

*Оксана Шекера, Анатолій Пальчиков, Мирослав Гончарук-Хомин**ДВНЗ «Ужгородський національний університет»*

До питання трендів цифровізації у пародонтологічній практиці: аналіз сучасних концепцій та особливостей практичної імплементації

▷ **Актуальність.** Можливості сучасних обчислювальних алгоритмів, оформлені у канву цільового програмного забезпечення, асоційованого чи не асоційованого із певним видом апаратної складової (інтраоральний сканер, конусно-променевий комп'ютерний томограф, системи автоматизованої пародонтологічної діагностики), змінюють патерни розвитку та впровадження цифрових технологій в пародонтологічній практиці.

Мета. Проаналізувати наявні тренди цифровізації в пародонтологічній практиці з урахуванням сучасних концепцій обробки великих масивів даних та індивідуалізації комплексних діагностично-лікувальних підходів.

Матеріали та методи. Пошук релевантних публікацій здійснювали у базах даних PubMed/MEDLINE та Scopus, а також із використанням пошукової системи Google Scholar із застосуванням булевих операторів (AND, OR, NOT) та набору ключових слів варіантів їх комбінацій. Внаслідок структуризації та групування результатів на основі проведеного контент-аналізу всі відібрані джерела були згруповані у такі аналітичні домени: рівень фактичної клінічної інтеграції цифрових технологій; роль алгоритмів штучного інтелекту у діагностиці та прогнозуванні; мультимодальна інтеграція даних як ключовий тренд цифровізації; бар'єри імплементації, перспективи розвитку та трансляції цифровізації у клінічну пародонтологічну практику.

Результати дослідження. Сучасний стан цифровізації пародонтологічної практики характеризується дисбалансом між стрімким розвитком технологічних можливостей та обмеженим рівнем їх клінічної імплементації. Незважаючи на доведений потенціал алгоритмів штучного інтелекту в обробці мультимодальних даних, підвищенні точності діагностики, стратифікації ризиків та прогнозуванні результатів лікування, їх широке впровадження обмежується недостатньою зовнішньою валідацією, гетерогенністю та обмеженим обсягом доступних датасетів, варіабельністю ефективності моделей залежно від модальності вхідних даних, а також відсутністю уніфікованих протоколів інтеграції у клінічну практику.

Висновки. Цифровізація в структурі пародонтологічної практики характеризується кластерним патерном впровадження із покриттям в першу чергу саме діагностичної складової та вихідною класифікацією клінічних випадків, що пов'язано як з відповідною статистичною «зрілістю» цільових верифікаційних алгоритмів, так і з досвідом їх впровадження в структуру відповідного апаратного та програмного забезпечення. Водночас прогностична складова, представлена алгоритмами для опрацювання масивів первинно-цифрових або ж оцифрованих даних, отриманих в ході діагностики пацієнта, досі залишається предметом валідаційних досліджень, кількість яких прогресивно зростає.

Ключові слова: пародонтологія; цифрова стоматологія; цифровізація; клінічна практика; штучний інтелект; пацієнт-орієнтоване лікування; доказова база.

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.uk>



Вступ

Попередній систематичний огляд, проведений Revilla-Leon M. та колегами, орієнтований на визначення фактичних можливостей застосування штучного інтелекту (ШІ) з метою діагностики

випадків гінгівіту та пародонтиту, визначив, що такі характеризуються широким спектром використання (від детекції зубного нальоту до об'єктивізації втрати кісткової тканини за даними рентгенограм), а також вираженим діапазоном

варіацій показників ефективності, які відрізнялися залежно від цільового застосування [1]. З іншого боку, у даному систематичному огляді, як і в низці досліджень аналогічної спрямованості, було визначено, що моделі ШІ, розроблені з метою застосування в пародонтологічній практиці, переживають специфічний етап розвитку: статистична «зрілість» даних моделей досі є недостатньо валідованою, тоді як запит на їх клінічне застосування продовжує зростати, слідуючи загальновираженим тенденціям цифровізації в стоматологічній практиці [1–4].

Відтак можна резюмувати, що можливості сучасних обчислювальних алгоритмів, оформлені у канву цільового програмного забезпечення, асоційованого чи не асоційованого із певним видом апаратної складової (інтраоральний сканер, конусно-променевий комп'ютерний томограф, системи автоматизованої пародонтологічної діагностики), змінюють патерни розвитку та впровадження цифрових технологій в пародонтологічній практиці [3, 5, 6]. Власне, відбувається перехід від етапу масового накопичення даних про стоматологічне здоров'я пацієнта до етапу структурованого процесингу цих даних із формулюванням на їх основі відповідних індивідуалізованих показників щодо діагностики відповідної стадії та ступеня захворювання, показників відносного ризику агравації патології чи навіть втрати окремих одиниць зубного ряду, формування пацієнт-орієнтованих схем реалізації заходів в структурі підтримуючої пародонтальної терапії [1, 3, 5, 6]. Окремої уваги потребує той факт, що опрацювання вищезазначених масивів даних наразі може провадитися не з використанням класичних статистичних підходів, а мультишарованих методів обробки інформації, на зразок конволюційних згорткових мереж, а також із реалізацією ансамблевих кооперацій одночасно декількох обчислювальних алгоритмів у структурі однієї моделі [1, 2, 3]. Вищезазначені особливості після досягнення клінічно-орієнтованої, а не лише суто математичної «зрілості» змінюють траєкторіальний патерн імплементації сучасних цифрових технологій в пародонтологічну практику.

Консенсусний звіт 20-го Європейського воркшопу з пародонтології визначив, що тестування моделей штучного інтелекту діагностичної та прогностичної спрямованості, а також інших цифрових інструментів діагностики в структурі проспективних досліджень є одним з фокусів для розширення можливостей пародонтологічної практики в цілому, оскільки досі недостатньо вивченою залишається клінічна значущість таких моделей, апробованих лише в експериментальних чи обмежених клінічних умовах

[7]. Зі свого боку, Hashim N. та колеги (2026) підкреслили, що наступне покоління клінічних гайдлайнів в пародонтології повинно передбачати наявність в їхній структурі елементів, що визначають вихідну складність клінічного випадку, прецизійність проведеної діагностики, значущість використовуваних у ході діагностики чи прогнозу цифрових технологій та інших складових, які сприяють персоніфікації розроблених стратегій лікування та моніторингу [8].

Виходячи з цього, аналіз наявних тенденцій щодо залученості цифрових інструментів, зокрема обчислювальних алгоритмів на основі штучного інтелекту, в пародонтологічну практику, сприятиме глибшому розумінню фактичних рівнів інтеграції таких моделей для оптимізації процесів діагностики, побудови стратегії лікування та обрахунку прогнозу змін за різних підходів до реалізації активної та підтримувальної терапії пацієнтів із патологією пародонта. Крім того, проведений аналіз дозволить критично оцінити, наскільки доступні можливості цифрових технологій, зокрема ШІ-базовані рішення, є клінічно застосовними, з можливістю трансляції експериментально-апробованих підходів в умови реальної клінічної практики.

Мета дослідження. Проаналізувати наявні тренди цифровізації в пародонтологічній практиці з урахуванням сучасних концепцій обробки великих масивів даних та індивідуалізації комплексних діагностично-лікувальних підходів.

Матеріали та методи

Це дослідження було виконано у форматі аналітичного огляду наукової літератури із застосуванням систематизованого підходу до ідентифікації, відбору, екстракції, контент-аналізу та узагальнення даних, асоційованих із репрезентацією сучасних трендів цифровізації у пародонтологічній практиці. Основний акцент дослідження був зосереджений на аналізі закономірностей інтеграції цифрових підходів, включаючи алгоритми штучного інтелекту та методи обробки великих масивів даних, у клінічні процеси діагностики, планування лікування, моніторингу та прогнозування. Ключовими категоріями пошуку, які формували дослідницький запит, були такі:

- ідентифікація ключових напрямів цифровізації пародонтологічної практики;
- оцінка рівня клінічної імплементації ідентифікованих варіантів цифрових можливостей в пародонтологічній практиці;
- аналіз потенціалу трансляції цифрових інструментів та моделей штучного інтелекту, апро-

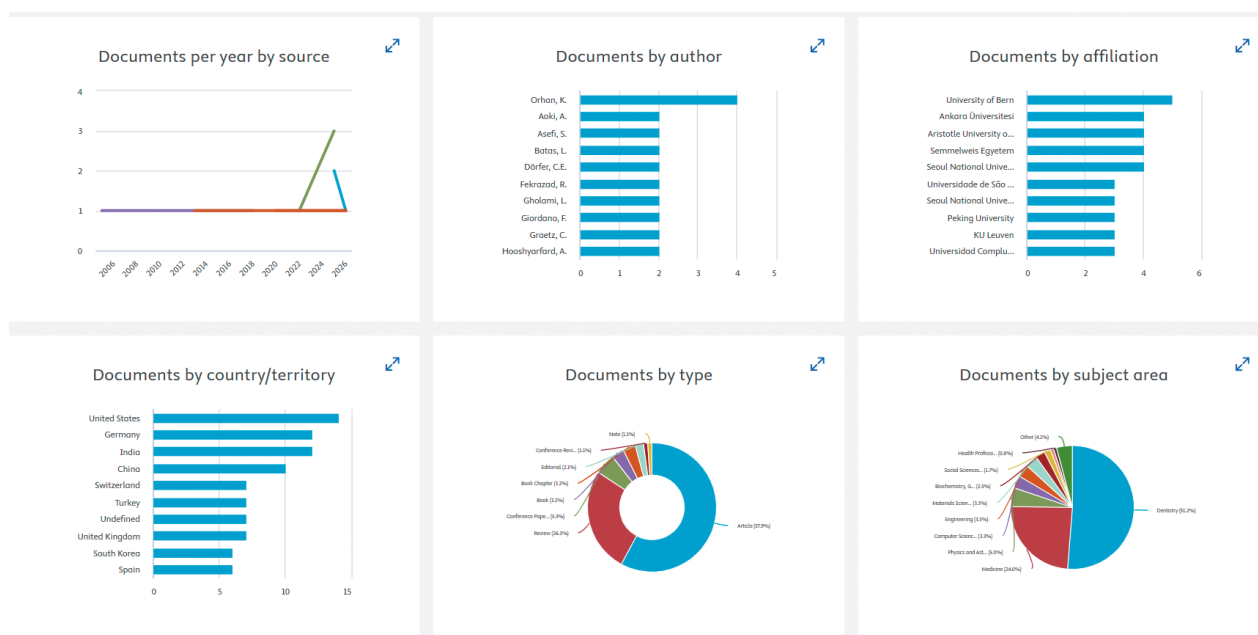


Рис. 1. Проміжний етап аналізу 95 публікацій відібраних за ключовими словами «digital» та «periodontology» у базі Scopus.

бованих в експериментальних умовах, у клінічну пародонтологічну практику.

Пошук релевантних публікацій здійснювали у базах даних PubMed/MEDLINE та Scopus, а також із використанням пошукової системи Google Scholar із застосуванням булевих операторів (AND, OR, NOT), набору ключових слів і варіантів їх комбінацій, зокрема: «digitalization», «digital transformation», «artificial intelligence», «machine learning», «periodontology». Додатково проводили ручний пошук за списками літератури відібраних джерел.

Пошук літератури у базі даних PubMed здійснювали із застосуванням розширеного булевого пошукового запиту. Побудова пошукового запиту базувалася на поєднанні синонімічних варіантів ключових термінів із використанням оператора «OR» для розширення чутливості пошуку, а також оператора «AND» для забезпечення специфічності результатів у межах пародонтологічної тематики. Додатково застосовували контрольовану медичну термінологію (MeSH), що дозволило підвищити релевантність відібраних джерел.

Зокрема, використовували таку пошукову формулу:

("digitalisation"[All Fields] OR
 "digitalised"[All Fields] OR
 "digitalization"[All Fields] OR
 "digitalize"[All Fields] OR
 "digitalized"[All Fields] OR
 "digitalizer"[All Fields] OR
 "digitalizing"[All Fields] OR
 "digitally"[All Fields] OR
 "digitals"[All Fields] OR
 "digitization"[All Fields] OR

"digitizations"[All Fields] OR
 "digitize"[All Fields] OR
 "digitized"[All Fields] OR
 "digitizer"[All Fields] OR
 "digitizers"[All Fields] OR
 "digitizes"[All Fields] OR
 "digitizing"[All Fields] OR
 "radiographic image enhancement"[MeSH Terms] OR
 "radiographic"[All Fields] AND
 "image"[All Fields] AND
 "enhancement"[All Fields]) OR
 "radiographic image enhancement"[All Fields] OR
 "digital"[All Fields])
 AND
 ("periodontics"[MeSH Terms] OR
 "periodontics"[All Fields] OR
 "periodontology"[All Fields]).

Відбір здійснювали поетапно: спочатку реалізовували первинний скринінг наукових робіт за заголовками та анотаціями, після чого проводили їх повнотекстову оцінку, що дозволяло сформулювати фінальну вибірку таргетних досліджень (рис. 1).

Джерела, які були лише частково релевантні щодо мети цього огляду, включали до досліджуваної вибірки за умови їх концептуальної значущості. Загалом до аналізу включали публікації, які відповідали таким критеріям:

- 1) дослідження, присвячені застосуванню цифрових технологій у пародонтології;
- 2) оригінальні наукові дослідження;
- 3) систематичні огляди та мета-аналізи, за умови наявності кількісних результатів, узагальнених показників або чітко окреслених трендів розвитку технологій;

- 4) публікації, що містять дані щодо:
 - а) ефективності або точності цифрових інструментів;
 - б) діагностичної або прогностичної цінності;
 - в) рівня клінічної імплементації або потенціалу трансляції;
- 5) статті, опубліковані у рецензованих наукових журналах;
- 6) публікації англійською мовою.

Критеріями виключення публікацій із первинно відібраного пулу були такі:

- 1) публікації, не пов'язані з аспектами цифровізації в пародонтологічній практиці;
- 2) оглядові статті, що не містять кількісного аналізу, узагальнених показників або структурованого опису трендів;
- 3) тези конференцій, редакційні статті, листи до редакції;
- 4) дублікати, або ж публікації, які відображали результати, аналогічні попередньо опублікованим, без наявних у них нових підходів до інтерпретації даних;
- 5) джерела без доступу до повного тексту публікації;
- 6) публікації не англійською мовою.

На етапі екстракції даних з кожного джерела, включеного до кінцевого пулу релевантних наукових робіт, екстрагували такі параметри, які в подальшому підлягали структуризації: тип дослідження; напрям цифровізації; рівень клінічної імплементації; типи використовуваних даних; показники ефективності; обмеження та перспективи.

Для систематизації отриманих даних застосовано метод якісного контент-аналізу з елементами тематичного кодування. Аналіз здійснювали у декілька послідовних підетапів:

1. *Відкрите кодування*: ідентифікація смислових одиниць (ключових понять, підходів, напрямів застосування цифрових технологій), що повторювалися у текстах відібраних публікацій.
2. *Формування категорій першого рівня*: об'єднання кодів у більш узагальнені аналітичні категорії відповідно до функціонального призначення цифрових рішень (діагностика, прогнозування, моніторинг, підтримка прийняття рішень).
3. *Осьове кодування*: встановлення взаємозв'язків між категоріями, зокрема між типом цифрового підходу, рівнем його клінічної валідованості та фактичним ступенем імплементації.
4. *Селективне кодування*: інтеграція категорій в узагальнені тематичні блоки, що відображають системні тренди цифровізації.

У процесі структуризації та групування результатів на основі проведеного контент-аналізу

всі відібрані джерела були згруповані у такі аналітичні домени:

- рівень фактичної клінічної інтеграції цифрових технологій;
- роль алгоритмів штучного інтелекту у діагностиці та прогнозуванні;
- мультимодальна інтеграція даних як ключовий тренд цифровізації;
- бар'єри імплементації, перспективи розвитку та трансляції цифровізації у клінічну пародонтологічну практику.

Групування здійснювали з урахуванням повторюваності тематичних патернів, ступеня доказовості та клінічної релевантності отриманих результатів.

Отримані дані після екстракції систематизували та структурували з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel (Microsoft Corporation, США, версія 2019), яке застосовували як інструмент первинної обробки, кодування та організації інформації. Для забезпечення стандартизованого підходу було сформовано уніфіковану електронну базу даних у вигляді таблиці, де кожен рядок відповідав окремому дослідженню, а кожен стовпець — визначеній аналітичній змінній. Структура таблиці включала бібліографічні, методологічні та результативні параметри досліджень.

Результати дослідження та їх обговорення

Пошук цільових публікацій у базах даних PubMed та Scopus сприяв виявленню таких трендів щодо кількості опублікованих наукових робіт у різні роки, які за сформульованими пошуковими запитамі відображено на рис. 2 та 3 відповідно.

Аналіз представлених графіків свідчить про чітку тенденцію до зростання кількості наукових публікацій, присвячених цифровізації в пародонтології. У базі даних PubMed спостерігається поступове збільшення кількості досліджень, починаючи з 2000-х років, із різким експоненціальним зростанням після 2018 року. Пік публікацій припадає на останні роки (2023–2025 роки), що корелює з активним розвитком технологій штучного інтелекту, машинного навчання та цифрової обробки медичних зображень.

Аналогічна тенденція простежується у базі даних Scopus, проте абсолютна кількість публікацій є значно нижчою, а крива зростання має більш варіабельний характер. Це може свідчити про поступове формування дослідницького поля та різну швидкість індексації джерел у різних наукометричних базах. Отримані результати підтверджують, що цифровізація в пародонтології

Кількість публікацій

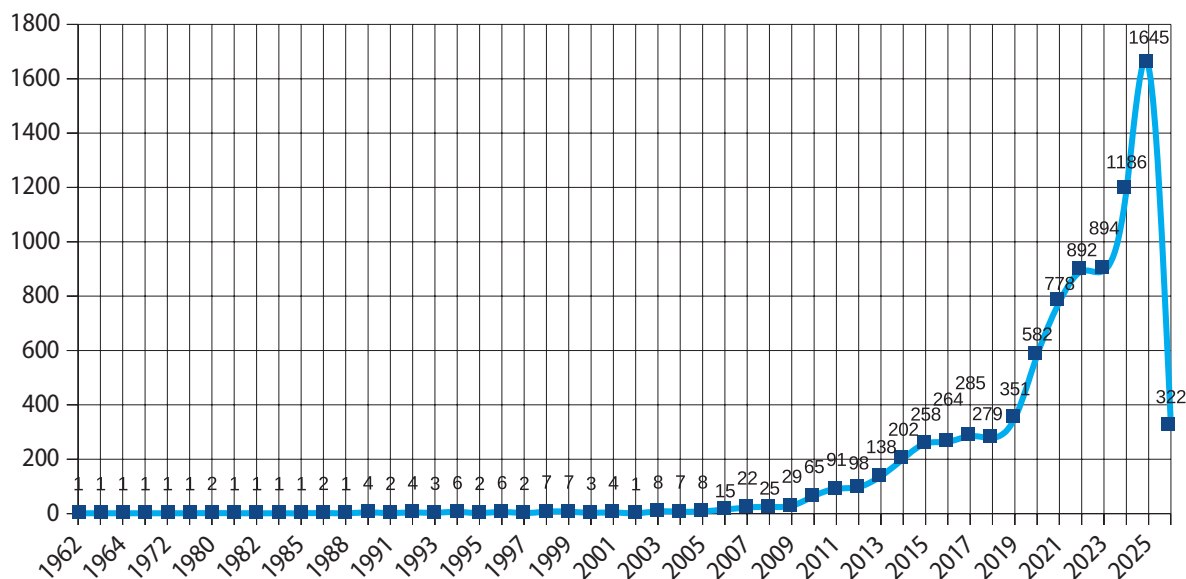
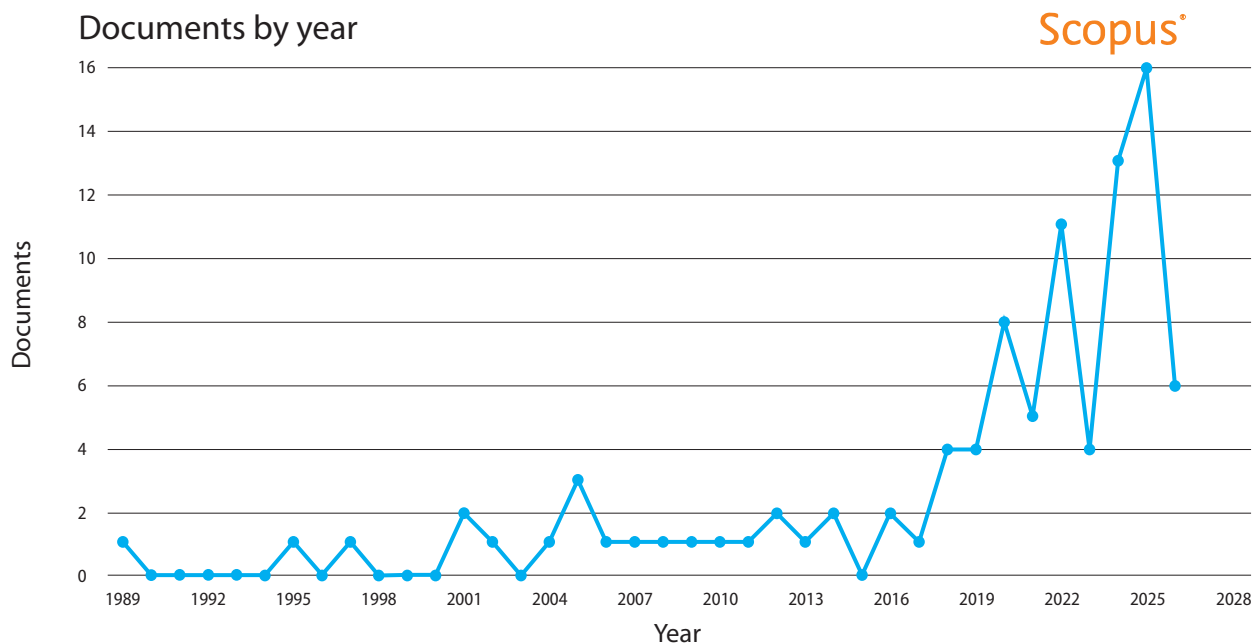


Рис. 2. Розподіл публікацій, первинно ідентифікованих у базі даних PubMed за запитом MeSH-відповідників до ключових слів «digital» та «periodontology», відповідно до року їх видання.



Copyright © 2026 Elsevier B. V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B. V.

Рис. 3. Розподіл публікацій, первинно ідентифікованих у базі даних Scopus за ключовими словами «digital» та «periodontology» (оригінальний графік, експортований із бази даних Scopus), відповідно до року їх видання.

є динамічно зростаючим напрямом досліджень, особливо в останнє десятиліття, що відображає загальні тенденції розвитку цифрової медицини та впровадження штучного інтелекту в клінічну практику.

З огляду на експоненціальне зростання кількості публікацій протягом останніх років, а також з метою забезпечення актуальності та релевантності аналізу, цільовий поглиблений аналіз враховував лише публікації, видані протягом останніх 10 років. Це дозволило зосередитися на сучасних технологічних підходах і актуальних клінічних тенденціях.

У процесі проведення аналізу відібраних джерел вдалося встановити, що наразі лише поодинокі дослідження демонструють рівень фактичної клінічної залученості цифрових технологій в пародонтологічну практику. Зокрема, під час опитування, проведеного Youssef M. та колегами, було встановлено, що найчастіше в ході пародонтологічного лікування лікарі послуговуються можливостями конусно-променевої комп'ютерної томографії, дані якої інтерпретують як елемент цифровізації [9]. Натомість залученість можливостей статичної та динамічної навігації є обмеженою, а об'єктивні дані щодо застосування систем

інтраорального сканування чи інструментів діагностичного або прогностичного характеру, які функціонують на основі штучного інтелекту, досі не з'ясовані [10].

Консенсусний звіт 20-го Європейського воркшопу з пародонтології підкреслив, що, зважаючи на виражені процесингові та детекційні можливості моделей штучного інтелекту, апробація цих інструментів повинна бути забезпечена не лише на основі двовимірних (планіметричних) рентгенограм, а шляхом інтеграції даних різної модальності, які включають результати заповнення електронних медичних карт, інтраорального сканування та конусно-променевої комп'ютерної томографії [7]. При цьому окремим елементом дослідження залишається пошук шляхів для адаптованого впровадження штучного інтелекту в наявні протоколи пародонтологічного лікування без порушення клінічної послідовності їх реалізації, а також з урахуванням обмеженості додаткових ресурсів, необхідних для цього [7].

Цифровізація пародонтологічної практики з урахуванням можливостей опрацювання великих масивів даних розширила межі застосування неklasичних підходів до інструментальної діагностики, результати якої можна зіставити та інтегрувати з даними клінічного огляду під час обстеження пацієнта, постановки діагнозу, визначення тактики лікування та прогнозу. Крім того, доступними є окремі експериментальні системи, які інтегрують внесені діагностичні дані щодо соматичного статусу пацієнта, особливостей мікробіоти, результатів молекулярної діагностики та omics-технологій для оптимізації процесів прийняття пацієнт-орієнтованих клінічних рішень у пародонтологічній практиці. Це забезпечує зміщення традиційних протокольних терапевтичних підходів до персоналізованих стратегій, які мають потенціал до адаптивної модифікації на основі прецизійної діагностики та процесингу наборів даних різного походження [11–13]. Зі свого боку, Pitchika V. та колеги (2024) зазначили, що тренд до цифровізації в пародонтологічній практиці можна розглядати як складову інтеграції елементів персоналізованої та прецизійної медицини, яка забезпечує поєднання (блендинг) пацієнт-асоційованих параметрів ризику, фармакогеноміки й мікробіому з фенотипічними характеристиками, біомаркерними діагностичними можливостями, а також психосоціальними факторами [12]. Можливості агрегації та процесингу клінічних даних із декількох клінічних центрів, які провадять пародонтологічне лікування за аналогічними протоколами, формують передумови для створення розширених карт прогностичних траєкто-

рій змін пародонтологічного статусу з опцією їх стратифікації за різної тривалості спостереження на основі досліджень мережевого характеру [14]. Клінічні переваги імплементації патернів цифровізації в пародонтологічну практику сприяють ранній детекції порушень та профілактиці їх розвитку, зменшенню ймовірності реалізації випадків надмірного лікування, кращому менеджменту складних клінічних випадків (кейсів) та вищому рівню залученості пацієнта в процеси лікування та профілактики [10].

Тап М. та колеги розробили комплексну діагностичну систему PerioAI для діагностики захворювань пародонта, функціонування якої базується на сумісному опрацюванні сегментованих мультимодальних даних інтраорального сканування та конусно-променевої комп'ютерної томографії [15]. Послугуючись параметрами відстані від краю ясен (zareєстрованих на інтраоральному скані) до краю кісткового гребеня (zareєстрованих на КПКТ), система забезпечує підхід до цифрового пародонтального зондування з величиною похибки лише 0,040 мм [15].

Хоча в інших дослідженнях величина відмінностей між клінічними вимірюваннями та параметрами, екстрагованими з цифрових даних, була більш значущою і сягала $0,82 \pm 0,69$ мм, первинний дизайн аналізованих критеріїв відрізнявся. Зокрема, порівнювали показник висоти ясеневної складової над рівнем кісткового гребеня за даними КПКТ й інтраорального сканування та показник клінічно-встановленої глибини пародонтальних кишень [16].

Варто зазначити, що використання різних систем електронних пародонтальних зондів також забезпечує чіткий та послідовніший процес для акумуляції даних пацієнта, які в подальшому можна включити в систему індивідуалізованого прогнозування [17]. Однак можливість виконання окремих пародонтальних вимірювань лише за цифровими даними КПКТ та інтраорального сканування сприяє оптимізації процесу їх автоматичного опрацювання. Це дозволяє встановлювати первинний діагноз для подальшої стратифікації пацієнтів з урахуванням ургентності надання спеціалізованої допомоги без потреби попередньої клінічної оцінки [15, 16, 18, 19].

Окремої уваги потребують перспективи застосування інтраоральних сканерів у практиці сучасної пародонтології. Технологія інтраорального сканування з доведеним рівнем ефективності може бути застосована для первинної оцінки фенотипу м'яких тканин [20, 21], верифікації первинних запальних змін [22, 23], оцінювання стану гігієни ротової порожнини [24–26], визна-

чення динаміки об'єму в ділянці проведених пародонтологічних втручань [27, 28], оцінки рівнів наповзаючого прикріплення [29], автоматизації розрахунку вираженості рецесій [30, 31], а також напівавтоматизованого заповнення складових пародонтологічних карт щодо зубів із вираженими ознаками патологічних змін чи компрометованим прогнозом [32].

Nalbantoglu A. та Yanik D. засвідчили, що інтраоральний сканер забезпечує клінічно точну реєстрацію ширини кератинізованих ясен [30].

У роботі Lee J.-S. було засвідчено, що відтворюваність та точність результатів вимірювання ширини кератинізованих ясен за даними інтраорального сканування є вищими, ніж за класичного підходу з використанням пародонтологічного зонда [34]. В експериментальних умовах доведено, що інтраоральний сканер також можна застосовувати для квантифікації ступеня рухомості зубів [35]. Колориметричний аналіз інтраоральних сканів підтвердив свою діагностичну ефективність на рівні понад 70 % у диференціації ділянок з ознаками кровоточивості під час зондування та без неї [23]. Інтраоральні скани також є допоміжним інструментом у реконструкції істинних параметрів конфігурації внутрішньокісткових дефектів, первинно проаналізованих на основі даних конусно-променевої комп'ютерної томографії [36].

Варто відзначити, що, згідно з даними систематичного огляду Сагон Т. та колег (2025), найчастіше інтраоральний сканер у пародонтологічній практиці використовували для оцінювання лінійних і об'ємних параметрів товщини ясен, висоти або площі кератинізованих ясен, висоти міжзубного сосочка, для картографування (маппінгу) вестибуло-орального м'якотканинного профілю, квантифікації стану гігієни ротової порожнини, обсягу набряку ясен, оцінки глибини зондування та рухомості, розмірних параметрів рецесії, верифікації положення зенітів, а також планування процедури подовження клінічної коронки [32].

При цьому дослідники зауважили навіть відмінності щодо частоти використання різних систем інтраорального сканування в пародонтологічній практиці. Найчастіше в дослідженнях повідомляли про застосування системи Trios (3Shape, Данія) — у 28 з 52 проаналізованих публікацій; CEREC Omnicam (Dentsply Sirona, Німеччина) — у 10 з 52 праць; а також моделей CS 3600 та CS 1500 від Carestream (Carestream Dental LLC, США) — у 6 з 52 досліджень [32]. Отримані дані свідчать про певну тенденцію щодо рівня застосовності різних систем інтраорального сканування у пародонтології.

Попередні дослідження досвіду впровадження штучного інтелекту (ШІ) в пародонтологічну практику продемонстрували, що ефективність діагностичних та прогностичних моделей суттєво варіює. Цей рівень залежить від модальності вихідних наборів даних (дво- або тривимірні рентгенологічні знімки, інтраоральні скани, цифрові пародонтологічні карти) та їхні повноти. Крім того, на результати тренування, навчання й апробації моделей впливають демографічні та епідеміологічні характеристики клінічних когорт, а також обрані критерії загальної оцінки [13, 37–39].

Ансамблеві моделі, а також згорткові нейронні мережі залишаються найбільш перспективними для процесингу наборів даних, які дозволяють квантифікувати пародонтологічний статус пацієнта з можливістю подальшого виокремлення цільових діагностичних чи прогностичних параметрів. Водночас алгоритми множинної класифікації, які оперують розподілом категоризаційних критеріїв, сприяють виокремленню груп ризику й експрес-постановці діагнозу за обмежених обсягів діагностичної інформації [13]. Щодо прогностичного потенціалу, то алгоритми машинного навчання продовжують удосконалюватися в пародонтологічній практиці. Проте в роботі Al-Sharqi A. було зазначено, що класичні підходи на основі логістичної регресії з опрацюванням клінічних параметрів забезпечують не меншу прогностичну точність стосовно квантифікації результатів нехірургічного пародонтологічного лікування, ніж методи контрольованого машинного навчання. При цьому показники точності варіювали в межах 61,0–70,4 % [40]. Такий результат може бути пов'язаний з обмеженою кількістю предикторів, які використовували для машинного навчання, а також із малим обсягом досліджуваних вибірок.

Водночас варто зазначити, що для скринінгу та прогнозування подальших порушень пародонтального статусу на основі наявних змін (без проведення лікування) точність прогнозування з використанням алгоритмів машинного навчання була значно вищою, ніж точність оцінки результатів проведеного нехірургічного лікування [41]. Потребує уваги той факт, що для скринінгу та автоматизованої класифікації випадків захворювань пародонта високу ефективність моделей штучного інтелекту можна забезпечити й за використання вихідних даних однієї модальності. Натомість для прогностичних цілей необхідним є залучення наборів даних різної модальності, що сприяє підвищенню точності моделі [2].

Водночас точність автоматизованих моделей скринінгу зростала лише в обмеженому діапазо-

ні при застосуванні різних наборів клінічних та параклінічних даних [42]. Відтак значущість алгоритмів машинного навчання для прогнозування результатів нехірургічного пародонтологічного лікування залишається предметом дискусій. Попри те, що апробовані підходи до опрацювання великих масивів даних характеризуються доведеною ефективністю, обмеженість наявних наборів даних належної якості та уніфікованості суттєво стримує можливість їх практичної імплементації в клінічну практику.

На думку Hashim N. та колег (2026), нове покоління S3 гайдлайнів, які розроблятимуть для пародонтологічної практики, повинно містити чітку рамку щодо доцільності застосування штучного інтелекту у відповідних клінічних ситуаціях. Цілі імплементації цієї технології наразі можна резюмувати таким чином:

- автоматизація аналізу рівня втрати кісткової тканини;
- цифрова реєстрація пародонтологічного статусу (періокартинг);
- формування індивідуалізованих моделей розрахунку ризиків розвитку наслідків та ускладнень;
- діагностична підтримка в разі перимплантаційних порушень;
- підтримка клінічного процесу прийняття рішень;
- інтерпретація даних конусно-променевої комп'ютерної томографії [8].

Дослідники також виокремили специфічні випадки, для яких залучення штучного інтелекту може характеризуватися найбільш очевидною потенційною ефективністю: об'єктивізація рівнів втрати кісткової тканини на початкових стадіях розвитку пародонтиту, забезпечення інтегративності процесу документації, а також складні випадки перимплантаційних патологій, де визначення параметрів конфігурації наявних дефектів значною мірою визначає прогноз лікування, та стратифікація ризику для прогнозування змін на основі мультимодальних вхідних даних [8].

В умовах зростаючої цифровізації у пародонтології слід зазначити, що тип використовуваних даних безпосередньо впливає на успішність цільового результату їх опрацювання. Зокрема, периапікальні рентгенограми та ортопантомограми відрізняються за чутливістю класифікації стадій розвитку пародонтиту, що було продемонстровано у метааналізі Lee J.-E. та колег [43]. Крім того, власне сформульовані підходи й критерії до класифікації, детекції та формування рішень визначають кінцеву точність автоматизованого процесингу цифрових пародонтологічних даних.

Обмеження щодо широкого впровадження технологій штучного інтелекту в пародонтологічну практику є типовими для програмного забезпечення на основі ШІ загалом і пов'язані з недостатньою зовнішньою валідацією доступних діагностичних та прогностичних алгоритмів на відносно малих за обсягом досліджуваних вибірках [44].

Цифрова трансформація у пародонтології повинна керуватися фундаментальними етичними принципами із збереженням анонімності даних пацієнта навіть у випадках їх опрацювання внутрішньоклінічними алгоритмами. При цьому необхідно забезпечити належний рівень прозорості та пояснюваності отриманих результатів, зі збереженням визначального принципу відповідальності лікаря за встановлення діагнозу та вибір конкретної терапевтичної стратегії, незалежно від того, чи сформована вона за підтримки штучного інтелекту [8].

Таким чином, сучасний стан цифровізації пародонтологічної практики характеризується дисбалансом між стрімким розвитком технологічних можливостей та обмеженим рівнем їх клінічної імплементації. Незважаючи на доведений потенціал алгоритмів штучного інтелекту в обробці мультимодальних даних, підвищенні точності діагностики, стратифікації ризиків та прогнозуванні результатів лікування, їх широке впровадження обмежується недостатньою зовнішньою валідацією, гетерогенністю й малим обсягом доступних вибірок, варіабельністю ефективності моделей залежно від модальності вхідної інформації, а також відсутністю уніфікованих протоколів інтеграції в клінічну практику.

Подальший прогрес у цьому напрямі потребує стандартизації підходів до збору та процесингу даних, ініціації багатоцентрих досліджень, а також розробки чітких клінічних рекомендацій щодо застосування цифрових технологій і систем штучного інтелекту. Водночас ключовим залишається забезпечення відповідності їх використання принципам доказової медицини, етичної обґрунтованості, прозорості алгоритмів та збереження провідної ролі клінічного мислення лікаря у процесі прийняття діагностичних і терапевтичних рішень.

Висновки

Цифровізація пародонтологічної практики відкриває нові можливості для інтеграції мультимодальних даних, підвищення точності діагностики та реалізації персоналізованих підходів до лікування, зокрема завдяки застосуванню штучного інтелекту й інтраорального сканування. Проведений аналіз дозволив встановити загальну тен-

денцію до розширення не лише обсягу, а й спектра модальностей вхідних цифрових даних, які потенційно можна застосувати з діагностичною та прогностичною метою в пародонтології.

Цифровізація в структурі пародонтологічної практики характеризується кластерним патерном впровадження з охопленням насамперед діагностичної складової та первинної класифікації клінічних випадків. Це пов'язано як із відповідною статистичною «зрілістю» цільових верифікаційних алгоритмів, так і з досвідом їх інтеграції в структуру відповідного апаратного та програмного забезпечення. Водночас прогностична складова, представлена алгоритмами для опрацювання масивів первинно-цифрових або оцифрованих даних, отриманих під час діагностики пацієнта, досі залишається предметом валідаційних досліджень, кількість яких прогресивно зростає.

Діагностична та прогностична точність програмного забезпечення для встановлення діагнозу, визначення стадії та ступеня пародонтиту, а також для оцінки майбутніх змін пародонтологічного статусу пацієнта характеризується нижчою частотою хибнопозитивних результатів за умови опрацювання мультимодальних наборів даних. До таких комплексів інформації належать матеріали планіметричної рентгенографії, конусно-промене-

вої комп'ютерної томографії, дані електронних медичних і пародонтологічних карт, результати неінвазивного скринінгу стану м'яких тканин, а також показники якісного й кількісного складу мікробіому пародонтальних кишень.

Водночас досі не встановлено, які з цих складових забезпечують найбільшу стабільність архітектури клінічно застосовуваних моделей. Сучасні інтегровані системи переважно функціонують із залученням лише двох-трьох показників (даних рентгенографії та клінічного пародонтологічного обстеження з їх внесенням в електронну пародонтокарту), аналіз яких виконується за ансамблевим та мультишаровим принципами.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Згода на публікацію

Автори ознайомлені з результатами і схвалили остаточний варіант рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори стверджують, що під час написання статті штучний інтелект не використовувався.

ПОСИЛАННЯ / REFERENCES

1. Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Barmak, A. B., et al. (2023). Artificial intelligence models for diagnosing gingivitis and periodontal disease: A systematic review. *J Prosthet Dent*, 130(6), 816–824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.01.026>.
2. Polizzi, A., Quinzi, V., Lo Giudice, A., et al. (2024). Accuracy of artificial intelligence models in the prediction of periodontitis: a systematic review. *JDR Clin Trans Res*, 9(4), 312–324. DOI: <https://doi.org/10.1177/23800844241232318>.
3. Zhang, J., Deng, S., Zou, T., et al. (2025). Artificial intelligence models for periodontitis classification: A systematic review. *J Dent*, 156, 105690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105690>.
4. Patil, S., Joda, T., Soffe, B., et al. (2023). Efficacy of artificial intelligence in the detection of periodontal bone loss and classification of periodontal diseases: a systematic review. *J Am Dent Assoc*, 154(9), 795–804. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adaj.2023.05.010>.
5. Reddy, M. S. (2026). The future of periodontology: Emerging technologies and conceptual shifts. *J Periodontol*, online ahead of print. DOI: <https://doi.org/10.1002/jper.70079>.
6. Di Spirito, F., Giordano, F., Di Palo, M. P., et al. (2025). Sustainable dental and periodontal practice: A narrative review on the 4R-Framework—Reduce, Reuse, Rethink, Recycle—And waste management rationalization. *Dent J*, 13(9), 392. DOI: <https://doi.org/10.3390/dj13090392>.
7. Herrera, D., Tonetti, M. S., Chapple, I., et al. (2025). Consensus report of the 20th European workshop on periodontology: contemporary and emerging technologies in periodontal diagnosis. *J Clin Periodontol*, 52, 4–33. DOI: <https://doi.org/10.1111/jcpe.14152>.
8. Hashim, N. T., Ahmed, A., Abushama, A. A., et al. (2026). Next-Generation S3-Level Clinical Practice Guidelines in Periodontology: Methodology, Current Evidence, and Future Directions. *Dent J*, 14(1), 58. DOI: <https://doi.org/10.3390/dj14010058>.
9. Youssef, M., Tatakis, D. N., Demko, C., & Schincaglia, G. P. (2025). Knowledge and use of digital technologies in periodontal practices in the United States: A survey study. *J Periodontol*, 96(8), 944–952. DOI: <https://doi.org/10.1002/JPER.24-0306>.

10. Bhandary, R., Simha, U., Bhat, A. R., et al. (2025). Digital Innovations in Periodontics: Transforming Periodontal and Implant Health With Advanced Dentistry Technologies. *J Health Allied Sci NU*, 15(4), 439–443. DOI: [https://doi.org/10.25259/JHS-2024-5-32-\(1315\)](https://doi.org/10.25259/JHS-2024-5-32-(1315)).
11. Dipalma, G., Inchingolo, A. M., Inchingolo, F., et al. (2025). The precision paradigm in periodontology: a multilevel framework for tailored diagnosis, treatment, and prevention. *J Pers Med*, 15(9), 440. DOI: <https://doi.org/10.3390/jpm15090440>.
12. Pitchika, V., Büttner, M., & Schwendicke, F. (2024). Artificial intelligence and personalized diagnostics in periodontology: A narrative review. *Periodontol 2000*, 95(1), 220–231. DOI: <https://doi.org/10.1111/prd.12586>.
13. Farina, R., Simonelli, A., Trombelli, L., et al. (2025). Emerging applications of digital technologies for periodontal screening, diagnosis and prognosis in the dental setting. *J Clin Periodontol*, 52, 211–245. DOI: <https://doi.org/10.1111/jcpe.14156>.
14. Peikert, S. A., Mittelhamm, F., Frisch, E., et al. (2020). Use of digital periodontal data to compare periodontal treatment outcomes in a practice-based research network (PBRN): a proof of concept. *BMC Oral Health*, 20(1), 297. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01284-3>.
15. Tan, M., Cui, Z., Li, Y., et al. (2025). PerioAI: A digital system for periodontal disease diagnosis from an intra-oral scan and cone-beam CT image. *Cell Rep Med*, 6(6). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2025.102186>.
16. Chung, H. M., Park, J. Y., Ko, K. A., et al. (2022). Periodontal probing on digital images compared to clinical measurements in periodontitis patients. *Sci Rep*, 12(1), 1616. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04695-6>.
17. Laugisch, O., Auschill, T. M., Heumann, C., et al. (2021). Clinical evaluation of a new electronic periodontal probe: a randomized controlled clinical trial. *Diagnostics*, 12(1), 42. DOI: <https://doi.org/10.3390/diagnostics12010042>.
18. Icen, M., Orhan, K., Şeker, Ç., et al. (2020). Comparison of CBCT with different voxel sizes and intraoral scanner for detection of periodontal defects: an in vitro study. *Dentomaxillofac Radiol*, 49(5), 20190197. DOI: <https://doi.org/10.1259/dmfr.20190197>.
19. Elashiry, M., Meghil, M. M., Arce, R. M., & Cutler, C. W. (2019). From manual periodontal probing to digital 3-D imaging to endoscopic capillaroscopy: Recent advances in periodontal disease diagnosis. *J Periodontal Res*, 54(1), 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1111/jre.12585>.
20. Li, W., Xu, T., Zhang, H., Lü, Y., et al. (2025). Digital analysis of periodontal phenotype in the maxillary anterior region. *Clin Adv Periodontics*, online ahead of print. DOI: <https://doi.org/10.1002/cap.10353>.
21. Kaya, S., & Alkan, M. (2025). Diagnostic accuracy of a novel non-invasive digital technique for assessing gingival phenotype: an area under the curve analysis. *BMC Oral Health*, 25(1), 1024. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06390-8>.
22. Li, W., Li, L., Xu, W., et al. (2025). Identification of gingival inflammation surface image features using intraoral scanning and Deep learning. *Int Dent J*, 75(3), 2104–2114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.identj.2025.01.002>.
23. Hassan, M. A., Silva do Amaral, G. C. L., Saraiva, L., et al. (2025). Colorimetric analysis of intraoral scans: A novel approach for detecting gingival inflammation. *J Periodontol*, 96(8), 848–857. DOI: <https://doi.org/10.1002/JPER.24-0389>.
24. Jung, K., Ganss, C., Korbmaier-Steiner, H., & Jablonski-Momeni, A. (2026). Planimetric quantification of plaque in patients with multibracket appliances using an intraoral scanner—proof-of-concept. *Clin Oral Investig*, 30(4), 130. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00784-026-06809-8>.
25. Jung, K., Giese-Kraft, K., Fischer, M., et al. (2022). Visualization of dental plaque with a 3D-intraoral-scanner—A tool for whole mouth planimetry. *PLoS One*, 17(10), e0276686. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276686>.
26. Doi, K., Yoshiga, C., Oue, H., et al. (2024). Comparison of plaque control record measurements obtained using intraoral scanner and direct visualization. *Clin Exp Dent Res*, 10(1), e852. DOI: <https://doi.org/10.1002/cre2.852>.
27. Zhang, J., Huang, Z., Cai, Y., & Luan, Q. (2021). Digital assessment of gingiva morphological changes and related factors after initial periodontal therapy. *J Oral Sci*, 63(1), 59–64. DOI: <https://doi.org/10.2334/josnurd.20-0157>.
28. Fons-Badal, C., Alonso Pérez-Barquero, J., Martínez-Martínez, N., et al. (2020). A novel, fully digital approach to quantifying volume gain after soft tissue graft surgery. A pilot study. *J Clin Periodontol*, 47(5), 614–620. DOI: <https://doi.org/10.2334/10.1111/jcpe.13235>.
29. Goncharuk-Khomyn, M., Krasnokutskyy, O., Boichuk, M., et al. (2023). Spontaneous recession repair after orthodontic treatment: case report with the use of digital approach for quantification of soft tissue changes. *Case Rep Dent*, 2023(1), 1831125. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/1831125>.
30. West, N. E., Wright, M., Daly, S., et al. (2026). Diagnostic accuracy of on-scan assessments compared to clinical assessments using a periodontal probe for detecting gingival recession: A cross-sectional study. *J Dent*, 106504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ident.2026.106504>.

31. Kuralt, M., & Fidler, A. (2022). Methods and parameters for digital evaluation of gingival recession: a critical review. *J Dent*, 118, 103793. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103793>.
32. Caron, T., Decup, F., Grosogeat, B., & Chacun, D. (2025). The relevance of intraoral scanner (IOS) for periodontal diagnosis: A scoping review. *J Dent*, 160, 105824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105824>.
33. Nalbantoğlu, A. M., & Yanık, D. (2023). Revisiting the measurement of keratinized gingiva: a cross-sectional study comparing an intraoral scanner with clinical parameters. *J Periodontal Implant Sci*, 53(5), 362. DOI: <https://doi.org/10.5051/jpis.2204320216>.
34. Lee, J. S., Jeon, Y. S., Strauss, F. J., et al. (2020). Digital scanning is more accurate than using a periodontal probe to measure the keratinized tissue width. *Sci Rep*, 10(1), 3665. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60291-0>.
35. Meirelles, L., Siqueira, R., Garaicoa-Pazmino, C., et al. (2020). Quantitative tooth mobility evaluation based on intraoral scanner measurements. *J Periodontol*, 91(2), 202–208. DOI: <https://doi.org/10.1002/JPER.19-0282>.
36. Palkovics, D., Mangano, F. G., Nagy, K., & Windisch, P. (2020). Digital three-dimensional visualization of intrabony periodontal defects for regenerative surgical treatment planning. *BMC Oral Health*, 20(1), 351. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01342-w>.
37. Chatzopoulos, G. S., Koidou, V. P., Tsalikis, L., & Kaklamanos, E. G. (2025). Clinical applications of artificial intelligence in periodontology: A scoping review. *Medicina*, 61(6), 1066. DOI: <https://doi.org/10.3390/medicina61061066>.
38. Goncharuk-Khomyn, M. Y., Bohdan, O. M., Boychuk, M. M., Melnyk, L. V. (2024). Algorithms of artificial intelligence for the evaluation of gingival conditions. *Intermed J.*, 2, 15–23. [Гончарук-Хомин М. Ю., Богдан О. М., Бойчук М. М., Мельник Л. В. (2024). Алгоритми штучного інтелекту для оцінки стану ясен. *Intermedical journal*, (2), 15–23]. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-7684/2024-2-3>.
39. Goncharuk-Khomyn, M. Y., Tarasovska, Y. Y., Konko, Y. V., Cherkashyn, O. O. Analysis of artificial intelligence and machine learning models' effectiveness in regards to bone loss verification as a criterion for assessing the state of periodontal tissues based on orthopantomography data. *Intermed J.*, 2, 37–43. [Гончарук-Хомин М. Ю., Тарасовська У. Є., Конько Ю. В., Черкашин О. О. (2025). Аналіз ефективності моделей штучного інтелекту та машинного навчання для верифікації втрати кісткової тканини як критерію оцінки стану тканин пародонта за даними ортопантомографії. *Intermedical journal*, (2), 37–43]. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-7684/2025-2-7>.
40. Al-Sharqi, A. J., Baban, M. T. A., Imran, N. K., et al. (2025). Comparison of Supervised Machine Learning Models to Logistic Regression Model Using Tooth-Related Factors to Predict the Outcome of Nonsurgical Periodontal Treatment. *Diagnostics*, 15(18), 2333. DOI: <https://doi.org/10.3390/diagnostics15182333>.
41. Montero, E., Sánchez, N., Sanz-Sánchez, I., et al. (2025). Emerging Technologies and Algorithms for Periodontal Screening and Risk of Disease Progression in Non-Dental Settings: A Scoping Review. *J Clin Periodontol*, 52, 246–291. DOI: <https://doi.org/10.1111/jcpe.14168>.
42. Tao, L. R., Li, Y., Wu, X. Y., et al. (2026). Deep learning photo processing for periodontitis screening. *J Dent Res*, 105(2), 226–235. DOI: <https://doi.org/10.1177/00220345251347508>.
43. Lee, J. E., Choi, E., & Park, J. B. (2025). Radiographic diagnosis of periodontitis using artificial intelligence: a meta-analysis comparing binary and staging classifications across imaging modalities. *BMC Oral Health*, 25(1), 1921. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-025-07171-z>.
44. Zhu, Z. X., Furquim, C. P., & Teles, F. (2026). Artificial Intelligence Applications in Periodontology: Enhancing Diagnosis, Monitoring, and Treatment in Clinical Practice. *Dent Clin North Am*, 70(2): 445–469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cden.2025.11.014>.

Digitalization Trends in Periodontal Practice: An Analysis of Modern Concepts and Clinical Implementation

Shekera, O., Palchykov, A., Goncharuk-Khomyn, M.

Uzhhorod National University

Background. The capabilities of modern computational algorithms integrated into dedicated software solutions—whether standalone or coupled with specific hardware components such as intraoral scanners, cone-beam computed tomography, and automated periodontal diagnostic systems—are transforming the paradigms of digital technology implementation in periodontal practice.

Objective. To analyze current digitalization trends in periodontal practice, with a focus on modern concepts of big data processing and the individualization of comprehensive diagnostic and treatment approaches.

Materials and Methods. Dedicated search for relevant publications was conducted within the PubMed/MEDLINE and Scopus databases, as well as using the Google Scholar search engine, applying Boolean operators (AND, OR, NOT) and combinations of relevant keywords. During the process of content analysis with corresponding results' structuring and grouping, all selected sources were categorized into the following analytical domains: level of actual clinical integration of digital technologies; role of artificial intelligence algorithms in periodontal-oriented diagnosis and prediction; multimodal data integration as a key trend in digitalization; barriers to implementation, prospects for development, and translation of digitalization into clinical periodontal practice.

Results. The current state of digitalization in periodontal practice is characterized by an imbalance between the rapid development of technological capabilities and the limited level of their clinical implementation. Despite the proven potential of artificial intelligence algorithms for processing multimodal data, improving diagnostic accuracy, risk stratification, and treatment outcome prediction in periodontology, their widespread implementation is limited by insufficient external validation, the heterogeneity and limited size of available datasets, variability in model performance depending on input data modalities, and the lack of standardized protocols for integration into clinical practice.

Conclusions. Digitalization in periodontal practice is characterized by a cluster pattern of implementation, primarily covering the diagnostic component and the initial classification of clinical cases. This is associated with both the statistical "maturity" of verification algorithms and the experience of their integration into relevant hardware and software systems. At the same time, the prognostic component, represented by algorithms for processing primary digital or digitized data obtained during patient diagnostics, remains the subject of ongoing validation studies, the number of which is steadily increasing.

Keywords: *periodontology; digital dentistry; digitalization; clinical practice; artificial intelligence; patient-centered care; evidence-based medicine.*

Стаття: надійшла до редакції 03.03.2026 р.;
прийнята до друку 15.04.2026 р.,
опублікована 25.05.2026 р.

Шекера Оксана Олегівна

кандидат медичних наук, доцент,
докторант ННІ стоматології
та лабораторної медицини
ДВНЗ «Ужгородський національний
університет», м. Ужгород, Україна

 <https://orcid.org/0000-0002-3584-1024>

Пальчиков Анатолій Володимирович

кандидат медичних наук,
докторант ННІ стоматології та
лабораторної медицини
ДВНЗ «Ужгородський національний
університет», м. Ужгород, Україна

 <https://orcid.org/0000-0001-5565-6224>

Гончарук-Хомин Мирослав Юрійович

PhD, доктор філософії, доцент,
доцент кафедри терапевтичної стоматології
ННІ стоматології та лабораторної медицини
ДВНЗ «Ужгородський національний
університет», м. Ужгород, Україна

 <https://orcid.org/0000-0002-7482-3881>