

## БІОЛОГІЧНІ ТА МЕДИЧНІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ

УДК 681.518.3: 535.243.2

В. Г. ПЕТРУК<sup>1</sup>, О. Є. КВАТЕРНЮК<sup>1</sup>, О. І. МОКАНЮК<sup>2</sup>, С. М. КВАТЕРНЮК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

<sup>2</sup>Вінницький національний медичний університет ім. М.І.Пирогова

### ОЦІНЮВАННЯ ВАЛІДНОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ БІОТКАНИН ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВОЇ КОЛОРИМЕТРІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖІ

**Анотація:** У роботі розроблено та проаналізовано експертну систему підтримки прийняття діагностичного рішення при дослідженні поверхневих пошкоджень біотканин за допомогою цифрової колориметрії з використанням нейромережі для обробки результатів. Перевірено можливості застосування архітектури нейромережі на основі багатошарового перцептрона з одним прихованим шаром, багатошарового перцептрона з двома прихованими шарами, імовірнісної нейромережі та мережі з радіальною базисною функцією. Після навчання нейромереж на основі тестових послідовностей досліджено результати продуктивності та помилок при їх роботі. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для введення анкетних даних пацієнтів при судово-медичній експертизі біотканин шкіри людини у спільну базу даних з цифровими фотографіями ушкоджень. Проаналізовано операційні параметри діагностичного тесту, що дозволяють оцінити точність діагностики поверхневих пошкоджень біотканин на основі вдосконаленого методу цифрової колориметрії.

**Ключові слова:** цифрова колориметрія, біотканини, судово-медична експертиза

**Аннотация:** В работе разработана и проанализирована экспертная система поддержки принятия диагностического решения при исследовании поверхностных повреждений биотканей с помощью цифровой колориметрии с использованием нейросети для обработки результатов. Проверены возможности применения архитектуры нейросети на основе многослойного перцептрона с одним скрытым слоем, многослойного перцептрона с двумя скрытыми слоями, вероятностной нейросети и сети с радиальной базисной функцией. После обучения нейронных сетей на основе тестовых последовательностей исследованы результаты производительности и ошибок при их работе. Разработано специализированное программное обеспечение для ввода анкетных данных пациентов при судебно-медицинской экспертизе биотканей кожи человека в общую базу данных с цифровыми фотографиями повреждений. Проанализированы операционные параметры диагностического теста, позволяющие оценить точность диагностики поверхностных повреждений биотканей на основе усовершенствованного метода цифровой колориметрии.

**Ключевые слова:** цифровая колориметрия, биоткани, судебно-медицинская экспертиза

**Abstract:** In this paper, we designed and analyzed the expert system of diagnostic adoption of sup-port solutions in the study of surface damage biological tissues by means of digital colorimetry using a neural network to process the results. The researchers tested the possibility of using neural network architecture based on multilayer perceptron with one hidden layer, multilayer perceptron with two hidden layers, probabilistic neural networks and network with radial basis function. After learning neural network based on test sequences we have studied performance results and errors in their work. We have developed specialized software for administration personal data of patients in forensic examination of biological tissues of human skin and combination of data in common database with digital photos injuries. The researchers analyzed the operating parameters of a diagnostic test to assess the diagnostic accuracy of surface damage biological tissues based on advanced of digital colorimetry method.

**Key words:** digital colorimetry, biological tissue, forensic examination

#### Вступ

Вдосконалений спосіб цифрової колориметрії поверхневих пошкоджень біотканин у судовій медицині дозволяє документально зареєструвати ушкодження біотканини шкіри судово-медичним експертом та використати результати досліджень у якості доказової бази [8]. Спеціалізоване алгоритмічно-програмне забезпечення засобу діагностики біотканин шкіри людини дозволяє визначити гістограму кольорів зображення патологічної біотканини шкіри при механічному ураженні тупим предметом. Отримана гістограма кольорів разом з іншими біомедичними параметрами пацієнта подається на вхід експертної системи підтримки прийняття діагностичного рішення. Таким чином, засіб діагностики дозволяє формалізувати відомі методики візуального експертного оцінювання терміну ушкодження біотканини шкіри людини внаслідок травми тупим предметом, що необхідно для зменшення суб'єктивності проведення досліджень у судово-медичній діагностиці.

**Актуальність** роботи обумовлена необхідністю підвищення точності діагностики параметрів поверхневих пошкоджень біотканин шкіри людини з урахуванням їх оптико-фізичних параметрів за рахунок вдосконалення методу цифрової колориметрії.

**Метою** дослідження є розробка та аналіз роботи експертної системи підтримки прийняття діагностичного рішення при дослідженні поверхневих пошкоджень біотканин за допомогою цифрової колориметрії з використанням нейромережі для обробки результатів, а також аналіз параметрів валідності діагностики.

#### Експертна система підтримки прийняття діагностичного рішення при дослідженні поверхневих пошкоджень біотканин

Для підтримки прийняття діагностичного рішення стосовно поверхневих пошкоджень біотканин у судовій медицині розроблено експертну систему для визначення часу, що минув з моменту нанесення травми тупим предметом на основі результатів обробки параметрів кольору ушкодженої ділянки у вигляді гістограми  $N_{j\%}$  з відносною кількістю пікселів, яку займають елементи зображення з

координатами кольору близькими до кожного з елементів шкали зразків, а також інших біомедичних параметрів з анкет пацієнтів, які є змінними множинного типу відповідних множин з фіксованою кількістю елементів, а саме:

- вік: 0-20 років ( $x_{11}$ ), 20-30 років ( $x_{12}$ ), 30-40 років ( $x_{13}$ ), 40-50 років ( $x_{14}$ ), 50-60 років ( $x_{15}$ ), 60 років ( $x_{16}$ )  $X1 = \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{16}\}$ ;
- стать: чоловік ( $x_{21}$ ), жінка ( $x_{22}$ )  $X2 = \{x_{21}, x_{22}\}$ ;
- індекс Rees-Eisenck: до 96 пікнічний тип ( $x_{31}$ ), 96-106 нормастенічний тип ( $x_{32}$ ), понад 106 астеничний тип ( $x_{33}$ )  $X3 = \{x_{31}, x_{32}, x_{33}\}$ ;
- об'єкт експертизи: жива особа ( $x_{41}$ )/ труп ( $x_{42}$ )  $X4 = \{x_{41}, x_{42}\}$ ;
- локалізація: голова, шия ( $x_{51}$ ), плеча, надпліччя ( $x_{52}$ ), тулуб ( $x_{53}$ ), стегно, сідниця ( $x_{54}$ ), передпліччя, кисть ( $x_{55}$ ), гомілка, стопа ( $x_{56}$ )  $X5 = \{x_{51}, x_{52}, \dots, x_{56}\}$ ;
- форма: округла ( $x_{61}$ ), овальна ( $x_{62}$ ), неправильна овальна ( $x_{63}$ )  $X6 = \{x_{61}, x_{62}, x_{63}\}$ .

На виході експертна система повинна сформувати діагностичне рішення у вигляді тривалості часу, що минув з моменту нанесення травми тупим предметом, який є елементом наступної множини:

Тривалість: до 1 години ( $t_1$ ), від 1 до 3 годин ( $t_2$ ), від 6 до 12 годин ( $t_3$ ), від 12 до 24 годин ( $t_4$ ), від 24 до 48 годин ( $t_5$ ), від 48 до 72 годин ( $t_6$ ), від 72 до 96 годин ( $t_7$ ), понад 96 годин ( $t_8$ )  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_8\}$ .

Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення Multima-Expert для введення анкетних даних пацієнтів при судово-медичній експертизі біотканин шкіри людини та поєднання їх у єдиній базі даних з цифровими фотографіями ушкоджень. Розроблена програма має можливість експортувати анкетні дані пацієнтів для друку та долучення до медичних карток.

Для побудови експертної системи підтримки прийняття діагностичного рішення про тривалість часу, що минув з моменту нанесення травми тупим предметом у судово-медичній експертизі за допомогою нейромережі використовуємо пакет STATISTACA 6.0 Neural Networks [1].

Для побудови нейромережі перевіримо можливості застосування архітектури мережі на основі:

- багатoshарового перцептрона з одним прихованим шаром – БШП1 (рис.1);
- багатoshарового перцептрона з двома прихованими шарами – БШП2;
- імовірнісної нейромережі - ІНМ;
- мережа з радіальною базисною функцією – РБФ.

Для навчання нейромережі використовуємо дані тривалості часу, який було обчислено судово-медичним експертом на основі результатів опитування пацієнтів  $T_{in} = \{t_1, t_2, \dots, t_8\}$ . Після навчання нейромереж протягом 500 ітерацій на основі тестових послідовностей отримано наступні результати продуктивності та помилок їх роботи (див. табл. 1).

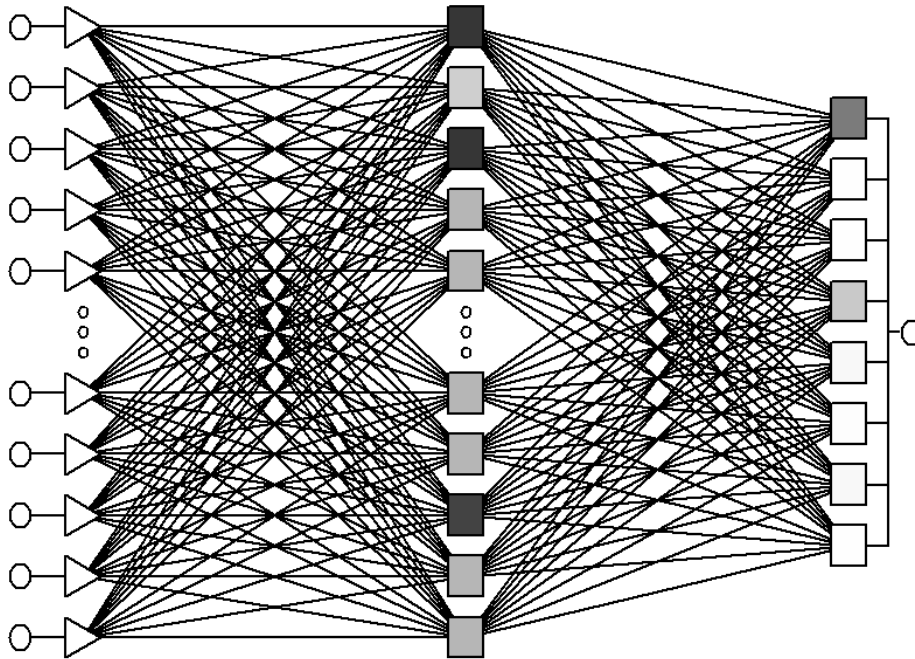


Рисунок 1 – Архітектура нейромережі на основі багатoshарового перцептрона з одним прихованим шаром

Таблиця 1 – Результати продуктивності та помилок нейромереж

Архітектура	Продуктив. навч.	Продуктив. контр.	Продуктив. тест.	Помилка при навчанні, %	Контрольна помилка, %	Тестова помилка, %
БШП1	0,986111	0,485714	0,371429	0,372299	5,978848	6,183768
БШП2	0,986111	0,485714	0,400000	0,153704	5,539583	5,836819
ІНМ	0,722222	0,371429	0,314286	0,203663	0,2883422	3,082088
РБФ	0,555556	0,428571	0,285714	0,255504	0,2848522	3,031888

### Оцінювання валідності біомедичного діагностування поверхневих пошкоджень біотканин на основі вдосконаленого методу цифрової колориметрії

Проаналізуємо точність діагностики поверхневих пошкоджень біотканин на основі вдосконаленого методу цифрової колориметрії використавши набір даних тестування:  $T_{in}$  – тривалість часу, який було обчислено судово-медичним експертом на основі результатів опитування пацієнтів (використовується у якості істинного значення часу),  $T_{out}$  – тривалість часу отримана на виході експертної системи.  $T_{in}$  та  $T_{out}$  є елементами множини  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_8\}$ .

У результаті діагностування необхідно визначити чи перевищує тривалість часу певне фіксоване значення  $T_{const}$ . У цьому випадку при діагностиці можливі такі варіанти:

$$\begin{cases} P_1 = 1 & \text{якщо } T_{in} \geq T_{const}, \text{ інакше } P_1 = 0, \\ P_2 = 1 & \text{якщо } T_{in} < T_{const}, \text{ інакше } P_2 = 0, \\ P_3 = 1 & \text{якщо } T_{out} \geq T_{const}, \text{ інакше } P_3 = 0, \\ P_4 = 1 & \text{якщо } T_{out} < T_{const}, \text{ інакше } P_4 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $P_1, P_2$  – змінні множинного типу  $\{0;1\}$ , які відповідають дійсному значенню тривалості  $T_{in}$ ,  $P_3, P_4$  – змінні множинного типу  $\{0;1\}$ , які відповідають значенню тривалості сформованому на виході експертної системи.

При цьому можливо розрахувати змінні  $A, B, C, D$ , які відповідають усім можливим подіям у процесі діагностики:

$$\begin{cases} A = 1 & \text{якщо } ((P_1 = 1) \wedge (P_3 = 1)), \text{ інакше } A = 0, \\ B = 1 & \text{якщо } ((P_2 = 1) \wedge (P_3 = 1)), \text{ інакше } B = 0, \\ C = 1 & \text{якщо } ((P_1 = 1) \wedge (P_4 = 1)), \text{ інакше } C = 0, \\ D = 1 & \text{якщо } ((P_2 = 1) \wedge (P_4 = 1)), \text{ інакше } D = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де  $A, B, C, D$  – змінні множинного типу  $\{0;1\}$ ,

$A$  – відповідає події, коли у процесі діагностування отримано істинно-позитивний результат (у результаті діагностування отримано позитивний результат діагностування, а дійсне значення теж було позитивним),

$B$  – відповідає події, коли у процесі діагностування отримано хибно-позитивний результат (у результаті діагностування отримано позитивний результат діагностування, а дійсне значення ознаки було негативним),

$C$  – відповідає події, коли у процесі діагностування отримано хибно-негативний результат (у результаті діагностування отримано негативний результат діагностування, а дійсне значення ознаки було позитивним),

$D$  – відповідає події, коли у процесі діагностування отримано істинно-негативний результат (у результаті діагностування отримано негативний результат діагностування, а дійсне значення ознаки теж було негативним).

Розраховуємо змінні  $P_1, P_2, P_3, P_4$  та, відповідно,  $A, B, C, D$  за формулами (1), (2) для набору даних тестування. Результати аналізу подій для біомедичного діагностування поверхневих пошкоджень біотканин наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Аналіз подій при діагностуванні поверхневих пошкоджень біотканин

N	$T_{in}$	$T_{out}$	Дійсне значення		Результати діагностики		A	B	C	D
			$P_1(+)$	$P_2(-)$	$P_3(+)$	$P_4(-)$				
1.	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1
2.	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1
3.	5	5	1	0	1	0	1	0	0	0
4.	2	4	0	1	1	0	0	1	0	0
5.	8	8	1	0	1	0	1	0	0	0
6.	7	2	1	0	0	1	0	0	1	0
...										
583	8	8	1	0	1	0	1	0	0	0

Відповідно кількість подій кожного типу для біомедичного діагностування на основі цифрової колориметрії буде  $a = \sum_{i=0}^n A_i$ ,  $b = \sum_{i=0}^n B_i$ ,  $c = \sum_{i=0}^n C_i$ ,  $d = \sum_{i=0}^n D_i$ . Отримані значення  $a, b, c, d$  вносимо в таблицю спряженості (2x2 contingency table) для порівняння двох груп за бінарною ознакою (табл. 3.).

Таблиця 3 – Порівняння результатів діагностування та дійсного значення ознаки

Результати діагностування	Дійсне значення ознаки («золотий» стандарт)		Разом
	Позитивне значення (+)	Негативне значення (-)	
Позитивний результат діагностування (+)	істинно-позитивний результат (true positive (TP)) $a = 350$	хибно-позитивний результат (false positive (FP)) $b = 11$	$a + b = 361$
Негативний результат діагностування (-)	хибно-негативний результат (false negative (FN)) $c = 8$	істинно-негативний результат (true negative (TN)) $d = 214$	$c + d = 222$
Разом	$a + c = 358$	$b + d = 225$	$a + b + c + d = 583$

На підставі отриманих даних розраховуємо показники валідності діагностичного тесту. Прогнозна валідність – інформація про методику (тест), що характеризує ступінь точності і обґрунтованості судження про якість діагностики за її результатом через певний час після вимірювань. Справжня цінність (міра довіри) дослідження визначається співвідношенням чутливості та специфічності. У деяких практичних випадках доцільна (за високої специфічності) надлишкова чутливість, що пов’язана зі зростанням параметра гіпердіагностики. У іншому випадку, при зменшенні чутливості зростає параметр гіподіагностики.

На основі порівняльної таблиці визначаємо операційні параметри діагностичного тесту [2-7]:

– діагностична чутливість (sensitivity або true positive rate (TPR)), частка осіб з позитивним результатом діагностування серед осіб з справжнім позитивним значенням ознаки

$$TPR = a / (a + c) = 350 / (350 + 8) = 0,978, \quad (4)$$

– діагностична специфічність (specificity (SPC) або true negative rate), частка осіб з негативним результатом діагностування серед осіб з справжнім негативним значенням ознаки

$$SPC = d / (d + b) = 214 / (214 + 11) = 0,951, \quad (5)$$

– діагностична ефективність, середнє між TPR та SPC

$$E = (TPR + SPC) / 2 = (0,978 + 0,951) / 2 = 0,964, \quad (6)$$

– позитивне прогнозне значення тесту (precision or positive predictive value (*PPV*)) – ймовірність наявності позитивного значення ознаки при позитивному результаті діагностування

$$PPV = a / (a + b) = 350 / (350 + 11) = 0,97, \quad (7)$$

– негативне прогнозне значення тесту (negative predictive value (*NPV*)) – ймовірність наявності негативного значення ознаки при негативному результаті діагностування

$$NPV = d / (\tilde{n} + d) = 214 / (8 + 214) = 0,964. \quad (8)$$

– загальна статистична валідність (validity або accuracy (*ACC*))

$$ACC = (a + d) / (a + b + c + d) = (350 + 214) / 583 = 0,967. \quad (9)$$

– індекс F1 (F1 score)

$$F1 = 2a / (2a + b + c) = 2 \cdot 350 / (2 \cdot 350 + 11 + 8) = 0,973. \quad (10)$$

Ймовірність помилки першого роду, показник гіпердіагностики ( $\alpha$  errors, type I error probability, fall-out or false positive rate (FPR)):

$$\alpha = b / (b + d) = 11 / (11 + 214) = 0,049. \quad (11)$$

Ймовірність помилки другого роду, показник гіподіагностики ( $\beta$  errors, type II errors probability, false negative rate (FNR)):

$$\beta = c / (a + c) = 8 / (350 + 8) = 0,022. \quad (12)$$

Достовірність (adequacy):

$$D = 1 - \alpha - \beta = 1 - 0,049 - 0,022 = 0,929. \quad (13)$$

Відношення правдоподібності позитивного результату (likelihood ratio positive):

$$LR_+ = TPR / (1 - SPC) = 20. \quad (14)$$

Відношення правдоподібності негативного результату (likelihood ratio negative):

$$LR_- = (1 - TPR) / SPC = 0,023. \quad (15)$$

Відношення шансів для діагностичного тесту (diagnostic odds ratio (DOR))

$$DOR = LR_+ / LR_- = 20 / 0,023 = 851,14. \quad (16)$$

### Висновки

У роботі розроблено та проаналізовано роботу експертної системи підтримки прийняття діагностичного рішення при дослідженні поверхневих пошкоджень біотканин за допомогою цифрової колориметрії з використанням нейромережі для обробки результатів. Перевірено можливості застосування архітектури нейромережі на основі багат шарового перцептрона з одним прихованим шаром, багат шарового перцептрона з двома прихованими шарами, імовірнісної нейромережі та мережі з радіальною базисною функцією. Після навчання нейромереж протягом 500 ітерацій на основі тестових послідовностей досліджено результати продуктивності та помилок їх роботи. Найменшу кількість помилок 0,288% забезпечила імовірнісна нейромережа. Проаналізовано операційні параметри діагностичного тесту, що дозволяють оцінити точність діагностики поверхневих пошкоджень біотканин на основі вдосконаленого методу цифрової колориметрії. Отримано показники діагностичної чутливості

0,978, діагностичної специфічності 0,951, загальної статистичної валідності 0,967, що достатні для використання розробленого засобу діагностики для потреб судово-медичної експертизи.

#### Список використаних джерел

1. Нейронные сети. STATISTACA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / Под редакцией В.П. Боровикова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2008. – 392 с.
2. Loong T-W. Understanding sensitivity and specificity with the right side of the brain / T-W. Loong // British Medical Journal. – 2003. – V.327. – P. 716-719.
3. Altman D.G. Statistics Notes: Diagnostic tests 1: sensitivity and specificity / D. G. Altman, J. M. Bland // British Medical Journal. – 1994. – V.308. – P. 1552.
4. ISO 3534-1:2006 Statistics - Vocabulary and symbols - Part 1: General statistical terms and terms used in probability. Committee ISO/TC 69/SC 1, Edition: 1, Publication date: 2010-10-25. – 105 p.
5. Реброва О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применения пакета прикладных программ STATISTICA. – М.: МедиаСфера, 2002. – 312 с.
6. Альтман Д. Г. Пересмотренный вариант единых стандартов представления результатов рандомизированных контролируемых испытаний (CONSORT): разъяснения и перспективы дальнейшего усовершенствования / [Альтман Д. Г., Шульц К.Ф., Мохер Д. и др.] // Международный журнал мед. практики. – 2001. – №4. – С.5-34.
7. Мінцер О.П. Інформаційні технології в охороні здоров'я і практичній медицині: У 10 кн. Кн. 5. Оброблення клінічних і експериментальних даних у медицині: Навч. посіб. / О.П. Мінцер, Ю.В. Вороненко, В.В. Власов. – К.: Вища школа, 2003. – 350 с.
8. Спосіб визначення і реєстрації кольору та розмірів ушкоджень в судово-медичних дослідженнях / [В. Г. Петрук, О. І. Моканюк; О. Є. Кватернюк та ін.]// Патент України №70759 МПК7 G01N 21/21 / заявл. 05.12.2011; опубл. 25.06.2012; Бюл. № 12. – 6 с.

#### Відомості про авторів

**Петрук Василь Григорович** – д.т.н., професор, директор Інституту екологічної безпеки та моніторингу довкілля, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця;

**Кватернюк Олена Євгенівна** – здобувач кафедри екології і екологічної безпеки, Вінницький національний технічний університет;

**Моканюк Олександр Іванович** – к.м.н., доцент кафедри патологічної анатомії, судової медицини та права, Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова, Вінниця;

**Кватернюк Сергій Михайлович** – к.т.н., с.н.с. кафедри екології і екологічної безпеки; вінницький національний технічний університет.