

## ПРИЛАДИ

УДК 615.471:616-07

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-1/04>

**Тимчик Г.С.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Шевченко В.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Гурова Т.О.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### КЕРУВАННЯ МАГНІТНО-ЛАЗЕРНОЮ ТЕРАПІЄЮ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАМИ

*Лазеротерапія посідає особливе місце серед немедикаментозних методів лікування. Важливою характеристикою при такому впливі є оцінка фізіологічного стану людини. Для попередження негативних реакцій на лазерну терапію доцільно використовувати комплексну методику, ключову позицію в якій займає система моніторингового контролю адаптаційних властивостей організму під час виконання сеансу, що дозволяє оцінити вплив зовнішніх чинників на адаптаційні резерви організму, які можна контролювати за реакцією кровопостачання органів. Одним з найважливіших показників нормального фізіологічного стану органу або тканини є ступінь їх кровонаповнення, тобто кровонаповнення мікросудин, які їх забезпечують, що дозволяє за показниками мікроциркуляції визначати адаптаційні властивості організму і відстежувати якість лікувального впливу. Для дослідження капілярних кровотоків найкраще підходить методика фотоплетизмографії. На відміну від кардіоінтервалографії плетизмографія може надати інформацію не за одним (частота серцевих скорочень), а за кількома параметрами, найважливішими з яких є тонус периферичних судин, частота серцевих скорочень, ударний об'єм крові.*

*Використання нейромережевих технологій з інтегрованими нечіткими модулями прийняття рішень, а також велика поширеність і відносно невисока вартість персональних комп'ютерів відкривають перспективи у використанні цієї методики. Таким чином, розробка методів і засобів управління лазерною терапією на основі оцінки динаміки адаптаційних властивостей організму за показниками фотоплетизмограми є актуальним завданням.*

*Метою роботи є підвищення ефективності визначення рівня лазерної чутливості шляхом аналізу структурних та спектральних характеристик фотоплетизмограми. Результатами досліджень є запропоновані нами алгоритм проведення процедури та математична модель, що дозволяє адекватно аналізувати фотоплетизмографічні показники будь-якого характеру.*

**Ключові слова:** фотоплетизмограма, лазерна терапія, пульсова хвиля, фізіологічний стан, кардіоцикл.

**Постановка проблеми.** Багаторічний досвід використання лазерної терапії (далі – ЛТ) в медичній практиці свідчить про те, що лазерний вплив має такі істотні переваги над загальноприйнятим медикаментозним лікуванням: відсутність алергічних і токсичних реакцій; розширення можливостей амбулаторної реабілітації та профілактики; простота, безпека і висока мобільність техноло-

гій; екологічна чистота і стерильність лазерного світла; зниження захворюваності з мінімальними витратами на профілактичні заходи. Для ефективною ЛТ необхідно володіти інформацією про величину порогового рівня лазерного випромінювання, що впливає на організм пацієнта [1], адже рівень сприйняття лазерного опромінювання в різних людей різний. Саме тому проблема підбору

індивідуальних доз лазерного впливу досі залишається актуальною.

Необхідність оперативного вирішення даних завдань особливо очевидна з урахуванням наявного дисонансу між наявністю в нозологічних стандартизованих методиках ЛТ широкого діапазону дозових навантажень, пропонованих фахівцям для досягнення у профільних хворих позитивного терапевтичного ефекту, і відсутністю задовільних кінцевих результатів такої терапії внаслідок непередбачуваності індивідуальних реакцій пацієнтів на однакові значення режимів курсового лазерного впливу, а також досить частого розвитку негативних наслідків у найближчі терміни лікування.

Мету роботи спрямовано на підвищення ефективності визначення рівня лазерної чутливості на підставі аналізу структурних та спектральних характеристик фотоплетизмограми [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Попередні дослідження показали, що основною проблемою магнітно-лазерної терапії (далі – МЛТ) є незрозуміння того, як можна перенести результати досліджень контрольних проб за межі живого організму. Це пов'язано з тим, що зворотний зв'язок з контролюючим середовищем відсутній [3]. Вивчення окремих механізмів біологічної дії МЛТ, вирваних з контексту загальних регулюючих чинників, ставить більше питань, ніж дає відповідей. Відсутність єдиної теорії механізмів дії МЛТ на біооб'єкти, яка об'єднує всі відомі ефекти, не дозволяє здійснювати прогноз відносно найважливіших чинників регулювання фізіологічних параметрів живих систем за допомогою МЛТ. Це обмежує розвиток методології МЛТ і вживання методу в клінічній практиці в цілому. На підставі аналітичного огляду можна зробити висновок, що контроль зміни адаптаційного статусу організму дозволяє визначити системні реакції на МЛТ, але відсутність надійних аналітичних критеріїв цих реакцій знижує ефективність управління нею [1; 3–5]. Для здобуття таких критеріїв може бути використана методика пальцевої фотоплетизмографії [6]. Водночас сучасні математичні методи й інформаційні технології, ґрунтуючись на ідеології системного підходу, дозволяють розв'язувати завдання досліджуваних класів з достатньою для практики якістю в умовах нечіткого і неповного опису вихідних даних та структури класів, яка погано формалізується.

Для визначення емоційного стресу [7] використовують частоту серцевих скорочень (далі – ЧСС) і частоту дихання, вираховують коефіцієнт коре-

ляції між цими системами і діагностують стрес при значеннях отриманої величини менших від деякого порогового значення. Однак середньостатистичні нормативи не дають уявлення про функціонування організму в цілому, про його індивідуальні резервні можливості. Крім того, визначення комплексу показників є трудомістким і дорогим процесом, який ускладнює аналіз лікарем через широкі коливання так званої норми. З огляду на це заслуговують на увагу способи, засновані на застосуванні фізичного навантаження і визначенні фізичної працездатності за такими одиничними показниками, як ЧСС, артеріальний тиск (далі – АТ). Основою цих способів є визначення меж нешкідливості впливу фізичних навантажень.

Наприклад, у джерелі літератури [8] пропонується спосіб визначення функціональних можливостей організму людини, заснований на вимірюванні тільки одного параметра – хвилинного об'єму кровообігу – при відповідних фізичних навантаженнях.

У роботі [9] пропонується до широко використовуваних показників ЧСС та АТ додати низку антропометричних показників з одночасним використанням степ-тестів. Однак ускладнення експерименту призводить до необхідності ускладнення і системи оцінок (як правило, бальних), що не дозволяє використовувати ці методи для скринінгу. Збільшення ж показників не завжди призводить до підвищення надійності діагностики. Контроль зміни адаптаційного статусу організму дозволяє визначити системні реакції на ЛТ, але відсутність надійних аналітичних критеріїв цих реакцій знижує ефективність управління ЛТ. Для здобуття таких критеріїв, як показали вітчизняні і зарубіжні учені, може бути використана методика пальцевої фотоплетизмографії. Водночас сучасні математичні методи й інформаційні технології, ґрунтуючись на ідеології системного підходу, дозволяють вирішувати завдання досліджуваних класів з достатньою для практики якістю в умовах нечіткого і неповного опису вихідних даних та структури класів, яка погано формалізується [3; 4].

**Постановка завдання.** Для підвищення ефективності МЛТ за допомогою нечіткого управління інтенсивністю лазерного випромінювання на основі аналізу динаміки структурних і спектральних характеристик фотоплетизмограми необхідно розробити спосіб управління магнітно-лазерною терапевтичною дією в процесі проведення фізіотерапевтичної процедури МЛТ, за допомогою якого можна буде знизити або повністю виключити негативні явища, пов'язані з МЛТ. Для реалізації

способу управління лазерною терапією необхідно обрати фізіологічні сигнали і сформуванати множини інформативних ознак, за допомогою яких можна буде контролювати зміну адаптаційних властивостей організму людини під впливом МЛТ.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Інформативні параметри фотоплетизмограми групуються за двома ознаками:

- на вертикальній осі досліджуються амплітудні характеристики пульсової хвилі, які відповідають анакротичному і дикротичному періоду. Попри те, що ці параметри є відносними, їх вивчення в динаміці надає цінну інформацію про силу судинної реакції. У цій групі ознак вивчається амплітуда анакротичної і дикротичної хвилі та індекс дикротичної хвилі. Останній показник має абсолютне значення і власні нормативні показники;

- на горизонтальній осі досліджуються часові характеристики пульсової хвилі, які надають інформацію про тривалість серцевого циклу, співвідношення і тривалість систоли і діастоли. Ці параметри мають абсолютні значення і можуть порівнюватися з наявними нормативними показниками. У цій групі параметрів вивчається тривалість анакротичної фази пульсової хвилі, тривалість дикротичної фази пульсової хвилі, тривалість фази вигнання, тривалість пульсової хвилі, індекс висхідної хвилі, час наповнення, тривалість фази систоли серцевого циклу, тривалість фази діастоли серцевого циклу, час віддзеркалення пульсової хвилі, частота серцевих скорочень [10].

*Алгоритм проведення процедури та обрахунку отриманих даних*

Проведений аналітичний огляд дозволяє визначити системні реакції на ЛТ за наявності контр-

олю зміни адаптаційного статусу організму, але відсутність аналітичних критеріїв реакцій знижує ефективність керування ЛТ. Для визначення даних критеріїв може бути використана методика пальцевої фотоплетизмографії (рис. 1). Водночас сучасні математичні методи й інформаційні технології, ґрунтуючись на ідеології системного підходу, дозволяють вирішувати поставлені завдання з достатньою для практики якістю в умовах нечіткого і неповного опису вихідних даних та структури класів, яка погано формалізується.

Пропонується такий алгоритм проведення процедури:

- 1) реєструються фізіологічні параметри пацієнта в стані спокою протягом 60 с;
- 2) проводиться вплив на пацієнта тривалістю 30 с (моніторинг стану організму не зупиняється);
- 3) після проведення впливу знімаються показники до моменту повернення їх до норми.

Запропоновано проводити розрахунок параметрів ФПГ за таким алгоритмом обчислення:

- 1) знайти точку мінімуму (рис. 2):

$$\min f(t_i) \in \{f(t_1), f(t_2), \dots, f(t_n)\}, \quad \min f(t_i) < f(t)_{\max}, \quad (1)$$

де  $\min f(t_i)$  – мінімальне значення з множини значень;  $f(t_1), f(t_2), \dots, f(t_n)$  – множина значень функції у конкретний момент часу;  $n$  – кількість значень на осі часу до моменту знаходження наступного мінімального значення;  $f(t)_{\max}$  – максимальне допустиме значення мінімуму функції.

Для відокремлення точки мінімуму функції від точки інцизури, де значення також може перебувати в точці з'єднання неперервно спадаючої і неперервно зростаючої функції, було запропоновано використовувати максимально допустиме значення мінімуму функції  $f(t)_{\max}$ , значення якого

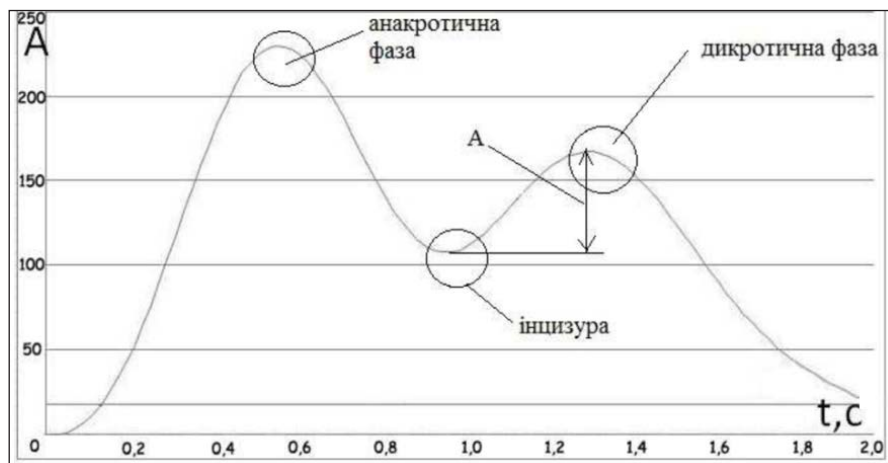


Рис. 1. Основні інформативні показники фотоплетизмограми

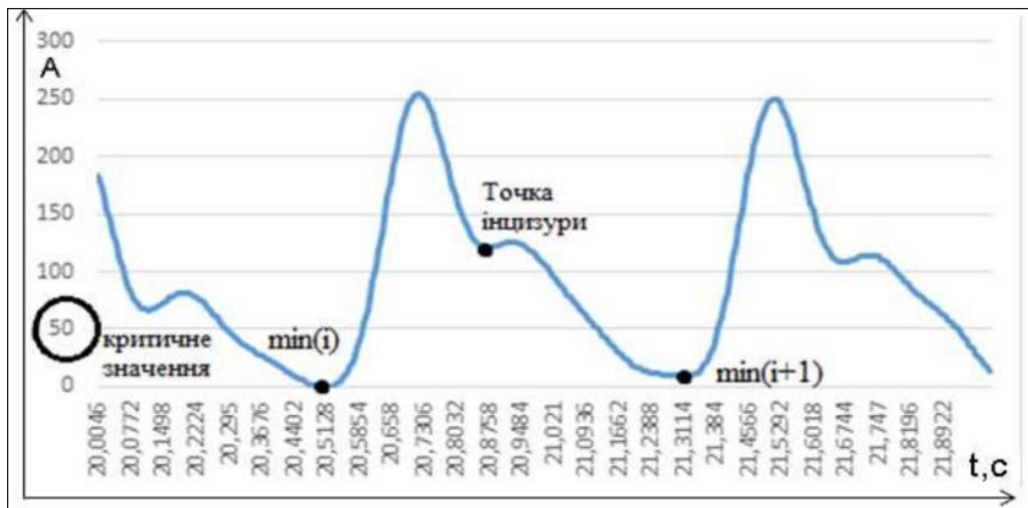


Рис. 2. Дані, отримані до навантажень

емпірично встановлене на основі аналізу плетизмограм і дорівнює 50. Для подальшого обчислення необхідно виконати такі дії:

- 2) знайти наступну точку мінімуму за формулою (1);
- 3) знайти суму інтегралів кожного кардіоциклу:

$$\sum_1^{60} \int_{\min(i)}^{\min(i+1)} f(t) dt, \quad (2)$$

де  $f(t)dt$  – крива, що відповідає значенню пульсу в конкретний момент часу;  $\min(i)$  – точка на осі абсцис, що відповідає найменшому значенню пульсу, початок кардіоциклу;  $\min(i+1)$  – наступна точка мінімального значення пульсу, кінець попереднього кардіоциклу і початок нового.

Значення  $\min(i)$  та  $\min(i+1)$  повинні бути менші від граничного значення, щоб не можна було сплутати їх з точкою інцизури;

4) завдяки використанню методу чисельного інтегрування трапецій рівняння знаходження інтегралу кожного кардіоциклу приймає такий вигляд:

$$\int_a^b f(t) dt \approx \left( \frac{f(a)+f(b)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f(t_i) \right) \cdot h, \quad (3)$$

де  $f(a)$  – значення функції в першій точці мінімуму (початок кардіоциклу);  $f(b)$  – значення функції в другій точці мінімуму (кінець кардіоциклу);  $f(t_i)$  – значення функції в момент часу  $t_i$ ;  $h$  – крок, з яким змінюється значення часу;  $n$  – кількість значень функцій на проміжку  $(a, b)$ ;

5) знаходимо середнє значення площі фігури, обмеженої лінією пульсової хвилі кожного кардіоциклу та осями початку і кінця кардіоциклу:

$$S_{\text{сеп}} = \frac{\sum_1^n S_i}{n}, \quad (4)$$

де  $S_i$  – значення площі фігури для кожного окремого кардіоциклу;  $n$  – кількість кардіоциклів;

6) проводимо вплив на організм пацієнта тривалістю 30 с. Після цього обробка нових даних проходить за формулами (1)–(4);

7) записуємо отримане значення середньої площі фігури при впливі;

8) після завершення впливу проводимо обчислення середньої площі фігури  $S_{\text{сеп}2}$  з інтервалом в 10 секунд за формулами (1)–(4);

9) визначаємо час  $t$ , за який стан пацієнта нормалізується. Середня площа фігури після проведення процедури стане меншою або буде дорівнювати середній площі фігури до процедури  $S_{\text{сеп}2} \leq S_{\text{сеп}}$ .

#### Результати досліджень та їх обговорення

Згідно з п. 1 та формулою (1) знаходимо точку мінімуму – початок кардіоциклу. Такою точкою є значення функції  $f(t)=0$  при  $t=20.5128$  (рис. 2). За п. 2 знаходимо наступну точку мінімуму – значення  $f(t)=9$  при  $t=21.3114$ . За п. 3 вважаємо весь кардіоцикл рівним одному. За формулою (3) обчислюємо значення площі фігури. За п. 5 середнє значення  $S_{\text{сеп}}$  дорівнює 78,6621, оскільки для обчислення ми використовуємо лише один кардіоцикл:

$$\int_a^b f(t) dt \approx \left( \frac{0+9}{2} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} (36+179+253+166+121+124+96+62+30+i+12) \right) \cdot 0,0726 = 78,6621.$$

Отримані дані після припинення навантажень наведені на рис. 3, а дані після відновлення початкового стану наведені на рис. 4. Точка мінімуму  $f(t)=0$  при  $t=113.2956$ , точка мінімуму за п. 2 – значення

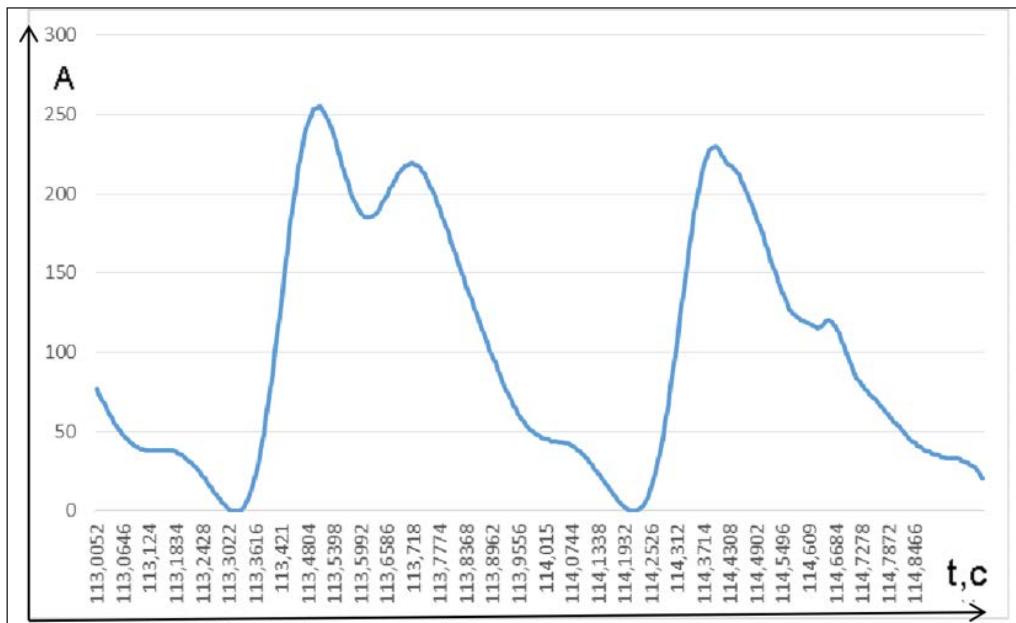


Рис. 3. Дані, отримані після припинення навантажень

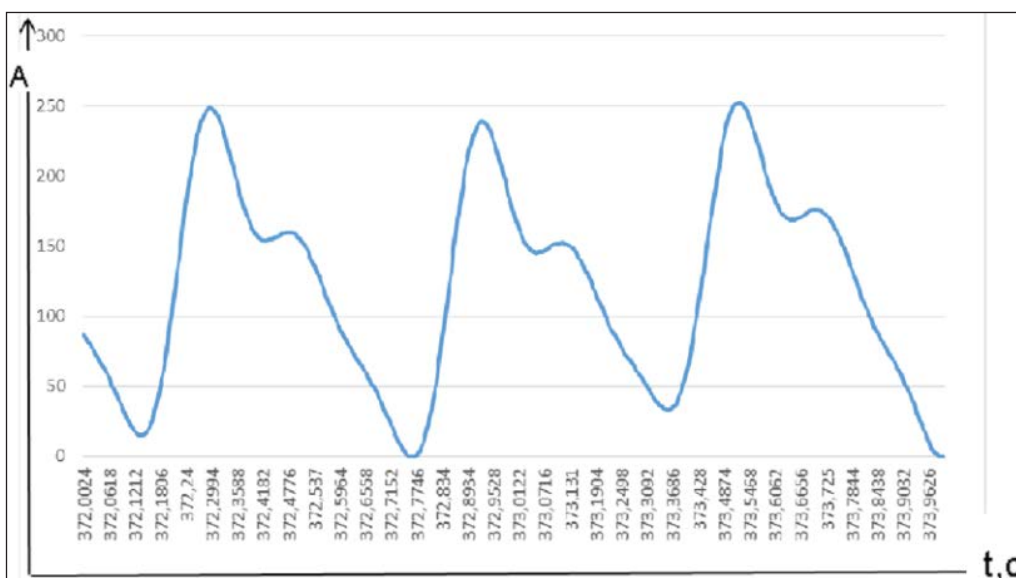


Рис. 4. Дані після відновлення початкового стану

$f(t)=0$  при  $t=114.2394$ . За формулою (3) обчислюємо значення площі фігури після проведення впливу:

$$\int_a^b f(t)dt = \left(\frac{0+0}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} (29+179+253+195+199+217+169+112+64+45+37+11)\right) \cdot 0,0726 = 109,626.$$

Як бачимо, площа фігури збільшилася ( $S_{сеп2}=109,626$ ), що вказує на зміну стану пацієнта. Головним завданням є визначення часу, за який стан пацієнта нормалізується, тобто  $S_{сеп2} \leq S_{сеп}$ . Точка мінімуму  $f(t)=13$  при  $t=372.1476$ , точка мінімуму за п. 2 – значення  $f(t)=6$  при  $t=372.7284$ . За формулою (3) обчислюємо значення площі фігури після проведення впливу:

$$\int_a^b f(t)dt = \left(\frac{13+6}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} (137+249+186+155+152+100+60)\right) \cdot 0,0726 = 76,121.$$

Підтверджується нерівність  $S_{сеп2} \leq S_{сеп}$ . Визначимо час, за який організм відновився:  $t=372,7284-114.2394=258$  с.

**Висновки.** Проведено порівняльний аналіз сучасних методів оцінки фізіологічних показників людини, розроблено математичну модель аналізу показників фотоплетизмограми та визначення функціонального стану організму людини. Дані розробки дають змогу удосконалити проведення аналізу електрофізіологічних сигналів у режимі реального часу на досить тривалих апертурах

спостереження. Це дозволить ставити і вирішувати завдання класифікації функціонального стану людини під час лазерного опромінення. Запропоно-

вано алгоритм проведення процедури визначення сприйнятливості організму людини до лазерної терапії та алгоритм обробки отриманих даних [11].

#### Список літератури:

1. Гаркави Л.Х. Адаптационные реакции и резистентность организма. Ростов-на-Дону, 1990. 224 с.
2. Мошкевич В.С. Фотоплетизмография (Аппаратура и методы исследования). Москва, 1970. 208 с.
3. Гаркави Л.Х. Антистрессорные реакции и активационная терапия. Москва : *Имедис*, 1998. 556 с.
4. Загускин С.Л., Загускина С.С. Лазерная и биоуправляемая квантовая терапия. Москва : «*Квантовая медицина*», 2005. 220 с.
5. Капустина Г.М., Максюшина Г.Н., Малахов В.В. Внутрисосудистое облучение крови, механизмы клинической эффективности, побочные действия, показания и противопоказания. *Новые направления лазерной медицины* : материалы Международной конференции. Москва, 1996. С. 230–231.
6. Капустина Г.М., Сюч Н.И., Наминов В.Л. Пути индивидуального подбора доз внутривенной лазерной терапии. *Совр. возм. лазерн. тер.* : матер. XIV научно-практич. конф. Великий Новгород, Калуга, 2004. С. 52–62.
7. Апанасенко Г.Л. Охрана здоровья здоровых: некоторые проблемы теории и практики валеологии. *Диагностика, средства и практика обеспечения здоровья* : сборник научных трудов. Вып. 1. Санкт-Петербург : Наука, 1993. 49–60 с.
8. Арканникова Г.А., Рудан Л.И., Липницкая Е.А. Результаты применения магнитно-лазерной терапии в условиях кардиологического отделения : матер. II Всероссийской научно-практической конференции по МИЛ-терапии. Москва, 1996. с. 51–52.
9. Асюленская Л.В., Самохвалова В.П., Разживихина Г.Н. Способ оценки адаптационных возможностей детского организма. *Вопросы охраны материнства и детства*. 1989. № 6. 50–54 с.
10. Малиновский Е.Л., Картелишев А.В., Евстигнеев А.Р. Тест-прогнозирование индивидуальной реакции больных на курсовую низкоинтенсивную лазерную терапию. Т. 10. 2006. С.14–21.
11. Тимчик Г.С., Осадчий О.В., Чупіка Б.С. Визначення інформативних показників функціонального стану людини при лазеротерапії. *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія «Приладобудування»*. 2014. Вип. 48 Ч. 2. С. 178–181.

#### Tymchuk G.S., Shevchenko V.V., Hurova T.O. MANAGEMENT OF MAGNETIC LASER THERAPY BASED ON THE ANALYSIS OF PHOTOPLETHYSMOGRAM

*Laser therapy holds a special place among non-drug treatments. An important characteristic of such an impact is the assessment of the physiological state of man. To prevent adverse reactions of LT, it is advisable to use a complex methodology, the key position in which is the system of monitoring the adaptation of the organism during the session, which allows to evaluate the influence of external factors on the adaptation reserves of the organism, which can be controlled by the reaction of blood supply to organs on the LT. One of the most important indicators of the normal physiological state of an organ or tissue is the degree of their blood filling, more precisely, the blood supply of their microvessels, which allows to determine the adaptive properties of the organism and to monitor the quality of therapeutic effects by the microcirculation indicators. As a study of capillary blood flow is the most holistic method of photoplethysmography. Unlike cardiointervalography, plethysmography can provide information, not one by one (heart rate) but by several parameters, the most important of which are the peripheral vascular tone, heart rate, stroke volume of blood.*

*The use of neural network technologies with integrated fuzzy decision-making modules, the high prevalence and relatively low cost of personal computers currently opens up new perspectives on the use of this methodology. Thus, the development of methods and tools for the management of laser therapy based on the evaluation of the dynamics of adaptive properties of the organism according to the photoplethysmogram is an urgent task.*

*This work aims to increase the efficiency of determining the level of laser sensitivity by analyzing the structural and spectral characteristics of the photoplethysmogram. As a result of the research, an algorithm for the procedure was proposed, a mathematical model of the study was created, which allows to adequately analyze photoplethysmographic indicators of any nature.*

**Key words:** photoplethysmogram, laser therapy, pulse wave, physiological state, cardiocycle.