

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**ФОТОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ТА НЕІНВАЗИВНІ  
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ  
ТКАНИННОЇ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2026

**УДК 004.891.3:615.47**

**Ф 81**

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 15 від 25.06.2026 р.)

Автори:

**В. С. Павлов, Н. І. Заболотна, С. Є. Тужанський, Ж. Ж. Ажибекова**

Рецензенти:

**Аврунін О. Г.** – завідувач кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки МОН України, доктор технічних наук, професор

**Романюк О. Н.** – завідувач кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету МОН України, Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор

**Тітова Н. В.** – завідувачка кафедри біомедичної інженерії Національного університету «Одеська Політехніка» МОН України, доктор технічних наук, професор

**Фотометричні методи та неінвазивні оптико-електронні технології оцінювання тканинної мікроциркуляції / В. С. Павлов, Н. І. Заболотна, С. Є. Тужанський, Ж. Ж. Ажибекова.** Вінниця : ВНТУ, 2026. 223 с.

ISBN 978-966-641-989-0

Монографію присвячено розв'язанню науково-прикладної проблеми, яка полягає у необхідності вдосконалення фотометричних методів взаємодії оптичного випромінювання з неоднорідними середовищами та розроблення неінвазивних оптико-електронних приладів експрес-діагностування показників тканинної мікроциркуляції, зокрема, при політравмах різного ступеню важкості.

Розрахована на науковців, аспірантів, студентів спеціальностей: автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка; біомедична інженерія; електроніка; інтелектуальні інформаційні системи.

**УДК 004.891.3:615.47**

**ISBN 978-966-641-989-0 (Друк.)**

**ISBN 978-617-8927-03-5 (PDF)**

© В. С. Павлов, Н. І. Заболотна, С. Є. Тужанський, Ж. Ж. Ажибекова, 2026

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                                                          |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ .....                                                                                                                                                                       | 6         |
| ПЕРЕДМОВА (PREFACE).....                                                                                                                                                                                 | 7         |
| ВСТУП .....                                                                                                                                                                                              | 15        |
| <b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ<br/>ПРИЛАДІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТКАНИННОЇ<br/>МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ ТА СИСТЕМНОЇ ГЕМОДИНАМІКИ .....</b>                                                           | <b>21</b> |
| 1.1 Методи дослідження периферійного кровообігу в<br>тканинах (біомікроскопічний, метод мікроплетизмографії,<br>плетизмографічний, реографічний) .....                                                   | 21        |
| 1.2 Аналіз фотометричних методів та особливості їх<br>використання для досліджень тканинної мікроциркуляції .....                                                                                        | 24        |
| 1.3 Аналіз та особливості використання оптичних сенсорів<br>для оцінювання тканинної мікроциркуляції .....                                                                                               | 29        |
| 1.4 Аналіз та особливості роботи оптичних контрольно-<br>вимірювальних приладів для реєстрації<br>фотоплетизмографічних сигналів .....                                                                   | 31        |
| 1.5 Напрямки застосування фотометричних методів та<br>оптико-електронних приладів для оцінювання тканинної<br>мікроциркуляції .....                                                                      | 33        |
| 1.6 Висновки до першого розділу.....                                                                                                                                                                     | 40        |
| Контрольні питання .....                                                                                                                                                                                 | 41        |
| Тестові завдання .....                                                                                                                                                                                   | 43        |
| <b>РОЗДІЛ 2 ФОТОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ТА ІМІТАЦІЙНЕ<br/>МОДЕЛЮВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ<br/>ТРАНСФОРМАЦІЇ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В<br/>БІОТКАНИНИ ТА МЕТОДИ ОБРОБЛЕННЯ БІОМЕДИЧНОЇ<br/>ІНФОРМАЦІЇ .....</b> | <b>51</b> |
| 2.1 Фотометричні методи дослідження оптичних<br>властивостей біотканин .....                                                                                                                             | 51        |
| 2.2 Моделювання вплив зменшення когерентності джерела<br>лазерного випромінювання на демпфування спекл-структури ...                                                                                     | 57        |
| 2.3 Імітаційне моделювання процесів перетворення<br>поляризованого оптичного випромінювання у біологічній<br>тканині .....                                                                               | 65        |
| 2.4 Представлення фотоплетизмографічного сигналу<br>тривимірною моделлю поверхні .....                                                                                                                   | 75        |
| 2.5 Розробка експертної нечіткої моделі підтримки прийняття<br>рішення для система оцінювання важкості діабетичного<br>кетозидозу .....                                                                  | 79        |

|                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.6 Висновки до другого розділу .....                                                                                                                               | 88  |
| Контрольні питання.....                                                                                                                                             | 90  |
| Тестові завдання.....                                                                                                                                               | 92  |
| <br>РОЗДІЛ 3 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗРОБЛЕННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ОЦІНЮВАННЯ ТКАНИННОЇ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ ПАЦІЄНТІВ З ПОЛІТРАВМАМИ РІЗНОГО СТУПЕНЯ ВАЖКОСТІ ..... | 100 |
| 3.1 Розробка лазерного волоконно-оптичного приладу для оцінювання тканинної мікроциркуляції .....                                                                   | 101 |
| 3.2 Розробка фотонного волоконно-оптичного приладу для оцінювання тканинної мікроциркуляції та фізіотерапевтичного впливу .....                                     | 106 |
| 3.3 Рекомендації щодо проектування апаратної та програмної реалізації мобільного оптико-електронного приладу для вимірювання гемодинамічних показників .....        | 112 |
| 3.4 Оцінювання метрологічних характеристик оптико-електронного приладу для оцінювання тканинної мікроциркуляції .....                                               | 119 |
| 3.5 Експериментальні дослідження та статистичний аналіз результатів вимірювань .....                                                                                | 127 |
| 3.6 Висновки до третього розділу .....                                                                                                                              | 132 |
| Контрольні питання .....                                                                                                                                            | 133 |
| Тестові завдання .....                                                                                                                                              | 135 |
| <br>РОЗДІЛ 4 ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ПОРУШЕНЬ ТКАНИННОЇ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ В МЕДИЧНІЙ ПРАКТИЦІ .....                                   | 144 |
| 4.1 Оцінювання змін тканинної мікроциркуляції при фотонному впливі для комплексного лікування хронічних ускладнень цукрового діабету .....                          | 144 |
| 4.2 Методика оцінювання виявлення порушення кровообігу біологічної тканини .....                                                                                    | 149 |
| 4.3 Застосування лазерної фотоплетізмографії в комплексному оцінюванні колатерального кровообігу нижніх кінцівок при політравмах різного ступеню важкості .....     | 158 |
| 4.4 Висновки до четвертого розділу .....                                                                                                                            | 165 |
| Контрольні питання .....                                                                                                                                            | 166 |
| Тестові завдання .....                                                                                                                                              | 168 |
| <br>ВИСНОВКИ .....                                                                                                                                                  | 176 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                                                                                                                    | 179 |

|                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ДОДАТКИ .....                                                                                                                                                      | 206 |
| Додаток А Варіанти реалізації оптико-електронних приладів для оцінювання тканинної мікроциркуляції для застосуванні при політравмах різного ступеню важкості ..... | 207 |
| Додаток Б Мультиспектральний лазерний та фотонний блок з оптоволоконним виходом .....                                                                              | 208 |
| Додаток С Приклад введення масиву інформації при експериментальних досліджень при аналізі трансформації лазерного випромінювання через біотканину .....            | 209 |
| Додаток Д Результати експериментальних досліджень при аналізі трансформації лазерного випромінювання через біотканину .....                                        | 211 |
| Додаток Е Лістинг програмного забезпечення для експертної нечіткої системи оцінювання важкості діабетичного кетоацидозу .....                                      | 217 |

**СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ**

|                                    |                                                 |
|------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Nd <sup>3+</sup> :YVO <sub>4</sub> | неперервний неодимовий лазер з діодною накачкою |
| He-Ne                              | гелій-неоновий лазер                            |
| BiBO <sub>6</sub> (BIBO)           | кристал борату барію                            |
| ІЧ                                 | інфрачервоне випромінювання                     |
| ФД                                 | фотодіод                                        |
| ОП                                 | операційний підсилювач                          |
| CCD                                | камера для реєстрації                           |
| n <sub>o</sub>                     | показник заломлення                             |
| РК                                 | рідинний кристал                                |
| 5CB                                | рідинний кристал 4-ціано-4'пентобіфеніл         |
| LC cell                            | комірка з рідинним кристалом                    |
| ДФ                                 | доплерівська флоуметрія                         |
| ЛФД                                | лазерна флуоресцентна діагностика               |
| ОТО                                | оптична тканинна оксиметрія                     |
| НМС                                | неінвазивна медична спектрофотометрія           |
| БТ                                 | біотканина                                      |
| ПМ                                 | показник мікроциркуляції                        |
| ВСР                                | варіабельність серцевого ритму                  |
| ФПГ                                | фотоплетізограма                                |
| ЕКГ                                | електрокардіограма                              |

## ПЕРЕДМОВА

Монографію присвячено розв'язанню науково-прикладної проблеми, яка полягає у необхідності вдосконалення фотометричних методів взаємодії оптичного випромінювання з неоднорідними середовищами та розроблення неінвазивних оптико-електронних приладів експрес-діагностування показників тканинної мікроциркуляції, зокрема, при політравмах різного ступеню важкості.

На основі теоретичних досліджень реалізовано оптико-електронний прилад оцінювання тканинної мікроциркуляції з політравмами різного ступеня, що є визначальним у біомедичній діагностиці. Запропоновано мультиспектральні лазерні та фотонні оптико-електронні прилади та системи, які дають можливість визначати порушення мікроциркуляції у різних ділянках, зокрема, щелепно-лицьовій ділянці, кінцівках, передній черевній стінці, зокрема, при політравмах у військовослужбовців.

В роботі отримано такі наукові та практичні результати:

У науковому плані:

- Розроблено імітаційну модель поширення оптичного випромінювання в багатошарових біологічних тканинах, програмне забезпечення імітаційної моделі, що дозволило визначити, що найбільше значення коефіцієнта пропускання  $T$  на межі розділу повітря та рогового шару відповідає куту падіння  $45^0$ . Доведено, що при збільшенні значення кута падіння кількість відбитих фотонів з рогового шару зменшується, не досягаючи внутрішньої структури шкіри;
- Запропоновано 3D модель поверхні для інформативного представлення фотоплетизмографічного сигналу, в якій запропоновано оцінювання динамічних кривих, як визначення основних показників фотоплетизмограм для задач оцінювання тканинної мікроциркуляції периферійного кровообігу, що дозволило покращити візуальне виявлення ступеню порушень мікроциркуляції судин.
- Отримала подальшого розвитку двовимірна зв'язнісна модель для формування шаблонів фотоплетизмографічного сигналу шляхом аналізу внутрішньозрізових та міжзрізових функцій, які застосовуються для оцінювання стану тканинної мікроциркуляції при політравмах різного ступеню важкості.

- Розроблено фізико-математичну модель випадкового переносу фотонів у плоскопаралельному зразку шкіри на основі методу Монте-Карло з урахуванням стану поляризації лазерного зонduючого світла, для можливості прогнозування інтенсивності зворотно розсіяного випромінювання та ступеня поляризації світлових хвиль лазерного випромінювання на виході зразка в залежності від його товщини
- Розроблена інформаційна експертна модель для оцінювання важкості діабетичного кетоацидозу.

У практичному плані:

В практичному плані запропоновані нові технічні рішення реалізації мультиспектральної оптико-електронної системи обробки біомедичної інформації для аналізу тканинної мікроциркуляції, структури автоматизованої системи з підвищеним рівнем діагностики і алгоритм її функціонування.

Результати досліджень дозволили суттєво розширити функціональні можливості систем і технологій, що дозволить додатково: дослідити статистичні методи аналізу й обробки інформативних ознак при оцінці гемодинамічних показників периферичного кровообігу, що дозволить підвищити інформативність при обробці фотоплетизмографічних сигналів; удосконалити архітектуру мультиспектральної системи для аналізу мікроциркуляції з підвищеною точністю, вірогідністю і функціональними можливостями системи при експрес-діагностуванні серцево-судинної системи, зокрема визначення порушення тканинної мікроциркуляції при політравмах у військовослужбовців.

Запропоновано мультиспектральну лазерну систему, що дозволить, завдяки застосуванню 4-х оптичних методів (каскад: оптичного тканинного оксиметра, доплерівського флуорометру, оптоволоконного пірометричного термометру, аналізатора контрасту спекл зображення біологічної поверхні), отримати достовірні результати діагностики стану мікроциркуляторного русла.

Запропоновані мультиспектральні фотонні технології нормалізації мікроциркуляції крові у сукупності з новими оптико-електронними методами оцінювання периферичного кровообігу на відміну від відомих забезпечують: підвищену достовірність результатів діагностики і терапії за рахунок інтелектуального аналізу гемодинамічних мікроциркуляторних показників; більш високий рівень інформативності показників, індексів і критеріїв при обробленні фотоплетизмограми; встановлення нових закономірностей взаємодії низькоінтенсивного лазерного та фотонного

випромінювання різних ділянок оптичного діапазону спектру з організмом людини; підвищений рівень експлуатаційно-технічних характеристик розробленої оптико-електронної системи шляхом зменшення похибок інформаційно-вимірального каналу при застосуванні оптичних сенсорів.

Високий рівень інтелектуальної інформаційної підтримки технологій: практично виключає суб'єктивний вплив людського фактора при проведенні досліджень; обробленні результатів, що дає можливість широкої інтеграції розроблених мультиспектральних технологій до єдиного медичного інформаційного простору.

Результати монографії використано в межах спеціальності G22 «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».

**Ключові слова:** біологічні тканини, лазерна поляриметрия, мікроциркуляція біотканин, система, когерентне випромінювання, розсіювання світла, спекл-поле, деполяризація, статистичний, кореляційний і фрактальний аналіз поляризаційних зображень, інтелектуалізація, підтримка прийняття рішень.

### **Над створенням монографії працювали:**

**Вступ** – Павлов В. С., Заболотна Н. І.

**Розділ 1.** Аналіз методів та оптико-електронних приладів для оцінювання тканинної мікроциркуляції та системної гемодинаміки – Павлов В. С., Тужанський С. Є.

**Розділ 2.** Фотометричні методи та імітаційне моделювання дослідження процесів трансформації оптичного випромінювання в біотканині та методи оброблення біомедичної інформації – Павлов В. С., Заболотна Н. І.

**Розділ 3.** Рекомендації щодо розроблення оптико-електронних приладів оцінювання тканинної мікроциркуляції пацієнтів з політравмами різного ступеня важкості – Павлов В. С., Заболотна Н. І.

**Розділ 4.** Застосування оптико-електронних приладів для оцінювання порушень тканинної мікроциркуляції в медичній практиці – Павлов В. С., Тужанський С. Є., Жанар Ажибекова

## ПОДЯКИ

Авторський колектив висловлює щирі подяки рецензентам цієї монографії завідувачу кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки МОН України, доктору технічних наук, професору **Олегу АВРУНІНУ**, завідувачу кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету МОН України, Заслуженому діячу науки і техніки України, доктору технічних наук, професору **Олександру РОМАНЮКУ**, завідувачі кафедри біомедичної інженерії Національного університету «Одеська Політехніка» МОН України, доктору технічних наук, професору **Наталії ТІТОВІЙ** за цінні зауваження та пропозиції, які були враховані під час підготовки видання.

Автори вдячні за мудрі поради та можливість проведення наукових досліджень на сучасному оптичному обладнанні директору ПП «Фотоніка Плюс», м. Черкаси, к.т.н. **Володимиру ХОЛІНУ**, за фахові рекомендації та технічну допомогу, к.ф.-м.н, старшим науковим співробітникам відділу когерентної і квантової оптики Інституту фізики НАН України **Наталії КАЧАЛОВІЙ** та **Валерію ВОЙЦЕХОВИЧУ**, а також колективу редакційно-видавничого відділу ВНТУ за допомогу у роботі над виданням.

## PREFACE

The monograph is devoted to addressing a scientific and applied problem related to the need to improve photometric methods for studying the interaction of optical radiation with heterogeneous media and to develop non-invasive optoelectronic devices for the rapid diagnosis of tissue microcirculation parameters, particularly in patients with polytrauma of varying severity.

Based on the theoretical studies, an optoelectronic device for assessing tissue microcirculation in patients with polytrauma of varying severity has been implemented, which is of particular importance in biomedical diagnostics. Multispectral laser and photonic optoelectronic devices and systems have been proposed, enabling the detection and assessment of microcirculatory disorders in various anatomical regions, including the maxillofacial region, extremities, and anterior abdominal wall, particularly in military personnel with polytrauma.

The following scientific and practical results have been obtained.

### SCIENTIFIC RESULTS

- A simulation model of optical radiation propagation in multilayer biological tissues and the corresponding simulation software have been developed. The results demonstrated that the maximum value of the transmittance coefficient  $T$  at the air–stratum corneum interface corresponds to an angle of incidence of  $45^\circ$ . It was established that, as the angle of incidence increases, the number of photons reflected from the stratum corneum decreases, with fewer photons reaching the internal structures of the skin.
- A 3D surface model has been proposed for the informative representation of the photoplethysmographic signal. The model provides for the evaluation of dynamic curves and determination of the principal photoplethysmographic parameters for assessing tissue microcirculation and peripheral blood circulation, thereby improving the visual identification of the severity of vascular microcirculatory disorders.
- A two-dimensional connectivity model for generating photoplethysmographic signal templates has been further developed through the analysis of intra-slice and inter-slice functions used to assess tissue microcirculation in patients with polytrauma of varying severity.
- A physical and mathematical model of stochastic photon transport in a plane-parallel skin sample has been developed based on the Monte Carlo method, taking into account the polarization state of the laser probing light. The model enables prediction of the intensity of backscattered radiation and the

degree of polarization of laser light waves at the sample output depending on the sample thickness.

- An information-based expert model for assessing the severity of diabetic ketoacidosis has been developed.

## **PRACTICAL RESULTS**

New technical solutions have been proposed for implementing a multispectral optoelectronic biomedical information processing system for tissue microcirculation analysis, including the architecture of an automated system with enhanced diagnostic capabilities and an algorithm for its operation.

The research results have significantly expanded the functionality of the proposed systems and technologies. In particular, they provide opportunities to further investigate statistical methods for the analysis and processing of informative features in the assessment of hemodynamic parameters of peripheral circulation, thereby increasing the informativeness of photoplethysmographic signal processing. They also enable improvement of the architecture of a multispectral system for microcirculation analysis, providing increased accuracy, reliability, and functionality for rapid cardiovascular diagnostics, particularly for detecting tissue microcirculation disorders in military personnel with polytrauma.

A multispectral laser system has been proposed that, through the combined application of four optical methods—a cascade comprising an optical tissue oximeter, a Doppler flowmeter, a fiber-optic pyrometric thermometer, and a biological-surface speckle-contrast imaging analyzer—makes it possible to obtain reliable diagnostic results concerning the state of the microcirculatory bed.

The proposed multispectral photonic technologies for blood microcirculation normalization, combined with novel optoelectronic methods for assessing peripheral circulation, provide several advantages over existing approaches: improved reliability of diagnostic and therapeutic results through intelligent analysis of hemodynamic microcirculatory parameters; a higher level of informativeness of parameters, indices, and criteria in photoplethysmogram processing; identification of new patterns in the interaction of low-intensity laser and photonic radiation from different regions of the optical spectrum with the human body; and improved operational and technical characteristics of the developed optoelectronic system by reducing errors in the information and measurement channel through the application of optical sensors.

The high level of intelligent information support provided by the proposed technologies virtually eliminates the subjective influence of the human factor

during research and data processing, thus enabling broad integration of the developed multispectral technologies into a unified medical information environment.

The results presented in the monograph have been incorporated into the educational process within Specialty G22 “Biomedical Engineering” in teaching such courses as Nanotechnology in Biology and Medicine, Biomedical Devices, Apparatus and Systems. Diagnostic Equipment, and Modern Information Technologies in Chemical Engineering and Bioengineering.

**Keywords:** biological tissues, laser polarimetry, biological tissue microcirculation, system, coherent radiation, light scattering, speckle field, depolarization, statistical, correlation and fractal analysis of polarization images, intelligent technologies, decision support.

## CONTRIBUTORS TO THE MONOGRAPH

**Introduction** – *V. S. Pavlov, N. I. Zabolotna*

**Chapter 1.** Analysis of Methods and Optoelectronic Devices for Assessing Tissue Microcirculation and Systemic Hemodynamics – *V. S. Pavlov, S. Ye. Tuzhanskyi*

**Chapter 2.** Photometric Methods and Simulation Modeling of Optical Radiation Transformation Processes in Biological Tissue and Methods for Biomedical Information Processing – *V. S. Pavlov, N. I. Zabolotna*

**Chapter 3.** Recommendations for the Development of Optoelectronic Devices for Assessing Tissue Microcirculation in Patients with Polytrauma of Varying Severity – *V. S. Pavlov, N. I. Zabolotna*

**Chapter 4.** Application of Optoelectronic Devices for Assessing Tissue Microcirculation Disorders in Medical Practice – *V. S. Pavlov, S. Ye. Tuzhanskyi, Zhanar Azhibekova*

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their sincere gratitude to the reviewers of this monograph: **Oleh AVRUNIN**, Head of the Department of Biomedical Engineering at Kharkiv National University of Radio Electronics under the Ministry of Education and Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Oleksandr ROMANIUK**, Head of the Department of Software

Engineering at Vinnytsia National Technical University under the Ministry of Education and Science of Ukraine, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor; and **Nataliia TITOVA**, Head of the Department of Biomedical Engineering at Odesa Polytechnic National University under the Ministry of Education and Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, for their valuable comments and suggestions, which were taken into consideration during the preparation of this publication.

*The authors are grateful to **Volodymyr KHOLIN**, Director of the Private Enterprise “Photonics Plus,” Cherkasy, Candidate of Technical Sciences, for his valuable advice and for providing the opportunity to conduct scientific research using modern optical equipment. The authors also express their gratitude to **Nataliia KACHALOVA** and **Valerii VOITSEKHOVYCH**, Candidates of Physical and Mathematical Sciences and Senior Researchers at the Department of Coherent and Quantum Optics of the Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, for their professional recommendations and technical assistance, as well as to the staff of the Editorial and Publishing Department of Vinnytsia National Technical University for their assistance in preparing this publication.*

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** В даний час існує значний інтерес до розробки специфічних, чутливих, недорогих і портативних оптико-електронних приладів, спеціально адаптованих для оптичного зондування. Останні розробки нових чутливих та селективних матеріалів відіграють важливу роль у вимірюванні оптичних показників, зокрема тканинної мікроциркуляції. Крім того, волоконно-оптична технологія широко застосовується в багатьох процесах оптичних вимірювань через її важливі переваги, такі як завадостійкість і можливість її використання для дистанційних і багатопозиційних вимірювань.

Оцінка стану тканинної мікроциркуляції є однією з ключових проблем при реалізації біомедичних технологій для сучасної медичної діагностики. Багато захворювань, таких як, артеріальна гіпертензія, атеросклероз ендотоксемія, діабетична нефропатія, сепсис, цукровий діабет, венозна недостатність, Covid-19 та інші, пов'язані з порушеннями тканинної мікроциркуляції. В даний час численні провідні компанії займаються розробкою та виробництвом діагностичного медичного обладнання, серед яких найбільш відомі: Philips, Cas Medical System (США), MEDIC (Medizinische Messtechnik GmbH), Micromed (Україна), Radiometer (Данія), Фотоніка Плюс (Україна), Criticare (США), Ютас (Україна) та інші. У дослідженнях рівня тканинної мікроциркуляції активно використовуються різні методи, зокрема фотоплетізмографія, пульсоксиметрія, неінвазивна медична спектрофотометрія (НМС), лазерна доплерівська флоуметрія, оптична тканинна оксиметрія, (ЛДФ) та лазерна флуоресцентна діагностика. Найбільш популярними стали ЛДФ та оптичні методи діагностики.

Найбільше поширення отримали ЛДФ та оптична тканинна оксиметрія (ОТО). З точки зору фізики, оптичні методи лікування та діагностики характеризуються завадостійкістю до електромагнітних завад оптичного сигналу і потенційною можливістю забезпечення паралельної передачі інформації. Водночас ці методи дозволяють досить точно визначати якісні та кількісні показники та стан біологічних об'єктів. Метод ЛДФ дає змогу оцінювати перфузію тканин при кровопостачанні (показник рівня мікроциркуляції (ПРМ)) на основі оцінювання мікроциркуляторного русла біотканини, а також частотні ритми процесів мікрогемодинаміки. Метод ОТО базується на спектрофотометричному аналізі показників гемоглобіну *in vivo* і дозволяє оцінювати метаболічні процеси та показник сатурації крові у мікросудинах. Проте, кожен з цих методів НМС не є

самодостатнім для моніторингу повного спектру показників тканинної мікроциркуляції. Деякі з них мають суттєві обмеження, зокрема недостатню точність.

Деякі з наведених методів мають суттєві обмеження, такі як недостатня просторово-часова роздільна здатність, обмежена інформація при глибинному скануванні біотканин, а також певна інвазивність вимірювань тощо. Методи та відповідні прилади НМС (за винятком пульсоксиметрів) відносять до індикаторних, оскільки вони дозволяють оцінювати відносні рівні реєстрованих біомедичних показників і загальні тенденції в динаміці вимірювань без жорсткої прив'язки до їх абсолютних значень. Достовірність та загальна інформативність діагностичних обстежень, що проводяться з використанням НМС, значною мірою залежать від правильного вибору методик вимірювань та підходів до інтерпретації та аналізу і результатів обстежень пацієнтів.

Таким чином, при проведенні диференціальної діагностики (визначення «норма-патологія»), важливу роль у інтерпретації отриманих результатів відіграють вибрані діапазони обстеження та ретельний підбір статистичних даних норми для конкретних анатомічних та топографічних точок. Оскільки методи НМС є відносно новим діагностичним підходом, що реалізується за допомогою нових технологій, сьогодні не існує статистичних даних, що повно оцінюють значення різних показників для різних локалізацій оптичних сенсорів на тілі пацієнта в нормі, а також при різних патологіях. Оптимальним рішенням є створення та подальше використання в клінічній практиці мультиспектральної лазерної волоконно-оптичної системи (оптичний тканинний оксиметр, аналізатор контрасту спекл-зображення біологічної поверхні), оптоволоконний пірометричний термометр, доплерівський флуорометр, що дозволить здійснювати моніторинг максимально широкого спектра показників функціонування мікроциркуляції тканин за найкоротший час.

У зв'язку з необхідністю точної оцінювання основних показником тканинної мікроциркуляції кровотоку в нормі і при патології, різними дослідниками було запропоновано велику кількість непрямих методів, серед них такі, наприклад, як полярографічний, термографічний, радіоізотопний і ряд інших методів. До основних оптичних методів відносяться наступні методи: біомікроскопічний, мікрокінематографічний, метод фотоелектричної мікроплетизмографії і фотоплетизмографічний [1, 2, 3, 8].

У зв'язку із сказаним удосконалення фотометричних методів та розробка оптико-електронних приладів комплексного дослідження

спектральних характеристик біологічних тканин і якісно нових методів виміру основних показників гемодинаміки цих біотканин, а також створення на їх основі вимірювальних приладів, що поєднують в собі достатню точність і достовірність вимірів, що проводяться, є актуальним завданням і має практичну цінність.

Саме виходячи з актуальності тематики мета нашого дослідження полягає в дослідженні і розробки принципів побудови оптико-електронних систем і приладів для оцінювання тканинної мікроциркуляції у біологічних тканин, дослідженні засобів спряження фотоплетизмографічного устаткування з комп'ютером для подальшої математичного оброблення сигналу з метою підвищення ефективності діагностування і подальшого лікування захворювань серцево-судинної системи.

**Мета і задачі роботи.** Метою роботи є підвищення точності, інформативності оцінювання тканинної мікроциркуляції шляхом вдосконалення фотометричних методів взаємодії оптичного випромінювання з неоднорідними середовищами та розроблення неінвазивних оптико-електронних приладів експрес-діагностування показників периферійного кровообігу, зокрема, при політравмах різного ступеню важкості.

У даній роботі було поставлено такі задачі:

- зробити короткий аналіз фотометричних методів та неінвазивних оптико-електронних систем та приладів для визначення тканинної мікроциркуляції;
- Довести необхідність застосування неінвазивних оптико-електронних приладів для визначення тканинної мікроциркуляції людини для оперативного контролю порушень кровообігу;
- Удосконалити фотометричні методи та фізичні моделі аналізу взаємодії оптичного випромінювання з біотканиною при оцінювання тканинної мікроциркуляції;
- Розробити інформаційну експертну модель для оцінювання важкості діабетичного кетоацидозу;
- Розробити вимоги до технічного забезпечення, методик фізіологічних досліджень для вивчення закономірностей розповсюдження низькоінтенсивного монохроматичного електромагнітного випромінювання різних ділянок оптичного діапазону спектра на мікроциркуляцію крові в зоні опромінення та у віддалених ділянках організму людини;

- розробити архітектуру оптико-електронного приладу для діагностування стану тканинної мікроциркуляції на основі неінвазивного методу вимірювання для оцінювання фізіологічного стану мікроциркуляції в області опромінення низькоінтенсивним випромінювання, зокрема, при політравмах різного ступеню важкості.
- Провести фізіологічні вимірювання в лабораторних умовах вивчення механізмів взаємодії низькоінтенсивного лазерного та фотонного електромагнітного випромінювання і розробити методику оптичного принципу оцінювання перфузії крові та провести метрологічне оцінювання отриманих результатів.

**Об'єкт дослідження** – процес дослідження фотометричних методів та дослідження оптичних характеристик біооб'єктів шляхом аналізу тканинної мікроциркуляції за допомогою неінвазивних оптико-електронних приладів

**Предмет дослідження** – фотометричні методи, оптичні характеристики біооб'єкту, неінвазивні оптико-електронні прилади для дослідження стану судин тканинної мікроциркуляції, зокрема, при політравмах різного ступеню важкості.

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

#### **Наукова новизна отриманих результатів**

- *Вперше* розроблено імітаційну модель поширення оптичного випромінювання в багатошарових біологічних тканинах, що дозволило встановити максимальне значення коефіцієнта пропускання на межі розділу повітря та рогового шару, яке відповідає куту падіння  $45^0$ . У міру збільшення кута падіння кількість відбитих фотонів з рогового шару зменшується, не досягаючи внутрішньої структури шкіри.
- *Вперше* запропоновано тривимірну модель поверхні для інформативного представлення фотоплетизмографічного сигналу, в якій здійснюється оцінювання динамічних кривих як визначення основних показників фотоплетизмограм для задач аналізу стану тканинної мікроциркуляції, що дозволило покращити інформативність візуального виявлення ступеню порушень

мікроциркуляції судин.

- *Вперше* розроблена інформаційна експертна модель для вирішення задач медичної діагностики на базі нечіткої логіки при класифікації ступеня важкості діабетичного кетоацидозу, що підвищило точність оцінювання та інформативність з подальшою можливістю використовувати її як інструментальний засіб для проектування об'єктно-орієнтованих систем, необхідних для інтелектуальної підтримки ухвалення діагностичних рішень в різних областях медицини, включаючи клінічну практику і підготовку лікарів-діагностів.
- *Отримало подальший розвиток* фізико-математична модель випадкового переносу фотонів у плоскопаралельному зразку шкіри на основі методу Монте-Карло, яка відрізняється тим, що враховується стан поляризації лазерного зонduючого світла, що дозволило здійснити прогнозування зміни інтенсивності зворотно розсіяного випромінювання та ступеня поляризації світлових хвиль лазерного випромінювання на виході зразка в залежності від його товщини.
- *Отримало подальший розвиток* двовимірна зв'язнісна модель для формування шаблонів фотоплетизмографічного сигналу, яка відрізняється тим, що враховуються зв'язки внутрішньозрізових та міжзрізових функцій, що дало можливість її використання для точного оцінювання стану тканинної мікроциркуляції при політравмах різного ступеню важкості.

**Практична цінність роботи** полягає в тому, що результати досліджень суттєво розширяють функціональні можливості систем і технологій, що дозволить додатково: дослідити статистичні методи аналізу й обробки інформативних ознак при оцінюванні тканинної мікроциркуляції периферичного кровотоку, що підвищує інформативність при обробці фотоплетизмографічних сигналів; удосконалити архітектуру оптико-електронної системи для аналізу системної гемодинаміки з підвищеною точністю, вірогідністю і функціональними можливостями системи при експрес-діагностуванні серцево-судинної системи, зокрема визначення порушення тканинної мікроциркуляції при політравмах у військовослужбовців.

Запропоновано мультиспектральну лазерну систему, яка завдяки застосуванню 4-х оптичних методів (каскад: оптичного тканинного

оксиметра, доплерівського флуорометру, оптоволоконного пірометричного термометру, аналізатора контрасту спекл зображення біологічної поверхні), дозволило отримати достовірні результати діагностики стану мікроциркуляторного русла.

Запропоновані мультиспектральні фотонні технології нормалізації мікроциркуляції крові у сукупності з новими оптико-електронними методами оцінювання периферичного кровообігу на відміну від відомих забезпечують: підвищену достовірність результатів діагностики і терапії за рахунок інтелектуального аналізу гемодинамічних мікроциркуляторних показників; більш високий рівень інформативності показників, індексів і критеріїв при обробленні фотоплетизмограми; встановлення нових закономірностей взаємодії низькоінтенсивного лазерного та фотонного випромінювання різних ділянок оптичного діапазону спектру з організмом людини; підвищений рівень експлуатаційно-технічних характеристик розробленої оптико-електронної системи шляхом зменшення похибок інформаційно-вимірювального каналу при застосуванні оптичних сенсорів.

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 периферичного кровообігу та мікроциркуляторного русла.

Результати досліджень дозволили суттєво розширити функціональні можливості систем і технологій, що дозволить додатково: дослідити статистичні методи аналізу й обробки інформативних ознак при оцінці гемодинамічних показників периферичного кровотоку, що дозволить підвищити інформативність при обробці фотоплетизмографічних сигналів; удосконалити архітектуру мультиспектральної системи для аналізу мікроциркуляції з підвищеною точністю, вірогідністю і функціональними можливостями системи при експрес-діагностуванні серцево-судинної системи, зокрема визначення порушення тканинної мікроциркуляції при політравмах у військовослужбовців.

*Наукове видання*

**Володимир Сергійович Павлов  
Наталія Іванівна Заболотна  
Станіслав Євгенович Тужанський  
Жанар Жубандиківна Ажибекова**

**ФОТОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ТА НЕІНВАЗИВНІ  
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ  
ОЦІНЮВАННЯ ТКАНИННОЇ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ**

**Монографія**

Видається в авторській редакції

Рукопис оформили: *Володимир ПАВЛОВ, Наталія ЗАБОЛОТНА*

Оригінал виготовлено в *Редакційно-видавничому відділі ВНТУ*

Підписано до видання 21.08.2026 р.  
Формат 29,7×42<sup>1</sup>/<sub>4</sub>. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Ум. друк. арк. 12,88. Обл. вид. арк. 13,12.  
Наклад 27 пр. Зам. № 2026-024.

Видавець та виготовлювач  
Вінницький національний технічний університет,  
Редакційно-видавничий відділ.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.  
[press.vntu.edu.ua](mailto:press.vntu.edu.ua);  
Email: [rvv.vntu@gmail.com](mailto:rvv.vntu@gmail.com)  
Свідectво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.