



УДК 616.31

DOI <https://doi.org/10.11603/2311-9624.2026.2.16436>

Л. Б. Волохова

ORCID <https://orcid.org/0009-0006-2939-4332>

Dr. Volokhova Medical Center

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ РАННЬОЇ ДІАГНОСТИКИ КАРІЕСУ

L. B. Volokhova

Dr. Volokhova Medical Center

USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR EARLY DIAGNOSIS OF CARIES

ІНФОРМАЦІЯ

Електронна адреса
для листування:
lv@dr-volokhova.com

Стаття надійшла до редакції
19.04.2026

Стаття прийнята 15.05.2026

Статтю опубліковано:
30.05.2026



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
(CC BY 4.0)

Ключові слова: штучний
інтелект, карієс зубів, рання
діагностика, цифрова стомато-
логія, стоматологічні зобра-
ження, глибоке навчання.

АНОТАЦІЯ

Карієс зубів залишається однією з найпоширеніших стоматологічних патологій, а його раннє виявлення є важливою умовою своєчасного застосування профілактичних і малоінвазивних втручань. У зв'язку з розвитком цифрової стоматології зростає інтерес до використання технологій штучного інтелекту для аналізу стоматологічних зображень і підтримки діагностичного процесу.

Мета дослідження – проаналізувати сучасні літературні дані щодо використання штучного інтелекту для раннього виявлення карієсу, визначити його переваги, обмеження та перспективи застосування в клінічній стоматології.

Матеріали та методи. Проведено аналіз сучасних наукових публікацій, індексованих у базах PubMed та Google Scholar. Пошукову стратегію формували на основі клінічних і технологічних блоків ключових слів.

Результати та їх обговорення. За даними сучасних досліджень, інструменти штучного інтелекту демонструють високу діагностичну ефективність у виявленні карієсу, особливо під час аналізу стоматологічних рентгенограм. Найбільш доцільним є їх використання як «другого читача» для підвищення чутливості виявлення ранніх апроксимальних уражень і стандартизації оцінки зображень. Водночас ефективність таких систем залежить від типу карієсу, локалізації ураження, характеристик зображення та особливостей навчальної вибірки. До основних обмежень відноситься ризик хибнонегативних і хибнопозитивних результатів, етичні та правові питання, проблеми конфіденційності даних і висока вартість впровадження.

Висновки. Штучний інтелект є перспективним допоміжним інструментом раннього виявлення карієсу, однак на сучасному етапі не може розглядатися як самостійний засіб встановлення діагнозу і має використовуватися в поєднанні з клінічним досвідом лікаря-стоматолога.

INFORMATION

Email address
for correspondence:
lv@dr-volokhova.com

Received: 19.04.2026
Accepted: 15.05.2026
Published: 30.05.2026

Key words: artificial
intelligence, dental caries, early
diagnosis, digital dentistry,
dental imaging, deep learning

ABSTRACT

Dental caries remains one of the most common dental pathologies, and its early detection is an important prerequisite for the timely use of preventive and minimally invasive interventions. With the development of digital dentistry, growing attention is being paid to the use of artificial intelligence technologies for the analysis of dental images and support of the diagnostic process.

Objective. To analyze current literature data on the use of artificial intelligence for early caries detection and to determine its advantages, limitations, and prospects for application in clinical dentistry.

Materials and methods. An analysis of current scientific publications indexed in PubMed and Google Scholar was conducted. The search strategy was based on clinical and technological blocks of keywords.

Results and discussion. According to current studies, artificial intelligence tools demonstrate high diagnostic effectiveness in caries detection, especially in the analysis of dental radiographs. Their most appropriate use is as a “second reader” to increase the sensitivity of detecting early approximal lesions and to standardize image assessment. At the same time, the effectiveness of such systems depends on the type of caries, lesion localization, image characteristics, and the features of the training dataset. The main limitations include the risk of false-negative and false-positive results, ethical and legal issues, data confidentiality concerns, and the high cost of implementation.

Conclusions. Artificial intelligence is a promising auxiliary tool for early caries detection; however, at the present stage it cannot be considered an independent means of establishing a diagnosis and should be used in combination with the clinical experience of the dentist.

Key words: artificial intelligence, dental caries, early diagnosis, digital dentistry, dental imaging, deep learning.

Вступ. Сучасна парадигма надання стоматологічної допомоги ґрунтується на розумінні того, що здоров'я ротової порожнини є важливою складовою загального здоров'я та благополуччя людини [1]. Карієс зубів залишається однією з найпоширеніших патологій ротової порожнини та має значний клінічний і соціальний тягар [2-3]. Його висока поширеність, схильність до прогресування та ризик розвитку ускладнень зумовлюють необхідність удосконалення підходів до ранньої діагностики [4].

Раннє виявлення каріозних уражень має принципове значення для своєчасного проведення профілактичних і малоінвазивних втручань, збереження твердих тканин зуба та запобігання подальшому поширенню патологічного процесу [5].

У клінічній практиці для діагностики карієсу застосовують візуально-тактильне обстеження, рентгенографічні методи та сучасні засоби цифрової візуалізації [5, 6]. Водночас точність інтерпретації результатів обстеження може залежати від локалізації ураження, стадії процесу, якості зображення та клінічного досвіду лікаря [7]. У зв'язку з цим особливу увагу привертає використання технологій штучного інтелекту (ШІ), які відкривають нові можливості для

автоматизації, стандартизації та об'єктивізації діагностичного процесу [7, 8].

Останніми роками в стоматології активно розвиваються алгоритми машинного та глибокого навчання, призначені для аналізу стоматологічних зображень, виявлення патологічних змін і підтримки клінічного рішення [7]. Найбільший інтерес становить їх застосування для раннього виявлення карієсу на основі аналізу прицільних, bitewing та панорамних рентгенограм [6]. Разом із тим результати досліджень залишаються неоднорідними, а питання клінічної доцільності, точності, відтворюваності та безпечності таких технологій потребують узагальнення.

Мета статті. Проаналізувати сучасні літературні дані щодо використання технологій штучного інтелекту для раннього виявлення карієсу, визначити їхні можливості, переваги, обмеження та перспективи застосування в клінічній стоматології.

Матеріали та методи. Пошук літератури здійснювали в базах PubMed та Google Scholar з використанням логічних операторів AND і OR.

Пошукову стратегію формували на основі клінічних і технологічних блоків ключових слів. До клінічного блоку включали терміни:

«штучний інтелект в стоматології», «рання діагностика карієсу», «карієс зубів», «стоматологічна діагностика», «терапевтична стоматологія», «цифрова стоматологія», «профілактика карієсу», «діагностичні методи в стоматології». Для розширення пошуку і кращого охоплення сучасних публікацій додатково використовували терміни, що описують технологічні аспекти проблеми: “machine learning”, “deep learning”, “convolutional neural network (CNN)”, “dental imaging”, “bitewing radiography”, “panoramic radiography”, “diagnostic accuracy”, “AI-assisted detection”.

Такий підхід дозволив включити до аналізу як клінічно орієнтовані, так і технічно спрямовані дослідження, присвячені застосуванню ШІ для виявлення карієсу.

Результати та їх обговорення. За даними сучасних досліджень, застосування штучного інтелекту в стоматології супроводжується високою діагностичною ефективністю у виявленні карієсу. Зокрема, у систематичному огляді та метааналізі Luke і Rezallah (2025) показано, що точність моделей штучного інтелекту в окремих дослідженнях коливалася від 73,3 % до 98,8 %, причому в низці робіт перевищувала 90 % [9]. У дослідженні Zhang et al. (2024) AI-асистоване виявлення карієсу продемонструвало загальну точність 93,40 %, чутливість 81,31 % та специфічність 95,65 % [10].

Технологічною основою більшості сучасних систем виявлення карієсу є моделі глибокого навчання на основі згорткових нейронних мереж (CNN), які найкраще пристосовані до аналізу візуальних даних [10]. У сучасних дослідженнях використовують як класичні CNN, так і їх удосконалені архітектури, зокрема DCNN, Faster R-CNN і Mask R-CNN [11, 12].

Поряд з цим використання таких технологій супроводжується низкою обмежень, зокрема варіабельністю чутливості залежно від типу карієсу і положення зуба, ризиком алгоритмічних помилок, етичними питаннями, проблемами конфіденційності даних пацієнтів та високою вартістю впровадження [9, 11]. Саме тому сьогодні активно обговорюються питання стандартизації протоколів навчання моделей, зовнішньої валідації, використання мультимодальних даних та інтеграції вдосконалених алгоритмів у клінічну практику.

Разом із тим, саме питання «високої точності» сьогодні є не лише аргументом на користь ШІ, а й предметом активної дискусії [7, 9]. Частина авторів повідомляє про дуже добрі результати для окремих типів уражень і окремих масивів bitewing-знімків, але метааналітичні дані вказують, що в узагальненій вибірці ефективність може бути помірнішою, ніж у найуспішніших одиничних роботах,

а результати стоматологів у реальних умовах не завжди поступають алгоритмам [9]. Отже, предметом сучасної дискусії є не стільки сама можливість використання ШІ для виявлення карієсу, скільки умови, за яких його результати є достатньо надійними для перенесення у клінічну практику.

Окрему увагу дослідники приділяють тому, що переваги ШІ не зводяться лише до формальних діагностичних метрик [11, 13]. Алгоритмічний аналіз може підвищувати стандартизацію оцінки зображень, зменшувати суб'єктивність інтерпретації, пришвидшувати обробку великих масивів даних і підтримувати клінічне рішення в сумнівних випадках. Це особливо важливо для ранніх або маловиражених уражень, де людська оцінка може коливатися залежно від досвіду лікаря, якості знімка та анатомічних особливостей зуба [11, 13]. Крім того, сучасні системи розглядаються як перспективний інструмент для інтеграції в цифрові робочі процеси, телемедичні консультації та навчання лікарів-інтернів [11, 14].

З іншої точки зору існує проблема, пов'язана з тим, що діагностична ефективність ШІ є нестабільною залежно від клінічного контексту. У публікаціях підкреслюється, що чутливість і специфічність алгоритмів змінюються залежно від типу карієсу, локалізації ураження, положення зуба, типу рентгенограми, наявності реставрацій, якості розмітки зображень і характеристик навчальної вибірки [15, 16]. Через це високі результати, отримані на внутрішніх наборах даних, не завжди відтворюються під час зовнішньої валідації, а клінічна «трансляційна готовність» багатьох моделей залишається обмеженою [9, 17].

Так, наявні дані свідчать, що для інструментів ШІ при виявленні карієсу більш характерною проблемою є гіподіагностика окремих типів уражень, ніж виражена гіпердіагностика. Попри високу специфічність (91–95,65 %), середня чутливість у метааналітичних і клінічних дослідженнях становила 76–81,31 %, що вказує на ризик пропуску частини реальних каріозних уражень, особливо залежно від локалізації зуба та типу карієсу [10].

Найбільш перспективними сьогодні вважають системи для аналізу апроксимального карієсу на bitewing-рентгенограмах, де чутливість і специфічність досягають 0,94 і 0,91 відповідно, однак позитивні результати потребують обов'язкової верифікації лікарем через широкую варіабельність PPV (0,15–0,87) [18].

Водночас для окремих клінічно складних сценаріїв, зокрема апроксимального карієсу групи фронтальних зубів і букального карієсу премоларів, чутливість AI може знижуватися приблизно до 10 %, що вказує на високий ризик

гіподіагностики [10]. Використання AI може підвищувати виявлення ранніх початкових каріозних уражень емалі, що супроводжується зростанням хибнопозитивних висновків, тому такі системи доцільно розглядати насамперед як інструмент підтримки клінічного рішення, а не як автономний засіб діагностики [13].

Проте наукові публікації свідчать, що використання систем штучного інтелекту як «другого читача» під час аналізу bitewing-рентгенограм, насамперед для виявлення ранніх апроксимальних каріозних уражень, обмежених емаллю є доцільним. У таких випадках AI здатний підвищувати чутливість виявлення змін, які часто залишаються непоміченими під час первинної візуальної оцінки. За даними Devlin et al. (2021), застосування AI-підтримки підвищило чутливість стоматологів з 44,3 % до 75,8 %, хоча супроводжувалося певним зниженням специфічності [13]. Отже, найбільша клінічна користь AI полягає не в автономному встановленні діагнозу, а в підсиленні уважності лікаря, зменшенні ризику пропуску ранніх уражень та підтримці прийняття клінічного рішення.

На основі вищевикладеного можна зробити висновок, що на сучасному етапі рішення про лікування не може ґрунтуватися лише на висновку системи штучного інтелекту. Це особливо важливо у випадках ранніх початкових каріозних уражень у межах емалі, позитивних знахідок, що потенційно можуть призвести до інвазивного втручання, а також при локалізаціях, для яких діагностична чутливість AI є нестабільною. Тобто, AI доцільно розглядати як інструмент підтримки клінічного рішення, тоді як остаточна інтерпретація результату, оцінка необхідності втручання та вибір лікувальної тактики повинні залишатися за лікарем-стоматологом.

Ще один блок дискусії стосується того, що штучний інтелект у стоматології неможливо оцінювати поза етичним і правовим контекстом. У новіших оглядах прямо наголошується на ризиках алгоритмічного зміщення, непрозорості моделей, нерівності доступу до технологій, проблемах конфіденційності даних пацієнтів та невизначеності щодо відповідальності за клінічне рішення [20]. Для стоматології це особливо важливо, оскільки цифрові інструменти дедалі активніше інтегруються в щоденну практику, але стандарти їх використання ще не є достатньо уніфікованими [19].

Не менш суттєвим практичним обмеженням залишається вартість впровадження таких систем і потреба в якісній цифровій інфраструктурі. Навіть за високих лабораторних показників точності широке клінічне застосування потребує стандартизованих протоколів збору

й розмітки даних, технічної сумісності програмного забезпечення з діагностичним обладнанням, підготовки персоналу та незалежної зовнішньої перевірки моделей. Саме тому низка авторів розглядає найближчу перспективу не як повну заміну клінічного мислення стоматолога, а як розвиток систем підтримки прийняття рішень, здатних посилити, але не підмінити лікаря [11, 12, 17].

У цьому контексті особливий інтерес становить подальший розвиток мультимодальних моделей, які поєднують різні типи зображень, клінічні дані та вдосконалені алгоритми аналізу [21-23]. Саме такі підходи сьогодні розглядаються як один із шляхів підвищення стабільності діагностики та зменшення залежності результатів від окремого формату візуалізації [24-26]. Паралельно активно обговорюється необхідність розробки стандартизованих протоколів навчання моделей, зовнішньої валідації та клінічного тестування в реальних умовах стоматологічної практики [17, 27-29].

Отже, сучасні літературні дані дають підстави розглядати штучний інтелект як перспективний інструмент раннього виявлення карієсу, що може підвищувати об'єктивність, швидкість і відтворюваність діагностики. Однак поряд із очевидними перевагами накопичуються і докази того, що ефективність цих систем є чутливою до методології дослідження, характеристик даних і клінічного середовища. Саме тому подальший розвиток цього напрямку пов'язаний не лише зі створенням точніших алгоритмів, а й із вирішенням етичних, організаційних та стандартизаційних питань, без яких реальна інтеграція ШІ в стоматологічну практику буде неповною.

Висновки. Дослідження показало, що сучасні системи штучного інтелекту демонструють високий потенціал у ранньому виявленні карієсу, особливо як інструменти «другої думки» під час аналізу стоматологічних зображень. Їх застосування може підвищувати чутливість виявлення ранніх уражень, стандартизувати оцінку знімків і підтримувати клінічне рішення лікаря. Водночас варіабельність діагностичних характеристик залежно від типу карієсу, локалізації ураження та умов використання не дозволяє розглядати ШІ як самостійний засіб встановлення діагнозу. На сучасному етапі найбільш обґрунтованим є використання ШІ як допоміжної технології в поєднанні з клінічним досвідом стоматолога.

Перспективи подальших досліджень. Перспективи подальших досліджень полягають у стандартизації протоколів навчання й валідації моделей, створенні більших і більш репрезентативних наборів стоматологічних зображень, використанні мультимодальних даних,

а також у клінічному тестуванні систем штучного інтелекту в реальних умовах практики. Окрему увагу слід приділяти вдосконаленню моделей CNN та інших алгоритмів глибокого

навчання, підвищенню їх відтворюваності, зовнішній валідації та інтеграції в цифрові робочі процеси стоматолога як інструментів підтримки клінічного рішення.

Список літератури

1. *Global oral health status report: Towards universal health coverage for oral health by 2030*. Geneva : World Health Organization, 2022. 120 p. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/364538/9789240061484-eng.pdf?sequence=1>
2. GBD 2021 Antimicrobial Resistance Collaborators. Global burden of bacterial antimicrobial resistance 1990–2021: a systematic analysis with forecasts to 2050. *Lancet*. 2024. Vol. 404(10459). P. 1199–1226. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)01867-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)01867-1).
3. GBD 2021 Diseases and Injuries Collaborators. Global incidence, prevalence, years lived with disability (YLDs), disability-adjusted life-years (DALYs), and healthy life expectancy (HALE) for 371 diseases and injuries in 204 countries and territories and 811 subnational locations, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet*. 2024. Vol. 403(10440). P. 2133–2161. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)00757-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)00757-8).
4. Wolf T. G., Cagetti M. G., Fisher J. M. et al. Non-communicable diseases and oral health: an overview. *Frontiers in Oral Health*. 2021. Vol. 2. P. 725460. DOI: <https://doi.org/10.3389/froh.2021.725460>.
5. Qadeer S., Walter R., Eyüboğlu T. F. et al. A review on non-invasive management of early carious lesions through modern approaches. *Current Oral Health Reports*. 2025. Vol. 12. P. 21. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40496-025-00412-8>.
6. de Magalhães A. A., Santos A. T. Advancements in diagnostic methods and imaging technologies in dentistry: a literature review of emerging approaches. *Journal of Clinical Medicine*. 2025. Vol. 14(4). P. 1277. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm14041277>.
7. Zang X., Luo C., Qiao B., Jin N., Zhao Y., Zhang H. A deep learning model using convolutional neural networks for caries detection and recognition with endoscopes. *Annals of Translational Medicine*. 2022. Vol. 10(24). P. 1369. DOI: <https://doi.org/10.21037/atm-22-5816>.
8. Najeeb M., Islam S. Artificial intelligence (AI) in restorative dentistry: current trends and future prospects. *BMC Oral Health*. 2025. Vol. 25(1). P. 592. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05989-1>.
9. Luke A. M., Rezallah N. N.F. Accuracy of artificial intelligence in caries detection: a systematic review and meta-analysis. *Head & Face Medicine*. 2025. Vol. 21(1). P. 24. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13005-025-00496-8>.
10. Zhang J. W., Fan J., Zhao F. B. et al. Diagnostic accuracy of artificial intelligence-assisted caries detection: a clinical evaluation. *BMC Oral Health*. 2024. Vol. 24(1). P. 1095. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04847-w>.
11. Al-Khalifa K. S., Ahmed W. M., Azhari A. A. et al. The use of artificial intelligence in caries detection: a review. *Bioengineering*. 2024. Vol. 11(9). P. 936. DOI: <https://doi.org/10.3390/bioengineering11090936>.
12. Lam Q. T., Le M. H.N., Fan F. Y. et al. Deep learning-based dental caries diagnosis: a modality-stratified systematic review and meta-analysis of Faster R-CNN and Mask R-CNN. *Diagnostics*. 2026. Vol. 16(5). P. 731. DOI: <https://doi.org/10.3390/diagnostics16050731>.
13. Devlin H., Williams T., Graham J. et al. The ADEPT study: a comparative study of dentists' ability to detect enamel-only proximal caries in bitewing radiographs with and without the use of AssistDent artificial intelligence software. *British Dental Journal*. 2021. Vol. 231. P. 481–485. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41415-021-3526-6>.
14. Fiegler-Rudol J., Lau K., Mroczek A., Kasperczyk J. Exploring human-AI dynamics in enhancing workplace health and safety: a narrative review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2025. Vol. 22(2). P. 199. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph22020199>.
15. Kurt Bayrakdar S., Orhan K., Bayrakdar I. S. et al. A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images. *BMC Medical Imaging*. 2021. Vol. 21(1). P. 86. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12880-021-00618-z>.
16. Hegde S., Gao J., Cox S., Nanayakkara S., Logothetis R., Vasa R. Machine learning algorithms enhance the accuracy of radiographic diagnosis of dental caries: a comparative study. *Dentomaxillofacial Radiology*. 2025. Vol. 54(8). P. 632–641. DOI: <https://doi.org/10.1093/dmfr/twaf053>.
17. Meléndez Rojas P., Jamett Rojas J., Villalobos Dellaflori M. F. et al. The current landscape of automatic radiology report generation with deep learning: a scoping review. *AI*. 2025. Vol. 7(1). P. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/ai7010008>.
18. Carvalho B. K.G., Nolden E. L., Wenning A. S. et al. Diagnostic accuracy of artificial intelligence for approximal caries on bitewing radiographs: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*. 2024. Vol. 151. P. 105388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105388>.
19. El Khoury N., Hadid D., El-Outa A. Exploring the ethical landscape of artificial intelligence in dentistry: insights from a cross-sectional study. *Cureus*. 2025. Vol. 17(4). P. e82667. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.82667>.
20. Ramnarayan B. K., Luke A. M., Vidya M. A., Shetty K. P. Artificial intelligence-driven dentistry: a systematic review of ethical and legal challenges. *International Journal of Dentistry*. 2026. Vol. 2026. P. 1870800. DOI: <https://doi.org/10.1155/ijod/1870800>.
21. Gonzalez-Valenzuela R. E., Mettes P., Loos B. G., Marquering H., Berkhout E. Accuracy of deep learning-based AI models for early caries lesion detection: the influence of annotation quality and reference choice. *Clinical Oral Investigations*. 2025. Vol. 29(12). P. 598. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00784-025-06672-z>.
22. Keskin N. B., Güneç H. G., Uslu G., Tezer E. O. Using artificial intelligence in the evaluation of periapical, caries, and restoration status: a new methodological and technological study. *BMC Medical Imaging*. 2025. Vol. 25(1). P. 466. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12880-025-02019-y>.
23. Caldwell J., Parekh K., Crowther B. et al. Performance evaluation of AI-based caries detection technology and its educational training module: a dual-phase investigation. *Frontiers in Dental Medicine*. 2026. Vol. 6. P. 1741855. DOI: <https://doi.org/10.3389/fdmed.2025.1741855>.

24. Arzani S., Karimi A., Iranmanesh P. et al. Examining the diagnostic accuracy of artificial intelligence for detecting dental caries across a range of imaging modalities: an umbrella review with meta-analysis. *PLoS One*. 2025. Vol. 20(8). P. e0329986. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0329986>.
 25. Lai J., Guo S., Wang K. et al. Artificial intelligence for binary dental caries diagnosis using intraoral images and dental radiographs: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health*. 2026. Vol. 26(1). P. 437. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-026-07770-4>.
 26. Ammar N., Kühnisch J. Diagnostic performance of artificial intelligence-aided caries detection on bitewing radiographs: a systematic review and meta-analysis. *Japanese Dental Science Review*. 2024. Vol. 60. P. 128–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2024.02.001>.
 27. Lal A., Nooruddin A., Umer F. Concerns regarding deployment of AI-based applications in dentistry – a review. *BDJ Open*. 2025. Vol. 11(1). P. 27. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41405-025-00319-7>.
 28. Ndiaye A. D., Gasqui M. A., Millioz F. et al. Exploring the methodological approaches of studies on radiographic databases used in cariology to feed artificial intelligence: a systematic review. *Caries Research*. 2024. Vol. 58(3). P. 117–140. DOI: <https://doi.org/10.1159/000536277>.
 29. Keenan J. R., Keenan A. V. Accuracy of dental radiographs for caries detection. *Evidence-Based Dentistry*.
- References**
1. Global oral health status report: towards universal health coverage for oral health by 2030. Geneva: World Health Organization; 2022. p. 120 <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/364538/9789240061484-eng.pdf?sequence=1>
 2. GBD 2021 Antimicrobial Resistance Collaborators (2024). Global burden of bacterial antimicrobial resistance 1990–2021: a systematic analysis with forecasts to 2050. *Lancet (London, England)*, 404(10459), 1199–1226. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)01867-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)01867-1)
 3. GBD 2021 Diseases and Injuries Collaborators (2024). Global incidence, prevalence, years lived with disability (YLDs), disability-adjusted life-years (DALYs), and healthy life expectancy (HALE) for 371 diseases and injuries in 204 countries and territories and 811 subnational locations, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet (London, England)*, 403(10440), 2133–2161. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)00757-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)00757-8)
 4. Wolf, T. G., Cagetti, M. G., Fisher, J. M et al. (2021). Non-communicable Diseases and Oral Health: An Overview. *Frontiers in oral health*, 2, 725460. <https://doi.org/10.3389/froh.2021.725460>
 5. Qadeer, S., Walter, R., Eyüboğlu, T. F. et al. A Review on Non-invasive Management of Early Carious Lesions Through Modern Approaches. *Curr Oral Health Rep* 12, 21(2025). <https://doi.org/10.1007/s40496-025-00412-8>
 6. de Magalhães, A. A., & Santos, A. T. (2025). Advancements in Diagnostic Methods and Imaging Technologies in Dentistry: A Literature Review of Emerging Approaches. *Journal of clinical medicine*, 14(4), 1277. <https://doi.org/10.3390/jcm14041277>
 7. Zang, X., Luo, C., Qiao, B., Jin, N., Zhao, Y., & Zhang, H. (2022). A deep learning model using convolutional neural networks for caries detection and recognition with endoscopes. *Annals of translational medicine*, 10(24), 1369. <https://doi.org/10.21037/atm-22-5816>
 8. 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>
 9. Luke, A. M., & Rezallah, N. N. F. (2025). Accuracy of artificial intelligence in caries detection: a systematic review and meta-analysis. *Head & face medicine*, 21(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s13005-025-00496-8>
 10. Zhang, J. W., Fan, J., Zhao, F. B et al. (2024). Diagnostic accuracy of artificial intelligence-assisted caries detection: a clinical evaluation. *BMC oral health*, 24(1), 1095. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04847-w>
 11. Al-Khalifa, K. S., Ahmed, W. M., Azhari, A. A et al. (2024). The Use of Artificial Intelligence in Caries Detection: A Review. *Bioengineering (Basel, Switzerland)*, 11(9), 936. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11090936>
 12. Lam, Q. T., Le, M. H. N., Fan, F. Y et al. (2026). Deep Learning-Based Dental Caries Diagnosis: A Modality-Stratified Systematic Review and Meta-Analysis of Faster R-CNN and Mask R-CNN. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 16(5), 731. <https://doi.org/10.3390/diagnostics16050731>
 13. Devlin, H., Williams, T., Graham, J., & Ashley, M. (2021). The ADEPT study: a comparative study of dentists' ability to detect enamel-only proximal caries in bite-wing radiographs with and without the use of Assist-Dent artificial intelligence software. *British dental journal*, 231(8), 481–485. <https://doi.org/10.1038/s41415-021-3526-6>
 14. Fiegler-Rudol, J., Lau, K., Mroczek, A., & Kasperczyk, J. (2025). Exploring Human-AI Dynamics in Enhancing Workplace Health and Safety: A Narrative Review. *International journal of environmental research and public health*, 22(2), 199. <https://doi.org/10.3390/ijerph22020199>
 15. Kurt Bayrakdar, S., Orhan, K., Bayrakdar, I. S et al. (2021). A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images. *BMC medical imaging*, 21(1), 86. <https://doi.org/10.1186/s12880-021-00618-z>
 16. Hegde, S., Gao, J., Cox, S et al. (2025). Machine learning algorithms enhance the accuracy of radiographic diagnosis of dental caries: a comparative study. *Dento maxillo facial radiology*, 54(8), 632–641. <https://doi.org/10.1093/dmfr/twaf053>
 17. Meléndez Rojas, P., Jamett Rojas, J., Villalobos et al. (2025). The current landscape of automatic radiology report generation with deep learning: a scoping review. *AI*, 7(1), 8. <https://doi.org/10.3390/ai7010008>
 18. Carvalho, B. K. G., Nolden, E. L., Wenning, A. S. et al. (2024). Diagnostic accuracy of artificial intelligence for approximal caries on bitewing radiographs: A systematic review and meta-analysis. *Journal of dentistry*, 151, 105388. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105388>
 19. El Khoury, N., Hadid, D., & El-Outa, A. (2025). Exploring the Ethical Landscape of Artificial Intelligence in Dentistry: Insights From a Cross-Sectional Study. *Cureus*, 17(4), e82667. <https://doi.org/10.7759/cureus.82667>
 20. Ramnarayan B. K., Luke A. M., Vidya M. A., Shetty K. P. Artificial Intelligence-Driven Dentistry: A Systematic Review of Ethical and Legal Challenges. *International Journal of Dentistry*. 2026. 2026:1870800. 8 p. <https://doi.org/10.1155/ijod/1870800>

21. Gonzalez-Valenzuela, R. E., Mettes, P., Loos, B. G., Marquering, H., & Berkhout, E. (2025). Accuracy of deep learning-based AI models for early caries lesion detection: the influence of annotation quality and reference choice. *Clinical oral investigations*, 29(12), 598. <https://doi.org/10.1007/s00784-025-06672-z>
22. Keskin, N. B., Güneç, H. G., Uslu, G., & Tezer, E. O. (2025). Using artificial intelligence in the evaluation of periapical, caries, and restoration status: a new methodological and technological study. *BMC medical imaging*, 25(1), 466. <https://doi.org/10.1186/s12880-025-02019-y>
23. Caldwell, J., Parekh, K., Crowther, B. et al. (2026). Performance evaluation of AI-based caries detection technology and its educational training module: a dual-phase investigation. *Frontiers in dental medicine*, 6, 1741855. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2025.1741855>
24. Arzani, S., Karimi, A., Iranmanesh, P. et al. (2025). Examining the diagnostic accuracy of artificial intelligence for detecting dental caries across a range of imaging modalities: An umbrella review with meta-analysis. *PloS one*, 20(8), e0329986. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0329986>
25. Lai, J., Guo, S., Wang, K., Li, X., Yu, X., & Wang, X. (2026). Artificial intelligence for binary dental caries diagnosis using intraoral images and dental radiographs: a systematic review and meta-analysis. *BMC oral health*, 26(1), 437. <https://doi.org/10.1186/s12903-026-07770-4>
26. Ammar, N., & Kühnisch, J. (2024). Diagnostic performance of artificial intelligence-aided caries detection on bitewing radiographs: a systematic review and meta-analysis. *The Japanese dental science review*, 60, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2024.02.001>
27. Lal, A., Nooruddin, A., & Umer, F. (2025). Concerns regarding deployment of AI-based applications in dentistry – a review. *BDJ open*, 11(1), 27. <https://doi.org/10.1038/s41405-025-00319-7>
28. Ndiaye, A. D., Gasqui, M. A., Millioz, F. et al. (2024). Exploring the Methodological Approaches of Studies on Radiographic Databases Used in Cariology to Feed Artificial Intelligence: A Systematic Review. *Caries research*, 58(3), 117–140. <https://doi.org/10.1159/000536277>
29. Keenan, J. R., & Keenan, A. V. (2016). Accuracy of dental radiographs for caries detection. *Evidence-based dentistry*, 17(2), 43. <https://doi.org/10.1038/sj.ebd.6401166>