

СПЕКТРАЛЬНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ФОТОДИСОЦІАЦІЇ ОКСИГЕМОГЛОБІНУ ПІД ДІЄЮ БЛИЖНЬОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

¹⁾Турбіцький О. С., ¹⁾Терещенко М. Ф., ^{1,2)}Велигоцький Д. В., ²⁾Мамілов С. О.,
^{1,3)}Комарова О. С.

¹⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²⁾Інститут магнетизму імені В.Г. Бар'яхтара НАН України, Київ, Україна

³⁾ПП «Фотоніка плюс», Черкаси, Україна

E-mail: turbitskiy0@gmail.com, agfarkpi@i.ua

Фототерапія є неінвазивним методом впливу неіонізуючого випромінювання на біотканини, який реалізує свої ефекти через фотобіомодуляційні та фотодисоціаційні процеси. У ближньому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні фотонна енергія здатна змінювати стан гемоглобіну, модифікуючи насичення крові киснем (SaO_2) шляхом часткового розриву зв'язку $\text{Fe}-\text{O}_2$ у молекулі гему. Актуальність дослідження зумовлена потребою у розробці персоналізованих методів фотомодуляції мікроциркуляції та тканинного дихання, а також у кількісному визначенні спектральних характеристик цього ефекту. Для реалізації поставлених завдань була розроблена та апробована методика неінвазивного моніторингу змін сатурації крові з високою часовою роздільною здатністю під впливом лазерного опромінення різних довжин хвиль (808, 830, 850 і 980 нм). З метою усунення індивідуальних відмінностей у початковій сатурації розраховувалася відносна величина $\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2$. Вимірювання проводилися транскутанно з використанням фотоплетизмографічного сенсора, що дозволяло фіксувати динаміку оксигенації крові в реальному часі. Результати показали, що найбільша зміна відносної сатурації спостерігалася при довжині хвилі 808 нм ($\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2 = 4,26 \pm 0,67\%$), тоді як при 830 нм вона становила $3,92 \pm 0,71\%$, для 850 нм – $2,72 \pm 0,63\%$, а для 980 нм – $0,79 \pm 0,45\%$. Виявлена майже лінійна залежність зменшення $\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2$ зі збільшенням довжини хвилі у межах 800–1000 нм свідчить про спектральну селективність процесу фотодисоціації HbO_2 , зумовлену особливостями поглинання гему та оптичними властивостями біотканин. Отримані дані узгоджуються з теоретичними моделями фотонної взаємодії та попередніми експериментами авторів, що підтверджує відтворюваність і стабільність ефекту. Показано, що випромінювання у діапазоні 800–850 нм є найбільш ефективним для ініціювання часткового розриву зв'язку $\text{Fe}-\text{O}_2$, що свідчить про можливість цілеспрямованого регулювання локальної оксигенації крові за допомогою низькоінтенсивного ІЧ-випромінювання. Отримані результати формують наукове підґрунтя для подальшої розробки неінвазивних технологій фотомодуляції мікроциркуляції та тканинного дихання, а також для оптимізації параметрів фототерапевтичних пристроїв у медичній і реабілітаційній практиці. Наступними етапами дослідження передбачено аналіз комбінованої дії кількох спектральних компонентів та розширення статистичної вибірки для підвищення достовірності висновків.

Ключові слова: фототерапія, лазерне опромінення, фотобіомодуляція, фотодисоціація гемоглобіну, оксигемоглобін, насичення артеріальної крові киснем, ближнє інфрачервоне випромінювання, неінвазивний моніторинг, фотоплетизмографія, спектральна залежність, зв'язок $\text{Fe}-\text{O}_2$.

Вступ. Постановка проблеми

Фототерапія – це кероване застосування неіонізуючого випромінювання у видимому, ближньому інфрачервоному та частково ультрафіолетовому діапазонах для індукції корисних біологічних ефектів у тканинах [1, 2]. Її сучасні варіації охоплюють фотобіомодуляцію [3], фотодинамічну терапію [4, 5], УФ-фототерапію [6] та яскраву світлотерапію [7-9], яка використовується для нормалізації циркадних ритмів і психоемоційного стану. Основою терапевтичного ефекту є взаємодія фотонів із клітинними хромофорами, серед яких ключову роль відіграють цитохро-

моксидаза (ССО) [2, 10], гемопротейни та фотосенсибілізатори [4], що запускають низку фотофізичних і фотохімічних процесів. Збудження цих структур призводить до підвищення активності дихального ланцюга мітохондрій, утворення активних форм кисню та оксиду азоту, модуляції судинного тонуусу й клітинної сигналізації, що разом формують біологічну відповідь, спрямовану на репарацію, протизапальний ефект і нормалізацію метаболізму.

Біомедичні застосування фототерапії охоплюють багато розділів медицини, зокрема дерматологію, неврологію, реабілітацію, онкологію та судинну медицину. У дерматології ультрафіолетове опромі-

нення впливає на проліферацію та диференціацію кератиноцитів, чинить виражену імуномодуючу дію та широко застосовується для лікування хронічних шкірних патологій. Ультрафіолетова фототерапія (UVA, UVB, PUVA) залишається ефективним методом терапії псоріазу, екземи та вітіліго [5, 6], причому використання вузькосмугового UVB-випромінювання (311–313 нм) забезпечує оптимальний баланс між клінічною ефективністю та безпечністю, зменшуючи ризики фотостаріння й мутагенних ушкоджень. Фотобіомодуляція у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні (620–1100 нм), що реалізує переважно нетеплові механізми дії – активацію цитохромоксидази (ССО), підвищення синтезу АТФ і вивільнення оксиду азоту (NO) – успішно використовується у фізіотерапії для пришвидшення регенерації тканин, зменшення запалення, а також для досягнення протизапального, анальгетичного та вазорегулюючого ефектів [11, 12].

В онкології фотодинамічна терапія, що базується на селективному накопиченні фотосенсибілізаторів у патологічних клітинах і подальшому опроміненні з генерацією синглетного кисню та реактивних форм, здатних руйнувати клітинні мембрани й органели [13, 14], забезпечує вибірккову деструкцію пухлин із мінімальним ушкодженням здорових тканин і є особливо ефективною для лікування поверхневих новоутворень шкіри та слизових оболонок. У кардіометаболічній медицині інфрачервоне випромінювання сприяє покращенню мікроциркуляції, відновленню ендотеліальної функції та підвищенню біодоступності оксиду азоту. У неврології та психіатрії світлотерапія, зокрема яскрава світлотерапія, демонструє високу ефективність у зниженні симптомів депресії, стабілізації сну та корекції циркадних ритмів, причому контрольований вплив білого світла певної інтенсивності сприяє відновленню добових біоритмів і використовується для лікування сезонних афективних розладів та інших порушень сну [7–9].

Фізичні основи фототерапії ґрунтуються на закономірностях розсіювання і поглинання світла в біотканинах, які мають складну багатшарову структуру. Хромофори – гемоглобін, меланін, вода, ліпіди – визначають спектральну селективність взаємодії. У межах терапевтичного «оптичного вікна» (650–950 нм) коефіцієнт поглинання мінімальний, що забезпечує проникнення випромінювання на кілька міліметрів у глибину тканин. Біологічна реакція формується сукупністю фотонних процесів: збудженням електронів, утворенням короткоживучих проміжних станів, активацією фотохімічних реакцій з утворенням ROS та фотодисоціацією лігандів у гемопротеїнах. Важливими параметрами є довжина хвилі, потужність, енергетична щільність і тривалість експозиції, які повинні підтримуватися в межах так званого «біологічного вікна» – діапазону доз, де ефект є позитивним, тоді як перевищення порогу може призвести до пригнічення клітинної активності [2, 13].

Технічна реалізація фототерапії базується на сучасних оптичних технологіях. Лазерні системи забезпечують точне дозування енергії та глибоке проникнення, тоді як світлодіодні масиви дають можливість створювати багатоспектральні прилади для одночасної стимуляції різних хромофорів [15]. Розробляються компактні системи з оптоволоконною доставкою світла або панельні рішення для широкоплощинного опромінення [16, 17]. У новітніх приладах передбачено інтегровані датчики зворотного зв'язку – фотодетектори, спектральні модулі, багатохвильові фотоплетизмографічні сенсори, які дозволяють в режимі реального часу контролювати стан оксигенації, кровонаповнення та теплові ефекти [18, 19]. Це відкриває шлях до персоналізованої фототерапії з адаптивним керуванням інтенсивністю та довжиною хвилі, а також до безпечного поєднання з іншими фізіотерапевтичними методами [20].

Особливе місце у сучасній концепції світлотерапії займають фотодисоціаційні процеси у біологічних тканинах. Під дією світла відбувається розрив зв'язків між атомом заліза у гемі та газовими лігандами – NO, CO, O₂. Це призводить до вивільнення біологічно активних молекул, зокрема оксиду азоту, який виступає потужним вазодилатором і регулятором клітинного метаболізму [2, 12]. Фотоіндуковане вивільнення NO сприяє покращенню мікроциркуляції, зниженню агрегації тромбоцитів та посиленню трофічних процесів [21, 22]. Подібні механізми спостерігаються і для оксигемоглобіну (HbO₂) та карбоксигемоглобіну (HbCO): фотонна енергія здатна тимчасово змінювати афінність гемі до газових лігандів, полегшуючи вивільнення кисню або оксиду вуглецю, що відкриває нові підходи до неінвазивного впливу на тканинне дихання та до потенційного лікування отруєнь CO [23–26]. Сучасні методи спектроскопії та багатохвильової фотоплетизмографії дозволяють реєструвати ці ефекти *in vivo*, що надає нові можливості для дослідження фотодинамічних процесів у судинній системі.

У попередніх роботах авторів [27–31] експериментально продемонстровано існування фотодисоціації HbO₂ та HbCO під дією видимого лазерного випромінювання. Показано, що лазерне опромінення судин призводить до зниження насичення крові киснем, що свідчить про часткове розщеплення зв'язку Fe–O₂ *in vivo*. Визначено квантову ефективність процесу у діапазоні 525–860 нм, виявлено вищу фоточутливість HbCO порівняно з HbO₂ та підтверджено спектральну залежність ефекту, узгоджену з «оптичним вікном» біотканин. І хоча фотодисоціація HbO₂ була широко висвітлена авторами в попередніх роботах, але все рівно залишаються області в спектральному діапазоні, які були досліджені не достатньо.

Метою даної роботи є виявлення залежності зміни насичення крові киснем під час взаємодії лазерного випромінювання ближнього інфрачервоного діапазону 800–980 нм з кровонаповненою біологіч-

ною тканиною з використанням неінвазивного вимірювання HbO_2 .

Матеріали та методи дослідження

У дослідженні взяли участь 10 здорових добровольців віком від 19 до 73 років, серед яких були особи різної статі та з різними звичками (зокрема, палінням).

Автоматизована система лазерно-світлової терапії

Експериментальні вимірювання проводилися з використанням апарату лазерного діодного «LIKA-LD» (рис. 1). Такий апарат використовується для проведення наукових досліджень і складається з електронного блоку та лазерних модулів. Як випромінюючий елемент в лазерному модулі слугує лазерний діод відповідної довжини хвилі. До електронного блоку апарату одночасно можна підключати три незалежні один від одного лазерних модуля для роботи з декількома довжинами хвиль [32].

Розроблена автоматизована система лазерно-світлової терапії (АСЛСТ) на базі апарату «LIKA-LD» дозволила сформувати, як моно так і мульти-спектральне лазерне випромінювання від 395 нм до 980 нм.



Рис. 1. Апарат лазерний діодний «LIKA-LD» [32]

Структурно-функціональна схема модернізованої автоматизованої системи лазерно-світлової терапії на базі апарату лазерного діодного «LIKA-LD» представлена на рис. 2 [33].

Автоматизована система лазерної терапії, в складі апарату лазерного діодного «LIKA-LD» працює наступним чином. Через блок живлення 20 напруга подається на всі блоки та пристрої системи. З блоку клавіатури 22 або з системи дистанційного керування, що складається з виносного пульта 33 та мікропроцесора 29, задається режим роботи лазерних випромінювачів 26-0; 26-1; 26-2, який відображається в блоці індикації 23. Перед початком процедури вихідний кінець рукоятки з лазерних випромінювачів по чергову підносять до фотоприймача 25. Через блок контролю оптичної потужності 24, що

з'єднаний з блоком керування 21, на екрані блока індикації 23 фіксується значення потужності лазерного випромінювання кожного з випромінювачів. Якщо це значення відповідає заданому режиму, блок управління 21 переводить систему в робочий режим для отримання мультиспектрального вихідного лазерного випромінювання. Лазерне випромінювання від випромінювача 26-0 використовується і для лікувального впливу на поверхню тіла людини. Одночасно випромінювання з лазерних випромінювачів 26-1; 26-2; 26-3 через суматор світлових сигналів 30 фокусується на об'єктиві 31, а з нього надходить у світловод 32. На кінці світловода розміщені температурні датчики 27, які контролюють температуру нагріву біологічної тканини в зоні дії лазерного променя. При перевищенні температури 42°C система відключає блок живлення 20 і зупиняє формування променів, що створює умови безпечного використання.

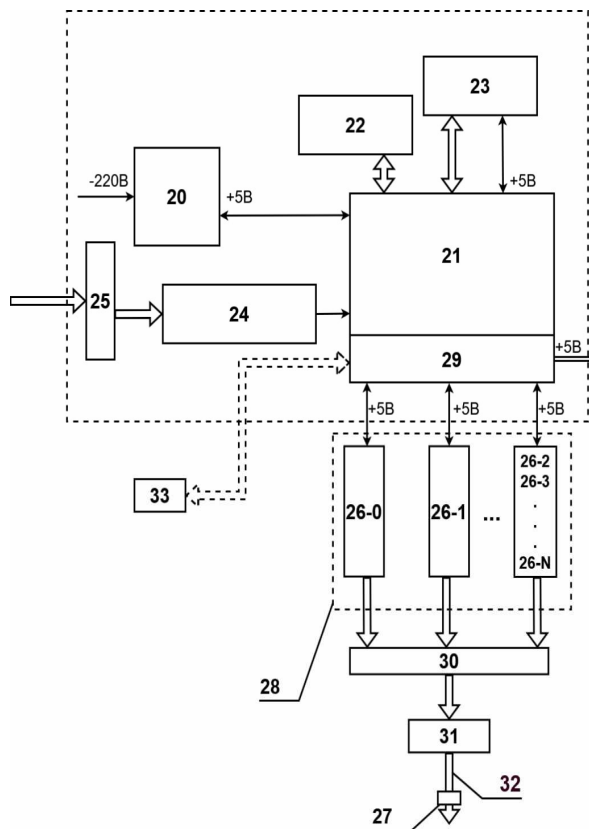


Рис. 2. Структурно-функціональна схема модернізованої АСЛСТ [33]

Пульсоксиметр-спектрофотометр

Для проведення експериментів та вимірювання значень локальної сатурації артеріальної крові киснем (SaO_2) було використано розроблений авторами пульсоксиметр-спектрофотометр [27, 34]. Пульсоксиметричний датчик реалізовував схему проходження світла через біотканину наскрізь (рис. 3). Датчик зібраний на базі стандартної пульсоксиметричної пари світлодіодів з довжинами хвиль випромінювання 940 та 660 нм і кремнієвого фотодіоду

BPW34 (OSRAM). Оптичні імпульси мали тривалість $t=160$ мкс і частоту $f_{\text{опр}}=348$ Гц. Для відсутності впливу прийнятого фотодіодом сигналу від одного світлодіода на сигнал іншого використано розділення сигналів по часу. Керування роботою

датчика, накопичення та передача даних виконується вимірювальним блоком. Він з'єднаний з персональним комп'ютером, який здійснює обробку даних, виведення на екран монітору інформації та збереження тренду сигналів на жорсткому диску.

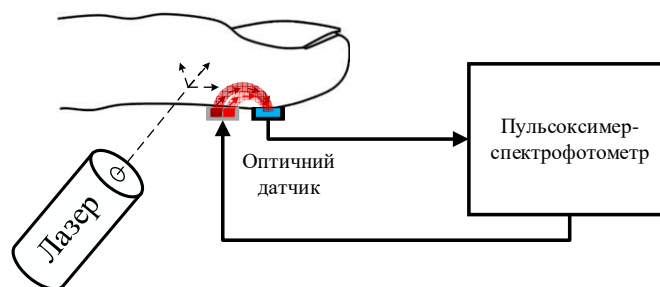


Рис. 3. Структурна схема експериментальної установки

Методика проведення експериментальних вимірювань

В рамках даного дослідження використовували діодні лазери з довжинами хвиль 808, 830, 850 та 980 нм (потужність 30 мВт). Лазерне випромінювання спрямовувалось таким чином, щоб опромінювалась нижня частина другої фаланги пальця поблизу стику з першою фалангою (рис. 3). Відстань від зовнішнього джерела дії до фотоприймача у цьому випадку складала близько 10 мм. Слід зауважити, що при такій схемі опромінювання відбувається часткова рекомбінація молекул оксигемоглобіну.

Процедура експерименту для кожного досліджуваного добровольця складалася з трьох етапів (як це зображено на рис. 4):

1. базовий період (30 секунд): запис вихідного рівня SaO_2 без зовнішнього впливу;
2. період опромінювання (30 секунд): на ділянку пальця спрямовувався промінь лазера;
3. період відновлення (30 секунд): запис показників після вимкнення лазерного випромінювання.

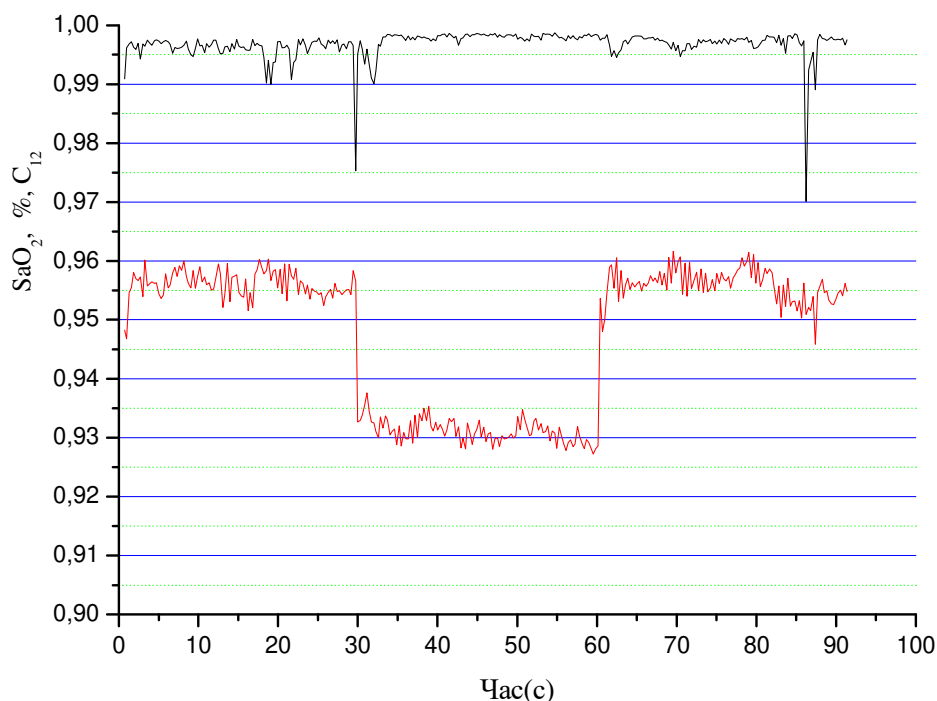


Рис. 4. Приклад динаміки зміни величини сатурації артеріальної крові киснем під час опромінювання довжиною хвилі 808 нм (C_{12} – коефіцієнт кореляції сигналів λ_1 (660 нм) і λ_2 (935 нм)). Три етапи дослідження: базовий (до 30 с), опромінювання (30–60 с) та відновлення (після 60 с)

Для кожного запису проводилось розрахунки середніх значень локальної сатурації артеріальної крові киснем SaO_2 на інтервалах без опромінення та з опроміненням і зміна SaO_2 під дією опромінення, яке потім усереднювали за кількістю записів. Розрахунки проводились за методикою, яка використовує кореляційну обробку сигналів [19].

Отримані значення статистично оброблялись з використанням відповідного пакету програми Origin 7.5 та обчислювались похибки значень для вірогідності $P = 0,95$ з використанням таблиці Ст'юдента.

Результати та їх обговорення

В ході експерименту було отримано масиви даних, що характеризують динаміку зміни сатурації (SaO_2) під впливом різних режимів лазерного опромінення. Щоб невілювати вплив початкового значення величини сатурації артеріальної крові киснем, розраховувалася величина $\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2$. Приклад динаміки зміни величини сатурації артеріальної крові киснем під час опромінювання довжиною хвилі 808 нм для однієї людини зображено на рис. 5.

В процесі дослідження було виявлено, що на довжині хвилі 808 нм зміна величини сатурації становила $4,26 \pm 0,67\%$, на довжині хвилі 830 нм – $3,92 \pm 0,71\%$, на довжині хвилі 850 нм – $2,72 \pm 0,63\%$, а на довжині хвилі 980 нм – $0,79 \pm 0,45\%$. На рис. 5 показано отримані результати експериментів. Як видно, на графіку, можна спостерігати майже лінійну залежність зміни $\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2$ від довжини хвилі:

зі збільшенням довжини хвилі відбувається зменшення значення $\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2$ для діапазону довжин хвиль лазерного опромінення 800-1000 нм.

Отримані результати добре узгоджуються з попередніми нашими дослідженнями [27], які були отримані для інших довжин ближнього інфрачервоного діапазону. Це добре видно, якщо ці результати сумістити і накласти на один графік, як це зображено на рис. 6, де представлено графік спектру дії оптичного опромінювання на фотодисоціацію оксигемоглобіну.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження підтверджують можливість підвищення оксигенації крові під впливом лазерного випромінювання без пошкодження тканин, що відкриває перспективи його застосування у неінвазивній терапії та реабілітації.

Висновки

Отримані результати свідчать, що оптичне опромінення у ближньому інфрачервоному діапазоні (800–1000 нм) справляє виражений вплив на динаміку насичення артеріальної крові киснем, що підтверджує наявність фотодисоціаційних процесів у системі гемоглобін–кисень. Відпрацьовано та апробовано методику неінвазивного дослідження впливу лазерного випромінювання на сатурацію крові з високою часовою роздільною здатністю, яка дозволила зафіксувати зміну показника $\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2$ під дією різних довжин хвиль.

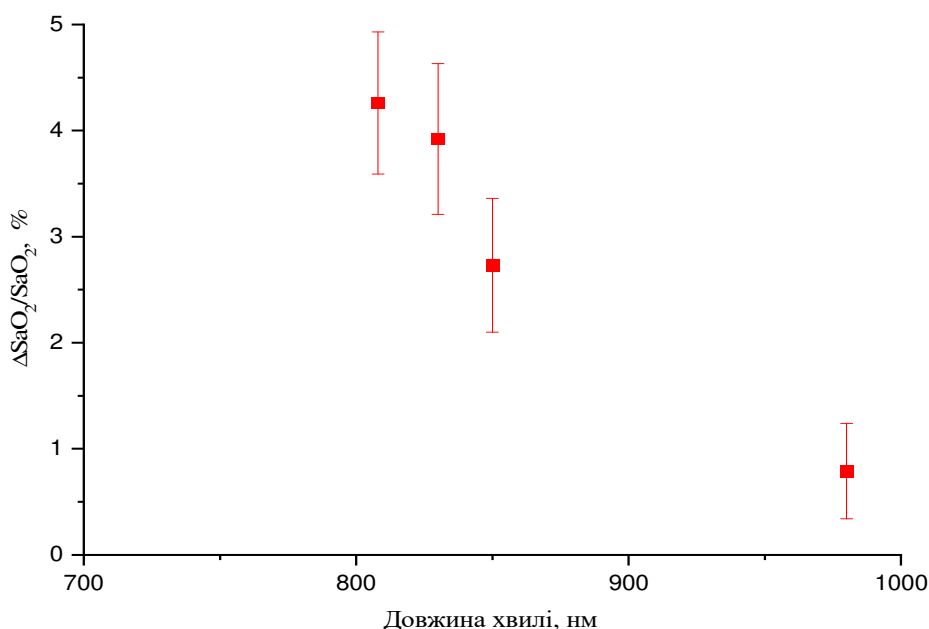


Рис. 5. Залежність середньої зміни сатурації крові від довжини хвилі монохроматичного лазерного випромінювання

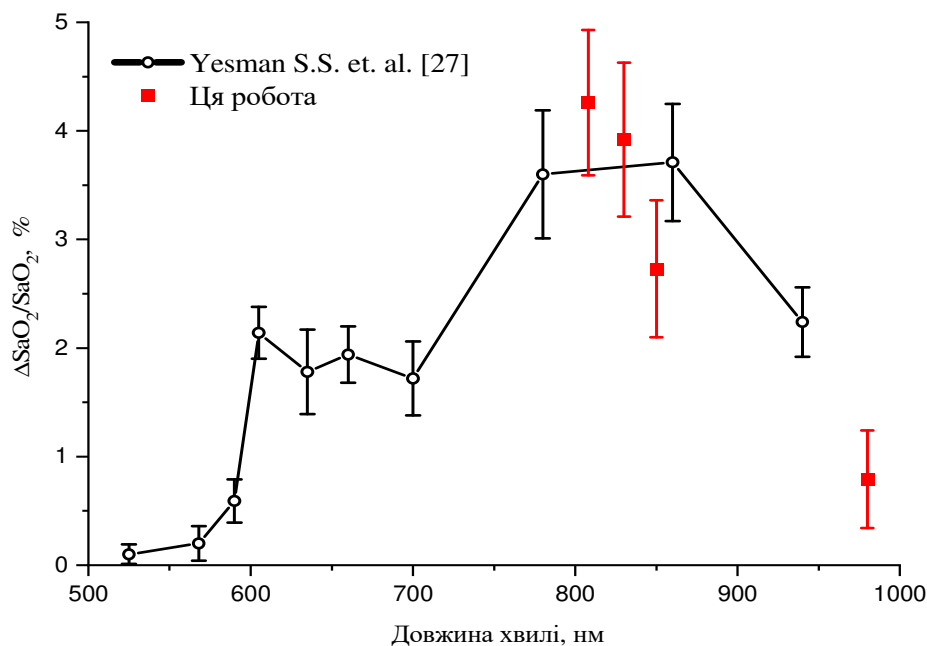


Рис. 6. Графік спектру дії оптичного опромінювання на фотодисоціацію оксигемоглобіну

Найбільша зміна насичення спостерігалася при опроміненні довжиною хвилі 808 нм, де $\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2$ становила близько 4,26 %, що узгоджується з даними про максимальну фоточутливість гемоглобіну в цьому діапазоні. При довших хвилях (830–980 нм) ефект поступово зменшувався, що свідчить про спектральну селективність процесу фотодисоціації HbO_2 , зумовлену особливостями поглинання гему та оптичними властивостями біотканин.

Встановлено, що транскутанне опромінення довжинами хвиль 808, 830, 850 та 980 нм призводить до підвищення рівня SpO_2 , причому найефективнішою є довжина хвилі $\lambda = 808$ нм. Лінійна тенденція зниження $\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2$ із ростом довжини хвилі у межах 800–1000 нм узгоджується з теоретичними моделями та раніше отриманими авторами результатами, підтверджуючи відтворюваність і стабільність ефекту.

Сукупність даних демонструє, що фотонна енергія в діапазоні 800–850 нм є найбільш ефективною для ініціювання часткового розриву зв'язку $\text{Fe}-\text{O}_2$ у гемі, а отже, цей спектральний інтервал можна вважати оптимальним для подальших досліджень з фотомодуляції оксигенації крові та розробки неінвазивних методів регуляції мікроциркуляції й тканинного дихання.

Наступними етапами дослідження передбачається аналіз комбінованої дії декількох спектральних компонентів та розширення статистичної вибірки для підвищення достовірності отриманих результатів.

Ця робота була підтримана Національною академією наук України, проєкт № 0124U000326 та стипендією Національної академії наук України для молодих вчених.

Література

- [1] H. Chung, T. Dai, S. K. Sharma, Y. Y. Huang, J. D. Carroll, and M. R. Hamblin, "The nuts and bolts of low-level laser (light) therapy," *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 40, no. 2, pp. 516–533, Feb. 2012, doi: 10.1007/s10439-011-0454-7.
- [2] М. Ф. Терещенко, І. О. Яковенко, Г. С. Тимчик, *Біофізика та основи моделювання біомедичних процесів і систем: підруч. для здобувачів ступеня бакалавра за спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» і 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»*. КНІ ім. Ігоря Сікорського. 2-ге вид., перероб. і допов. Київ, Україна: КНІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2025. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/76905>
- [3] D. W. Frankowski et al., "Light buckets and laser beams: mechanisms and applications of photobiomodulation (PBM) therapy," *GeroScience*, vol. 47, no. 3, pp. 2197–2209, Jun. 2025, DOI: 10.1007/s11357-024-01150-z.
- [4] A. P. Castano, P. Mroz, and M. R. Hamblin, "Photodynamic therapy and anti-tumour immunity," *Nat. Rev. Cancer*, vol. 6, no. 7, pp. 535–545, Jul. 2006, DOI: 10.1038/nrc1894.
- [5] С. Павлов, В. Вуйцік, Р. Голяка, Н. Тітова, Л. Никифорова, О. Азаров, М. Терещенко, В. Холін, М. Богомолів і О. Комарова, "Особливості проектування теплових сенсорів потоку біомедичного призначення", *Опт-ел. інф-енерг.*

- техн., вип. 44, вип. 2, с. 66–81, Січ 2023.
DOI: 10.31649/1681-7893-2022-44-2-66-81
- [6] Y. Li et al., “Assessment of efficacy and safety of UV-based therapy for psoriasis: a network meta-analysis of randomized controlled trials,” *Ann. Med.*, vol. 54, no. 1, pp. 159–169, Dec. 2022, DOI: 10.1080/07853890.2021.2022187.
- [7] H. Tong, N. Dong, C. L. Lam, and T. M. Lee, “The effect of bright light therapy on major depressive disorder: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials,” *Asian J. Psychiatry*, vol. 99, 104149, Sep. 2024, DOI: 10.1016/j.ajp.2024.104149.
- [8] R. Chen, Y. Yan, and X. Cheng, “Circadian light therapy and light dose for depressed young people: a systematic review and meta-analysis,” *Front. Public Health*, vol. 11, 1257093, Jan. 2024, DOI: 10.3389/fpubh.2023.1257093.
- [9] C. Zhao, N. Li, W. Miao, Y. He, and Y. Lin, “A systematic review and meta-analysis on light therapy for sleep disorders in shift workers,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, 2025, DOI: 10.1038/s41598-024-83789-3.
- [10] M. R. Hamblin, “Mechanisms and mitochondrial redox signaling in photobiomodulation,” *Photochem. Photobiol.*, vol. 94, no. 2, pp. 199–212, Mar. 2018. DOI: 10.1111/php.12864.
- [11] J. Maghfour et al., “Photobiomodulation CME part I: Overview and mechanism of action,” *J. Am. Acad. Dermatol.*, vol. 91, no. 5, pp. 793–802, Nov. 2024. DOI: 10.1016/j.jaad.2023.10.073.
- [12] S. Kashiwagi et al., “Photobiomodulation and nitric oxide signaling,” *Nitric Oxide*, vol. 130, pp. 58–68, Jan. 2023. DOI: 10.1016/j.niox.2022.11.005.
- [13] M. Przygoda et al., “Cellular mechanisms of singlet oxygen in photodynamic therapy,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 24, no. 23, 16890, Nov. 2023. DOI: 10.3390/ijms242316890.
- [14] D. Hu et al., “Recent advances in reactive oxygen species (ROS)-responsive drug delivery systems for photodynamic therapy of cancer,” *Acta Pharm. Sin. B*, vol. 14, no. 12, pp. 5106–5131, Dec. 2024. DOI: 10.1016/j.apsb.2024.08.016
- [15] C. Wang et al., “Challenges and opportunities in next-generation LED therapeutic devices,” *Light Sci. Appl.*, vol. 14, no. 1, 319, 2025. DOI: 10.1038/s41377-024-01659-z.
- [16] Jurado Ronald Humberto Rovira, et al., “Simulation modeling of conversion processes of polarized optical radiation in biological tissue,” in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024*, Ryszard S. Romaniuk and Andrzej Smolarz and Waldemar Wojcik. Eds. SPIE, vol. 12400, pp. 134000C. DOI: 10.1117/12.3054899
- [17] Y. Hu, P. Minzioni, J. Hui, S. H. Yun, and A. K. Yetisen, “Fiber optic devices for diagnostics and therapy in photomedicine,” *Adv. Opt. Mater.*, vol. 12, no. 22, Art. no. 2400478, 2024. DOI: 10.1002/adom.202400478.
- [18] D. Castaneda, A. Esparza, M. Ghamari, C. Soltanpur, and H. Nazeran, “A review on wearable photoplethysmography sensors and their potential future applications in health care,” *Int. J. Biosens. Bioelectron.*, vol. 4, no. 4, p. 195, 2018, DOI: 10.15406/ijbsbe.2018.04.00125.
- [19] D. Velyhotskyi, “Design of Multi-Wavelength Photoplethysmography System for Non-Invasive Measurement of Oxyhemoglobin and Carboxyhemoglobin,” in *Advanced System Development Technologies II*. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 165–198. DOI: 10.1007/978-3-031-59931-9_8.
- [20] M. Cronshaw, S. Parker, O. Hamadah, J. Arnabat-Dominguez, and M. Grootveld, “Photobiomodulation LED devices for home use: design, function and potential: A pilot study,” *Dent. J.*, vol. 13, no. 2, Art. no. 76, Feb. 2025, DOI: 10.3390/dj13020076.
- [21] A. C. Barolet, L. Germain, and D. Barolet, “In vivo measurement of nitric oxide release from intact human skin post photobiomodulation using visible and near-infrared light: A chemiluminescence detection study,” *J. Photochem. Photobiol.*, vol. 24, 100250, 2024, DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2024.100250.
- [22] A. C. Barolet, I. V. Litvinov, and D. Barolet, “Light-induced nitric oxide release in the skin beyond UVA and blue light: red & near-infrared wavelengths,” *Nitric Oxide*, vol. 117, pp. 16–25, Dec. 2021. DOI: 10.1016/j.niox.2021.09.003.
- [23] A. I. Gisbrecht and M. M. Asimov, “Kinetics of laser-induced photodissociation of oxyhemoglobin and its biomedical applications,” *Bulg. Chem. Commun.*, vol. 48, no. 3, pp. 521–524, 2016.
- [24] S. V. Lepeshkevich et al., “Direct observation of two-channel photodissociation of carbon monoxide from the hemoglobin subunits,” *Nat. Commun.*, vol. 16, no. 1, 2025. DOI: 10.1038/s41467-025-63092-z.
- [25] A. Fischbach et al., “Veno-venous extracorporeal blood phototherapy increases the rate of carbon monoxide (CO) elimination in CO-poisoned pigs,” *Lasers Surg. Med.*, vol. 54, no. 2, pp. 256–267, Feb. 2022. DOI: 10.1002/lsm.23462.
- [26] C. C. Liu, C. S. Hsu, H. C. He, Y. Y. Cheng, and S. T. Chang, “Effects of intravascular laser phototherapy on delayed neurological sequelae after carbon monoxide intoxication as evaluated by brain perfusion imaging: a case report and review of the literature,” *World J. Clin. Cases*, vol. 9, no. 13, pp. 3048–3057, May 2021, DOI: 10.12998/wjcc.v9.i13.3048.
- [27] S. S. Yesman, S. O. Mamilov, D. V. Veligotsky, and A. I. Gisbrecht, “Local changes in arterial oxygen saturation induced by visible and near-infrared light radiation,” *Lasers Med. Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 145–149, Jan. 2016. DOI: 10.1007/s10103-015-1833-z.

- [28] O. Ostapenko, O. Salyuk, D. Velyhotskyi, and S. Mamilov, "Transcutaneous Influence of Laser Radiation on the Oxygen Saturation of Venous Blood," *Ukr. J. Phys.*, vol. 70, no. 5, pp. 333–338, 2025. DOI: 10.15407/ujpe70.5.333.
- [29] S. O. Mamilov, S. S. Yesman, and D. V. Velyhotskyi, "Investigation of the photodissociation quantum efficiency of hemoglobin derivatives," in *Proc. 2019 IEEE 39th Int. Conf. Electron. Nanotechnol. (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, Apr. 2019, pp. 466–470. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783938.
- [30] J. S. Lee, J. Kim, Y. S. Ye, and T. I. Kim, "Materials and device design for advanced phototherapy systems," *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 186, Art. no. 114339, Jul. 2022. DOI: 10.1016/j.addr.2022.114339.
- [31] C. A. Elmets et al., "Joint American Academy of Dermatology–National Psoriasis Foundation guidelines of care for the management and treatment of psoriasis with phototherapy," *J. Am. Acad. Dermatol.*, vol. 81, no. 3, pp. 775–804, Sep. 2019. DOI: 10.1016/j.jaad.2019.04.042.
- [32] Апарат світлодіодний «LIKA-LED». [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.fotonikaplus.com.ua/produktsiya/lazernye-apparaty/product/58-apparat-svetodiodnyi-lika-led>
- [33] О. С. Турбіцький, М. Ф. Терещенко, "Системи формування мультиспектрального лазерного випромінювання," на XXIV Міжнар. наук.-техн. конф. ПРИБУДОВУВАННЯ: стан і перспективи, Київ, 2025, с. 252–255
- [34] Д. Велигоцький, С. Дуга, і С. Мамілов, «Система багатохвильової фотоплетизмографії», *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.*, вип. 69(1), с. 106–118, Чер 2025. DOI: 10.20535/1970.69(1).2025.331971
- [35] B. J. Quirk and H. T. Whelan, "What lies at the heart of photobiomodulation: light, cytochrome c oxidase, and nitric oxide—review of the evidence," *Photobiomodul. Photomed. Laser Surg.*, vol. 38, no. 9, pp. 527–530, Sep. 2020. DOI: 10.1089/photob.2019.4787.

UDC 615.849.19

¹⁾Oleksandr Turbitskyi, ¹⁾Mykola Tereshchenko, ^{1,2)}Dmytro Velyhotskyi, ²⁾Serhii Mamilov, ^{1,3)}Olha Komarova

¹⁾National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

²⁾V. G. Baryakhtar Institute of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³⁾FOTONICA PLUS CO., Cherkasy

SPECTRAL DEPENDENCE OF OXYHEMOGLOBIN PHOTODISSOCIATION UNDER THE ACTION OF NEAR-INFRARED LASER RADIATION

Phototherapy is a non-invasive method of influencing biotissues with non-ionizing radiation, realizing its effects through photobiomodulation and photodissociation processes. In the near-infrared (NIR) range, photon energy can alter the state of hemoglobin, modifying blood oxygen saturation (SaO₂) by partially breaking the Fe–O₂ bond in the heme molecule. The relevance of this study is driven by the need to develop personalized methods for the photomodulation of microcirculation and tissue respiration, as well as to quantify the spectral characteristics of this effect. To achieve these goals, a methodology for non-invasive monitoring of blood saturation changes with high temporal resolution under the influence of laser irradiation at different wavelengths (808, 830, 850, and 980 nm) was developed and tested. Measurements were conducted transcutaneously using a photoplethysmographic sensor, and the relative value $\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2$ was calculated to eliminate individual differences in initial saturation. The results showed that the greatest change in relative saturation was observed at a wavelength of 808 nm ($\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2 = 4.26 \pm 0.67\%$), while at 830 nm it was $3.92 \pm 0.71\%$, for 850 nm — $2.72 \pm 0.63\%$, and for 980 nm — $0.79 \pm 0.45\%$. The detected near-linear dependence of the decrease in $\Delta\text{SaO}_2/\text{SaO}_2$ with increasing wavelength in the 800–1000 nm range indicates the spectral selectivity of the HbO₂ photodissociation process. It was shown that radiation in the 800–850 nm range is the most effective for initiating the partial rupture of the Fe–O₂ bond, suggesting the possibility of targeted regulation of local blood oxygenation using low-intensity IR radiation. The obtained results form a scientific basis for the further development of non-invasive technologies for photomodulation of microcirculation and tissue respiration, as well as for optimizing the parameters of phototherapeutic devices in medical and rehabilitation practice.

Key words: phototherapy, laser irradiation, photobiomodulation, hemoglobin photodissociation, oxyhemoglobin, arterial oxygen saturation, near-infrared radiation, non-invasive monitoring, photoplethysmography, spectral dependence, Fe–O₂ bond.

Надійшла до редакції
20 жовтня 2025 року

Рецензовано
18 листопада 2025 року



© 2025 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).