

УДК 616.314.1

DOI <https://doi.org/10.11603/2311-9624.2026.3.16572>**М. Ю. Гончарук-Хомин**ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7482-3881>**І. М. Богдан**ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0948-5548>**М. М. Бойчук**ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9735-3651>**С. І. Крічфалушій**ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2469-0347>

Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет»

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЦИФРОВОЇ РЕЄСТРАЦІЇ СТАТИЧНИХ ОКЛЮЗІЙНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ ПІД ЧАС ІНТРАОРАЛЬНОГО СКАНУВАННЯ*M. Y. Goncharuk-Khomyn, I. M. Bohdan, M. M. Boichuk, S. I. Krichfalushii*

State High Educational Institution "Uzhhorod National University"

EFFECTIVENESS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED SOFTWARE FOR OPTIMIZING DIGITAL REGISTRATION OF STATIC OCCLUSAL RELATIONSHIPS DURING INTRAORAL SCANNING**ІНФОРМАЦІЯ**Електронна адреса
для листування:
myroslav.goncharuk-khomyn@uzhnu.edu.uaДата першого надходження
статті до видання: 13.08.2026Дата прийняття статті до
друку після рецензування:
20.09.2026Дата публікації (оприлюднен-
ня) статті: 16.10.2026Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
(CC BY 4.0)**Ключові слова:** інтраоральне
сканування, оклюзія, оклюзій-
ні контакти, стоматологічна
реабілітація, штучний інтеле-
кт, ортопедичне лікування.**АНОТАЦІЯ**

Коректна реєстрація статичних оклюзійних співвідношень верхньої та нижньої щелеп є актуальною проблемою сучасної цифрової стоматології, оскільки передбачає потребу у врахуванні не тільки вже наявних змін у структурі оклюзійної схеми, які повинні бути компенсовані, а й фізіологічних параметрів мікрорухомості зубів через податливість комплексу тканин пародонта, вираженість котрих на індивідуальному рівні не може бути точно передбачена в структурі алгоритмів процесингу програмного забезпечення, асоційованого із системою інтраорального сканування.

Мета дослідження – оцінити практичну ефективність застосування програмного забезпечення на основі штучного інтелекту для мінімізації ефекту виникнення оклюзійних колізій за суміщення інтраоральних сканів у процесі реалізації цифрового протоколу стоматологічної реабілітації.**Матеріали та методи.** Під час дослідження було проведено порівняння кількості оклюзійних колізій (графічних пенетрацій), відмічених на суміщених 64 парах інтраоральних сканів верхньої та нижньої щелеп, статичні оклюзійні співвідношення між котрими були зареєстровані в програмному забезпеченні використовуваної системи сканування без залучення додаткових корекційних функцій (контрольна група), а також у випадку оптимізації таких у структурі програмного забезпечення, яке працює на основі штучного інтелекту (досліджувана група). Усі скани були отримані системою інтраорального сканування Medit i500.

Результати. Під час опрацювання пар інтраоральних сканів та вихідних цифрових реєстратів прикусу в програмному забезпеченні, яке функціонує на основі штучного інтелекту, сумарна кількість оклюзійних колізій була меншою, ніж під час опрацювання таких у структурі оригінального програмного забезпечення системи інтраорального сканування, різниця між ними була статистично підтвердженою ($p < 0,05$). Після опрацювання сканів у ШІ-базованому програмному забезпеченні BiteFinder різниця кількості оклюзійних колізій у випадках наявності та відсутності дефектів зубного ряду різної протяжності та локалізації та/або наявності ділянок препарування зубів різної кількості та локалізації не була статистично підтвердженою ($p > 0,05$).

Висновки. Застосування програмного забезпечення на основі штучного інтелекту для оптимізації статичних оклюзійних співвідношень за даними інтраорального сканування сприяло статистично значущому зменшенню кількості оклюзійних інтерференцій (графічних penetрацій) порівняно з результатами, отриманими виключно в середовищі програмного забезпечення системи інтраорального сканера. Водночас кількість оклюзійних інтерференцій не може розглядатися як прямий еквівалент показників правдивості та прецизійності відтворення міжоклюзійних співвідношень. З огляду на це оклюзійні інтерференції доцільно розглядати як додатковий, клінічно орієнтований критерій оцінки результатів цифрової реєстрації прикусу, який доповнює показники правдивості та прецизійності, але не замінює їх.

INFORMATION

Email address
for correspondence:
myroslav.goncharuk-khomyn@
uzhnu.edu.ua

Received: 13.08.2026
Accepted: 20.09.2026
Published: 16.10.2026

Key words: intraoral scanning,
occlusion, occlusal contacts,
dental rehabilitation, artificial
intelligence, prosthetic
treatment.

ABSTRACT

Accurate registration of static occlusal relationships between the maxilla and mandible remains relevant challenge in modern digital dentistry. This is due to the need to account not only for existing alterations in the occlusal scheme that require compensation, but also for the physiological parameters of tooth micromobility resulting from the resilience of the periodontal tissue complex. Magnitude of such mobility at the individual level cannot be precisely predicted within the processing algorithms of software associated with intraoral scanning systems.

Aim of the study. To evaluate the practical effectiveness of artificial intelligence-based software in minimizing effect of occlusal collisions while articulating intraoral scans within a digital dental rehabilitation protocol.

Research materials and methods. The study compared the number of occlusal collisions (graphical interpenetrations) identified in 64 pairs of aligned intraoral scans of maxilla and mandible. In the control group static occlusal relationships were registered within the original software of the scanning system without the use of additional correction functions. In the study group occlusal relationships were optimized using software operating on artificial intelligence algorithms. All scans were obtained using the Medit i500 intraoral scanning system.

Results. Processing of intraoral scan pairs and initial digital bite registrations using artificial intelligence-based software resulted in lower total number of occlusal collisions compared to processing scans within the original intraoral scanning system software; difference in collisions amount between two approaches was statistically significant ($p < 0,05$). After processing the scans within the BiteFinder software differences in the number of occlusal collisions in cases with and without dental arch defects of varying extent and localization, and/or with varying numbers and locations of prepared teeth, were not statistically significant ($p > 0,05$).

Conclusions. Application of artificial intelligence-based software for the optimization of static occlusal relationships based on intraoral scanning data contributed to statistically significant reduction in the number of occlusal interferences (graphical interpenetrations) compared to results obtained solely within the original intraoral scanning system software environment. At the same time, the number of occlusal interferences cannot be regarded as a direct equivalent of trueness and precision indicators in reproducing interocclusal relationships. Therefore, occlusal interferences should be considered an additional, clinically oriented criterion for evaluating the results of digital bite registration, which is complementing but not replacing trueness and precision metrics.

Вступ. Доступність технології інтраорального сканування в клінічній стоматологічній практиці розширила можливості для впровадження цифрових протоколів ортопедичної реабілітації конструкціями з опорою як на власних зубах, так і на дентальних імплантатах [1, 2, 3, 4]. За даними низки цільових систематичних оглядів, відтворюваність стану та положення опор у структурі цифрових відбитків є не менш точним, аніж в структурі еластомерних, хоча правдивість та прецизійність інтраоральних сканів залежить від впливу значної кількості факторів, асоційованих як безпосередньо із вихідними умовами клінічної ситуації, так і з досвідом лікаря щодо застосовуваної технології [4, 5, 6, 7]. При цьому похибки, які виникли під час хоча б одного з етапів цифрового протоколу ортопедичної реабілітації, надалі можуть акумулюватися та пропагуватися, компрометуючи точність виготовлення й посадки протетичних конструкцій, а також їх адаптації до наявної оклюзійної схеми чи щодо коректності зміни такої під час лікування [8, 9].

Для оптимізації роботи із цифровими даними під час стоматологічного лікування передбачено низку варіантів програмного забезпечення, яке функціонує, послугуючись обчислювальними можливостями штучного інтелекту (ШІ) [10, 11, 12]. Базовані на основі принципів машинного навчання програми сприяють автоматизованій сегментації результатів конусно-променевої комп'ютерної томографії та інтраорального сканування, ранньому виявленню стоматологічних патологій на двомірних та тримірних наборах даних, детекції критичних девіацій, котрі могли мати місце в процесі обробки цифрових дизайнів конструкцій протезів та шаблонів, оптимізації процесу прийняття клінічних рішень під час комплексної реабілітації [10, 11, 12].

Коректна реєстрація статичних оклюзійних співвідношень верхньої та нижньої щелеп є актуальною проблемою сучасної цифрової стоматології, оскільки передбачає потребу у врахуванні не тільки вже наявних змін у структурі

оклюзійної схеми, які повинні бути компенсовані, а й фізіологічних параметрів мікрорухомості зубів через податливість комплексу тканин пародонта, вираженість котрих на індивідуальному рівні не може бути точно передбачена в структурі алгоритмів процесингу програмного забезпечення, асоційованого із системою інтраорального сканування [13, 14].

Крім того, відтворюваність фактичних статичних оклюзійних співвідношень залежить від коректності сканування зубних рядів верхньої та нижньої щелеп, повторюваності пацієнтом міжоклюзійних патернів контакту в стані звичної оклюзії, сили накушування, а також від факту реалізації належного підходу до отримання цифрового реєстрату прикусу з урахуванням специфіки функціонування апаратної та програмної складових системи інтраорального сканування [13, 14]. У спробі вирішення частини вищезазначених аспектів, а також із метою оптимізації процесу реєстрації статичних оклюзійних співвідношень незалежно від використовуваної системи сканування було розроблено варіант ШІ-базованого програмного забезпечення, ефективність котрого продовжує уточнюватися в структурі клінічних та експериментальних досліджень [15, 16, 17, 18]. Водночас досі дані щодо результатів застосування цього програмного забезпечення не були належним чином систематизовані й узагальнені, що дало змогу сформулювати хоча б проміжні висновки на основі наявних доказів, оцінивши його прикладну значущість у клінічній стоматологічній практиці.

Мета дослідження – оцінити практичну ефективність застосування програмного забезпечення на основі штучного інтелекту для оптимізації статичних оклюзійних співвідношень за результатами внутрішньоротового сканування в процесі реалізації цифрового протоколу стоматологічної реабілітації.

Матеріали та методи дослідження. Під час дослідження було проведено порівняння кількості оклюзійних колізій (графічних пенетрацій), відмічених на суміщених 64 парах

інтраоральних сканів верхньої та нижньої щелеп, статичні оклюзійні співвідношення між котрими були зареєстровані в програмному забезпеченні використовуваної системи сканування без залучення додаткових корекційних функцій (контрольна група), а також у випадку оптимізації таких у структурі програмного забезпечення, яке працювало на основі штучного інтелекту (досліджувана група). Усі скани були отримані системою інтраорального сканування Medit i500 (Medit Corp., Сеул, Південна Корея).

Відбір пар сканів проводився рандомізовано з пулу зібраних під час клінічної практики й експериментальних досліджень першого автора (М. Г.-Х.) з подальшою перевіркою їх відповідності щодо критеріїв наявності достатньої кількості одиниць зубного ряду для забезпечення стабільної висоти прикусу та програмно підтвердженого факту завершеності реєстрації статичних оклюзійних співвідношень. У разі невідповідності зазначеному критерію рандомізовано відібрана пара сканів вилучалась із досліджуваної когорти з її заміщенням новою рандомізовано відібраною парою сканів, які відповідали вищезазначеним критеріям.

Перед проведенням аналітичного етапу дослідження, а також перед опрацюванням пар внутрішньоротових сканів у програмному забезпеченні, яке функціонує на основі штучного інтелекту, усі скани були анонімізовані з повним виключенням можливості встановлення особи пацієнта за елементами найменування скану та метаданими опрацьованих файлів.

Категоризація відібраних 64 пар сканів проводилася ретроспективно за такими параметрами: 1) наявність / відсутність дефектів зубного ряду різної протяжності та локалізації та/або наявність ділянок препарування зубів різної кількості та локалізації; 2) наявність / відсутність дистально необмежених дефектів зубного ряду протяжністю понад два зуби та/або ділянок препарування два зуби в дистальних ділянках щелеп із відсутністю дистальної опори, яка забезпечувала стабілізацію висоти прикусу; 3) протяжність, локалізація та розподіл цифрових реєстратів статичних оклюзійних співвідношень, отриманих під час виконання процедури інтраорального сканування. Ретроспективна категоризація відібраних сканів проводилася для встановлення відмінностей між ними з урахуванням вищезазначених категорій розподілу з порівнянням кількості оклюзійних інтерференцій, відмічених в умовах суміщення цифрових моделей у програмному забезпеченні системи інтраорального сканування, а також у структурі програмного забезпечення, яке працює на основі штучного інтелекту.

Для жодної з відібраних пар сканів не використовувалася функція корекції (оптимізації) оклюзійних співвідношень, передбачена в структурі програмного забезпечення Medit Link (Medit Corp., Сеул, Південна Корея) (рис. 1).

Оптимізація статичних оклюзійних співвідношень анонімізованих пар інтраоральних сканів із використанням можливостей штучного інтелекту проводилася в програмному забезпеченні Bite-Finder (Bite-Finder AG, Базель,



Рис. 1. Виключена функція оптимізації / компенсації оклюзійних співвідношень у програмному забезпеченні Medit Link

Швейцарія) [19]. У структуру програмного забезпечення імпортували цифрові скани верхньої та нижньої щелеп, а також оригінально отримані цифрові реєстри статичних оклюзійних співвідношень (рис. 2).

Кількість оклюзійних колізій як випадків феномену графічних penetрацій тримірних об'єктів інтраоральних сканів обраховували мануально на кожній парі сканів за результатами проєкційного зворотного позиціонування скану верхньої щелепи (внутрішньою поверхнею полігональної сітки до оператора) та візуальної ідентифікації ділянок penetрації оператором із 7-річним досвідом використання різних систем інтраорального сканування (рис. 3).

Статистичну обробку даних здійснювали у два етапи: на етапі попередньої підготовки проводили структурування та верифікацію масиву даних у середовищі Microsoft Excel 2021 (Microsoft Office 2021, Microsoft, США); подальший

інферентний аналіз виконували з використанням пакета XLSTAT (Addinsoft Inc., Нью-Йорк, США), інтегрованого як надбудова до Microsoft Excel 2021 (Microsoft Office 2021, Microsoft, США), що дало змогу реалізувати багатофакторні обчислювальні процедури й оцінку статистичної значущості отриманих результатів.

Результати досліджень та їх обговорення. Відповідно до застосовуваної ретроспективної категоризації випадків інтраорального сканування 27 пар інтраоральних сканів (42,19%) репрезентували клінічні ситуації з відсутністю дистально необмежених дефектів зубного ряду протяжністю понад два зуби або ж ділянок препарування два зуби в дистальних ділянках щелеп із відсутністю дистальної опори, яка забезпечувала стабілізацію висоти прикусу, тоді як 37 пар (57,81%) – клінічні ситуації без вищезазначених умов.

Під час опрацювання пар інтраоральних сканів у програмному забезпеченні системи



Рис. 2. Інтерфейс програмного забезпечення BiteFinder (випадок із клінічної практики Гончарука-Хомина М. Ю.)

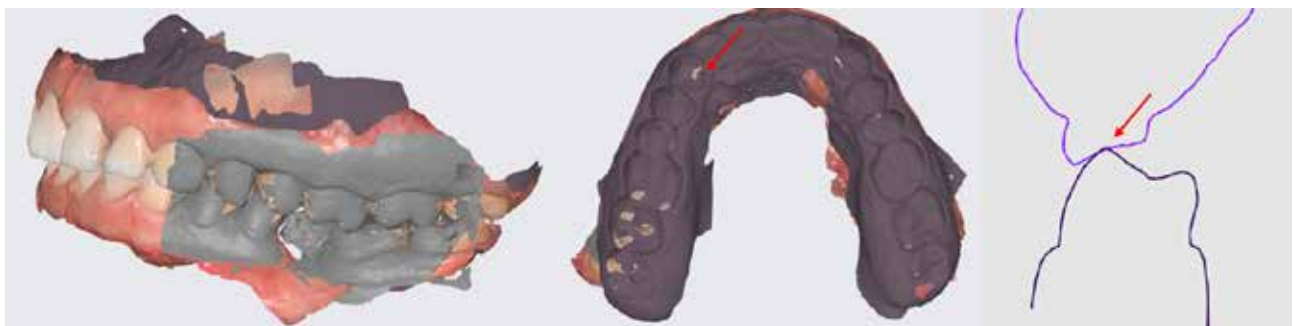


Рис. 3. Послідовність аналізу оклюзійних графічних колізій, реалізованих у програмному забезпеченні використовуваної системи інтраорального сканування

інтраорального сканування з реєстрацією статичних міжоклюзійних співвідношень між ними кількість оклюзійних колізій у випадках дистально необмежених дефектів зубного ряду протяжністю понад два зуби або ж ділянок препарування понад два зуби в дистальних ділянках щелеп була статистично вищою, ніж за відсутності цих умов ($p < 0,05$).

Під час опрацювання пар інтраоральних сканів та вихідних цифрових реєстратів прикусу в програмному забезпеченні, яке функціонує на основі штучного інтелекту, сумарна кількість оклюзійних колізій була меншою, ніж в разі опрацювання таких у структурі оригінального програмного забезпечення системи інтраорального сканування, різниця між котрими була статистично підтвердженою ($p = 0,02$) (рис. 4).

Після опрацювання сканів у програмному забезпеченні BiteFinder різниця кількості оклюзійних колізій у випадках наявності та відсутності дефектів зубного ряду різної протяжності та локалізації та/або наявності ділянок препарування зубів різної кількості та локалізації не була статистично підтвердженою ($p > 0,05$). Аналогічно значущість статистичної різниці не вдалося встановити щодо відмінностей кількості оклюзійних колізій у клінічних ситуаціях

із відсутністю та наявністю дистально необмежених дефектів зубного ряду протяжністю понад два зуби або ж ділянок препарування понад два зуби в дистальних ділянках щелеп із відсутністю дистальної опори за умов опрацювання пар сканів в ШІ-базованому програмному забезпеченні ($p > 0,05$) (рис. 5).

Встановлені характеристики протяжності, локалізації та розподілу цифрових реєстратів статичних оклюзійних співвідношень, отриманих під час виконання процедури інтраорального сканування, не демонстрували жодних специфічних залежностей та відрізнялися з урахуванням особливостей клінічних ситуацій, хоча загалом більша кількість реєстратів була отримана в проєкції молярів та премолярів, які за наявності дефекту зубного ряду були суміжними до такого; протяжність цифрових реєстратів прикусу варіювала в межах вестибулярних поверхонь 2,5–4,5 зуба.

Проведений огляд цільових досліджень, присвячених оцінці застосування програмного забезпечення на основі штучного інтелекту для оптимізації статистичних оклюзійних співвідношень, за даними інтраорального сканування виявив, що такі представлені переважно експериментальними апробаціями цього підходу

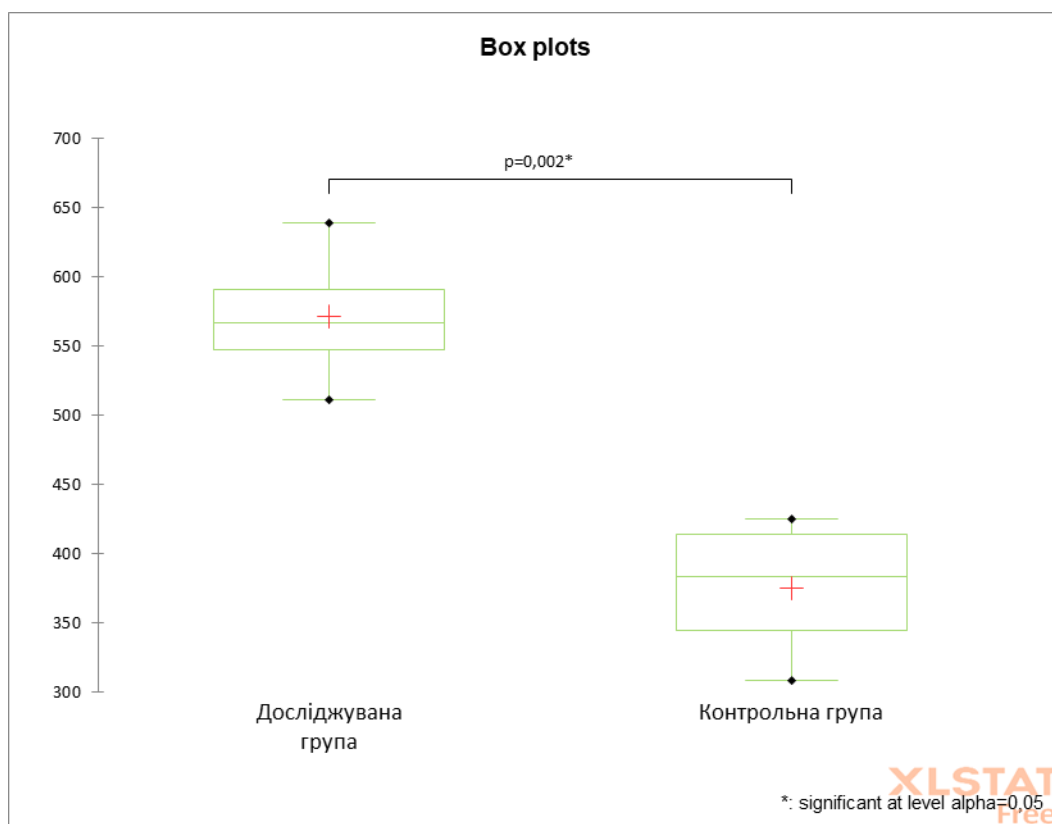


Рис. 4. Порівняння сумарної кількості оклюзійних колізій, зареєстрованих у досліджуваній та контрольній групах

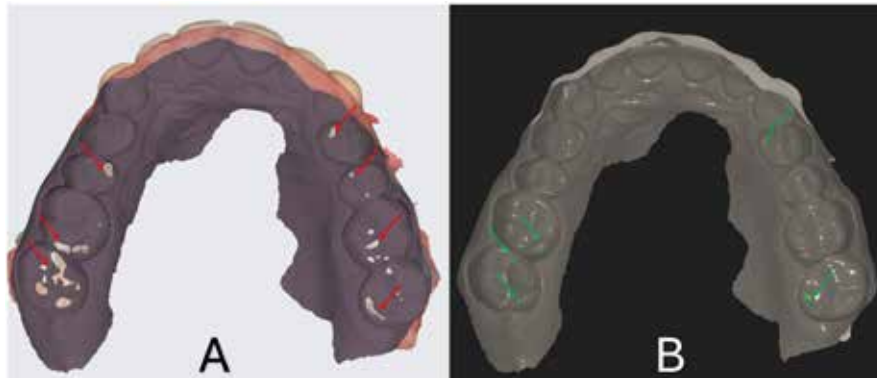


Рис. 5. Відмінності оклюзійних графічних колізій того самого пацієнта візуалізовані в програмному забезпеченні інтраорального сканера (А) та програмному забезпеченні, яке функціонує на основі штучного інтелекту для оптимізації статичних оклюзійних співвідношень (В) (клінічний випадок пацієнта без наявних дефектів зубних рядів із практики Гончарука-Хомина М. Ю.)

в лабораторних умовах. Використовуваний алгоритм пошуку дав змогу виявити лише поодинокі клінічні дослідження, які відображають досвід практичної застосовуваності цільового програмного забезпечення, однак такий результат може бути пов'язаний з особливостями реалізованої пошукової стратегії. У цьому дослідженні було проведено оцінку застосування програмного забезпечення на основі штучного інтелекту для оптимізації статичних оклюзійних співвідношень за результатами внутрішньоротового сканування в процесі реалізації цифрового протоколу стоматологічної реабілітації на реальних клінічних випадках.

У попередньому клінічному порівняльному дослідженні Ntovas P. та співавторів (2025) було продемонстровано, що застосування BiteFinder сприяло ідентифікації максимальної кількості істиннопозитивних ділянок контакту за використання як референсу картування ділянок контактів артикуляційним папером незалежно від факту попередньої артикуляції чи корекції сканів у межах програмного забезпечення інтраорального сканера [19]. Також III-орієнтована оптимізація оклюзійних співвідношень сприяла зменшенню кількості хибнопозитивних контактів порівняно з кількістю верифікованих за даними суміщення в програмному забезпеченні інтраорального сканера з та без реалізації функції корекції співвідношень у ньому [19].

При цьому варто зазначити, що кількість істиннопозитивних контактів з реалізацією функції корекції в програмному забезпеченні сканера була вищою, ніж без реалізації такої, проте водночас була і вищою кількістю хибнопозитивних контактів. Дані, отримані Ntovas P. та колегами (2025), тотожні даним, отриманим у цьому дослідженні, попри відмінності в методології таких. Під час проведеної апробації було

відмічено зменшення кількості оклюзійних колізій за використання програмного забезпечення на основі штучного інтелекту порівняно з кількістю відмічених у програмному забезпеченні системи інтраорального сканування. За аналогічного підходу Ntovas P. та співавтори відмітили зменшення кількості хибнопозитивних контактів, частина з котрих і є випадками оклюзійних колізій [19].

В експериментальному дослідженні Revilla-Leon M. та колег (2025) було відмічено, що продовжуваність сканів загалом є фактором впливу на відтворюваність міжколюзійних співвідношень як за їх реєстрації з використанням програмного забезпечення сканерів, так і за реєстрації із залученням програмного забезпечення на основі штучного інтелекту [20].

Наявність повного скану з білатеральною реєстрацією прикусу характеризувалося вищим рівнем прецизійності, ніж аналогічні маніпуляції, проведені на часткових (половинних) сканах, а правдивість відтворюваності цифрового реєстрату прикусу також залежала і від використовуваного апарату інтраорального сканера (Primescan демонстрував вищі рівні правдивості, ніж i700 та Aoralscan3) [20]. Водночас під час порівняння результатів програмного забезпечення (ПЗ) систем сканерів та на основі штучного інтелекту, не асоційованого зі сканером, ПЗ систем інтраорального сканування продемонструвало вищі показники правдивості та прецизійності щодо відтворення істинного положення максимального фісурно-бугоркового контакту (лінійні відхилення в діапазоні 0–60 мкм порівняно з діапазоном 0–125 мкм, характерним для III-базованого ПЗ) [20]. Проте в умовах половинних сканів програмне забезпечення інтраоральних сканерів забезпечувало нижчий рівень відхилень відтворюваності міжколюзійних

співвідношень, тоді як ШІ-базоване програмне забезпечення сприяло досягненню вищих рівнів точності саме на цільнодугових сканах щелеп [20]. У цьому дослідженні не проводилося визначення параметрів показників правдивості та прецизійності цифрових реєстратів між-оклюзійних співвідношень, а характеристики протяжності, локалізації та розподілу цифрових реєстратів статичних оклюзійних співвідношень, отриманих під час виконання процедури інтраорального сканування, не демонстрували жодних специфічних залежностей та відрізнялися з урахуванням особливостей клінічних ситуацій. Проте, враховуючи, що в дослідженні Revilla-Leon M. та колег було отримано результати для системи сканування i700, у подальшому доцільним є апробації запропонованої авторами методології і для інших, у тому числі і Medit i500, яка використовувалася в цьому дослідженні.

В іншому дослідженні Revilla-Leon M. було продемонстровано, що ефективність програмного забезпечення на основі штучного інтелекту для оптимізації статичних оклюзійних співвідношень за даними інтраорального сканування залежить від того, у якій системі інтраорального сканування первинно було проведено артикуляції цифрових моделей [17, 18]. Зокрема, BiteFinder сприяв покращенню правдивості відтворених співвідношень за умов, якщо первинно скани були артикульовані в цифровому середовищі iTero та PrimeScan, однак водночас провокував погіршення правдивості за умов, якщо первинна артикуляція сканів проводилася в цифровому середовищі TRIOS 4 and i700 [17, 18]. Загальна тенденція, виявлена дослідниками, була такою: програмне забезпечення на основі ШІ характеризується нижчими показниками правдивості та прецизійності відтвореності між-оклюзійних співвідношень у разі обробки попередньо неартикульованих сканів порівняно з показниками, характерними після процесингу сканів у структурі ПЗ систем інтраорального сканування та після процесингу за двоетапним протоколом (спочатку шляхом їх артикуляції в ПЗ системі інтраорального сканування, а вже після – у ШІ-базованому програмному забезпеченні) [18]. У проведеному нами дослідженні було фактично реалізовано етап, тотожний такому в дослідженні Revilla-Leon M., адже оптимізація оклюзійних співвідношень у програмному забезпеченні на основі штучного інтелекту проводилася з урахуванням вихідного отриманого байт-реєстрату, що, очевидно, і сприяло зменшенню кількості оклюзійних колізій як феномену графічної взаємопенетрації тримірних об'єктів. Водночас перспективним для подальших досліджень є вивчення змін оклюзійних колізій в умовах, коли обробка

вихідних сканів верхньої та нижньої щелеп у програмному забезпеченні на основі штучного інтелекту проводиться без попередньо отриманого в оригінальному програмному забезпеченні цифрового реєстрату прикусу.

Крім того, в іншому лабораторному дослідженні було відмічено, що попередня артикуляція і корекція сканів у програмному забезпеченні системи інтраорального сканування сприяє вищому досягненню показників правдивості та прецизійності, ніж відсутність такої корекції, і ці показники не відрізняються від характерних для цільового ШІ-базованого програмного забезпечення щодо відтвореності оклюзійних співвідношень [17]. Для об'єктивізації відмінностей варто зазначити, що середні значення відмінностей між-оклюзійних співвідношень у випадках суміщення попередньо неартикульованих сканів у ШІ-базованому програмному забезпеченні становили 194 ± 46 мкм, у випадках корекції в програмному забезпеченні інтраорального сканера – 190 ± 31 мкм, за відсутності корекції в програмному забезпеченні інтраорального сканера – 230 ± 25 , без корекції в програмному забезпеченні інтраорального сканера під час оптимізації в структурі ШІ-базованого програмного забезпечення – 185 ± 109 , за попередньої корекції в програмному забезпеченні інтраорального сканера та після оптимізації в структурі ШІ-базованому програмному забезпеченні – 218 ± 95 мкм [17]. Загалом програмне забезпечення на основі ШІ продемонструвало кращі перспективи в оптимізації оклюзійних співвідношень інтраоральних сканів, які попередньо не були ні артикульовані, ні кориговані в програмному забезпеченні інтраорального сканера, проте така ситуація видається мало-ймовірною у клінічній практиці. Водночас покращення правдивості також відмічалось щодо сканів, некоригованих у програмному забезпеченні, однак показник прецизійності відтвореності таких перевищував 100 мкм [17]. У проведеному дослідженні застосування програмного забезпечення на основі штучного інтелекту сприяло статистично значущому зменшенню кількості оклюзійних інтерференцій, проте необхідно зазначити, що цей ефект частково міг бути забезпечений завдяки тому, що опрацювання проводилося на основі як сканів верхньої та нижньої щелеп, так і первинно отриманого цифрового реєстрату прикусу під час вихідного сканування. За відсутності первинного цифрового реєстрату прикусу наслідки опрацювання цифрових моделей щелеп можуть бути відмінними, проте для їх уточнення доцільним є проведення подальших досліджень.

Підсумовуючи отримані результати, можна резюмувати, що застосування програмного

забезпечення на основі штучного інтелекту асоціюється зі статистично значущим зменшенням кількості оклюзійних інтерференцій порівняно з обробкою сканів лише в середовищі програмного забезпечення системи інтраорального сканування. При цьому вплив клінічних факторів, зокрема наявності дистально необмежених дефектів зубного ряду або протяжних ділянок препарування без дистальної опори, втрачає статистичну значущість після ШІ-оптимізації, що свідчить про певну алгоритмічну стабілізацію цифрових оклюзійних співвідношень.

Разом із тим отримані результати слід інтерпретувати з урахуванням того, що кількість оклюзійних колізій не є прямим показником правдивості чи прецизійності відтворення міжоклюзійних співвідношень. На відміну від метричних лінійних відхилень, графічні пенетрації відображають радше функціональну узгодженість суміщення тривимірних моделей, ніж абсолютну просторову точність їх позиціонування. Отже, оклюзійні інтерференції доцільно розглядати як клінічно релевантний, але допоміжний індикатор якості цифрової артикуляції.

Аналіз отриманих результатів із даними попередніх клінічних та лабораторних досліджень демонструє, що ефективність ШІ-базованої оптимізації значною мірою залежить від первинного протоколу артикуляції, типу сканера та повноти цифрового реєстрату прикусу. У проведеному дослідженні використання первинно отриманого байт-реєстрату могло посилити ефект зменшення кількості колізій, що обґрунтовує необхідність подальших досліджень із моделюванням альтернативних сценаріїв обробки.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Застосування програмного забезпечення на основі штучного інтелекту для оптимізації статичних оклюзійних співвідношень за даними інтраорального сканування сприяло статистично значущому зменшенню кількості оклюзійних інтерференцій (графічних пенетрацій) порівняно з результатами, отриманими виключно в середовищі програмного забезпечення системи інтраорального сканування. При цьому ефект зниження кількості оклюзійних колізій не залежав від наявності чи відсутності дистально необмежених дефектів зубного ряду та протяжності ділянок препарування, що вказує на потенційну стабілізаційну роль алгоритмів штучного інтелекту в умовах різних клінічних сценаріїв.

Водночас кількість оклюзійних інтерференцій не може розглядатися як прямий еквівалент показників правдивості та прецизійності відтворення міжоклюзійних співвідношень. На відміну від лінійних або просторових метричних відхилень, що кількісно відображають

ступінь відповідності цифрової моделі референтному положенню, оклюзійні колізії характеризують наявність феномену взаємопенетрації тривимірних об'єктів, який має радше функціонально-клінічне, ніж суто метрологічне значення. Таким чином, їх аналіз не дає можливості безпосередньо оцінити параметри точності сканування в класичному розумінні, проте відображає потенційні ризики клінічної некоректності у відтворенні статичних оклюзійних співвідношень у цифровому середовищі. З огляду на це оклюзійні інтерференції доцільно розглядати як додатковий, клінічно орієнтований критерій оцінки результатів цифрової реєстрації прикусу, який доповнює показники правдивості та прецизійності, але не замінює їх. Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію аналізу графічних колізій із метричними показниками просторових відхилень для формування комплексного підходу до оцінки ефективності ШІ-базованих алгоритмів у цифровій стоматологічній практиці.

Перспективним є вивчення впливу різних сценаріїв обробки даних, зокрема оптимізації сканів без попередньо сформованого цифрового реєстрату оклюзійних співвідношень, а також різних варіантів щодо параметрів протяжності та локалізації. У подальшому також варто дослідити взаємозв'язок між зменшенням графічних колізій у цифровому середовищі та реальними клінічними показниками адаптації протетичних конструкцій, включно з необхідністю внутрішньоротових корекцій, стабільністю оклюзійних контактів у динаміці та довгостроковими функціональними результатами лікування.

Таким чином, подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію метрологічного, алгоритмічного та клінічного підходів до оцінки цифрових протоколів реєстрації прикусу з метою формування доказової основи для раціонального впровадження ШІ-базованих рішень у щоденну стоматологічну практику.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів, який міг би вплинути на дизайн дослідження, аналіз та інтерпретацію отриманих результатів або підготовку рукопису.

Джерело фінансування. Дослідження виконано без залучення зовнішнього цільового фінансування. Автори не отримували грантової, комерційної чи іншої фінансової підтримки, яка могла б вплинути на проведення дослідження, аналіз отриманих даних або формулювання висновків.

Відповідність нормам біоетики. Дослідження проводилося відповідно до загальноприйнятих принципів біоетики, положень

Гельсінської декларації та чинних вимог щодо проведення біомедичних досліджень і захисту конфіденційності інформації.

Для аналізу використовували цифрові дані інтраорального сканування, отримані в межах клінічної стоматологічної практики та деідентифіковані перед початком дослідницького опрацювання. Персональні дані, за якими можна було безпосередньо ідентифікувати пацієнтів, у процесі аналізу та представлення результатів не використовувалися. Додаткові діагностичні або лікувальні втручання, зумовлені суто потребами цього дослідження, не проводилися. Опрацювання цифрових даних здійснювали лише в межах поставленої наукової мети із забезпеченням належного рівня конфіденційності та захисту інформації.

Внесок авторів. М. Ю. Гончарук-Хомин – концептуалізація дослідження, розробка методології, формування дизайну дослідження, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, підготовка первинного варіанта рукопису, наукове редагування й остаточне доопрацювання тексту. І. М. Богдан – систематизація отриманих

результатів, їх аналіз та інтерпретація, критичний перегляд і редагування рукопису. М. М. Бойчук – опрацювання та верифікація цифрових даних, аналіз результатів, підготовка матеріалів дослідження та критичний перегляд рукопису. С. І. Крічфалушій – верифікація та інтерпретація отриманих результатів, підготовка матеріалів дослідження та редагування остаточної версії рукопису.

Усі автори ознайомилися з остаточною версією рукопису, схвалили її та погоджуються нести відповідальність за достовірність, цілісність та коректність представленої роботи.

Використання штучного інтелекту. Програмне забезпечення на основі штучного інтелекту BiteFinder використовувалося безпосередньо як досліджуваний інструмент для оптимізації цифрової реєстрації статичних оклюзійних співвідношень та становило один із ключових об'єктів порівняльного аналізу в межах дизайну цього дослідження. Усі результати, їх інтерпретація та остаточні формулювання були перевірені й затверджені авторами, які несуть повну відповідальність за зміст публікації.

Список літератури

1. Siqueira R., Galli M., Chen Z., Mendonça G. et al. Intraoral scanning reduces procedure time and improves patient comfort in fixed prosthodontics and implant dentistry: a systematic review. *Clinical oral investigations*. 2021. Vol. 25(12). P. 6517–6531. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04157-3>.
2. Vieira F. L., Carnietto M., Cerqueira Filho J. R. et al. Intraoral Scanning Versus Conventional Methods for Obtaining Full-Arch Implant-Supported Prostheses: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15(2). P. 533. <https://doi.org/10.3390/app15020533>.
3. Mangano F., Gandolfi A., Luongo G., Logozzo S. Intraoral scanners in dentistry: a review of the current literature. *BMC oral health*. 2017. Vol. 17(1). P. 149. <https://doi.org/10.1186/s12903-017-0442-x>.
4. Albanchez-Gonzalez M. I., Brinkmann J. C. B., Pelaez-Rico J. et al. Accuracy of digital dental implants impression taking with intraoral scanners compared with conventional impression techniques: A systematic review of in vitro studies. *International journal of environmental research and public health*. 2022. Vol. 19(4). P. 2026. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042026>.
5. Pesce P., Nicolini P., Caponio V. C. A. et al. Accuracy of full-arch intraoral scans versus conventional impression: a systematic review with a meta-analysis and a proposal to standardise the analysis of the accuracy. *Journal of Clinical Medicine*. 2024. Vol. 14(1). P. 71. <https://doi.org/10.3390/jcm14010071>.
6. Ma J., Zhang B., Song H. et al. Accuracy of digital implant impressions obtained using intraoral scanners: A systematic review and meta-analysis of in vivo studies. *International Journal of Implant Dentistry*. 2023. Vol. 9(1). P. 48. <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00517-8>.
7. Joensahakij N., Serichetaphongse P., Chengprapakorn W. The accuracy of conventional versus digital (intraoral scanner or photogrammetry) impression techniques in full-arch implant-supported prostheses: a systematic review. *Evidence-Based Dentistry*. 2024. Vol. 25(4). P. 216–217. <https://doi.org/10.1038/s41432-024-01045-z>.
8. 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. <https://doi.org/10.3390/bioengineering13020219>.
9. Revilla-León M., Aragonese R., Arroyo Valverde E. M. et al. Classification of scanning errors of digital scans recorded by using intraoral scanners. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2025. Vol. 37(6). P. 1363–1371. <https://doi.org/10.1111/jerd.13419>.
10. Putra R. H., Doi C., Yoda N. et al. Current applications and development of artificial intelligence for digital dental radiography. *Dentomaxillofacial Radiology*. 2022. Vol. 51(1). P. 20210197. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20210197>.
11. Najeeb M., Islam S. Artificial intelligence (AI) in restorative dentistry: current trends and future prospects. *BMC Oral Health*. 2022. Vol. 25(1). P. 592. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05989-1>.
12. Azhari A. A., Helal N., Sabri L. M., Abduljawad A. Artificial intelligence (AI) in restorative dentistry: Performance of AI models designed for detection of interproximal carious lesions on primary and permanent dentition. *Digital Health*. 2023. Vol. 9. P. 20552076231216681. <https://doi.org/10.1177/20552076231216681>.
13. Chinam N., Bekkali M., Kallas M., Li J. Virtual occlusal records acquired by using intraoral scanners: A review of factors that influence maxillo-mandibular relationship accuracy. *Journal of Prosthodontics*. 2023. Vol. 32(S2). P. 192–207. <https://doi.org/10.1111/jopr.13787>.
14. Revilla-León M., Barmak A. B., Tohme H. et al. Factors that influence the accuracy of maxillomandibular

relationship at maximum intercuspation acquired by using intraoral scanners: A systematic review. *Journal of dentistry*. 2023. Vol. 138. P. 104718. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104718>.

15. Nusser A. Intraorale Scan-Daten-Korrektur fehlerhafter Bisslagen: Arbeiten mit der Software Bite-Finder. *Quintessenz der Zahntechnik*. 2024. Vol. 50(6). P. 636–642.
16. Kordaß B., Ruge S., Imhoff B. et al. Digital Occlusion and Occlusal Analysis-Definitions and Requirements Position Paper of the Study Group for Oral Physiology and Masticatory Function (DGFD). *Journal of Craniomandibular Function*. 2024. Vol. 16(2). P. 117–132.
17. Revilla-León M., Gómez-Polo M., Barmak A. B. et al. Accuracy of an artificial intelligence-based program for locating the maxillomandibular relationship of scans acquired by using intraoral scanners. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2024. Vol. 134(3). P. 809–817. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.01.023>.
18. Revilla-León M., Fernández-Estevan L., Barmak A. B. et al. Accuracy of maximum intercuspation position located by using four intraoral scanners and an artificial intelligence-based program. *The Journal of Prosthetic*

Dentistry. 2024. Vol. 134(4). P. 1242–1250. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.03.007>.

19. Ntovas P., Vazouras K., Barmak A. B. et al. Influence of artificial intelligence-based registration and occlusal collision correction on the accuracy of occlusal contacts captured at maximum intercuspation position using an intraoral scanner: A clinical comparative study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2025. P. S0022-3913(25)00832-7. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.01.012>.
20. Revilla-León M., Gómez-Polo M., Barmak A. B. et al. Influence of scan extension on the accuracy of maximum intercuspation position recorded by using intraoral scanners or an artificial intelligence-based program. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2025. Vol. 134(6). P. 2524–2533. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.01.012>.
21. Гончарук-Хомин М. Ю., Тукало І. В., Лях А. І., Стойка В. В. Фактори впливу та підходи до оптимізації оцінки міжжюкльзійних співвідношень верхньої та нижньої щелеп із використанням даних інтраорального сканування. *Вісник стоматології*. 2024. № 127(2). С. 107–120. <https://doi.org/10.35220/2078-8916-2024-52-2.17>.

References

1. Siqueira, R., Galli, M., Chen, Z., Mendonça, G., Meirelles, L., Wang, H. L., & Chan, H. L. (2021). Intraoral scanning reduces procedure time and improves patient comfort in fixed prosthodontics and implant dentistry: a systematic review. *Clinical oral investigations*, 25(12), 6517–6531. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04157-3>.
2. Vieira, F. L., Carnietto, M., Cerqueira Filho, J. R., Bordini, E. A., Oliveira, H. F., Pegoraro, T. A., & Santiago Junior, J. F. (2025). Intraoral Scanning Versus Conventional Methods for Obtaining Full-Arch Implant-Supported Prostheses: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Applied Sciences*, 15(2), 533. <https://doi.org/10.3390/app15020533>.
3. Mangano, F., Gandolfi, A., Luongo, G., & Logozzo, S. (2017). Intraoral scanners in dentistry: a review of the current literature. *BMC oral health*, 17(1), 149. <https://doi.org/10.1186/s12903-017-0442-x>.
4. Albalanche-Gonzalez, M. I., Brinkmann, J. C. B., Pelaez-Rico, J., Lopez-Suarez, C., Rodriguez-Alonso, V., & Suarez-Garcia, M. J. (2022). Accuracy of digital dental implants impression taking with intraoral scanners compared with conventional impression techniques: A systematic review of in vitro studies. *International journal of environmental research and public health*, 19(4), 2026. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042026>.
5. Pesce, P., Nicolini, P., Caponio, V. C. A., Zecca, P. A., Canullo, L., Isola, G., ... & Menini, M. (2024). Accuracy of full-arch intraoral scans versus conventional impression: a systematic review with a meta-analysis and a proposal to standardise the analysis of the accuracy. *Journal of Clinical Medicine*, 14(1), 71. <https://doi.org/10.3390/jcm14010071>.
6. Ma, J., Zhang, B., Song, H., Wu, D., & Song, T. (2023). Accuracy of digital implant impressions obtained using intraoral scanners: A systematic review and meta-analysis of in vivo studies. *International Journal of Implant Dentistry*, 9(1), 48. <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00517-8>.
7. Joensahakij, N., Serichetaphongse, P., & Chengprapakorn, W. (2024). The accuracy of conventional versus digital (intraoral scanner or photogrammetry) impression techniques in full-arch implant-supported prostheses: a systematic review. *Evidence-Based Dentistry*. 2024. Vol. 134(4). P. 1242–1250. <https://doi.org/10.1038/s41432-024-01045-z>.
8. 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. <https://doi.org/10.3390/bioengineering13020219>.
9. Revilla-León, M., Aragonese, R., Arroyo Valverde, E. M., Gómez-Polo, M., & Kois, J. C. (2025). Classification of scanning errors of digital scans recorded by using intraoral scanners. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 37(6), 1363–1371. <https://doi.org/10.1111/jerd.13419>.
10. Putra, R. H., Doi, C., Yoda, N., Astuti, E. R., & Sasaki, K. (2022). Current applications and development of artificial intelligence for digital dental radiography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 51(1), 20210197. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20210197>.
11. Najeeb, M., & Islam, S. (2025). Artificial intelligence (AI) in restorative dentistry: current trends and future prospects. *BMC Oral Health*, 25(1), 592. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05989-1>.
12. Azhari, A. A., Helal, N., Sabri, L. M., & Abduljawad, A. (2023). Artificial intelligence (AI) in restorative dentistry: Performance of AI models designed for detection of interproximal carious lesions on primary and permanent dentition. *Digital Health*, 9, 20552076231216681. <https://doi.org/10.1177/20552076231216681>.
13. Chinam, N., Bekkali, M., Kallas, M., & Li, J. (2023). Virtual occlusal records acquired by using intraoral scanners: A review of factors that influence maxillo-mandibular relationship accuracy. *Journal of Prosthodontics*, 32(S2), 192–207. <https://doi.org/10.1111/jopr.13787>.
14. Revilla-León, M., Barmak, A. B., Tohme, H., Yilmaz, B., Kois, J. C., & Gómez-Polo, M. (2023). Factors that influence the accuracy of maxillomandibular relationship at maximum intercuspation acquired by using intraoral scanners: A systematic review. *Journal of dentistry*, 138, 104718. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104718>.
15. Nusser, A. (2024). Intraorale Scan-Daten-Korrektur fehlerhafter Bisslagen: Arbeiten mit der Software Bite-Finder. *Quintessenz der Zahntechnik*, 50(6), 636–642.
16. Kordaß, B., Ruge, S., Imhoff, B., Güth, J. F., Reich, S., Schlenz, M. A., ... & Hugger, A. (2024). Digital Occlusion

- and Occlusal Analysis-Definitions and Requirements Position Paper of the Study Group for Oral Physiology and Masticatory Function (DGFD). *Journal of Craniomandibular Function*, 16(2), 117–132.
17. Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Barmak, A. B., Kois, J. C., & Pérez-Barquero, J. A. (2024). Accuracy of an artificial intelligence-based program for locating the maxillomandibular relationship of scans acquired by using intraoral scanners. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 134(3), 809–817. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.01.023>.
18. Revilla-León, M., Fernández-Estevan, L., Barmak, A. B., Kois, J. C., & Pérez-Barquero, J. A. (2024). Accuracy of maximum intercuspal position located by using four intraoral scanners and an artificial intelligence-based program. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 134(4), 1242–1250. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.03.007>.
19. Ntovas, P., Vazouras, K., Barmak, A. B., Att, W., & Revilla-León, M. (2025). Influence of artificial intelligence-based registration and occlusal collision correction on the accuracy of occlusal contacts captured at maximum intercuspal position using an intraoral scanner: A clinical comparative study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, S0022-3913(25)00832-7. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.10.028>.
20. Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Barmak, A. B., Kois, J. C., & Pérez-Barquero, J. A. (2025). Influence of scan extension on the accuracy of maximum intercuspal position recorded by using intraoral scanners or an artificial intelligence-based program. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 134(6), 2524–2533. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.01.012>.
21. Goncharuk-Khomyn, M. Y., Tukako, I. V., Liakh, A. I., & Stoyka, V. V. (2024). Faktory vplyvu ta pidkhody do optymizatsii otsinky mizhokliuziinykh spivvidnoshen verkhnoi ta nyzhnoi shchelep iz vykorystanniam danykh intraoralnoho skanuvannia [Influential factors and optimization approaches for the assessment of interocclusal relationship between maxilla and mandible with the use of intraoral scanning data]. *Visnyk stomatologii*, 127(2), 107–120. <https://doi.org/10.35220/2078-8916-2024-52-2.17> [in Ukrainian].