

ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ-КЛАСИФІКАТОРІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ БАГАТОВИМІРНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ МІКРОСКОПІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ СУДОВО-МЕДИЧНОГО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ХВОРОБ СЕРЦЯ

*Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси, Україна

**Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна

***Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці, Україна

Анотація. Значна поширеність випадків гострої коронарної недостатності у практиці судово-медичного експерта та її раптовість породжують підозру у судово-слідчих органів про насильницький характер загибелі особи. Потрібно використання об'єктивних і точних методів діагностики гострої ішемії міокарда. В цій роботі подані результати застосування методології створення інформаційних технологій багаторівневого інтелектуального моніторингу з метою забезпечення даними процесів прийняття рішень судово-медичним експертом. Поєднуються методи багатовимірної поляризаційної мікроскопії і статистичної обробки даних з методами індуктивного моделювання для побудови методології створення інтелектуальних систем багаторівневого судово-медичного моніторингу. На прикладі процесу посмертного діагностування ішемічної хвороби серця та гострої коронарної недостатності досліджені процеси координації взаємодій різнотипних методів формування масиву інформативних ознак, типових агрегатів синтезу моделей-класифікаторів на кожному із етапів моніторингу. Розв'язувалась задача класифікації результатів дослідження біологічних матеріалів з метою отримання діагнозу. Для отримання інформативних ознак розроблена модель біологічної тканини міокарду та визначені основні діагностичні параметри (статистичні моменти 1–4 порядків координатних розподілів значень азимутів, еліптичностей поляризації та їх автокореляційних функцій, а також вейвлет-коефіцієнтів відповідних розподілів), що є динамічними внаслідок їх некротичних змін. Чисельні характеристики інформативних ознак утворюють масив вхідних даних для синтезатора моделей моніторингової інформаційної системи. Класифікація цих даних забезпечувалась шляхом побудови вирішуючого правила синтезатором за багаторядним алгоритмом МГУА. Експериментально доведена ефективність описаної методології.

Ключові слова: судово-медичний інтелектуальний моніторинг, поляризаційна мікроскопія, інформативні ознаки, класифікація, МГУА.

Аннотация. Значительная распространенность случаев острой коронарной недостаточности в практике судебно-медицинского эксперта и ее внезапность порождают подозрение у судебно-следственных органов о насильственном характере смерти человека. Требуется использование объективных и точных методов диагностики острой ишемии миокарда. В этой работе представлены результаты применения методологии создания информационных технологий многоуровневого интеллектуального мониторинга с целью обеспечения данными процессов принятия решений судебно-медицинским экспертом. Сочетаются методы многомерной поляризационной микроскопии и статистической обработки данных с методами индуктивного моделирования для построения методологии создания интеллектуальных систем многоуровневого судебно-медицинского мониторинга. На примере процесса посмертного диагностирования ишемической болезни сердца и острой коронарной недостаточности исследованы процессы координации взаимодействий разнотипных методов формирования массива информативных признаков, типичных агрегатов синтеза моделей-классификаторов на каждом из этапов мониторинга. Решалась задача классификации результатов исследования биологических материалов с целью получения диагноза. Для получения информативных признаков разработана модель биологической ткани миокарда и определены основные диагностические параметры (статистические моменты 1–4 порядков координатных распределений значений азимутов, эллиптичности поляризации и их автокорреляционных функций, а также вейвлет-коэффициентов соответствующих распределений), что является динамическим вследствие их некротических изменений. Численные характеристики информативных признаков образуют массив входных данных для синтезатора моделей мониторинговой

информационной системы. Классификация этих данных обеспечивалась путем построения решающего правила синтезатором по многоуровневому алгоритму МГУА. Экспериментально доказана эффективность описанной методологии.

Ключевые слова: судебно-медицинский интеллектуальный мониторинг, поляризационная микроскопия, информативные признаки, классификация, МГУА.

Abstract. The significant prevalence of the cases of acute coronary insufficiency in the practice of a forensic expert and its suddenness gives a rise to suspicion of forensic investigating authorities about the violent nature of the death of a person. It requires the use of objective and precise methods for diagnosis of acute ischemia of the myocardium. In this work the results of application of the methodology of creation of information technologies of multilevel intelligent monitoring are presented in order to provide data of decision-making processes by forensic medical expert. The methods of multidimensional polarization microscopy and statistical processing of data with methods of inductive modeling are combined for constructing a methodology for the creation of intelligent systems of multilevel forensic medical monitoring. On the example of the process of posthumous diagnosis of coronary heart disease and acute coronary insufficiency, processes of coordination of interactions of various types of formation of an array of informative features, typical aggregates of synthesis of model-classifiers at each of the stages of monitoring are researched. To obtain informative features, a model of biological tissue of the myocardium was developed and the main diagnostic parameters were determined (statistical moments of 1–4 orders of coordinate distributions of the values of azimuths and the ellipticity of polarization and their autocorrelation functions, as well as wavelet coefficients of the corresponding distributions), which are dynamic due to its necrotic changes. Numerical characteristics of informative features form an array of input data for the synthesizer of models of monitoring information system. The classification of these data was provided by constructing a decisive rule for the synthesizer on a multi-path algorithm of GMDH. The efficiency of the described methodology has been experimentally proved.

Keywords: forensic medical monitoring, polarization microscopy, informative signs, classification, GMDH.

1. Вступ

Интеллектуальный мониторинг – це технологія забезпечення інформацією процесів прийняття рішень шляхом організації неперервних спостережень та обробки їх результатів [1]. Основними етапами є визначення відомостей про властивості об'єктів спостереження, потрібних для порівняння стратегій при прийнятті рішень, визначення переліку діагностичних параметрів, формування масиву вхідних даних (МВД), обробка та перетворення інформації алгоритмами синтезу моделей класифікатора моніторингової інтелектуальної системи (МІС). Множина отриманих моделей класифікаторів заноситься до бази модельних знань [2], формуючи її ієрархічну структуру. Завжди актуальним є завдання забезпечення інформативності МВД, достатньої для побудови корисних моделей наявними методами і засобами, реалізованими в синтезаторі моделей МІС. Ефективна організація спостережень за об'єктами досліджень передбачає залучення останніх наукових досягнень у предметній галузі, в якій реалізовується технологія моніторингу.

Різноманіття об'єктів медичного моніторингу вимагає індивідуальних досліджень процесів формування масиву вхідних даних. Об'єктом медичного моніторингу в цій роботі є процеси посмертної диференціації ішемічної хвороби серця (ІХС) та гострої коронарної недостатності (ГКН).

Серцево-судинні захворювання є причиною близько третини смертельних наслідків в усьому світі, займаючи лідируючу позицію серед інших причин смерті [3, 4]. Починаючи з 2000 р., серцево-судинні захворювання були причиною 33,7 % зареєстрованих смертельних випадків, серед них 42,5 % були пов'язані з ішемічною хворобою серця (ІХС) [5], зокрема, з раптовою серцевою смертю внаслідок гострої коронарної недостатності (ГКН). Значна поширеність випадків ГКН у практиці судово-медичного експерта та її раптовість, що породжує підозру у судово-слідчих органів на насильницький характер, вимагає вико-

ристання об'єктивних і точних методів діагностики гострої ішемії (ГІ) міокарда. Однак, ГКН важко діагностувати через неспецифічність макроскопічних ознак і необхідність використання специфічних методів забарвлення та роль «людського фактора» [6].

Разом з тим задача встановлення ГІ в ранні терміни залишається нерозв'язаною. Наявний брак сучасних, об'єктивних методик визначення ГІ спонукає до пошуку і розробки нових технологій моніторингу патологічних змін міокарда людини. Достатньо зазначити, що на наукових засіданнях Міжнародної академії судової медицини (International Academy of Legal Medicine), Міжнародної асоціації судових наук (International Association of Forensic Sciences) завжди в науковій програмі виділяють секцію з танатології, де розглядають сучасні методи встановлення раптової серцевої смерті та ГКН.

Методи багатовимірної поляризаційної мікроскопії дозволяють сформулювати перелік інформативних показників для МВД та отримати їх чисельні характеристики, що містять нову, об'єктивну інформацію про динаміку зміни лазерних поляриметричних зображень морфологічної структури біотканин. Вони успішно апробовані при розв'язанні таких задач забезпечення інформацією процесів прийняття рішень під час проведення судово-медичної експертизи, як визначення давності настання смерті, час формування гематом, діагностика часу спричинення та встановлення прижиттєвості тілесних ушкоджень [7, 8]. Інформативними є результати аналізу розподілів станів поляризації (азимутів α та еліптичностей β) і фаз (δ) світлових коливань зображень міокарда для визначення та відображення в чисельній формі їх змін, пов'язаних із вогнищами ГІ при ГКН [9, 10].

Для первинної обробки отриманих таким чином результатів спостережень та побудови додаткових інформативних ознак використовуються методи статистичного, кореляційного та вейвлет-аналізу з наступним визначенням чутливості (Se), специфічності (Sp) та збалансованої точності (Ac) [11, 12].

Таким чином формується вектор ознак, що характеризує властивості кожного із досліджених об'єктів. Множина чисельних характеристик векторів ознак утворює МВД. На його основі розв'язується задача класифікації об'єктів – формується вирішуюче правило, за допомогою якого кожній із хвороб ставиться у відповідність вектор ознак, що її характеризує. Це вирішуюче правило будується синтезатором моделей моніторингової інтелектуальної системи. В синтезаторі МІС реалізовано більше 20 алгоритмів синтезу моделей (АСМ). Це базові алгоритми МГУА [13], МГУА-подібні алгоритми, нейромережі різних топологій, генетичні і гібридні алгоритми та ін. Синтезатор забезпечує вибір алгоритму синтезу моделей адаптивно до властивостей МВД. Вибір відбувається за результатами послідовного випробування кожного з АСМ на основі оцінки якості отриманої моделі.

Таким чином, процес діагностики хвороби містить етапи отримання біологічного матеріалу, формування переліку його ознак, здобування переліку чисельних характеристик, формування масиву вхідних даних, побудову вирішуючого правила синтезатором моделей МІС, класифікацію об'єктів МВД, інтерпретацію результатів класифікації судмедекспертом.

Синтезатор моделей використовується в типовому вигляді, а результати діагностики залежать від процесів формування МВД. Результати досліджень біологічних зразків засобами багатовимірної поляризаційної мікроскопії містять ознаки ішемічної хвороби серця та гострої коронарної недостатності й дозволяють отримати додаткову інформацію для їх діагностування. Тому дослідження процесу використання багатовимірної поляризаційної мікроскопії для формування чисельних ознак МВД та синтезу моделей-класифікаторів є актуальними. Ця технологія дозволяє підвищити точність і достовірність інформації, якою забезпечується процес прийняття рішень судмедекспертом щодо диференціації причини смерті хворого.

2. Мета та задачі дослідження

Була сформульована гіпотеза про те, що перелік інформативних ознак для класифікації захворювань за інформаційною технологією багаторівневого інтелектуального моніторингу у процесі судово-медичної експертизи причин загибелі хворих на серцево-судинні захворювання повинен отримуватись шляхом використання методів багатовимірної поляризаційної мікроскопії для обробки зображень гістологічних зрізів міокарда. Метою роботи є дослідження процесу формування переліку інформативних ознак та формування масиву вхідних даних для класифікації причин загибелі хворого для судово-медичної експертизи шляхом послідовного застосування методів багатовимірної поляризаційної мікроскопії, статистичної обробки даних та індуктивного моделювання.

Для досягнення цієї мети розв'язувались такі задачі. Досліджувалися результати класифікації зразків після формування масиву вхідних даних на основі ознак, отриманих застосуванням багатовимірної поляризаційної мікроскопії зображень зрізів ділянок міокарда та після статистичної обробки цих результатів. Результати оцінювались за кількістю правильно класифікованих зразків.

3. Результати дослідження

3.1. Етап 1. Отримання біологічного матеріалу

Були сформовані класи та виділені класифікаційні ознаки об'єктів дослідження. Для цього виділено три групи та розроблено критерії включення об'єктів до класів і критерії їх виключення. Всі померлі були жителями м. Чернівці та області, які, зі слів родичів та даних судово-гістологічного дослідження не мали інших значних системних захворювань і не знаходились з цього приводу на обліку.

Досліджувались ділянки міокарда трупів людей. Забір проводився з різних анатомічних структур, включаючи ділянки перетинки, стінки правого та лівого шлуночків, стінки правого та лівого передсердь, а також область верхівки. Формувались блоки об'ємом 1 см³, які безпосередньо після забору нарізались на заморожуючому мікротомі на зрізи товщиною 30±5 мкм.

У табл. 1 подані характеристики класів досліджуваних об'єктів.

Таблиця 1 – Характеристики класів досліджуваних об'єктів

Клас	Кількість об'єктів у групі	Критерії включення	Критерії виключення
Гостра коронарна недостатність	150	Трупи людей двох статей віком від 18 до 45 років. Гістохімічно підтверджено ГКН	Наявність анамнестичних, макроскопічних, мікроскопічних, у тому числі гістохімічних даних іншої патології міокарда. Підтверджено лабораторно наявність будь-яких екзогенних інтоксикацій
Хронічна ішемічна хвороба серця	160	Трупи людей обох статей віком старіше 45 років. Макроскопічні ознаки: дрібновогнищевий міокардіосклероз, наявність атеросклеротичних бляшок у просвіті коронарних артерій, гіпертрофія стінки лівого шлуночка (товщина стінки 1,6-2,0 см), гіпертрофія пупкових м'язів, укорочення сухожилля мітрального клапана	Постінфарктний міокардіосклероз. Наявність анамнестичних, макроскопічних, мікроскопічних, у тому числі гістохімічних даних іншої патології міокарда; підтверджено лабораторно наявність будь-яких екзогенних інтоксикацій

Конт- рольна група	20	Трупні людей двох статей віком від 18 до 40 років. Насильницька смерть з відсутнім агональним періодом	Наявність анамнестичних, макроскопічних, мікроскопічних, у тому числі гістохімічних даних наявності патології міокарда. Виявлення ознак, характерних для агонії під час помирання. Лабораторно підтверджені будь-які екзогенні інтоксикації
--------------------------	----	---	---

3.2. Етап 2. Формування інформативних ознак об'єктів дослідження

3.2.1. Багатовимірна поляризаційна мікроскопія гістологічних зрізів міокарда

Поляризаційну мікроскопію проводили при стандартному розташуванні стокс-поляриметра (рис. 1) [14].

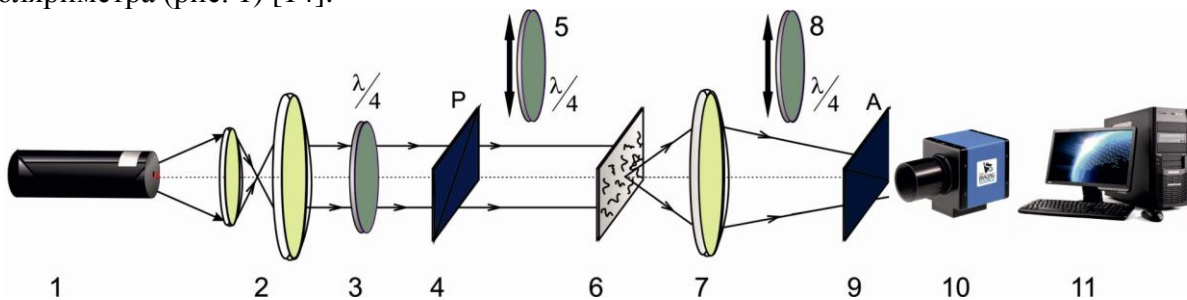


Рисунок 1 – Оптична схема стокс-поляриметра: 1 – He-Ne лазер; 2 – коліматор; 3 – стаціонарна чвертьхвильова пластинка; 4 – поляризатор; 5 – механічно рухома чвертьхвильова пластинка; 6 – нативний зріз; 7 – поляризаційний мікрооб'єктив; 8 – механічно рухома чвертьхвильова пластинка; 9 – аналізатор; 10 – CCD-камера; 11 – комп'ютер

Опромінювання зразків міокарда (рис. 1, (6)) проводилося паралельним ($\otimes = 2 \times 10^3 \mu\text{m}$) слабкоінтенсивним ($P = 5,0 \text{ мВт}$) пучком He-Ne лазера ($\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$).

Поляризаційний опромінювач складався з двох чвертьхвильових пластинок (Achromatic True Zero-Order Waveplate) (рис. 1, (3, 5)) і поляризатора (B+W Kaesemann XS-Pro Polarizer MRC Nano) (рис. 1, (4)).

Зріз міокарда послідовно зондувався лазерним пучком із такими типами поляризації: лінійна з азимутами 0° , 90° , $+45^\circ$ і права циркуляція (\otimes). Поляризаційні зображення зразка міокарда за допомогою поляризаційного мікрооб'єктива 7 (Nikon CFI Achromat P, фокусна відстань – 30 мм, числова апертура – 0,1, збільшення – 4x) проектувалися у площину світлочутливої площадки ($m \times n = 1280 \times 960$ пікселів) CCD-камери (рис. 1, (10)) (The Imaging Source DMK 41AU02.AS, monochrome 1/2" CCD, Sony ICX205AL (progressive scan), роздільна здатність – 1280x960, розмір світлочутливої площадки – 7600x6200мкм, чутливість – 0,05 lx, динамічний діапазон – 8 bit).

Аналіз зображень зразків міокарда здійснювався за допомогою поляризатора (рис. 1, (9)) і чвертьхвильової пластинки (рис. 1, (8)). Обчислення координатних розподілів $V_i(p \times k)$ – параметри вектора Стокса, $\alpha(p \times k)$ – азимуту поляризації, $\beta(p \times k)$ – еліптичності поляризації, які характеризують мікроскопічні зображення зрізів міокарда здійснювалось за відомими алгоритмами [15]:

$$\begin{aligned}
V_{i=1}^{0;45;90;\otimes} &= I_0^{0;45;90;\otimes} + I_{90}^{0;45;90;\otimes}, \\
V_{i=2}^{0;45;90;\otimes} &= I_0^{0;45;90;\otimes} - I_{90}^{0;45;90;\otimes}, \\
V_{i=3}^{0;45;90;\otimes} &= I_{45}^{0;45;90;\otimes} - I_{135}^{0;45;90;\otimes}, \\
V_{i=4}^{0;45;90;\otimes} &= I_{\otimes}^{0;45;90;\otimes} + I_{\oplus}^{0;45;90;\otimes}.
\end{aligned} \tag{1}$$

Тут $I_{0;45;90;135;\otimes;\oplus}$ – інтенсивності випромінювання, пропущеного лінійним поляризатором з азимутом повороту 0° ; 45° ; 90° ; 135° , та право- (\otimes) й ліво- (\oplus) циркулярно поляризованим фільтром.

Визначивши згідно з (2) у кожному пікселі світлочутливої площадки набір параметрів Стокса V_i , отримують значення азимута α та еліптичності β поляризації у відповідних точках зображення нативного зрізу міокарда:

$$\begin{aligned}
\alpha &= 0,5 \arctg \frac{V_{i=3}}{V_{i=2}}, \\
\beta &= 0,5 \arcsin \frac{V_{i=4}}{V_{i=1}}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Рис. 2 ілюструє серію поляризаційних зображень оптикоанізотропної матриці (у перехрещених площинах пропускання поляризатора 4 і аналізатора 9 (рис. 1) зразків тканини міокарда всіх груп.

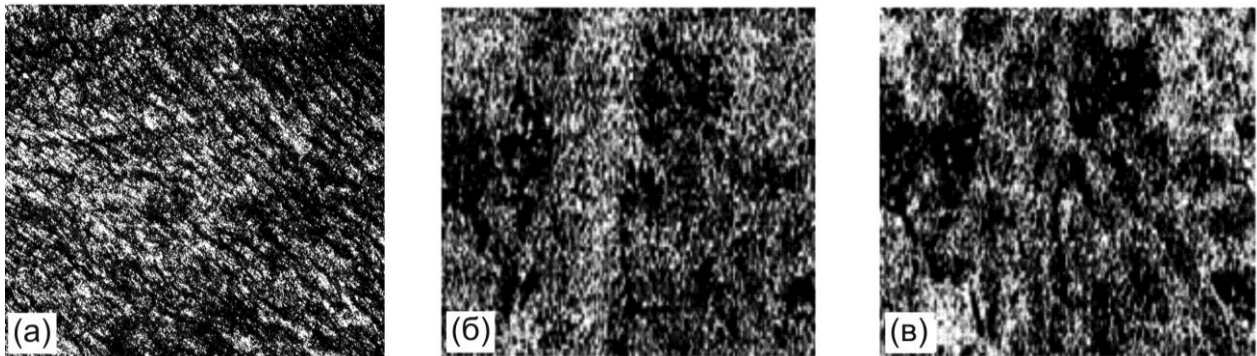


Рисунок 2 – Лазерні зображення поляризаційно-візуалізованої фібрилярної сітки гістологічного зрізу міокарда: (а) – елемент класу 1, (б) – елемент класу 2, (в) – елемент класу 3

3.2.2. Дослідження тканини міокарда

В основу опису механізмів оптичної анізотропії міокарда покладено такі модельні уявлення [16].

1. Амінокислоти та утворені ними поліпептидні ланцюги (первинна структура білка) володіють циркулярним двопронезаломленням або оптичною активністю й характеризуються таким матричним оператором:

$$\{A\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ де } a_{ik} = \begin{cases} a_{22} = a_{33} = \cos 2\theta, \\ a_{23} = -a_{32} = \sin 2\theta. \end{cases} \tag{3}$$

Тут θ – кут повороту площини поляризації світлового пучка відносно площини падіння.

Отже, шляхом реєстрації поляризаційної мапи азимута поляризації можна одержати інформацію про прояви оптично активних структур первинної структури білків, які формують морфологічну будову міокарда.

2. Фібрилярні (вторинна структура) протейнові мережі, які утворені поліпептидними ланцюгами, володіють лінійним двопронезаломленням. Оптичним проявом особливостей морфологічної будови фібрилярної сітки є формування координатного розподілу інтенсивності у площині мікроскопічного зображення гістологічного зрізу міокарда. Оптичні прояви такого механізму вичерпно повно описуються таким матричним оператором:

$$\{B\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ 0 & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ 0 & b_{42} & b_{43} & d_{44} \end{pmatrix}, \text{ де } b_{ik} = \begin{cases} b_{22} = \cos^2 2\gamma + \sin^2 2\gamma \cos \varphi, \\ b_{23} = b_{32} = \cos 2\gamma \sin 2\gamma (1 - \cos \varphi), \\ b_{33} = \sin^2 2\gamma + \cos^2 2\gamma \cos \varphi, \\ b_{24} = -b_{42} = \sin 2\gamma \sin \varphi, \\ b_{34} = -b_{43} = \cos 2\gamma \sin \varphi, \\ b_{44} = \cos \varphi. \end{cases} \quad (4)$$

Тут γ – напрям укладання фібрил, який визначає орієнтацію оптичної осі, ϕ – фазовий зсув між лінійно-поляризованими ортогональними складовими амплітуди світлового пучка.

Таким чином, шляхом реєстрації поляризаційної мапи еліптичності поляризації можна одержати інформацію про прояви властивостей фібрилярних мереж (сіток), які формують вторинну структуру морфологічної будови міокарда.

3. Некротичні зміни морфологічної будови міокарда призводять до структурної й біохімічної трансформації первинної та вторинної структур її білкових складових. Оптично такі процеси призводять до змін координатних розподілів мап азимута (біохімічні процеси) та еліптичності (орієнтаційні зміни фібрилярних сіток) поляризації мікроскопічних зображень гістологічних зрізів міокарда.

4. Головна ідея диференціації зразків тканини міокарда померлих внаслідок ІХС та ГКН лежить у можливості багатопараметричної ($r \equiv \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$) об'єктивізації аналізу мікроскопічних зображень гістологічних зрізів у рамках статистичного, кореляційного та вейвлет-аналізу.

Статистичний аналіз результатів проводився шляхом розрахунку статистичних моментів 1, 2, 3 і 4 порядків.

Статистичний момент 1-го порядку M_1 розраховувався як середнє значення (математичне сподівання) серед усього набору (ансамблю) випадкових величин координатних розподілів r і обчислювався за співвідношенням

$$M_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(r)_i|. \quad (5)$$

Статистичний момент 2-го порядку M_2 або дисперсія, яка характеризує розподіл випадкової величини r – це міра розкиду даної величини або її відхилення від математичного сподівання. Він розраховувався за формулою (6)

$$M_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r - M_1)_i^2. \quad (6)$$

Статистичний момент 3-го порядку M_3 або асиметрія, що характеризує відхилення від нормального розподілу випадкової величини r , обчислювалася згідно з співвідношенням

$$M_3 = \frac{1}{M_2^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r - M_1)_i^3. \quad (7)$$

Статистичний момент 4-го порядку M_4 або ексцес, який характеризує ступінь гостроти «піку» розподілу випадкової величини r розраховувався відповідно до виразу (8)

$$M_4 = \frac{1}{M_2^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r - M_1)_i^4, \quad (8)$$

де N – кількість ($p \times k = 1280 \times 960$) пікселів цифрової камери стокс-поляриметра, що реєструє поляризаційно-відфільтровані мікроскопічні зображення нативного зрізу міокарда.

Кореляційний аналіз проводився обчисленням автокореляційних функцій $K(r)$ шляхом координатного зсуву вздовж рядків пікселів цифрової камери координатних розподілів $r(p \times k)$ за відомим співвідношенням у рамках програмного продукту MATLAB.

З метою кількісної оцінки автокореляційних функцій $K(r)$ використано обчислення статистичних моментів 2-го (співвідношення (4)) і 4-го (співвідношення (6)) порядків (у подальшому кореляційні моменти K_2 і K_4).

Вейвлет-аналіз проводився для локального оцінювання координатних розподілів $r \equiv \left[\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \right]$ [17].

Як аналітичний зонд використовувалась спеціальна математична функція (вейвлет-функція), що має скінченну основу як в координатному, так і частотному просторі.

За допомогою вейвлет-функції розподіл значень обчисленого параметра q , який характеризує структуру зображення нативного зрізу міокарда, розкладався в математичний ряд, який являє собою згортку (кореляцію) параметрів зміщення (b), масштабування (a) та певних коефіцієнтів (вейвлет-коефіцієнти). Результатом вейвлет - перетворення одновимірної залежності параметра r є двовимірний масив амплітуд вейвлет-коефіцієнтів $W(a, b)$. Вейвлет-аналіз дозволяє дослідити різномасштабну структуру поляризаційних мап, які взаємопов'язані з морфологічною будовою міозинових сіток міокарда.

3.2.3. Аналіз інформативності характеристик методу поляризаційної мікроскопії

Аналіз операційних характеристик методу поляризаційної мікроскопії, що визначають її діагностичну інформативність, не виявив задовільного рівня більшості з об'єктивних параметрів $r \equiv \left[M_{i=1;2;3;4}; K_{i=2;4} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \right]$ розподілів азимута та еліптичності поляризації мікроскопічних зображень у завданні посмертної діагностики міокарда.

Найбільш інформативними виявилися статистичні і кореляційні моменти 4-го порядку $r \equiv \left[M_{i=4}; K_{i=4} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \right]$:

$$\alpha \Leftrightarrow \begin{cases} Se(\alpha) = 62\% - 68\%, \\ Sp(\alpha) = 54\% - 59\%, \\ Ac(\alpha) = 60,5\% - 61\%, \end{cases} \quad \beta \Leftrightarrow \begin{cases} Se(\beta) = 58\% - 62\%, \\ Sp(\beta) = 55\% - 57\%, \\ Ac(\beta) = 56\% - 58,5\%. \end{cases} \quad (9)$$

Досягнутий рівень інформативності не відповідає задовільній якості діагностичного тесту.

Аналіз операційних характеристик масштабно-селективного методу вейвлет-аналізу даних поляризаційної мікроскопії, що визначають її діагностичну інформативність, виявив зростання (у порівнянні з безпосереднім аналізом поляризаційних мап) збалансованої точності посмертної діагностики міокарда.

На великих масштабах ($a_{\max} = 55$) оцінювання проявів оптичної анізотропії фібрилярних мереж найбільш інформативним виявився статистичний момент 3-го порядку, що характеризує асиметрію розподілу вейвлет-коефіцієнтів мапи еліптичності поляризації мікроскопічних зображень гістологічних зрізів міокарда обох груп померлих

$$\beta \Leftrightarrow \begin{cases} Se(\beta) = 62\% - 78\%, \\ Sp(\beta) = 57\% - 67\%, \\ Ac(\beta) = 59,5\% - 72,5\%. \end{cases} \quad (10)$$

На малих масштабах ($a_{\min} = 15$) оцінювання проявів оптичної активності первинної структури білків міозину найбільш інформативними виявилися статистичні моменти 3-го і 4-го порядків, які характеризують розподіли вейвлет-коефіцієнтів мап азимута поляризації мікроскопічних зображень гістологічних зрізів міокарда померлих внаслідок ІХС та ГКН:

$$\alpha \Leftrightarrow \begin{cases} Se(\alpha) = 64\% - 77\%, \\ Sp(\alpha) = 59\% - 68\%, \\ Ac(\alpha) = 61,5\% - 72,5\%. \end{cases} \quad (11)$$

Одержані результати щодо визначення операційних характеристик методу поляризаційної мікроскопії з масштабно-селективним виявили зростання збалансованої точності до рівня хорошої якості діагностичного тесту – $Ac(\beta) = 72,5\%$ і $Ac(\alpha) = 72,5\%$.

3.3. Етап 3. Формування масиву вхідних даних

Таким чином, перелік інформативних ознак містить статистичні моменти 1–4 порядків координатних розподілів значень азимутів, еліптичностей поляризації та їх автокореляційних функцій, а також вейвлет-коефіцієнтів відповідних розподілів. Вектор ознак X містив 144 показники:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{144}\}. \quad (12)$$

Масив вхідних даних (МВД) формується шляхом розрахунку чисельних характеристик інформативних ознак та їх поєднання у двовимірний масив даних відповідно до [1].

МВД сформовано шляхом перетворення зображень гістологічних зрізів 330 біологічних зразків до масиву чисельних характеристик інформативних ознак, поданих у табл. 2. Чисельні характеристики зображення окремого біологічного зразка дозволяють сформува-ти рядок у двовимірній таблиці МВД – точку спостереження в багатовимірному просторі ознак.

МВД містив 306 точок спостереження, що використовувались для побудови моделі, і 24 точки спостереження, що використовувались для випробування моделі і не приймали участі у процесі її побудови. Кожна точка спостереження була класифікована експертним шляхом відповідно до табл. 1 – містила ознаки одного із захворювань (класів) – 1) гострої коронарної недостатності; 2) гострої ішемії міокарда та 3) контрольна без ознак цих захворювань. Належність до класу 1 позначалась «+10», до класу 2 – «-10», до класу 3 – «0».

3.4. Етап 3. Синтез моделей-класифікаторів

Моделі-класифікатори будувались із застосуванням багаторядного алгоритму МГУА [13]. Послідовно проходили випробування кілька алгоритмів синтезу моделей, реалізованих у МІС. За результатами випробувань вибирався АСМ, що забезпечував найкращі характеристики результатів роботи моделі-класифікатора за критерієм регулярності на екзаменаційній послідовності точок спостереження.

У табл. 2 подані результати досліджень. Значення образу позначало належність точки спостереження до одного із 3-х класів. Результат моделювання відображає розраховане значення образу. Точка спостереження позначалася «1» у випадку, коли результати її класифікації були правильні. У протилежному випадку точка позначалась – «0».

Таблиця 2 – Результати випробування моделі-класифікатора на екзаменаційній послідовності

№ з/п	Клас	Дійсне значення образу	Змодельоване значення образу	Результат
1	1	10	9,99	1
2	1	10	10,00	1
3	1	10	9,99	1
4	1	10	10,00	1
5	1	10	9,99	1
6	1	10	10,00	1
7	1	10	9,99	1
8	1	10	10,00	1
9	1	10	9,99	1
10	2	-10	-10,00	1
11	2	-10	-10,00	1
12	2	-10	-10,00	1
13	2	-10	-9,99	1
14	2	-10	-10,00	1
15	2	-10	-10,00	1
16	2	-10	-9,99	1
17	2	-10	-9,99	1
18	2	-10	-9,99	1
19	2	-10	-10,00	1
20	3	0	$-3,3 \cdot 10^{-4}$	1
21	3	0	$-2,6 \cdot 10^{-4}$	1
22	3	0	$-4,7 \cdot 10^{-4}$	1
23	3	0	$-9,5 \cdot 10^{-4}$	1
24	3	0	$-4,6 \cdot 10^{-4}$	1

В умовах дослідження модель-класифікатор забезпечила правильні результати ідентифікації хвороби в усіх точках спостереження. Це означає, що масив вхідних даних є достатньо інформативним. І гіпотеза про формування МВД за результатами послідовного за-

стосування методів багатовимірної поляризаційної мікроскопії отримала своє експериментальне підтвердження.

4. Висновки

Використання моніторингових інформаційних систем для забезпечення інформацією процесів прийняття рішень у галузі судово-медичної експертизи дозволяє успішно розв'язувати задачі класифікації досліджуваних зразків.

Застосування статистичної обробки результатів дослідження тканини міокарда методами багатовимірної поляризаційної мікроскопії дозволяє отримати статистичні моменти 1, 2, 3 і 4 порядків, які є інформативними і можуть використовуватись для формування МВД при побудові моделей-класифікаторів досліджуваних зразків.

Застосування методу азимутально-інваріантного поляризаційного картографування посмертних змін оптичної анізотропії гістологічних зрізів міокарда та вейвлет-аналізу азимутально-незалежних поляризаційних мап дозволяє отримати додаткові інформативні показники для МВД.

Експериментально підтверджено ефективність застосування методів індуктивного моделювання, зокрема, багаторядного алгоритму МГУА, для синтезу моделей-класифікаторів на основі масиву вхідних даних із результатами обробки зображень зрізів міокарда методами поляризаційної мікроскопії.

Сукупність методів отримання біологічних зразків, формування інформативних ознак, побудови моделей-класифікаторів та інтерпретації результатів моделювання утворюють інформаційну технологію інтелектуального судово-медичного моніторингу.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Голуб С.В. Багаторівневе моделювання в технологіях моніторингу оточуючого середовища. Черкаси: Вид. від. ЧНУ імені Богдана Хмельницького, 2007. 220 с.
2. Жирякова І.А., Голуб С.В. Новий підхід до концептуалізації знань. *Технічні науки та технології*. 2015. № 2. С. 78–82.
3. Lopera G., Curtis A.B. Risk stratification for sudden cardiac death: current approaches and predictive value. *Curr. Cardiol. Rev.* 2009. Vol. 5. P. 56–64.
4. Rubart M., Zipes D. Mechanisms of sudden cardiac death. *Journal of Clinical Investigation*. 2005. Vol. 115, N 9. P. 2305–2315.
5. Mozaffarian D., Benjamin E.J., Go A.S. et al. Heart disease and stroke statistics-2015 update: a report from the american heart association. *Circulation*. 2015. Vol. 131, N 4. P. E29–322.
6. Van der Werf C., Hofman N., Tan H.L. et al. Diagnostic yield in sudden unexplained death and aborted cardiac arrest in the young: the experience of a tertiary referral center in The Netherlands. *Heart Rhythm*. 2010. Vol. 7, N 10. P. 1383–1389.
7. Ushenko Y.A., Arkheliyuk A.D., Sidor M.I. et al. Laser polarization autofluorescence of endogenous porphyrins of optically anisotropic biological tissues and fluids in diagnostics of necrotic and pathological changes of human organs. *Appl. Opt.* 2014. N 53. P. B181–B191.
8. Ushenko A.G., Dubolazov A.V., Ushenko V.A., Ushenko Yu.A., Pidkamin L.Y., Soltys I.V., Zhytaryuk V.G., Pavlyukovich N. Mueller-matrix mapping of optically anisotropic fluorophores of molecular biological tissues in the diagnosis of death causes. *Proc. SPIE*. 2016. Vol. 9971. P. 99712L.
9. Ushenko Yu.A., Bachynsky V.T., Vanchulyak O.Ya., Dubolazov A.V., Garazdyuk M.S., Ushenko V.A. Jones-matrix mapping of complex degree of mutual anisotropy of birefringent protein networks during the differentiation of myocardium necrotic changes. *Appl. Opt.* 2016. Vol. 55. P. B113–B119.
10. Sakhnovskiy M.Yu., Ushenko Yu.O., Ushenko V.O., Besaha R.N., Pavlyukovich N., Pavlyukovich O. Multiscale polarization diagnostics of birefringent networks in problems of necrotic changes diagnostics. *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 10612. P. 106121K.
11. Dubolazov O.V., Ushenko A.G., Bachynsky V.T. et al. On the feasibilities of using the wavelet analysis of Mueller matrix images of biological crystals. *Advances in Optical Technologies*. 2010. Vol. 2010. P. 162832.

12. Ushenko Yu.A., Sidor M.I., Pashkovskaia N., Koval G.D., Marchuk Yu.F., Andreichuk D. Laser polarization-variable autofluorescence of the network of optically anisotropic biological tissues: diagnostics and differentiation of early stages of cancer of cervix uteri. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. 2014. Vol. 7, N 6. P. 1450024.
13. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев: Наукова думка, 1981. 296 с.
14. Bachinskyi V.T., Boychuk T.M., Ushenko A.G., Dubolazov A.V., Vanchuliak O.Ya, Ushenko Yu.A., Ushenko V.A. Laser polarimetry of biological tissues and fluids. Chapter 1. Polarization mapping of optically thin layers of biological tissues and fluids: monography. Balti, republic of Moldova: LAP Lambert Academic Publishers, 2017. P. 16–70.
15. Gerrard A., Burch M.J. Introduction to Matrix Methods in Optics. New York: Dover Publications, Inc., 1994. P. 179–239.
16. Garazdyuk M.S., Bachinskyi V.T., Vanchulyak O.Ya., Ushenko A.G., Dubolazov O.V., Gorsky M.P. Polarization-phase images of liquor polycrystalline films in determining time of death. *Appl. Opt.* 2016. Vol. 55. P. B67–B71.
17. Ushenko Yu.A., Sidor M.I., Pashkovskaia N., Koval G.D., Marchuk Yu.F., Andreichuk D. Laser polarization-variable autofluorescence of the network of optically anisotropic biological tissues: diagnostics and differentiation of early stages of cancer of cervix uteri. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. 2014. Vol. 7, N 6. 1450024 p.
18. Ushenko Yu.O., Dubolazov O.V., Karachevtsev A.O., Gorsky M.P., Marchuk Yu.F. Wavelet analysis of Fourier polarized images of the human bile. *Appl. Opt.* 2012. Vol. 51. P. C133–C139.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2018