

УДК 616.314-77:616.314-089.843:004.9

DOI <https://doi.org/10.35220/2523-420X/2026.2.12>**М.Ю. Гончарук-Хомин,**

PhD, доктор філософії, доцент,

доцент кафедри терапевтичної стоматології,

Державний вищий навчальний заклад

«Ужгородський національний університет»,

вул. Університетська, 16а, м. Ужгород, Україна,

індекс 88000, myroslav.goncharuk-khomyn@uzhnu.edu.ua<https://orcid.org/0000-0002-7482-3881>**А.В. Пальчиков,**

кандидат медичних наук,

докторант ННІ стоматології

та лабораторної медицини

ДНВЗ «Ужгородський національний університет»,

вул. Університетська, 16а, м. Ужгород, Україна,

індекс 88000, anatolii.palchikov@gmail.com<https://orcid.org/0000-0001-5565-6224>**А.Т. Кенюк,**

PhD, кандидат медичних наук, доцент,

доцент кафедри ортопедичної стоматології,

Державний вищий навчальний заклад

«Ужгородський національний університет»,

вул. Університетська, 16а, м. Ужгород, Україна,

індекс 88000, andrii.keniuk@uzhnu.edu.ua: <https://orcid.org/0000-0001-6093-0785>**А.В. Бокоч,**

PhD, кандидат медичних наук, доцент,

доцент кафедри ортопедичної стоматології,

Державний вищий навчальний заклад

«Ужгородський національний університет»,

вул. Університетська, 16а, м. Ужгород, Україна,

індекс 88000, anatolii.bokoch@uzhnu.edu.ua: <https://orcid.org/0000-0001-8969-8043>

АНАЛІЗ ЗВІТІВ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ КОМІСІЇ АМЕРИКАНСЬКОЇ АКАДЕМІЇ НЕЗНІМНОГО ПРОТЕЗУВАННЯ ЩОДО ТОЧНОСТІ РІЗНИХ ПІДХОДІВ ОТРИМАННЯ ЦИФРОВИХ ВІДБИТКІВ У ВИПАДКАХ ТОТАЛЬНОГО ПРОТЕЗУВАННЯ З ОПОРОЮ НА ДЕНТАЛЬНИХ ІМПЛАНТАТАХ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ЕВОЛЮЦІЙНОЇ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗАСТОСОВАНИХ МЕТОДИК

Мета дослідження. Провести аналіз звітів дослідницької комісії Американської академії незнімного протезування щодо точності різних підходів отримання цифрових відбитків у випадках тотального протезування з опорою на дентальних імплантатах, забезпечити систематизацію та порівняння даних таких з урахування обсягів наповнення доказової бази щодо апробованих методик та клінічної значущості повідомлених результатів. **Методи дослідження.** Дослідження виконано у форматі аналітичного огляду з елементами порівняльного опрацювання даних доказової бази щодо точності цифрових методик реєстрації позицій дентальних імплантатів у випадках реабілітації повної адентії. Об'єктом аналізу стали чотири систематичні огляди, опубліковані дослідницькою комісією Американської академії незнімного протезування у 2025-2026 роках, присвячені оцінці точності різних підходів до отримання цифрових відбитків для реєстрації положення дентальних імплантатів в умовах тотальної реабілітації. **Наукова новизна.** Порівняльний аналіз усіх чотирьох систематичних оглядів дозволяє сформувати чітку ієрархію сучасних цифрових протоколів за рівнем точності. Найвищі показники точності демонструють системи зовнішньоротової фотограмметрії, для яких характерні лінійні відхилення апроксимізовані до рівня девіації в 27 мкм та кутові відхилення апроксимізовані до рівня девіації 0,21°. Порівнювані показники відмічаються для систем внутрішньоротової фотограмметрії та інших каліброваних систем скан-абатментів, для яких середні лінійні похибки знаходяться в межах 30-50 мкм. Некалібровані шинуючі конструкції та системи з додатковою референтною геометрією здатні забезпечувати показники точності у межах 26-58 мкм за сприятливих умов. Найменш прогнозованими цифровими відбитками з точки зору точності залишаються традиційні протоколи без шинування скан-абатментів, для яких характерна найбільша варіабельність результатів. **Висновки.** Аналіз чотирьох цільових систематичних оглядів дослідницької комісії Американської академії незнімного протезування, присвячених оцінці точності різних підходів до отримання цифрових відбитків з реєстрацією положення дентальних імплантатів в умовах повної адентії, засвідчив, що параметр точності цифрових відбитків визначається не лише технічними характеристиками внутрішньоротового сканера, але насамперед математичним принципом формування цифрової моделі та наявністю додаткових геометричних орієнтирів. Традиційні протоколи з використанням нешинуваних скан-абатментів залишаються найбільш залежними від послідовного графічного зшивання локальних кадрів, унаслідок чого характеризуються найбільшою варіабельністю результатів і ризиком накопичення кумулятивної просторової похибки.

Ключові слова: ортопедичне лікування, інтраоральне сканування, відбиток, дентальні імплантати, стоматологічна реабілітація.

M.Yu. Goncharuk-Khomyn,
 PhD, Associate Professor,
 Associate Professor at the Department
 of Restorative Dentistry,
 SHEI «Uzhhorod National University»,
 16a Universytetska street, Uzhhorod, Ukraine,
 postal code 88000,
 myroslav.goncharuk-khomyn@uzhnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-7482-3881>

A.V. Palchykov,
 Candidate of Medical Sciences,
 Doctoral Researcher at the Educational and Scientific
 Institute of Dentistry and Laboratory Medicine,
 SHEI «Uzhhorod National University»,
 16a Universytetska street, Uzhhorod, Ukraine,
 postal code 88000,
 anatolii.palchykov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5565-6224>

A.T. Keniuk,
 Candidate of Medical Sciences, Associate Professor,
 Associate Professor at the Department
 of Prosthetic Dentistry,
 SHEI «Uzhhorod National University»,
 16a Universytetska street, Uzhhorod, Ukraine,
 postal code 88000,
 andrii.keniuk@uzhnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-6093-0785>

A.V. Bokoch,
 Candidate of Medical Sciences, Associate Professor,
 Associate Professor at the Department
 of Prosthetic Dentistry,
 SHEI «Uzhhorod National University»,
 16a Universytetska street, Uzhhorod, Ukraine,
 postal code 88000, anatolii.bokoch@uzhnu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-8969-8043>

ANALYSIS OF REPORTS PROVIDED BY RESEARCH COMMITTEE OF THE AMERICAN ACADEMY OF FIXED PROSTHODONTICS ON THE ACCURACY OF DIFFERENT DIGITAL IMPRESSION APPROACHES FOR FULL-ARCH IMPLANT-SUPPORTED PROSTHETIC REHABILITATION AND PROPOSALS OF EVOLUTIONARY AND MATHEMATICAL CLASSIFICATIONS FOR THE APPLIED TECHNIQUES

Purpose of the study. To analyze the reports of the Research Committee of the American Academy of Fixed Prosthodontics concerning the accuracy of different approaches to digital impression acquisition for full-arch implant-supported prosthetic rehabilitation, and to systematize and compare their findings with consideration of the extent of the available evidence for the evaluated

techniques and the clinical relevance of the reported outcomes. **Research methods.** Study was conducted as an analytical review incorporating elements of comparative evaluation of the available evidence regarding the accuracy of digital techniques used to register dental implant positions in patients undergoing rehabilitation under conditions of complete edentulism. The analysis included four systematic reviews published by the Research Committee of the American Academy of Fixed Prosthodontics between 2025 and 2026. These reviews evaluated the accuracy of different digital impression approaches used to register the spatial positions of dental implants in patients requiring full-arch rehabilitation. **Scientific novelty.** Comparative analysis of all four systematic reviews enabled the establishment of a clear hierarchy of contemporary digital protocols according to their level of accuracy. The highest accuracy was demonstrated by extraoral photogrammetry systems, with linear discrepancies approximating 27 μm and angular discrepancies approximating 0.21°. Comparable outcomes were reported for intraoral photogrammetry systems and other calibrated implant scan-body systems, for which mean linear discrepancies ranged from 30 to 50 μm . Under favorable conditions, noncalibrated splinting devices and systems incorporating additional reference geometry were capable of achieving accuracy values within the range of 26-58 μm . Conventional protocols using nonsplinted implant scan bodies remained the least predictable and demonstrated the greatest variability in reported outcomes. **Conclusions.** Analysis of the four selected systematic reviews published by the Research Committee of the American Academy of Fixed Prosthodontics and focused on the accuracy of different digital impression approaches for registering dental implant positions under conditions of complete edentulism demonstrated that digital impression accuracy is determined not only by the technical characteristics of the intraoral scanner itself, but primarily by the mathematical principle used to generate the digital model and by the availability of additional geometric reference features. Conventional protocols involving nonsplinted implant scan bodies remain the most dependent on the sequential image stitching of local scan frames. Consequently, these protocols are characterized by the greatest variability in outcomes and the highest risk of cumulative spatial error.

Key words: prosthetic treatment, intraoral scanning, impression, dental implants, dental rehabilitation.

Постановка проблеми. Основна проблема точності цифрових відбитків у випадках тотального протезування пацієнтів з опорою на внутрішньокісткових титанових дентальних імплантатах полягає в обмеженості сучасного апаратного та програмного забезпечення реалізовувати трансфер координатного положення опор з ділянки ротової порожнини в цифрове середовище без ефекту асоційованих просторових девіацій [1, 2, 3].

Очевидно, що для різних методик отримання цифрового відбитка, зокрема оригінальних технік внутрішньротового сканування та їх модифікацій у формі адаптованих стратегій сканування

чи застосування додаткових маркерів, позаротового сканування з використанням інтраорального сканера (техніка реверсивного відбитка), позаротового сканування з використанням технології фотограмметрії природа, характер накопичення та величина координатних зміщень зареєстрованого положення внутрішньоротових опор по відношенню до їх фактичної локалізації та взаєморозміщення будуть відрізнятися [4, 5, 6, 7].

Власне саме відмінності у патерні формування та пропаганації девіацій, які, як зазначено вище, залежать від реалізованого підходу до отримання цифрового відбитка, унеможливають системне порівняння різних методик, зважаючи, що у відповідності до існуючих концепцій дотримання принципів доказовості, досліджувані умови таких повинні бути уніфікованими для забезпечення репродуктивності та повторюваної порівнюваності отриманих результатів [4, 5, 6, 7].

Варто також враховувати динамічність розвитку цифрових технологій, направлених на реєстрацію положення дентальних імплантатів у випадках тотальної реабілітації пацієнтів. В 2023 році систематичний огляд, котрий представляв проєкт консенсусного рішення Європейської асоціації ортопедичної стоматології, визначив точність методів інтраорального сканування та фотограмметрії як порівнювану, зважаючи на варіативність доступних даних [8]. Проте систематичні огляди періоду 2025-2026 рр. уже вказують на вищі рівні точності, як правдивості, так і прецизійності, технології фотограмметрії у порівнянні з технологією інтраорального сканування, щодо передачі істинного координатного положення дентальних імплантатів з ділянки ротової порожнини в цифрове середовище [9, 10, 11]. Хоча варто зазначити, що в окремих систематичних оглядах визначені діапазони складових точності для інтраорального сканування та фотограмметрії взаємонакладаються, що ускладнює коректність інтерпретації отриманих результатів, при цьому переваги класичної екстраоральної фотограмметрії з точки зору статистичної інтерпретації відмінностей критеріїв прецизійності та ангулярної точності в порівнянні із інтраоральним сканування є однозначними та очевидними [11].

Методологічна проблема порівняння даних, котрі стосуються точності різних підходів до отримання цифрових відбитків у випадках тотального протезування з опорою на дентальних імплантатах, полягає також у тому, що для об'єктивізації параметру точності у різних дослідженнях застосовуються різні похідні критерії оцінки (точність відтворення поверхонь, центроїдів, кутових спів-

відношень, окремих точок, відстаней, комплексу просторових координат), а також різні референтні моделі [12]. Відтак попри потребу в проведенні системного аналізу та порівняння точності різних підходів до отримання цифрових відбитків з проєкції дентальних імплантатів, встановлених на беззубій щелепі, за стандартизованими критеріями в уніфікованих умовах, більш практичним та реалістичним, зважаючи на масив та гетерогенність доступних даних, є компаративна оцінка підходів, котрі характеризуються однорідністю в реалізації, або ж хоча спорідненістю застосованих принципів їх проведення.

Дослідницька комісія Американської академії незнімного протезування оприлюднила результати чотирьох систематичних оглядів, кожен з яких присвячений оцінці точності специфічних підходів отримання цифрових відбитків у випадках тотального протезування з опорою на дентальних імплантатах з урахуванням відмінних принципів провадження таких [4, 5, 6, 7], однак порівняльний аналіз результатів даних систематичних оглядів між собою, приймаючи до уваги наповненість доказової бази щодо кожного із вищезгаданих підходів, досі не був реалізований з категоризацію найбільш значущих для клінічної практики результатів.

Мета дослідження. Провести аналіз звітів дослідницької комісії Американської академії незнімного протезування щодо точності різних підходів отримання цифрових відбитків у випадках тотального протезування з опорою на дентальних імплантатах, забезпечити систематизацію та порівняння даних таких з урахування обсягів наповнення доказової бази щодо апробованих методик, та клінічної значущості повідомлених результатів.

Матеріали та методи. Дослідження виконано у форматі аналітичного огляду з елементами порівняльного опрацювання даних доказової бази щодо точності цифрових методик реєстрації позицій дентальних імплантатів у випадках реабілітації в умовах повної адентії. Об'єктом аналізу стали чотири систематичні огляди, опубліковані дослідницькою комісією Американської академії незнімного протезування у 2025-2026 роках, присвячені оцінці точності різних цифрових підходів до отримання цифрових відбитків для реєстрації положення дентальних імплантатів в умовах потреби тотальної реабілітації. До аналізу були включені систематичні огляди, присвячені вивченню: 1) методик із використанням нешинованих скан-абатментів («nonsplinting techniques») [4]; 2) методик із використанням некаліброваних шинуючих

конструкцій та модифікованих скан-абатментів («noncalibrated splinting and modified implant scan body techniques») [5]; 3) методик із використанням каліброваних систем сканування («calibrated scanning techniques») [6]; 4) зовнішньоротовим методикам цифрової реєстрації позицій імплантів, включаючи фотограмметрію та техніку реверсивного відбитка («extraoral techniques») [7].

У процесі аналізу із структури кожного систематичного огляду проводили екстракцію щодо кількості включених первинних досліджень, типів досліджуваних цифрових протоколів, використаних технічних рішень, а також зареєстрованих показників точності. Основними параметрами аналізу були показники правдивості та прецизійності, величини лінійних та кутових відхилень, а також характеристики статистичної гетерогенності отриманих результатів.

Окремо проводився порівняльний аналіз принципів функціонування досліджуваних цифрових систем. З цією метою всі технології були класифіковані за математичним принципом визначення просторових координат імплантів на: 1) системи, котрі передбачають проведення графічного зшивання ділянок інтересу як фрагментів інтраорального скану без використання додаткових засобів; 2) системи, котрі передбачають проведення графічного зшивання ділянок інтересу як фрагментів інтраорального скану з оптимізацією процесу за рахунок використання модифікованих геометричних засобів для стабілізації процесу графічного зшивання; 3) системи, котрі передбачають проведення графічного зшивання ділянок інтересу як фрагментів інтраорального скану з оптимізацією процесу за рахунок використання додаткових засобів з референтно-геометричними (еталонними) параметрами, створеними на основі складної просторової архітектури; 4) системи, котрі передбачають проведення графічного зшивання ділянок інтересу як фрагментів інтраорального скану з оптимізацією процесу за рахунок використання додаткових каліброваних геометричних засобів з наперед встановленими метричними характеристиками; 5) фотограмметрично-асоційовані системи та системи істинної фотограмметрії. Додатково виконувалося зіставлення зазначеної математичної класифікації з еволюційною моделлю розвитку цифрових технологій, котрі застосовуються для реєстрації положення дентальних імплантів у випадках повної адентії.

У рамках проведеного дослідження також було виконано систематизацію та порівняльний аналіз конкретних технічних рішень, які застосовува-

лися в різних цифрових протоколах, та були описані у проаналізованих систематичних оглядах. До таких належали традиційні скан-абатменти варіативної геометрії та виготовлені з різних матеріалів, горизонтально орієнтовані референтні конструкції, системи додаткової просторової геометрії (Scan Ladder, ScanTransfer, Auxiliary Clip Systems), калібровані референтні платформи (IOSFix, Scan Gauge Systems, MedicalFit), системи внутрішньоротової фотограмметрії та їх похідні (Aoralscan Elite), а також спеціалізовані системи зовнішньоротової фотограмметрії (PIC Dental, ICam4D, Grammee, OxoFit).

На основі аналізу літературних даних виділено послідовні етапи розвитку технологій цифрового відбитку для сценаріїв реєстрації положення дентальних імплантів на беззубих щелепах: етап оптимізації характеристик скан-абатментів, етап використання та вдосконалення принципу шинування скан-абатментів, етап використання структурованих референтних систем з чітко визначеними геометричними метриками, етап використання каліброваних референтних структур, етап внутрішньоротової фотограмметрії та її похідних, а також етап систем істинної зовнішньоротової фотограмметрії. Такий підхід дозволив не лише порівняти ефективність окремих цифрових рішень, але й оцінити закономірності розвитку технологій у контексті поступового зменшення залежності від алгоритмів графічного зшивання ділянок інтересу інтраоральних сканів та переходу до безпосереднього визначення просторових координат імплантів.

Узагальнення та інтерпретація результатів проводилися шляхом якісного порівняльного аналізу опублікованих даних із подальшим формуванням концептуальної моделі розвитку цифрових технологій для реєстрації координатного положення дентальних імплантів в умовах повної адентії. Основну увагу приділяли визначенню взаємозв'язку між математичним принципом функціонування цифрової системи, її конструктивними особливостями та досягнутими показниками точності. Це дозволило сформулювати узагальнену ієрархію сучасних цифрових рішень відповідно до їх здатності забезпечувати прогнозовану та відтворювану реєстрацію просторового положення дентальних імплантів в умовах повної відсутності зубів як об'єктів з визначеною геометричною формою.

На підставі узагальнення результатів включених систематичних оглядів було проведено якісний порівняльний аналіз ефективності різних підходів до компенсації похибок цифрової рекон-

струкції, оцінено вплив додаткових геометричних фідуціарних маркерів на точність цифрових відбитків та сформовано концептуальну модель еволюції цифрових технологій реєстрації позицій імплантатів при повній адентії.

Для систематизації екстрагованих даних використовували електронні таблиці Microsoft Excel (Microsoft Office 2021, Microsoft, США). Було сформовано стандартизовану матрицю даних, у якій окремими рядками відображали систематичні огляди, включені до них первинні дослідження та описані цифрові протоколи, а стовпцями – рік публікації, дизайн дослідження, тип щелепи, кількість і просторове розташування імплантатів, вид системи сканування, конструктивні характеристики скан-абатментів і додаткових референтних елементів, принцип визначення координат, референтний метод, а також показники правдивості, прецизійності, лінійних і кутових відхилень. Для опрацювання текстової частини систематичних оглядів застосовували метод якісного контент-аналізу.

На завершальному етапі дані, систематизовані в Microsoft Excel (Microsoft Office 2021, Microsoft, США), зіставляли з результатами контент-аналізу для побудови порівняльної матриці «принцип функціонування – конструктивне рішення – показники точності». Кількісні показники використовували переважно для описового порівняння діапазонів відхилень і частоти представлення окремих технологічних підходів, тоді як текстові дані – для пояснення механізмів виникнення похибок та обґрунтування виділених етапів технологічної еволюції.

Результати дослідження та їх обговорення.

Сукупно цільові чотири систематичні огляди дослідницької комісії Американської академії незнімного протезування охоплюють 156 первинних досліджень та відображають еволюцію технологічних рішень від використання традиційних нешинованих скан-абатментів до впровадження фотограмметричних систем та каліброваних референтних структур [4, 5, 6, 7].

Найбільший масив доказових даних був проаналізований у систематичному огляді, присвяченому методикам використання скан-абатментів без шинування таких, до якого було включено 100 цільових досліджень [4]. Результати мета-аналізу засвідчили значну варіабельність показників точності, що були асоційовані з широким діапазоном лінійних відхилень від 22 до 1050 мкм та середнім значенням лінійної похибки на рівні 117 мкм. Середній показник кутових відхилень становив $0,48^\circ$ [4]. Подібний розподіл результатів свідчить

не лише про неоднорідність досліджуваних сканерів, скан-абатментів та застосованих стратегій сканування в розрізі забезпечення певного рівня точності, але й про фундаментальні обмеження самого принципу внутрішньоротового сканування в умовах адентії за відсутності додаткових просторових орієнтирів. При аналізі результатів простежується чітка тенденція до збільшення похибки зі зростанням протяжності ділянки сканування, кількості імплантатів та міжімплантатної відстані. Крім того, окремі дослідження демонстрували суттєве зростання кумулятивної похибки при наявності значних кутових відхилень між імплантатами, що вказує на обмеженість алгоритмів графічного зшивання при реконструкції складних просторових конфігурацій [4].

Отримані результати дозволяють розглядати традиційні протоколи без шинування скан-абатментів як найбільш залежні від характеристик конкретного внутрішньоротового сканера, типу скан-абатментів та особливостей протоколу сканування. Водночас саме ця категорія методик характеризувалася найвищим рівнем статистичної гетерогенності серед усіх проаналізованих систематичних оглядів, що ускладнює формування однозначних клінічних рекомендацій щодо їх використання при просторовій реєстрації положення дентальних імплантатів в умовах повної адентії.

Порівняно з традиційними методиками використання скан-абатментів без шинування, застосування додаткових просторових орієнтирів продемонструвало суттєве покращення показників точності, що підтверджується результатами систематичного огляду, присвяченого технікам некаліброваного шинування та технікам використання модифікованих скан-абатментів (в структуру такого було включено 12 цільових досліджень) [5]. Незважаючи на відносно невелику кількість доступних публікацій, які відповідали критеріям включення, результати таких виявилися достатньо узгодженими щодо позитивного впливу додаткових геометричних структур на якість цифрової реєстрації позицій імплантатів.

Подібні результати підтверджують припущення про те, що основною причиною втрати точності при цільнодуговому внутрішньоротовому скануванні є не стільки похибка самого сканера, скільки недостатня кількість геометричних референтних об'єктів, необхідних для алгоритмів просторової реконструкції. Водночас навіть у межах цієї категорії спостерігалася значна залежність результатів від конструктивних особливостей конкретної системи, що свідчить про відсутність універсального рішення для компенсації поми-

лок, пов'язаних із ефектом графічного зшивання фрагментів скану [5].

Подальший розвиток концепції додаткових просторових орієнтирів реалізувався у вигляді каліброваних систем сканування, результати яких були проаналізовані в окремому систематичному огляді, що включав 15 досліджень. На відміну від некаліброваних систем шинування, калібровані системи характеризуються наявністю наперед визначених геометричних параметрів, які використовуються як еталонні координатні структури під час цифрової реконструкції. До цієї категорії належали системи, на зразок, Scan Gauge, IOSFix, MedicalFit та рішення, засновані на внутрішньоротовій фотограмметрії [6].

Аналіз результатів продемонстрував суттєве зменшення варіабельності показників точності порівняно з традиційним внутрішньоротовим скануванням. Загальний діапазон лінійних відхилень становив від 11 до 128 мкм, причому більшість отриманих результатів не перевищувала поріг 150 мкм [6]. Особливу увагу привертають результати внутрішньоротової фотограмметрії, для якої середня лінійна похибка становила 36 мкм, а середнє кутове відхилення – $0,23^\circ$ [6].

Важливо відзначити, що зазначені показники практично наближаються до результатів спеціалізованих фотограмметричних систем та істотно перевищують характеристики більшості традиційних внутрішньоротових сканерів. Крім того, у дослідженнях каліброваних систем спостерігався значно нижчий рівень гетерогенності результатів, що свідчить про вищу відтворюваність відповідних протоколів.

Найвищі показники точності були продемонстровані методиками, що базуються на зовнішньоротовій фотограмметрії та аналізувалися в систематичному огляді, присвяченому оцінці зовнішньоротових технік цифрового відбитка [7]. До даного огляду було включено 29 досліджень, у яких оцінювалися фотограмметричні системи PIC Dental, ICam4D, Grammee, OxoFit [7]. Узагальнені результати мета-аналізу продемонстрували середню лінійну похибку на рівні 27 мкм та середнє кутове відхилення $0,21^\circ$ [7]. Такі показники є найнижчими серед усіх проаналізованих категорій цифрових протоколів.

Порівняння результатів фотограмметричних систем із даними для традиційних внутрішньоротових сканувань демонструє зменшення лінійної похибки більш, ніж у чотири рази. Водночас різниця між зовнішньоротовою фотограмметрією та каліброваними внутрішньоротовими системами виявилася значно меншою, що свідчить про посту-

пову апроксимізацію рівня точності цих технологій. Аналіз розподілу результатів також показав, що фотограмметричні системи характеризуються не лише нижчими середніми значеннями похибок, але й суттєво меншою варіабельністю отриманих результатів, що є критично важливим з точки зору прогнозованості клінічних результатів.

Окремо слід відзначити результати досліджень, присвячених техніці зворотного (реверсивного відбитка). Незважаючи на меншу кількість доступних публікацій порівняно з фотограмметрією, отримані дані свідчать про здатність даних протоколів забезпечувати високий рівень точності завдяки перенесенню етапу цифровізації за межі ротової порожнини [7]. При цьому основними джерелами похибок залишаються не процеси цифрового сканування, а традиційні аналогові етапи отримання відбитка та виготовлення робочої моделі [13, 14, 15].

Порівняльний аналіз усіх чотирьох систематичних оглядів дозволяє сформулювати чітку ієрархію сучасних цифрових протоколів за рівнем точності. Найвищі показники точності демонструють системи зовнішньоротової фотограмметрії, для яких характерні лінійні відхилення апроксимізовані до рівня девіації в 27 мкм та кутові відхилення апроксимізовані до рівня девіації $0,21^\circ$ [4, 5, 6, 7]. Порівнювані показники відмічаються для систем внутрішньоротової фотограмметрії та інших каліброваних систем скан-абатментів, для яких середні лінійні похибки знаходяться в межах 30-50 мкм [4, 5, 6, 7]. Некалібровані шинуючі конструкції та системи з додатковою референтною геометрією здатні забезпечувати показники точності у межах 26-58 мкм за сприятливих умов [4, 5, 6, 7]. Найменш прогнозованими залишаються традиційні протоколи без шинування скан-абатментів, для яких характерна найбільша варіабельність результатів та найвищий ризик накопичення помилок, асоційованих з процесом графічного зшивання фрагментів інтраорального скану (табл. 1).

Саме наявність референтних структур, а не характеристики сканера як такі, може бути інтерпретовано в якості ключового фактора, який визначає точність цифрової реєстрації позицій імплантатів в умовах повної адентії.

Аналіз результатів чотирьох послідовно опублікованих систематичних оглядів дозволяє простежити закономірну еволюцію цифрових технологій реєстрації позицій імплантатів при тотальній реабілітації пацієнтів ортопедичними конструкціями з опорою на дентальних імплантатах. Важливо відзначити, що розвиток даних рішень відбувався не стільки шляхом удосконалення апаратних характе-

Таблиця 1

**Основні результати цільових систематичних оглядів дослідницької комісії
Американської академії незнімного протезування щодо точності цифрових методик
реєстрації позицій дентальних імплантатів у випадках реабілітації в умовах повної адентії**

№	Систематичний огляд	Кількість включених статей	Основна група методик	Основні результати
1	Accuracy of complete arch implant scans using nonsplinting techniques: A systematic review and meta-analysis. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics [4]	100 досліджень	Скан-абатменти без шинування (стандартні скан-абатменти, формувачі ясен з можливістю використання у якості скан-абатментів, різні скан-абатменти за матеріалом, висотою, діаметром, геометрією)	Лінійна похибка становила від 22 до 1050 мкм, із середнім значенням 117 мкм; ангулярна похибка – від 0,01° до 1,75°, із середнім значенням 0,48°. Правдивість лінійних вимірювань становила від 41 до 557 мкм, із середнім значенням 153 мкм; прецизійність лінійних вимірювань – від 7 до 166 мкм, із середнім значенням 57 мкм. Правдивість ангулярних вимірювань становила від 0,20° до 1,69°, із середнім значенням 0,65°; прецизійність ангулярних вимірювань – від 0,05° до 1,69°, із середнім значенням 0,41°.
2	A systematic review of the accuracy of complete arch implant scans recorded by using noncalibrated splinting or implant scan body techniques. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics [5]	12 статей	Некаліброване шинування скан-абатментів та модифіковані версії скан-абатментів (горизонтальні некалібровані скан-абатментами, коннектори, модифіковані шини, доцентрово орієнтовані горизонтальні скан-абатменти)	Доказова база обмежена, але більшість noncalibrated splinting-рішень показували похибки в межах клінічно прийнятного діапазону (до 150 мкм)
3	A systematic review and meta-analysis of the accuracy of complete arch implant scanning techniques performed extraorally: Reverse impression and extraoral photogrammetry methods. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics [7]	29 досліджень	Позаротові техніки (позаротова фотограмметрія та техніка реверсивного відбитка)	Для методик зовнішньоротової фотограмметрії середня лінійна похибка становила 27 мкм, середня ангулярна похибка – 0,21°, середня правдивість лінійних вимірювань – 69 мкм, середня прецизійність лінійних вимірювань – 43 мкм, середня правдивість ангулярних вимірювань – 0,23°, а середня прецизійність ангулярних вимірювань – 0,15°.
4	Accuracy of complete arch implant scans recorded by using calibrated scanning techniques: A systematic review and meta-analysis. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics [6]	15 статей	Калібровані техніки (калібровані джиги, внутрішньоротова фотограмметрія, калібровані горизонтальні скан-абатменти)	Показники точності різних каліброваних методик становили від 11 до 128 мкм. У більшості досліджень величина деформації скану не перевищувала 150 мкм. Для методики внутрішньоротової фотограмметрії середня лінійна похибка становила 36 мкм, а середня ангулярна похибка – 0,23°.

ристик внутрішньоротових сканерів, скільки через пошук способів мінімізації накопичення просторових похибок, які виникають у процесі побудови цифрової моделі беззубої щелепи.

Перший етап розвитку представлений використанням традиційних конструкцій скан-абатментів без їх шинування. Концепція даного підходу базувалася на припущенні, що точність цифрового відбитка може бути забезпечена виключно за рахунок можливостей внутрішньоротового сканера та алгоритмів просторової реконструкції.

У межах цієї концепції основна увага приділялася модифікації геометрії, висоти, діаметра та матеріалу скан-абатментів, однак сам принцип отримання цифрового відбитка залишався незмінним. Результати систематичного огляду продемонстрували, що навіть за умов використання сучасних внутрішньоротових сканерів накопичення похибок графічного зшивання залишається основним фактором втрати точності, особливо при збільшенні довжини сканованого сегмента та кількості імплантатів [4].

Приймаючи до уваги даний факт наступний етап розвитку передбачав використання некаліброваних шинуючих конструкцій, метою яких було створення додаткової геометричної інформації для алгоритмів графічного зшивання. До даної групи належали різноманітні конструкції горизонтально орієнтованих скан-абатментів, допоміжні кліпси та коннектори, полімерні балки та інші системи, що фізично об'єднували окремі імплантати в єдину просторову структуру [5]. На відміну від традиційних підходів, ці рішення вже не розглядали імплантат як ізольований об'єкт сканування, а формували міжімплантатні зв'язки, які могли використовуватися програмним забезпеченням для більш стабільної просторової реконструкції.

Подальшим розвитком цієї концепції стало формування класу систем з референтними геометричними параметрами, завданням яких було не механічне з'єднання імплантатів, а створення додаткової просторової архітектури зі складною геометрією, яка забезпечувала значно більшу кількість референтних точок для цифрового алгоритму [5]. Фактично відбулася зміна концепції від простого з'єднання скан-абатментів до створення штучної геометричної екосистеми, що компенсувала дефіцит анатомічних орієнтирів на беззубих ділянках щелеп. Саме на цьому етапі стало очевидним, що точність цифрового відбитка визначається не лише якістю збору даних, а й обсягом просторової інформації, доступної для процесу реконструкції.

Логічним продовженням розвитку систем з референтною геометрією стало впровадження каліброваних референтних структур [6]. Якщо попередні системи створювали додаткову геометрію без попередньо визначених координатних характеристик, то калібровані системи вже використовували конструкції з наперед відомими просторовими параметрами. Принципова відмінність даного етапу полягає у переході від використання додаткової геометрії до використання контрольованої та математично визначеної геометрії. Завдяки цьому алгоритми просторової реконструкції отримують не лише більше орієнтирів, але й можливість верифікації правильності побудови цифрової моделі відносно відомих еталонних параметрів.

Наступним кроком розвитку стало інтегрування принципів фотограмметрії у внутрішньоротові протоколи сканування. На відміну від попередніх підходів, які намагалися покращити якість процесу графічного зшивання, внутрішньоротова фотограмметрія частково відмовляється від самої концепції послідовного зшивання зображень [6]. Натомість просторові координати імплантатів

визначаються шляхом аналізу великої кількості взаємопов'язаних оптичних проєкцій. Таким чином відбувається перехід від покращення традиційного внутрішньоротового сканування до використання принципово іншої математичної моделі просторової локалізації об'єктів. Проте варто зазначити, що при цьому вихідне поле зйомки обмежене розмірними параметрами робочого вікна головки сканера, отже з точки зору графічної реконструкції ефект часткового графічного зшивання залишається присутнім.

Найвищий рівень розвитку представлений системами зовнішньоротової фотограмметрії, оскільки замість реконструкції геометрії шляхом накопичення окремих фрагментів цифрова модель формується на основі безпосереднього визначення просторових координат імплантатів за допомогою фотограмметричних алгоритмів [7].

Авторська пропозиція класифікації поколінь цифрових методик реєстрації позицій дентальних імплантатів у випадках реабілітації в умовах повної адентії наведена у таблиці 2.

Попри значну різноманітність сучасних цифрових рішень для реєстрації позицій дентальних імплантатів при тотальних реабілітаціях з опорою на імплантатах, їх класифікація лише за конструктивними особливостями або хронологією появи не дозволяє повною мірою зрозуміти механізми забезпечення точності цифрового відбитка. У зв'язку з цим більш доцільним видається концептуальний підхід, заснований на математичному принципі визначення просторових координат імплантатів. Така класифікація дозволяє простежити не лише еволюцію конкретних пристроїв, але й трансформацію фундаментальних алгоритмічних підходів до реконструкції тривимірної геометрії.

Найпростішою категорією є системи, які функціонують лише на принципі графічного зшивання фрагментів скану, як ділянок інтересу, до яких належать традиційні підходи внутрішньоротового сканування із використанням стандартних скан-абатментів. У межах даного підходу координати імплантатів визначаються шляхом послідовного накопичення та зшивання великої кількості локальних зображень. Просторова модель формується за рахунок пошуку спільних ділянок між сусідніми кадрами-фрагментами скану та їх математичного поєднання в єдину тривимірну структуру. Однак кожен наступний етап зшивання супроводжується мінімальною похибкою, яка накопичується зі збільшенням довжини сканованої ділянки [1, 2, 3]. У результаті кінцева точність визначається не лише якістю окремих сканів, але й сумарним ефектом послідовних просторових трансформацій (рис. 1-2).

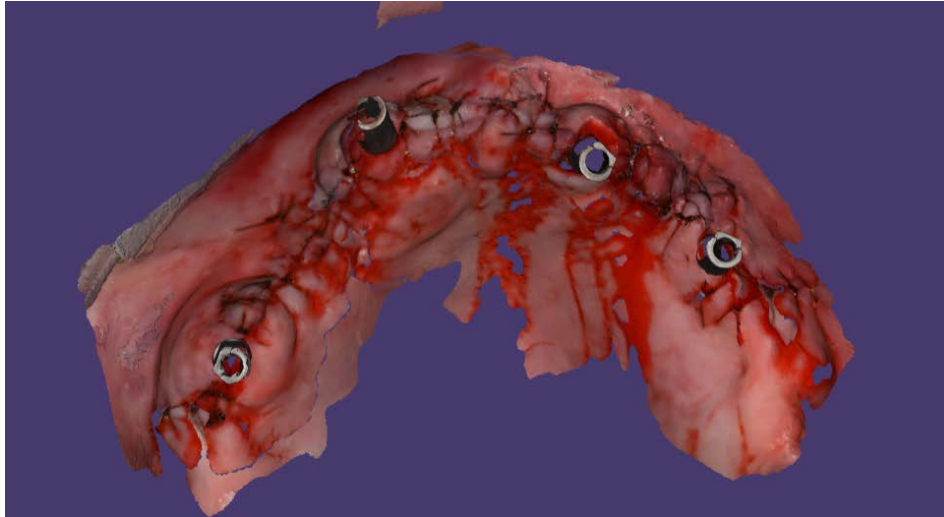


Рис. 1. Репрезентація клінічного випадку із скануванням скан-абатментів без використання жодних додаткових підходів до оптимізації процесу отримання інтраорального скану (із клінічних досліджень та експериментальних напрацювань Гончарука-Хомина М. Ю. та Тукала І. В.)

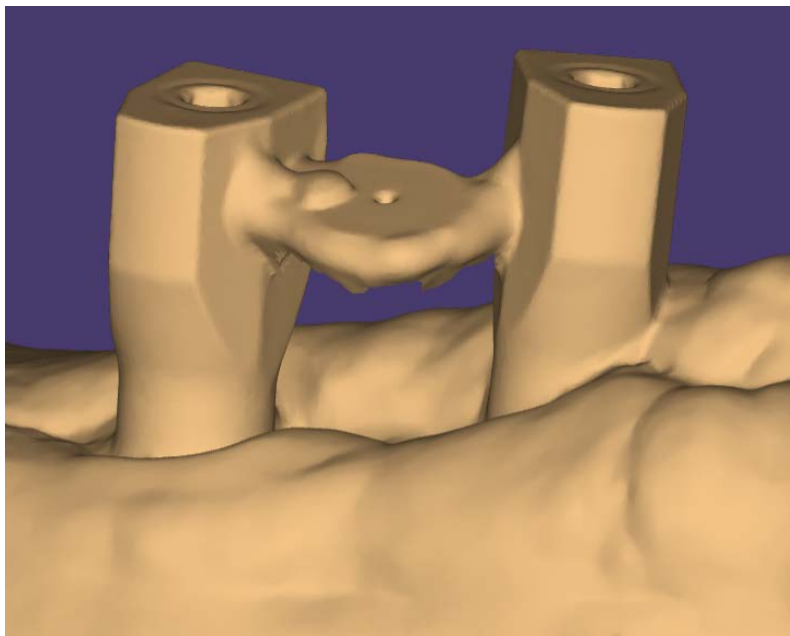


Рис. 2. Репрезентація клінічного випадку із шинуванням скан-абатментів (із клінічних досліджень та експериментальних напрацювань Гончарука-Хомина М. Ю. та Поповича С. С.)

Таблиця 2

Пропозиція класифікації поколінь цифрових методик реєстрації позицій дентальних імплантатів у випадках реабілітації в умовах повної адентії

Покоління	Концепція	Основне джерело точності
I покоління	Безпосереднє сканування скан-абатментів	Алгоритм сканера
II покоління	Сканування шинуваних скан-абатментів	Фізичне з'єднання скан-абатментів
III покоління	Структуроване сканування конструкцій шинуючого принципу дії	Горизонтальні референтні структури
IV покоління	Сканування з використанням референтних геометричних систем	Штучна просторова архітектура
V покоління	Сканування з використанням каліброваних геометричних систем	Калібрована геометрія
VI покоління	Інтраоральна фотограмметрія	Фотограмметричне визначення окремих координат з обмеженим полем зйомки
VII покоління	Позаротова фотограмметрія	Пряме фотограмметричне позиціонування

У межах запропонованої еволюційної моделі дана група відповідає першому поколінню цифрових технологій або етапу оптимізації параметрів скан-абатментів, коли основна увага приділялася вдосконаленню форми, матеріалу та геометрії окремих скан-абатментів без зміни базового математичного принципу реконструкції [1, 2, 3, 4].

Усвідомлення обмежень традиційного підходу графічного зшивання фрагментів скану сприяло появі другої концептуальної категорії, що може визначатися як графічне зшивання на основі додаткових геометричних координат. До неї належать системи, що використовують горизонтальні або доцентрово-орієнтовані референтні елементи між імплантатами [4, 16] (рис. 3).

Незважаючи на те, що математичний принцип реконструкції залишається заснованим на графічному зшиванні, додаткова геометрія створює нові точки прив'язки для алгоритму просторового вирівнювання. Таким чином відбувається стабілізація процесу графічного зшивання шляхом збільшення обсягу доступної геометричної інформації. Ця категорія відповідає другому поколінню цифрових рішень або етапу реалізації принципу шинування, коли основним способом підвищення точності стало фізичне об'єднання окремих скан-абатментів у єдину структуру.

Подальший розвиток технологій призвів до формування категорії систем з референтною геометрією. На відміну від попередньої групи, де

додаткова геометрія мала переважно допоміжний характер, у даному випадку саме референтна архітектура стає ключовим елементом системи. Їх принципова відмінність полягає у створенні складної просторової структури з великою кількістю взаємопов'язаних геометричних елементів, які суттєво підвищують стабільність алгоритмів просторової реконструкції. Математично ці системи все ще залишаються залежними від процесів графічного зшивання, проте використовують значно більшу кількість референсних точок та просторових обмежень. У межах еволюційної моделі ця категорія відповідає третьому поколінню або етапу реалізації принципів референтної геометрії. Саме на цьому етапі відбувається концептуальний перехід від оптимізації окремих скан-абатментів до оптимізації всієї просторової архітектури цифрового відбитка.

Наступною ланкою розвитку стали калібровані геометричні системи, які передбачають використання геометричних структур із наперед відомими метричними характеристиками [6, 17, 18]. На відміну від систем з референтною геометрією, де додаткова геометрія створює лише орієнтири для графічного зшивання, калібровані системи забезпечують можливість математичної перевірки правильності реконструкції відносно еталонних параметрів. По суті алгоритм отримує не лише додаткові точки для поєднання фрагментів, але й інформацію про те, якою повинна бути пра-

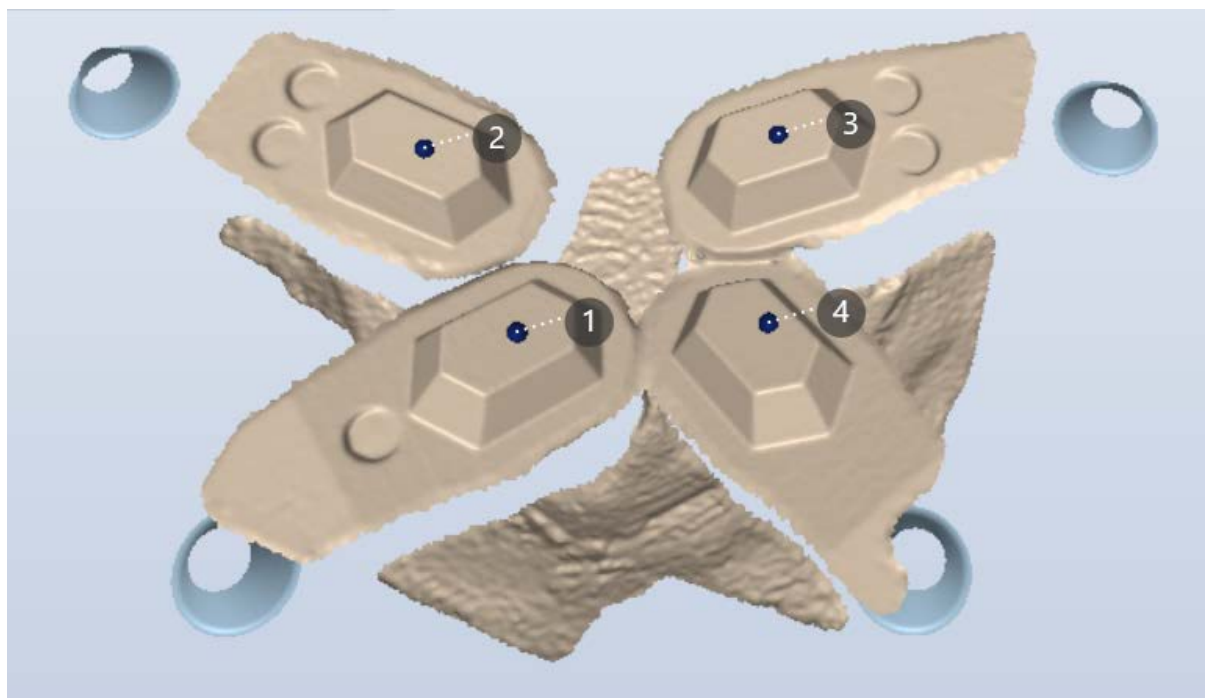


Рис. 3. Репрезентація системи із доцентрово зверненими модифікованими скан-абатментами (із клінічних досліджень та експериментальних напрацювань Гончарука-Хомина М. Ю.)

вильна геометрична конфігурація. Це дозволяє суттєво зменшити вплив накопичення похибок та підвищити відтворюваність результатів. У запропонованій еволюційній схемі дана категорія відповідає четвертому поколінню або етапу реалізації принципів каліброваної геометрії.

Подальше вдосконалення цифрових технологій відбулося за рахунок часткової відмови від традиційної концепції графічного зшивання. Цей напрям представлений категорією фотограмметрично-асистованих систем, до якої належать сучасні системи внутрішньоротової фотограмметрії [18, 19, 20]. У даному випадку просторові координати імплантатів визначаються не лише шляхом послідовного зшивання окремих зображень, а й за допомогою фотограмметричних алгоритмів аналізу взаємного положення маркерів у просторі. Таким чином частина координатних розрахунків виконується незалежно від процесу графічного зшивання, що дозволяє суттєво зменшити вплив кумулятивних похибок. Дана категорія відповідає п'ятому поколінню або етапу інтраоральної фотограмметрії, який характеризується інтеграцією фотограмметричних принципів у традиційні цифрові робочі процеси.

Найвищим рівнем розвитку сучасних технологій є категорія істинних фотограмметричних систем, для яких просторове положення імплантатів розраховується безпосередньо на основі фотограмметричних алгоритмів триангуляції та аналізу множинних проєкцій координат [19, 21] (рис. 4).

У результаті усувається головне джерело похибок, характерне для внутрішньоротового сканування, а саме накопичення помилок при послідовному поєднанні локальних фрагментів скану. Саме тому дана категорія демонструє найвищі показники точності серед усіх сучасних цифрових технологій. У межах еволюційної моделі вона відповідає шостому поколінню.

Таким чином, класифікація за математичним принципом фактично пояснює логіку еволюції цифрових технологій цифрових відбитків для випадків реєстрації координатного положення множинних дентальних імплантатів. Якщо класифікація за поколіннями відображає історичну послідовність розвитку рішень, то математична класифікація демонструє зміну фундаментального механізму визначення координат імплантатів в цифровому середовищі: від алгоритмів цифрового зшивання до безпосереднього визначення просторових координат за допомогою фотограмметричних методів.

Водночас наразі до даної класифікації також варто додати мобільні фотограмметричні рішення, а також такі які базуються на основі використання штучного інтелекту (ШІ), хоча такі не повністю відповідають традиційній лінійній послідовності поколінь. Мобільна фотограмметрія переважно відображає новий формат технічної реалізації фотограмметричного принципу, спрямований на підвищення портативності та клінічної доступності систем [22, 23], натомість штучний інтелект є над-

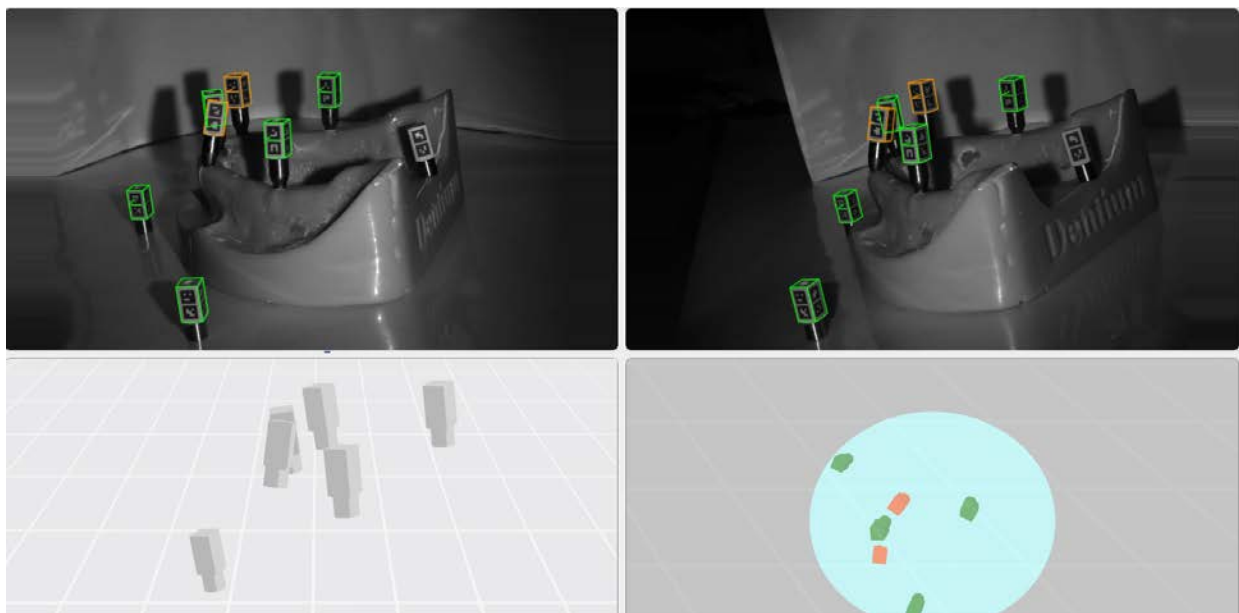


Рис. 4. Репрезентація системи фотограмметрії для реєстрації положення дентальних імплантатів (із клінічних досліджень та експериментальних напрацювань Гончарука-Хомина М. Ю.)

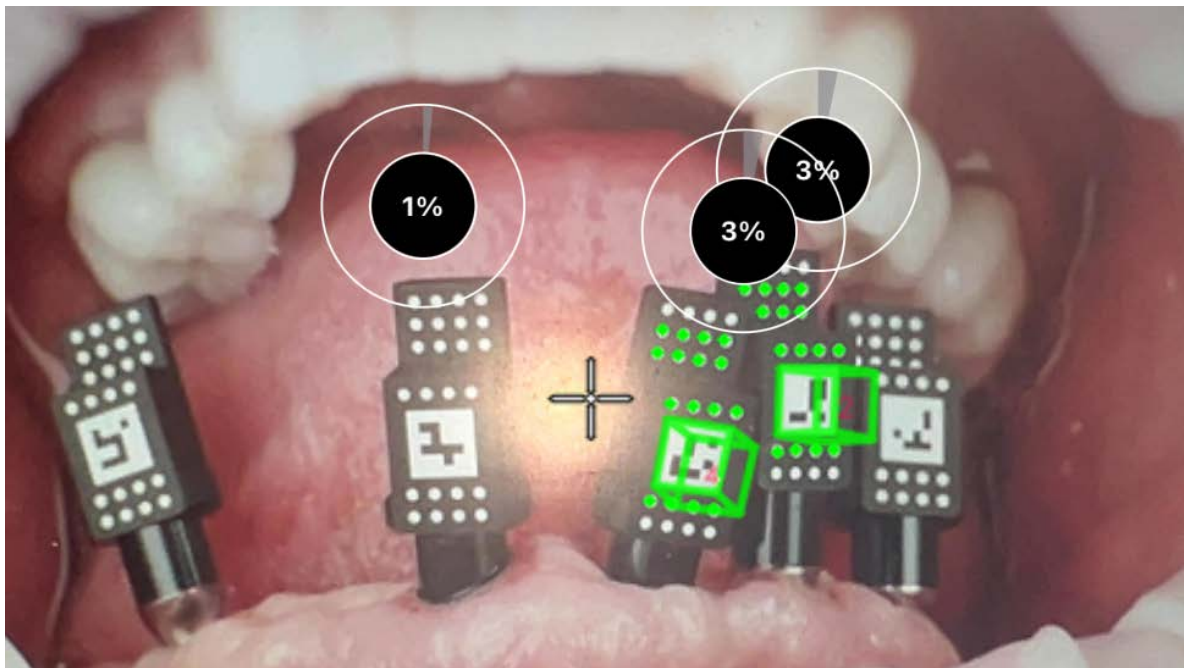


Рис. 5. Репрезентація системи із мобільною версією фотограмметрії для реєстрації положення дентальних імплантів (із клінічних досліджень та експериментальних напрацювань Гончарука-Хомина М. Ю.)

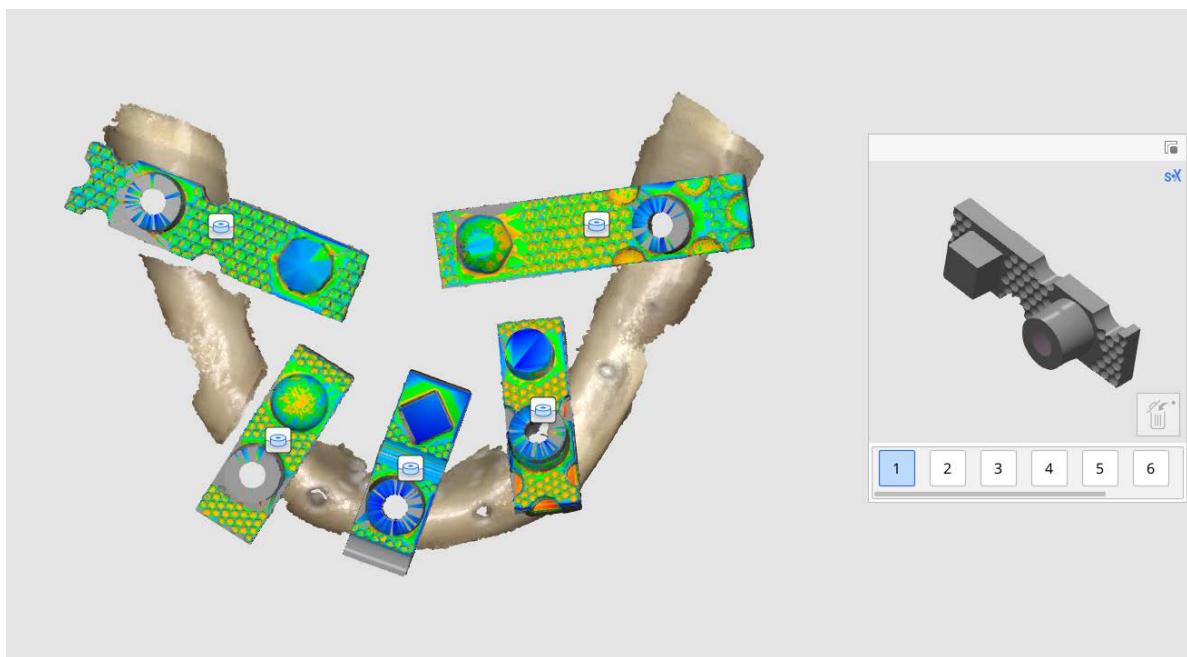


Рис. 6. Репрезентація системи із ШП-базованим автоматичним суміщення бібліотек скан-абатментів з результатами сканування (із клінічних досліджень та експериментальних напрацювань Гончарука-Хомина М. Ю.)

будовною технологією, яка потенційно може застосовуватися на різних етапах цифрової реєстрації (від оптимізації графічного зшивання до автоматичного розпізнавання фідуціарних маркерів і корекції фотограмметричних розрахунків) [24, 25, 26] (рис. 5-6).

Авторська пропозиція класифікації цифрових методик реєстрації позицій дентальних імплантів у випадках реабілітації в умовах повної адентії з урахуванням математичного принципу визначення просторових координат цільових об'єктів представлена у таблиці 3.

Таблиця 3

**Пропозиція класифікації цифрових методик реєстрації позицій дентальних імплантатів
у випадках реабілітації в умовах повної адентії з урахуванням математичного принципу
визначення просторових координат цільових об'єктів**

Категорія цифрових систем	Принцип визначення положення імплантатів	Роль графічного зшивання	Основна технологічна особливість	Відповідний етап розвитку
Системи на основі графічного зшивання	Координати імплантатів визначаються шляхом послідовного поєднання локальних кадрів (фрагментів) інтраорального скану	Є основним механізмом формування тривимірної моделі	Використання стандартних скан-абатментів; точність залежить від якості окремих кадрів і накопичення похибок під час їх послідовного зшивання	I покоління – оптимізація характеристик скан-абатментів
Системи з геометрично-асистованим графічним зшиванням	Графічне зшивання виконується з використанням додаткових горизонтальних, доцентрово орієнтованих або шинуючих елементів	Залишається основним механізмом, але стабілізується додатковою геометрією	Збільшення кількості розпізнаваних ділянок і точок прив'язки між імплантатами	II покоління – реалізація принципу шинування
Системи з референтною просторовою геометрією	Координати визначаються шляхом зшивання сканів із використанням складної просторової структури, що містить численні взаємопов'язані геометричні орієнтири	Зберігається, проте виконується за більшої кількості просторових обмежень	Оптимізується не на рівні окремого скан-абатменту, а вся архітектура цифрового відбитка	III покоління – використання структурованої референтної геометрії
Системи з каліброваною геометрією	Просторове положення імплантатів визначається з урахуванням наперед відомих метричних характеристик референтної конструкції	Використовується, але може перевірятися та коригуватися відносно еталонної геометрії	Алгоритм послуговується інформацією не лише про форму конструкції, а й про її нормативні розміри, відстані та просторові співвідношення	IV покоління – використання каліброваних референтних систем
Фотограмметрично-асистовані системи	Координати визначаються шляхом поєднання інтраорального сканування з фотограмметричним аналізом взаємного положення спеціальних маркерів	Використовується для відтворення анатомічних тканин, але частково втрачає значення для визначення координат імплантатів	Частина просторових розрахунків виконується незалежно від послідовного зшивання локальних кадрів	V покоління – інтеграція внутрішньоротової фотограмметрії
Системи істинної фотограмметрії	Положення імплантатів безпосередньо розраховується за множинними оптичними проєкціями та принципом просторової триангуляції	Не є основним механізмом визначення координат імплантатів	Усунення або максимальне обмеження кумулятивної похибки, характерної для послідовного зшивання інтраоральних сканів	VI покоління – спеціалізована фотограмметрична реєстрація
Мобільні фотограмметричні системи	Просторове положення імплантатів визначається фотограмметрично за допомогою компактних портативних або мобільно інтегрованих засобів реєстрації зображень	Може бути відсутнім або використовуватися лише для поєднання координат імплантатів з анатомічною моделлю щелепи	Підвищення портативності, доступності та можливості клінічного застосування без стаціонарного спеціалізованого комплексу	Мобільний напрям VI покоління або перехідний етап до VII покоління
Системи зі штучним інтелектом	Координати визначаються або уточнюються алгоритмами автоматичного розпізнавання маркерів, сегментації, зіставлення геометрії, виявлення артефактів і прогнозування похибок	Залежить від базової технології; штучний інтелект може оптимізувати як зшивання, так і фотограмметричні обчислення	Автоматична оцінка якості скану, корекція локальних деформацій, виявлення пропущених ділянок, прогнозування ненадійних координат і підтримка повторного сканування	III-асистований напрям VII покоління

Висновки. Аналіз чотирьох цільових систематичних оглядів дослідницької комісії Американської академії незнімного протезування, присвячених оцінці точності різних підходів до отримання цифрових відбитків з реєстрацією положення дентальних імплантатів в умовах повної адентії, засвідчив, що параметр точності цифрових відбитків визначається не лише технічними характеристиками внутрішньоротового сканера, але насамперед математичним принципом формування цифрової моделі та наявністю додаткових геометричних орієнтирів. Традиційні протоколи з використанням нешинованих скан-абатментів залишаються найбільш залежними від послідовного графічного зшивання локальних кадрів, унаслідок чого характеризуються найбільшою варіабельністю результатів і ризиком накопичення кумулятивної просторової похибки.

Використання шинуючих конструкцій, структурованої референтної геометрії та каліброваних систем послідовно підвищує стабільність просторової реконструкції завдяки збільшенню кількості фідучіарних ділянок та можливості контролю отриманої моделі відносно наперед визначених метричних параметрів. Найвищі та найбільш відтворювані показники точності продемонстрували системи внутрішньоротової й особливо зовнішньоротової фотограмметрії, у яких визначення координат імплантатів меншою мірою залежить або практично не залежить від послідовного графічного зшивання фрагментів скану.

Запропонована класифікація за математичним принципом функціонування дає змогу представити розвиток цифрових методик як закономірний перехід від алгоритмічного поєднання локальних ділянок інтраорального скану до безпосереднього фотограмметричного визначення просторових координат імплантатів. Такий підхід є більш інформативним, ніж виключно хронологічне або конструктивне групування систем, оскільки пояснює механізми виникнення похибок, способи їх компенсації та відмінності у відтворюваності цифрових протоколів.

Мобільні фотограмметричні рішення та технології зі штучним інтелектом доцільно розглядати як перспективні напрями подальшого розвитку, а не як повністю відокремлені послідовні покоління розвитку підходів до отримання цифрових відбитків для реєстрації положення дентальних імплантатів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на клінічну валідацію цих систем, стандартизацію методів оцінки їх точності та визначення порогових значень похибок, сумісних

із прогнозованою пасивною посадкою конструкцій з опорою на внутрішньокісткових титанових дентальних імплантатах.

Література:

1. Chen H.T., Feng S.W., Vo T.T.T. et al. Cumulative Error in Digital Workflows for Full-Arch Implant Rehabilitation: A Narrative Review. *Bioengineering*. 2026. Vol. 13(2). P. 219. DOI: 10.3390/bioengineering13020219
2. Pan Y., Tsoi J.K.H., Lam W.Y. et al. The cumulative effect of error in the digital workflow for complete-arch implant-supported frameworks: an in vitro study. *Clinical Oral Implants Research*. 2022. Vol. 33(9), P. 886-899. DOI: 10.1111/clr.13968
3. Zingari F., Meglioli M., Gallo F. et al. Predictability of intraoral scanner error for full-arch implant-supported rehabilitation. *Clinical Oral Investigations*. 2023. Vol. 27(7).. P. 3895-3905. DOI: 10.1007/s00784-023-05011-4
4. Revilla-León M., Barmak A. B., Prasad S. Accuracy of complete arch implant scans using nonsplinting techniques: A systematic review and meta-analysis. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2026. Vol. 136 (1). P. e102-e138. DOI: 10.1016/j.prosdent.2026.02.034
5. Revilla-León M., Ghunaim D., Barmak A. B. et al. A systematic review of the accuracy of complete arch implant scans recorded by using noncalibrated splinting or implant scan body techniques. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2026. Vol. 135 (6). P. 1058-1071 DOI:10.1016/j.prosdent.2025.11.018
6. Revilla-León M., Ghunaim D., Barmak A.B. et al. Accuracy of complete arch implant scans recorded by using calibrated scanning techniques: A systematic review and meta-analysis. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2026. Vol. 135(4). P. e28-e42. DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.11.029
7. Prasad S., Barmak A.B., Revilla-León M. A systematic review and meta-analysis of the accuracy of complete arch implant scanning techniques performed extraorally: Reverse impression and extraoral photogrammetry methods. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2026. Vol. 136 (1). P. e79-e101. DOI: 10.1016/j.prosdent.2026.01.018
8. Rutkūnas V., Gedrimienė A., Mischitz I. et al. EPA consensus project paper: accuracy of photogrammetry devices, intraoral scanners, and conventional techniques for the full-arch implant impressions: a systematic review. *The European journal of prosthodontics and restorative*

dentistry. 2023. Online ahead of print. DOI:10.1922/EJPRD_2481Rutkunas12

9. Noronha C.P., de Souza C.F., dos Santos Oliveira M.D. et al. Accuracy of Stereophotogrammetry in Implant Scanning Compared to Intraoral Scanning in Completely Edentulous Patients--A Systematic Review and Meta-analysis. *International Journal of Prosthodontics*. 2026. Vol. 39(3). P. 397. DOI: 10.11607/ijp.9358

10. Jain S., Daak H.A., Someli L.A. et al. Accuracy of stereophotogrammetry technique versus intraoral scanners for complete-arch implant digital impressions: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Dentistry*. 2025. Vol. 20(1). P. 34-48. DOI: 10.1055/s-0045-1806935

11. Pozzi A., Arcuri L., Carosi P. et al. Photogrammetry Versus Intraoral Scanning in Complete-Arch Digital Implant Impression: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Clinical implant dentistry and related research*. 2025. Vol. 27(3). P. e70059. DOI: 10.1111/cid.70059

12. Гончарук-Хомин М.Ю., Тукало І.В. Аналіз критеріїв та підходів до кількісної оцінки точності реєстрації положення дентальних імплантатів із використанням технології цифрового відбитка. *Intermedical journal*. 2025. № 3. С. 27-37. DOI: 10.32782/2786-7684/2025-3-5.

13. Hyspler P., Urbanová P., Dostalova T. Comparison of the reverse scan technique with an intraoral scanner and the traditional impression technique. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2025. Vol. 134(6). P. 2515-2523. DOI: 10.1016/j.prosdent.2024.08.012

14. Chamma-Wedemann C. N., Sanchez R. S. L., Pacheco P. S. [et al.]. Applicability of the reverse scan body technique for the fabrication of implant-supported prostheses: a scoping review. *Brazilian Dental Science*. 2026. Vol. 29. P. e4974. DOI: 10.4322/bds.2026.e4974

15. Papaspyridakos P., Bedrossian E.A., Ntovas P. [et al.]. Reverse scan body: the scan pattern affects the fit of complete-arch prototype prostheses. *Journal of Prosthodontics*. 2023. Vol. 32(S2). P. 186-191. DOI: 10.1111/jopr.13772

16. Revilla-León M., Cascos R., Barmak A. B. et al. Accuracy of a complete arch noncalibrated splinting implant scanning technique with a palatal orientation recorded by using different intraoral scanners. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2026. Vol. 135(1). P. 109-117. DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.02.020

17. Giglio G.D., Giglio A.B., Tarnow D.P. et al. A paradigm shift using scan bodies to record the position of a complete arch of implants in a digital workflow. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*. 2024. Vol. 44(1). P. 115-126. DOI: 10.11607/prd.6733

18. Lerner H., Weigl P., Sader R. [et al.]. Accuracy of Full-arch Implant Scan with Nexus IOS® Scan Gauges versus Different Conventional Scan bodies: an in Vitro Comparative Study. *Journal of Dentistry*. 2025. 106254. DOI: 10.1016/j.jdent.2025.106254

19. Revilla-León M., Gómez-Polo M., Drone M. et al. Accuracy of complete arch implant scans recorded

by using intraoral and extraoral photogrammetry systems. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2025. Vol. 134(6). P. 2508-2514. DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.01.041

20. Revilla-León M., Cascos R., Barmak A. [et al.]. Accuracy of intraoral photogrammetry and influence of calibrated implant scan body dimensions. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2026. P. S0022-3913. DOI: 10.1016/j.prosdent.2026.05.006

21. Revilla-León M., Guinot-Barona C., Barmak A.B. et al. Comparative accuracy study of three extraoral photogrammetry methods, one intraoral photogrammetry system, and a noncalibrated implant scan body technique. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2026. Vol. 136(1). P. 267-274. DOI: 10.1016/j.prosdent.2026.01.010

22. Santamaría-Laorden A., Marugán A. M., Andreu-Vázquez C. et al. Complete arch implant capture using a photogrammetry algorithm and smartphone app: An in vitro study. *Journal of Dentistry*. 2026. P. 105969. DOI: 10.1016/j.jdent.2025.105969

23. Revilla-León M., Gómez-Polo M., Barmak A.B. et al. Accuracy of implant scans recorded using tablet-based photogrammetry and noncalibrated implant scan body systems. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2026. P. S0022-3913. DOI: 10.1016/j.prosdent.2026.03.034

24. Nulty A.B. AI-Driven aesthetic rehabilitation in edentulous arches: advancing symmetry and smile design through medit smartX and scan ladder. *Journal of Aesthetic Medicine*. 2025. Vol. 1(1). P. 4. DOI: 10.3390/jaestheticmed1010004

25. Nulty A.B., Kelly C., Ambridge O. et al. In Vitro Comparison of Trueness and Precision of an AI-Driven Real-Time Library Matching Protocol with Irregular Geometry Scan Bodies for Full-Arch Implant Scanning. *Dentistry Journal*. 2025. Vol. 13(11). P. 533. DOI: 10.3390/dj13110533

26. Revilla-León M., Cascos R., Barmak A. et al. Influence of an artificial intelligence-based application on the accuracy of complete arch implant scans recorded by using an intraoral scanner. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2025. Vol. 134(6). P. 2471-2481. DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.02.010

References:

1. Chen, H.T., Feng, S.W., Vo, T.T.T., Wang, Y.L., Fan, F.Y., & Lee, I.T. (2026). Cumulative Error in Digital Workflows for Full-Arch Implant Rehabilitation: A Narrative Review. *Bioengineering*, 13(2), 219. DOI: 10.3390/bioengineering13020219

2. Pan, Y., Tsoi, J.K. H., Lam, W.Y., Zhao, K., & Pow, E.H. (2022). The cumulative effect of error in the digital workflow for complete-arch implant-supported frameworks: an in vitro study. *Clinical Oral Implants Research*, 33(9), 886-899. DOI: 10.1111/clr.13968 Digital Object Identifier (DOI)

3. Zingari, F., Meglioli, M., Gallo, F., Macaluso, G. M., Tagliaferri, S., Toffoli, A., & Lumetti, S. (2023). Predictability of intraoral scanner error for full-arch implant-supported rehabilitation. *Clinical Oral Investigations*, 27(7), 3895-3905. DOI: 10.1007/s00784-023-05011-4
4. Revilla-León, M., Barmak, A.B., & Prasad, S. (2026). Accuracy of complete arch implant scans using nonsplinting techniques: A systematic review and meta-analysis. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 136(1), e102-e138. DOI: 10.1016/j.prosdent.2026.02.034
5. Revilla-León, M., Ghunaim, D., Barmak, A.B., Afshari, F.S., Fang, Q., & Prasad, S. (2026). A systematic review of the accuracy of complete arch implant scans recorded by using noncalibrated splinting or implant scan body techniques. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of prosthetic dentistry*, 135(6), 1058-1071. DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.11.018
6. Revilla-León, M., Ghunaim, D., Barmak, A.B., Afshari, F. ., Fang, Q., & Prasad, S. (2026) Accuracy of complete arch implant scans recorded by using calibrated scanning techniques: A systematic review and meta-analysis. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of prosthetic dentistry*, 135(4), e28-e42. DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.11.029
7. Prasad, S., Barmak, A.B., & Revilla-León, M. (2026). A systematic review and meta-analysis of the accuracy of complete arch implant scanning techniques performed extraorally: Reverse impression and extraoral photogrammetry methods. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 136(1), e79-e101. DOI: 10.1016/j.prosdent.2026.01.018
8. Rutkūnas, V., Gedrimienė, A., Mischitz, I., Mijiritsky, E., & Huber, S. (2023). EPA consensus project paper: accuracy of photogrammetry devices, intraoral scanners, and conventional techniques for the full-arch implant impressions: a systematic review. *The European journal of prosthodontics and restorative dentistry*, online ahead of print. DOI: 10.1922/EJPRD_2481Rutkunas12
9. Noronha, C. P., de Souza, C.F., dos Santos Oliveira, M.D., da Silva, E.V., Sesma, N., & Mukai, M.K. (2026). Accuracy of Stereophotogrammetry in Implant Scanning Compared to Intraoral Scanning in Completely Edentulous Patients--A Systematic Review and Meta-analysis. *International Journal of Prosthodontics*, 39(3), 397. DOI: 10.11607/ijp.9358
10. Jain, S., Daak, H.A., Someli, L.A., Alamer, A.Y., Apratim, A., Akoor, R. M.A., & Ayoub, M. (2025). Accuracy of stereophotogrammetry technique versus intraoral scanners for complete-arch implant digital impressions: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Dentistry*, 20(1), 34-48. DOI: 10.1055/s-0045-1806935
11. Pozzi, A., Arcuri, L., Carosi, P., Laureti, A., Londono, J., & Wang, H.L. (2025). Photogrammetry Versus Intraoral Scanning in Complete-Arch Digital Implant Impression: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Clinical implant dentistry and related research*, 27(3), e70059. DOI: 10.1111/cid.70059
12. Goncharuk-Khomyn, M.Y., & Tukalo, I.V. (2025). analiz kryteriiv ta pidkhodiv do kilkisnoi otsinky tochnosti reiestratsii polozhennia dentalnykh implantativ iz vykorystanniam tekhnolohii tsyfrovoho vidbytky [Analysis of criteria and approaches used for quantitative assessment of dental implant positions' registration accuracy with the use of digital impression technology]. *Intermedical journal*, (3), 27-37. DOI: 10.32782/2786-7684/2025-3-5 [in Ukrainian]
13. Hyspler, P., Urbanová, P., & Dostalova, T. (2025). Comparison of the reverse scan technique with an intraoral scanner and the traditional impression technique. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 134(6), 2515-2523. DOI: 10.1016/j.prosdent.2024.08.012
14. Chamma-Wedemann, C.N., Sanchez, R.S.L., Pacheco, P.S., Mukai, M.K., Sesma, N., & Silva, E.V.F.D. (2026). Applicability of the reverse scan body technique for the fabrication of implant-supported prostheses: a scoping review. *Brazilian Dental Science*, 29, e4974. DOI: 10.4322/bds.2026.e4974
15. Papaspyridakos, P., Bedrossian, E.A., Ntovas, P., Kudara, Y., Bokhary, A., & Chochlidakis, K. (2023). Reverse scan body: the scan pattern affects the fit of complete-arch prototype prostheses. *Journal of Prosthodontics*, 32(S2), 186-191. DOI: 10.1111/jopr.13772
16. Revilla-León, M., Cascos, R., Barmak, A. B., Kois, J. C., & Gómez-Polo, M. (2026). Accuracy of a complete arch noncalibrated splinting implant scanning technique with a palatal orientation recorded by using different intraoral scanners. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 135(1), 109-117. DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.02.020
17. Giglio, G. D., Giglio, A. B., & Tarnow, D. P. (2024). A paradigm shift using scan bodies to record the position of a complete arch of implants in a digital workflow. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 44(1), 115-126. DOI: 10.11607/prd.6733
18. Lerner, H., Weigl, P., Sader, R., Klein, M., Polack, M.A., & Tuminelli, F.J. (2025). Accuracy of Full-arch Implant Scan with Nexus IOS® Scan Gauges versus Different Conventional Scan bodies: an in Vitro Comparative Study. *Journal of Dentistry*, 106254. DOI: 10.1016/j.jdent.2025.106254
19. Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Drone, M., Barmak, A.B., Kois, J.C., & Pérez-Barquero, J.A. (2025). Accuracy of complete arch implant scans recorded by using intraoral and extraoral photogrammetry systems. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 134(6), 2508-2514. DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.01.041

20. Revilla-León, M., Cascos, R., Barmak, A. B., Koïs, J. C., Pérez-Barquero, J. A., & Gómez-Polo, M. (2026). Accuracy of intraoral photogrammetry and influence of calibrated implant scan body dimensions. *The Journal of prosthetic dentistry*, S0022-3913. DOI: 10.1016/j.prosdent.2026.05.006
21. Revilla-León, M., Guinot-Barona, C., Barmak, A. B., Drone, M., Koïs, J. C., & Pérez-Barquero, J. A. (2026). Comparative accuracy study of three extraoral photogrammetry methods, one intraoral photogrammetry system, and a noncalibrated implant scan body technique. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 136(1), 267-274. DOI: 10.1016/j.prosdent.2026.01.010
22. Santamaría-Laorden, A., Marugán, A. M., Andreu-Vázquez, C., & Orejas-Pérez, J. (2025). Complete arch implant capture using a photogrammetry algorithm and smartphone app: An in vitro study. *Journal of Dentistry*, 105969. DOI: 10.1016/j.jdent.2025.105969
23. Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Barmak, A. B., Koïs, J. C., & Pérez-Barquero, J. A. (2026). Accuracy of implant scans recorded using tablet-based photogrammetry and noncalibrated implant scan body systems. *The Journal of prosthetic dentistry*, S0022-3913. DOI: 10.1016/j.prosdent.2026.03.034
24. Nulty, A. B. (2025). AI-Driven aesthetic rehabilitation in edentulous arches: advancing symmetry and smile design through medit smartX and scan ladder. *Journal of Aesthetic Medicine*, 1(1), 4. DOI: 10.3390/jaestheticmed1010004
25. Nulty, A. B., Kelly, C., Ambridge, O., Ambridge, M., Ferguson, R., & Hoffer, A. (2025). In Vitro Comparison of Trueness and Precision of an AI-Driven Real-Time Library Matching Protocol with Irregular Geometry Scan Bodies for Full-Arch Implant Scanning. *Dentistry Journal*, 13(11), 533. DOI: 10.3390/dj13110533
26. Revilla-León, M., Cascos, R., Barmak, A. B., Koïs, J. C., & Gómez-Polo, M. (2025). Influence of an artificial intelligence-based application on the accuracy of complete arch implant scans recorded by using an intraoral scanner. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 134(6), 2471-2481. DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.02.010
- Дата першого надходження рукопису до видання:
17.06.2026
Дата прийнятого до друку рукопису
після рецензування: 15.07.2026
Дата публікації: 17.08.2026