

УДК [681.7.01+66.088+615.478.6]

С. М. Злепко<sup>1</sup>, А. М. Коробов<sup>2</sup>, Вальдемар Вуйцік<sup>3</sup>, А. Ю. Клапоущак<sup>1</sup>, В. С. Павлов<sup>1</sup>, Т. І. Козловська<sup>1</sup>, Ж. М. Хоменко<sup>4</sup>

## ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗМІНИ ПЕРИФЕРІЙНОГО КРОВООБІГУ ПРИ ФОТОННОМУ ВПЛИВІ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ЛІКУВАННЯ ХРОНІЧНИХ УСКЛАДНЕНЬ ЦУКРОВОГО ДІАБЕТУ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет, Вінниця <sup>2</sup>Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків <sup>3</sup>Люблінський технологічний університет «Любельська Політехніка», Люблін <sup>4</sup>Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир

**Анотація.** В статті розглянуто перспективність використання фотоплетизмографічного методу для оцінювання мікроциркуляторних змін периферійного кровообігу для вивчення процесів, які відбуваються при фотонному фізіотерапевтичному впливі для комплексного лікування хронічних ускладнень цукрового діабету. Показано, що фотонне випромінювання сприяє підвищенню еластичності стінок кровососних судин, еластичності еритроцитів, кисневотранспортній функції крові, активності клітинних мембран, прискоренню процесів регенерації тканин, зменшення окислення ліпідів, нормалізації реологічних показників крові, стимуляції утворення АТФ в мітохондріях, що підвищує біоенергетичний потенціал клітин. Після сеансів світлолікування у хворих зникав синдром «термоампутації», зменшувалися набряки ніг, а також значно зменшувалася біль в ногах, проходило оніміння, припинялися судороги ніг. Показано, що фотонне випромінювання апарату «Барва - СДС» призводить до протизапальної, десенсибілізуючої, знеболювальної, спазмолітичної, протинабрякової дій, що і підтверджено в даному дослідженні при лікуванні хворих з ускладненнями цукрового діабету. Для контролю рівня периферійного кровообігу використовувався фотоплетизмографічний метод, який порівняно з іншими відомими методами дослідження кровообігу має певні переваги, тому що дозволяє проводити дослідження як у прохідному, так і у відбитому світлі. Він дозволяє отримати корисну інформацію про судинну активність, судинному відповіді на специфічні речовини, а також проводити вивчення кровообігу в ізольованих судинах різного калібру (вени, артерії та ін.). Крім того, фотосенсор не викликає стиснення судин біологічної тканини, тобто не вносить порушення кровообігу. Таким чином, очевидно, що найбільш перспективним напрямком реєстрації фізіологічних параметрів є використання неінвазивних методів діагностування, серед яких широкого розвитку отримали оптичні методи реєстрації і перетворення біомедичної інформації і дозволяє проводити дослідження мікроциркуляції в тканинах людини без порушення кровообігу в досліджуваній ділянці, що є суттєвою перевагою для медичної практики.

**Ключові слова:** фотоплетизмограма, оптичні сенсори, фотонне випромінювання, фізіотерапевтичний вплив, цукровий діабет.

**Анотация.** В статье рассмотрены перспективность использования фотоплетизмографического метода для оценки микроциркуляторных изменений периферического кровообращения для изучения процессов, происходящих при фотонном физиотерапевтическом воздействии для комплексного лечения хронических осложнений сахарного диабета. Показано, что фотонное излучение способствует повышению эластичности стенок кровеносных сосудов, эластичности эритроцитов, кислородно-транспортной функции крови, активности клеточных мембран, ускорению процессов регенерации тканей, уменьшению окисления липидов, нормализации реологических показателей крови, стимуляции образования АТФ в митохондриях, что повышает биоэнергетический потенциал клеток. После сеансов светолечения у больных исчезал синдром «термоампутации», уменьшались отеки ног, а также значительно уменьшалась боль в ногах, проходило онемение, прекращались судороги ног. Показано, что фотонное излучение аппарата «Краска - СДС» приводит к противовоспалительному, десенсибилизирующему, обезболивающему, спазмолитическому, противотечному эффектам, что подтверждено в данном исследовании при лечении больных с осложнениями сахарного диабета. Для контроля уровня периферического кровообращения использовался фотоплетизмографический метод, который по сравнению с другими известными методами исследования кровообращения имеет определенные преимущества, так как позволяет проводить исследования как в проходящем, так и в отраженном свете. Он позволяет получить полезную информацию о сосудистой активности, сосудистом ответе на специфические вещества, а также проводить изучение кровообращения в сосудах различного калибра (вены, артерии и др.). Кроме того, фотосенсор не вызывает сжатия сосудов биологической ткани и не вносит нарушения при периферическом кровообращении. Таким образом, очевидно, что наиболее перспективным направлением регистрации физиологических параметров является использование неинвазивных методов диагностики, среди которых широкое развитие получили оптические методы регистрации и преобразования биомедицинской информации и позволяет проводить исследования микроциркуляции в тканях человека без нарушения кровообращения в исследуемой области, что является актуальным для медицинской практики.

**Ключевые слова:** фотоплетизмограма, оптические сенсоры, фотонное излучение, физиотерапевтический влияние, сахарный диабет.

**Abstract.** The paper deals with the prospect of using the photoplethysmographic method for the evaluation of microcirculatory changes in peripheral circulation to study the processes that occur during photonic physiotherapy exposure for the complex treatment of chronic complications of diabetes. It is shown that photonic radiation helps to increase the elasticity of the walls of blood vessels, the elasticity of erythrocytes, oxygen transport function of the blood, the activity of cell membranes, the acceleration of processes of tissue regeneration, the reduction of lipid oxidation, the normalization of rheologic indices. After procedures of phototherapy in patients, the syndrome of "thermoamputation" disappeared, swelling of the legs decreased, as well as significantly decreased pain in the legs, numbness took place, leg cramps stopped. It is shown that photonic radiation of the Barva apparatus leads to anti-inflammatory, desensitizing, analgesic, antispasmodic, and anti-edema actions, which was confirmed in this study in the treatment of patients with complications of diabetes. To control the level

С. М. Злепко, А. М. Коробов, Вальдемар Вуйцік, А. Ю. Клапоущак, В. С. Павлов, Т. І. Козловська,  
Ж. М. Хоменко, 2019

of peripheral circulation, a photoplethysmographic method was used, which, compared to other known methods of blood circulation research, has certain advantages, because it allows to conduct studies in both transient and reflected light. It allows to obtain useful information about vascular activity, vascular response to specific substances, as well as to study blood circulation in isolated vessels of different caliber (veins, arteries, etc.). In addition, the photosensor does not cause compression of vessels of biological tissue, that is, does not cause impaired blood circulation. Thus, it is obvious that the most promising direction of registration of physiological parameters is the use of non-invasive methods of diagnosis, among which the wide development has received optical methods of registration and transformation of biomedical information and allows to study microcirculation in human tissues without impaired circulation in the study area, which is essential for medical practice.

**Key words:** Photoplethysmogram, optical sensors, photon radiation, physiotherapy effect, diabetes mellitus.

**DOI:** <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2019-45-2-13-24>.

### Вступ

Ускладнення цукрового діабету, такі як ангіопатії і полінейропатії, викликають серйозну занепокоєність ендокринологів у всьому світі у зв'язку з ростом кількості хворих з діабетичними нейропатіями в останні десятиліття. У лабораторії квантової біології та квантової медицини ХНУ імені В.Н. Каразіна під керівництвом А.М. Коробова та лабораторії біомедичної оптики ВНТУ під керівництвом С.В. Павлова проводяться дослідження дії низькоінтенсивного електромагнітного випромінювання оптичного діапазону спектра на розвиток цукрового діабету фотоплетизмографічними технологіями, а також розробляються методики і апарати серії «Барва» для лікування і профілактики ускладнень цукрового діабету (лабораторія квантової біології та квантової медицини ХНУ імені В.Н. Каразіна). В основу терапевтичної дії фотонних апаратів «Барва» покладено властивість світла видимого діапазону спектра посилювати мікроциркуляцію крові і лімфи, підвищувати еластичність стінок кровоносних судин, нормалізувати реологічні показники крові, а також нормалізувати роботу імунної, ендокринної, центральної і периферичної нервових систем.

### Актуальність

Доведено, що фотоплетизмографічний метод є найкращим для дослідження стану периферичного кровообігу в тканинах людини, так як дозволяє проводити дослідження безконтактним способом як у прохідному так і у відбитому світлі, а також дозволяє проводити дослідження мікроциркуляції в тканинах людини без порушення кровообігу в досліджуваній ділянці, що є суттєвою перевагою для медичної практики.

Фотоплетизмографія заснована на просвічуванні досліджуваної ділянки тіла людини (монохроматичним) пучком світла, який після проходження або відбиття від нього реєструється оптико-електронними засобами, посилюється і записується. Встановлено, що інтенсивність променевої енергії, що пройшла через досліджуваний об'єкт або відбитий від нього, є функцією від вмісту в ній крові [29]. Оскільки коефіцієнт поглинання променевої енергії кров'ю значно вище, ніж тканинами, застосування фотоплетизмографічного методу дозволяє реєструвати лише зміни вмісту крові. При цьому розсіювання світла кров'ю відбувається в основному за рахунок відбиття від еритроцитів. Також, як і в реографії динаміка зміни оптичної щільності досліджуваних тканин  $D(t)$  однозначно характеризує динаміку його кровонаповнення. Сигнал корисної інформації являє собою приріст оптичної щільності  $\Delta D(t)$  та обумовлене перерозподілом крові з частотою серцевих скорочень щодо деякого постійного рівня  $D_0$ .

Порівняно з іншими відомими методами дослідження кровообігу фотоплетизмографічний метод має певні переваги, тому що дозволяє проводити дослідження як у прохідному, так і у відбитому світлі. Він дозволяє отримати корисну інформацію про судинної активності, судинному відповіді на специфічні речовини, а також проводити вивчення кровообігу в ізольованих судинах різного калібру (вени, артерії та ін.). Крім того, фотосенсор не викликає стиснення судин біологічної тканини, тобто не вносить порушення кровообігу.

Таким чином, очевидно, що найбільш перспективним напрямком реєстрації фізіологічних параметрів є використання неінвазивних методів діагностування, серед яких широкого розвитку отримали оптичні методи реєстрації і перетворення біомедичної інформації.

### Мета

Метою статті є підвищення ефективності вивчення мікроциркуляторних змін за допомогою фотоплетизмографічного методу при фотонному фізіотерапевтичному впливі на перебіг діабетичних ангіопатій.

### Задачі

1. Провести аналіз біологічних ефектів при фотонному фізіотерапевтичному впливі.
2. Проаналізувати фізичні і математичні моделі для аналізу взаємодії оптичного випромінювання з біотканинами.
3. Реалізація оптико-електронного приладу діагностування стану периферичного кровообігу.
4. Проаналізувати результати терапевтичного впливу фотонного випромінювання та провести контроль ефективності фотоплетизмографічним методом.

## Розв'язання задач

### Аналіз біологічних ефектів при фотонному фізіотерапевтичному впливі

В результаті експериментальних досліджень з'ясовано, що відповідний відгук організму на фізіотерапевтичний вплив виникає на адаптаційному рівні і має періодичний характер, при цьому послідовно змінюються фази збудження і гальмування. Адаптаційна відповідь організму на терапевтичний вплив фотонним випромінюванням впливає на всі системи організму, як на клітинному, так і на органосистемному рівні.

Поглинання фотонного випромінювання викликає в біотканині біохімічні, біоелектричні та біоенергетичні ефекти. На рис. 1 показано біофізичні ефекти, які виникають після поглинання лазерного випромінювання малої і середньої потужності. Ці ефекти виникають при низьких густинах потужності та відносно тривалому часі опромінення.

Біохімічні ефекти викликають стимуляцію виділення гістамінів і серотонінів (це речовини, що відносяться до речовин-нейромедіаторів, а саме, фізіологічно активних речовин, що виконують роль хімічних посередників (медіаторів та нейрогормонів) у міжклітинних взаємодіях), можуть також стимулювати або гальмувати ензиматичні (ензими або ферменти – це речовини-каталізатори більшості хімічних реакцій, які відбуваються у живих організмах) реакції кислоти АТФ.

Біоелектричні ефекти приводять до нормалізації потенціалу біологічної тканини, а точніше її складових, зокрема і мембрани клітин.

Біоенергетичні ефекти стимулюють ріст і регенерацію клітин, а також міжклітинні процеси.

Вищеописані первинні ефекти, які безпосередньо виникають при опроміненні лазерним випромінюванням біотканин, спричиняють також вторинні ефекти і мають місце не тільки в опромінених, але одночасно і в сусідніх біологічних тканинах. Вторинні ефекти поділяються на три групи: протибольові, протизапальні та біостимуляційні.

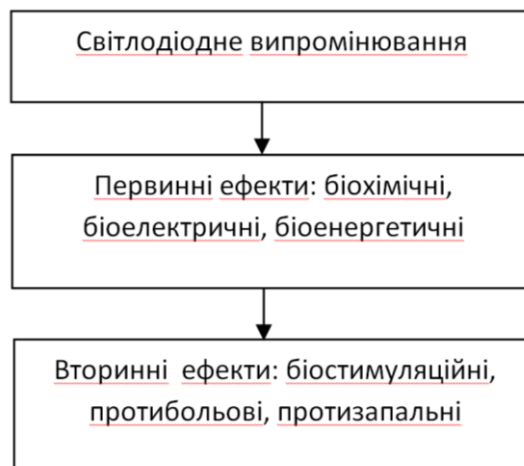


Рисунок 1 – Спрощена схема реакції біотканини на фотонне випромінювання малої або середньої потужності

Біоенергетичні ефекти стимулюють ріст і регенерацію клітин, а також міжклітинні процеси.

Вищеописані первинні ефекти, які безпосередньо виникають при опроміненні лазерним випромінюванням біотканин, спричиняють також вторинні ефекти і мають місце не тільки в опромінених, але одночасно і в сусідніх біологічних тканинах. Вторинні ефекти поділяються на три групи: протибольові, протизапальні та біостимуляційні.

Механізм дії ІЧ фотонного випромінювання (0,8–1,4 мкм) визначається його низькою енергією, нездатністю викликати виражений фотохімічний ефект. При поглинанні біотканинами ІЧ випромінювання перетворюється у теплову енергію вібрації молекул. Як наслідок різкого теплового розширення протоплазми клітин може виникнути гідродинамічний удар, який є вихідним імпульсом більш загальної дії ІЧ випромінювання. В результаті перебігу даних процесів різні біологічні сполуки переходять в активний стан або інактивуються. Фотонне випромінювання у ближній ІЧ області спектра слабо поглинається меланіном, водою та іншими компонентами біотканин, що обумовлює його високу проникність.

Таким чином, специфічність відповіді на дію фотонного світлодіодного випромінювання чітко проявляється у особливостях первинної відповіді (фотореакції) та на таких етапах, які запускаються в результаті локальних атомно-молекулярних змін. Після первинної резонансної абсорбції енергії кванта оптичного випромінювання або розподілу поглиненої енергії між збудженими станами окремих атомних

груп виникають перебудови макромолекул. Результатом цього може бути зміна активності ключових ферментів біотканинного метаболізму та мікроархітектоніки клітинних мембран.

Розглянемо принципи побудови математичних моделей для розрахунків взаємодії оптичного випромінювання з неоднорідними біотканинами. Як було відзначено раніше, неоднорідними називають середовища, в яких присутнє як поглинання так і розсіяння випромінювання. Одним із таких прикладів є шкіра людини. В той же час шкіра людини є живим багатошаровим середовищем, яке містить різноманітні включення, такі, як наприклад, кровоносні судини, в яких відбувається рух крові. Все це ускладнює розуміння процесів, які відбуваються при дії випромінювання на шкіру. Для опису цих процесів існує величезна кількість математичних і фізичних моделей, кожна з яких вирішує те чи інше конкретне завдання. Розглянемо основні принципи побудови математичних моделей, які описують взаємодію оптичного випромінювання з багатокомпонентними багатошаровими неоднорідними середовищами, таким як шкіра людини [1,6,7].

Практично всі моделі будуються за однаковою схемою (рис. 2).

Спочатку вибирають об'єкт дослідження, його геометрію. Потім визначаються оптичні і фізичні параметри всіх його компонентів. Далі відбувається розрахунок розподілу випромінювання в середовищі і для деяких моделей обчислення температурних полів.

Різниця між моделями стає помітною вже на етапі побудови геометрії. В більшості випадків шкіра являє собою послідовність плоских шарів з різними оптичними і теплофізичними характеристиками. Кількість шарів може змінюватися від одного до семи в залежності від поставлених завдань.

Побудуємо модель, яка дасть змогу оцінити інтенсивність випромінювання при відбиванні від судин.

Реальна біотканина являє собою неоднорідне середовище, в якому присутнє як поглинання так і розсіювання оптичного випромінювання, тому дослідити і описати процеси, які в ній відбуваються, практично неможливо. Розглянемо один із прикладів біотканини, а саме шкіру людини.

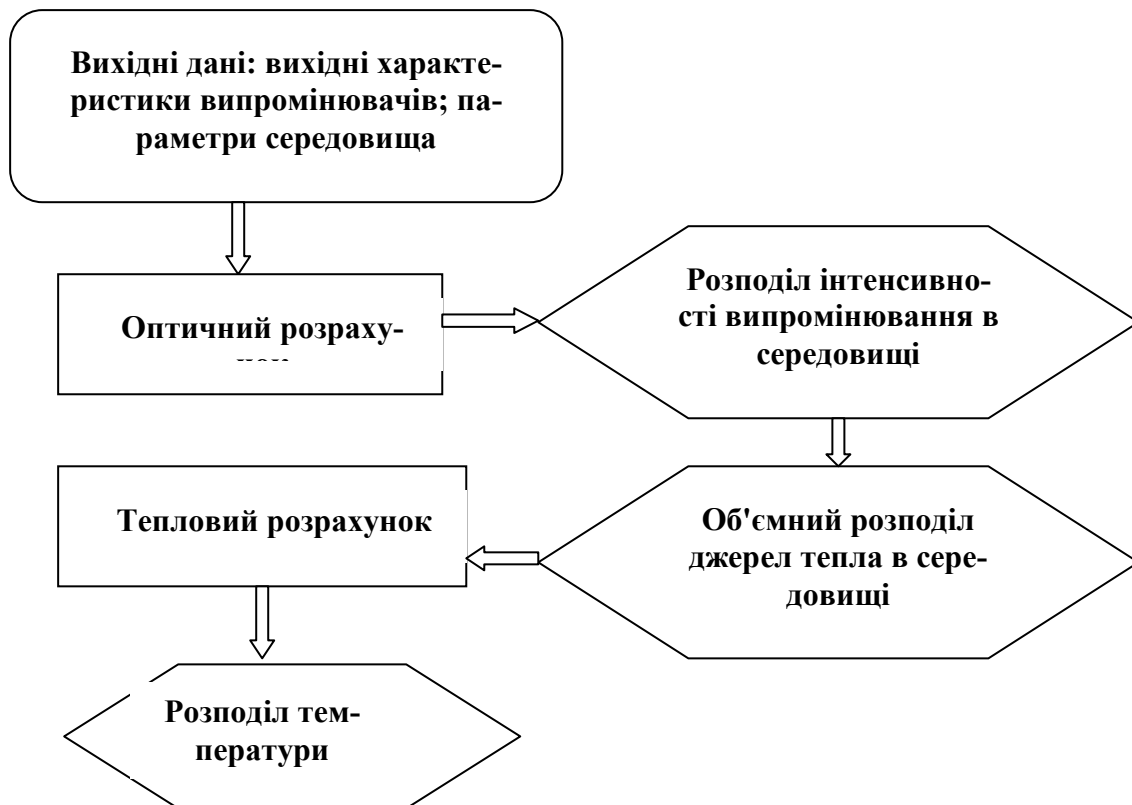


Рисунок 2 – Схема побудови моделей

Шкіра людини є живим багатошаровим середовищем, що містить різні включення, такі як, наприклад, кровоносні судини, в яких відбувається рух крові. Все це ускладнює розуміння процесів, що відбуваються, при дії випромінювання на шкіру. Для опису цих процесів на даний момент існує безліч різних математичних і фізичних моделей, кожна з яких покликана вирішити яку-небудь конкретну задачу,

описати окремий випадок. Спрощена модель шкіри, являє собою тришарову систему, причому кожен шар має різні біофізичні властивості, а тому і різні оптичні параметри (рис. 3).

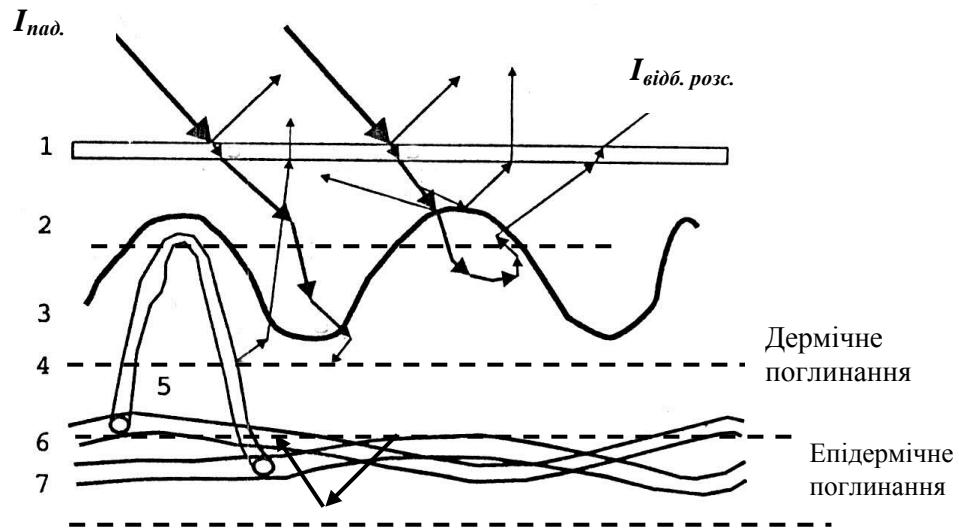


Рисунок 3 – Схема розповсюдження оптичного випромінювання в біооб'єкті:  
1 – роговий шар; 2 – епідерміс; 3 – зона між епідермісом та дермою (базальна мембрана); 4 – дерма;  
5 – артеріола; 6 – посткапілярна венула

Падаюче на шкіру випромінювання  $I_1$ , частково відбивається від її поверхні  $I_1'$ , проходить через епідерміс, де поглинається меланіном шкіри і частково розсіюється  $I_2$ , а частина проходить через дерму і відбивається від судини  $I_3$

$$\Delta I_{\text{відб}} = I_1 - (I_1' + I_2 + I_3) \quad (1.1)$$

Позначимо  $I_l = f(I_0, R, \theta)$  як функцію інтенсивності випромінювання, яке взаємодіє з біотканиною.  $I_0 = f(\lambda)$ , а також кута його падіння  $\theta$  за умови, коли здійснюється закон Ламберта  $I_0 = I_0 \cos(\theta)$ .

При відбиванні від поверхні шкіри випромінювання змінює інтенсивність в деякому тілесному куті

$$dI_1' = r_1 I_0 \cos \Theta d\Omega, \quad (1.2)$$

де  $d\Omega = \sin \Theta d\Theta d\varphi$  елементарний тілесний кут,  $r_1$  – коефіцієнт відбивання шкіри.

При поглинанні у меланіні інтенсивність змінюється за законом Бугера – Ламберта

$$I_2(l) = I_0' e^{-\mu l c}, \quad (1.3)$$

де  $l$  – оптична товщина середовища,  $c$  – концентрація центрів поглинання,  $\mu$  – коефіцієнт послаблення.

При відбиванні від судини інтенсивність зменшиться

$$dI_3 = I_0' r_2 2dl d\Omega. \quad (1.4)$$

Для обрахунку зміни інтенсивності запишемо отримане рівняння

$$dI(l) = I_0 \cos \Theta - (r_1 I_0' d\Omega + (1 - r_1) \exp(-\mu l c) + r_2 2dl d\Omega) \quad (1.5)$$

Отже, рівняння (5) дає можливість оцінити зміну інтенсивності випромінювання при відбиванні від судин залежно від їх кровонаповненості, що враховується зміною оптичної товщини середовища з врахуванням зміни інтенсивності при поглинанні і відбиванні у шарах шкіри [1,2].

### Реалізація оптико-електронного приладу діагностування стану периферичного кровообігу

Конструктивно фотоплетизмографічні прилади складаються з чотирьох основних частин: вимірювального перетворювача, що включає в себе джерело оптичного випромінювання і фотоприймач, електронного блоку, призначеного для посилення напруги, що знімається з фотоприймача, і виділення корисного сигналу, реєстратора і блоку живлення, що служить для живлення електронних схем і джерела оптичного випромінювання.

В основу створення оптико-електронного приладу діагностування стану периферичного кровообігу, в якому за рахунок введення нових елементів та зв'язків підвищуються функціональні можливості та чутливість реєстрації пристрою. Оптико-електронний прилад діагностування стану периферичного кровообігу (рис. 4) містить джерело випромінювання 1 фотоприймач 2, що підключений до входу підсилювача 3. Вихід підсилювача 3 під'єднаний до входу мікроконтролера 4 обчислювача 5, вихід 6 мікроконтролера 4 з'єднаний зі входом блока спектрального аналізу 7, вихід 8 якого під'єднаний до входу мікроконтролера 4, вихід 9 мікроконтролера 4 з'єднаний зі входом блока еталонів 10, вихід 11 якого з'єднаний зі входом блока зберігання еталонів 12, перший вихід 13 якого з'єднаний зі входом блока еталонів 10, а другий його вихід 14 під'єднано до входу мікроконтролера 4.

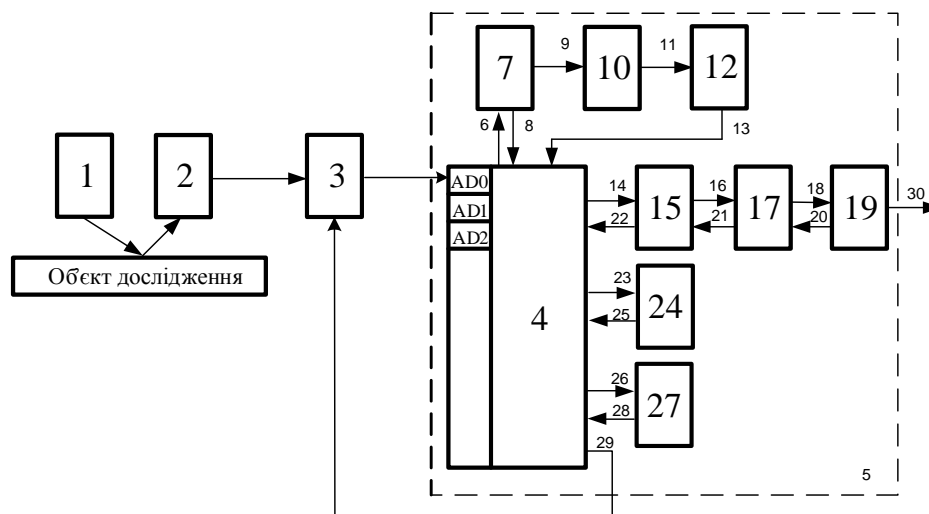


Рисунок 4– Структурна схема оптико-електронного приладу діагностування стану периферичного кровообігу

Оптико-електронний прилад діагностування стану периферичного кровообігу працює таким чином. Одразу після включення пристрою відбувається обнулення блоків обчислювача 5, а саме скид мікроконтролера 4 в нульовий стан та задання дозволу роботи пристрою. Після цього джерело випромінювання 1 випромінює світловий потік, що частково поглинаючись і частково розсіюючись біологічними тканинами досліджуваної ділянки тіла (об'єкту дослідження), подається на фотоприймач 2. Пульсації периферичних судин, що виникають за рахунок проходження пульсової хвилі, викликають коливання оптичної густини живої тканини, тому потік інфрачервоного випромінювання, що пройшов або відбився від тканин, модулюється по амплітуді і наводить у фотоприймачі 2 електричні сигнали, пропорційні цьому потоку.

Сигнал з фотоприймача 2 після фільтрації та посилення на підсилювачі 3 поступає на вхід мікроконтролера 4. Потім, сигнал надходить на вхід блока еталонів 10, де відбувається порівняння отриманого сигналу з записаним раніше в блоці зберігання еталонів 12, його еталонним значенням, в результаті чого визначається ступінь порушення периферичного кровообігу. У випадку, коли необхідно провести спектральний аналіз отриманого сигналу, вмикається блок спектрального аналізу 7, і, сигнал з мікроконтролера 4 надходить на його вхід, де проводиться виділення основних інформаційних ознак отриманого сигналу (рис.5.)

Оскільки мікроконтролер 4 має вбудований АЦП, то в ньому проводиться серія аналого-цифрових перетворень, після чого мікроконтролер 4 перетворює сигнал в цифровий код. З його виходу сигнал надходить на перший вхід 15 блока гальванічної розв'язки 16. З виходу 17 якого сигнал передається до USB-контролера 18. USB контролер 18 використовується для передачі даних в пам'ять персонального комп'ютера 20. Після того, як результати вимірювання потрапляють до персонального комп'ютера 20, на екрані висвітлюється оброблений фотоплетизмографічний сигнал (рис 6).

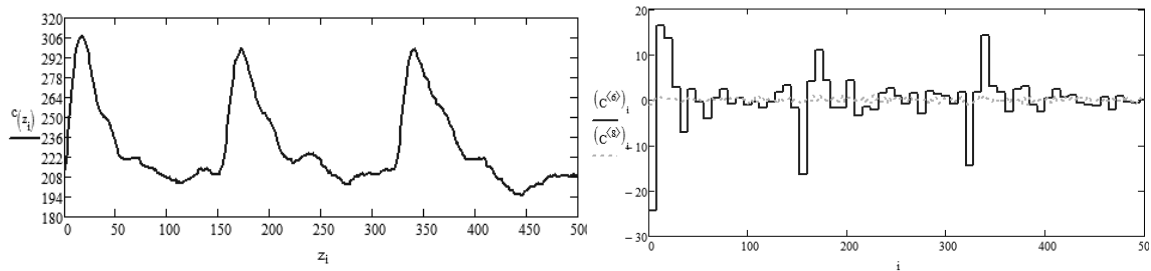


Рисунок 5 – Результат проведення спектрального аналізу фотоплетизмографічного сигналу, що реєструється за допомогою оптико-електронного приладу діагностування стану периферичного кровообігу

Коли сигнали потрапляють в персональний комп'ютер 20, він повідомляє мікроконтролер про те, що сигнал встановився. Це здійснюється через виходи: 21 персонального комп'ютера 20, 22 USB-контролера 18 та 23 блока гальванічної розв'язки 16.

Синхронізація роботи приладу, а саме підсилювача 3 здійснюється завдяки керуючому сигналу з виходу 30, який виробляє мікроконтролер 4.

Для забезпечення мобільності роботи даного приладу та розширення його функціональних можливостей в ньому використовується графічний рідкокристалічний індикатор 25, на який виводиться графічна інформація (фотоплетизмограма), через вихід 24 мікроконтролера 4, в якому запрограмовано модуль роботи з графічним рідкокристалічним індикатором. Це дозволяє проводити діагностування без використання персонального комп'ютера, що є важливим при обстеженні післяопераційних хворих. Крім того, прилад оснащений слотом 28 для SD-карти пам'яті, що дозволяє зберігати дані, та переносити їх в подальшому на персональний комп'ютер.

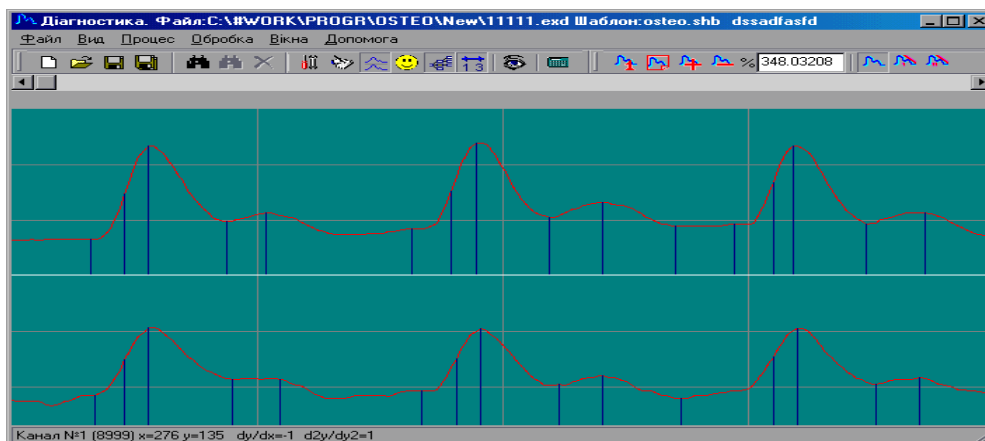


Рисунок 6 – Фотоплетизмографічний сигнал, що реєструється за допомогою оптико-електронного приладу діагностування стану периферичного кровообігу

### Матеріал і методи досліджень

Фізіотерапевтичний вплив проводився за допомогою двосекційних фототерапевтичних апаратів Коробова А. - Коробова В. «Барва - СДС». В обстеженні брали участь 20 хворих з діабетичними ангіопатіями, що знаходилися на лікуванні в санаторії ендокринного профілю «Березовий гай» у м Миргороді. Вік обстежуваних осіб 40-72 року, з них 10 чоловіків і 10 жінок. Тривалість захворювання - 4-12 років. Всі учасники експерименту отримували комплексне лікування: светотерапія, дієтотерапія, корекція глікемії, гідропатичні процедури, прийом миргородської мінеральної води. Для контролю ефективності запропонованого методу фотонного впливу застосовували спосіб оцінювання біоелектричних властивостей клітинних ядер (визначали показник ЕНЯ% - відсоток електронегативних ядер в клітинах букального епітелію), який є інтегральним тестом, що відображає загальний функціональний стан організму обстежуваної особи. Для оцінки колатерального кровообігу в нижніх кінцівках хворих використовували методи лазерної фотоплетизмографія (ФПГ).

### Результати експериментальних досліджень

Нижче наведені результати дослідження.

Приклад 1. Ефект впливу фотонного випромінювання за досліджуваними показниками у хворого Євгена Б., 1973 р.н.. (Зріст 184 см, вага 102 кг); діагноз: цукровий діабет 2 типу середньої тяжкості, ста-

дія субкомпенсації, мікроангіопатія. Фототерапія проводилася три дні випромінюванням зеленого діапазону спектра (525 нм), тривалість кожної процедури - 10 хвилин.

Вихідні значення показника ЕНЯ% - 57,7% по відношенню до вікової норми. Показник ЕНЯ% після першого сеансу світлолікування - 64,4% по відношенню до вікової норми. Показник ЕНЯ% після другого сеансу світлолікування - 71,1% по відношенню до вікової норми.

Показники ФПГ (рис. 7): ліва гомілка - посилення мікроциркуляції крові після трьох сеансів на 75%; права гомілка - посилення мікроциркуляції крові на 11%; ліва стопа - посилення мікроциркуляції крові на 2%; права стопа - посилення мікроциркуляції крові на 24%.

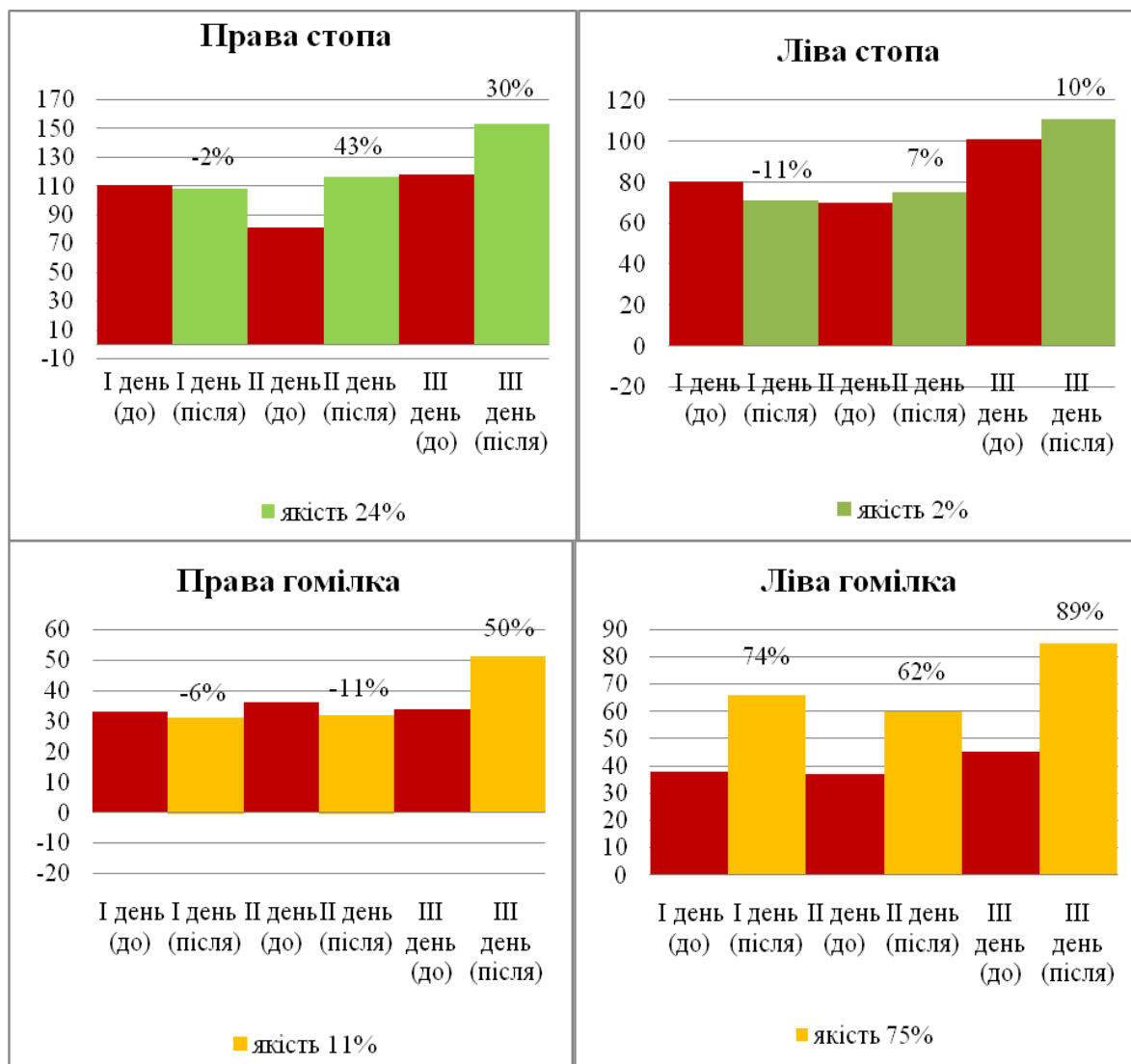


Рисунок 7 – Оцінювання рівня периферійного кровонаповнення при впливі фотонного випромінювання (приклад 1)

Приклад 2. Ефект впливу світлолікування за досліджуваними показниками у хворій Олені П., 1978 р.н.. (Зріст 168 см, вага 100 кг); діагноз: цукровий діабет 2 типу, комбінована ангіопатія. Фототерапія проводилася три дні випромінюванням синього діапазону спектра (470 нм), тривалість кожної процедури - 10 хвилин.

Вихідні значення показника ЕНЯ% - 32,4% по відношенню до вікової норми. Показник ЕНЯ% після першого сеансу світлолікування - 40,5% по відношенню до вікової норми. Показник ЕНЯ% після другого сеансу світлолікування - 45,9% по відношенню до вікової норми.

Показники ФПГ (рис. 8): ліва гомілка - посилення мікроциркуляції крові після трьох сеансів на 95%; права гомілка - посилення мікроциркуляції крові на 13%; ліва стопа - посилення мікроциркуляції крові на 41%; права стопа - посилення мікроциркуляції крові на 198%.

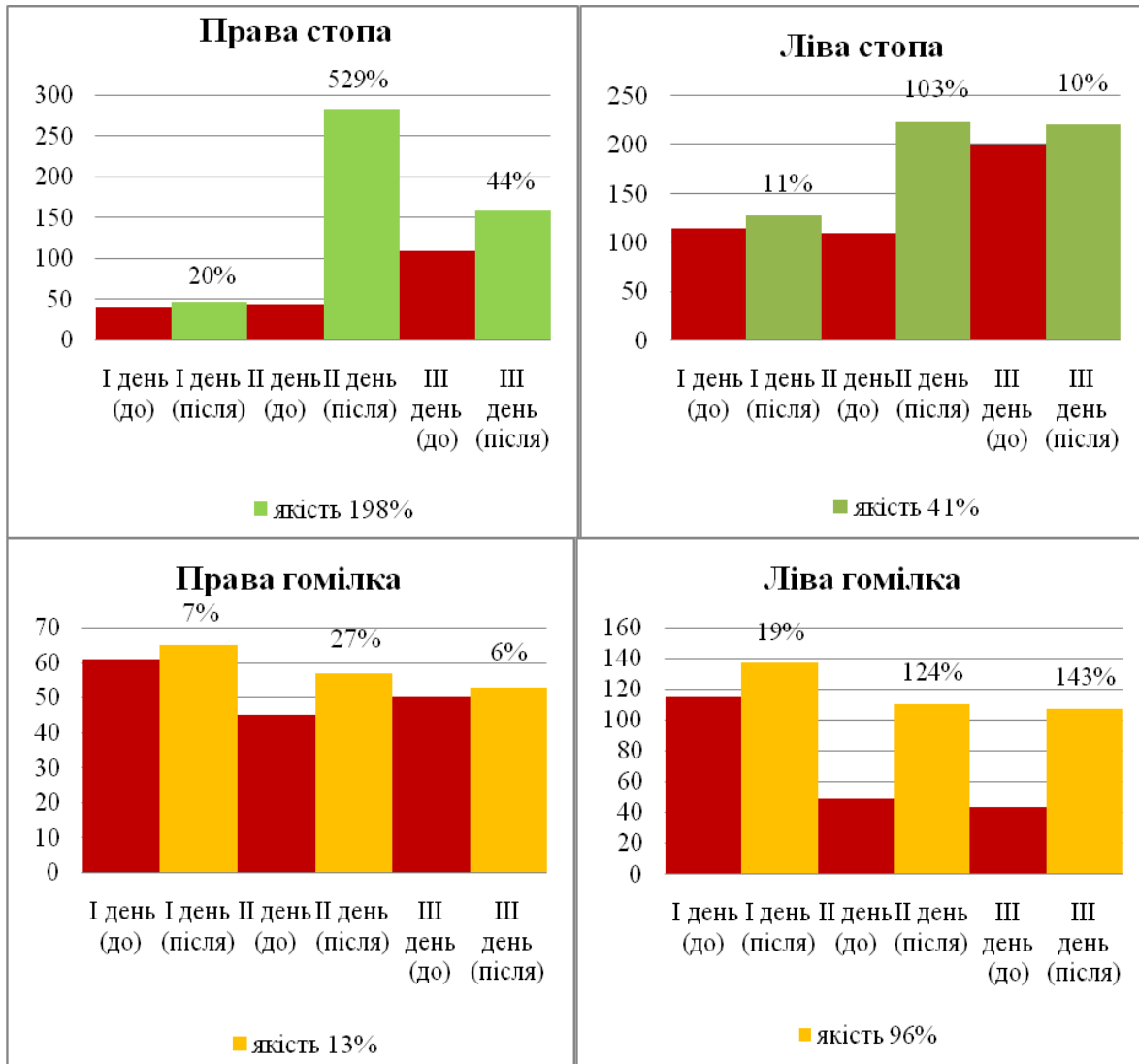


Рисунок 8 – Оцінювання рівня периферійного кровонаповнення при впливі фотонного випромінювання (приклад 2)

### Висновки

1. В статті розглянуто перспективність використання фотоплетизмографічного методу для оцінювання мікроциркуляторних змін периферійного кровообігу для вивчення процесів, які відбуваються при фотонному фізіотерапевтичному впливі для комплексного лікування хронічних ускладнень цукрового діабету.

2. Показано, що фотонне випромінювання сприяє підвищенню еластичності стінок кровоносних судин, еластичності еритроцитів, кисневотранспортній функції крові, активності клітинних мембран, прискоренню процесів регенерації тканин, зменшення окислення ліпідів, нормалізації реологічних показників крові, стимуляції утворення АТФ в мітохондріях, що підвищує біоенергетичний потенціал клітин.

3. Після сеансів світлолікування у хворих зникнув синдром «термоампутації», зменшувалися набряки ніг, а також значно зменшувалася біль в ногах, проходило оніміння, припинялися судоми ніг.

4. Показано, що фотонне випромінювання апарату «Барва - СДС» призводить до протизапальної, десенсибілізуючої, знеболювальної, спазмолітичної, протинабрякової дій, що і підтверджено в даному дослідженні при лікуванні хворих з ускладненнями цукрового діабету.

### Список літератури

1. Фізичні основи біомедичної оптики : монографія / [Павлов С. В., Кожем'яко В. П., Колісник П. Ф. та ін.] – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 155 с.
2. Аналіз методів взаємодії оптичного випромінювання з біотканинами і шляхи їх удосконалення / [С.В.Павлов, В.П.Думенко, Т.І.Козловська та ін.] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.– 2008. – №2. – С. 129-135.

3. Лазерні медичні технології : навчальний посібник / [за редакцією Готри З. Ю. , Павлова С. В.] – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 157 с.
4. Timmis A, Townsend N, Gale C [ et al.]. European Society of Cardiology: Cardiovascular Disease Statistics 2017.*European Heart Journal*. 39 (2018), 508–579. doi: 10.1093/eurheartj/ehx628.
5. The National Audit of Cardiac Rehabilitation (NACR). The National Audit of Cardiac Rehabilitation (NACR) annual statistical report. UK: University of York, 2016.
6. Röhrig B, Salzwedel A, Linck-Eleftheriadis S [et al.]. Outcome based center comparisons in inpatient cardiac rehabilitation – results from the EVA-Reha® Cardiology project. *Rehabilitation (Stuttg)*. 54(1) (2015), 45-52. doi: [10.1055/s-0034-1395556](https://doi.org/10.1055/s-0034-1395556).
7. Soumagne D. Weber classification in cardiac rehabilitation. *Acta Cardiol*. 67(3) (2012), 285-290.
8. Anderson L, Thompson DR, Oldridge N [et al.]. Exercise-based cardiac rehabilitation for coronary heart disease. *Cochrane Database Syst Rev*. 5 (1)(2016).CD001800. doi: 10.1002/14651858.CD001800.pub3.
9. Widmer RJ, Allison TG, Lennon R [et al.]. Digital health intervention during cardiac rehabilitation: A randomized controlled trial. *Am Heart J*. 188 (2017), 65-72. doi: 10.1016/j.ahj.2017.02.016.
10. Bhasipol A, Sanjaroensuttikul N, Pornsuriyasak P [et al.]. Efficiency of the home cardiac rehabilitation program for adults with complex congenital heart disease. *Congenit Heart Dis*. (2018) Sep 14. doi: 10.1111/chd.12659.
11. Olena V. Vysotska, Kostiantyn Nosov, Natalia B. Savina, and etc. An approach to determination of the criteria of harmony of biological objects", Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108083B (1 October 2018); doi: 10.1117/12.2501539.
12. Sergii V. Pavlov, Aleksandr T. Kozhukhar, et al. Electro-optical system for the automated selection of dental implants according to their colour matching // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 3/2017. – P. 121-124. - doi:10.15199/48.2017.03.28
13. Vladimir V. Kholin, Oksana M. Chepurna, Sergii Pavlov et al. Methods and fiber optics spectrometry system for control of photosensitizer in tissue during photodynamic therapy, *Proc. SPIE* 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, 1003138 (September 28, 2016); doi:10.1117/12.2249259
14. 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, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, 100313E (September 28, 2016); doi:10.1117/12.2249373
15. S. V. Pavlov; V. B. Vassilenko; I. R. Saldan; D. V. Vovkotrub; A. A. Poplavskaya, 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
16. Ronald Rovira; Marcia M. Bayas; Sergey V. Pavlov; Tatiana I. Kozlovskaya; Piotr Kisała, 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
17. Natalia I. Zabolotna; Sergii V. Pavlov; Kostiantyn O. Radchenko; Vladyslav A. Stasenko; Waldemar Wójcik, et al. Diagnostic efficiency of Mueller-matrix polarization reconstruction system of the phase structure of liver tissue, *Proc. SPIE* 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015, 98161E (December 18, 2015); doi:10.1117/12.2229018
18. Oleg G. Avrunin; Maksym Y. Tymkovich; Sergii V. Pavlov; Sergii V. Timchik; Piotr Kisała, et al. Classification of CT-brain slices based on local histograms, *Proc. SPIE* 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015, 98161J (December 18, 2015); doi:10.1117/12.2229040;
19. Oksana Chepurna; Irina Shton; Vladimir Kholin; Valerii Voytsehovich; Viacheslav Popov, et al. Photodynamic therapy with laser scanning mode of tumor irradiation, *Proc. SPIE* 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015, 98161F (December 18, 2015); doi:10.1117/12.2229030.
20. Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz// Information Technology in Medical Diagnostics . London, July 11, 2017 by Taylor & Francis Group CRC Press Reference - 210 Pages.
21. Vassilenko, S Valtchev, JP Teixeira, S Pavlov. Energy harvesting: an interesting topic for education programs in engineering specialities / «Internet, Education, Science” (IES-2016) – 2016. – P. 149-156.
22. Roman Kvyetnyy, Olga Sofina, Pavel Orlyk, Andres J. Utreras, Waldemar Wójcik, and etc. "Improving the quality perception of digital images using modified method of the eye aberration correction", Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, 1003113 (28 September 2016).

Стаття надійшла: 01.06.2019.

## References

1. Fizichni osnovy biomedichnoi optikt: monografiya/ [Pavlov S.V., Kojemiako V.P., Kolisnik P.F. ta insh.] – Vynnytsia: VNTU, 2010. – 155 s.
2. Analiz metodiv vzaenodii optichnogo viprominyuvannya z biotkaninoyu I shlyahi ih udoskonalennya / [S.V. Pavlov, V.P. Dumenko, T.I. Kozlovska ta insh] // Vimiryuvalna ta obchislyuvalna technika v technologichnih prosesah.– 2008. – №2. – S. 129-135.
3. Lazerni medichni tehnologii : navchalnii posibnik / [za redaksieyu Gotri Z.Yu., Pavlova S.V.] – Vynnytsia: VNTU, 2017. – 157 s.
4. Timmis A, Townsend N, Gale C [ et al.]. European Society of Cardiology: Cardiovascular Disease Statistics 2017.*European Heart Journal*. 39 (2018), 508–579. doi: 10.1093/eurheartj/ehx628.
5. The National Audit of Cardiac Rehabilitation (NACR). The National Audit of Cardiac Rehabilitation (NACR) annual statistical report. UK: University of York, 2016.
6. Röhrig B, Salzwedel A, Linck-Eleftheriadis S [et al.]. Outcome based center comparisons in inpatient cardiac rehabilitation – results from the EVA-Reha® Cardiology project. *Rehabilitation (Stuttg)*. 54(1) (2015), 45-52. doi: [10.1055/s-0034-1395556](https://doi.org/10.1055/s-0034-1395556).
7. Soumagne D. Weber classification in cardiac rehabilitation. *Acta Cardiol*. 67(3) (2012), 285-290.
8. Anderson L, Thompson DR, Oldridge N [et al.]. Exercise-based cardiac rehabilitation for coronary heart disease. *Cochrane Database Syst Rev*. 5 (1)(2016).CD001800. doi: 10.1002/14651858.CD001800.pub3.
9. Widmer RJ, Allison TG, Lennon R [et al.]. Digital health intervention during cardiac rehabilitation: A randomized controlled trial. *Am Heart J*. 188 (2017), 65-72. doi: 10.1016/j.ahj.2017.02.016.
10. Bhasipol A, Sanjaroensuttikul N, Pornsuriyasak P [et al.]. Efficiency of the home cardiac rehabilitation program for adults with complex congenital heart disease. *Congenit Heart Dis*. (2018) Sep 14. doi: 10.1111/chd.12659.
11. Olena V. Vysotska, Kostiantyn Nosov, Natalia B. Savina, and etc. An approach to determination of the criteria of harmony of biological objects", *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108083B (1 October 2018); doi: 10.1117/12.2501539.
12. Sergii V. Pavlov, Aleksandr T. Kozhukhar, et al. Electro-optical system for the automated selection of dental implants according to their colour matching // *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 3/2017. – P. 121-124. - doi:10.15199/48.2017.03.28
13. Vladimir V. Kholin, Oksana M. Chepurna, Sergii Pavlov et al. Methods and fiber optics spectrometry system for control of photosensitizer in tissue during photodynamic therapy, *Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016*, 1003138 (September 28, 2016); doi:10.1117/12.2249259
14. 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, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016*, 100313E (September 28, 2016); doi:10.1117/12.2249373
15. S. V. Pavlov; V. B. Vassilenko; I. R. Saldan; D. V. Vovkotrub; A. A. Poplavskaya, 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
16. Ronald Rovira; Marcia M. Bayas; Sergey V. Pavlov; Tatiana I. Kozlovskaya; Piotr Kisała, 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
17. Natalia I. Zabolotna; Sergii V. Pavlov; Kostiantyn O. Radchenko; Vladyslav A. Stasenko; Waldemar Wójcik, et al. Diagnostic efficiency of Mueller-matrix polarization reconstruction system of the phase structure of liver tissue, *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015*, 98161E (December 18, 2015); doi:10.1117/12.2229018
18. Oleg G. Avrunin; Maksym Y. Tymkovych; Sergii V. Pavlov; Sergii V. Timchik; Piotr Kisała, et al. Classification of CT-brain slices based on local histograms, *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015*, 98161J (December 18, 2015); doi:10.1117/12.2229040;
19. Oksana Chepurna; Irina Shton; Vladimir Kholin; Valerii Voytsehovich; Viacheslav Popov, et al. Photodynamic therapy with laser scanning mode of tumor irradiation, *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015*, 98161F (December 18, 2015); doi:10.1117/12.2229030.
20. Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz// *Information Technology in Medical Diagnostics* . London, July 11, 2017 by Taylor & Francis Group CRC Press Reference - 210 Pages.

21. Vassilenko, S Valtchev, JP Teixeira, S Pavlov. Energy harvesting: an interesting topic for education programs in engineering specialities / «Internet, Education, Science» (IES-2016) – 2016. – P. 149-156.
22. Roman Kvyetnyy, Olga Sofina, Pavel Orlyk, Andres J. Utreras, Waldemar Wójcik, and etc. "Improving the quality perception of digital images using modified method of the eye aberration correction", Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, 1003113 (28 September 2016).

#### Відомості про авторів

**Злепко Сергій Макарович**, д.т.н., професор, зав. кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету.

**Коробов Анатолій Михайлович** – к.ф.-м.н, директор НВ медико-біологічної корпорації «Лазер та здоров'я», Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна.

**Вуйцик Вальдемар** д.т.н., професор, директор інституту електроніки та інформаційних технологій Люблінського технологічного університету «Любельська Політехніка».

**Клапоушак Андрій Юрійович**, старший викладач кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету.

**Павлов Володимир Сергійович**, магістрант кафедри лазерної та оптико-електронної техніки Вінницького національного технічного університету.

**Козловська Тетяна Іванівна**, к.т.н., доцент кафедри фізики Вінницького національного технічного університету.

**Хоменко Жанна Миколаївна**, к.т.н., доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

S. M. Zlepko<sup>1</sup>, A. M. Korobov<sup>2</sup>, Waldemar Wojcik<sup>3</sup>, A. Yu. Klauposhak<sup>1</sup>,  
V. S. Pavlov<sup>1</sup>, T. I. Kozlovska<sup>1</sup>, Z. M. Khomenko<sup>4</sup>

## OPTICAL-ELECTRONIC TECHNOLOGIES OF EVALUATION OF CHANGE OF PERIPHERAL CIRCULATION AT PHOTON INFLUENCE FOR COMPLEX TREATMENT OF CHRONIC DIAGNOSIS

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

<sup>2</sup>Kharkiv national University by V.N.Karazin

<sup>3</sup>Technological University "Politechnika Lubelska"

<sup>4</sup>State University "Zhytomyr Politechnika"

С. М. Злепко<sup>1</sup>, А. М. Коробов<sup>2</sup>, Вальдемар Вуйцик<sup>3</sup>, А. Ю. Клапоушак<sup>1</sup>,  
В. С. Павлов<sup>1</sup>, Т. И. Козловська<sup>1</sup>, Ж. Н. Хоменко<sup>4</sup>

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ ПРИ ФОТОННОМ ВЛИЯНИИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ЛЕЧЕНИЯ ХРОНИЧЕСКИХ ОСЛОЖНЕНИЙ САХАРНОГО ДИАБЕТА

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

<sup>3</sup>Люблинский технологический университет «Любельская Политехника»

<sup>4</sup>Государственный университет «Житомирская политехника»