

УДК 616-073:621.373.826

DOI: 10.20535/.2026.1(21).355554

# СУЧАСНІ ЛАЗЕРНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ КРОВІ

*Шевченко Олег Віталійович*

[sheva.ua2005@gmail.com](mailto:sheva.ua2005@gmail.com)

*Богомолов Микола Федорович*

[mfbogomolov@gmail.com](mailto:mfbogomolov@gmail.com)

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

м. Київ, Україна

*Анотація* – У межах даної роботи було здійснено комплексний аналіз сучасних лазерних методів дослідження крові, що ґрунтуються на синергії оптичних та електронних принципів [2, 11]. Зазначений підхід є перспективним напрямом розвитку медичної діагностики, оскільки забезпечує високу точність, неінвазивність і можливість отримання результатів у режимі реального часу [4, 8].

У роботі розкрито фундаментальні механізми взаємодії лазерного випромінювання з біологічними компонентами крові. Зокрема, розглянуто процеси поглинання, розсіювання та зміни поляризаційних характеристик світла при його взаємодії з клітинними та плазмовими елементами. Показано, що оптичні властивості крові визначаються такими параметрами, як концентрація гемоглобіну, ступінь оксигенації та особливості мікроциркуляції.

Наведено аналіз основних лазерних діагностичних методів, серед яких фотометрія, спектроскопія, доплерівська флоуметрія, поляриметрія та спекл-інтерферометрія. Описано їхні принципи дії, діагностичні можливості та особливості практичного застосування. Підкреслено ефективність поєднання цих методів із сучасними оптоелектронними системами, які забезпечують точну реєстрацію сигналів і їх подальшу цифрову обробку.

У результаті проведеного аналізу обґрунтовано переваги лазерних методів порівняно з традиційними клініко-лабораторними підходами, зокрема їх високу інформативність, швидкість та безпечність. Визначено перспективні напрями розвитку, пов'язані з інтеграцією технологій штучного інтелекту, створенням портативних діагностичних пристроїв та впровадженням у системи персоналізованої медицини.

*Ключові слова:* лазерна діагностика, оптоелектронні методи, кров, біомедична інженерія, мікроциркуляція, фотометрія.

## I. ВСТУП

Кров є однією з найважливіших біологічних систем організму людини, яка виконує транспортну, регуляторну, захисну та гомеостатичну функції [14, 21]. Будь-які зміни фізико-хімічних або структурних властивостей крові можуть свідчити про розвиток патологічних процесів, тому її дослідження займає центральне місце в клінічній діагностиці. Традиційні методи аналізу крові, що включають клінічні, біохімічні та імунологічні дослідження, хоча й залишаються стандартом, мають ряд обмежень, пов'язаних з інвазивністю, часовими витратами та необхідністю складної лабораторної інфраструктури [2, 12].

У зв'язку з цим в останні десятиліття активно розвиваються фізичні методи дослідження крові, серед яких особливе місце займають лазерні оптоелектронні технології. Вони базуються на аналізі

параметрів лазерного випромінювання після його взаємодії з кров'ю або її компонентами.

Висока когерентність і стабільність лазерного світла дозволяють фіксувати навіть незначні зміни оптичних характеристик біологічного середовища, що відкриває широкі можливості для ранньої діагностики захворювань.

Актуальність дослідження зумовлена стрімким розвитком біомедичної інженерії та зростаючими вимогами до якості медичної діагностики.

Сучасна медицина орієнтована на раннє виявлення захворювань, профілактику та персоналізований підхід до лікування, що неможливо без швидких, точних і неінвазивних методів оцінки стану організму.

Сучасні лазерні методи дозволяють здійснювати моніторинг параметрів крові в режимі реального часу, зменшуючи ризики для пацієнта та навантаження на медичний персонал.

Крім того, розвиток портативних лазерних пристроїв та цифрових систем обробки даних створює передумови для широкого впровадження таких методів не лише в умовах стаціонару, але й у телемедицині та домашньому моніторингу здоров'я.

Оптоелектронні, зокрема лазерні, методи набули широкого застосування в сучасних біомедичних дослідженнях завдяки своїй високій точності, чутливості та можливості безконтактного вимірювання біологічних параметрів. Однією з основних переваг таких методів є висока точність вимірювань: потенційна точність лазерних методів визначення швидкості може досягати 0,2 %. Це пояснюється тим, що оптоелектронні пристрої перетворюють корисний сигнал у частотну форму, а вимірювання частоти в сучасній метрології є одним із найбільш точних еталонних методів. При дослідженні швидкості кровотоку реальна похибка таких вимірювань становить приблизно 5–7 %.

Важливою перевагою оптоелектронних методів є можливість дослідження об'єктів у широкому діапазоні розмірів і швидкостей. У біомедичних дослідженнях це дозволяє аналізувати як рух окремих клітин та внутрішньоклітинних структур зі швидкостями порядку 1 мкм/с, так і швидкісні характеристики кровотоку в судинах, де швидкість може досягати 1–3 м/с у великих артеріях, зокрема в аорті.

Крім того, використання оптичного діапазону електромагнітних хвиль забезпечує високу завадостійкість таких систем, оскільки вони практично не піддаються впливу потужних електромагнітних перешкод. Це особливо важливо при передаванні біомедичної інформації у телемедичних системах через волоконно-оптичні канали зв'язку. Ще однією важливою особливістю є можливість здійснення багатоканальних вимірювань у різних точках простору шляхом розщеплення лазерного випромінювання на декілька сенсорних зон, наприклад за допомогою дифракційних ґраток. Такий підхід дозволяє ефективно досліджувати

параметри кровотоку та процеси мікроциркуляції [1].

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою даної роботи є системний аналіз сучасних лазерних методів дослідження крові, розкриття фізичних механізмів взаємодії лазерного випромінювання з її компонентами, а також оцінка їх діагностичних можливостей і перспектив застосування в клінічній практиці [2, 8].

## III. КРОВ ЯК ОБ'ЄКТ ЛАЗЕРНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Кров являє собою складну, багатогранну біологічну суспензію, унікальну за своєю будовою та функціями, що структурована з двох основних фракцій: рідкої плазми та численних корпускулярних (клітинних) елементів [13].

Плазма, у свою чергу, виступає як унікальне акватичне середовище, що містить розчинені різноманітні органічні та неорганічні сполуки, зокрема широкий спектр протеїнів, електролітів та інших життєво важливих біологічно активних метаболітів [2, 6].

На противагу цьому, корпускулярні складові, серед яких особливо виділяються червоні кров'яні тільця, або еритроцити, вирізняються диференційованою та складною структурною організацією, а також специфічними оптичними характеристиками.

Примітно, що саме присутність цих мікроскопічних клітинних елементів є ключовим фактором, що визначає виражений ефект інтенсивного розсіювання світлових променів у межах кровоносного русла. Отже, її спектральні характеристики та загальна оптична поведінка детерміновані низкою суттєвих фізіологічних параметрів [4, 16]. До них належать: концентрація основного кисневого пігменту – гемоглобіну, рівень оксигенації (насиченість киснем), феномен агрегації червоних кров'яних тілець, а також динаміка циркуляції крові (швидкість кровотоку).

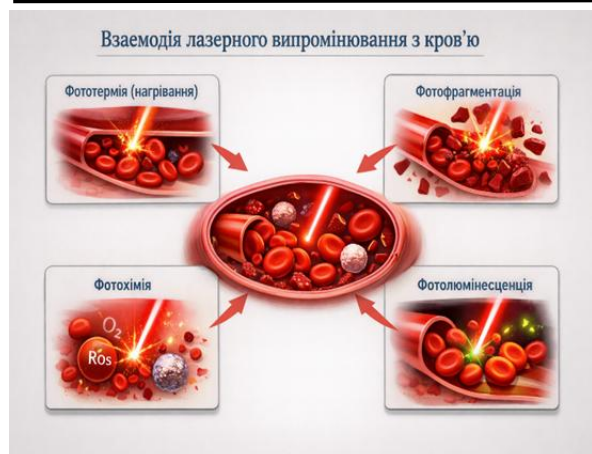


Рис. 1. – Основні механізми взаємодії лазерного випромінювання з кров'ю.

Важливим аспектом дослідження крові як оптичного середовища є її гетерогенність. Наявність клітин різного розміру, форми та оптичних властивостей призводить до складного характеру розсіювання світла. Еритроцити, як основні формені елементи крові, відіграють ключову роль у формуванні оптичного сигналу, оскільки їх концентрація та агрегація безпосередньо впливають на інтенсивність розсіювання. Також значний вплив має плазма крові, яка містить білки, електроліти та інші компоненти, що визначають її оптичну прозорість. Зміни складу плазми можуть бути індикаторами патологічних процесів, що додатково підвищує інформативність лазерних методів дослідження.

#### IV. ЛАЗЕРНА ФОТОМЕТРІЯ ТА СПЕКТРОСКОПІЯ КРОВІ

Лазерний фотометричний аналіз виступає як один із найдоступніших та водночас критично значущих аналітичних інструментів для дослідження біологічних субстратів, особливо у контексті гематології та аналізу крові.

В його основі лежить фундаментальний принцип виявлення та прецизійного кількісного вимірювання інтенсивності світлового потоку після його проходження крізь досліджуваний зразок [9].

Будь-які відхилення у початковій інтенсивності випромінювання є безпосереднім відображенням комплексних фізико-хімічних процесів, таких як абсорбція

(поглинання) та дисперсія (розсіювання) світла, які відбуваються за рахунок компонентів аналізованого матеріалу.



Рис. 2. – Структурна схема лазерної фотометричної установки

Сучасна лазерна спектроскопія пропонує виняткові можливості для глибокого аналізу та отримання детальних спектральних характеристик біологічних середовищ, зокрема крові.

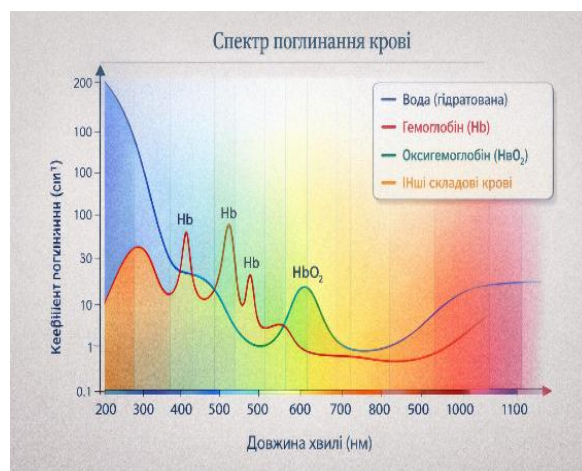


Рис 2.1 – Приклад спектра поглинання крові

Цей потужний аналітичний інструмент дозволяє не лише якісно досліджувати, але й точно ідентифікувати та кількісно оцінювати вміст ключових компонентів, таких як оксигемоглобін та дезоксигемоглобін [15, 16].

Здатність до такого прецизійного моніторингу має фундаментальне значення для всебічної оцінки кисневого метаболізму

та характеристики оксигенаційного статусу організму в цілому.

## V. ЛАЗЕРНА ДОПЛЕРІВСЬКА ФЛОУМЕТРИЯ

Лазерна доплерівська флоуметрія широко застосовується для дослідження мікроциркуляції крові. Метод базується на аналізі частотного зсуву лазерного випромінювання, розсіяного рухомими еритроцитами [5].

Отриманий сигнал містить інформацію про швидкість та інтенсивність кровотоку [10, 14]. Принцип формування доплерівського сигналу наведено на рис. 3.

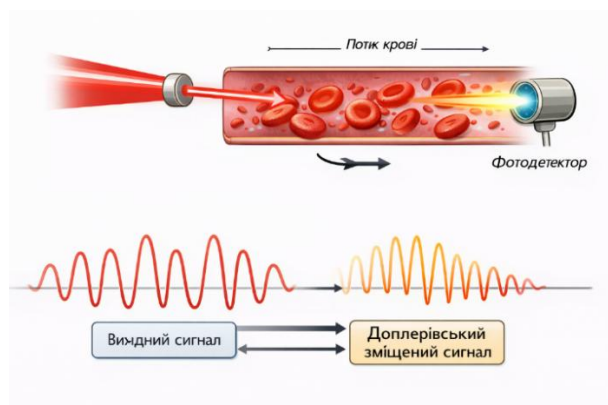


Рис. 3. – Принцип утворення доплерівського сигналу при русі еритроцитів

Представлений на рисунку принцип утворення доплерівського сигналу демонструє механізм виникнення частотного зсуву лазерного випромінювання при взаємодії з рухомими еритроцитами. Внаслідок руху клітин крові відбувається зміна частоти відбитого світла, що є основою для оцінки швидкості кровотоку.

Аналіз даного процесу свідчить про високу чутливість доплерівських методів до динамічних характеристик мікроциркуляції. Зокрема, навіть незначні зміни швидкості руху еритроцитів призводять до вимірюваного зсуву частоти, що дозволяє використовувати цей підхід для ранньої діагностики порушень кровообігу.

Водночас точність отриманих результатів залежить від кута між напрямком лазерного променя та рухом частинок, а також від оптичних властивостей

середовища. Це потребує врахування відповідних корекційних коефіцієнтів під час обробки сигналу [4, 11].

## VI. ЛАЗЕРНА ПОЛЯРИМЕТРИЯ ТА СПЕКЛ-МЕТОДИ

Методи лазерної поляриметрії дозволяють досліджувати анізотропні властивості крові та плазми [17]. Зміни поляризаційного стану світла після взаємодії з кров'ю можуть свідчити про структурні зміни білкових компонентів.

Спекл-інтерферометрія базується на аналізі динаміки спекл-картин, що формуються при освітленні крові когерентним лазерним світлом [10, 19].

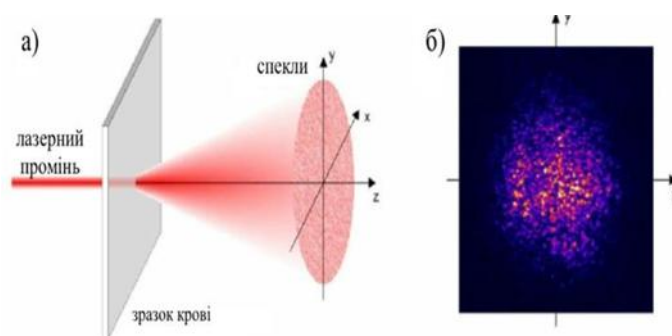


Рис. 4. – Механізм утворення спекл-інтерферографів: а) пропускання лазерного променя через зразок крові; б) розподіл інтенсивностей спекл-зображення

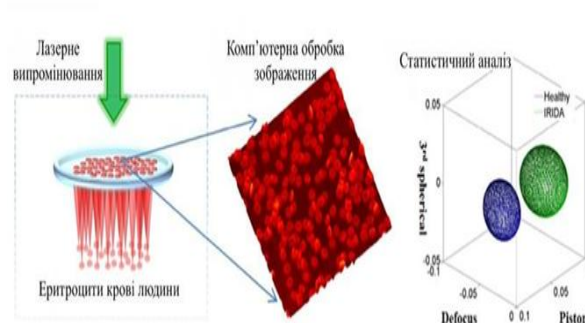


Рис. 4.1 – Загальний принцип проведення аналізу поверхні крові за допомогою спекл-інтерферометрії.

Застосування поляриметричних методів дозволяє виявляти навіть незначні зміни структури біологічних тканин. Це особливо важливо при дослідженні патологічних станів, які супроводжуються змінами білкового складу або структурної організації клітин. Спекл-методи, у свою чергу, дають

зможу аналізувати динамічні процеси в крові, зокрема рух клітин та зміни мікроциркуляції. Це робить їх ефективним інструментом для функціональної діагностики.

## VII. ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ЦИФРОВА ОБРОБКА ДАНИХ

Сучасні лазерні системи дослідження крові включають лазерні джерела, оптичні елементи, фотодетектори та комп'ютерні модулі обробки сигналів [11, 20]. Цифрова обробка дозволяє підвищити точність вимірювань, зменшити шум та автоматизувати процес діагностики [18].



Рис. 5. – Узагальнена структура лазерної оптоелектронної діагностичної системи.

## VIII. КЛІНІЧНІ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Сучасні досягнення в галузі лазерних оптоелектронних систем вже міцно закріпилися як невід'ємна складова медичної діагностики та наукових досліджень.

Їхня неперевершена ефективність переконливо продемонстрована у забезпеченні детального кількісного аналізу стану мікроциркуляторного русла, безперервного відстеження життєво важливих реологічних властивостей крові, а також у всебічній верифікації та суттєвій оптимізації лікувальних стратегій.

Проте, подальша траєкторія еволюції та розкриття справжнього потенціалу цих методик нерозривно корелює з їхньою інтеграцією у складну екосистему штучного інтелекту, що дозволить здійснювати глибинний, багатоаспектний аналіз величезних масивів одержуваних даних.

Паралельно, стратегічним вектором є розробка та впровадження інноваційного покоління компактних, мініатюрних та ергономічних пристроїв, призначених для широкого індивідуального застосування. Це, безумовно, прокладе шлях до утвердження принципів персоналізованої медицини та реалізації ефективного, безперервного моніторингу стану здоров'я в повсякденному житті.

Окремої уваги заслуговує застосування лазерних методів у клінічній практиці. Зокрема, лазерна доплерівська флоуметрія широко використовується для оцінки мікроциркуляції при цукровому діабеті, судинних захворюваннях та порушеннях периферичного кровообігу. Спектроскопічні методи дозволяють визначати рівень оксигенації крові, що є важливим показником при діагностиці гіпоксичних станів.

Крім того, лазерні технології застосовуються для контролю ефективності лікування, зокрема при терапії серцево-судинних захворювань та післяопераційному моніторингу. Використання портативних лазерних пристроїв відкриває можливості для дистанційного спостереження за станом пацієнта в умовах телемедицини [12, 14].

## IX. ПЕРЕВАГИ ТА ОБМЕЖЕННЯ ЛАЗЕРНИХ МЕТОДІВ

Лазерні методи дослідження крові мають низку суттєвих переваг порівняно з традиційними клініко-лабораторними підходами. Передусім, вони забезпечують високу точність вимірювань завдяки використанню когерентного випромінювання та можливості аналізу навіть незначних змін оптичних характеристик біологічного середовища. Важливою перевагою є їх неінвазивність, що значно знижує ризики для пацієнта та дозволяє проводити багаторазові дослідження без шкоди для організму.

Ще однією важливою характеристикою є можливість отримання результатів у режимі реального часу, що є критично важливим для моніторингу стану пацієнта. Лазерні методи також відзначаються

високою чутливістю до змін фізіологічних параметрів, зокрема швидкості кровотоку, рівня оксигенації та структурних особливостей клітин [2, 12].

Разом із тим існують певні обмеження. До них належить залежність результатів від індивідуальних оптичних властивостей тканин, що може ускладнювати інтерпретацію даних. Крім того, складність апаратного забезпечення та висока вартість сучасних лазерних систем обмежують їх широке впровадження у клінічну практику [2, 8].

Незважаючи на зазначені труднощі, розвиток технологій, зокрема удосконалення методів цифрової обробки сигналів та впровадження штучного інтелекту, сприяє поступовому подоланню цих обмежень і розширенню сфери застосування лазерної діагностики.

## X. ВИСНОВКИ

У роботі проведено системний аналіз сучасних лазерних методів дослідження крові та розглянуто фізичні основи взаємодії лазерного випромінювання з її біологічними компонентами. Показано, що такі процеси, як поглинання, розсіювання та зміна поляризації світла, є інформативними для оцінки стану крові та її параметрів. Проаналізовано основні лазерні методи, зокрема фотометрію, спектроскопію, доплерівську флоуметрію, поляриметрію та спекл-методи, які забезпечують високу точність, неінвазивність і можливість досліджень у режимі реального часу. Встановлено, що застосування лазерних оптоелектронних систем у поєднанні з цифровою обробкою сигналів значно розширює діагностичні можливості сучасної медицини.

Перспективи розвитку даних технологій пов'язані з їх мініатюризацією, інтеграцією зі штучним інтелектом та впровадженням у системи персоналізованої медицини.

**Фінансування.** Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

**Згода на публікацію.** Усі пацієнти, що мають відношення до рукопису дали згоду на публікацію даної роботи.

**ORCID ID та внесок авторів.**

0009-0003-6015-6939 (A,B,D) Shevchenko Oleg

0000-0002-4351-527X (C,E,F) Bogomolov Mykola

A- Концепція роботи та дизайн, B- аналіз даних, C- Відповідальність за статистичний аналіз, D- Написання статті, E- Критичний огляд, F- Остаточне схвалення статті.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Богомолів М. Ф., Максименко В. Б., Шликов В. В. Методи та засоби діагностики. Основи лазерних лабораторних методів біомедичних досліджень : навч. посіб. для студ. спец. 163 «Біомедична інженерія». – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
2. Тучин В. В. Оптика тканин: Методи розсіювання світла та прилади для медичної діагностики. - Спрінгер, 2015.
3. Ванг Л., Ву Г. Біомедична оптика: Принципи та візуалізація. - Вайлі, 2012.
4. Башкатов О. М., Геніна Е. О., Тучин В. В. Оптичні властивості крові // Журнал біомедичної оптики, 2011.
5. Зімяков Д. О., Тучин В. В. Лазерна доплерівська флоуметрія // Успіхи фізичних наук, 2002.
6. Боас Д. О. Довідник з біомедичної оптики. - СРС Прес, 2016.
7. Німц М. Г. Взаємодія лазера з тканинами: Основи та застосування. - Спрінгер, 2019.
8. Во-Дінь Т. Довідник з біомедичної фотоніки. - СРС Прес, 2014.
9. Попеску Г. Кількісна фазова візуалізація клітин і тканин. - Мак-Гроу Хілл, 2011.
10. Брієрс Дж. Д. Лазерний Доплер та спекл-технології для картування перфузії крові // Фізіологічні вимірювання, 2001.
11. Гуань Я. Штучний інтелект у біомедичній оптиці. - Прогрес у біомедичній візуалізації, 2022.
12. Вейнант Р. В. Лазери в медицині. - СРС Прес, 2001.
13. Прієзжев О. С. Лазерна діагностика в біології та медицині. - Наука, 1989.
14. Козлов В. І. Лазерна доплерівська флоуметрія в оцінці стану мікроциркуляції. - Медицина, 2012.
15. Степанов Є. В. Лазерні методи аналізу газоподібних біомаркерів. - Фізматліт, 2009.
16. Лоцонов В. Б. Оптична спектроскопія та флуоресцентна діагностика. - МФТІ, 2015.
17. Лаптанська К. В. Оптоелектронні пристрої в біомедицині. - Київ: Політехніка, 2018.
18. Сичов О. В. Цифрова обробка біомедичних сигналів. - Техніка, 2020.
19. Берн Б. Дж. Динамічне розсіювання світла в біології. - Довер, 2000.
20. Котлер П. Основи медичного приладобудування. - Спрінгер, 2017.
21. Южаков В. В. Спектральні методи дослідження біологічних рідин. - СГУ, 2014.

---

UDC 616-073:621.373.826

# MODERN LASER METHODS OF BLOOD RESEARCH

*Oleh Shevchenko*  
[sheva.ua2005@gmail.com](mailto:sheva.ua2005@gmail.com)  
*Mykola Bohomolov,*  
[mfbogomolov@gmail.com](mailto:mfbogomolov@gmail.com)

National Technical University of Ukraine, “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**Abstract** – Within this work, a comprehensive analysis of modern laser methods of blood research was carried out, based on the synergy of optical and electronic principles [2, 11]. This approach represents a promising direction in the development of medical diagnostics, as it ensures high accuracy, non-invasiveness, and the possibility of obtaining results in real time [4, 8].

The study reveals the fundamental mechanisms of interaction between laser radiation and biological components of blood. In particular, processes of absorption, scattering, and changes in polarization characteristics of light during its interaction with cellular and plasma elements are considered. It is shown that the optical properties of blood are determined by parameters such as hemoglobin concentration, degree of oxygenation, and features of microcirculation.

An analysis of the main laser diagnostic methods is presented, including photometry, spectroscopy, Doppler flowmetry, polarimetry, and speckle interferometry. Their principles of operation, diagnostic capabilities, and practical application features are described. The effectiveness of combining these methods with modern optoelectronic systems, which provide precise signal registration and subsequent digital processing, is emphasized.

As a result of the conducted analysis, the advantages of laser methods compared to traditional clinical-laboratory approaches are substantiated, particularly their high informativeness, speed, and safety. Prospective directions of development are identified, related to the integration of artificial intelligence technologies, creation of portable diagnostic devices, and implementation into personalized medicine systems.

**Key words** – laser diagnostics, optoelectronic methods, blood, biomedical engineering, microcirculation, photometry.

Надійшла до редакції  
26.03.2026 р.

Прийнята до публікації  
27.03.2026 р.

Опубліковано  
06.04.2026 р.