

Володимир ПАВЛОВ, доктор філософії

e-mail: machinehead6926@gmail.com

Доктор філософії, старший науковий співробітник кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем Вінницького національного технічного університету. Результатом науково-педагогічної діяльності Володимира Павлова є понад 100 публікацій, серед яких: монографія за кордоном, три у видавництві «Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book» (Лондон, Велика Британія), 15 патентів України, 20 статей у фахових виданнях, зокрема 17 статей у виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science. Лауреат Державної Премії Верховної Ради України для молодих вчених, двічі Стипендіат Кабінету Міністрів України. (Індекс Гірша у Scopus – 5).

ORCID ID: 0000-0002-0717-7082



Наталія ЗАБОЛОТНА, доктор технічних наук

e-mail: nataliazabolotna@gmail.com

Доктор технічних наук, професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем. Результатом науково-педагогічної діяльності Заболотної Н.І. є понад 300 публікацій, 37 статей у Scopus/WoS, 7 монографій у співавторстві, дві з яких опубліковані CRC Press, Taylor & Francis Group (Лондон), 50 статей у фахових виданнях України, 17 патентів на винаходи та корисні моделі України, участь у міжнародній європейській програмі «Електротехніка» – Міжнародна студія докторської програми (Люблінська політехніка) Програма № POWR.03.02.00 – IP. 08-00-DOK/17, 2018-2024 рік, участь у міжнародній експертизі дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, науковий керівник аспірантів. (індекс Гірша у Scopus – 11).

ORCID ID: 0009-0006-2209-8573



Станіслав ТУЖАНСЬКИЙ, кандидат технічних наук

e-mail: slavat@vntu.edu.ua

Кандидат технічних наук, доцент професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем Вінницького національного технічного університету. Результатом науково-педагогічної діяльності Тужанського С.С. є понад 100 наукових і навчально-методичних публікацій, у т.ч. 3 монографії у співавторстві, 50 статей у фахових виданнях України, 13 статей у виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 7 патентів України. (індекс Гірша у Scopus – 4).

ORCID ID: 0000-0002-0185-7490



Жанар АЖИБЕКОВА, доктор філософії

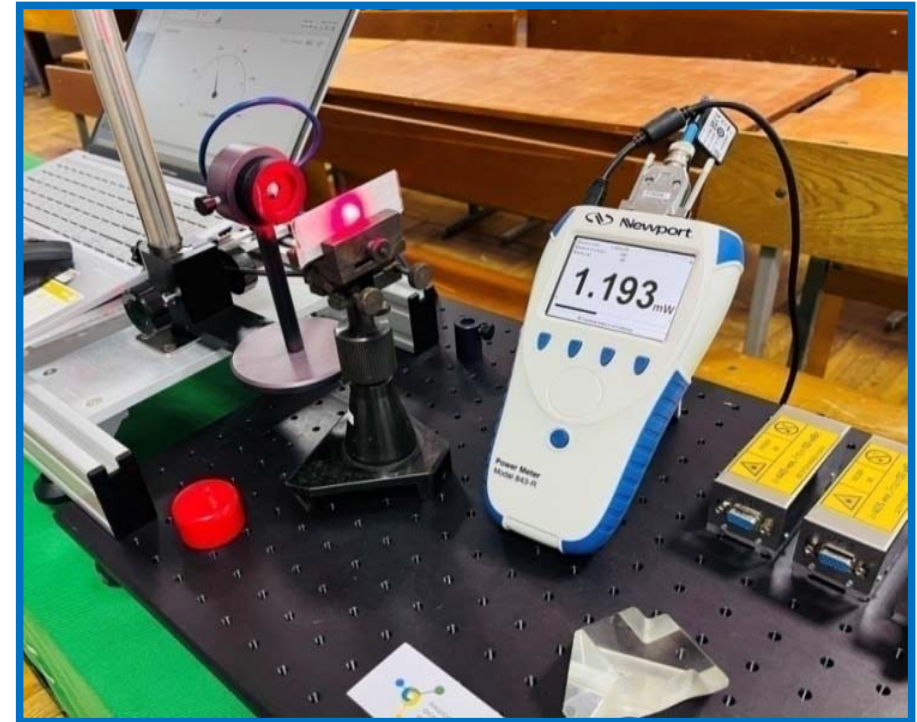
e-mail: azhibekova.z@kaznmu.kz



Ph.D., асоційований професор, Завідувач кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Казахського національного медичного університету імені С.Д. Асфендіярова, Алмати, Республіка Казахстан.

В результаті проведених досліджень Ажибекова Ж.Ж. опублікувала 3 навчальні посібники, 70 наукових статей та 7 електронних підручників. З 2012 року Ажибекова Ж.Ж. завідувала модулем «Інформатика», 2016-2020 рр. завідувала курсом «Інформатика та біофізика», з 2020 р. працює завідувачем кафедри інформаційно-комунікаційних технологій. (Індекс Гірша у Scopus – 5).

ORCID ID: 0000-0002-4396-1261



ФОТОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ТА НЕІНВАЗИВНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ ТКАНИННОЇ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ

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 видання 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 : монографія [Електронний ресурс] / В. С. Павлов, Н. І. Заболотна, С. Є. Тужанський, Ж. Ж. Ажибекова. Електрон. текст. дані. Вінниця : ВНТУ, 2026. PDF, 223 с.

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

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

DOI: <https://doi.org/10.31649/617.8927.03.5>

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

ISBN 978-966-641-989-0 (Друк.)

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

ЗМІСТ

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

2.5 Розробка експертної нечіткої моделі підтримки прийняття рішення для система оцінювання важкості діабетичного кетоацидозу	79
2.6 Висновки до другого розділу	88
Контрольні питання.....	90
Тестові завдання.....	92

РОЗДІЛ 3 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗРОБЛЕННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ОЦІНЮВАННЯ ТКАНИННОЇ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ ПАЦІЄНТІВ З ПОЛІТРАВМАМИ РІЗНОГО СТУПЕНЯ ВАЖКОСТІ

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

РОЗДІЛ 4 ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ПОРУШЕНЬ ТКАНИННОЇ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ В МЕДИЧНІЙ ПРАКТИЦІ

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

ВИСНОВКИ	176
СПИСОК ВИКОРИСТАННИХ 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 кетозидозу	217

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

Nd ³⁺ :YVO ₄	неперервний неодимовий лазер з діодною накачкою
He-Ne	гелій-неоновий лазер
BiBO ₆ (BIBO)	кристал борату барію
ІЧ	інфрачервоне випромінювання
ФД	фотодіод
ОП	операційний підсилювач
CCD	камера для реєстрації
n _o	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-вимірювального 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 щирю подяку 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° . 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТКАНИННОЇ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ ТА СИСТЕМНОЇ ГЕМОДИНАМІКИ

1.1 Методи дослідження периферійного кровообігу в тканинах (біомікроскопічний, метод мікроплетизмографії, плетизмографічний, реографічний)

У зв'язку з необхідністю точної оцінювання основних параметром 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 такі методи: біомікроскопічний, мікрокінематографічний, фотоелектричної мікроплетизмографії і фотоплетизмографічний [1].

Біомікроскопічний метод. Основа методу біомікроскопії базується в тому, що за допомогою світлового мікроскопа визначається об'ємне наповнення капілярів і проникність судинної стінки. Рідше, для вирішення спеціальних завдань, застосовуються ультрафіолетова, люмінесцентна, фазово-контрастна, інтерференційна і поляризаційна мікроскопія.

Існуючі нині методи біомікроскопії для вказаних вище цілей підрозділяються на чотири групи. У першу групу методів входять усі дослідження, виконані за принципом підсвічування досліджуваного об'єкту, тобто у світлі, що проходить. До них відносяться численні роботи по дослідженню мікросудин, виконані на тваринах.

Друга група методів включає дослідження мікроциркуляції, виконані у відбитому світлі. Сюди відносяться роботи на таких об'єктах, як мікросудини шкіри, слизових оболонок порожнини рота і носа, внутрішніх порожнин тіла і органів. Третя група методів базується на застосуванні спеціальних прозорих камер, які імплантують тваринам і людині для вивчення мікроциркуляції в хронічних дослідах [1, 2].

Четверта група методів передбачає використання різного типу світловодів, які використовуються як для підведення оптичного випромінювання до важкодоступних ділянок досліджуваних тканин і органів БО, так і для спостереження за ними. За допомогою цієї методики були вивчені особливості мікроциркуляції живої селезінки, мозку, печінки, бруньки, шкіри, брижі, сечового міхура, нервів, пульпи зуба, слизових

ВИСНОВКИ

В монографії розвинуто методологію розвитку фотометричних методів досліджень біологічних тканин та тканинної мікроциркуляції при діагностуванні порушень кровообігу при політравмах різного ступеню важкості, що дозволить підвищити точність діагностування порівняно з традиційними методами діагностування (ультразвуковими реоплетизмографічними, та інш.), а також розширяє функціональні можливості біомедичної інженерії в напрямку експрес-діагностування та оцінювання 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.

Отримано такі наукові та практичні результати:

У науковому плані:

- Розроблено імітаційну модель поширення оптичного випромінювання в багат шарових 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 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.

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-вимірювального 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.

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

Результати використано в межах спеціальностей 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».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Born M. and Wolf E., Principles of Optics. Cambridge: Cambridge University Press (1999)
2. Nye J. F., Natural Focusing and Fine Structure of Light: Caustics and Wave Dislocations (1999)
3. Vasnetsov M., Soskin M., and Pasko V., Topological configurations of cross-coupled polarization singularities in a space-variant vector field, *Optics Communications* 63, 181-187 (2016)
4. Goodman, J., Some fundamental properties of speckle, *J. Opt. Soc. Am.* 66, 1145–1150 (1976)
5. Schmitt J. M., Xiang S. H. and Yung K. M., Speckle in Optical Coherence Tomography, *Journal of Biomedical Optics* 4, 95–105 (1999)
6. Goodman J. W., Speckle Phenomena in Optics: *Theory and Applications*, 1st ed. (Roberts & Company), 125–149 (2006).
7. Dayan Li, Damien P. Kelly, and John T. Sheridan, *Speckle suppression by doubly scattering systems*, *Applied Optics* 52, 8617-8626 (2013)
8. Jermana L. Moraes, Matheus X. Rocha, Glauber G. Vasconcelos, José E. Vasconcelos Filho, Victor Hugo C. de Albuquerque and Auzuir R. Alexandria. Advances in Photoplethysmography Signal Analysis for Biomedical Applications, *Sensors* 2018, 18, 1894; 26 p. doi:10.3390/s18061894
9. Mendis, S. Global Status Report on Noncommunicable Diseases 2014; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2014; p. 298. *Sensors* 2018, 18, 1894 20 of 26.
10. De Alexandria, A.R.; Cortez, P.C.; Bessa, J.A.; da Silva Félix, J.H.; de Abreu, J.S.; de Albuquerque, V.H.C. Psnares: A new radial active contour model and its application in the segmentation of the left ventricle from echocardiographic images. *Comput. Methods Progr. Biomed.* 2014, 116, 260–273.
11. Corrêa, L.A.F. Sistema não Invasivo de Monitorização da Pressão Arterial e da Onda de Pulso Utilizando a Fotoplethysmografia. Ph.D. Thesis, Programa de Pós Graduação em Engenharia Biomédica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
12. Kilsztajn, S.; Rossbach, A.; Câmara, M.; Carmo, M. Health services, expenses and aging of the Brazilian population. *Rev. Bras. Study Popul.* 2003, 20, 93–108.
13. Fan, F.; Yan, Y.; Tang, Y.; Zhang, H. A motion-tolerant approach for monitoring SpO₂ and heart rate using photoplethysmography signal with dual

- frame length processing and multi-classifier fusion. *Comput. Biol. Med.* 2017, 91, 291–305.
14. Birrenkott, D.; Pimentel, M.A.; Watkinson, P.J.; Clifton, D.A. A robust fusion model for estimating respiratory rate from photoplethysmography and electrocardiography. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2017.
 15. Akay, M. *Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering*; Wiley-Interscience: Hoboken, NJ, USA, 2006; p. 4152.
 16. Papini, G.; Fonseca, P.; Aubert, X.; Overeem, S.; Bergmans, J.; Vullings, R. Photoplethysmography beat detection and pulse morphology quality assessment for signal reliability estimation. In *Proceedings of the 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Seogwipo, Korea, 11–15 July 2017; pp. 117–120.
 17. Da S.; Luz, E.J.; Nunes, T.M.; de Albuquerque, V.H.C.; Papa, J.P.; Menotti, D. ECG arrhythmia classification based on optimum-path forest. *Expert Syst. Appl.* 2013, 40, 3561–3573.
 18. De Albuquerque, V.H.C.; Nunes, T.M.; Pereira, D.R.; Luz, E.J.D.S.; Menotti, D.; Papa, J.P.; Tavares, J.M.R.S. Robust automated cardiac arrhythmia detection in ECG beat signals. *Neural Comput. Appl.* 2018, 29, 679–693.
 19. Zhao, D.; Sun, Y.; Wan, S.; Wang, F. SFST: A robust framework for heart rate monitoring from photoplethysmography signals during physical activities. *Biomed. Signal Process. Control* 2017, 33, 316–324.
 20. Pradhan, N.; Rajan, S.; Adler, A.; Redpath, C. Classification of the quality of wristband-based photoplethysmography signals. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Rochester, MN, USA, 7–10 May 2017; pp. 269–274.
 21. Hussein, A.F.; Kumar, A.; Burbano-Fernandez, M.; Ramirez-Gonzalez, G.; Abdulhay, E.; de Albuquerque, V.H.C. An Automated Remote Cloud-Based Heart Rate Variability Monitoring System. *IEEE Access* 2018.
 22. Hassan, M.; Malik, A.; Fofi, D.; Saad, N.; Karasfi, B.; Ali, Y.; Meriaudeau, F. Heart rate estimation using facial video: A review. *Biomed. Signal Process. Control* 2017, 38, 346–360.
 23. Charlton, P.; Birrenkott, D.A.; Bonnici, T.; Pimentel, M.A.F.; Johnson, A.E.W.; Alastruey, J.; Tarassenko, L.; Watkinson, P.J.; Beale, R.; Clifton, D.A. Breathing Rate Estimation from the Electrocardiogram and Photoplethysmogram: A Review. *IEEE Rev. Biomed. Eng.* 2018.
 24. Alian, A.A.; Shelley, K.H. Photoplethysmography. *Best Pract. Res. Clin. Anaesthesiol.* 2014, 28, 395–406.

25. Sun, Y.; Thakor, N. Photoplethysmography Revisited: From Contact to Noncontact, From Point to Imaging. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2016, 63, 463–477.
26. Pfeifer, G.; Garfinkel, S.N.; Praag, C.D.G.V.; Sahota, K.; Betka, S.; Critchley, H.D. Feedback from the heart: Emotional learning and memory is controlled by cardiac cycle, interoceptive accuracy and personality. *Biol. Psychol.* 2017, 126, 19–29.
27. Rodrigues, K.A.S.; Pereira, M.H.R.; Pádua, F.L.C. Detecção em tempo real da frequência cardíaca de pessoas por meio da análise de variações temporais em vídeos. *E-xacta* 2016, 9, 49–62.
28. Choi, S.; Min, K.; Kim, N.N.; Munarriz, R.; Goldstein, I.; Traish, A.M. Laser Oximetry: A Novel Noninvasive Method to Determine Changes in Penile Hemodynamics in an Anesthetized Rabbit Model. *J. Androl.* 2002, 23, 278–283.
29. Schwarz, L. Proposta de um Sistema Telemétrico Para Aquisição de Sinais Fisiológicos. Ph.D. Thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 2007. *Sensors* 2018, 18, 1894 21 of 26.
30. Peter, L.; Vorek, I.; Massot, B.; Bryjova, I.; Urbanczyk, T. Determination of Blood Vessels Expandability; Multichannel Photoplethysmography. *IFAC–PapersOnLine* 2016, 49, 284–288.
31. Madhavan, G. Plethysmography. *Biomed. Instrum. Technol.* 2005, 39, 367–371.
32. Allen, J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiol. Meas.* 2007, 28, R1–R39.
33. Fan, Q.; Li, K. Non-contact remote estimation of cardiovascular parameters. *Biomed. Signal Process. Control* 2018, 40, 192–203.
34. Bhattacharya, J.; Kanjilal, P.; Muralidhar, V. Analysis and characterization of photo-plethysmographic signal. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2001, 48, 5–11.
35. Meredith, D.; Clifton, D.; Charlton, P.; Brooks, J.; Pugh, C.; Tarassenko, L. Photoplethysmographic derivation of respiratory rate: A review of relevant physiology. *J. Med. Eng. Technol.* 2012, 36, 1–7.
36. Moyle, J.T.B. *Pulse Oximetry*, 2nd ed.; BMJ: London, UK, 2002.
37. Hejmel, L.; Gál, I. Heart rate variability analysis. *Acta Physiologica Hungarica* 2001, 88, 219–230.
38. Hemon, M.C.; Phillips, J.P. Comparison of foot finding methods for deriving instantaneous pulse rates from photoplethysmographic signals. *J. Clin. Monit. Comput.* 2016, 30, 157–168.

39. Phillips, J.P.; Kyriacou, P.A. Comparison of methods for determining pulse arrival time from Doppler and photoplethysmography signals. In Proceedings of the 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Chicago, IL, USA, 26–30 August 2014; pp. 3809–3812.
40. Millasseau, S.C.; Stewart, A.D.; Patel, S.J.; Redwood, S.R.; Chowienczyk, P.J. Evaluation of Carotid-Femoral Pulse Wave Velocity. *Hypertension* 2005, 45, 222–226.
41. Vardoulis, O.; Papaioannou, T.G.; Stergiopoulos, N. Validation of a novel and existing algorithms for the estimation of pulse transit time: Advancing the accuracy in pulse wave velocity measurement. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2013, 304, H1558–H1567.
42. Gesche, H.; Grosskurth, D.; K  chler, G.; Patzak, A. Continuous blood pressure measurement by using the pulse transit time: Comparison to a cuff-based method. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2012, 112, 309–315.
43. Hennig, A.; Patzak, A. Continuous blood pressure measurement using pulse transit time. *Somnol. Schlaforschung Schlafmed.* 2013, 17, 104–110.
44. Zheng, Y.L.; Yan, B.P.; Zhang, Y.T.; Poon, C.C.Y. An Armband Wearable Device for Overnight and Cuff-Less Blood Pressure Measurement. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2014, 61, 2179–2186.
45. Choi, Y.; Zhang, Q.; Ko, S. Noninvasive cuffless blood pressure estimation using pulse transit time and Hilbert–Huang transform. *Comput. Electr. Eng.* 2013, 39, 103–111.
46. Yang, C.; Tavassolian, N. Pulse transit time measurement using seismocardiogram, photoplethysmogram, and acoustic recordings: Evaluation and comparison. *IEEE J. Biomed. Health Inf.* 2017, 22, 733–740.
47. Mukkamala, R.; Hahn, J.O. Toward Ubiquitous Blood Pressure Monitoring via Pulse Transit Time: Predictions on Maximum Calibration Period and Acceptable Error Limits. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2018, 65, 1410–1420.
48. Davies, J.I.; Struthers, A.D. Pulse wave analysis and pulse wave velocity: A critical review of their strengths and weaknesses. *J. Hypertens.* 2003, 21, 463–472.
49. Nabeel, P.M.; Jayaraj, J.; Mohanasankar, S. Single-source PPG-based local pulse wave velocity measurement: a potential cuffless blood pressure estimation technique. *Physiol. Meas.* 2017, 12, 2122–2140.
50. Borik, S.; Cap, I. Measurement and Analysis Possibilities of Pulse Wave Signals. *Adv. Electr. Electron. Eng.* 2013, 11.

51. Chobanian, A.V.; Bakris, G.L.; Black, H.R.; Cushman, W.C.; Green, L.A.; Izzo, J.L., Jr.; Jones, D.W.; Materson, B.J.; Oparil, S.; Wright, J.T., Jr.; et al. The seventh report of the joint national committee on prevention, detection, evaluation, and treatment of high blood pressure: The JNC 7 report. *JAMA* 2003, 289, 2560–2571.
52. Alvim, R.D.O.; Santos, P.C.J.L.; Bortolotto, L.A.; Mill, J.A.G.; Pereira, A.D.C. Arterial Stiffness: Pathophysiological and Genetic Aspects. *Int. J. Cardiovasc. Sci.* 2017, 30, 433–441.
53. Pereira, T.; Maldonado, J.; Pereira, L.; Conde, J. Aortic stiffness is an independent predictor of stroke in hypertensive patients. *Arq. Bras. Cardiol.* 2013, 100, 437–443.
54. McCombie, D.B.; Reisner, A.T.; Asada, H.H. Adaptive blood pressure estimation from wearable PPG sensors using peripheral artery pulse wave velocity measurements and multi-channel blind identification of local arterial dynamics. In *Proceedings of the 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, New York, NY, USA, 30 August–3 September 2006; pp. 3521–3524.
55. Gil, E.; Orini, M.; Bailón, R.; Vergara, J.M.; Mainardi, L.; Laguna, P. Photoplethysmography pulse rate variability as a surrogate measurement of heart rate variability during non-stationary conditions. *Physiol. Meas.* 2010, 31, 1271.
56. Ma, H.T.; Zhang, Y. Spectral analysis of pulse transit time variability and its coherence with other cardiovascular variabilities. In *Proceedings of the 28th 2006 EMBS'06 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, New York, NY, USA, 30 August–3 September 2006; pp. 6442–6445.
57. Boulnois, J.L. Photophysical processes in recent medical laser developments: A review. *Lasers Med. Sci.* 1986, 1, 47–66.
57. Martins, R.M.S. Fotopletismografia para Monitorização Cardíaca para aplicação no Pulso. Master's Thesis, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2010; 114p.
59. Gubbi, S.; Amrutur, B. Adaptive Pulse Width Control and Sampling for Low Power Pulse Oximetry. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* 2015, 9, 272–283.
58. Lee, H.; Chung, H.; Ko, H.; Lee, J. Wearable Multichannel Photoplethysmography Framework for Heart Rate Monitoring During Intensive Exercise. *IEEE Sens. J.* 2018, 18, 2983–2993.
59. Haahr, R.; Duun, S.; Toft, M.; Belhage, B.; Larsen, J.; Birkelund, K.; Thomsen, E. An Electronic Patch for Wearable Health Monitoring by

- Reflectance Pulse Oximetry. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* 2012, 6, 45–53.
60. Wang, C.Z.; Zheng, Y.P. Home-Telecare of the elderly living alone using an new designed ear-wearable sensor. In *Proceedings of the 2008 5th International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors*, Hong Kong, China, 1–3 June 2008; pp. 71–74.
 61. Rhee, S.; Yang, B.H.; Asada, H. Artifact-resistant power-efficient design of finger-ring plethysmographic sensors. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2001, 48, 795–805.
 62. Rosero, G.; Fernando, O. Sistema móvel de Monitoramento E Treinamento Para Ciclista com Smartphone Android. Master's Thesis, Engenharia de Sistemas Eletrônicos e de Automação, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2012.
 63. Allen, J.; Murray, A. Similarity in bilateral photoplethysmographic peripheral pulse wave characteristics at the ears, thumbs and toes. *Physiol. Meas.* 2000, 21, 369.
 64. Shelley, K.H.; Tamai, D.; Jablonka, D.; Gesquiere, M.; Stout, R.G.; Silverman, D.G. The Effect of Venous Pulsation on the Forehead Pulse Oximeter Wave Form as a Possible Source of Error in SpO₂ Calculation. *Anesth. Analg.* 2005, 100, 743–747.
 65. Mendelson, Y.; Duckworth, R.; Comtois, G. A Wearable Reflectance Pulse Oximeter for Remote Physiological Monitoring. In *Proceedings of the 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, New York, NY, USA, 30 August–3 September 2006; pp. 912–915.
 66. Shin, K.; Kim, Y.; Bae, S.; Park, K.; Kim, S. A Novel Headset with a Transmissive PPG Sensor for Heart Rate Measurement. In *Proceedings of the 13th International Conference on Biomedical Engineering*, Singapore, 3–6 December 2008; Lim, C.T., Goh, J.C., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009; pp. 519–522.
 67. Paul, B.; Manuel, M.; Alex, Z. Design and development of non invasive glucose measurement system. In *Proceedings of the 2012 1st International Symposium on Physics and Technology of Sensors (ISPTS-1)*, Pune, India, 7–10 March 2012; pp. 43–46.
 68. Karlen, W.; Raman, S.; Ansermino, J.; Dumont, G. Multiparameter Respiratory Rate Estimation from the Photoplethysmogram. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2013, 60, 1946–1953.
 69. Araújo, F.O. Infraestrutura De Hardware E Software Para Monitoramento De Batimentos Cardíacos Em Bovinos De Corte; Trabalho de Conclusão de

- Curso em Engenharia Elétrica; Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, FAENG, Campo Grande: Vila Olinda, Brasil, 2014.
70. Vanderlei, L.C.M.; Pastre, C.M.; Hoshi, R.A.; Carvalho, T.D.D.; Godoy, M.F.D. Basic notions of heart rate variability and its clinical applicability. *Braz. J. Cardiovasc. Surg.* 2009, 24, 205–217.
 71. Javorka, M.; Zila, I.; Balhãrek, T.; Javorka, K. Heart rate recovery after exercise: Relations to heart rate variability and complexity. *Braz. J. Med. Biol. Res.* 2002, 35, 991–1000.
 72. Nunan, D.; Sandercock, G.R.; Brodie, D.A. A Quantitative Systematic Review of Normal Values for Short-Term Heart Rate Variability in Healthy Adults. *Pacing Clin. Electrophysiol.* 2010, 33, 1407–1417.
 73. Task, F. Force of the European Society of Cardiology, Heart rate variability, standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation* 1996, 93, 1043–1065.
 74. Pumpila, J.; Howorka, K.; Groves, D.; Chester, M.; Nolan, J. Functional assessment of heart rate variability: Physiological basis and practical applications. *Int. J. Cardiol.* 2002, 84, 1–14. [CrossRef]
 75. Hirfanoglu, T.; Serdaroglu, A.; Cetin, I.; Kurt, G.; Capraz, I.Y.; Ekici, F.; Arhan, E.; Bilir, E. Effects of vagus nerve stimulation on heart rate variability in children with epilepsy. *Epilepsy Behav.* 2018, 81, 33–40.
 76. Khaled, A.; Owis, M.; Mohamed, S.A.A. Employing Time-Domain Methods and Poincaré Plot of Heart Rate Variability Signals to Detect Congestive Heart Failure. *BIME J.* 2006, 6, 35–41.
 77. De Carvalho, T.D.; Pastre, C.M.; Rossi, R.C.; de Abreu, L.; Valenti, V.; Vanderlei, L.M. Índices geométricos de variabilidade da frequência cardíaca na doença pulmonar obstrutiva crônica. *Rev. Port. Pneumol.* 2011, 17, 260–265.
 78. Smith, A.L.; Reynolds, K.J.; Owen, H. Correlated Poincaré indices for measuring heart rate variability. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.* 2007, 30, 336.
 79. Lam, J.C.; Yan, C.S.; Lai, A.Y.; Tam, S.; Fong, D.Y.; Lam, B.; Ip, M.S. Determinants of Daytime Blood Pressure in Relation to Obstructive Sleep Apnea in Men. *Lung* 2009, 187, 291–298.
 80. Tulppo, M.P.; Mäkikallio, T.H.; Seppänen, T.; Laukkanen, R.T.; Huikuri, H.V. Vagal modulation of heart rate during exercise: Effects of age and physical fitness. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 1998, 274, H424–H429.
 81. Sarén-Koivuniemi, T.J.; Yli-Hankala, A.M.; van Gils, M.J. Increased variation of the response index of nociception during noxious stimulation in

- patients during general anaesthesia. *Comput. Methods Progr. Biomed.* 2011, 104, 154–160.
82. Gamelin, F.X.; Berthoin, S.; Bosquet, L. Validity of the polar S810 heart rate monitor to measure RR intervals at rest. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2006, 38, 887–893.
 83. Shields Robert, W. Heart rate variability with deep breathing as a clinical test of cardiovagal function. *Cleve. Clin. J. Med.* 2009, 76, S37–40.
 84. Akselrod, S.; Gordon, D.; Ubel, F.; Shannon, D.; Berger, A.; Cohen, R. Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: A quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. *Science* 1981, 213, 220–222.
 85. Elgendi, M.; Fletcher, R.R.; Norton, I.; Brearley, M.; Abbott, D.; Lovell, N.H.; Schuurmans, D. Frequency analysis of photoplethysmogram and its derivatives. *Comput. Methods Progr. Biomed.* 2015, 122, 503–512.
 86. Elgendi, M. Standard Terminologies for Photoplethysmogram Signals. *Curr. Cardiol. Rev.* 2012, 8, 215–219.
 87. Higgins, J.P. Nonlinear systems in medicine. *Yale J. Biol. Med.* 2002, 75, 247.
 88. Niskanen, J.P.; Tarvainen, M.P.; Ranta-aho, P.O.; Karjalainen, P.A. Software for advanced HRV analysis. *Comput. Methods Progr. Biomed.* 2004, 76, 73–81.
 89. Puri, C.; Ukil, A.; Bandyopadhyay, S.; Singh, R.; Pal, A.; Mandana, K. iCarMa: Inexpensive Cardiac Arrhythmia Management—An IoT Healthcare Analytics Solution. In *Proceedings of the First IoT of Health '16 Workshop on IoT-enabled Healthcare and Wellness Technologies and Systems*, Singapore, 25–30 June 2016; ACM: New York, NY, USA, 2016; pp. 3–8.
 90. Karegar, F.P.; Fallah, A.; Rashidi, S. ECG based human authentication with using Generalized Hurst Exponent. In *Proceedings of the 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Tehran, Iran, 2–4 May 2017; pp. 34–38.
 91. Pham, T.D.; Oyama-Higa, M. Photoplethysmography technology and its feature visualization for cognitive stimulation assessment. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Seville, Spain, 17–19 March 2015; pp. 1735–1740.
 92. Horio, K.; Li, Y. Visualization and Analysis of Mental States Based on Photoplethysmogram. In *Proceedings of the 2009 Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC)*, Kaohsiung, Taiwan, 7–9 December 2009; pp. 1401–1404.

93. Lee, J.; Jung, W.; Kang, I.; Kim, Y.; Lee, G. Design of filter to reject motion artifact of pulse oximetry. *Comput. Stand. Interfaces* 2004, 26, 241–249.
94. Lee, H.W.; Lee, J.W.; Jung, W.G.; Lee, G.K. The periodic moving average filter for removing motion artifacts from PPG signals. *Int. J. Control Autom. Syst.* 2007, 5, 701–706.
95. Ruiz, L.M.; Manzo, A.; Casimiro, E.; Cárdenas, E.; González, R. Heart rate variability using photoplethysmography with green wavelength. In *Proceedings of the 2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 5–7 Noember 2014; pp. 1–5.
96. Manonelles Rincón, L. Development of an Acquisition Circuit of Multiple Biological Signals for Integration into a Wearable Bracelet. Bachelor's Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2017.
97. Kukkapalli, R. Non-Invasive Wearable Sensors for Respiration Monitoring. Bachelor's Thesis, University of Maryland, Baltimore County, Baltimore, MD, USA, 2016.
98. Asada, H.; Reisner, A.; Shaltis, P.; McCombie, D. Towards the Development of Wearable Blood Pressure Sensors: A Photo-Plethysmograph Approach Using Conducting Polymer Actuators. In *Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, Shanghai, China, 17–18 January 2005; pp. 4156–4159.
99. Baheti, P.K.; Garudadri, H. An Ultra Low Power Pulse Oximeter Sensor Based on Compressed Sensing. In *Proceedings of the 2009 Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, Berkeley, CA, USA, 3–5 June 2009; pp. 144–148.
100. Wang, L.; Lo, B.P.; Yang, G.Z. Multichannel Reflective PPG Earpiece Sensor With Passive Motion Cancellation. *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* 2007, 1, 235–241.
101. Rhee, S.; Liu, S. An ultra-low power, self-organizing wireless network and non-invasive biomedical instrumentation. In *Proceedings of the Second Joint 24th Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society, Engineering in Medicine and Biology*, Houston, TX, USA, 23–26 October 2002; Volume 3, pp. 1803–1804.
102. Guyton, A.; Hall, J. Renal regulation of potassium, calcium, phosphate, and magnesium; integration of renal mechanisms for control of blood volume and extracellular fluid volume. *Guyton Hall Textb. Med. Physiol.* 2006, 10, 371–373.

103. Silva, M.D.C. Monitoramento Remoto Preventivo de Pacientes Com Doenças Cardiovasculares Utilizando Dispositivo Móvel Como Agente Inteligente. Ph.D. Thesis, Programa de Pós-Graduação em Informática, Universidade Federal da Paraíba, UFPB, João Pessoa, Brasil, 2012.
104. Pantoni, C.; Reis, M.; Martins, L.; Catai, A.; Costa, D.; Borghi-Silva, A. Study of heart rate autonomic modulation at rest in elderly patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Braz. J. Phys. Ther.* 2007, 11, 35–41.
105. Pickett, J.; Amoroso, P.; Nield, D.; Jones, D. Pulse oximetry and PPG measurements in plastic surgery. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 1997. In *Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE*, Chicago, IL, USA, 30 October–2 November 1997; Volume 5, pp. 2330–2332.
106. Allen, J.; Oates, C.P.; Lees, T.A.; Murray, A. Photoplethysmography detection of lower limb peripheral arterial occlusive disease: A comparison of pulse timing, amplitude and shape characteristics. *Physiol. Meas.* 2005, 26, 811.
107. Custódio Rubira, M.; Angelis Rubira, A.P.F.D.; Silva Soares, P.P.D.; Gusmão Medeiros, L.; Alves Neves, G.; Consolim-Colombo, F.M. Cardiovascular risk in eutrophic young subjects: Influence of corporal fat and sympathetic activity. *ConSci. Saúde* 2011, 10, 223–230.
108. Amir, O.; Barak-Shinar, D.; Henry, A.; Smart, F.W. Photoplethysmography as a single source for analysis of sleep-disordered breathing in patients with severe cardiovascular disease. *J. Sleep Res.* 2012, 21, 94–100.
109. Melillo, P.; Fusco, R.; Sansone, M.; Bracale, M.; Pecchia, L. Discrimination power of long-term heart rate variability measures for chronic heart failure detection. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2011, 49, 67–74.
110. Carnethon, M.R.; Liao, D.; Evans, G.W.; Cascio, W.E.; Chambless, L.E.; Heiss, G. Correlates of the shift in heart rate variability with an active postural change in a healthy population sample: The Atherosclerosis Risk In Communities study. *Am. Heart J.* 2002, 143, 808–813.
111. Naydenova, E.; Tsanas, A.; Casals-Pascual, C.; Vos, M.D. Smart diagnostic algorithms for automated detection of childhood pneumonia in resource-constrained settings. In *Proceedings of the 2015 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, Seattle, WA, USA, 8–11 October 2015; pp. 377–384.
114. Karlen, W.; Brouse, C.; Cooke, E.; Ansermino, J.; Dumont, G. Respiratory rate estimation using respiratory sinus arrhythmia from photoplethysmography. In *Proceedings of the 2011 Annual International*

- Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Boston, MA, USA, 30 August–3 September 2011; pp. 1201–1204.
112. Furuland, H.; Linde, T.; Englund, A.; Wikström, B. Heart rate variability is decreased in chronic kidney disease but may improve with hemoglobin normalization. *J. Nephrol.* 2008, 21, 45–52.
 113. Sommermeyer, D.; Zou, D.; Ficker, J.H.; Randerath, W.; Fischer, C.; Penzel, T.; Sanner, B.; Hedner, J.; Grote, L. Detection of cardiovascular risk from a photoplethysmographic signal using a matching pursuit algorithm. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2016, 54, 1111–1121.
 114. Paschoal, M.; Gonçalves, N.; Petrelluzzi, K.; Machado, R. Controle automático cardíaco durante a execução de atividade física dinâmica de baixa intensidade. *Rev. Soc. Cardiol. Estado de São Paulo* 2003, 13, S1–S11.
 115. Lin, C.H. Assessment of bilateral photoplethysmography for lower limb peripheral vascular occlusive disease using color relation analysis classifier. *Comput. Methods Progr. Biomed.* 2011, 103, 121–131.
 116. Faurholt-Jepsen, M.; Kessing, L.V.; Munkholm, K. Heart rate variability in bipolar disorder: A systematic review and meta-analysis. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2017, 73, 68–80.
 117. Palma, J.A.; Benarroch, E.E. Neural control of the heart. *Neurology* 2014, 83, 261–271.
 118. Aubert, A.E.; Seps, B.; Beckers, F. Heart rate variability in athletes. *Sports Med.* 2003, 33, 889–919.
 119. Florea, V.G.; Cohn, J.N. The Autonomic Nervous System and Heart Failure. *Circ. Res.* 2014, 114, 1815–1826.
 120. Rajendra, A.U.; Paul, J.K.; Natarajan, K.; Min, L.C.; Suri, J.S. Heart rate variability: A review. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2006, 44, 1031–1051.
 121. Porto, L.G.G.; Junqueira, L.F., Jr. Comparison of Time-Domain Short-Term Heart Interval Variability Analysis Using a Wrist-Worn Heart Rate Monitor and the Conventional Electrocardiogram. *Pacing Clin. Electrophysiol.* 2009, 32, 43–51.
 122. Sánchez, D.M. Diseño De Un Dispositivo Para La Detección Del Estrés A Partir De La Señal De Fotopletismografía. Trabajo Fin de G, Escuela Técnica Superior De Ingeniería Grado En Ingeniería De Las Tecnologías De Telecomunicación, Sevilla, 2014. Available online: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90024/> (accessed on 08 June 2018).
 123. Vilhgas, L.Z. Development of a Prototype for Monitoring Oxygen Saturation and Heart Rate for Rodents. Master's Thesis, Título de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, São Paulo, Brasil, 2007.

124. Kompanets Igor, Zalyapin Nikolay, Methods and Devices of Speckle-Noise Suppression (Review), *Optics and Photonics Journal*, 10, 219-250 (2020)
125. Zhang Z., Tan H. M., Gao L. L., Wang B.S., Miao J. G., Peng J. Y., Intracavity second harmonic generation with Nd:YVO₄/BIBO laser at 542 nm, *Optics Communications* 267, 487-490 (2006)
126. Turri G., Jenssen H. P., Cornacchia F., Tonelli M., Bass M., Temperature-dependent stimulated emission crosssection in Nd³⁺:YVO₄ crystals, *J. Opt. Soc. Am. B* 26, 2084-2088 (2009)
127. Nye J. F., Hajnal J. V., The wave structure of monochromatic electromagnetic radiation, *Proc R Soc Lond A* 409:21–36 (1987).
128. Singha A.K., Manohara R., Shuklaa J.P. and Biradarb A.M., Refractive indices, order parameter and optical transmittance studies of a nematic niquid crystal mixture, *Acta Physica Polonica A* 110, 485-493 (2006)
129. Zabolotna N.I. Principals and methods of Mueller-matrix tomography of multilayer biological tissues / N.I. Zabolotna, I.V. Musiichuk // Proc. SPIE. – 2011. - Vol. 8338. – 833810.
130. Angelo Pierangelo A. Ex-vivo characterization of human colon cancer by Mueller polarimetric imaging / Angelo Pierangelo, Abdelali Benali, Maria-Rosaria Antonelli, [et al.] // Optics Express. – 2011. – Vol. 19. – № 2. – P. 1582-1593.
131. Multispectral Mueller polarimetric imaging detecting residual cancer and cancer regression after neoadjuvant treatment for colorectal carcinomas/ A. Pierangelo, S. Manhas S, A. Benali [et al.] // Journal of Biomedical Optics. – 2013. – Vol.18 (4). – 046014.
132. Zabolotna N.I. Orientational tomography of optical axes directions distributions of multilayer biological tissues birefringent polycrystalline networks / N.I. Zabolotna, R.Y. Dovhaliuk // Proc. SPIE. – 2013. – Vol. 8873. – 887313; doi: 10.1117/12.2048634.
133. Zabolotna N.I. System of polarization phasometry of polycrystalline blood plasma networks in mammary gland pathology diagnostics / N.I. Zabolotna, B.P. Oliinychenko, K.O. Radchenko, A.K. Krasnoshchoka, O.K. Shcherba // Proc. of SPIE. – 2015. – Vol. 9613. – 961311; doi: 10.1117/12.2187383.
134. Заболотна Н.І. Багатопараметричні поляризаційно-фазові методи і засоби відтворення та аналізу структури полікристалічних біологічних шарів при оцінюванні патологічних станів: дис. ... доктора техн. наук: 05.11.17 / Заболотна Наталія Іванівна – Харків, 2018. – 427 с.
135. Тужанський С.Є. Системи лазерної відеополяриметрії для автоматизованого контролю параметрів неоднорідних біотканин :

- монографія / С.Є. Тужанський, Г.Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 156 с.
136. Ушенко В.О. Вектор-параметрична діагностика та диференціація проявів оптичної анізотропії біологічних полікристалічних мереж : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 01.04.05 «Оптика, лазерна фізика» / В.О. Ушенко. – Київ, 2015. – 20 с.
 137. Ротштейн А.П. Медицинская диагностика на нечеткой логике / Ротштейн А.П. - Винница: Контингент, 1996. - 132 с.
 138. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / Ротштейн А.П. – Винница: Универсум – Винница, 1999. – 320 с.
 139. Alalia S. Polarized light imaging in biomedicine: emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment / Sanaz Alalia, Alex Vitkin // Journal of Biomedical Optics. – 2015. – Vol. 20(6). – 061104.
 140. Maria Rosaria Antonelli. Biomedical applications of polarimetric imaging contrast. Initial studies for scattering media and human tissues. Medical Physics [physics.med-ph]. Ecole Polytechnique X, 2011. English. – Режимдоступу: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00652201>.
 141. Ghosh N. Turbid medium polarimetry in biomedical imaging and diagnosis / N. Ghosh, A. Banerjee, J. Soni // Eur. Phys. J.Appl. Phys. – 2011. – Vol.54. – P.30001.
 142. Smith M. H. Mueller matrix imaging polarimetry in dermatology / M.H. Smith // Proc. SPIE. – 2000. - Vol. 3911. – P. 1605–7422.
 143. Shukla P. Mueller decomposition images for cervical tissue: Potential for discriminating normal and dysplastic states / P. Shukla, Pradhan A. // Optics Express. – 2009. – Vol. 17. – №3. – P. 1600–1609.
 144. Polarization birefringence measurements for characterizing the myocardium, including healthy, infarcted, and stem-cell-regenerated tissues / M. F. G. Wood [et al] // J. Biomed. Opt. – 2010.-Vol.15.- 047009.
 145. Polarimetric imaging of uterine cervix: a case study / A. Pierangelo [et al] // Opt. Express. - 2013.- Vol.21(12).- P. 14120–14130.
 146. Mueller matrix imaging of human colon tissue for cancer diagnostics: how Monte Carlo modeling can help in the interpretation of experimental data / M.R. Antonelli, A. Pierangelo, T. Novikova [et al.] // Optics Express. – 2010. – Vol. 18(10). – P. 10200–10208.
 147. Mueller matrix microscope: a quantitative tool to facilitate detections and fibrosis scorings of liver cirrhosis and cancer tissues / Ye Wang, Honghui He,

- Jintao Chang [et al.] // Journal of Biomedical Optics. – 2016. – Vol. 21(7). – 071112.
148. Петрук В.Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ (теорія і практика оптичного вимірювального контролю) / Петрук В.Г. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2000. – 207 с.
 149. Cowin S.C. How is a tissue built? / S.C. Cowin // Journal of Biomedical Engineering. – 2000. – V.122, Issue 6. – P. 553–568.
 150. Laser Polarimetry of Pathological Changes in Biotissues / O.V. Angel'skii, A.G. Ushenko, A.D. Arkhelyuk, [et al.] // Optics and Spectroscopy. – 2000. – № 89(6). – P. 973 - 978.
 151. Ushenko A.G. Polarization-phase mapping and reconstruction of biological tissue architectonics during diagnosis of pathological Lesions / A.G. Ushenko, D.N. Burkovets, Yu. A. Ushenko // Optics and Spectroscopy. – 2002. – № 93 (3). – P. 449–456.
 152. Ушенко В.О. Вектор-параметрична діагностика та диференціація проявів оптичної анізотропії біологічних полікристалічних мереж: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.мат. наук: спец. 01.04.05 «Оптика, лазерна фізика» / В.О. Ушенко. – Київ. – 2015. – 20 с.
 153. Lu S.Y. Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition / S.Y. Lu, R.A. Chipman // Journal of Optical Society of America. – 1996. – Vol.13. – P. 1106–1113.
 154. Polarimetric imaging of uterine cervix: a case study / A. Pierangelo, A. Nazac, P. Validive [et al.] // Optics Express. – 2013. – Vol. 21(12). – P. 14120-14130.
 155. Cloude S.R. Concept of polarization entropy in optical scattering / S.R. Cloude, E. Pottier // Optical Engineering – 1995. – Vol.34. – P. 1599-1610.
 156. Заболотна Н.І. Архітектура і алгоритми функціонування та аналізу даних двовимірних систем лазерної поляриметрії біологічних тканин / Н.І. Заболотна // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – №1(25). – С. 54–65.
 157. Пат. на корисну модель № 102237 Україна, МПК G01N 33/48, G01N 21/00. Спосіб вимірювання орієнтаційних томограм полікристалічних мереж оптико-анізотропних шарів біологічних тканин / Заболотна Н.І.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201503161; заявл. 06.04.2015; опубл. 26.10.2015, Бюл.№20.

158. Пат. на корисну модель №70125 Україна, МПК G01N33/00; A61B5/00. Спосіб вимірювання фазових мап оптико-анізотропних шарів біологічних об'єктів / Заболотна Н.І., Ушенко О.Г., Олійниченко Б.П. ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201113973; заявл. 28.11.2011; опубл.25.05.2012, Бюл.№10.
159. Differential phase analysis of laser images of a polycrystalline component of blood plasma in diagnostics of pathological changes in mammary gland / O.P. Mintser, N.I. Zabolotna; B.P. Oliinychenko, P. Komada // Proc. SPIE. – 2012. – Vol. 8698. – 86980D; doi: 10.1117/12.2019714.
160. Клімов О.С. Адаптивна поляриметрія послідовного зондування однорідних анізотропних об'єктів: дис. ...канд. техн. наук: 01.04.05 / Клімов Олександр Сергійович. – К., 2010. – 186 с.
161. Tuchin V.V. Polarized light interaction with tissues / V.V. Tuchin // Journal of Biomedical Optics. – 2016. – Vol. 21. – №7 – 071114.
162. Лазерна поляриметрична діагностика в біології та медицині / [О.Г. Ушенко, В.П. Пішак, О.В. Ангельський та ін.]; за ред. В.П. Пішака, О.Г. Ушенка. – Чернівці: Медакадемія, 2000. – 305 с.
163. Лазерна поляриметрія біологічних тканин. Діагностика пухлин жіночих репродуктивних органів / [Ушенко О.Г., Пересунько О.П., Сенютович Р.В. та ін.]; під ред. О.Г. Ушенка, О.П. Пересунька, Р.В. Сенютовича. – Чернівці: Чернівецький нац. ун – т, 2010. – 476 с.
164. Шопа Я.І. Вимірювання оптичної активності на відеополяриметрах / Я.І. Шопа, М.І. Бондар // Журнал фізичних досліджень. – 2004. – Т. 8. – №2. – С. 122–126.
165. Савенков С.М. Стокс-поляриметр на рідкокристалічних комірках: аналіз похибок / Савенков С.М., Клімов О.С., Оберемок Є.А. // Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки. – 2009. – №1. – С. 215–220.
166. Тимчик С.В. Класифікація медичних інформаційних систем і технологій за інтегральним сукупним критерієм / С.В. Тимчик, С.М. Злепко, С.В. Костішин // Системи обробки інформації. – 2016. – Випуск 3 (140). – С. 194–198.- Режим доступу <http://kostishyn.vk.vntu.edu.ua/file/articles/3b148ac48fc5ec6631b205375ec21c35.pdf>
167. Продеус А.Н., Захрабова Е.Н., Экспертные системы в медицине / А.Н. Продеус, Е.Н. Захрабова. - К.: ВЕК+, 1998. – 320 с.

168. Вуйцік В., Готра О.З., Григор'єв В.В., Експертні системи: навчальний посібник. – Львів: Ліга-Прес, 2006. – 290 с.
169. Бабак В.П. Обробка сигналів / В.П. Бабак, В.С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К.: Либідь, 1996 -322 с.
170. Bishop, Christopher M. Neural networks for pattern recognition. - Clarendon Press. – 1995, - ISBN 978-0198538493.
171. Волчек Ю. А. Положение модели искусственной нейронной сети в медицинских экспертных системах / Ю.А. Волчек, О.Н. Шишко, О.С. Спиридонова, Т.В. Мохорт Т.В. // Juvenis scientia [Электронный ресурс]. - 2017 - № 9. – Режим доступа до журн. <https://www.jscientia.org/2017-9>
172. Innocent P. Fuzzy Methods For Medical Diagnosis.. / P. Innocent, J. Robert, J. Garibaldi // Applied Artificial Intelligence - 2005. - №19. - 69-98 p. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/220355740_Fuzzy_Methods_For_Medical_Diagnosis.
173. Поворознюк А. І. Застосування нечіткої логіки в комп'ютерних системах медичної діагностики / А. І. Поворознюк, Є. С. Харченко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Інформатика та моделювання. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 125-133. – Режим доступу: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/19950>
174. Дмитриенко В.Д. Применение нейронных сетей при построении медицинских информационных систем / В.Д. Дмитриенко, О.А. Поворознюк // Системный анализ, управление и информационные технологии. Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 99. – С. 134–137.
175. Заболотна Н.І. Інтелектуалізована система поляризаційного картографування плівок плазми крові у діагностиці онкологічного стану молочних залоз / Н. І. Заболотна, Д. Ю. Локотей, Б. П. Олійниченко // Оптико-електронні ін-формаційно-енергетичні технології. – 2016. - №1. – С. 36 – 46.
176. Radchenko K. O. Intellectualized Mueller-Jones matrix system of laser polarimetry for breast fibroadenoma diagnosis / Kostiantyn O. Radchenko // Proc. SPIE. – 2018. - Vol. 10750. - 107500M.
177. Zabolotna N.I. Processing and analysis of images in the multifunctional classification laser polarimetry system of biological objects / N.I. Zabolotna, S.V. Pavlov, V.V. Sholota [et all] // Proc. SPIE . – 2018. - Vol. 10750. - 107500N, P.1-8.

178. Zabolotna N.I. Method and system of Jones-matrix mapping of blood plasma films with “fuzzy” analysis in differentiation of breast pathology changes / N.I. Zabolotna, K.O. Radchenko, O.V. Karas // Proc. SPIE. – 2018. – Vol. 10612, 106121P.
179. Product Requirements & Platform Availability for MATLAB Parallel Server [Електроннийресурс]. – Назвазекрану. – Режимдоступу: <https://www.mathworks.com/support/requirements/matlab-parallel-server.html>
180. Diagnostics of structure and physiological state of birefringent biological tissues: statistical, correlation and topological approaches / Y.A. Ushenko, T.M. Boychuk, V.T.Bachynsky, O.P. Mincer // Handbook of Coherent-Domain Optical Methods. – New York: Springer Science+Business Media, 2013. – P. 107-148.
181. Ушенко О.Г. Лазерна поляриметрія світлорозсіюючих об’єктів і середовищ: дис. ... доктора фіз.-мат. наук: 01.04.05 / Ушенко Олександр Григорович – Чернівці, 2001. – 334 с.
182. Zabolotna N.I. Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies / Natalia I. Zabolotna, Vladyslava V. Sholota, Heorhii H. Okarskyi // Proc. SPIE 11369, Fourteenth International Conference on Correlation Optics, 113691S (6 February 2020); P. 501-513. - <https://doi.org/10.1117/12.2556542>.
183. Заболотна Н.І. Багатопараметричні поляризаційно-фазові методи засоби відтворення та аналізу структури полікристалічних біологічних шарів при оцінюванні патологічних станів / Автореферат дис. на здобуття наук. Ступеня д.т.н. . спец. 05.11.17- біологічні та медичні прилади і системи, Харків: ХПІ. - 2018. – 40 с.
184. Ushenko A.G. Laser polarimetry of biological tissue. Principles and applications. Chapter in the book Biomedical Diagnostics, environmental and material Science / A.G. Ushenko, V .P. Pishak // Kluwer Academic Publishers. – 2004. – P. 93–136.
185. Statistical and fractal structure of biological tissue Mueller matrix images / O.V. Angelsky, V.P. Pishak, A.G. Ushenko [et al.] // Optical correlation techniques and applications; ed. by O. Angelsky. – Bellingham: SPIE Press. – 2007. – P. 213-266.
186. УшенкоУ.Г. Дослідження мікроструктури кісткової тканиниу поляризованому лазерному світлі / Ушенко О.Г., Пішак В.П., Пішак О.В. // Медичні перспективи. – 2000. –Т.V. – №4. –С. 3–7.

187. Polarization-correlation investigations of biotissue multifractal structures and their pathological changes diagnostics / Angelsky O., Burkovets D., Pishak V. [et al.] // *Laser Physics*. – 2000. – Vol. 10(5) – P. 1136–1142.
188. Polarization-correlation analysis of anisotropic structures in bone tissue for the diagnostics of pathological changes / Ushenko A.G., Angelsky O., V. Burkovets [et al.] // *Опт. и спектр.* – 2001. – Т.90, №3. – С. 458–464.
189. 2-D Stokes correlometry of biotissues images in pre-clinic diagnostics of their pre-cancer states / O.V. Angelsky, Ye.G. Ushenko, Yu.A. Ushenko [et al.] // *Photon Correlation and Scattering Conference, 2004: Proc. NASA: Amsterdam, The Netherlands*. – 2004. – P. 75–77.
190. О структурі матриць преобразования лазерного випромінювання біофракталами / Ангельський О.В., Архелюк А.Д., Ермоленко С.Б. [и др.] // *Квантова електроніка*. – 1999. – Т.29, №2. – С. 8–11.
191. Рассеяние лазерного излучения мультифрактальными биоструктурами / О.В. Ангельский, А.Г. Ушенко, А.Д. Архелюк [и др.] // *Опт. и спектр.* – 2000. – Т. 88, №3. – С. 495–498.
192. Ушенко О.Г. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні рідини / О.Г.Ушенко, Т.М. Бойчук – Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2011. – 656 с.
193. Ровіра Хурадо Рональд Умберто. Метод і система лазерної поляриметрії для оцінювання патологічних змін біологічних тканин: дис. канд. техн. наук: 05.11.17 / Ровіра Хурадо Рональд Умберто. – Вінниця, 2015. – 185 с.
194. Zabolotna Natalia I.. System of Mueller-Jones matrix polarizing mapping of blood plasma films in breast pathology / Zabolotna N., Kostiantyn O. Radchenko, Mykola H. Tarnovskiy // *Proc. SPIE 10407, Polarization Science and Remote Sensing VIII, 1040714* (2017).
195. Zabolotna Natalia I.. Diagnostic efficiency of Mueller - matrix polarization reconstruction system of the phase structure of liver tissue / Natalia I. Zabolotna, Sergii V. Pavlov, Kostiantyn O. Radchenko, Vladyslav A. Stasenko, Waldemar Wójcik, Nazym Kussambayeva // *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications, 98161E* (2015).
196. Zabolotna Natalia I.. A multifunctional automated system of 2D laser polarimetry of biological tissues / Natalia I. Zabolotna, Kostiantyn O. Radchenko // *Proc. SPIE 9205, Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces, 92050V* (2014).
197. Заболотна Н.І. Зображальна система поляризаційного відтворення та аналізу орієнтаційно-фазових параметрів двошарових біологічних

- тканин / Н.І. Заболотна, В.В. Шолота, Г.Г. Окарський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2019. - №1(37). – с.39-49.
198. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). Information Technology in Medical Diagnostics II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>. eBook ISBN 9780429057618.
 199. Rovira R. H. Particular Aspects of the Use of Videopolarimetric Technology for Dermatological Study, Measuring and computing equipment in technological processes. – 2014. – №. 3 (48). – P. 115-119. – ISSN 2219-9365.
 200. Pavlov S. V., Koslovskaya T. I. ., Rovira R. H. Design and Automation of a Videopolarimetry System for the analyzing of the Polarization Properties of a Biological Sample, Measuring and computing equipment in technological processes. – 2014. – №. 4 (49). – P. 158-161. – ISSN 2219-9365.
 201. Modern aspects of laser therapy. Cherkassy, ed. V.D. Popov, Ukraine: Vertical, publisher S.G. Kandych, 2012, 608 p.
 202. Laser medical technologies: a study guide, edited by Gotry Z. Yu., Pavlova S. V. and others. – Vinnytsia: VNTU, 2017. – 158 p.
 203. Information Technology in Medical Diagnostics II. By editors: Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M., London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
 204. Nikytenko A.G., and Yu.V. Troitsky Formation of a non-Gaussian intensity profile in a laser with inhomogeneous mirrors, Quantum Electronics, 9, No. 8, 1982, pp. 1600-1607.
 205. Voitsekhovych V.S., Karpusheva A.H., Kachalova N.M., Petrushko Yu.A., Tereshchenko N.F., and Kholin V.V.. On the uniformity of the laser radiation power density distribution at the output of optical fibers, Materials of the scientific and practical conference "Current issues of the use of lasers in medicine - 2020", Cherkasy, October 30-31, 2020.
 206. IS/IEC 60793-1-43: Optical Fibres, Part 1: Measurement Methods and Test Procedures, Section 43: Numerical Aperture, 2001.
 207. Komarova O. S., Pavlov S. V., Petrushko Yu. A., Petrakovskii O.. Experimental evaluation of the homogeneity of the laser radiation power density distribution at the output of short segments of multimode optical fibers, Electric power, electromechanics and technologies in the agricultural industry: [Electronic resource] : materials of the International science and

- practice Conf., November 9, 2023 / Govt. biotechnological university - Kharkiv, 2023. - P. 155-156.
208. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). Information Technology in Medical Diagnostics II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>.
 209. Фізичні основи біомедичної оптики (Монографія) / [Павлов С. В., Кожем'яко В. П., Колісник П. Ф. Козловська Т. І., Думенко В. П.] – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 155 с.
 210. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages
 211. Фотоплетизмографічні технології контролю серцево-судинної системи: (Монографія) / С.В.Павлов, В.П.Кожем'яко, В.Г.Петрук, П.Ф.Колісник – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 254 с.
 212. Ronald H. Rovira; Stanislav Ye. Tuzhansky; Sergii V. Pavlov; Sergii N. Savenkov; Ivan S. Kolomiets, et al. Polarimetric characterisation of histological section of skin with pathological changes, *Proc. SPIE* 10031, 2016, 100313E (September 28, 2016); doi:10.1117/12.224937.
 213. Pavlov S. V.; Vassilenko V. B, et al. Methods of processing biomedical image of retinal macular region of the eye, *Proc. SPIE* 9961, Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces V, 99610X (September 26, 2016); doi:10.1117/12.2237154.
 214. Ronald Rovira; Marcia M. Bayas; Sergey V. Pavlov et al. Application of a modified evolutionary algorithm for the optimization of data acquisition to improve the accuracy of a video-polarimetric system, *Proc. SPIE* 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015, 981619 (December 18, 2015); doi:10.1117/12.2229087.
 215. Zabolotna Natalia I.; S Pavlov ergii V., et al. Diagnostic efficiency of Mueller-matrix polarization reconstruction system of the phase structure of liver tissue, *Proc. SPIE* 9816, 2015, 98161E (December 18, 2015).
 216. Haijing Zheng, Huayan Sun, Huaili Zhang, Yingchun Li, Huichao Guo, Laixian Zhang, Rong Li, Qiang Yin, "Simulation and Experimental Research on a Beam Homogenization System of a Semiconductor Laser", *Sensors* 2022, 22, 3725, 1-18 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22103725>
 217. Bräuer-Krisch, E., Adam, J-F, Alagoz, E., Bartzsch, S., Crosbie, J., DeWagter, C., et al. "Medical physics aspects of the synchrotron radiation therapies: Microbeam radiation therapy (MRT) and synchrotron stereotactic

- radiotherapy (SSRT). *Physica medica*," 31(6), 568–83 (2015). doi:10.1016/j.ejmp.2015.04.016.
218. Комарова Ольга, Павлов Сергій, Петрушко Юлія, Петраківський Олександр, Рева Анна. 2023. «Експериментально оцінювання однорідності розподілу щільності потужності лазерного випромінювання на виході коротких відрізків багатомодових оптичних волокон різних довжин». Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції "Біобезпека та сучасні реабілітаційні технології. Теорія, практика, перспективи". Під редакцією Андрій Соломін – 15-16 листопада 2023 року, Київ, с. 273-278.
 219. Freund, I. Joseph W. Goodman: Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. *J Stat Phys* **130**, 413–414 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10955-007-9440-8>.
 220. Bazhenov, V. Y., Vasnetsov, M. V., and Soskin, M. S., "Laser beams with screw dislocations in their wavefronts", *Jetp Lett*, 52 (8), 429-431 (1990).
 221. Dickey, F.M. (Ed.). *Laser Beam Shaping: Theory and Techniques*, Second Edition (2nd ed.) (2014). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17140>.
 222. Komarova, O., Kholin, V., Tereshchenko, M., Pavlov, S., Rozumenko, V., Posokhov, M., Ivasenko, V. and Lapina, S., "Experimental evaluation of the homogeneity of the output streams of optical radiation of a rectangular shape for various versions of the output sections of the light guide nozzles for medical laser equipment," *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*, 65(1), 123–127 (2023). doi: 10.20535/1970.65(1).2023.283458
 223. Kholin, V., Voytsehovych, V., Komarova, O., Reva, A., Chepurna, K., Pavlov, S., Tereshchenko, M., "Experimental studies of the influence of phocons on the uniformity of initial optical fluxes in short lightguides from multimode optical fibers," *Collection of materials from the XIII International Scientific and Technical Conference "INSTRUMENT MANUFACTURING"*, PBF, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine, 182-187 (14 – 15 may 2024).
 224. Layton, M.R., Bucaro, J.A., "Optical fiber acoustic sensor utilizing mode-mode interference," 18(5), 666-70 (1 Mar 1979). doi: 10.1364/AO.18.000666. PMID: 20208797.
 225. European EN ISO 13694 Optics and photonics - Lasers and laser-related equipment - Test methods for laser beam power (energy) density distribution (ISO 13694:2018).

226. Metropolis, N., Ulam, S. The Monte Carlo Method, *Journal of the American Statistical Association* 44 № 247 335—341 (1949).
227. Jacques, S. L Optical properties of biological tissues: a review. *Physics in Medicine and Biology*, 58(11), R37, 2013.
228. Tuchin V. V., *Tissue Optics and Photonics: Light-Tissue Interaction*, *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*, 2015
229. Born, M. & Wolf, E. *Principles of Optics*. Cambridge University Press., 2013.
230. Wang, L., Jacques, SL, & Zheng, L. (1995) / "MCML - Монте-Карло моделювання light transport в multi-layered tissues" // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 47(2), 131-146
231. Goodman, J.W. (2007). *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*. Roberts and Company Publishers
232. Ghosh, N., Wood, M.F.G, & Vitkin, I.A. (2008) / Mueller matrix decomposition for polarized light tissue characterization // *Optics Express*, 16 (18), 13799-13809
233. Jacques S.L. *Optical Properties of Biological Tissues: A Review*. *Phys. Med. Biol.* 1992
234. Vasnetsov, M. Voytsekhovich V., Ponevchinsky V., Kachalova N., A. Khodko, O.Mamuta, V. Khomenko / A mechanism of speckle field damping in a multi-chromatic field // *SPIE Proceedings 12938, Sixteenth International Conference on Correlation Optics*; 129381B (2024). <https://doi.org/10.1117/12.3012836>
235. Vasnetsov M., Voytsekhovich V., Ponevchinsky V, Kachalova N., Khodko A., Mamuta O., Pavlov V., Khomenko V., Manicheva N. / Optical speckle-field visibility diminishing by reduction of a temporal coherence // *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 12-17 (2024). DOI: 10.35784/iapgos.5495
236. Vasnetsov, M. V., Ponevchinsky, V. V., Voitsekhovich, V. S., Golub, P. V., Mamuta, O. D., & Kachalova, N. M. / Peculiarities of polarised light scattering in nematic liquid crystals with large-scale director perturbations // *Liquid Crystals*, 1–7 (2024). <https://doi.org/10.1080/02678292.2024.2388273>
237. Bradshaw M. J., Raynes E. P., Bunning J. D., Faber T. E. / The Frank constants of some nematic liquid crystals // *Journal de Physique* 46 (9), pp.1513-1520 (1985)
238. Xiang-Dong Mi and Deng-Ke Yang / Capillary filling of nematic liquid crystals // *Phys. Rev. E* 58; 1992-2000 (1998)

239. Dadivanyan K., Noah O. V., Pashinina Yu. M., Belyaev V. V., Chigrinov V. G., Chausov D. N. / Anchoring Energy of Liquid Crystals // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 560:1, 108-114 (2012).
240. O.V. Katelian, S.D. Himych, P.F. Kolesnic, V.S. Pavlov, T.I. Kozlovskaya, etc. "Study of the peripheral blood circulation of an abdominal wall using optoelectronic plethysmograph", *Information Technology in Medical Diagnostics II*, Edited By Waldemar Wójcik, Sergii Pavlov, Maksat Kalimoldayev, Taylor & Francis Group, CRC Press United Kingdom, 2018. eBook ISBN 9780429057618, c. 119-125.
241. Y.O. Bezsmertnyi, V.S. Pavlov, T.I. Kozlovskaya, etc. "Optoelectronic plethysmography method for evaluation of peripheral blood circulation", *Information Technology in Medical Diagnostics II*, Edited By Waldemar Wójcik, Sergii Pavlov, Maksat Kalimoldayev, Taylor & Francis Group, CRC Press United Kingdom, 2018. eBook ISBN 9780429057618, c. 173-178.
242. Vasnetsov, M., Voytsekhovich, V., Ponevchinsky, V., Kachalova, N., Pavlov, V. Khodko, A., Mamuta, O., Manicheva, N. (2024). Optical speckle-field visibility diminishing by reduction of a temporal coherence. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 14(1), 17–20. <https://doi.org/10.35784/iapgos.5495>.
243. Kryvonosov, V., Avrunin, O., Sander, S., Pavlov, V., etc. (2023). A usage of the impedance method for detecting circulatory disorders to determine the degree of limb ischemia. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 13(4), 5–10. <https://doi.org/10.35784/iapgos.5393>.
244. Sergii M. Zlepko, Sergii V. Sander, Tatiana I. Kozlovskaya, Volodymyr S. Pavlov, Waldemar Wojcik, etc. "Analysis of the vascular tone and character of the local blood flow to assess the viability of the body using the photoplethysmographic device", *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 5/2017, doi:10.15199/48.2017.05.18.
245. Jurado Ronald Humberto Rovira, Nataliia I. Zabolotna, Volodymyr Pavlov, etc. "Simulation modeling of conversion processes of polarized optical radiation in biological tissue", Proc. SPIE 13400, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, 2024, 134000C (16 December 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3054899>.
246. Liudmyla Shkilniak, Nataliia Zabolotna, Volodymyr Pavlov, etc. "Photonic methods for normalizing the level of tissue microcirculation in the maxillo-facial region", Proc. SPIE 12985, *Optical Fibers and Their Applications*, 2023, 129850M (20 December 2023); <https://doi.org/10.1117/12.3022729>.

247. Tetiana Kanishyna, Liudmyla Shkilniak, Oleg Vlasenko, Volodymyr Pavlov, etc. "Study of tissue microcirculation disorders after tooth extraction by photoplethysmography in diabetic patients", Proc. SPIE 12476, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, 2022, 1247603 (12 December 2022); <https://doi.org/10.1117/12.2657895>.
248. Zorina Nizhynska-Astapenko, Waldemar Wojcik, Maryna Vlasenko, Olga Chaikovska, Volodymyr Pavlov, etc. "Information medical fuzzy-expert system for the assessment of the diabetic ketoacidosis severity on the base of the blood gases indices", Proc. SPIE 12126, *Fifteenth International Conference on Correlation Optics*, 1212626 (20 December 2021); <https://doi.org/10.1117/12.2616675>.
249. Volodymyr S. Pavlov, Yurii O. Bezsmernyi, Sergey M. Zlepko, and Halyna V. Bezsmertna "The photonic device for integrated evaluation of collateral circulation of lower extremities in patients with local hypertensive-ischemic pain syndrome", Proc. SPIE 10404, *Infrared Sensors, Devices, and Applications VII*, 1040409 (30 August 2017); <https://doi.org/10.1117/12.2272324>.
250. Tetyana I. Kozlovska, Peter F. Kolisnik, Volodymyr S. Pavlov, Waldemar Wójcik, etc. "Physical-mathematical model of optical radiation interaction with biological tissues", Proc. SPIE 10445, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, 2017, 104453G (7 August 2017); <https://doi.org/10.1117/12.2280928>.
251. Sergii V. Sander, Tatiana I. Kozlovska, Volodymyr S. Pavlov, Piotr Kisała, etc. "Laser photoplethysmography in integrated evaluation of collateral circulation of lower extremities", Proc. SPIE 9816, *Optical Fibers and Their Applications*, 2015, 98161K (17 December 2015); <https://doi.org/10.1117/12.2229042>.
252. В. Павлов, Н. Заболотна, Д. Штофель, інш. «Реалізація лазерного волоконно-оптичного приладу для оцінювання тканинної мікроциркуляції», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 48, вип. 2, с. 205–211, Лист. 2024. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-48-2-205-211>
253. В. Павлов, Х. Р. У. Ровіра, Н. Заболотна, В. Холін, Л. Никифорова, і О. Комарова, «Експериментальні дослідження гістологічних зрізень епідермісу людської шкіри», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, вип. 47, вип. 1, с. 177–186, Лип. 2024. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-47-1-177-186>

254. В. С. Войцехович, О. М. Кравченко, М. В. Васнецов, Н. М. Качалова, В. С. Павлов, інш. «Використання лазеротерапії при герпесвірусних ураженнях периферичної нервової системи», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, вип. 46, вип. 2, с. 84–92, Груд. 2023. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2023-46-2-84-92>
255. Павлов В. С., Н. І. Заболотна, О. С. Безкрєвний, і Я. Лунінь, «Особливості використання волоконно-оптичних сенсорів для дослідження тканинної мікроциркуляції», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні техно-логії*, вип. 45, вип. 1, с. 106–113, Вер 2023. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2023-45-1-106-113>
256. Я. Г. Скорюкова, В. С. Павлов, Ю. О. Безсмертний, і О. С. Безкрєвний, інш. «Оптико-електронна система для оцінювання периферичного кровообігу нижніх кінцівок людини», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, вип. 37, вип. 1, с. 77–83, Лист. 2019. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2019-37-1-77-83>
257. С. М. Злепко, Т. І. Козловська, В. А. Стасенко, В. С. Павлов, і В. П. Думенко, «Оцінювання метрологічних характеристик фотоплетизмографічного приладу діагностування стану периферичного кровообігу», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, вип. 35, вип. 1, с. 4–12, Трав 2016.
258. Г.І. Криничних, С.М., Шувалов, В.С. Павлов, О.В Кулицька., інш. Денситометричний метод оцінювання щільності кісткової тканини фронтального відділу верхньої щелепи з прогностичною метою, *Стоматологічний альманах*. 2023. № 3, С. 44-48. <https://dental-almanac.org/index.php/journal/article/view/615>
259. Вуйцік Вальдемар, Микитюк З. М., Павлов В. С., інш. Взаємодія лазерного випромінювання з біологічною тканиною –Лазер і здоров'я. : монографія / А. В. Кіпенський, Л. Я. Васильєва-Лінецька, Вуйцік Вальдемар [та ін.] ; заг. ред. А. В. Кіпенського ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : Міська друкарня, 2024. – С. 65-111: іл. - (Фізична та біомедична електроніка).
260. Mamuta M., Vasnetsov M., Voytsekhovich V., Kachalova N., Pavlov V., інш. Automated correction of optical speckle-field visibility with neural networks, *Міжнародна науково-практична конференція «Використання штучного інтелекту в наукових дослідженнях та прикладних розробках»*, Збірник матеріалів конференції 11 квітня 2024 р., С. 84-85. <http://repository.vsau.org/getfile.php/35556.pdf>

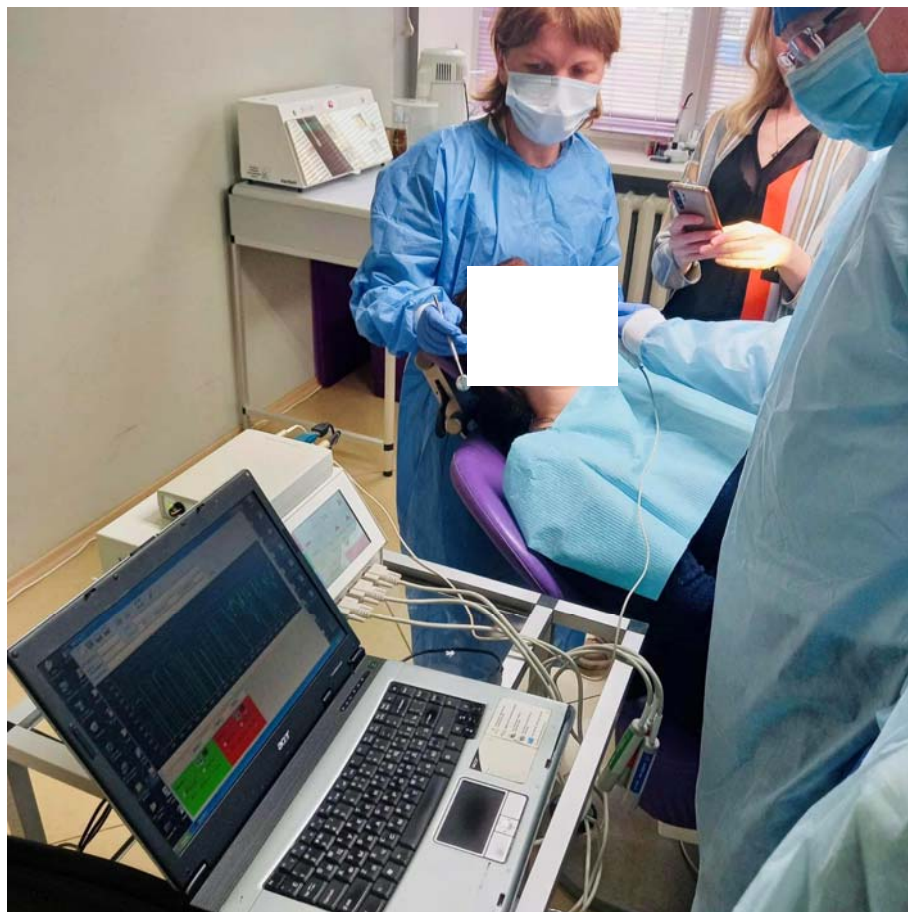
261. В.С.Павлов. Перспективність застосування оптико-електронних технологій для оцінювання стану тканинної мікроциркуляції, Матеріали LIII науково-технічної конференції ВНТУ, Вінниця, 20-22 березня 2024 р., 2 с. <file:///C:/Users/VNTU/Downloads/20797-73518-1-PB.pdf>
262. Ольга Комарова, Володимир Павлов, Олександр Петраківський, Юлія Петрушко Методика оцінювання однорідності розподілу щільності потужності лазерного випромінювання на виході коротких відрізків багатомодових оптичних волокон, Міжнародна науково-практична конференція Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем, листопад, 2023, 2 с. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/spirn/spirn2023/paper/view/19282>
263. Liudmyla Shkilniak, Tetiana Kanishyna, Oleg Vlasenko, Volodymyr Pavlov, інш. Photoplethysmography method for investigation of tissue microcirculation disorders after tooth extraction, Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference "Modern technologies of biomedical engineering, 2023, С.121-126
264. Я. Скорюкова, В. Павлов. Дослідження тривимірної моделі поверхні для визначення порушень мікроциркуляції крові на кінцівках, XLVI Науково-технічна конференція факультету комп'ютерних систем і автоматики (2017) – 3 с. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2017/paper/view/2015>
265. V.S. Pavlov, P.F. Kolesnic, T.I. Kozlovskaya. Evaluation of the peripheral blood circulation of an abdominal wall using optoelectronic plethysmograph, Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13-15 березня 2019, 3 с. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/27250/7029.pdf?sequence=3>
266. С.М. Злепко, С.В. Тимчик, В.С. Павлов "Система для досліджування життєдіяльності пацієнта", Пат. на корисну модель № 131588, МПК (2018.01) G06F 19/00 G06Q 50/22. - № у 2018 07222; заявл. 26.06.2018, 25.01.2019, Бюл № 2. – 5 с.
267. Т.І. Козловська, П.Ф. Колісник, В.С. Павлов. "Оптичний неінвазивний пристрій для визначення рівня периферійного кровонаповнення", Пат. на корисну модель № 134334, МПК (2006.01) A61B 5/02. - № у 2018 12507; заявл. 17.12.2018, опубл. про державну реєстрацію: 10.05.2019, Бюл. № 9. - 5 с. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1355163/>.

268. Vitaliy Polishchuk, Volodymyr Pavlov, Sergii Polishchuk, et. "Laser system for analysis of microcirculation of tissue in the maxillofacial region when assessing the effectiveness of implant treatment", Proc. SPIE 14009, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2025, 140090K (30 December 2025); <https://doi.org/10.1117/12.3099379>.
269. Я. Кузьмінов, О. Карась, і В. Павлов, «Інтелектуалізована система інтервальної гіпоксичної терапії з біозворотним контролем у реабілітації військових», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 50, вип. 2, с. 104–113, Січ 2026. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2025-50-2-104-113>
270. Vitaliy Polishchuk, Volodymyr Pavlov, etc. Laser system for analysis of microcirculation of tissue in the maxillofacial region when assessing the effectiveness of implant treatment, Conference: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments Lublin, Poland, December 2025.
<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/14009.toc>
271. Volodymyr Pavlov. Evaluation of changes in tissue microcirculation under laser and photon influence for complex treatment of chronic complications of diabetes, International Scientific and Practical Internet Conference «Youth in Science: Research, Problems, Prospects», March, 2026, 3 p. <https://conferences.vntu.edu.ua>
272. Volodymyr Pavlov. Assessment of blood circulation disorders in biological tissue using the electrical conductivity method, LV Scientific and Technical Conference of Divisions of VNTU (March, 2026), 3 p. <https://conferences.vntu.edu.ua>

ДОДАТКИ

Додаток А

Варіанти реалізації оптико-електронних приладів для оцінювання тканинної мікроциркуляції для застосуванні при політравмах різного ступеню важкості



Додаток Б

Мультиспектральний лазерний та фотонний блок з оптоволоконним виходом

Мультиспектральні лазерні та фотонні блоки з оптоволоконним виходом: ергономічний та портативний дизайн; сенсорна панель «Touch screen»; ступінчасте регулювання і контроль випромінювання потужності; установка і контроль часу процедури; модуляція випромінювання в УФ, видимого та ІЧ спектральних діапазонах; робота кожною довжиною хвилі окремо або одночасна робота 3-ма довжинами хвиль.



Технічні характеристики лазерних та фотонних блоків	
Число каналів (лазерне випромінювання)	3
Довжини хвиль* / максимальна потужність випромінювання*	
1-й канал	660 нм / 205 мВт
2-й канал	520 нм / 115 мВт
3-й канал	445 нм / 140 мВт
Довжини хвиль фотонних оптичних насадок	380 нм; 445 нм; 450 нм; 465 нм; 475 нм; 480 нм; 500 нм; 520 нм; 550 нм; 590 нм; 600 нм; 625 нм; 630 нм; 660 нм; 670 нм; 735 нм; 700 нм; 740 нм; 850 нм; 940 нм
Час випромінювання	0,1-59 хв
Реєстрована доза випромінювання	0,01-99,99 Дж $\pm$ 20 %
Діагональ екрану	7"
Живлення	220 В / 50 Гц
Габаритні розміри електронного блоку	265x165x250 мм
Маса апарата	не більше 6,4 кг
* Довжини хвиль та максимальна потужність випромінювання можуть змінюватися в залежності від потреб користувача.	

Додаток С

Приклад введення масиву інформації при експериментальних дослідженнях при аналізі трансформації лазерного випромінювання через біотканину

```

;PC Software:PMManager Version 3.90 Build 2
! ***** Warning: Do not modify this file. Changes may prevent *****
! ***** the PMManager Log reader from opening the file correctly. *****
;Logged:03/09/2024 at 07:34:50
;File Version:5
;Time Resolution:1 microseconds
;Log Settings:Stop after:readings:100
;Graph Mode:Split
;Notes:

;Channel A:843-R-USB Photodiode 818-UV-DB-v2 (s/n:3120024) EF1.56 (s/n:3116330)

;Channel A:Details
;Name:818-UV-DB-v2
;Graph Type:Needle
;Graph Color:RGB(14,104,168)
;Units:W
;Settings:Measuring:Power
;Settings:Wavelength:555
;Settings:Range:3.00mW
;Settings:Filter:IN

;Channel A:Statistics
;Min:9.000uW
;Max:10.00uW
;Average:9.010uW
;Std.Dev.:100.0nW
;Overrange:0
;-----

```

;First Pulse Arrived : 03/09/2024 at 07:34:50
 Timestamp Channel A

0.000	9.000e-06	0.667	9.000e-06	1.334	9.000e-06
0.067	9.000e-06	0.734	9.000e-06	1.401	9.000e-06
0.134	9.000e-06	0.801	9.000e-06	1.466	9.000e-06
0.201	9.000e-06	0.867	9.000e-06	1.534	9.000e-06
0.269	9.000e-06	0.934	9.000e-06	1.601	9.000e-06
0.334	9.000e-06	1.001	9.000e-06	1.674	9.000e-06
0.401	9.000e-06	1.071	9.000e-06	1.739	9.000e-06
0.467	9.000e-06	1.134	9.000e-06	1.806	9.000e-06
0.534	9.000e-06	1.200	9.000e-06	1.871	9.000e-06
0.601	9.000e-06	1.269	9.000e-06	1.938	9.000e-06

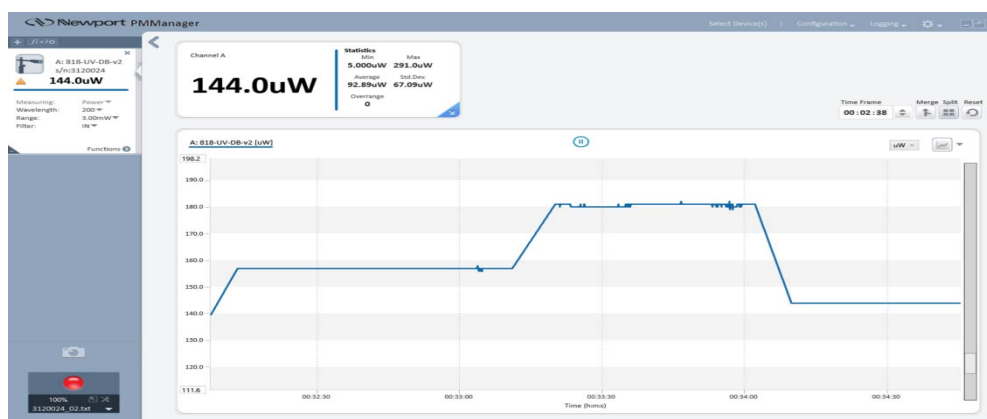
2.005	9.000e-06	3.533	9.000e-06	5.066	9.000e-06
2.070	9.000e-06	3.600	9.000e-06	5.133	9.000e-06
2.136	9.000e-06	3.667	9.000e-06	5.200	9.000e-06
2.202	9.000e-06	3.733	9.000e-06	5.268	9.000e-06
2.273	9.000e-06	3.800	9.000e-06	5.333	9.000e-06
2.334	9.000e-06	3.866	9.000e-06	5.400	9.000e-06
2.401	9.000e-06	3.933	9.000e-06	5.466	9.000e-06
2.467	9.000e-06	4.000	9.000e-06	5.533	9.000e-06
2.533	9.000e-06	4.066	9.000e-06	5.600	9.000e-06
2.600	9.000e-06	4.132	9.000e-06	5.666	9.000e-06
2.667	9.000e-06	4.199	9.000e-06	5.733	9.000e-06
2.733	1.000e-05	4.268	9.000e-06	5.799	9.000e-06
2.800	9.000e-06	4.333	9.000e-06	5.866	9.000e-06
2.867	9.000e-06	4.399	9.000e-06	5.933	9.000e-06
2.933	9.000e-06	4.466	9.000e-06	5.999	9.000e-06
3.000	9.000e-06	4.533	9.000e-06	6.066	9.000e-06
3.067	9.000e-06	4.600	9.000e-06	6.133	9.000e-06
3.133	9.000e-06	4.666	9.000e-06	6.199	9.000e-06
3.200	9.000e-06	4.733	9.000e-06	6.268	9.000e-06
3.268	9.000e-06	4.800	9.000e-06	6.333	9.000e-06
3.333	9.000e-06	4.866	9.000e-06	6.399	9.000e-06
3.400	9.000e-06	4.933	9.000e-06	6.466	9.000e-06
3.467	9.000e-06	5.000	9.000e-06	6.533	9.000e-0

Додаток Д

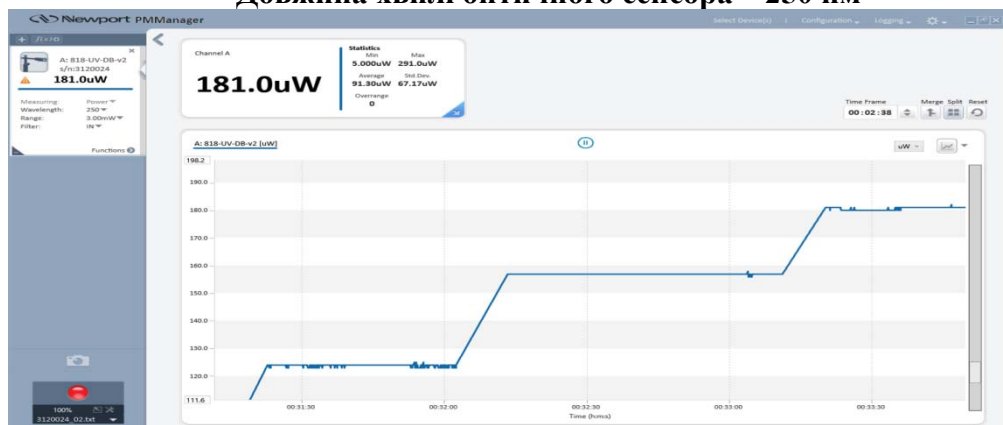
Результати експериментальних досліджень при аналізі трансформації лазерного випромінювання через біотканину

Інфрачервоний спектр лазерного випромінювання (830 нм)

Довжина хвилі оптичного сенсора – 200 нм



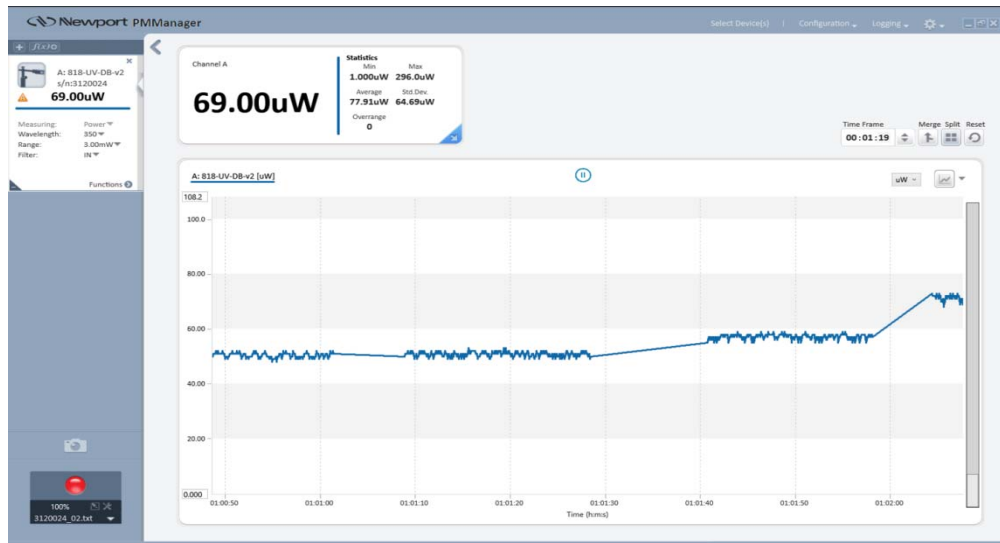
Довжина хвилі оптичного сенсора – 250 нм



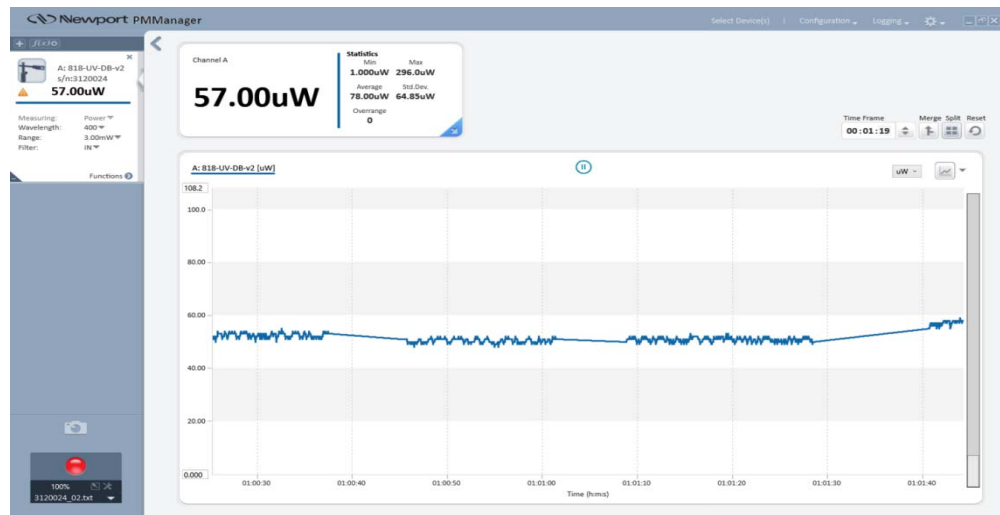
Довжина хвилі оптичного сенсора – 300 нм



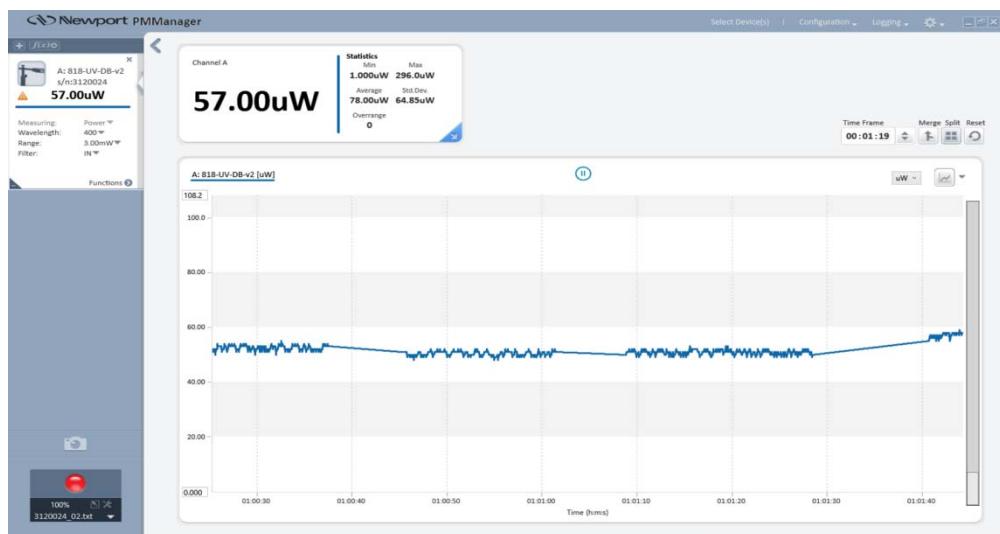
Довжина хвилі оптичного сенсора – 350 нм



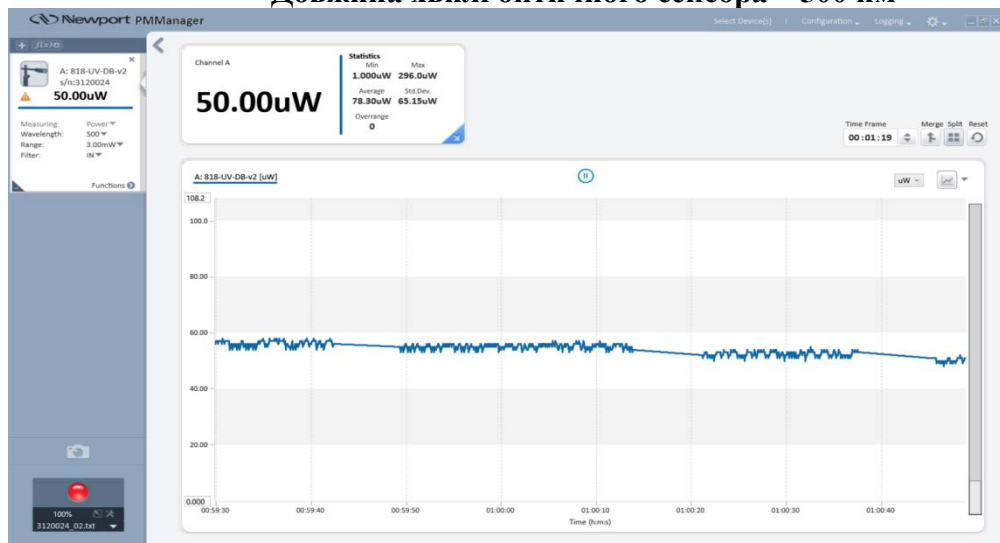
Довжина хвилі оптичного сенсора – 400 нм



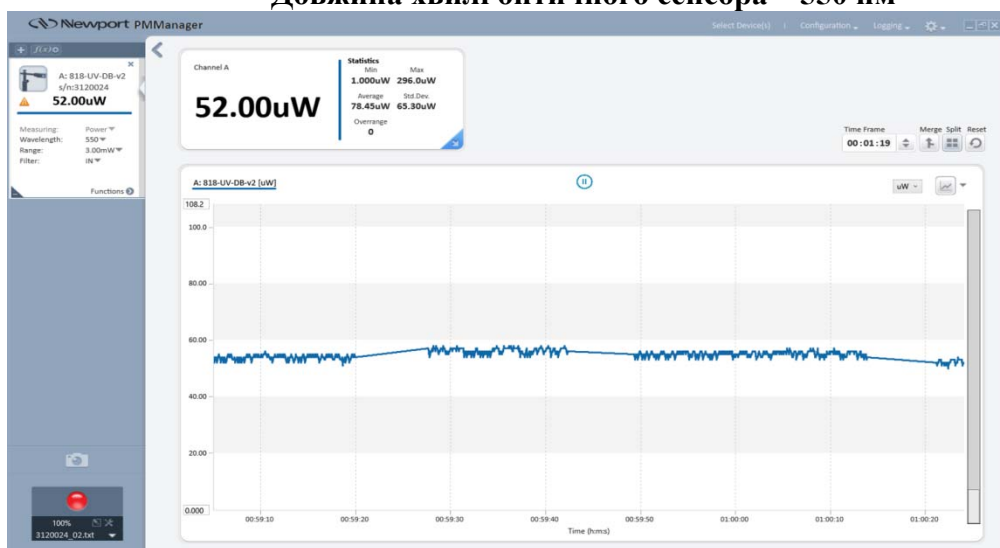
Довжина хвилі оптичного сенсора – 450 нм



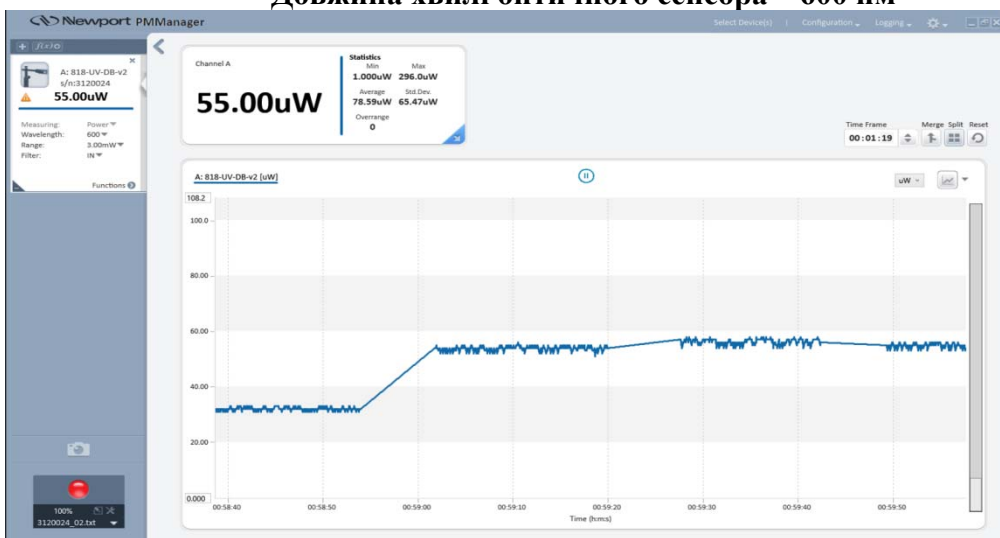
Довжина хвилі оптичного сенсора – 500 нм



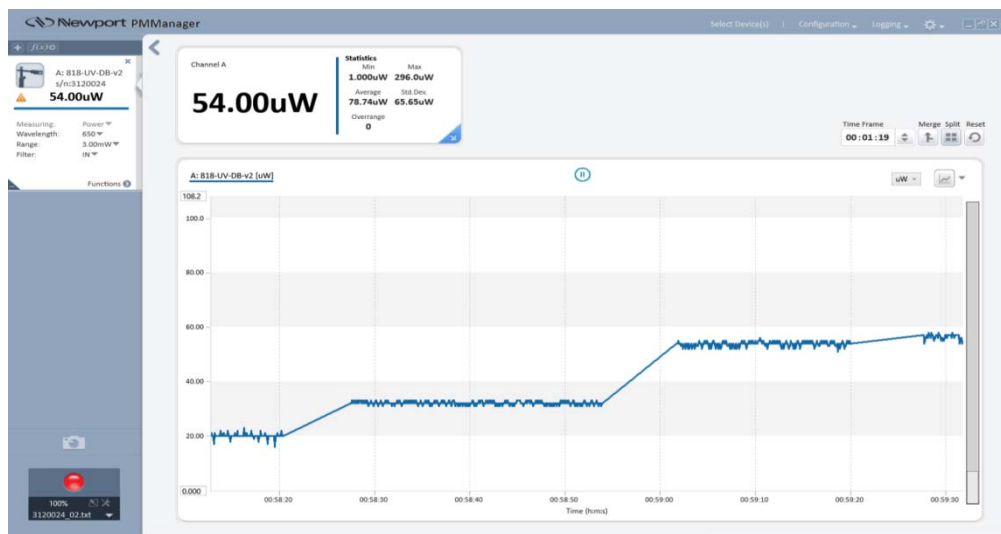
Довжина хвилі оптичного сенсора – 550 нм



Довжина хвилі оптичного сенсора – 600 нм



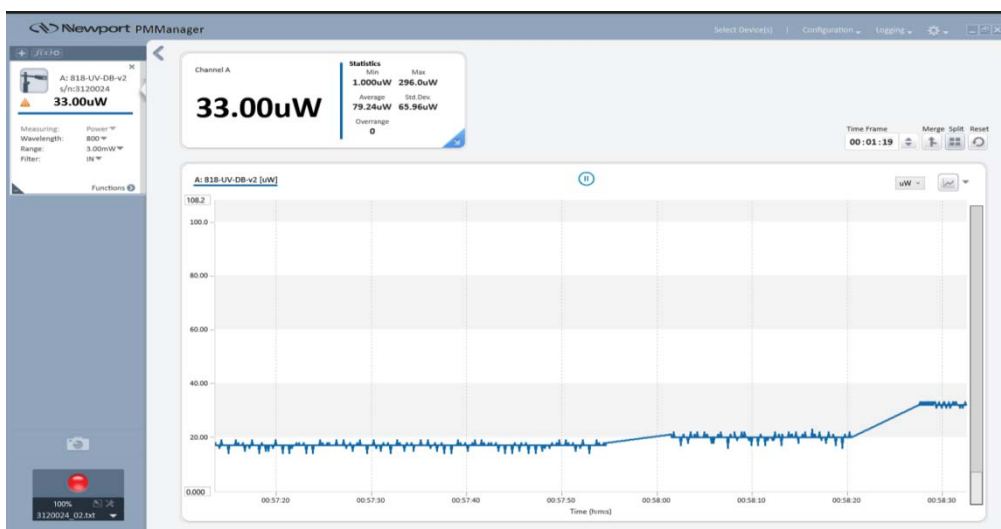
Довжина хвилі оптичного сенсора – 650 nm



Довжина хвилі оптичного сенсора – 700 nm



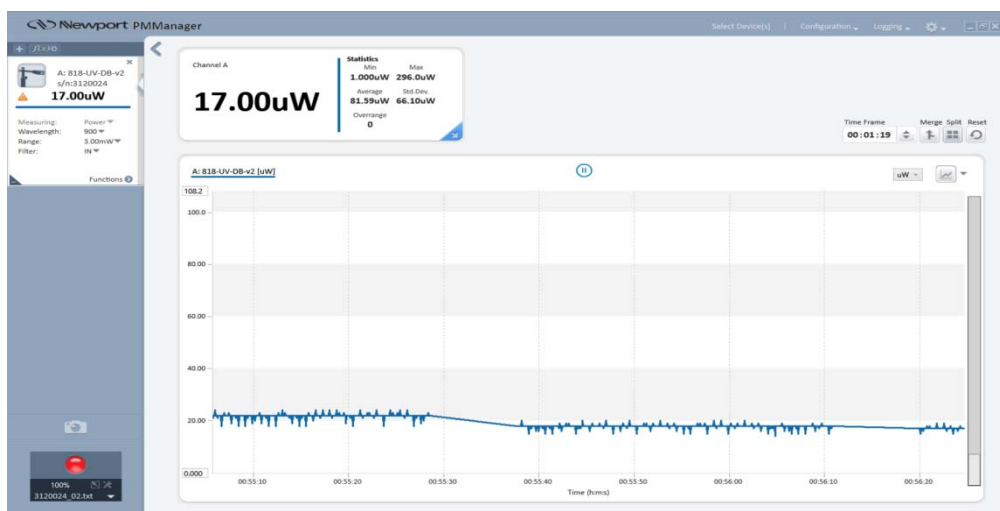
Довжина хвилі оптичного сенсора – 800 nm



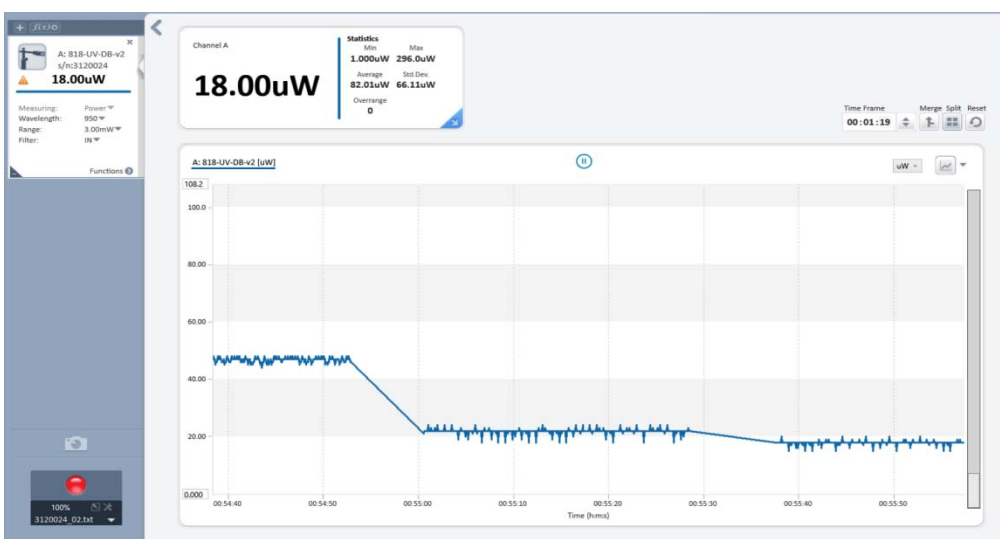
Довжина хвилі оптичного сенсора – 850 nm



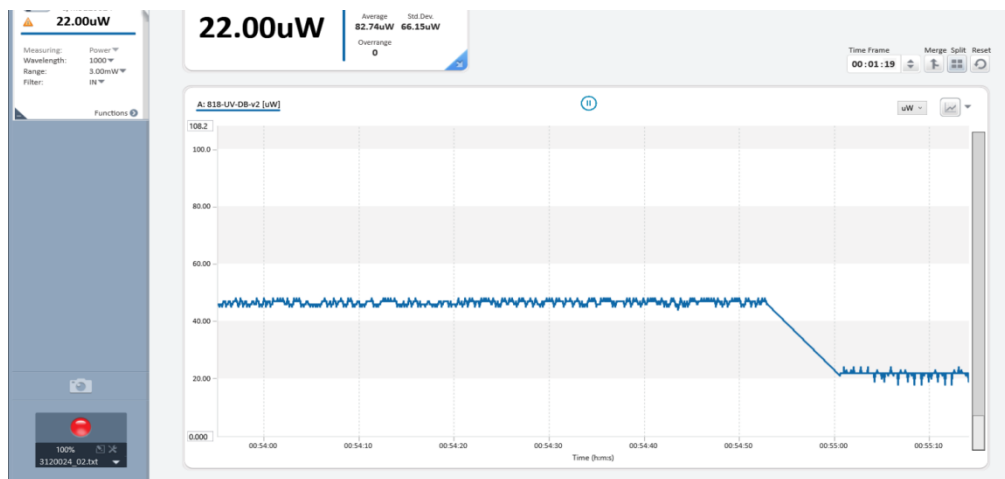
Довжина хвилі оптичного сенсора – 900 nm



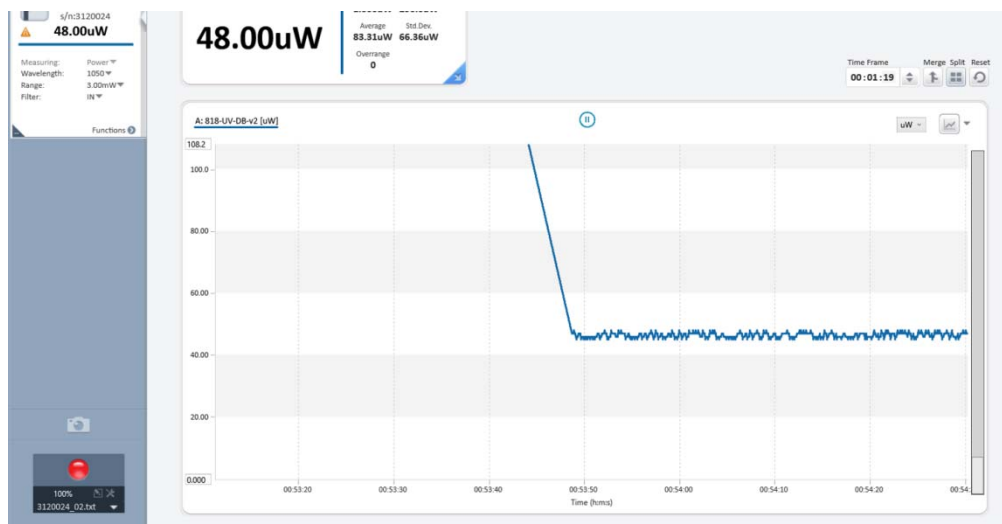
Довжина хвилі оптичного сенсора – 950 nm



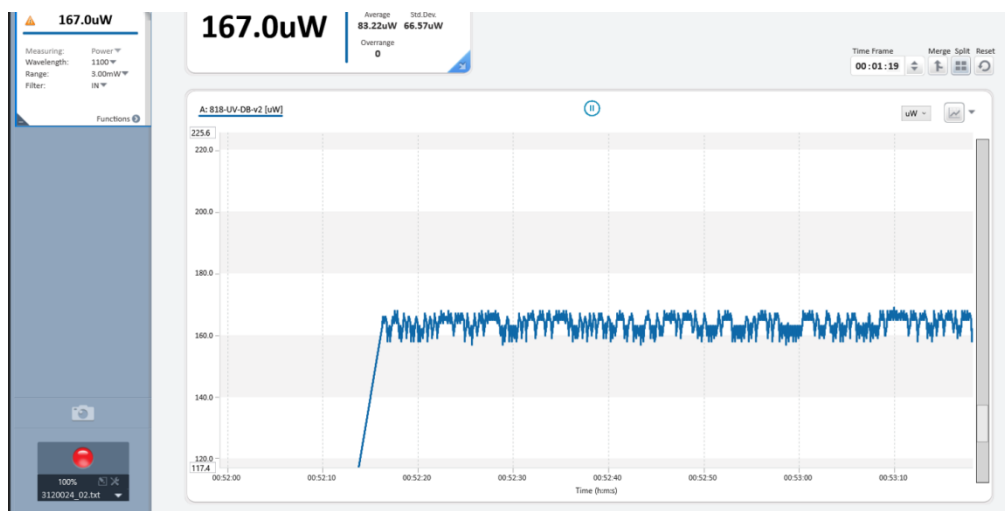
Довжина хвилі оптичного сенсора – 1000 нм



Довжина хвилі оптичного сенсора – 1050 нм



Довжина хвилі оптичного сенсора – 1100 нм



Додаток Е

**Лістинг програмного забезпечення для експертної нечіткої системи
оцінювання важкості діабетичного кетоацидозу***Main.java*

```

package sample;

import javafx.application.Application;
import javafx.fxml.FXMLLoader;
import javafx.scene.Parent;
import javafx.scene.Scene;
import javafx.scene.image.Image;
import javafx.stage.Stage;

public class Main extends Application {

    @Override
    public void start(Stage primaryStage) throws Exception {
        Parent root = FXMLLoader.load(getClass().getResource("sample.fxml"));
        primaryStage.getIcons().add(new Image("diabetic.png"));
        primaryStage.setTitle("Diagnosis of diabetic ketoacidosis");
        primaryStage.setScene(new Scene(root, 650, 425));
        primaryStage.setResizable(false);
        primaryStage.show();
    }

    public static void main(String[] args) {
        launch(args);
    }
}

```

Controller.java

```

package sample;

import javafx.fxml.FXML;
import javafx.scene.control.*;
import javafx.scene.text.Text;

import java.io.*;
import java.net.URL;
import java.nio.charset.StandardCharsets;
import java.nio.file.Files;
import java.nio.file.Paths;
import java.text.DecimalFormat;
import java.text.DecimalFormatSymbols;
import java.time.LocalDate;
import java.time.format.DateTimeFormatter;
import java.util.Arrays;
import java.util.Locale;
import java.util.ResourceBundle;

public class Controller {

    @FXML
    private ResourceBundle resources;

    @FXML
    private URL location;

```

```
@FXML  
private RadioButton EnRadioBtn;
```

```
@FXML  
private RadioButton UkrRadioBtn;
```

```
@FXML  
private Button calculateBtn;
```

```
@FXML  
private Text diagnosisText;
```

```
@FXML  
private Text diagnosisTxt;
```

```
@FXML  
private TextField doctorName;
```

```
@FXML  
private Text errorText;
```

```
@FXML  
private ToggleGroup lang;
```

```
@FXML  
private TextField patientAge;
```

```
@FXML  
private TextField patientName;
```

```
@FXML  
private TextField patientSex;
```

```
@FXML  
private Text doctorText;
```

```
@FXML  
private Text patientText;
```

```
@FXML  
private Text nameText;
```

```
@FXML  
private Text ageText;
```

```
@FXML  
private Text sexText;
```

```
@FXML  
private Text upTxt;
```

```
@FXML  
private TextField x1inputField;
```

```
@FXML  
private TextField x2inputField;
```

```
@FXML  
private TextField x3inputField;
```

```

@FXML
private TextField x4inputField;

@FXML
private CheckBox checkSaveResults;

@FXML
void initialize() {

    calculateBtn.setOnAction(event -> {

        errorText.setText("");
        diagnosisText.setText("");

        String lang = "unknown";
        if (EnRadioBtn.isSelected()) {
            lang = "EN";
        }
        if (UkrRadioBtn.isSelected()) {
            lang = "UKR";
        }
        if (lang.equals("UKR")) {
            calculateBtn.setText("Розрахувати");
            diagnosisTxt.setText("Діагноз:");
            upTxt.setText("Кафедра біомедичної інженерії");
            doctorText.setText("Лікар:");
            patientText.setText("Пацієнт:");
            nameText.setText("Ім'я:");
            ageText.setText("Вік:");
            sexText.setText("Стать:");
        }
        if (lang.equals("EN")) {
            calculateBtn.setText("Calculate");
            diagnosisTxt.setText("Diagnosis:");
            upTxt.setText("Department of Biomedical Engineering");
            doctorText.setText("Doctor:");
            patientText.setText("Patient:");
            nameText.setText("Name:");
            ageText.setText("Age:");
            sexText.setText("Sex:");
        }
    });

    double x1, x2, x3, x4;

    try {
        x1 = Double.parseDouble(x1inputField.getText().replaceAll(",", "."));
        x2 = Double.parseDouble(x2inputField.getText().replaceAll(",", "."));
        x3 = Double.parseDouble(x3inputField.getText().replaceAll(",", "."));
        x4 = Double.parseDouble(x4inputField.getText().replaceAll(",", "."));
    } catch (Exception e) {
        if (lang.equals("UKR")) {
            errorText.setText("Помилка:\nПараметри задано невірно");
        }
        if (lang.equals("EN")) {
            errorText.setText("Error:\nParameters are incorrect");
        }
        return;
    }
}

```

```

    DecimalFormatSymbols symbolsEN_US =
DecimalFormatSymbols.getInstance(Locale.US);
    DecimalFormat decimalFormat = new DecimalFormat("#,###.#####",
symbolsEN_US);

//H - низьке, HC - нижче середнього, C - середнє, BC - вище середнього, B - високе
double x1H, x1HC, x1C, x1BC, x1B;
double x2H, x2HC, x2C, x2BC, x2B;
double x3H, x3HC, x3C, x3BC, x3B;
double x4H, x4HC, x4C, x4BC, x4B;

x1H = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x1H));
x1HC = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x1HC));
x1C = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x1C));
x1BC = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x1BC));
x1B = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x1B));
} else {
    if (lang.equals("UKR")) {
        errorText.setText("Помилка:\nНе виконана умова \"X1 ∈ [6.9; 7.45]\"");
    }
    if (lang.equals("EN")) {
        errorText.setText("Error:\nCondition not met \"X1 ∈ [6.9; 7.45]\"");
    }
    return;
}
}
x2H = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x2H));
x2HC = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x2HC));
x2C = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x2C));
x2BC = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x2BC));
x2B = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x2B));
} else {
    if (lang.equals("UKR")) {
        errorText.setText("Помилка:\nНе виконана умова \"X2 ∈ [10; 60]\"");
    }
    if (lang.equals("EN")) {
        errorText.setText("Error:\nCondition not met \"X2 ∈ [10; 60]\"");
    }
    return;
}
}
x3H = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x3H));
x3HC = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x3HC));
x3C = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x3C));
x3BC = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x3BC));
x3B = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x3B));
} else {
    if (lang.equals("UKR")) {
        errorText.setText("Помилка:\nНе виконана умова \"X3 ∈ [2; 40]\"");
    }
    if (lang.equals("EN")) {
        errorText.setText("Error:\nCondition not met \"X3 ∈ [2; 40]\"");
    }
    return;
}
}
x4H = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x4H));
x4HC = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x4HC));
x4C = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x4C));
x4BC = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x4BC));
x4B = Double.parseDouble(decimalFormat.format(x4B));

```

```

    } else {
        if (lang.equals("UKR")) {
            errorText.setText("Помилка:\nНе виконана умова \"X4 ∈ [70; 150]\"");
        }
        if (lang.equals("EN")) {
            errorText.setText("Error:\nCondition not met \"X4 ∈ [70; 150]\"");
        }
        return;
    }
}
double[] minArr = new double[4];

minArr[0] = Arrays.stream(new double[]{x1BC, x2BC, x3BC, x4H}).min().getAsDouble();
minArr[1] = Arrays.stream(new double[]{x1BC, x2BC, x3BC,
x4HC}).min().getAsDouble();
minArr[2] = Arrays.stream(new double[]{x1BC, x2BC, x3BC, x4C}).min().getAsDouble();
minArr[3] = Arrays.stream(new double[]{x1B, x2BC, x3BC, x4HC}).min().getAsDouble();

double d1A = Arrays.stream(minArr).max().getAsDouble();
minArr[0] = Arrays.stream(new double[]{x1C, x2HC, x3HC, x4HC}).min().getAsDouble();
minArr[1] = Arrays.stream(new double[]{x1C, x2HC, x3HC, x4C}).min().getAsDouble();
minArr[2] = Arrays.stream(new double[]{x1BC, x2HC, x3HC,
x4HC}).min().getAsDouble();
minArr[3] = Arrays.stream(new double[]{x1BC, x2HC, x3HC,
x4C}).min().getAsDouble();

double d2A = Arrays.stream(minArr).max().getAsDouble();

minArr[0] = Arrays.stream(new double[]{x1C, x2H, x3HC, x4HC}).min().getAsDouble();
minArr[1] = Arrays.stream(new double[]{x1C, x2H, x3HC, x4C}).min().getAsDouble();
minArr[2] = Arrays.stream(new double[]{x1C, x2HC, x3HC,
x4HC}).min().getAsDouble();
minArr[3] = Arrays.stream(new double[]{x1C, x2HC, x3HC, x4C}).min().getAsDouble();

double d3A = Arrays.stream(minArr).max().getAsDouble();

double[] minArr1 = new double[3];
minArr1[0] = Arrays.stream(new double[]{x1H, x2H, x3H, x4C}).min().getAsDouble();
minArr1[1] = Arrays.stream(new double[]{x1HC, x2H, x3H, x4C}).min().getAsDouble();
minArr1[2] = Arrays.stream(new double[]{x1HC, x2HC, x3H,
x4BC}).min().getAsDouble();
double d4A = Arrays.stream(minArr1).max().getAsDouble();
errorText.setText("" +
    "d1A = " + d1A +
    ", d2A = " + d2A +
    "\nd3A = " + d3A +
    ", d4A = " + d4A);
double maxResult = Arrays.stream(new double[]{d1A, d2A, d3A,
d4A}).max().getAsDouble();
String resultTxt = "";
if (d1A == maxResult) {
    resultTxt = resultTxt.concat("Ketosis\n");
}
if (d2A == maxResult) {
    resultTxt = resultTxt.concat("Diabetic Ketoacidosis I\n");
}
if (d3A == maxResult) {
    resultTxt = resultTxt.concat("Diabetic Ketoacidosis II\n");
}
if (d4A == maxResult) {

```

```

        resultTxt = resultTxt.concat("Diabetic Ketoacidosis III\n");
    }
    diagnosisText.setText(resultTxt);

    if (checkSaveResults.isSelected()) {
        DateTimeFormatter folderPattern = DateTimeFormatter.ofPattern("dd-MM-
yyyy_HH.mm.ss");
        DateTimeFormatter filePattern = DateTimeFormatter.ofPattern("dd-MM-yyyy
HH:mm:ss");
        LocalDateTime now = LocalDateTime.now();
        File directory = new File("Results");
        if (! directory.exists()){
            directory.mkdir();
        }
        try (Writer writer = new BufferedWriter(new OutputStreamWriter(
            new FileOutputStream("Results/result_" + folderPattern.format(now) + ".txt"),
            StandardCharsets.UTF_8))) {
            if (lang.equals("UKR")) {
                writer.write("Ім'я лікаря: " + doctorName.getText() +
                    "\nІм'я пацієнта: " + patientName.getText() +
                    "\nВік пацієнта: " + patientAge.getText() +
                    "\nСтать пацієнта: " + patientSex.getText() +
                    "\nДіагноз: " + diagnosisText.getText() +
                    "\nДата отримання результату: " + filePattern.format(now));
            }
            if (lang.equals("EN")) {
                writer.write("Doctor's name: " + doctorName.getText() +
                    "\nPatient's name: " + patientName.getText() +
                    "\nPatient's age: " + patientAge.getText() +
                    "\nPatient's sex: " + patientSex.getText() +
                    "\nDiagnosis: " + diagnosisText.getText() +
                    "\nDate of result: " + filePattern.format(now));
            }
        } catch (Exception e) {
            e.printStackTrace();
        }
    }

```

Електронне 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.

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № P2026-114.

Видавець та виготовлювач

Вінницький національний технічний університет,

Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua;

Email: rvv.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.