

Гончарук-Хомин Мирослав Юрійович,
*PhD, доцент, доцент кафедри терапевтичної стоматології,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0000-0002-7482-3881
м. Ужгород, Україна*

Богдан Олена Михайлівна,
*старший викладач кафедри терапевтичної стоматології,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0000-0003-0586-2155
м. Ужгород, Україна*

ОЦІНКА ВІТАЛЬНОСТІ ПУЛЬПИ В УМОВАХ СУМІЖНИХ ПАРОДОНТАЛЬНИХ ПОРУШЕНЬ: ПРОБЛЕМАТИКА ТА ПРОПОЗИЦІЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Вступ. Наразі лише окремі дослідження висвітлюють можливості застосування методу пульсоксиметрії для оцінки вітальності зубів в умовах суміжно наявних патологій пародонту, а також специфічно у випадках ендо-пародонтальних патологій, і уточнення даних можливостей, а також розробка пропозицій для вдосконалення даного методу у вищезазначених клінічних умовах є аргументовано-релевантним завданням сучасної стоматологічної практики.

Мета дослідження. Проаналізувати проблематику сучасних методів оцінки вітальності пульпи в умовах наявної суміжної патології пародонту, систематизувати існуючі підходи щодо їх оптимізації та розробити технічну пропозицію вдосконалення з використанням можливостей сучасних цифрових технологій.

Матеріали та методи. Проведене дослідження носило теоретико-аналітичний та інженерно-концептуальний характер і базувалося на системному узагальненні сучасних літературних даних щодо методів оцінки вітальності пульпи зуба в умовах супутньої патології пародонту, а також на аналізі та інтерпретації сучасних технологічних рішень у сфері біофотоніки та цифрової стоматології орієнтованих на оцінку вітальності пульпи. На основі проведеного аналізу було сформульовано методологічно-технічно-обґрунтовану концепцію інтегрованої оптико-діагностичної системи, як пропозиції вдосконалення методу оцінки вітальності пульпи з використанням сучасних цифрових технологій.

Результати досліджень та їх обговорення. Фактори, котрі обмежують широке використання пульсоксиметрії в клінічній стоматологічній практиці включають: 1) потребу розробки універсального дизайну адаптивного датчика в умовах варіативної конфігурації зубів різної топографічної приналежності; 2) потребу оптимізації потужності та стабільності світлового потоку з урахуванням ефекту розсіювання через товщу твердих тканин зубів (мінімізація ефектів дифракції та розсіювання); 3) вплив зовнішнього освітлення на результуючі показники пульсоксиметрії. У відповідь на виявлені обмеження запропоновано інженерно обґрунтовану концепцію інтеграції пульсоксиметричного сенсорного модуля в конструкцію інтраорального сканера з формуванням єдиної оптико-діагностичної системи. Інтеграція оптичних можливостей інтраорального сканера, зокрема використання ближнього інфрачервоного спектру, із пульсоксиметричним принципом реєстрації фотоплетизмографічного сигналу дозволяє підвищити ефективність проходження світла крізь тверді тканини зуба та покращити умови детекції пульсаційної компоненти сигналу.

Висновки. Встановлено, що, незважаючи на високий потенціал пульсоксиметрії як об'єктивного методу оцінки вітальності пульпи, її клінічне застосування обмежується низкою факторів, серед яких ключовими є відсутність спеціалізованих стоматологічних сенсорів, вплив розсіювання світла в твердих тканинах зуба, варіабельність анатомічних умов та відсутність стандартизованих діагностичних порогів. У відповідь на виявлені обмеження запропоновано інженерно обґрунтовану концепцію інтеграції пульсоксиметричного модуля з інтраоральним сканером, що дозволяє оптимізувати умови оптичного зондування, підвищити ефективність фотонного транспорту та покращити відношення параметрів сигнал / шум.

Ключові слова: ендодонтія, пародонтологія, ендо-пародонтальні ураження, зуб, пульпа, пародонт, пародонтит, діагностика, вітальний стан пульпи, інтраоральний скан, пульсоксиметрія.

© Гончарук-Хомин М. Ю., Богдан О. М., 2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

ASSESSMENT OF PULP VITALITY IN THE PRESENCE OF CONCOMITANT PERIODONTAL LESIONS: CHALLENGES AND PROPOSAL FOR IMPROVEMENT USING MODERN DIGITAL TECHNOLOGIES

Introduction. Currently, only a limited number of studies address the potential application of pulse oximetry for assessing tooth vitality in the presence of concomitant periodontal pathologies, particularly in endo-periodontal lesions. Therefore, further clarification of these possibilities, as well as the development of proposals to improve this method under such clinical conditions, represents a relevant and justified task in modern dental practice.

Objective of the research. To analyze the limitations of current methods for assessing pulp vitality in the presence of concomitant periodontal pathology, to systematize existing approaches for their optimization, and to develop a technically grounded proposal for improvement using modern digital technologies.

Materials and methods. Study had a theoretical-analytical and engineering-conceptual design and was based on a comprehensive review of contemporary literature regarding methods for assessing pulp vitality in the presence of periodontal pathology, as well as on the analysis and interpretation of current technological solutions in biophotonics and digital dentistry. Based on this analysis, a methodologically and technically substantiated concept of an integrated opto-diagnostic system was proposed as an approach to improve pulp vitality assessment using modern digital technologies.

Results and discussions. The factors limiting the widespread clinical application of pulse oximetry in dentistry include: 1) the need to develop a universal adaptive sensor design compatible with the variable morphology of teeth; 2) the need to optimize the power and stability of the light flux considering scattering effects within dental hard tissues (including diffraction and light dispersion); 3) influence of ambient light on measurement outcomes. In response to these limitations, an engineering-based concept of integrating a pulse oximetry sensor module into an intraoral scanner was proposed, forming a unified opto-diagnostic system. The integration of optical capabilities of intraoral scanners, particularly the use of the near-infrared spectrum, with the pulse oximetry principle of photoplethysmographic signal detection enhances light transmission through dental hard tissues and improves the detection of the pulsatile component of the signal.

Conclusions. Despite the high potential of pulse oximetry as an objective method for assessing pulp vitality, its clinical application is limited by several factors, including the lack of specialized dental sensors, light scattering in hard tissues, anatomical variability, and the absence of standardized diagnostic thresholds. In response, a concept of integrating a pulse oximetry module with an intraoral scanner is proposed, which may optimize optical probing conditions, improve photon transport efficiency, and enhance the signal-to-noise ratio.

Key words: endodontics, periodontology, endo-periodontal lesions, tooth, pulp, periodontium, periodontitis, diagnosis, pulp vitality, intraoral scanning, pulse oximetry.

Вступ. У випадках комбінованих уражень пульпи та пародонту коректна діагностика стану пульпи визначає тактику стоматологічного лікування, обґрунтовуючи потребу в реалізації чи відтермінуванні проведення ендодонтичних маніпуляцій по відношенню до цільових пародонтологічних втручань в структурі послідовності комплексу терапевтичних заходів [1, 2]. Водночас методи, котрі згідно інтерпретації лікарів застосовуються в реальних клінічних умовах для перевірки вітальності зуба, по факту дозволяють оцінити рівень відповіді на подразник, що по суті відображає функціональний стан нервового волокна, а не рівень перфузії в структурі пульпи [3, 4]. З іншої сторони, навіть застосовуючи тести на перевірку чутливості, які опосередковано дозволяють оцінити стан функціонування в структурі пульпи ланцюга передачі нервового імпульсу, такі не завжди характеризуються належним рівнем точності, як адекватного співвідношення рівнів чутливості та специфічності, для достатньо вірогідної диференціації випадків вітального та девітального станів пульпи в клінічних умовах наявності супутньої патології пародонту [5, 6]. З однієї сторони це може бути пояснено тим, що показники тестів на чутливість недостатньо корелюють із показниками тестів на вітальність в умовах пародонтологічних порушень, до прикладу у роботі Giovanella L. було продемонстровано, що коефіцієнт кореляції між вищезазначеними параметрами у формі відповіді на холодний подразник

та зареєстрованим рівнем сатурації складав лише 0,3, хоча такий результат може бути обґрунтований адаптивними змінами пульпи на подразнення зі сторони пародонту [7]. З іншої сторони на рівні експресії окремих запальних біомаркерів у дослідженні Louzada L. та колег було відмічено, що профіль таких в умовах симптоматичного незворотного пульпіту та вітального стану пульпи, однак на фоні резистентної до лікування патології пародонту з глибиною кишень в понад 6 мм, статистично не відрізняється, що частково може бути відповідальним за ефект «розмивання» клінічної картини ураження, асоційованої із запальними змінами, та провокувати варіації діагностичних показників в ході тестування [8]. Виходячи з цього, можна резюмувати, що тести на перевірку чутливості пульпи попри те, що забезпечують достатній клінічно-орієнтований рівень точності диференціації випадків вітального та девітального стану пульпи в звичайних клінічних умовах, характеризуються зниженням показника діагностичної точності при наявності супутньої патології пародонту. В той же час діагностичні тести, котрі орієнтовані на оцінку перфузії в структурі пульпи та об'єктивізацію рівня сатурації кисню, за даними літератури можна інтерпретувати у якості референтного підходу до верифікації вітального стану [5].

Лазерна доплерівська флоуметрія як метод оцінки вітальності продемонстрував стабільність високих показників чутливості та специфічності діагностики

при різних клінічних сценаріях. В порівнянні із ним метод пульсоксиметрії характеризувався певною варіацією показників при різних вихідних умовах [5]. З іншої сторони лазерна доплерівська флоуметрія має ряд недоліків порівняно з пульсоксиметрією: вона менш специфічна до кровотоку саме в пульпі, оскільки сигнал може спотворюватися кровопостачанням з навколишніх тканин, є дуже чутливою до рухів пацієнта та положення датчика, що ускладнює отримання стабільних результатів, потребує відповідних знань для інтерпретації результатів через комплексний характер отриманих сигналів, а також є дорожчою та менш зручною для впровадження у повсякденну клінічну практику [5].

Результати систематичного огляду Gupta D. та колеги засвідчили, що метод пульсоксиметрії є одним з найбільш надійних діагностичних підходів до оцінки вітальності пульпи з усередненим рівнем чутливості в 95% та специфічності в 99% [9]. Мета-аналітичне дослідження Patro S. та колеги підтвердило високі діагностичні можливості пульсоксиметрії у диференціації вітального та девітального станів пульпи [10]. Caldeira C. L. та колеги відмітили значущість пульсоксиметрії для оцінки вітальності травмованих зубів, що сприяло більш доказовому аргументуванню щодо потреби моніторингу за станом таких без проведення ендодонтичного лікування зубів [11]. Водночас лише окремі дослідження висвітлюють можливість застосування методу пульсоксиметрії для оцінки вітальності зубів в умовах суміжно наявних патологій пародонту, а також специфічно у випадках ендо-пародонтальних патологій [12], і уточнення даних можливостей, а також розробка пропозицій для вдосконалення даного методу у вищезазначених клінічних умовах є аргументовано-релевантним завданням сучасної стоматологічної практики.

Мета. Проаналізувати проблематику сучасних методів до оцінки вітальності пульпи в умовах наявної суміжної патології пародонту, систематизувати існуючі підходи щодо їх оптимізації та розробити технічну пропозицію вдосконалення з використанням можливостей сучасних цифрових технологій.

Матеріали та методи. Проведене дослідження носило теоретико-аналітичний та інженерно-концептуальний характер і базувалося на системному узагальненні сучасних літературних даних щодо методів оцінки вітальності пульпи зуба в умовах супутньої патології пародонту, а також на аналізі та інтерпретації сучасних технологічних рішень у сфері біофотоніки та цифрової стоматології орієнтованих на оцінку вітальності пульпи.

У межах проведеного дослідження було реалізовано комплексний підхід, що включав:

- критичний аналіз результатів попередніх клініко-гістологічних та експериментальних досліджень, спрямований на узагальнення даних щодо морфологічних і функціональних змін пульпи при супутніх пародонтальних ураженнях та їх впливу на параметри мікроциркуляції і тканинної оксигенації, котрі можуть бути зареєстровані в ході діагностичної оцінки вітальності пульпи;

- систематизацію фізичних, біологічних та технічних чинників, що обмежують практичне впровадження та/або діагностичну спроможність методу пульсоксиметрії як такого, що застосовується для оцінки вітальності пульпи в цілому, а також в умовах ендо-пародонтальних порушень;

- аналіз конструктивних особливостей існуючих систем пульсоксиметрії, зокрема таких з адаптованими технічними рішеннями для стоматологічного застосування, з оцінкою впливу реалізованих модифікацій на відтворюваність, стабільність та точність вимірювань.

На основі проведеного аналізу було сформульовано методологічно- та технічно-обґрунтовану концепцію інтегрованої оптико-діагностичної системи, як пропозиції вдосконалення методу оцінки вітальності пульпи з використанням сучасних цифрових технологій, котра передбачає функціональне поєднання пульсоксиметричного сенсорного модуля з інтраоральним сканером.

У запропонованій архітектурі реалізовано трансмісійний або квазітрансмісійний принцип реєстрації фотоплетизмографічного сигналу пульсоксиметра шляхом просторово узгодженого позиціонування джерела випромінювання та фотоприймального елемента відносно досліджуваного зуба, з підсиленням сигналу інфрачервоної складової за рахунок випромінювання аналогічного спектру, котре застосовується в структурі інтраорального сканера.

Методологічною основою підходу є використання випромінювання у червоному та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах із подальшим аналізом змін інтенсивності сигналу, зумовлених пульсаційною динамікою кровонаповнення пульпи. З урахуванням оптичної неоднорідності зуба особлива увага була приділена оптимізації передачі сигналу через емаль і дентин, що досягається шляхом узгодження спектральних характеристик випромінювання пульсоксиметра та інтраорального сканера, які забезпечують підвищення ефективності детекції сигналу.

Конструктивно система реалізується за модульним принципом із інтеграцією випромінювального та приймального вузлів у робочу частину інтраорального сканера з урахуванням анатомічної варіабельності зубного ряду. Додатково передбачено алгоритмічну обробку сигналу, що включає багаторівневу фільтрацію шумів, компенсацію рухових артефактів та нормалізацію даних із урахуванням геометричних параметрів зуба, отриманих у процесі тривимірного сканування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Структурі та функціональні зміни пульпи в умовах патології оточуючого пародонту достатньо описані в цільових наукових джерелах, проте специфіка таких продовжує уточнюватися з використанням більш сучасних методів дослідження [13, 14, 15]. Гістологічні дослідження проведені на зубах, екстрагованих у пацієнтів з важкою формою пародонтиту, встановили, що в залежності від залишкового рівня інтактної пародонтальної мембрани поширеність явищ некрозу пульпи у таких зубах може сягати до 63,33%, набряку пульпи – до 50,88%, васкулярної атрофії – до 28,07%, фіброзу структури –

до 38,60%, кальцифікації – до 22,81% [16]. В цілому результати продемонстрували, що наявність пародонтиту негативно впливає на стан пульпи зуба, а клінічно використовувані тести для оцінки чутливості не корелюють із гістологічними змінами пульпи в умовах наявності суміжних пародонтальних порушень [16]. Аналогічні результати також були описані в клініко-гістологічному дослідженні Arulmani S. та колег, при цьому вони повідомляли про вищу поширеність некрозу пульпи (до 90%) на фоні наявного пародонтиту [12]. У систематичному огляді літератури, проведеному Kostenkova A. та колегами (2025), було відзначено, що за умов наявності пародонтиту у структурі пульпи запальна клітинна інфільтрація може відмічатися з поширеністю в 34,29–93,7%, некроз пульпи – з поширеністю в 90% (при виражених рецесіях), крім того мають місце явища фіброзу та кальцифікації [17].

Рівень сатурації кисню в структурі пульпи за даними Giovanella L. та колег корелював із глибиною пародонтальної кишені (кожен 1 мм глибини був асоційований з 2,2% зниженням сатурації) та втратою клінічного прикріплення (кожен 1 мм втрати клінічного прикріплення був асоційований із 1,5% зниженням сатурації), що лише підтверджує дані й інших досліджень, які засвідчували негативний вплив компрометованого стану оточуючого пародонту на стан пульпи [7]. Редукція рівня сатурація була відмічена також і на кожен міліметр вираженості рецесій (0,6% на 1 мм), проте статистична значущість таких залежностей не була підтверджена [7]. Хоча в клініко-гістологічному дослідженні Arulmani S. та колег було відмічено, що рецесії асоційовані з вищою вираженістю дегенеративних змін пульпи у пацієнтів з пародонтитом, а відтак – і потенційно із нижчим рівнем перфузії [12]. Водночас навіть приймаючи до уваги результати відмічені в попередніх дослідженнях досі не встановлено чіткої категоризації показників сатурації, об'єктивізованих методом пульсоксиметрії, котрі могли б з достатнім рівнем вірогідності засвідчувати вітальний та запалений стан пульпи зуба в умовах ендо-пародонтальних патологій [12]. Хоча Lambert P. та колеги в ході систематичного огляду зробили спробу категоризувати референтні дані насичення киснем, і на основі проведеного мета-аналізу встановили рівні в 84,94% (95% довірчий інтервал [ДІ]: 84,85–85,04%) для центральних різців, 89,29% (95% ДІ: 89,22–89,35%) для латеральних різців та 89,20% (95% ДІ: 89,05–89,34%) для ікол [18]. В ході опрацювання було зазначено, що в попередніх наукових роботах дослідники порівнювали показники пульсоксиметрії відмічені на досліджуваних зубах із такими, зареєстрованими на пальцях пацієнтів, оскільки використовували дизайни апаратів пульсоксиметрів оригінально були розроблені саме для пальцевої фіксації, однак кореляція між такими не завжди була встановлена. Однак, водночас мета-аналітичне опрацювання даних проведене Lambert P. дозволило встановити мінімальний рівень сатурації киснем, асоційований із вітальним станом пульпи, який складав 77,52% [18].

Виходячи з цього можна резюмувати, що патологічні зміни пародонту суттєво впливають на стан

пульпи та безпосередньо відображаються на показниках пульсоксиметрії, зумовлюючи зниження рівня сатурації кисню (SpO₂) та зміну перфузії. Встановлені кореляції між глибиною пародонтальних кишень, втратою клінічного прикріплення та показниками SpO₂ підтверджують цей взаємозв'язок, однак водночас ускладнюють об'єктивну інтерпретацію отриманих даних. Наявність запальних і дегенеративних змін пульпи, а також вплив морфологічних змін твердих тканин зуба можуть спотворювати результати вимірювання, знижуючи їхню діагностичну точність. Таким чином, використання пульсоксиметрії в умовах ендо-пародонтальних уражень потребує подальшого вдосконалення, стандартизації підходів та уточнення діагностичних критеріїв для забезпечення її надійності та клінічної інформативності.

Almudever-García A. та колег було відмічено, що однією з проблем уніфікованої оцінки ефективності пульсоксиметрії для діагностики вітального стану пульпи є відсутність цільового стоматологічного апарату пульсоксиметра [19].

Kasper R. та колеги систематизували наступні фактори, котрі обмежують широке використання пульсоксиметрії в клінічній стоматологічній практиці:

- 1) потреба розробки універсального дизайну адаптивного датчика в умовах варіативної конфігурації зубів різної топографічної приналежності;
- 2) потреба оптимізації потужності та стабільності світлового потоку з урахуванням ефекту розсіювання через товщу твердих тканин зубів (мінімізації ефектів дифракції та розсіювання);
- 3) необхідність мінімізації впливу зовнішнього освітлення на результуючі показники пульсоксиметрії [20].

Окремими аспектами виступають технологічні особливості, котрі повинні бути враховані при проведенні процедури пульсоксиметрії в ендодонтичній практиці. Зокрема, повинно забезпечуватися паралельне розташування сенсора та LED-діодів відносно зуба, як цільової ділянки дослідження, таким чином, щоб мимовільні рухи пацієнта не провокували зміщення датчика [20]. У разі непаралельного розміщення діодів детектор отримує штучно зменшену кількість світлового сигналу, що безпосередньо впливає на результуючі показники. Крім того, необхідним є забезпечення швидкого процесингового зв'язку між апаратною та програмною частиною, щоби зареєстровані пульсоксиметром показники відразу нотувалися у адаптованому програмному забезпеченні з можливістю проведення їх подальшого аналізу [20]. На даний момент більшість досліджень з використанням пульсоксиметрії в стоматології використовують апарати, що відображають показники сатурації на екрані монітора самого апарату, і відтак повинні бути в подальшому перенесені вручну у табличний редактор чи картку пацієнта для реєстрації і аналізу. Крім того згідно попередніх досліджень на результати пульсоксиметрії пульпи найбільше впливають оптичні перешкоди, представлені товщею твердих тканин зуба, та вікові інволютивні зміни пульпи (мініералізація пульпи та зниження кровотоку із віком

може призводити до зниження показників насичення киснем) [19]. Емаль та дентин, як і реставраційні та ізолюючі матеріали, провокують ефект розсіювання світла і відтак знижують точність вимірювання пульсоксиметра [19].

Приймаючи до уваги вищезазначені обмеження щодо можливості застосування та проблематики забезпечення належної діагностичної точності методу пульсоксиметрії нами запропонована модифікація підходу із використанням технології інтраорального сканування. Запропонований підхід ґрунтується на інтеграції пульсоксиметричного сенсорного модуля в конструкцію інтраорального сканера з формуванням єдиної оптико-діагностичної системи. У межах такого рішення джерело випромінювання, що працює в червоному та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах, позиціонується таким чином, щоб забезпечити контрольоване введення світлового потоку в структури зуба, тоді як фотоприймальний елемент, адаптований до анатомії зубного ряду, реєструє сигнал після його проходження через тверді тканини та пульпу. Така геометрія формує трансмісійний або квазітрансмісійний оптичний канал, що є принципово важливим для підвищення чутливості до змін мікроциркуляції в пульпі (рис. 1).

Фізичною основою методу є фотоплетизмографічний аналіз сигналу, який дозволяє диференціювати постійну компоненту, обумовлену оптичними властивостями емалі та дентину, та змінну компоненту, асоційовану з пульсаційними коливаннями кровонаповнення [5, 19, 20]. Спектральне співвідношення поглинання на різних довжинах хвиль забезпечує кількісну оцінку оксигенації гемоглобіну, що розглядається як об'єктивний індикатор вітальності пульпи. При цьому узгодження спектральних характеристик випромінювання інтраорального сканера з діапазоном пульсоксиметрії створює умови для підвищення густини фотонного потоку, що, з урахуванням домі-

нуючих процесів розсіювання, призводить до зростання ефективної кількості фотонів, які досягають детектора. Це, у свою чергу, покращує відношення параметрів сигнал/шум і підвищує достовірність реєстрації низькоамплітудних гемодинамічних коливань. Такий ефект має не електронну, а суто фотонно-транспортну природу, забезпечуючи оптимізацію умов формування сигналу без спотворення його біологічного змісту. Даний аспект вдосконалення є принципово важливим з огляду на складну багатшарову структуру зуба, де варіації товщини дентину, ступеня мінералізації та наявності вторинних структур істотно впливають на коефіцієнти поглинання і розсіювання [5, 19, 20], в свою чергу підвищення інтенсивності та спектральна стабілізація випромінювання дозволяють зменшити вплив індивідуальних анатомічних факторів і підвищити відтворюваність вимірювань.

Найбільш показовим прикладом інтраоральних сканерів, у яких реалізовано використання випромінювання в ближньому інфрачервоному діапазоні, є система iTero Element 5D (Align Technology, США), що функціонує на основі технології Near-Infrared Imaging (NIRI) із довжиною хвилі близько 850 нм. Первинно дана технологія була розроблена для виявлення та верифікації каріозних уражень за рахунок підвищеної проникності інфрачервоного світла крізь тверді тканини зуба та зміни оптичних властивостей демінералізованих ділянок. З позицій біофотоніки зазначений спектральний діапазон практично відповідає одному з робочих каналів пульсоксиметрії (850–940 нм), що використовується для аналізу диференційного поглинання оксигенованого та дезоксигенованого гемоглобіну. Така спектральна конгруентність обґрунтовує доцільність використання подібних сканерів як платформи для інтеграції або синергічного поєднання з пульсоксиметричними сенсорами, оскільки дозволяє забезпечити фізично узгоджені умови формування оптичного сигналу.

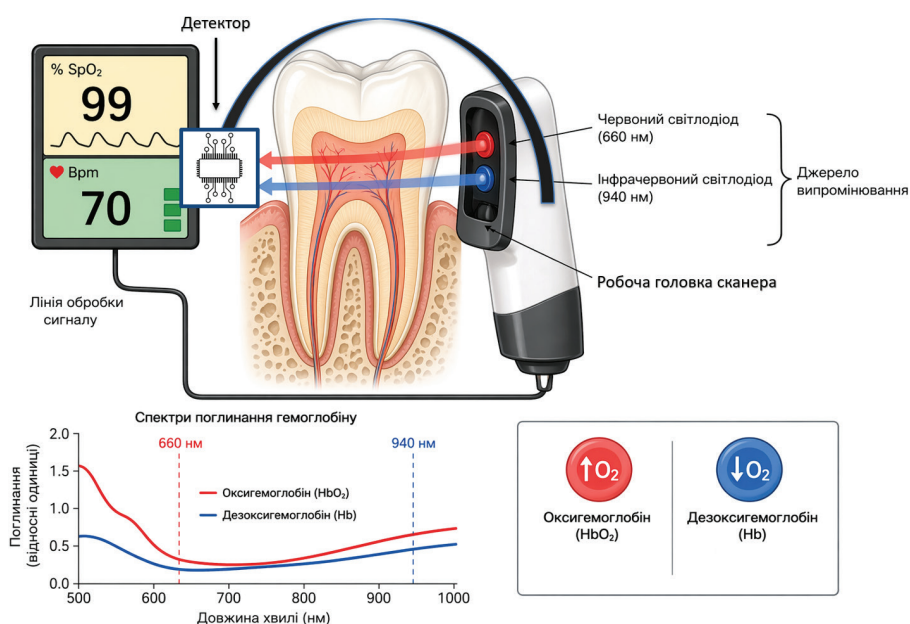


Рис. 1. Схематичне зображення запропонованої технічної пропозиції вдосконалення методу пульсоксиметрії з використанням сучасних цифрових технологій

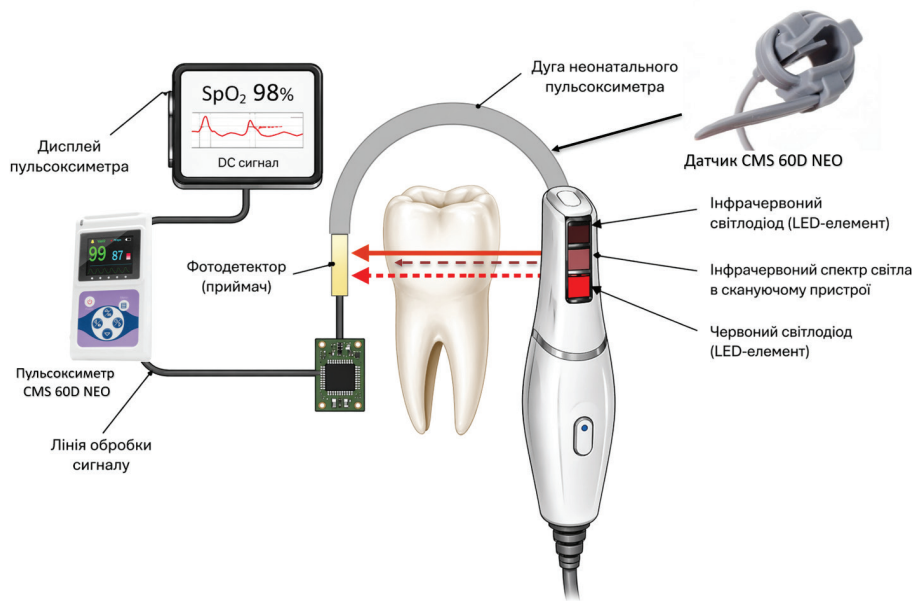


Рис. 2. Схематична ілюстрації конструктивної реалізації інтегрованої системи «інтраоральний сканер-пульсоксиметр»

Крім того, випромінювання в діапазоні ~ 850 нм характеризується відносно низьким коефіцієнтом поглинання у мінералізованих тканинах (емалі та дентині) та переважанням процесів розсіювання, що забезпечує більшу глибину проникнення світла порівняно з видимим спектром. Це створює передумови для реєстрації сигналів, сформованих у глибших структурах, зокрема в пульпі, де відбуваються гемодинамічні процеси. В науковій літературі попередньо висвітлено успішний досвід застосування функції NIRI для детекції прихованого карієсу із використанням специфічно із використанням апарату інтраорального сканера iTero Element 5D [21–25]. Хоча офіційні джерела інформації, асоційовані із інтраоральним сканером PrimeScan 2 (Dentsply Sirona, США) також вказують на наявність у структурі апаратної складової можливості сканування у режимі з використання ближнього інфрачервоного світла. В окремих джерелах повідомлялось про імплементацію можливості детекцію карієсу сканером Planmeca Emerald S (Planmeca, Фінляндія) з довжиною хвилі 727 нм [25]. Офіційна інформація на сайті компанії 3Share засвідчує використання у структурі моделі сканера TRIOS 6 (3Share, Данія) технології гіперспектральної візуалізації, котра одночасно поєднує дані білого світла, флуоресценції та ближнього інфрачервоного випромінювання в межах одного сканування, складова яких потенційно також може бути інтегрована із модулем пульсоксиметрії. Однак на даний момент кількість публікацій та репрезентацій результатів клінічного застосування технології NIRI в структурі інтраорального сканування є переважуюче вищою щодо застосування система iTero Element 5D, аніж інших аналогів [21–25].

Таким чином, з урахуванням спектральної відповідності, оптичних характеристик тканин зуба, фізіологічної інформативності інфрачервоного діапазону та доступної доказової бази, використання інтраоральних сканерів типу iTero Element 5D може розглядатися як

науково обґрунтована основа для створення комбінованих діагностичних систем, орієнтованих на неінвазивну оцінку вітальності пульпи. Водночас така концепція потребує подальшої експериментальної та клінічної валідації щодо точності, відтворюваності та діагностичної чутливості отриманих показників.

Конструктивна реалізація інтегрованої системи «інтраоральний сканер-пульсоксиметр» може бути інженерно виконана за модульним принципом із просторово рознесеними випромінювальним та приймальним вузлами. Зокрема, світлодіодний блок, що генерує випромінювання у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах, доцільно інтегрувати у робочу головку сканера, який розміщується з вестибулярного боку коронки зуба, забезпечуючи стабільну геометрію введення світлового потоку. Фотоприймальний модуль, який розміщуватиметься в проекції язикової чи піднебінної сторін зубів, пропонується реалізувати як елемент на кінці дугоподібного утримувача, який на іншому кінці буде з'єднаний із робочою насадкою сканера. Така просторова архітектура формує оптичний канал трансмісійного або квазітрансмісійного типу, в якому реєструється сигнал після проходження через багаточастотну структуру зуба, що дозволяє підвищити чутливість системи до змін гемодинаміки пульпи. У запропонованому технічному рішенні як базову платформу сенсорного вузла доцільно використати конструкцію неонатального пульсоксиметра по типу CMS 60D NEO (Contec Medical Systems Co., Ltd., Китай), яка враховуючи свої розміри, гнучкість та можливість адаптивної фіксації є найбільш придатними для модифікації під умови інтраорального застосування та інтеграції з геометрією скануючої головки (рис. 2).

Разом із тим, забезпечення метрологічної коректності методу вимагає жорсткого контролю параметрів випромінювання: відповідності довжин хвиль максимумам диференційного поглинання оксигенованого та

дезоксигенованого гемоглобіну, достатньої, але безпечної інтенсивності світлового потоку, а також високої стабільності джерела випромінювання. Додатково необхідною є синхронізація пульсоксиметричного та сканувального оптичних каналів для мінімізації інтерференції сигналів, що може реалізовуватися шляхом часової модуляції або спектрального розділення.

Обов'язковою складовою запропонованого вдосконалення є алгоритмічна обробка сигналу, яка передбачає багаторівневу фільтрацію, компенсацію рухових артефактів та нормалізацію з урахуванням геометричних параметрів зуба, отриманих у процесі 3D-сканування.

Відтак запропонована система забезпечує неінвазивну, об'єктивну та відтворювану діагностику стану пульпи зуба на основі фізіологічних параметрів кровообігу, поєднуючи переваги сучасної цифрової стоматології з біофотонними методами дослідження тканин, що відкриває перспективи для підвищення точності клінічних рішень та автоматизації діагностичних процесів. Водночас інтеграція пульсоксиметричного модуля з інтраоральним сканером дозволяє одночасно отримувати високоточну тривимірну (3D) модель зубів, що забезпечує можливість зіставлення функціональних показників пульпи з анатомічними особливостями зуба. Це створює умови для цифрового документування та нотування стану кожного зуба з урахуванням як його морфологічних характеристик, так і фізіологічних параметрів, що підвищує інформативність діагностики, покращує відтворюваність результатів і сприяє більш обґрунтованому індивідуалізованому плануванню лікування та динамічному клінічному моніторингу. Крім того, цифрова природа отриманих даних створює передумови для їх подальшого аналізу із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту, що відкриває перспективи для розвитку предикативної діагностики та персоналізованого підходу до лікування стоматологічних захворювань.

У попередніх публікаціях Estrela C. було запропоновано конструкції утримувачів пульсоксиметра на різні групи зубів [26, 27]. Grabliauskiene Z. та колегами було запропоновано конструкцію універсального утримувача пульсоксиметра на зубах, змодельованого в програмному середовищі та виготовленого із застосуванням технологій трьохмірного прінтингу [28]. Аналогічний підхід також було описано в науковій роботі Janani K. та колег [29]. Використання такого пристрою сприяло оптимізації процедури вимірювання рівня сатурації з можливістю формування референтних показників для зубів верхньої та нижньої щелепи та їх відповідних довірчих інтервалів. В той же час існуючі модифікації окремих пульсоксиметрів, а також конструкцій для їх утримання на зубі потенційно можуть впливати на точність зареєстрованих показників, і крім того, враховуючи відмінності реалізованих підходів до оптимізації проведення процедури пульсоксиметрії в стоматологічній практиці, виникає ефект методологічної відмінності проведених досліджень, що утруднює їх порівняння в ході мета-аналітичного опрацювання. Попередньо повідомлялось лише про один сучасний підхід із викорис-

танням принципу саме оптичного сканування структури пульпи [30]. Принцип роботи такого пристрою базувався на використанні спектроскопії пропущеного світла в діапазоні довжин хвиль від 450 до 750 нм та аналізі спектральної відповіді. Тісний контакт із стінками зуба забезпечувався завдяки використанню світлопровідних зондів-щупів, які фіксувалися на зубі, а час вимірювання для кожного зуба залежав від ширини досліджуваної одиниці зубного ряду та рівня прозорості, і визначався на основі спеціально-розробленого програмного забезпечення. Проте апробація такого пристрою встановила, що його діагностична точність є нижчою за клінічно-прийнятну, особливо у випадках ураженого стану пульпи [30].

В цілому варто зазначити, що підходи до модифікації методів оцінки вітальності пульпи з метою підвищення рівня їх клінічної адаптованості в більшій мірі стосуються практик використання принципу пульсоксиметрії, аніж принципу доплерографії.

Також в літературі відома ціла низка інших оптично-діагностичних методів оцінки вітальності пульпи, що зокрема включають фотоплетизмографію, флоуметрія пропущеного лазерного світла, спектрофотометрія, світлоіндукована флюорисценція, оптично рефлексійна віталометрія, метод лазерних спеклів, діагностична спроможність котрих потребує уточнення як з точки зору точності, так і з точки зору клінічної застосовуваності [31].

В той же час запропонована технічна концепція комбінованого використання технологій інтраорального сканування та пульсоксиметрії формує новий підхід до об'єктивної оцінки вітальності пульпи зуба, що базується на аналізі фізіологічних параметрів мікроциркуляції, а не лише сенсорної відповіді тканин. Інтеграція оптичних можливостей інтраорального сканера, зокрема використання ближнього інфрачервоного спектру, із пульсоксиметричним принципом реєстрації фотоплетизмографічного сигналу дозволяє підвищити ефективність проходження світла крізь тверді тканини зуба та покращити умови детекції пульсаційної компоненти сигналу. Це забезпечує підвищення співвідношення параметрів сигнал/шум, зростання відтворюваності вимірювань та зменшення впливу анатомічної варіабельності зубів на результати діагностики.

Висновки. Проведений аналіз засвідчив, що за умов супутньої патології пародонту відмічаються виражені морфофункціональні зміни пульпи, які супроводжуються порушенням мікроциркуляції, зниженням рівня оксигенації та розвитком дегенеративних процесів. Такі зміни суттєво впливають на результати сучасних діагностичних тестів, зокрема знижують інформативність традиційних методів оцінки чутливості та ускладнюють інтерпретацію показників пульсоксиметрії через вплив оптичних і біофізичних факторів.

Встановлено, що, незважаючи на високий потенціал пульсоксиметрії як об'єктивного методу оцінки вітальності пульпи, її клінічне застосування обмежується низкою факторів, серед яких ключовими є відсутність спеціалізованих стоматологічних сенсорів, вплив розсіювання світла в твердих тканинах зуба,

варіабельність анатомічних умов та відсутність стандартизованих діагностичних порогів.

У відповідь на виявлені обмеження запропоновано інженерно обґрунтовану концепцію інтеграції пульсоксиметричного модуля з інтраоральним сканером, що дозволяє оптимізувати умови оптичного зондування, підвищити ефективність фотонного транспорту та покращити відношення сигнал/шум. Використання ближнього інфрачервоного спектру, характерного для сучасних скануючих систем, створює фізично узгоджені умови для реєстрації фотоплетизмографічного сигналу з глибоких структур зуба.

Крім того, поєднання функціональних параметрів пульси з морфологічними даними, отриманими

в результаті тривимірного сканування, забезпечує можливість комплексної оцінки стану зуба та створює умови для цифрового документування і моніторингу клінічних показників у динаміці.

Таким чином, запропонований підхід формує нову концепцію діагностики вітальності пульпи, орієнтовану на об'єктивну оцінку мікроциркуляції з урахуванням анатомічних особливостей зуба, що має потенціал для підвищення точності клінічних рішень. Водночас подальші експериментальні та клінічні дослідження є необхідними для валідації запропонованої системи, стандартизації методики та визначення її діагностичної ефективності в умовах ендо-пародонтальної патології.

REFERENCES

1. Komichi S, Takahashi Y, Kawahara T, Nagahara T, Hayashi M. Interpreting Endodontic–Periodontal Lesions: A Conceptual Framework Based on Pulpal and Periodontal Findings—A Narrative Review. *Dentistry Journal*. 2026 Mar 10;14(3):158. DOI: <https://doi.org/10.3390/dj14030158>.
2. Fan Y, Sun F, Zhu Q, Wang J, Wang P, Zhou Y, Gao Y, Shou Y, Feng M, Hu M, Cai A. Effects of Different Treatment Sequences on the Efficacy of Combined Periodontal-Endodontic Lesions: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Dental Journal*. 2026 Feb 1;76(1):104021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.identj.2025.104021>.
3. Saikiran KV, Gurunathan D, Patil SS, Nuvvula S, Elicherla SR, Elicherla NR. A bibliometric analysis of the 100 most cited articles on pulp vitality devices. *European Oral Research*. 2026 Jan 15;60(1):122. DOI: <https://doi.org/10.26650/eor.20251528914>.
4. Saikiran KV, Gurunathan D, Elicherla SR, Rahul S, Nuvvula S, Nuvvula S. Knowledge and awareness of pulp vitality tests among dental interns and postgraduates: A multicenter cross-sectional study. *Endodontology*. 2024 Jul 1;36(3):245-50. DOI: https://doi.org/10.4103/endo.endo_58_23.
5. Alghaithy RA, Qualtrough AJ. Pulp sensibility and vitality tests for diagnosing pulpal health in permanent teeth: a critical review. *International endodontic journal*. 2017 Feb;50(2):135-42. <https://doi.org/10.1111/iej.12611>
6. Jespersen JJ, Hellstein J, Williamson A, Johnson WT, Qian F. Evaluation of dental pulp sensibility tests in a clinical setting. *Journal of endodontics*. 2014 Mar 1;40(3):351-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2013.11.009>.
7. Giovannella LB, Barletta FB, Felipe WT, Bruno KF, de Alencar AH, Estrela C. Assessment of oxygen saturation in dental pulp of permanent teeth with periodontal disease. *Journal of Endodontics*. 2014 Dec 1;40(12):1927-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.08.009>.
8. Louzada LM, Arruda-Vasconcelos R, Kearney M, Yamauchi Y, Gomes BP, Duncan HF. Teeth with vital pulps and stage III periodontitis unresponsive to therapy exhibit a pulpal inflammatory profile similar to symptomatic irreversible pulpitis. *International Endodontic Journal*. 2024 Dec;57(12):1769-82. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.14139>.
9. Gupta D, Shaw AK, Gaikwad A, Kale P, Deshpande SM, Gachake A, Shaw AK, Gaikwad Sr A, Deshpande SM, Gachake AR. The diagnostic accuracy of pulse oximetry for assessing pulp vitality: a systematic review. *Cureus*. 2025 Jan 2;17(1). DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.76820>.
10. Patro S, Meto A, Mohanty A, Chopra V, Miglani S, Das A, Luke AM, Hadi DA, Meto A, Fiorillo L, Karobari MI. Diagnostic accuracy of pulp vitality tests and pulp sensibility tests for assessing pulpal health in permanent teeth: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022 Aug 4;19(15):9599. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19159599>.
11. Caldeira CL, Zamalloa SI, Sakitani CR, Barletta FB, Holzhausen M. Clinical Validation of Smartphone-Enabled Pulse Oximetry for Objective Pulp Vitality Assessment: A Diagnostic Accuracy Study. *Journal of Endodontics*. 2025 Sep 6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joen.2025.09.003>.
12. Arulmani S, Athul A, Bhuvanewari M, Vijayarangan A, Elumalai A, Muthukali S, Balachandran Jr A, Balachandran A. Assessment of pulp vitality in multirooted teeth with advanced periodontal disease: a clinical and histological study. *Cureus*. 2023 Jan 3;15(1). DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.33298>.
13. Ricucci D, Siqueira Jr JF, Rôças IN. Pulp response to periodontal disease: novel observations help clarify the processes of tissue breakdown and infection. *Journal of Endodontics*. 2021 May 1;47(5):740-54. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.02.005>
14. Gautam S, Galgali SR, Sheethal HS, Priya NS. Pulpal changes associated with advanced periodontal disease: a histopathological study. *Journal of Oral and Maxillofacial Pathology*. 2017 Jan 1;21(1):58-63. DOI: <https://doi.org/10.4103/0973-029X.203795>.
15. Sabeti M, Tayeed H, Kurtzman G, Abbas FM, Ardakani MT. Histopathological investigation of dental pulp reactions related to periodontitis. *European Endodontic Journal*. 2021 Jul 7;6(2):164-9. DOI: <https://doi.org/10.14744/ej.2021.96268>.
16. Tan B, Sun Q, Xiao J, Zhang L, Yan F. Pulp status of teeth in patients with chronic advanced periodontitis. *International journal of clinical and experimental pathology*. 2020 Apr 1;13(4):635. PMID: 32355511.
17. Kostenkova A, Zasčiurinskienė E, Lodienė G. Histopathological Evaluation of the Impact of Periodontitis on Dental Pulp Condition: A Systematic Literature Review. *Australian Endodontic Journal*. 2025 Dec;51(3):806-24. DOI: <https://doi.org/10.1111/aej.12978>.

-
18. Lambert P, Miguens SA, Solda C, Sganzerla JT, Reichert LA, Estrela C, Barletta FB. Reference values for pulp oxygen saturation as a diagnostic tool in endodontics: a systematic review and meta-analysis. *Restorative Dentistry & Endodontics*. 2020 Oct 5;45(4). DOI: <https://doi.org/10.5395/rde.2020.45.e48>.
19. Almudever-Garcia A, Forner L, Sanz JL, Llana C, Rodriguez-Lozano FJ, Guerrero-Gironés J, Melo M. Pulse oximetry as a diagnostic tool to determine pulp vitality: A systematic review. *Applied Sciences*. 2021 Mar 18;11(6):2747. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11062747>.
20. Kasper RH, Coelho MR, Miguens-Jr SA, Grazziotin-Soares R, Barletta FB. Pulse oximetry as a dental pulp test: a scoping review to identify barriers hindering the use of oximeters in clinical practice. *The Saudi Dental Journal*. 2024 Feb 1;36(2):262-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.11.006>.
21. Cuenin K, Chen J, Tai SK, Lee D, Gerges G, Oh H. Caries detection and characterization in pediatric patients using iTero 5D near-infrared technology. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2024 Jan 1;165(1):54-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2023.06.026>.
22. Tashkandi AK, Jiffri SO, Albalawi RM, Albukhari SA, Mugharbil SA, Yeslam HE. Detection of proximal dental caries in primary teeth with a near-infrared-irradiation-assisted intraoral scanner: an in vitro study. *BMC Oral Health*. 2025 Feb 20;25(1):270. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05629-8>.
23. Litzemberger F, Heck K, Kaisarly D, Kunzelmann KH. Diagnostic validity of early proximal caries detection using near-infrared imaging technology on 3D range data of posterior teeth. *Clinical oral investigations*. 2022 Jan;26(1):543-53. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04032-1>.
24. Misirli-Gülbes, M., Ongun, S., & Atabek, S. (2025). A Randomized Clinical Trial Comparing Near-Infrared Imaging and Panoramic Radiography for Caries Detection. *Nigerian Journal of Clinical Practice*, 28(10), 1139–1144. DOI: https://doi.org/10.4103/njcp.njcp_679_24.
25. Schlenz MA, Schupp B, Schmidt A, Wöstmann B, Baresel I, Krämer N, Schulz-Weidner N. New caries diagnostic tools in intraoral scanners: a comparative in vitro study to established methods in permanent and primary teeth. *Sensors*. 2022 Mar 10;22(6):2156. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22062156>.
26. Estrela C, Oliveira KS, Alencar AH, Barletta FB, Estrela CR, Felipe WT. Oxygen saturation in the dental pulp of maxillary and mandibular molars-Part 2. *Brazilian Dental Journal*. 2017;28(6):704-9. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-6440201701447>.
27. Estrela C, Serpa GC, Alencar AH, Bruno KF, Barletta FB, Felipe WT, Estrela CR, Souza JB. Oxygen saturation in the dental pulp of maxillary premolars in different age groups-Part 1. *Brazilian Dental Journal*. 2017;28:573-7. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-6440201701660>.
28. Grabliauskienė Ž, Zamaliauskienė R, Lodienė G. Pulp vitality testing with a developed universal pulse oximeter probe holder. *Medicina*. 2021 Jan 23;57(2):101. DOI: <https://doi.org/10.3390/medicina57020101>.
29. Janani K, Ajitha P, Sandhya R, Subbaiyan H, Jose J. Efficiency of new custom-made pulse oximeter sensor holder in assessment of actual pulp status. *Journal of Family Medicine and Primary Care*. 2020 Jul 1;9(7):3333-7. DOI: https://doi.org/10.4103/jfmpc.jfmpc_73_20.
30. Briseño Marroquín B, Borgschulte M, Savic A, Ertl TP, Wolf TG. Pulp Vitality Diagnosis by Means of an Optical Pulp Scanning Device. *Dentistry Journal*. 2024 Oct 12;12(10):326. DOI: <https://doi.org/10.3390/dj12100326>.
31. Afkhami F, Wright PP, Chien PY, Xu C, Walsh LJ, Peters OA. Exploring approaches to pulp vitality assessment: A scoping review of nontraditional methods. *International Endodontic Journal*. 2024 Aug;57(8):1065-98. DOI: <https://doi.org/10.1111/iej.14073>.

Дата першого надходження статті до видання: 15.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026