УДК 616-085:615.849
DOI https://doi.org/10.32782/2786-7684/2025-4-18

Пантьо Валерій Валерійович,
кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри мікробіології, вірусології,
епідеміології з курсом інфекційних хвороб,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0000-0002-0207-3372
SCOPUS ID: 57204452937
м. Ужгород, Україна

Данко Ельвіра Михайлівна,
доктор філософії, доцент кафедри терапевтичної стоматології,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0000-0002-3997-9311
SCOPUS ID: 57226699176
м. Ужгород, Україна

Пантьо Валерій Іванович,
кандидат медичних наук, доцент,
доцент кафедри загальної хірургії
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0000-0003-2137-1567
Scopus ID: 57193877789
м. Ужгород, Україна

ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВИДИМОГО СПЕКТРУ ЯК НЕМЕДИКАМЕНТОЗНОГО ТЕРАПЕВТИЧНОГО ЗАСОБУ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

Вступ. Розвиток стійкості інфекційних агентів до протимікробних засобів є природнім процесом та пов'язаний зі здатністю мікроорганізмів знешкоджувати антибактеріальні препарати, виводити їх з клітини, модифікувати мішені антибіотиків, формувати біоплівки тощо. Резистентні мікроорганізми зумовлюють збільшення морбідності та мортальності, спричинюють значні економічні збитки. Внаслідок цього актуальним завданням науковців та практикуючих лікарів є вивчення механізмів впливу немедикаментозних засобів на мікробну клітину з метою їх більш широкого впровадження в клінічну практику.

Мета дослідження – аналіз наукових літературних джерел щодо застосування поляризованого та неполяризованого, а також когерентного та некоректного низькоінтенсивного випромінювання видимого спектру в комплексній терапії захворювань інфекційної та неінфекційної етіології.

Матеріали та методи. Проведено дослідження та аналіз літературних джерел за допомогою пошукових систем PubMed, Google Scholar, Research Gate. Ключові слова пошуку: «фототерапія», «фотодинамічна терапія», «антибіотикорезистентність», «низькоінтенсивне випромінювання в медицині». Глибина пошуку становила 15 років.

Результати досліджень та їх обговорення. З моменту відкриття оптичних квантових пристроїв, які генерують лазерне, світлодіодне, поляризоване поліхроматичне та інші види випромінювання, розпочався якісно новий етап розвитку фототерапії. Внаслідок наявності ряду переваг та майже повній відсутності протипоказів, застосування низькоінтенсивного випромінювання видимого та ближнього інфрачервоного спектру знайшло широке застосування у майже всіх галузях медицини для комплексної терапії широкого кола патологій як інфекційної, так і неінфекційної етіології. Незважаючи на наявність великої кількості наукових публікацій щодо механізму взаємодії низькоінтенсивного випромінювання з біологічними тканинами, чимало питань, зокрема безпосереднього впливу випромінювання низької інтенсивності на мікробні клітини залишаються відкритими.

Висновки. Внаслідок невпинного та незворотного розвитку антибіотикорезистентності мікроорганізмів, використання немедикаментозних засобів лікування розглядається як доповнення та, в деяких випадках, як альтернатива традиційній антибіотикотерапії. Багатогранність ефектів фототерапії та фотодинамічної терапії, доведений позитивний вплив на біологічні об'єкти різного рівня організації робить дану методику одним з найбільш перспективних терапевтичних напрямків.

Ключові слова: антибіотикорезистентність, низькоінтенсивне лазерне випромінювання, світлодіодне випромінювання, антимікробна фотодинамічна терапія, комплексна терапія, фототерапія, антимікробний вплив.

Pantyo Valeriy Valeriiovych, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Microbiology, Virology, Epidemiology with the Course of Infectious Diseases, Uzhhorod National University, ORCID ID: 0000-0002-0207-3372, SCOPUS ID: 57226699176, Uzhhorod, Ukraine

Danko Elvira Mykhailivna, Doctor of Philosophy, Associate Professor at the Department of Therapeutic Dentistry, Uzhhorod National University, ORCID ID: 0000-0002-3997-9311, SCOPUS ID: 57226699176, Uzhhorod, Ukraine

© Пантьо В. В., Данко Е. М., Пантьо В. І., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Pantyo Valeriy Ivanovych, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of General Surgery, Uzhhorod National University, ORCID ID: 0000-0003-2137-1567, SCOPUS ID: 57193877789, Uzhhorod, Ukraine

THE USE OF LOW-POWER VISIBLE SPECTRUM RADIATION AS A NON-MEDICAMENTOUS THERAPEUTIC MEAN (LITERATURE REVIEW)

Introduction. The development of antimicrobial resistance is a natural process and is associated with the ability of microorganisms to neutralize antibacterial drugs, remove them from the cell, modify antibiotic targets, form biofilms, etc. Resistant microorganisms cause increased morbidity and mortality, and significant economic losses. As a result, the urgent task of scientists and practicing physicians is to study the mechanisms of influence of non-drug agents on the microbial cell with the aim of their wider implementation in clinical practice.

The purpose of the work is to analyze scientific literature sources on the use of polarized and non-polarized, as well as coherent and non-coherent low-power visible spectrum radiation in the complex therapy of diseases of infectious and non-infectious etiology.

Materials and methods. A study and analysis of literature sources was conducted using the PubMed, Google Scholar, and Research Gate search engines. Search keywords: “phototherapy”, “photodynamic therapy”, “antibiotic resistance”, “low-intensity radiation in medicine”. The search depth was 15 years.

Results and discussion. Since the discovery of optical quantum devices that generate laser, LED, polarized polychromatic and other types of radiation, a completely new stage in the development of phototherapy has begun. Due to the presence of a number of advantages and the almost complete absence of contraindications, the use of low-intensity radiation of the visible and near-infrared spectrum has found wide application in almost all branches of medicine for the complex therapy of a wide range of pathologies of both infectious and non-infectious etiology. Despite the large number of scientific publications on the mechanism of interaction of low-intensity radiation with biological tissues, many questions, in particular the direct effect of low-power radiation on microbial cells, remain opened.

Conclusions. Due to the continuous and irreversible development of antibiotic resistance of microorganisms, the use of non-medicamentous treatments is considered as a supplement and, in some cases, as an alternative to traditional antibiotic therapy. The versatility of the effects of phototherapy and photodynamic therapy, the proven positive effect on biological objects of different levels of organization make this technique one of the most promising therapeutic directions.

Key words: antibiotic resistance, low-power laser radiation, LED radiation, antimicrobial photodynamic therapy, complex therapy, phototherapy, antimicrobial effect.

Вступ. На сьогоднішній день антибіотики відіграють ключову роль у лікуванні бактеріальних інфекцій, а їх відкриття вважається одним з найважливіших досягнень сучасної науки [1]. Разом з тим, резистентність до антимікробних засобів становить одну з найбільших загроз у галузі охорони здоров’я та є серйозною проблемою при лікуванні та профілактиці захворювань, зумовлених стійкими мікроорганізмами [2]. Стійкість до антимікробних препаратів – здатність бактерій або інших мікроорганізмів протистояти впливу антибіотиків, до яких вони раніше були чутливими [3]. Виникнення та поширення стійкості є природнім процесом, який втім суттєво прискорюється внаслідок надмірного та неправильного використання антибіотиків у медицині, сільському господарстві та ветеринарії [4]. Протягом останніх років велике занепокоєння викликає поява бактерій з множинною, екстенсивною і навіть панрезистентністю до антибіотиків [5].

Механізми лікарської стійкості поділяються на кілька категорій: інактивація або модифікація антибіотика, зміна мішеней, ефлюкс, зниження проникності клітинної стінки. Зазначені типи резистентності можна об'єднати як біохімічну стійкість [6, 7]. Окремим механізмом набуття антибіотикорезистентності є здатність мікроорганізмів до формування біоплівки, що сприяє виживанню бактерій та робить їх значно стійкішими до фізичних та хімічних чинників [8].

Для вирішення або мінімізації проблеми резистентності необхідно застосовувати комплексний підхід, який полягає в розумінні механізмів набуття та поширення стійкості [4], дослідженні нових антимікробних засобів – відкритті нових антибіотиків [9], застосуванні антимікробних пептидів [10], новосинтезованих хімічних речовин з протимікробною активністю [11], а також більш широкому впровадженні новітніх засобів боротьби з інфекційними агентами. До останніх можна віднести терапевтичне застосування бактеріофагів [12], ефірних олій [13], озонотерапії [14], а також фототерапії [15] та фотодинамічної терапії [16].

У зв’язку з наявністю ряду переваг – малою інвазивністю, майже повною відсутністю протипоказів та доведеному позитивному впливі на організм людини [17], дедалі більш поширеним стає застосування низькоінтенсивного випромінювання з метою комплексної терапії та фотодинамічної терапії різноманітних патологій бактеріальної етіології.

Мета роботи – проаналізувати наукові літературні джерела щодо застосування поляризованого та неполяризованого, а також когерентного та некогерентного низькоінтенсивного випромінювання видимого та ближнього інфрачервоного спектру в комплексній терапії захворювань, зумовлених патогенними та умовно-патогенними мікроорганізмами, а також патологічних процесів неінфекційної етіології.

Методологія та методи дослідження. Вивчення та аналіз літературних джерел проводили за допомогою пошукових систем PubMed, Google Scholar, Research Gate. Ключовими словами пошуку були: «фототерапія», «фотодинамічна терапія», «антибіотикорезистентність», «низькоінтенсивне випромінювання в медицині». Глибина пошуку становила 15 років.

Виклад основного матеріалу дослідження

Історія виникнення та сфери застосування фототерапії. Лікування хвороб з використанням світла відоме з давніх часів. В античний період сонячними променями лікували широкий спектр недуг – від порушень опорно-рухового апарату до захворювань шкіри. Винайдення електричного генератора та електричної лампи зумовили трансформацію геліотерапії у фототерапію із застосуванням штучних джерел світла. Засновником сучасної фототерапії вважається Нільс Ріберг Фінзен (1860–1904), який відмітив протимікробну

дію сонячного світла та лікував вовчак за допомогою лампи з «хімічними променями» [18, 19].

Новітній етап розвитку фототерапії пов'язаний з винайденням Теодором Мейманом 1960 року рубінового лазера (LASER – light amplification by stimulated emission of radiation – підсилення світла шляхом вимушеного випромінювання) – пристрою, який генерував електромагнітне випромінювання, однорідне за довжиною хвилі, фазою та поляризацією [20].

На сьогоднішній день низькоінтенсивне лазерне випромінювання (НІЛВ) використовується майже в усіх галузях медицини. Застосування НІЛВ стає дедалі поширенішим методом лікування в галузі фізичної медицини та реабілітації [21], травматології, зокрема для прискорення загоєння переломів [22], дерматології [23], як імуномоделюючий засіб при порушеннях цитокінового балансу [24], онкології [25] та навіть при алопеції [26].

Окрім того, лазери вважаються новітньою технологією в стоматології та успішно використовуються в клінічній практиці, зокрема у випадках, коли традиційні методи лікування не завжди приносять бажаних результатів [27].

Так, завдяки своїм можливостям абляції, проникності та дезінфекції, лазери добре зарекомендували себе в ендодонтичному лікуванні, включаючи лікування кореневих каналів, гіперчутливості дентину та лікування зубного болю, пов'язаного з пульпою та перирадикулярними захворюваннями [28].

В пародонтології використовується лазерне випромінювання як високої інтенсивності, так і НІЛВ. Останнє застосовують для покращення відновлення тканин, регенеративних процесів, мікроциркуляції, а також при антимікробній фотодинамічній терапії. Випромінювання високої інтенсивності слугує як альтернатива нехірургічній пародонтальній терапії [29].

Широке використання лазерів та багатообіцяючі результати відзначають також в стоматологічній імплантології. Лазери можуть використовуватися для травматичного розкриття занурених імплантатів, щоб запобігти втраті кісткової тканини, реконструкції м'яких тканин навколо імплантатів та формування профілю виходу протезних компонентів, підняття хірургічних клаптів, реконструкції кісткової тканини та створення параболічної архітектури тканин [30].

На сьогоднішній день з метою фототерапії та фотодинамічної терапії застосовують також інші джерела низькоінтенсивного випромінювання, зокрема, світлодіодне (LED) та поляризоване [31, 32]. Так основною перевагою використання LED-випромінювання є можливість опромінення значних ділянок тіла. При сумісному застосуванні НІЛВ та LED-випромінювання червоного та ближнього інфрачервоного спектрів доведена значно краща динаміка загоєння ран, зокрема внаслідок відновлення балансу колаген-колагеназа. Описані суттєві аналгетичні та протизапальні ефекти, зменшення післяопераційних набряків [33].

Механізм дії низькоінтенсивного випромінювання на еукаріотичні та прокаріотичні клітини. Фототерапія з використанням низькоінтенсивного випромінювання видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів базується на поглинанні світлових променів, які не супроводжуються термальними ефектами [34]. Специфічність дії НІЛВ реалізуються на різних рівнях організації біологічних об’єктів: субклітинному, клітинному, тканинному, системному, та на рівні організму. Ступінь взаємодії біологічних тканин та низькоінтенсивного випромінювання залежить як від параметрів випромінювання – довжини хвилі, дози та інтенсивності світлового потоку, так і властивостей біотканин – ступінь однорідності та пігментації тканини, її теплові та пружні властивості тощо. Існує чотири типи взаємодії низькоінтенсивного випромінювання з біологічною тканиною: поглинання, розсіювання, відбивання та передача, при цьому домінуючим типом є саме поглинання, оскільки лише поглинена частина лазерного випромінювання проявляє біологічну дію на організм [34, 35, 36]. Поглинання світла визначає, наскільки глибоко світло може проникати в певну тканину. Ступінь абсорбції передусім залежить від довжини хвилі та є важливим у діагностиці та лікуванні патологічних станів тканин. Механізм взаємодії випромінювання з біологічними тканинами зводиться до наступних ефектів: фотобіомодуляція, фотохімічні взаємодії, теплові взаємодії (наприклад, коагуляція та вапоризація), фотоабляція, плазмоіндукована абляція та фотодеструкція [36].

Літературні дані щодо випливу НІЛВ та інших джерел низькоінтенсивного випромінювання видимого та ближнього інфрачервоного діапазону на бактеріальні клітини суперечливі. Згідно даних певних авторів [37], низькоінтенсивне випромінювання не володіє вираженим впливом на інтенсивність росту бактерій, проте зумовлює суттєве покращення та прискорення процесу загоєння ранових інфекцій у піддослідних тварин.

Результати досліджень інших авторів [38] вказують на вплив низькоінтенсивного випромінювання на біоплівкоутворення. При цьому, залежно від параметрів випромінювання, даний вплив може мати як стимуюючий, так і пригнічувальний характер.

Дозозалежність впливу випромінювання низької інтенсивності доводять результати досліджень *in vitro*, проведені рядом науковців [39]. Відповідно до цього, нетривалі експозиції зумовлюють підвищення інтенсивності росту широкого кола грам-позитивних та грам-негативних мікроорганізмів, а також мікроскопічних грибів. Підвищення тривалості експозиції, а відповідно дози випромінювання, зумовлює зворотний ефект – суттєве зниження інтенсивності росту досліджуваної мікрофлори. Вказаний ефект відзначається вже при одноразовому впливі випромінювання та збільшується при повторних експозиціях [40].

Стимуляційним ефектом на ріст мікроорганізмів може бути пояснено підвищення їх чутливості до антибіотиків різних груп після короткотривалого опромінення мікробного інокулюму низькоінтенсивним LED-випромінюванням [41]. Доведено також, що опромінення стандартизованого завису мікроорганізмів підвищує їх чутливість до новосинтезованих хімічних речовин. При цьому, для опромінених культур значення мінімальної інгібуючої та мінімальної

бактерицидної концентрацій були нижчими, порівняно з неопроміненими – контрольними мікрорганізмами [42]. Вищеописані методики можуть бути використані при комплексній антибіотикотерапії широкого кола патологічних процесів бактеріальної етіології. При цьому позитивний ефект лікування досягається як за рахунок підвищення чутливості мікроорганізмів до антибіотиків, так і стимулюючого впливу випромінювання низької інтенсивності на макроорганізм.

Антимікробна фотодинамічна терапія. Вказана методика базується на застосуванні фотосенсибілізатора з подальшим опроміненням низькоінтенсивним випромінюванням відповідної довжини хвилі, що запускає каскад фотохімічних реакцій. Під дією світла молекула фотосенсибілізатора переходить в збуджений стан, а при поверненні до свого нормального стану виділяє енергію. Найбільш часто в ролі акцепторів цієї енергії виступає кисень, з подальшою генерацією активних форм оксигену – супероксиданіону, гідроксил аніону, пероксиду водню тощо, які й зумовлюють протимікробну дію щодо широкого кола бактерій, грибів та вірусів [43, 44].

Головними перевагами методу антимікробної фотодинамічної терапії (аФДТ) є висока ефективність щодо різноманітних інфекційних агентів (бактерій, грибів, вірусів, найпростіших), неможливість розвитку стійкості з боку мікроорганізмів, безболісність, мала інвазивність, можливість застосування як при гострих, так і хронічних захворюваннях, а також деяких видах бактеріоносійства, селективна дія – оточуючі здорові тканини не піддаються деструкції, проведення процедур у важкодоступних місцях, відсутність токсичних та мутагенних ефектів [45].

Результати досліджень *in vitro* [46, 47, 48] свідчать про високу ефективність аФДТ щодо умовно-патогенних мікроорганізмів як у планктонній, так і у біоплівковій формах. При цьому, враховуючи, що для проведення аФДТ використовують фотосенсибілізатор та низькоінтенсивне випромінювання відповідної довжини хвилі, для встановлення ступеню протимікробної дії комплексу цих двох факторів доцільно вивчити їх вплив окремо. Згідно даних ряду дослідників [45-48] сукупний вплив фотосенсибілізатора та низькоінтенсивного випромінювання значно перевищує ефект вказаних факторів у випадку їх окремого застосування.

Як і у випадку фототерапії, основними джерелами низькоінтенсивного випромінювання при аФДТ є НІЛВ, LED та поляризоване випромінювання видимого та ближнього інфрачервоного спектрів [43]. Враховуючи перераховані переваги методики аФДТ, в тому числі високу активність щодо мікробних біоплівок, вона може бути рекомендована для лікування різноманітних патологій як доповнення, або навіть альтернатива традиційній антибіотикотерапії. АФДТ вже зараз знайшла широке застосування в стоматології, хірургії, гінекології, дерматології тощо. Окрім того ФДТ використовується у якості неінвазивного засобу терапії пухлин в онкології [50, 51]. Враховуючи широке поширення стійких до протимікробних засобів мікроорганізмів, перспективними є подальші дослідження механізмів дії аФДТ для ще більш широкого впровадження даного немедикаментозного засобу в клінічну практику.

Висновки. Низькоінтенсивне випромінювання видимого та ближнього інфрачервоного спектру широко застосовується в клінічній практиці з метою фототерапії та фотодинамічної терапії патологічних процесів різноманітної локалізації та етіології. Суперечливі літературні дані щодо безпосереднього впливу низькоінтенсивного випромінювання на бактеріальну клітину спонукають до більш детального вивчення механізмів його дії на планктонні та біоплівкові форми мікроорганізмів. Внаслідок доведеного позитивного впливу на біологічні об'єкти різного рівня організації, наявності широкого вибору апаратури, яка генерує поляризоване та неполяризоване, когерентне та некогерентне монохроматичне та поліхроматичне випромінювання, а також майже повній відсутності протипоказів, застосування низькоінтенсивного випромінювання є перспективним терапевтичним напрямком.

Дослідження проводились за грантової підтримки НФДУ (проєкт № 2023.03/0176).

REFERENCES

1. Marston HD, Dixon DM, Knisely JM, Palmore TN, Fauci AS. Antimicrobial Resistance. JAMA. 2016;316(11):1193–1204. doi: 10.1001/jama.2016.11764

2. Dadgostar, P. Antimicrobial Resistance: Implications and Costs. Infection and Drug Resistance. 2019;12:3903–3910. doi: https://doi.org/10.2147/IDR.S234610

3. Uddin TM, Chakraborty AJ, Khusro A, Zidan BRM, Mitra S, Emran TB, et al. Antibiotic resistance in microbes: History, mechanisms, therapeutic strategies and future prospects. Journal of infection and public health. 2021;14(12):1750-1766. doi: https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.10.020

4. Holmes AH, Moore LSP, Sundsfjord A, Steinbakk M, Regmi S, Karkey A, Guerin PJ, Piddock LJV.Understanding the mechanisms and drivers of antimicrobial resistance. The Lancet. 2016;387(10014):176-187. doi: https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)00473-0

5. Pulingam T, Parumasivam T, Gazzali AM, Sulaiman AM, Chee JY, Lakshmanan M, et al. Antimicrobial resistance: Prevalence, economic burden, mechanisms of resistance and strategies to overcome. European Journal of Pharmaceutical Sciences. 2022;170:106103. doi: https://doi.org/10.1016/j.ejps.2021.106103

6. Uddin TM, Chakraborty AJ, Khusro A, Zidan BRM, Mitra S, Emran TB et al. Antibiotic resistance in microbes: History, mechanisms, therapeutic strategies and future prospects. Journal of infection and public health. 2021;14(12):1750-1766. https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.10.020

7. Reygaert WC. An overview of the antimicrobial resistance mechanisms of bacteria. AIMS microbiology. 2018;4(3):482-501. doi: 10.3934/microbiol.2018.3.482

8. Singh S, Singh SK, Chowdhury I, Singh R. Understanding the Mechanism of Bacterial Biofilms Resistance to Antimicrobial Agents. Open Microbiol J. 2017;11:53-62. doi: 10.2174/1874285801711010053.

9. Singh SB. Discovery and development of kibdelomycin, a new class of broad-spectrum antibiotics targeting the clinically proven bacterial type II topoisomerase. Bioorganic & Medicinal Chemistry. 2016;24(24):6291-6297. doi: https://doi.org/10.1016/j.bmc.2016.04.043

10. Bahar AA, Ren D. Antimicrobial Peptides. Pharmaceuticals. 2013; 6:1543-1575. doi: https://doi.org/10.3390/ph6121543

11. Slivka MV, Korol NI, Fizer MM. Fused bicyclic 1,2,4-triazoles with one extra sulfur atom: Synthesis, properties, and biological activity. Journal of Heterocyclic Chemistry. 2020;57(9):3236-3254. doi: https://doi.org/10.1002/jhet.4044

12. Golkar Z, Bagasra O, Pace DG. Bacteriophage therapy: a potential solution for the antibiotic resistance crisis. The Journal of Infection in Developing Countries. 2014;8(02):129-136. doi: https://doi.org/10.3855/jidc.3573

13. Chouhan S, Sharma K, Guleria S. Antimicrobial Activity of Some Essential Oils – Present Status and Future Perspectives. Medicines. 2017;4:58. doi: https://doi.org/10.3390/medicines4030058

14. Song M, Zeng Q, Xiang Y, Gao L, Huang J, Huang, J, et al. The antibacterial effect of topical ozone on the treatment of MRSA skin infection. Molecular medicine reports. 2018;17(2):2449-2455. doi: https://doi.org/10.3892/mmr.2017.8148

15. Pantyo VV, Pantyo VI, Danko EM. The impact of piler-radiation on the growth rate of opportunistic microorganisms. Reports of Vinnytsia National Medical University. 2018;22(2):272-275. doi: https://doi.org/10.31393/reports-vnmedical-2018-22(2)-07

16. Gonçalves AS, Leitão MM, Fernandes JR, Saavedra MJ, Pereira C, Simões M, et al. Photodynamic activation of phytochemical-antibiotic combinations for combatting *Staphylococcus aureus* from acute wound infections. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2024;258:112978. doi: https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2024.112978

17. Mahmoudi H, Bahador A, Pourhajibagher M, Alikhani MY. Antimicrobial photodynamic therapy: an effective alternative approach to control bacterial infections. Journal of Lasers in Medical Sciences. 2018;9(3):154-160. doi: https://doi.org/10.15171/jlms.2018.29

18. Kurz B, Berneburg M, Bäumler W, Karrer S. Phototherapy: Theory and practice. JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft. 2023;21(8):882-897. doi: https://doi.org/10.1111/ddg.15126

19. Grzybowski A, Sak J, Pawlikowski J. A brief report on the history of phototherapy. Clinics in Dermatology. 2016;34(5):532-537. doi: https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2016.05.002

20. Farivar S, Malekshahabi T, Shiari R. Biological Effects of Low Level Laser Therapy. J Lasers Med Sci 2014;5(2):58-62 PMID: 25653800

21. Hashmi JT, Huang YY, Osmani BZ, Sharma SK, Naeser MA, Hamblin MR. Role of low-level laser therapy in neurorehabilitation. Pm&r. 2010;2:S292-S305. doi: https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2010.10.013

22. Kazem Shakouri S, Soleimanpour J, Salekzamani Y. et al. Effect of low-level laser therapy on the fracture healing process. Lasers Med Sci. 2010;25:73-77. doi: https://doi.org/10.1007/s10103-009-0670-7

23. Barros NDM, Sbroglio LL, Buffara MDO, Baka JLCES, Pessoa ADS, Azulay-Abulafia L.. Phototherapy. Anais brasileiros de dermatologia. 2021;96(4):397-407. doi: https://doi.org/10.1016/j.abd.2021.03.001

24. Mesquita-Ferrari RA, Martins MD, Silva Jr JA, Da Silva TD, Piovesan RF, Pavesi VCS, et al.. Effects of low-level laser therapy on expression of TNF-α and TGF-β in skeletal muscle during the repair process. Lasers in Medical Science. 2011;26(3):335-340. doi: https://doi.org/10.1007/s10103-010-0850-5

25. Cai Y, Chai T, Nguyen W, Liu J, Xiao E, Ran X, et al. Phototherapy in cancer treatment: strategies and challenges. Signal Transduction and Targeted Therapy. 2025; 10(1):115. doi: https://doi.org/10.1038/s41392-025-02140-y

26. Avci P, Gupta GK, Clark J, Wikonkal N, Hamblin MR. Low-level laser (light) therapy (LLLT) for treatment of hair loss. Lasers in surgery and medicine. 2014;46(2):144-151. doi: https://doi.org/10.1002/lsm.22170

27. David CM, Gupta P. Lasers in dentistry: a review. Int J Adv Health Sci. 2015;2(8):7-13.

28. Huang Q, Li Z, Lyu P, Zhou X, Fan Y. Current Applications and Future Directions of Lasers in Endodontics: A Narrative Review. Bioengineering. 2023; 10(3):296. doi: https://doi.org/10.3390/bioengineering10030296

29. Passanezi E, Damante CA, de Rezende MLR, Greghi SLA. Lasers in periodontal therapy. Periodontology 2000. 2015; 67(1): 268-291. doi: https://doi.org/10.1111/prd.12067

30. Romanos GE, Gupta B, Yunker M, Romanos EB, Malmstrom H. Lasers use in dental implantology. Implant dentistry. 2013; 22(3):282-288. doi: 10.1097/ID.0b013e3182885fcc

31. Danko EM, Kostenko YY, Pantyo VV. The use of LED radiation in the treatment of periodontitis. 2024; (5):17-22. https://doi.org/10.33295/1992-576X-2024-5-17

32. Danko EM, Kostenko YY, Pantyo VV. The use of PILER radiation in the complex treatment of periodontitis. 2024; 1(2024):70-75. doi: https://doi.org/10.32782/2786-7684/2024-1-10

33. Kim WS, & Calderhead RG. Is light-emitting diode phototherapy (LED-LLLT) really effective?. Laser therapy. 2011;20(3):205-215. doi: https://doi.org/10.5978/islsm.20.205

34. Mussttaf RA, Jenkins DF, & Jha AN. Assessing the impact of low level laser therapy (LLLT) on biological systems: a review. International journal of radiation biology, 2019;95(2):20-143. doi: https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1524944

35. Maghfour J, Ozog DM, Mineroff J, Jagdeo J, Kohli I, Lim HW. Photobiomodulation CME part I: Overview and mechanism of action. J Am Acad Dermatol. 2024 Nov;91(5):793-802. doi: https://doi.org/10.1016/j.jaad.2023.10.073

36. Keiser, G. (). Light-Tissue Interactions. In: Biophotonics. Graduate Texts in Physics. Springer, Singapore2016. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0945-7_6

37. Pereira PR, de Paula JB, Cielinski J, Pilonetto M, Von Bahten LC. Effects of low intensity laser in in vitro bacterial culture and in vivo infected wounds. Rev Col Bras Cir. 2014;41:4955. doi: https://doi.org/10.1590/S0100-69912014000100010

38. Thomé AMC, Souza BP, Mendes JPM, Soares LC, Trajano ETL, Fonseca AS. Dichromatic and monochromatic laser radiation effects on survival and morphology of Pantoea agglomerans. Laser Phys. 2017;27(6):055602. doi: 10.1088/1555-6611/aab65

39. Fonseca AS, Campos VMA, Magalhães LAG, Paoli F. Nucleotide excision repair pathway assessment in DNA exposed to low-intensity red and infrared lasers. Brazilian Journal of Medical and Biological Research. 2015;48(10):929-938. doi: https://doi.org/10.1590/1414-431X20154457

40. Dixit S, Ahmad I, Gular K, Eid RA, Reddy RS. et al. Efficacy of single versus multiple exposure by electromagnetic modalities on gram-negative and positive bacterial strains in an in-vitro model. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2021;28(3):1678-1686. doi: https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.12.004

41. Pantyo VV, Koval GM, Pantyo VI, Danko EM, & Gulyar SA. Influence of led radiation on the staphylococcus aureus sensitivity to antibiotics. Photobiology and Photomedicine. 2019;26:(56-62). doi: https://doi.org/10.26565/2076-0612-2019-26-07

42. Pantyo VV, Haleha OV, Kut DZ, Kut MM, Onysko MY, Danko EM, Koval GM, Pantyo VI, Haza KV, Bulyna TB. The effect of low-intensity laser radiation on the sensitivity of Staphylococcus aureus to some halogen-containing azaheterocycles . Regul. Mech. Biosyst. 2024;15(2): 230-234. doi: https://doi.org/10.15421/022434

43. Piksa M, Lian C, Samuel IC, Pawlik KJ, Samuel ID, & Matczyszyn K. The role of the light source in antimicrobial photodynamic therapy. Chemical Society Reviews. 2023;52(5):1697-1722. doi: https://doi.org/10.1039/D0CS01051K

44. Polat E, Kang K. Natural photosensitizers in antimicrobial photodynamic therapy. Biomedicines, 2021;9(6):584. doi: https://doi.org/10.3390/biomedicines9060584

45. Mahmoudi H, Bahador A, Pourhajibagher M, Alikhani MY. Antimicrobial photodynamic therapy: an effective alternative approach to control bacterial infections. Journal of Lasers in Medical Sciencesю. 2018;9(3):154-160. doi: https://doi.org/10.15171/jlms.2018.29

46. Pantyo VV, Koval GM, Danko EM, Pantyo VI. Complex impact of polarized and non-polarized low intense light and methylene blue on growth rate of some opportunistic microorganisms . Regul. Mech. Biosyst. 2020;11(4):520-3. doi: https://doi.org/10.15421/022079

47. Fu XJ, Fang Y, Yao M. Antimicrobial photodynamic therapy for methicillin-resistant Staphylococcus aureus infection. BioMed Research International. 2013;2013(1):159157. doi: https://doi.org/10.1155/2013/159157

48. Pantyo VV, Pallah OV, Boiko NV, Danko EM, Koval GM, Pantyo VI, Chobey AS. Impact of methylene blue and LED radiation on microbial biofilms. Regul. Mech. Biosyst.. 2025;16(1):e25014. doi: https://doi.org/10.15421/0225014

49. Kwiatkowski S, Knap B, Przystupski D, Saczko J, Kędzierska E, Knap-Czop K, Kulbacka J. Photodynamic therapy – mechanisms, photosensitizers and combinations. Biomedicine and Pharmacotherapy. 2018;106:1098–1107. doi: https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.07.049

50. Rajesh S, Koshi E, Philip K, Mohan A. Antimicrobial photodynamic therapy: An overview. Journal of Indian Society of Periodontology. 2011;15(4):323–327. doi: https://doi.org/10.4103/0972-124X.92563

51. Agostinis P, Berg K, Cengel KA, Foster TH, Girotti AW, Gollnick SO, Hahn SM, Hamblin MR, Juzeniene A, Kessel D, Korbelik M, Moan J, Mroz P, Nowis D, Piette J, Wilson BC, Golab J. Photodynamic therapy of cancer: an update. CA Cancer J Clin. 2011;61(4):250-81. doi: https://doi.org/10.3322/caac.20114

Дата надходження статті: 15.10.2025
Дата прийняття статті: 14.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025