kermani, A.; Ranjbarnavazi, S.M.; Pourmodheji, A. Overview of different medical imaging techniques for the identification of coronary atherosclerotic plaques. In *Computing and Visualization for Intravascular Imaging and Computer-Assisted Stenting*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2017; pp. 79–106.
 78. Sayadi, M.; Varadarajan, V.; Sadoughi, F.; Chopannejad, S.; Langerizadeh, M. A Machine Learning Model for Detection of Coronary Artery Disease Using Noninvasive Clinical Parameters. *Life* 2022, 12, 1933.
 79. Wang, L.; Liang, D.; Yin, X.; Qiu, J.; Yang, Z.; Xing, J.; Dong, J.; Ma, Z. Coronary Artery Segmentation in Angiographic Videos Utilizing Spatial-Temporal Information. *BMC Med. Imaging* 2020, 20, 110.

80. Bertolone, D.T.; Gallinoro, E.; Esposito, G.; Paolisso, P.; Bermpeis, K.; De Colle, C.; Fabbriatore, D.; Mileva, N.; Valeriano, C.; Munhoz, D.; et al. Contemporary Management of Stable Coronary Artery Disease. *High Blood Press. Cardiovasc. Prev.* 2022, 29, 207–219.
81. Liu, Y.; Zhang, X.; Wan, W.; Liu, S.; Liu, Y.; Liu, H.; Zeng, X.; Zhang, Q. Two New Stenosis Detection Methods of Coronary Angiograms. *IJCARS* 2022, 17, 521–530. 9. Hashemi, J.; Rai, S.; Ghafghazi, S.; Berson, R.E. Blood Residence Time to Assess Significance of Coronary Artery Stenosis. *Sci. Rep.* 2020, 10, 11658.
82. Barriada, R.G.; Masip, D. An Overview of Deep-Learning-Based Methods for Cardiovascular Risk Assessment with Retinal Images. *Diagnostics* 2022, 13, 68.
83. Moorthy, J.; Gandhi, U.D. A Survey on Medical Image Segmentation Based on Deep Learning Techniques. *BDCC* 2022, 6, 117.
84. Balaji, K.; Lavanya, K. Medical image analysis with deep neural networks. In *Deep Learning and Parallel Computing Environment for Bioengineering Systems*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2019; pp. 75–97.
85. Han, X.; Zhang, Z.; Ding, N.; Gu, Y.; Liu, X.; Huo, Y.; Qiu, J.; Yao, Y.; Zhang, A.; Zhang, L.; et al. Pre-Trained Models: Past, Present and Future. *AI Open* 2021, 2, 225–250. 14. Cervantes-Sanchez, F.; Cruz-Aceves, I.; Hernandez-Aguirre, A.; Hernandez-Gonzalez, M.A.; Solorio-Meza, S.E. Automatic Segmentation of Coronary Arteries in X-Ray Angiograms Using Multiscale Analysis and Artificial Neural Networks. *Appl. Sci.* 2019, 9, 5507.
86. Nwogu, I.; Lorigo, L. Fast temporal tracking and 3D reconstruction of a single coronary vessel. In *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Image Processing, San Antonio, TX, USA, 16 September–19 October 2019*; Volume 5, p. V-537. *Diagnostics* 2023, 13, 2274 22 of 24

87. Kerkeni, A.; Benabdallah, A.; Manzanera, A.; Bedoui, M.H. A Coronary Artery Segmentation Method Based on Multiscale Analysis and Region Growing. *CMIG* 2016, 48, 49–61.
88. Jiang, Y.; Zhang, H.; Tan, N.; Chen, L. Automatic Retinal Blood Vessel Segmentation Based on Fully Convolutional Neural Networks. *Symmetry* 2019, 11, 1112.
89. Yang, S.; Kweon, J.; Roh, J.-H.; Lee, J.-H.; Kang, H.; Park, L.-J.; Kim, D.J.; Yang, H.; Hur, J.; Kang, D.-Y.; et al. Deep Learning Segmentation of Major Vessels in X-Ray Coronary Angiography. *Sci. Rep.* 2019, 9, 16897.
90. Iyer, K.; Najarian, C.P.; Fattah, A.A.; Arthurs, C.J.; Soroushmehr, S.M.R.; Subban, V.; Sankardas, M.A.; Nadakuditi, R.R.; Nallamotheu, B.K.; Figueroa, C.A. AngioNet: A Convolutional Neural Network for Vessel Segmentation in X-Ray Angiography. *Sci. Rep.* 2021, 11, 18066.
91. Zhu, X.; Cheng, Z.; Wang, S.; Chen, X.; Lu, G. Coronary Angiography Image Segmentation Based on PSPNet. *Comput. Methods Programs Biomed.* 2021, 200, 105897.
92. Jiang, Z.; Ou, C.; Qian, Y.; Rehan, R.; Yong, A. Coronary Vessel Segmentation Using Multiresolution and Multiscale Deep Learning. *IMU* 2021, 24, 100602.
93. Badrinarayanan, V.; Kendall, A.; Cipolla, R. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2017, 39, 2481–2495.
94. Saood, A.; Hatem, I. COVID-19 Lung CT Image Segmentation Using Deep Learning Methods: U-Net versus SegNet. *BMC Med. Imaging* 2021, 21, 19.
95. Zhao, C.; Bober, R.; Tang, H.; Tang, J.; Dong, M.; Zhang, C.; He, Z.; Esposito, M.; Xu, Z.; Zhou, W. Semantic Segmentation to Extract Coronary Arteries in Invasive Coronary Angiograms. *J. Adv. Appl. Comput. Math.* 2022, 9, 76–85.
96. Tran, S.-T.; Cheng, C.-H.; Nguyen, T.-T.; Le, M.-H.; Liu, D.-G. TMD-Unet: Triple-Unet with Multi-Scale Input Features and Dense Skip Connection for

- Medical Image Segmentation. Healthcare 2021, 9, 54. 26. Zunair, H.; Ben Hamza, A. Sharp U-Net: Depthwise Convolutional Network for Biomedical Image Segmentation. Comput. Biol. Med. 2021, 136, 104699.
97. Cai, L.; Gao, J.; Zhao, D. A Review of the Application of Deep Learning in Medical Image Classification and Segmentation. Ann. Transl. Med. 2020, 8, 713.
 98. Semenoglou, A.-A.; Spiliotis, E.; Assimakopoulos, V. Image-Based Time Series Forecasting: A Deep Convolutional Neural Network Approach. Neural Netw. 2023, 157, 39–53.
 99. Wang, J.; Liu, Q.; Xie, H.; Yang, Z.; Zhou, H. Boosted EfficientNet: Detection of Lymph Node Metastases in Breast Cancer Using Convolutional Neural Networks. Cancers 2021, 13, 661.
 100. Antczak, K.; Liberadzki, Ł. Stenosis Detection with Deep Convolutional Neural Networks. MATEC Web Conf. 2018, 210, 04001.
 101. Born M. and Wolf E., Principles of Optics. Cambridge: Cambridge University Press (1999)
 102. Nye J. F., Natural Focusing and Fine Structure of Light: Caustics and Wave Dislocations (1999)
 103. Vasnetsov M., Soskin M., and Pasko V., Topological configurations of cross-coupled polarization singularities in a space-variant vector field, *Optics Communications* 63, 181-187 (2016)
 104. Meredith, D.; Clifton, D.; Charlton, P.; Brooks, J.; Pugh, C.; Tarassenko, L. Photoplethysmographic derivation of respiratory rate: A review of relevant physiology. J. Med. Eng. Technol. 2012, 36, 1–7.
 105. Moyle, J.T.B. Pulse Oximetry, 2nd ed.; BMJ: London, UK, 2002.
 106. Hejjel, L.; Gál, I. Heart rate variability analysis. Acta Physiologica Hungarica 2001, 88, 219–230.
 107. Hemon, M.C.; Phillips, J.P. Comparison of foot finding methods for deriving instantaneous pulse rates from photoplethysmographic signals. J. Clin. Monit. Comput. 2016, 30, 157–168.

108. Hennig, A.; Patzak, A. Continuous blood pressure measurement using pulse transit time. *Somnol. Schlafforschung Schlafmed.* 2013, 17, 104–110.
109. Zheng, Y.L.; Yan, B.P.; Zhang, Y.T.; Poon, C.C.Y. An Armband Wearable Device for Overnight and Cuff-Less Blood Pressure Measurement. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2014, 61, 2179–2186.
110. Choi, Y.; Zhang, Q.; Ko, S. Noninvasive cuffless blood pressure estimation using pulse transit time and Hilbert–Huang transform. *Comput. Electr. Eng.* 2013, 39, 103–111.
111. Yang, C.; Tavassolian, N. Pulse transit time measurement using seismocardiogram, photoplethysmogram, and acoustic recordings: Evaluation and comparison. *IEEE J. Biomed. Health Inf.* 2017, 22, 733–740.
112. Zabolotna N.I. Principals and methods of Mueller-matrix tomography of multilayer biological tissues / N.I. Zabolotna, I.V. Musiichuk // *Proc. SPIE.* – 2011. – Vol. 8338. – 833810.
113. Angelo Pierangelo A. Ex-vivo characterization of human colon cancer by Mueller polarimetric imaging / Angelo Pierangelo, Abdelali Benali, Maria-Rosaria Antonelli, [et al.] // *Optics Express.* – 2011. – Vol. 19. – № 2. – P. 1582-1593.
114. Multispectral Mueller polarimetric imaging detecting residual cancer and cancer regression after neoadjuvant treatment for colorectal carcinomas/ A. Pierangelo, S. Manhas S, A. Benali [et al.] // *Journal of Biomedical Optics.* – 2013. – Vol.18 (4). – 046014.
115. Zabolotna N.I. Orientational tomography of optical axes directions distributions of multilayer biological tissues birefringent polycrystalline networks / N.I. Zabolotna, R.Y. Dovhaliuk // *Proc. SPIE.* – 2013. – Vol. 8873. – 887313; doi: 10.1117/12.2048634.
116. Zabolotna N.I. System of polarization phasometry of polycrystalline blood plasma networks in mammary gland pathology diagnostics / N.I. Zabolotna, B.P. Oliinychenko, K.O. Radchenko, A.K. Krasnoshchoka, O.K. Shcherba // *Proc. of SPIE.* – 2015. – Vol. 9613. – 961311; doi: 10.1117/12.2187383.

117. Заболотна Н.І. Багатопараметричні поляризаційно-фазові методи і засоби відтворення та аналізу структури полікристалічних біологічних шарів при оцінюванні патологічних станів: дис. ... доктора техн. наук: 05.11.17 / Заболотна Наталія Іванівна – Харків, 2018. – 427 с.
118. Тужанський С.Є. Системи лазерної відеополяриметрії для автоматизованого контролю параметрів неоднорідних біотканин : монографія / С.Є. Тужанський, Г.Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 156 с.
119. Ушенко В.О. Вектор-параметрична діагностика та диференціація проявів оптичної анізотропії біологічних полікристалічних мереж : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 01.04.05 «Оптика, лазерна фізика» / В.О. Ушенко. – Київ, 2015. – 20 с.
120. Ротштейн А.П. Медицинская диагностика на нечеткой логике / Ротштейн А.П. - Винница: Контингент, 1996. - 132 с.
121. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / Ротштейн А.П. – Винница: Универсум – Винница, 1999. – 320 с.
122. Alalia S. Polarized light imaging in biomedicine: emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment / Sanaz Alalia, Alex Vitkin // Journal of Biomedical Optics. – 2015. – Vol. 20(6). – 061104.
123. Maria Rosaria Antonelli. Biomedical applications of polarimetric imaging contrast. Initial studies for scattering media and human tissues. Medical Physics [physics.med-ph]. Ecole Polytechnique X, 2011. English. – Режимдоступу: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00652201>.
124. Ghosh N. Turbid medium polarimetry in biomedical imaging and diagnosis / N. Ghosh, A. Banerjee, J. Soni // Eur. Phys. J. Appl. Phys. – 2011. – Vol.54. – P.30001.
125. Smith M. H. Mueller matrix imaging polarimetry in dermatology / M.H. Smith // Proc. SPIE. – 2000. - Vol. 3911. – P. 1605–7422.

126. Shukla P. Mueller decomposition images for cervical tissue: Potential for discriminating normal and dysplastic states / P. Shukla, Pradhan A. // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17. – №3. – P. 1600–1609.
127. Polarization birefringence measurements for characterizing the myocardium, including healthy, infarcted, and stem-cell-regenerated tissues / M. F. G. Wood [et al] // *J. Biomed. Opt.* – 2010. – Vol. 15. – 047009.
128. Polarimetric imaging of uterine cervix: a case study / A. Pierangelo [et al] // *Opt. Express*. – 2013. – Vol. 21(12). – P. 14120–14130.
129. Заболотна Н.І. Архітектура і алгоритми функціонування та аналізу даних двовимірних систем лазерної поляриметрії біологічних тканин / Н.І. Заболотна // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. – 2013. – №1(25). – С. 54–65.
130. Пат. на корисну модель № 102237 Україна, МПК G01N 33/48, G01N 21/00. Спосіб вимірювання орієнтаційних томограм полікристалічних мереж оптико-анізотропних шарів біологічних тканин / Заболотна Н.І.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201503161; заявл. 06.04.2015; опубл. 26.10.2015, Бюл. №20.
131. Пат. на корисну модель №70125 Україна, МПК G01N33/00; A61B5/00. Спосіб вимірювання фазових мап оптико-анізотропних шарів біологічних об'єктів / Заболотна Н.І., Ушенко О.Г., Олійниченко Б.П. ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201113973; заявл. 28.11.2011; опубл. 25.05.2012, Бюл. №10.
132. Differential phase analysis of laser images of a polycrystalline component of blood plasma in diagnostics of pathological changes in mammary gland / O.P. Mintser, N.I. Zabolotna; B.P. Oliinychenko, P. Komada // *Proc. SPIE*. – 2012. – Vol. 8698. – 86980D; doi: 10.1117/12.2019714.
133. Mohrag, M.; Mojiri, M.E.; Hakami, M.S.; Alghamdi, M.S.; Moafa, A.Y.; Kreet, S.J.; Alghamdi, S.M.; Nasib, H.A.; Alghamdi, O.R.; Ayoub, S.M.; et

- al. The Impact of Wearable Technologies on Blood Pressure Control in Hypertensive Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cureus* 2024, 16, e71220.
134. Ismail, S.N.A.; Nayan, N.A.; Jaafar, R.; May, Z. Recent Advances in Non-Invasive Blood Pressure Monitoring and Prediction Using a Machine Learning Approach. *Sensors* 2022, 22, 6195.
135. Povoroznyuk, A.Y., Povoroznyuk, O., Filatova, A.(2024). Heterogeneous ensemble classifier in medical decision support systems, 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology, KhPIWeek 2024, Техніка. 2024; Том 1 № 1: 221 –226.
136. Продеус А.Н., Захрабова Е.Н., Экспертные системы в медицине / А.Н. Продеус, Е.Н. Захрабова. - К.: БЕК+, 1998. – 320 с.
137. Вуйцік В., Готра О.З., Григор'єв В.В., Експертні системи: навчальний посібник. – Львів: Ліга-Прес, 2006. – 290 с.
138. Бабак В.П. Обробка сигналів / В.П. Бабак, В.С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К.: Либідь, 1996 -322 с.
139. Bishop, Christopher M. Neural networks for pattern recognition. - Clarendon Press. – 1995, - ISBN 978-0198538493.
140. Povoroznyuk A., Filatova A., Povoroznyuk O. Shakhina I. (2023). Associative Information Retrieval in Medical Databases, *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies* Volume 149, Pages 320 – 332
141. Innocent P. Fuzzy Methods For Medical Diagnosis.. / P. Innocent, J. Robert, J. Garibaldi // *Applied Artificial Intelligence* - 2005. - №19. - 69-98 p. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/220355740_Fuzzy_Methods_For_Medical_Diagnosis.
142. Поворознюк А. І. Застосування нечіткої логіки в комп'ютерних системах медичної діагностики / А. І. Поворознюк, Є. С. Харченко // *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Інформатика та моделювання*. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 125-

133. – Режим доступу: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/19950>
143. Дмитриенко В.Д. Применение нейронных сетей при построении медицинских информационных систем / В.Д. Дмитриенко, О.А. Поворознюк // Системный анализ, управление и информационные технологии. Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 99. – С. 134–137.
144. Zabolotna N.I. Method and system of Jones-matrix mapping of blood plasma films with “fuzzy” analysis in differentiation of breast pathology changes / N.I. Zabolotna, K.O. Radchenko, O.V. Karas // Proc. SPIE. – 2018. – Vol. 10612, 106121P.
145. Вуйцік, В., Мартинюк, Т., Нікітчук, Т., Єралієва, Б., Штофель, Д., & Лунінь, Я. (2024). Підходи до створення оптичних температурних сенсорів на основі структури Брега для біомедичних досліджень. Технічна інженерія, (2(94), 298–304.
146. Korenivska Oksana, Benedytskyi Vasyl, Nikitchuk Tetiana, Volosovych Oleksandr, Kozbakova Ainur, and Wójcik Waldemar, etc. (2024). Application of optical methods for measuring physiological parameters in the construction of telemedicine systems for the diagnosis of infants and children, Proc. SPIE 13400, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024, 134000I
147. Zabolotna N.I. Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies / Natalia I. Zabolotna, Vladyslava V. Sholota, Heorhii H. Okarskyi // Proc. SPIE 11369, Fourteenth International Conference on Correlation Optics, 113691S (6 February 2020); P. 501-513. - <https://doi.org/10.1117/12.2556542>.
148. Nikitchuk T. M., Vakaliuk T. A., Andreiev O. V., Korenivska O. L., Osadchyi V V and Medvediev M. G. (2022). Mathematical model of the

- base unit of the biotechnical system as a type of edge devices, *Journal of Physics: Volume 2288, 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2288 012004*, 1-16.
149. Осадчук, О., Вуйцік, В., Голяка, Р., Мозговий, О., & Муращенко, О. (2024). Перетворювачі інтегральних сигналів пристроїв вимірювально-діагностичних температурних сенсорів для біомедичних застосувань, *Технічна інженерія*, 2 (94), 305–314.
 150. Ровіра Хурадо Рональд Умберто. Метод і система лазерної поляриметрії для оцінювання патологічних змін біологічних тканин: дис. канд. техн. наук: 05.11.17 / Ровіра Хурадо Рональд Умберто. – Вінниця, 2015. – 185 с.
 151. 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.
 152. Pavlov S. V., Koslovskaya T. I., Rovira R. H. Design and Automation of a Videopolarimetry System for the analyzing of the Polarization Properties of a Biological Sample, *Measuring and computing equipment in technological processes*. – 2014. – №. 4 (49). – P. 158-161. – ISSN 2219-9365.
 153. *Modern aspects of laser therapy*. Cherkassy, ed. V.D. Popov, Ukraine: Vertical, publisher S.G. Kandych, 2012, 608 p.
 154. *Laser medical technologies: a study guide*, edited by Gotry Z. Yu., Pavlova S. V. and others. – Vinnytsia: VNTU, 2017. – 158 p.
 155. *Information Technology in Medical Diagnostics II*. By editors: Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M., London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
 156. Фізичні основи біомедичної оптики (Монографія) / [Павлов С. В., Кожем'яко В. П., Колісник П. Ф. Козловська Т. І., Думенко В. П.] – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 155 с.
 157. Pavlov S. V. *Information Technology in Medical Diagnostics* //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages

158. Фотоплетизмографічні технології контролю серцево-судинної системи: (Монографія) / С.В.Павлов, В.П.Кожем'яко, В.Г.Петрук, П.Ф.Колісник – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 254 с.
159. Ronald H. Rovira; Stanislav Ye. Tuzhanskyu; Sergii V. Pavlov; Sergii N. Savenkov; Ivan S. Kolomiets, et al. Polarimetric characterisation of histological section of skin with pathological changes, *Proc. SPIE* 10031, 2016, 100313E (September 28, 2016); doi:10.1117/12.224937.
160. Pavlov S. V.; Vassilenko V. B, et al. Methods of processing biomedical image of retinal macular region of the eye, *Proc. SPIE* 9961, Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces V, 99610X (September 26, 2016); doi:10.1117/12.2237154.
161. Ronald Rovira; Marcia M. Bayas; Sergey V. Pavlov et al. Application of a modified evolutionary algorithm for the optimization of data acquisition to improve the accuracy of a video-polarimetric system, *Proc. SPIE* 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015, 981619 (December 18, 2015); doi:10.1117/12.2229087.
162. Filatova, Anna, Povoroznyuk, Anatoliy, Fahs, Mohamad Study, (2022). Functional Model of an Electrocardiological Study, 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2022 – Proceedings Pages 567 – 572
163. Freund, I. Joseph W. Goodman: Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. J Stat Phys **130**, 413–414 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10955-007-9440-8>.
164. Bazhenov, V. Y., Vasnetsov, M. V., and Soskin, M. S., "Laser beams with screw dislocations in their wavefronts", *Jetp Lett*, 52 (8), 429-431 (1990).
165. Dickey, F.M. (Ed.). Laser Beam Shaping: Theory and Techniques, Second Edition (2nd ed.) (2014). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17140>.
166. [Yaroslav Kotov](#), Evhenia Yavorska, Halyna Tsupryk, et al. "Evaluating interoperability and data quality in FHIR-based AI assessment pipelines", *Proc. SPIE* 14009, Photonics Applications in Astronomy, Communications,

- Industry, and High Energy Physics Experiments 2025, 140091F (30 Dec 2025); <https://doi.org/10.1117/12.3100561>
167. Evhenia Yavorska, Ivan Hryniuk, Bohdan Yavorsky, et al. "Modern methods of image quality enhancement in intrascopic medical imaging: comparative analysis and development trends", Proc. SPIE 14009, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2025, 140090X (30 Dec 2025); <https://doi.org/10.1117/12.3099346>
 168. Є. Б. Яворська, І. О. Гринюк. Застосування нейромережних технологій для підвищення інформативності медичних зображень, Вісник Херсонського національного технічного університету, Том 2 № 3(94) (2025): <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.2.68>.
 169. Франчевська , Г., & Яворська , Є. (2024). Математичне моделювання електро-кардіосигналу плода для розробки програмного забезпечення для його достовірного виділення в комп'ютерних кардіодіагностичних системах. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, 2(49), 50–61. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.2.2024.321353>
 170. Komarova, O., Kholin, V., Tereshchenko, M., Pavlov, S., Rozumenko, V., Posokhov, M., Ivasenko, V. and Lapina, S., "Experimental evaluation of the homogeneity of the output streams of optical radiation of a rectangular shape for various versions of the output sections of the light guide nozzles for medical laser equipment," Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making, 65(1), 123–127 (2023). doi: 10.20535/1970.65(1).2023.283458
 171. Martyniuk T., Kozhemiako A., Katashynskyi D., and Bulyga I. (2024). Structural peculiarities of neurolike object classifier, Works of VNTU, 2023. № 4, 1-5.
 172. Vasnetsov M., Voytsekhovich V., Ponevchinsky V, Kachalova N., Khodko A., Mamuta O., Pavlov V., Khomenko V., Manicheva N. / Optical speckle-

- field visibility diminishing by reduction of a temporal coherence // Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 12-17 (2024). DOI: 10.35784/iapgos.5495
173. Vasnetsov, M. V., Ponevchinsky, V. V., Voitsekhovych, V. S., Golub, P. V., Mamuta, O. D., & Kachalova, N. M. / Peculiarities of polarised light scattering in nematic liquid crystals with large-scale director perturbations // Liquid Crystals, 1–7 (2024).
<https://doi.org/10.1080/02678292.2024.2388273>
 174. Bradshaw M. J., Raynes E. P., Bunning J. D., Faber T. E. / The Frank constants of some nematic liquid crystals // Journal de Physique 46 (9), pp.1513-1520 (1985).
 175. Zafar, H.; Zafar, J.; Sharif, F. Automated Clinical Decision Support for Coronary Plaques Characterization from Optical Coherence Tomography Imaging with Fused Neural Networks. Optics 2022, 3, 8–18.
 176. Alzhanov, N.; Ng, E.Y.K.; Zhao, Y. Hybrid CFD PINN FSI Simulation in Coronary Artery Trees. Fluids 2024, 9, 280.
 177. Zhang, X.; Lu, P.; Zheng, Z.; Li, W. HR-UMamba++: A High-Resolution Multi-Directional Mamba Framework for Coronary Artery Segmentation in X-Ray Coronary Angiography. Fractal Fract. 2026, 10, 43.
 178. Milzi, A.; Simonetto, F.; Landi, A. Percutaneous Revascularization of Thrombotic and Calcified Coronary Lesions. J. Clin. Med. 2025, 14, 692.
 179. Kini, A.S.; Vengrenyuk, Y.; Pena, J.; Motoyama, S.; Feig, J.E.; Meelu, O.A.; Rajamanickam, A.; Bhat, A.M.; Panwar, S.; Baber, U.; et al. Optical coherence tomography assessment of the mechanistic effects of rotational and orbital atherectomy in severely calcified coronary lesions. Catheter. Cardiovasc. Interv. 2015, 86, 1024–1032.
 180. Evhenia Yavorska, Mykola Khvostivskyi, Roman Kinash, Roman Boyko. Mathematical, Algorithmic and Software Support for Phonocardiographic Signal Processing to Detect Mitral Insufficiency of Human Heart Valves3rd

- International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP-2023), CEUR Workshop Proceedings, 2024, 9 p.
181. Napodano, M.; Dariol, G.; Al Mamary, A.H.; Marra, M.P.; Tarantini, G.; D'Amico, G.; Frigo, A.C.; Buja, P.; Razzolini, R.; Iliceto, S. Thrombus burden and myocardial damage during primary percutaneous coronary intervention. *Am. J. Cardiol.* 2014, 113, 1449–1456.
 182. Genereux, P.; Madhavan, M.V.; Mintz, G.S.; Maehara, A.; Palmerini, T.; LaSalle, L.; Xu, K.; McAndrew, T.; Kirtane, A.; Lansky, A.J.; et al. Ischemic Outcomes After Coronary Intervention of Calcified Vessels in Acute Coronary Syndromes: Pooled Analysis From the HORIZONS-AMI (Harmonizing Outcomes with Revascularization and Stents in Acute Myocardial Infarction) and ACUITY (Acute Catheterization. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2014, 63, 1845–1854.

Додатки

Додаток А

Акт про впровадження результатів дисертаційних досліджень

Проректор з науково-педагогічної роботи
та організації освітнього процесу ВНТУ



Олександр ПЕТРОВ

" 20 " 01 2026 р.

АКТ

про впровадження результатів в рамках виконання дисертаційних
досліджень

ВОЛОСОВИЧА ОЛЕКСАНДРА СЕРГІЙОВИЧА

за темою: «Методи та інтелектуалізована біотехнічна система для
оцінювання ризику ураження коронарних артерій», яка подана на
здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань

16 «Хімічна інженерія та біоінженерія»

за спеціальністю 163 «Біомедична інженерія»

Комісія у складі декана факультету інформаційних електронних систем, доц., к.т.н. Тимчика Сергія Васильовича, завідувача кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, професора кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних. д.т.н. Заболотної Наталії Іванівни, доцента кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних, доц., к.т.н. Штофеля Дмитра Хуановича склали цей акт про те, що протягом 2023-2025 роках на базі кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем Вінницького національного технічного університету впроваджено результати дисертаційної роботи **Волосовича Олександра Сергійовича** у навчальному процесі, а саме запропоновані нові технічні рішення реалізації вдосконалення методів та підвищення інформативності, достовірності оцінювання ризику ураження коронарних

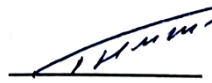
артерій шляхом використання методів нечітких множин та створення інтелектуалізованої біотехнічної системи стратифікації та прогнозування перебігу захворювання, що надає можливість проводити профілактику та запобігати дестабілізації перебігу захворювання та розвитку різних ускладнень хвороби з NSTEMI.

Це має особливу цінність і мотивацію для подальшого розвитку медичних інформаційних систем і технологій, оскільки запропоновані методи, моделі і технології, зменшуючи суб'єктивність дослідника, сприяють створенню нового класу медичних інформаційних технологій для дослідження стану коронарних судин.

Результати досліджень дозволили суттєво розширити функціональні можливості систем і технологій, що дозволить додатково: дослідити статистичні методи аналізу й обробки інформативних ознак при оцінюванні ризику ураження коронарних артерій.

Результати використано в межах спеціальності 163 «Біомедична інженерія» під час викладання таких дисциплін, як: «Нанотехнології в біології та медицині», «Біомедичні прилади, апарати і комплекси. Діагностична техніка», «Сучасні інформаційні технології в галузі хімічної інженерії та біоінженерії».

Голови комісії:



Сергій ТИМЧИК

Члени:



Наталія ЗАБОЛОТНА



Дмитро ШТОФЕЛЬ

МЕМОРАНДУМ
ПРО СПІВПРАЦЮ (СПІВРОБІТНИЦТВО) № 190-24

м. Вінниця

23 10 2024 р.

ВІЙСЬКОВО-МЕДИЧНИЙ КЛІНІЧНИЙ ЦЕНТР ЦЕНТРАЛЬНОГО РЕГІОНУ, ідентифікаційний код юридичної особи в ЄДРПОУ 078116153, в особі начальника центру **ПАШКОВСЬКОГО Сергія Миколайовича**, який діє на підставі Положення про Військово-медичний клінічний центр Центрального регіону, з однієї сторони (далі – Сторона 1), та **ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**, ідентифікаційний код юридичної особи в ЄДРПОУ 02070693, в особі ректора **БІЛІЧЕНКА Віктора Вікторовича**, який діє на підставі Статуту Університету (далі – “Сторона 2”), які надалі разом іменуються «Сторони»,

усвідомлюючи, що впровадження заходів, спрямованих на посилення обороноздатності України, відповідає інтересам обох Сторін;

керуючись Конституцією України, іншими законодавчими актами України, нормативно-правовими актами, спрямованими на захист держави в умовах широкомасштабної збройної агресії проти України;

прагнучи забезпечити максимальну ефективність здійснюваних заходів під час досягнення спільних цілей, домовились про таке:

1. МЕТА МЕМОРАНДУМУ

1.1. Цей Меморандум визначає основні засади створення організаційних умов та передбачає консолідацію зусиль і співпрацю Сторін спрямованих на впровадження спільних програм, проведення спільних наукових заходів з використанням матеріально-технічної бази Сторін, а також заходів спрямованих на розвиток галузі біомедичної інженерії.

1.2. Предметом Меморандуму є надання консультацій, послуг та допомоги між Сторонами у сферах визначених пунктом 1.1. Меморандуму.

1.3. Предмет Меморандуму реалізується Сторонами через задекларовані напрямки співпраці та здійснюються на безоплатній основі.

1.4. Перелік напрямків не є вичерпним та може доповнюватися за взаємною згодою Сторін.

2. НАПРЯМИ СПІВПРАЦІ

2.1. З метою реалізації умов цього Договору та задля досягнення мети Сторони домовились про співпрацю в межах наявних ресурсів за наступними напрямками:

2.1.1. сприяння розвитку, накопиченню та поширенню знань й досвіду з питань біомедичної інженерії, здійсненню з цією метою відповідних спільних заходів;

2.1.2. залучення фахівців для консультування та проведення модернізації медичного обладнання для наукових та практичних цілей;

3.1.3. залучення фахівців-практиків Сторін для проведення сумісних дистанційних занять;

3.1.4. участь у спільному проведенні конференцій, круглих столів, досліджень тощо;

3.1.5. впровадження спільних програм, проведення спільних заходів з використанням матеріально-технічної бази Сторін, а також заходів спрямованих на розвиток галузі біомедичної інженерії;

3.1.6. проведення спільних наукових, навчальних і просвітницьких заходів, обміну досвідом в межах умов та напрямків цього Договору.

3. ОРГАНІЗАЦІЯ СПІВПРАЦІ

3.1. Співробітництво здійснюється на основі таких принципів, як гуманність, неупередженість, законність, дотримання суспільних і державних інтересів, рівноправність, нейтральність, незалежність, добросовісність, гласність співробітництва.

3.2. Сторони можуть призначати уповноважених представників (відповідальних осіб) для здійснення комунікації між Сторонами та вирішення питань, які виникають в процесі реалізації Меморандуму.

3.3. Для досягнення мети Меморандуму Сторони можуть, за взаємною згодою, запрошувати до співробітництва в рамках узгоджених напрямів інших юридичних та фізичних осіб.

4. КОНФІДЕНЦІЙНІСТЬ ТА ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ СТОРІН

4.1. Уся інформація, яка прямо або опосередковано стосується Меморандуму, рівно як і інформація про діяльність кожної зі Сторін або про діяльність будь-якої третьої сторони, яка має відношення до Сторін, яка не є загальнодоступною і яка стала відомою Сторонам у результаті укладання та/або виконання Меморандуму, вважається конфіденційною.

4.2. Сторони гарантують дотримання конфіденційності щодо інформації та документації, отриманої за цим Меморандумом, та зобов'язуються не розголошувати конфіденційну інформацію будь-яким третім особам, крім випадків, передбачених законодавством.

4.3. Кожна Сторона зобов'язана обмежити максимально, наскільки це практично можливо і необхідно для реалізації цього Меморандуму, коло осіб, які матимуть доступ до конфіденційної інформації.

5. СТРОК ДІЇ МЕМОРАНДУМУ, ПРИПИНЕННЯ ДІЇ МЕМОРАНДУМУ

5.1. Цей Меморандум набуває чинності з моменту його підписання Сторонами і діє до 31 грудня 2026 року.

5.2. Сторони дійшли згоди, що за умови наявності такої потреби, для продовження строку дії Меморандуму укладається додаткова угода у письмовій формі.

5.3. Будь-яка Сторона може в будь-який час припинити дію цього Меморандуму шляхом направлення відповідного письмового повідомлення іншій Стороні.

6. ПРИКІНЦЕВІ ПОЛОЖЕННЯ

6.1. Зміни або доповнення, додатки до цього до Меморандуму мають юридичну силу та складають невід'ємну частину Меморандуму лише за умови, якщо вони викладені в письмовій формі, підписані уповноваженими представниками Сторін та скріплені печатками Сторін.

6.2. Цей Меморандум не покладає на Сторони жодних фінансових та/або майнових зобов'язань. Якщо інше прямо не встановлено цим Меморандумом, кожна Сторона самостійно покриває витрати та збитки, які виникають у неї у зв'язку з підписанням чи реалізацією цього Меморандуму.

6.3. Цей Меморандум не є попереднім договором у розумінні статті 635 Цивільного кодексу України та статті 182 Господарського кодексу України і не покладає на Сторони юридичних зобов'язань щодо укладання в майбутньому основного договору.

6.4. Жодне з положень цього Меморандуму не перешкоджає Сторонам співпрацювати з іншими особами та укладати інші правочини.

6.5. Цей меморандум укладений у 2 (двох) автентичних примірниках українською мовою по одному для кожної зі Сторін.

7. ЮРИДИЧНІ АДРЕСИ ТА ПІДПИСИ СТОРІН

СТОРОНА 1

**ВІЙСЬКОВО-МЕДИЧНИЙ
КЛІНІЧНИЙ ЦЕНТР
ЦЕНТРАЛЬНОГО РЕГІОНУ**

21018 м. Вінниця,
вул. Князів Коріатовичів, 185
код ЄДРПОУ 07816153,
тел. (0432) 53-22-11
E-mail: Vmkccreg@post.mil.gov.ua

**Начальник Військово-медичного
клінічного центру Центрального
регіону**

 **Сергій ПАШКОВСЬКИЙ**



СТОРОНА 2

**ВІННИЦЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

21027 м. Вінниця,
Хмельницьке шосе, 95,
код ЄДРПОУ 02070693
тел. (0432) 65-19-03, (067) 437-00-79
e-mail: vnty@vntu.edu.ua

**Ректор Вінницького
національного технічного
університету**

 **Віктор БІЛЧЕНКО**



Додаток Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Публікації в журналах, що входять до наукометричної бази Scopus

1. Oksana Korenivska, Vasył Benedytskyi, Tetiana Nikitchuk, **Oleksandr Volosovych**, Ainur Kozbakova, and Waldemar Wójcik "Application of optical methods for measuring physiological parameters in the construction of telemedicine systems for the diagnosis of infants and children", Proc. SPIE 13400, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024, 134000I (16 December 2024);. <https://doi.org/10.1117/12.3058675>. (Scopus Q4).
2. Oleksandr Poplavskyi, Iryna Mezhiievskaa, Waldemar Wójcik, Timur Kartbayev, Sergii Pavlov, Valentyn Maslovskyi, Oksana Olenich, **Oleksandr Volosovych**, and Sholpan Zhumagulova "Hybrid deep neural networks for automated detection of coronary pathologies in angiographic video sequences", Proc. SPIE 14009, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2025, 140091E (30 December 2025); <https://doi.org/10.1117/12.3099150>. (Scopus Q4).
3. Waldemar Wójcik, Iryna Mezhiievskaa, Sergii V Pavlov, Tomasz Lewandowski, Oleh V Vlasenko, Valentyn Maslovskyi, Oleksandr Volosovych, Iryna Kobylanska, Olha Moskovchuk, Vasył Ovcharuk, Anna Lewandowska Medical Fuzzy-Expert System for Assessment of the Degree of Anatomical Lesion of Coronary Arteries. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2023**, 20(2), 979; <https://doi.org/10.3390/ijerph20020979>. (Scopus Q1).

Статті у журналах, що включені до переліку наукових фахових видань України

4. С. Пашковський, Ю. Пилипець, С. Павлов, Я. Ярославський, і **О. Волосович**, «Інтелектуальні системи обробки ехокардіографічних зображень для оцінки функціонального стану серця», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 49, вип. 1, с. 193–199, Чер 2025. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-49-1-193-199> .
5. Д. Милосердов, О. Колесницький, **О. Волосович**, Ш. Жумагулова, і О. Короленко, «Класифікація електрокардіограм як динамічного процесу на основі спайкінгової нейронної мережі», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 48, вип. 2, с. 68–77, Лис 2024. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-48-2-68-77> .
6. І. А.Межієвська, С.В. Павлов, Г.Б. Кашаганова, В. Ю. Масловський, Д. Х. Штофель, і **О.С. Волосович**, «Застосування інформаційної технології BLAST для пошуку мікроорганізмів, потенційних продуцентів біогенних магнітних наночасток, які призводять до серцевих захворювань», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 46, вип. 2, с. 117–123, Груд 2023. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2023-46-2-117-123> .
7. Ю. Пилипець, Я. Ярославський, і О. Волосович, «Особливості використання EXPLAINABLE AI у біомедичній обробці зображень: прозорість та інтерпретованість моделей», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 50, вип. 2, с. 210–214, Січ 2026. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-50-2-210-214> .

Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України

8. С.В. Павлов, І.А. Межієвська, В. Вуйцік, О.В. Власенко, О.Г. Аврунін, В.Ю. Масловський, О.С. Волосович. Перспективність застосування

- медичних інформаційних технологій для оцінювання ризику анатомічного ураження коронарних артерій, Наука, технології, інновації. – № 1 (25), 2023. – С. 44-55. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/22603>.
9. Волосович, О.С. (2025). Особливості викладання дисципліни «Медична інформатика» здобувачам вищої медичної освіти: міжнародний досвід. *Вісник науки та освіти*, 11(41). [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-11\(41\)-1606-1616](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-11(41)-1606-1616).
 10. Волосович, О.С., Шеремета Р.О. (2025). Можливості застосування нейромереж для потреб патоморфології. Перспективи та інновації науки, 12(57). [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-12\(58\)-1979-1988](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2025-12(58)-1979-1988)
 11. С.В.Павлов, І.А. Межієвська, В.Войцік, О.В.Власенко, В.Ю. Масловський, О.С.Волосович, «Моделювання оцінювання ризику анатомічного ураження коронарних артерій на основі нечітких множин»
НТКП ВНТУ. Факультет інформаційних електронних систем (2023).
<http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/41226>.
 12. Mezhiievska Iryna, Pavlov Sergii, Kashaganova Gulzhan, MaslovskyI Valentyn, Shtofel Dmytro, Volosovych Oleksandr. Prospects for the use of blast information technology for the search of microorganisms which cause heart diseases, III науково-практична конференція з міжнародною участю «Медико-технічна співпраця заради перемоги: актуальні завдання медичної, біологічної фізики та інформатики» 5-6 квітня 2024 року м. Вінниця, С.24-28. <https://www.google.com/search?client=opera&q>

Додаток В

Програмний модуль на основі transfer learning з архітектурою ResNet-50 для автоматизованої класифікації ангиографічних зображень коронарних артерій за типами патологічних змін

```

import os
import torch
import timm
import numpy as np
from torch import nn
from torchvision import datasets, transforms
from torch.utils.data import DataLoader
from sklearn.metrics import classification_report, confusion_matrix, f1_score

DATA_DIR = "data"
MODEL_NAME = "resnet50" #можна: efficientnet_b0, convnext_tiny, vit_base_patch16_224
IMG_SIZE = 224
BATCH_SIZE = 16
EPOCHS = 25
LR = 1e-4
DEVICE = "cuda" if torch.cuda.is_available() else "cpu"

train_tfms = transforms.Compose([

    transforms.Grayscale(num_output_channels=3),
    transforms.Resize((IMG_SIZE, IMG_SIZE)),
    transforms.RandomRotation(7),
    transforms.RandomHorizontalFlip(),
    transforms.RandomAdjustSharpness(1.5, p=0.3),
    transforms.ToTensor(),
    transforms.Normalize([0.485, 0.456, 0.406],

                        [0.229, 0.224, 0.225])
])

eval_tfms = transforms.Compose([
    transforms.Grayscale(num_output_channels=3),
    transforms.Resize((IMG_SIZE, IMG_SIZE)),
    transforms.ToTensor(),
    transforms.Normalize([0.485, 0.456, 0.406],

                        [0.229, 0.224, 0.225])
])

train_ds = datasets.ImageFolder(os.path.join(DATA_DIR, "train"), transform=train_tfms)
val_ds = datasets.ImageFolder(os.path.join(DATA_DIR, "val"), transform=eval_tfms)
test_ds = datasets.ImageFolder(os.path.join(DATA_DIR, "test"), transform=eval_tfms)
train_loader = DataLoader(train_ds, batch_size=BATCH_SIZE, shuffle=True,
num_workers=2)
val_loader = DataLoader(val_ds, batch_size=BATCH_SIZE, shuffle=False, num_workers=2)

```

```

test_loader = DataLoader(test_ds, batch_size=BATCH_SIZE, shuffle=False, num_workers=2)
classes = train_ds.classes
num_classes = len(classes)
model = timm.create_model(MODEL_NAME, pretrained=True, num_classes=num_classes)
model = model.to(DEVICE)
criterion = nn.CrossEntropyLoss()
optimizer = torch.optim.AdamW(model.parameters(), lr=LR, weight_decay=1e-4)
best_f1 = 0.0
def run_epoch(loader, train=False):

    model.train() if train else model.eval()
    total_loss = 0
    all_y, all_pred = [], []
    with torch.set_grad_enabled(train):

        for x, y in loader:
            x, y = x.to(DEVICE), y.to(DEVICE)
            logits = model(x)
            loss = criterion(logits, y)
            if train:
                optimizer.zero_grad()
                loss.backward()
                optimizer.step()

            pred = logits.argmax(dim=1)
            total_loss += loss.item() * x.size(0)
            all_y.extend(y.cpu().numpy())
            all_pred.extend(pred.cpu().numpy())

    avg_loss = total_loss / len(loader.dataset)
    macro_f1 = f1_score(all_y, all_pred, average="macro")
    return avg_loss, macro_f1, all_y, all_pred
for epoch in range(1, EPOCHS + 1):

    train_loss, train_f1, _, _ = run_epoch(train_loader, train=True)
    val_loss, val_f1, _, _ = run_epoch(val_loader, train=False)
    print(f"Epoch {epoch:02d}: "

          f"train_loss={train_loss:.4f}, train_f1={train_f1:.4f}, "
          f"val_loss={val_loss:.4f}, val_f1={val_f1:.4f}")

    if val_f1 > best_f1:
        best_f1 = val_f1
        torch.save({
            "model_state": model.state_dict(),
            "classes": classes,
            "model_name": MODEL_NAME
        }, "best\_angio\_classifier.pt")
        print("Saved best model")

checkpoint = torch.load("best\_angio\_classifier.pt", map_location=DEVICE)

```

```

model.load_state_dict(checkpoint["model_state"])
test_loss, test_f1, y_true, y_pred = run_epoch(test_loader, train=False)
print("\nTEST RESULTS")
print("Macro F1:", test_f1)
print("\nClassification report:")
print(classification_report(y_true, y_pred, target_names=classes))
print("\nConfusion matrix:")
print(confusion_matrix(y_true, y_pred))

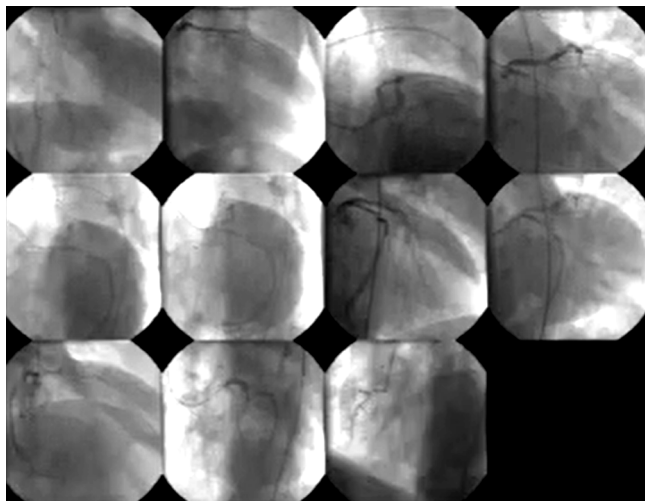
from PIL import Image
import torch
import timm
from torchvision import transforms

DEVICE = "cuda" if torch.cuda.is_available() else "cpu"
IMG_SIZE = 224
checkpoint = torch.load("best_angio_classifier.pt", map_location=DEVICE)
classes = checkpoint["classes"]
model = timm.create_model(
    checkpoint["model_name"],
    pretrained=False,
    num_classes=len(classes)
)
model.load_state_dict(checkpoint["model_state"])
model.to(DEVICE)
model.eval()
tfm = transforms.Compose([
    transforms.Grayscale(num_output_channels=3),
    transforms.Resize((IMG_SIZE, IMG_SIZE)),
    transforms.ToTensor(),
    transforms.Normalize([0.485, 0.456, 0.406],
                          [0.229, 0.224, 0.225])
])
img = Image.open("example_angio.png").convert("RGB")
x = tfm(img).unsqueeze(0).to(DEVICE)
with torch.no_grad():
    prob = torch.softmax(model(x), dim=1)[0]
for cls, p in zip(classes, prob.cpu().numpy()):
    print(f"{cls}: {p:.3f}")
print("Prediction:", classes[int(prob.argmax)])

```

Додаток Д

**Приклади ангіографічних зображень коронарних артерій з патологіями
та приклад автоматизованої процедури їх оброблення за допомогою
інтелектуалізованої біотехнічної системи**



Продовження додатку Д



Продовження додатку Д

