

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

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

Бойчук Микола Михайлович,
PhD-здобувач кафедри ортопедичної стоматології,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0000-0001-9735-3651
м. Ужгород, Україна

Мельник Леся Владиславівна,
старший викладач кафедри хірургічної стоматології та клінічних дисциплін,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
ORCID ID: 0009-0001-6325-2083
м. Ужгород, Україна

Алгоритми штучного інтелекту для оцінки стану ясен

Вступ. Сучасні методи ідентифікації та предикції гінгівіту та пародонтиту на основі моделей штучного інтелекту, котрі застосовуються для аналізу даних фотографій та цифрових сканів, включають підходи з використанням алгоритмів глибоких нейронних мереж, методу опорних векторів, різних типів дерев класифікації та логістичної регресії. Проте більшість досліджень з апробації таких підходів характеризується ретроспективним дизайном, а відтак – обмеженими можливостями щодо трансляції отриманих результатів в умови щоденної клінічної стоматологічної практики.

Мета дослідження. Проаналізувати доступні моделі та алгоритми штучного інтелекту, які потенційно могли б бути використані для автоматизації процесу діагностики стану ясен.

Матеріали та методи. Дослідження було організовано у форматі цільового огляду літератури з тергетним пошуком даних щодо доступних моделей та алгоритмів штучного інтелекту, розроблених для діагностики та диференціації стану ясен. З метою максимізації обсягу первинної вибірки пошук публікацій, пов'язаних із метою даного дослідження, проводився через систему Google Scholar (<https://scholar.google.com/>), з використанням ключових слів «artificial intelligence», «gingiva» та «periodontology», розширених функцій сервісу та фільтрації робіт, опублікованих англійською мовою до квітня 2024 року.

Результати досліджень та їх обговорення. Проаналізовані моделі штучного інтелекту продемонстрували ефективність автоматичної ідентифікації ділянок гінгівіту та порушення сталості ясеневого контуру на рівні точності в понад 70% з використанням у якості основного набору вихідних даних внутрішньоротових цифрових фотографій. Водночас точність верифікації здорового стану ясен за даними проаналізованих досліджень була доволі низькою, що пов'язано із проблемами диференціації сегментованих ділянок із референтними зображеннями здорових ясен, які характеризуються не тільки інтеріндивідуальною, але й інтраіндивідуальною варіативністю. Проблематика якісної оцінки стану ясен з використанням моделей штучного інтелекту за даними інтраорального сканування обґрунтована відмінностями у технологіях отримання зображення, передбачених різними апаратами, та ефектом так званого «надмірного оцифрування», що призводить до дисторції реальної репрезентації стану м'яких тканин. Крім того загально-виражена проблема інтраоральних сканерів щодо оцінки стану ясен полягає у аугментованому типі графічного процесингу поверхонь, які характеризуються відсутністю виражених фідуціарних маркерів (фізіологічних чи штучних) та однорідністю площинних топологічних характеристик.

Висновки. Доступні моделі та алгоритми штучного інтелекту, цільове призначення котрих передбачає оцінку та диференціацію стану ясен, продемонстрували високу точність автоматизованого процесу діагностики випадків гінгівіту на пацієнт-орієнтованому рівні ($\geq 70\%$), водночас чутливість таких моделей щодо верифікації здорового стану ясен залишається низькою, а також характеризується широким діапазоном варіації (з вихідною точкою діапазону з 0%). Застосування моделей штучного інтелекту з метою сегментації та подальшої категоризації ділянок ясен по певним чітко-визначеним класам (в ході індексної оцінки стану ясен, чи під час вихідної диференціації та якісної категоризації типу посмішки), а також в ході ідентифікації ділянок порушення цілісності ясеневого контуру та його можливої реконструкції по встановленому патерну, характеризується високими показниками чутливості та специфічності на рівні досліджуваних вибірок, проте клінічна валідність даних підходів з урахуванням інтер- та інтраіндивідуальних рівнів варіацій різних проявів змін ясен досі не доведена.

Ключові слова: штучний інтелект, діагностика, стоматологія, пародонт, пародонтологія, ясна, ротова порожнина

Goncharuk-Khomyn Myroslav Yuriyovich, PhD, Head of Department of Restorative Dentistry, Uzhhorod National University, ORCID ID: 0000-0002-7482-3881, Uzhhorod, Ukraine

Bohdan Olena Mykhaylivna, Senior Lecturer at the Department of Restorative Dentistry, Uzhhorod National University, ORCID ID: 0000-0003-0586-2155, Uzhhorod, Ukraine

Boychuk Mykola Mykhaylovych, PhD-Student at the Department of Prosthetic Dentistry, Uzhhorod National University, ORCID ID: 0000-0001-9735-3651, Uzhhorod, Ukraine

Melnyk Lesya Vladyslavivna, Senior Lecturer at the Department of Surgical Dentistry and Clinical Disciplines, Uzhhorod National University, ORCID ID: 0009-0001-6325-2083, Uzhhorod, Ukraine

Algorithms of artificial intelligence for the evaluation of gingival conditions

Introduction. Modern methods of identification and prediction of gingivitis and periodontitis based on artificial intelligence models that analyze intraoral photos or scans data include approaches using algorithms of deep neural networks, method of support vectors, various types of classification trees and logistic regression. However, most studies dedicated to the approbation of such approaches were characterized by a retrospective design and, therefore, associated with limited possibilities regarding translation of the obtained results into the conditions of daily dental clinical practice.

Objective of the research. To analyze the available models and algorithms of artificial intelligence that could potentially be used to automatize the process of gingival conditions diagnostics.

Materials and methods. The study was organized in the format of targeted literature review with a focused search for data regarding available artificial intelligence models and algorithms developed specifically for the diagnosis and differentiation of gingival diseases. In order to maximize the volume of the primary sample, the search for publications related to the purpose of this study was conducted through the Google Scholar system (<https://scholar.google.com/>), using the keywords «artificial intelligence», «gingiva» and «periodontology», advanced service functions and filtering of works published in English until April 2024.

Results and discussions. The analyzed artificial intelligence models demonstrated the effectiveness of automatic identification for areas of gingivitis and gingival contour disruption with an accuracy level of more than 70% using intraoral digital photographs as the main set of initial data. At the same time, verification accuracy for healthy gingival condition according to the data of the analyzed studies was quite low, which is related with the problems of differentiating segmented areas with reference images of healthy gums, because latter characterized not only by inter-individual, but also by intra-individual variability. The problem of qualitative assessment of gingival conditions using artificial intelligence models based on intraoral scanning data is related to the differences within image acquisition technologies provided by different devices and the so-called effect of «excessive digitization», which leads to distortion within the real representation of soft tissues condition. In addition, the common problem of intraoral scanners in assessing the state of the gingiva is related to the augmented type of graphical surface processing, which is characterized by the absence of pronounced fiducial markers (physiological or artificial) and the uniformity of planar topological characteristics within the scanned gingival area.

Conclusions. Available models and algorithms of artificial intelligence, the purpose of which involves the assessment and differentiation of the gingiva conditions, have demonstrated a high accuracy regarding the automated process of gingivitis cases diagnostics at the patient-oriented level ($\geq 70\%$), while the sensitivity of such models for the verification of the healthy gingival condition remains low, and is characterized by a wide range of variation (with the starting point of the range from 0%). The use of artificial intelligence models for the purpose of segmentation and further categorization of gingival areas according to certain clearly defined classes (during the index assessment of the gum condition, or during the initial differentiation and qualitative categorization of the smile type), as well as during the identification of areas with gingival contour disruption and its further possible reconstruction according to the established pattern, is characterized by high values of sensitivity and specificity at the level of the studied samples, however, the clinical validity of these approaches, taking into account the inter- and intra-individual levels of variation for various manifestations of gingival changes, has not yet been proven.

Key words: artificial intelligence, diagnostics, dentistry, periodontium, periodontology, gingiva, oral cavity.

Вступ. Систематичний огляд Revilla-Leon M. та колег дозволив верифікувати всього 24 наукові роботи, які відповідали критеріям включення щодо якості опублікованих досліджень, та були присвячені аспектам використання штучного інтелекту (ШІ) з метою діагностики гінгівіту та пародонтиту [1]. З даного пулу наукових робіт 2 стосувалися ідентифікації нальоту, в яких точність використовуваних моделей ШІ варіювала в діапазоні 73,6-99%, 7 – діагностики гінгівіту за даними інтраоральних цифрових фотографій з зареєстрованою точністю використовуваних моделей ШІ в межах 74-78,20%, 1 – діагностики гінгівіту за даними флюорисцентних інтраоральних фотографій з точністю застосовуваної ШІ моделі на рівні 67,7-73,72%, і 14 наукових робіт були присвячені діагностиці пародонтиту з використанням різних підходів машинного навчання [1].

Сучасні методи ідентифікації та предикції гінгівіту та пародонтиту на основі моделей штучного інтелекту,

котрі застосовуються для аналізу даних фотографій та цифрових сканів, включають підходи з використанням алгоритмів глибоких нейронних мереж, методу опорних векторів, різних типів дерев класифікації та логістичної регресії. Проте більшість досліджень з апробації таких підходів характеризується ретроспективним дизайном, а відтак – обмеженими можливостями щодо трансляції отриманих результатів в умови щоденної клінічної стоматологічної практики (в розрізі цільового використання для різних варіацій клінічних ситуацій з урахуванням ефективності не на когорту цільових досліджуваних суб'єктів, а на кожного конкретного пацієнта) [1, 2, 3]. Patil S. та колеги констатували низьку якість доказів, які б аргументували клінічну значущість різних моделей штучного інтелекту для діагностики захворювань пародонту, хоча такий висновок дослідників був в першу чергу обґрунтований гетерогенністю використовуваних підходів в цілому, а не низькою ефективністю кожного з них [4].

Важливо відмітити, що поширеність наукових робіт щодо використання можливостей штучного інтелекту в стоматології почала прогресивно зростати починаючи з 2019 року, що, очевидно, пов'язано із розвитком більш досконалих моделей ШІ та можливостей їх адаптації до клінічних стоматологічних потреб [1, 2, 3, 5, 6, 7]. Вартує уваги також той факт, що з 2019 року значно зріс обсяг проанотованих/промаркованих (повністю чи частково) даних стоматологічних пацієнтів різного формату зі збереженням їх анонімності, однак з позначенням відповідних клінічних знахідок на інтраоральних цифрових фотографія та сканах [8].

Попри це питання щодо ефективності доступних моделей та алгоритмів штучного інтелекту для діагностики та диференціації конкретно стану ясен залишається відкритим, враховуючи проблематику аналізу різних параметрів м'яких тканин ротової порожнини без додаткових клінічних втручань; при цьому зростає клінічна орієнтованість моделей ШІ розроблених для аналізу рентгенографічних даних, в тому числі і таких, які характеризують стан опорних тканин пародонта [1, 2, 4, 8, 9]. Відтак аналіз доступних алгоритмів ШІ, які первинно були розроблені специфічно для оцінки стану ясен, дозволить актуалізувати діагностичні можливості автоматизованих діагностичних підходів, котрі можуть бути імплементовані в клінічну практику та мінімізувати при цьому потребу в додаткових маніпуляціях інтервенційно-діагностичного характеру.

Мета. Проаналізувати доступні моделі та алгоритми штучного інтелекту, які потенційно могли б бути використані для автоматизації процесу діагностики стану ясен.

Матеріали та методи. Дослідження було організовано у форматі цільового огляду літератури з тергетним пошуком даних щодо доступних моделей та алгоритмів штучного інтелекту, розроблених для діагностики та диференціації стану ясен. З метою максимізації обсягу первинної вибірки пошук публікацій, пов'язаних із метою даного дослідження, проводився через систему Google Scholar (<https://scholar.google.com/>), з використанням ключових слів «artificial intelligence», «gingiva» та «periodontology», розширених функцій сервісу та фільтрації робіт, опублікованих англійською мовою до квітня 2024 року [10]. Додатково аналіз кожної із відібраних до первинної когорти наукових праць проводили через сервіс Connected Papers (<https://www.connectedpapers.com/>) з метою пошуку додаткових зв'язків із роботами аналогічного спрямування, попередніх, а також похідних робіт, які потенційно могли бути пропущені під час первинного відбору за назвою публікації [11] (рис. 1).

Опрацювання кожної із відібраних статей забезпечувалось спочатку за змістом анотацій/резюме, після чого ті роботи, які в найбільшій мірі відповідали меті даного дослідження, підлягали деталізованому контент-аналізу, категорії котрого включали наступні: 1) тип використовуваних моделей та алгоритмів штучного інтелекту, які були розроблені для діагностики та диференціації стану ясен; 2) діагностична ефективність використовуваних моделей та алгоритмів штучного інтелекту для оцінки стану ясен; 3) параметри ясен, які підлягали оцінці із використанням діагностичних можливостей штучного інтелекту; 4) проблемні аспекти коректної роботи моделей штучного інтелекту,

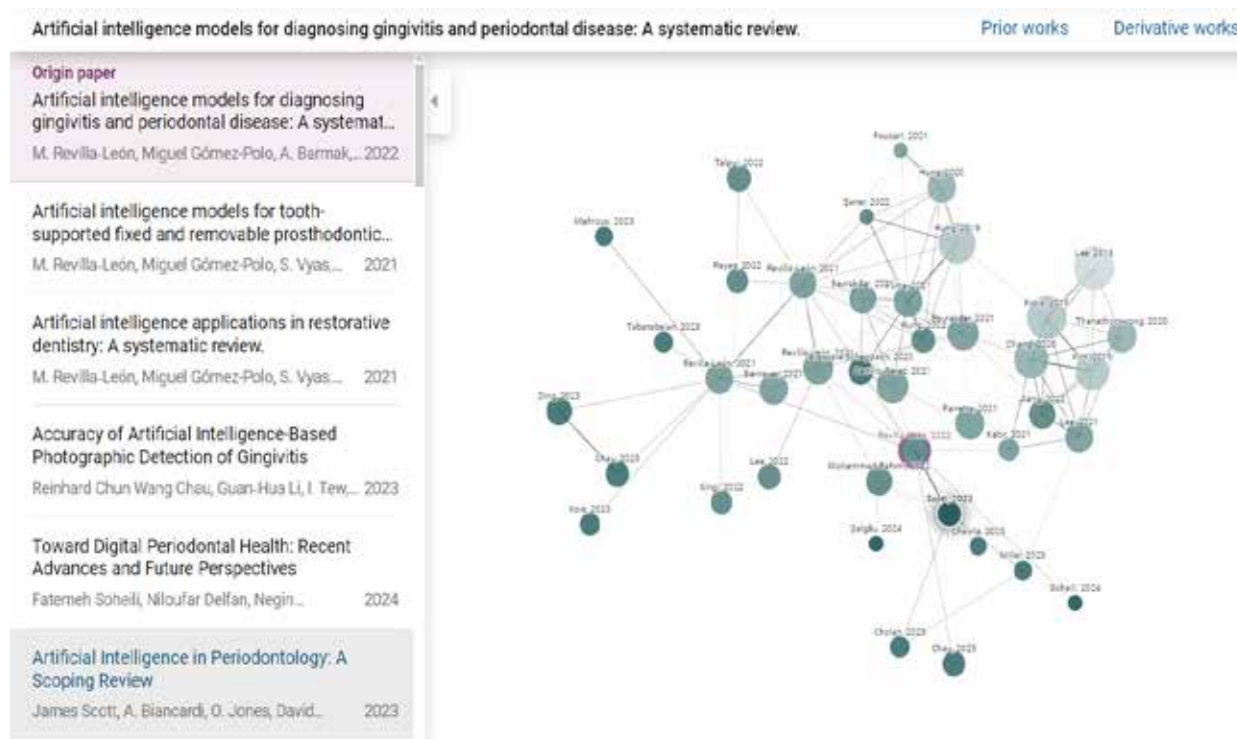


Рис. 1. Інтерфейс сервісу Connected Papers в процесі аналізу первинної вибірки публікацій на предмет зв'язку із попередніми чи похідними науковими роботами

первинно розроблених для оцінки та диференціації стану ясен.

Систематизації та кластеризація даних у відповідності до вищезгаданих категорій контент-аналізу забезпечувалася у табличному редакторі Microsoft Excel 2019 (Microsoft Office 2019, Microsoft, США) з подальшим топологічним сортуванням блоків екстрагованої інформації у відповідності до встановлених взаємозв'язків між такими в межах однієї категорії або між декількома категоріями контент-аналізу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Опрацювання наукових робіт, які представляли досліджувану вибірку публікацій, дозволило систематизувати наступні напрямки застосування алгоритмів штучного інтелекту для оцінки стану ясен: для автоматизації процесу індексної оцінки, для диференціації їх нормального стану та гіперплазії, для градації вираженості гінгівіту та з метою ідентифікації ділянок змін ясеневого контуру [1, 2, 4, 5, 7]. Більша частина описаних підходів базувалася на реалізації принципу попередньої сегментації ділянок ясен із отриманих інтраоральних цифрових фотографій з подальшим процесингом таких згідно послідовностей, структурованих різними моделями машинного навчання [1, 2, 6, 7, 8, 12]. Процес сегментації ділянки ясен від зубів на цифрових зображеннях Eckhard T. та колеги запропо-

нували проводити на основі алгоритму самоорганізаційного маппінгу, і тільки після цього використовувати відповідні класифікатори кольору та форми для диференціації між здоровим станом ясен та гінгівітом [13]. Хоча доступні підходи цифрової фотометрії, які передбачають проведення квантифікації стану ясен лише за кольорними характеристиками без додаткової сегментації, в свою чергу також можуть бути використані у якості класифікаторів для моделей штучного інтелекту [12]. (рис. 2).

Chau R.C. та колеги описали модель штучного інтелекту, ефективність якої визначали за кількістю пікселів асоційованих із здоровим чи патологічним станом маргінальних ясен на основі цифрових внутрішньоротових фотографій [5]. Чутливість розробленої авторами моделі складала 0,92, а специфічність – 0,94, однак дослідники відмітили, що можливість широкого впровадження вихідного алгоритму є обмеженою, оскільки він був апробований лише на вибірці китайських пацієнтів, тоді як подальші результати можуть варіювати при його апробації на інших етнічних групах [5]. Крім того потребує значної уваги склад тренувального набору даних, оскільки превалювання в такому фотографій пацієнтів з гінгівітом, чи навпаки, пацієнтів зі здоровим станом ясен, провокуватиме похибки у кінцевій ефективності алгоритму.

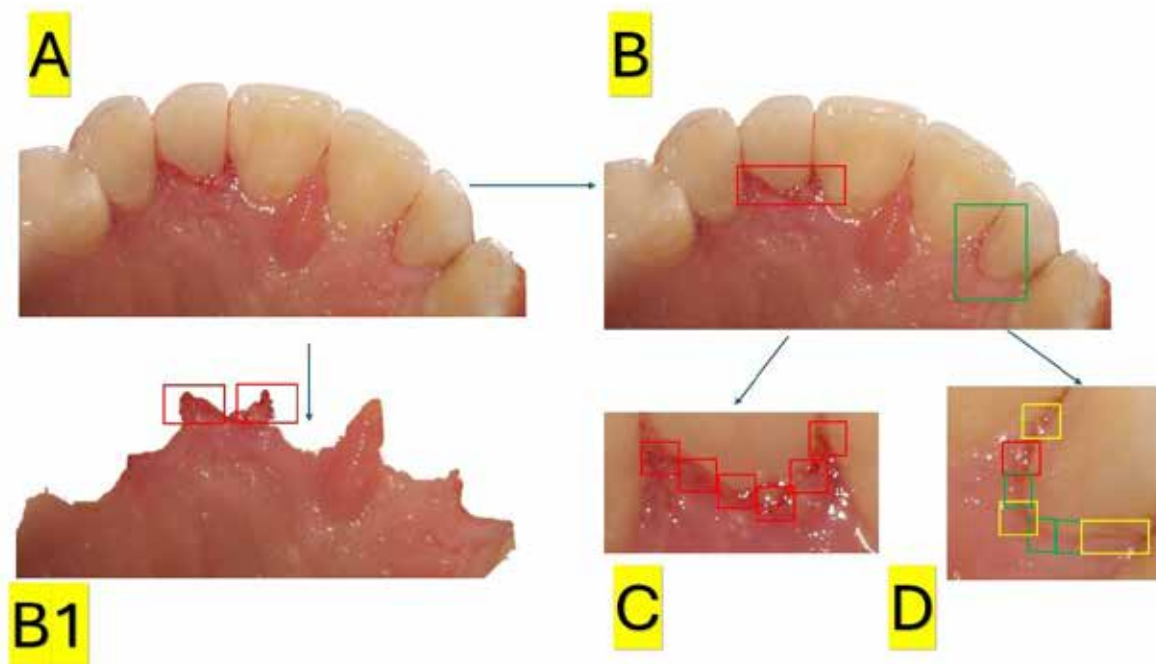


Рис. 2. Приклади сегментації ділянок ясен (із добірки експериментальних напрацювань Гончарука-Хомина М.Ю.)

А. Цифрова фотографія. В. Сегментації box-типу в ділянці ознак ураження ясен (в проекції зуба 1.2) та в ділянці, де не проводилось жодних втручань (в проекції зуба 2.1). С. Деталізована box-сегментація ділянки ясен з ознаками ураження (за критеріями відмінності кольору та порушення цілісності ясеневого контуру). С. Деталізована box-сегментація ділянки ясен без первинно виражених ознак ураження ясен на загальній фотографії; диференціація ділянок ясен з відмінними ознаками на збільшеній фотографії: червоні ділянки сегментації – ідентифіковані ознаки гінгівіту (ймовірність позитивного прогнозу – 84%), жовті ділянки сегментації – ймовірні ознаки гінгівіту (ймовірність позитивного прогнозу – 62%), зелені ділянки сегментації – здоровий стан ясен (ймовірність позитивного прогнозу – 54%). В1. Приклад тотальної сегментації ясен за принципом відмінності кольору: візуалізація вираженої ділянки порушення ясеневого контуру, проте обмежена ймовірність деталізованої диференціації стану ясен в інших ділянках

Застосування мобільного застосунку «iGAM app» для обробки зображень зубів та ясен, зроблених пацієнтом особисто із використанням свого смартфона, дозволяє коректно прорахувати модифікований ясеневий індекс (modified gingival index) та класифікувати стан ясен у відповідності до отриманих значень на основі технології штучного інтелекту [14, 15, 16]. Запропонована дослідниками система характеризувалася надмірною чутливістю (з точністю у 0% для здорового стану ясен), однак такий аспект був інтерпретований як перевага методу, враховуючи, що отримання хибно-позитивного результату є більш прийнятним, ніж хибно-негативного з точки зору впливу на подальшу клінічну діагностику та лікування [14, 15, 16].

Використання можливостей згорткових нейронних мереж R-CNN (орієнтованих на аналіз конкретної зони) з метою диференціації ділянок здорових ясен та ділянок гінгівіту у дослідженні Alalharith D. та колег дозволило коректно діагностувати гінгівіт з точністю у 77,12% [17]. Kurt-Bayrakdar S. та колеги запропонували використовувати згорткові нейронні мережі для діагностики стану ясен та пародонтологічних порушень за даними інтраоральних фотографій, при цьому у їх дослідженні чутливість розроблених алгоритмів для діагностики запалення ясен сягала 0,737, а для гіперплазії ясен – 0,757 [18]. Rana A. та колеги описали автоматизований алгоритм покрової сегментації здорових ясен від таких з ознаками гінгівіту з точністю в 0,74; існуючі проблеми з коректною класифікацією автори пов'язували із ефектом аугментації кольору, який був відмічений при зміні налаштувань фотокамери [19]. В цілому неодноразово було підтверджено ефективність штучних нейронних мереж для диференціації випадків гінгівіту та здорового стану ясен на основі аналізу отриманих внутрішньоротових фотографій, точність котрих перевищувала 70% [20].

При цьому для верифікації змін ясен по інтраоральним фотографіям з використанням технології штучного інтелекту можуть бути використані різні колористичні моделі – RGB та HSV, досвід апробації котрих уже був описаний у низці досліджень [21, 22, 23]. Зокрема застосування RGB моделі та мультизадачної згорткової нейронної мережі дозволяло провести детекцію гінгівіту на інтраоральних знімках з точністю у 87,11% [21, 22]. Ebron J. G. та колеги продемонстрували 81,68% точність діагностики гінгівіту на основі обробки зображень з HSV моделлю розробленим типом згорткової мережі [23].

Використання мобільного додатку з технологією штучного інтелекту в домашніх умовах з метою моніторингу сприяло покращенню пародонтологічного статусу пацієнтів, які перебувають на етапі диспансеризації, оскільки такий підхід дозволяє раніше виявити зміни в структурі різних клінічних параметрів за даними інтраоральних фото, та при негативному тренді таких наголосити на потребі відвідування стоматолога [24]. Пацієнти, які використовували моніторинговий додаток з технологією штучного інтелекту, характеризувалися більш вираженими покращеннями параметрів глибини зондування, рівня клінічного прикріплення та індексу нальоту за даними рандомізованого контрольованого дослідження [24].

Технологія машинного навчання також дозволяє більш ефективно диференціювати здоровий стан пародонту, гінгівіт та пародонтит, використовуючи в якості детермінант-класифікаторів неклінічні параметри (дані опитувальників) та біомаркери слини [25]. Точність такого підходу перевищує 94% при використанні ансамблевого методу машинного навчання на основі принципу дерева рішень (дерева класифікації), та перевищує ефективність логістичної регресійної моделі [25].

Застосування можливостей штучного інтелекту також сприяє оптимізації процесу сегментації ділянок ясен та визначення їх товщини на основі суперімпозиції результатів КПКТ та інтраорального сканування, що було підтверджено результатами пілотного дослідження на тваринній моделі [26]. Узгодженість отриманих результатів з клінічними даними була більш вираженою з щічної сторони щелеп, аніж з лінгвальної, що очевидно пов'язано із ефектом анатомічних піддурень, які відмічаються з язикової сторони, та обмежують можливості щодо ефективної реєстрації стану поверхонь [26].

Можливості оцінки змін параметрів товщини м'яких тканин після проведення пародонтологічного лікування з використанням інтраорального сканування були підтверджені також у роботах Kuralt M. [27, 28, 29, 30]. Використання таких у майбутньому може бути використано в структурі машинного навчання для предикції результатів різних підходів до пародонтологічного лікування. Lim H.-C. та дослідники репрезентували підходи із цифровою оцінкою таких параметрів як висота та площа кератинізованих ясен на основі даних інтраорального сканування [31]. Попередні роботи Kuralt M. та Fidler A. продемонстрували також можливість оцінки параметрів рецесії ясен на основі отриманих інтраоральних сканів, проте досі відсутні дані про автоматизовані системи детекції та квантифікації рецесій на основі алгоритмів штучного інтелекту [29, 30].

Проблематика якісної оцінки стану ясен з використанням моделей штучного інтелекту за даними інтраорального сканування пов'язана із відмінностями у технологіях отримання зображення, передбачених різними апаратами, та ефектом так званого «надмірного оцифрування», що призводить до дисторсії реальної репрезентації стану м'яких тканин. Крім того загальновиражена проблема інтраоральних сканерів щодо оцінки стану ясен полягає у аугментованому типі графічного процесингу поверхонь, які характеризуються відсутністю виражених фідуціарних маркерів (фізіологічних чи штучних) та однорідністю площинних топологічних характеристик. (рис. 3).

Автоматизація процесу сегментації інтраоральної та периоральної ділянок із цифрових фотографій з подальшим ануванням таких дозволила оптимізувати процес метричної оцінки посмішки для подальшої класифікації з використанням алгоритмів штучного інтелекту, що в свою чергу дозволить об'єктивізувати потреби у відповідній естетичній корекції, і таким чином мінімізувати складову суб'єктивної градації [32]. Точність моделі обрахунку індексу посмішки та її коректної категоризації у одну із шести можливих груп

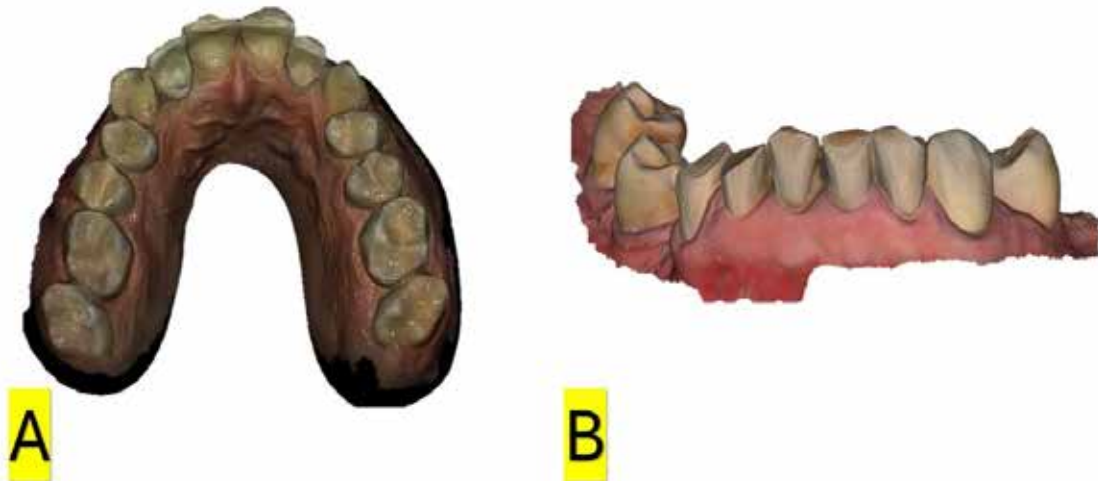


Рис. 3. А. Приклад скану та репрезентації м'яких тканин, отриманих з використанням інтраорального сканера Condor (Condor International, Гент, Бельгія). В. Приклад скану та репрезентації м'яких тканин, отриманих з використанням інтраорального сканера Medit i500 (Medit Corp., Сеул, Південна Корея) (клінічні випадки із власної практики Гончарука-Хомина М.)

з використанням технологій машинного навчання складала 0,933 [32].

Tian S. та колеги розробили підхід з мережевою реконструкцією контуру ясен на основі аналізу такого серед пацієнтів з використанням принципів машинного навчання [33]. Даний підхід базується на екстракції контуру в ортогональній проекції із отриманих зображень за принципом реверсивного маппінгу та з подальшою дискримінацією наявних змін в залежності від фактичного стану стоматологічного статусу, відносно котрих і проводиться надбудова майбутнього індивідуалізованого контуру ясен [33]. Переваги запропонованої методики полягають в наступному: 1) можливість реалізації у різних клінічних варіантах адентії; 2) низька похибка реконструкції; 3) можливість застосування безпосередньо на клінічному прийомі; 4) узгодженість реконструйованого контуру із наявним контуром в області присутніх зубів з репрезентацією змін, яких необхідно досягнути в обох ділянках, або ж тільки в ділянках адентії, приймаючи контур в області власних зубів за референтний [33].

Алгоритми машинного навчання на основі даних інтраоральних фотографій також дозволяють діагностувати у пацієнта наявність анемії, приймаючи до уваги параметри ясен з точністю в діапазоні 77-85% в залежності від використовуваного підходу до опрацювання даних [34].

Окремі роботи продемонстрували значущість машинного навчання для предикції патології пародонтиту, виходячи з параметрів віку, статі, стану гігієни ротової порожнини, глибини пародонтального зондування, рухомості зубів, пародонтального та гінгівального індексів та рівня оточуючої кісткової тканини [35].

Важливим аспектом застосування технологій штучного інтелекту в пародонтології в цілому є можливість реалізації принципів персоналізованої діагностики та лікування, які включають пацієнт-орієнтовану оцінку ризиків, ранній індивідуалізований скринінг та діагностику, таргетну підтримуючу терапію та гігієнічне навчання [36].

Одним із найбільш перспективних напрямків, який обґрунтовує доцільність імплементації алгоритмів штучного інтелекту для оцінки стану ясен, залишається можливість залучення пацієнта до етапу планування та прогнозування наслідків пародонтологічних втручань. Krasnokutskyy A. та Goncharuk-Khomyn M. була запропонована концепція пацієнт-орієнтованого планування процедури закриття рецесій на основі моделювання різних змін ясеневого контуру, котрі можуть мати місце після втручання, з демонстрацією таких пацієнту перед втручанням для об'єктивізації індивідуального мінімально-прийнятнього результату, який би сам пацієнта суб'єктивно міг оцінити як успішний [37]. Даний підхід згідно оригінальної авторської пропозиції може бути реалізований як з використанням інтраоральних цифрових фотографій, так на основі інтраоральних трьохмірних сканів, і автоматизація такого, враховуючи його алгоритмічну структуру, відповідно може бути реалізована з використанням технології штучного інтелекту шляхом навчання такого на основі проведеної пацієнтами градації значної кількості варіантів результату клінічного лікування згідно дихотомічного критерію «успішно» або «неуспішно». Пізніше Goncharuk-Khomyn M. та співавтори опублікували одну з перших праць, присвячену ідентифікації феномену наповзаючого прикріплення із закриттям рецесій опісля проведеного ортодонтичного лікування без будь-яких додаткових ятрогенних втручань на основі порівняння лише цифрових внутрішньоротових сканів, підкреслюючи практичну значущість використання таких як вихідних даних для подальшого поглибленого вивчення феномену наповзаючого прикріплення [38]. Враховуючи, що інтраоральні скани представляють собою набір цифрових даних, такі можуть бути використані для навчання алгоритмів штучного інтелекту, спрямованих на ідентифікацію змін ясеневого контуру після різних видів терапевтичних, ортодонтичних та пародонтологічних втручань, з метою прогностичної оцінки змін ясеневого контуру, котрі потенційно можуть розви-

ватися за механізмом «наповзаючого прикріплення» [38]. Такі моделі машинного навчання дозволять виокремити діапазон змін рівня ясен, котрі можуть мати місце в процесі лікування, але при цьому напряму не пов'язані із цільовим безпосереднім впливом реалізованих ятрогенних втручань, а розвиваються за рахунок фізіологічних процесів на фоні проліферації клітин, зниження рівня маргінального натягу м'яких тканин та нівелювання мукогінгівального стресу, корональної міграції зв'язкового апарату за рахунок скоротливих властивостей фібробластів, збільшення обсягу сполучнотканинної складової.

Таким чином, згідно проаналізованих даних літератури моделі штучного інтелекту продемонстрували ефективність автоматичної ідентифікації ділянок гінгівіту та порушення сталості ясеневого контуру на рівні точності в понад 70% з використанням у якості основного набору вихідних даних внутрішньоротових цифрових фотографій. Водночас точність верифікації здорового стану ясен за даними проаналізованих досліджень була доволі низькою, що пов'язано із проблемами диференціації сегментованих ділянок із референтними зображеннями здорових ясен, які характеризуються не тільки інтеріндивідуальною, але й інтраіндивідуальною варіативністю. Перспективним є застосування моделей штучного інтелекту для індексної оцінки та градації ясеневого контуру в цілому по відповідних класах у межах цільових запитів (наприклад, для оцінки вираженості гінгівіту, чи квантифікації типу посмішки). Продовжується розробка предикативних моделей штучного інтелекту, направлених на прогнозування змін тканин пародонту без і після проведеного лікування, а також з урахуванням впливу різних факторів ризику та біологічних феноменів репарації та регенерації; продовжується вдосконалення різних алгоритмів побудованих на основі ШІ та пов'язаних із оцінкою та прогнозом змін стану ясен, які сприятимуть

формуванню можливостей для вищої пацієнтзалученості пацієнтів у процес стоматологічного лікування, що відтак потенційно позитивно впливатиме на кінцеві показники пацієнтзадоволеності досягнутими результатами реабілітації.

Висновки. Доступні моделі та алгоритми штучного інтелекту, цільове призначення котрих передбачає оцінку та диференціацію стану ясен, продемонстрували високу точність автоматизованого процесу діагностики випадків гінгівіту на пацієнт-орієнтованому рівні ($\geq 70\%$), водночас чутливість таких моделей щодо верифікації здорового стану ясен залишається низькою, а також характеризується широким діапазоном варіації (з вихідною точкою діапазону з 0%). Застосування моделей штучного інтелекту з метою сегментації та подальшої категоризації ділянок ясен по певним чітко-визначеним класам (в ході індексної оцінки стану ясен, чи під час вихідної диференціації та якісної категоризації типу посмішки), а також в ході ідентифікації ділянок порушення цілісності ясеневого контуру та його можливої реконструкції по встановленому патерну, характеризується високими показниками чутливості та специфічності на рівні досліджуваних вибірок, проте клінічна валідність даних підходів з урахуванням інтер- та інтраіндивідуальних рівнів варіацій різних проявів змін ясен досі не доведена. Важливим аспектом застосування технологій штучного інтелекту в пародонтології в цілому є можливість реалізації принципів персоналізованої діагностики та лікування, які включають пацієнт-орієнтовану оцінку ризиків, ранній індивідуалізований скринінг та диспансеризацію, таргетну підтримуючу терапію та гігієнічне навчання, виходячи з параметрів віку, статі, стану гігієни ротової порожнини, глибини пародонтального зондування, рухомості зубів, пародонтального та гінгівального індексів, рівня оточуючої кісткової тканини та інших похідних параметрів.

REFERENCES

1. Revilla-León M, Gómez-Polo M, Barmak AB, Inam W, Kan JY, Kois JC, Akal O. Artificial intelligence models for diagnosing gingivitis and periodontal disease: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2023 Dec 1;130(6):816-24. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.01.026>
2. Polizzi A, Quinzi V, Lo Giudice A, Marzo G, Leonardi R, Isola G. Accuracy of Artificial Intelligence Models in the Prediction of Periodontitis: A Systematic Review. *JDR Clinical & Translational Research*. 2024 Apr 8;23800844241232318. <https://doi.org/10.1177/23800844241232318>
3. Goncharuk-Khomyn M, Noenko I, Cavalcanti AL, Adigüzel Ö, Dubnov A. Artificial intelligence in endodontics: relevant trends and practical perspectives. *Ukrainian Dental Journal*. 2023 Mar 5;2(1):96-101. <https://doi.org/10.56569/UDJ.2.1.2023.96-101>
4. Patil S, Joda T, Soffe B, Awan KH, Fageeh HN, Tovani-Palone MR, Licari FW. Efficacy of artificial intelligence in the detection of periodontal bone loss and classification of periodontal diseases: A systematic review. *Journal of the American Dental Association*. 2023 Sep;154(9):795-804. <https://doi.org/10.1016/j.adaj.2023.05.010>
5. Chau RC, Li GH, Tew IM, Thu KM, McGrath C, Lo WL, Ling WK, Hsung RT, Lam WY. Accuracy of artificial intelligence-based photographic detection of gingivitis. *International dental journal*. 2023 Oct 1;73(5):724-30. <https://doi.org/10.1016/j.identj.2023.03.007>
6. Duy HB, Hue TT, Son TM, Lan LT, Duc NM. A dental intraoral image dataset of gingivitis for image captioning. *Data in Brief*. 2024 Sep 19;110960. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110960>
7. Wen C, Bai X, Yang J, Li S, Wang X, Yang D. Deep learning based approach: automated gingival inflammation grading model using gingival removal strategy. *Scientific Reports*. 2024 Aug 26;14(1):19780. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70311-y>
8. Carrillo-Perez F, Pecho OE, Morales JC, Paravina RD, Della Bona A, Ghinea R, Pulgar R, Pérez MD, Herrera LJ. Applications of artificial intelligence in dentistry: A comprehensive review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2022 Jan;34(1):259-80. <https://doi.org/10.1111/jerd.12844>

9. Thurzo A, Urbanová W, Novák B, Czako L, Siebert T, Stano P, Mareková S, Fountoulaki G, Kosnáčová H, Varga I. Where is the artificial intelligence applied in dentistry? Systematic review and literature analysis. *Healthcare*. 2022 Jul 8;10(7):1269. <https://doi.org/10.3390/healthcare10071269>
10. Gusenbauer M, Haddaway NR. Which academic search systems are suitable for systematic reviews or meta-analyses? Evaluating retrieval qualities of Google Scholar, PubMed, and 26 other resources. *Research synthesis methods*. 2020 Mar;11(2):181-217. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1378>
11. Behera PK, Jain SJ, Kumar A. Visual Exploration of Literature Using Connected Papers: A Practical Approach. *Issues in Science and Technology Librarianship*. 2023 Oct 5;104. <https://doi.org/10.29173/istl2760>
12. Ginesin O, Zigdon-Giladi H, Gabay E, Machtei EE, Mijiritsky E, Mayer Y. Digital photometric analysis of gingival response to periodontal treatment. *Journal of Dentistry*. 2022 Dec 1;127:104331. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104331>
13. Eckhard T, Valero EM, Nieves JL. Labial teeth and gingiva color image segmentation for gingival health-state assessment. *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*. 2012 Jan 1;6:102-107. <https://doi.org/10.2352/CGIV.2012.6.1.art00019>
14. Tobias G, Spanier AB. Developing a mobile app (iGAM) to promote gingival health by professional monitoring of dental selfies: user-centered design approach. *JMIR mHealth and uHealth*. 2020 Aug 14;8(8):e19433. <https://doi.org/10.2196/19433>
15. Tobias G, Spanier AB. Using an mHealth app (iGAM) to reduce gingivitis remotely (part 2): prospective observational study. *JMIR mHealth and uHealth*. 2021 Sep 16;9(9):e24955. <https://doi.org/10.2196/24955>
16. Tobias G, Sgan-Cohen H, Spanier AB, Mann J. Perceptions and attitudes toward the use of a mobile health app for remote monitoring of gingivitis and willingness to pay for mobile health apps (part 3): mixed methods study. *JMIR Formative Research*. 2021 Oct 5;5(10):e26125. <https://doi.org/10.2196/26125>
17. Alalharith DM, Alharthi HM, Alghamdi WM, Alsenbel YM, Aslam N, Khan IU, Shahin SY, Dianišková S, Alhareky MS, Barouch KK. A deep learning-based approach for the detection of early signs of gingivitis in orthodontic patients using faster region-based convolutional neural networks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020 Nov;17(22):8447. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228447>
18. Bayrakdar SK, Ugurlu M, Yavuz MB, Sali N, Bayrakdar IS, Çelik Ö, Köse O, Beklen A, Uzun B, Jagtap R, Orhan K. Detection of tooth numbering, frenulum attachment, gingival overgrowth, and gingival inflammation signs on dental photographs using convolutional neural network algorithms: a retrospective study. *Quintessence International*. 2023;54(8):680-93. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2222628/v1>
19. Rana A, Yauney G, Wong LC, Gupta O, Muftu A, Shah P. Automated segmentation of gingival diseases from oral images, in 2017 IEEE Healthcare Innovations and Point of Care Technologies (HI-POCT), (2017), 144-147. <https://doi.org/10.1109/HIC.2017.8227605>
20. Şahin GA. Advances in Artificial Intelligence-aided Intraoral Imaging Analysis in Periodontics. *Black Sea Journal of Health Science*;7(5):218-25. <https://doi.org/10.19127/bshealthscience.1539717>
21. Li W, Liang Y, Zhang X, Liu C, He L, Miao L, Sun W. A deep learning approach to automatic gingivitis screening based on classification and localization in RGB photos. *Scientific Reports*. 2021 Aug 19;11(1):16831. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96091-3>
22. Li W, Guo E, Zhao H, Li Y, Miao L, Liu C, Sun W. Evaluation of transfer ensemble learning-based convolutional neural network models for the identification of chronic gingivitis from oral photographs. *BMC Oral Health*. 2024 Jul 17;24(1):814. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04460-x>
23. Ebron JG, Adante JR, Garcia ER, Marasigan MC, Tiongco PY. Application of Improved HSV Color Model for Early Gingivitis Detection using Image Processing and Machine Learning. In 2024 16th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE) 2024 Mar 14 (pp. 397-402). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCAE59995.2024.10569631>
24. Shen KL, Huang CL, Lin YC, Du JK, Chen FL, Kabasawa Y, Chen CC, Huang HL. Effects of artificial intelligence-assisted dental monitoring intervention in patients with periodontitis: a randomized controlled trial. *Journal of Clinical Periodontology*. 2022 Oct;49(10):988-98. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13675>
25. Deng K, Zonta F, Yang H, Pelekos G, Tonetti MS. Development of a machine learning multiclass screening tool for periodontal health status based on non-clinical parameters and salivary biomarkers. *Journal of Clinical Periodontology*. 2023 Sep 11; online ahead of print. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13856>
26. Yang M, Li C, Yang W, Chen C, Chung CH, Tanna N, Zheng Z. Accurate gingival segmentation from 3D images with artificial intelligence: an animal pilot study. *Progress in Orthodontics*. 2023 May 1;24(1):14. <https://doi.org/10.1186/s40510-023-00465-4>
27. Kuralt M, Cmok Kučić A, Gašperšič R, Grošelj J, Knez M, Fidler A. Gingival shape analysis using surface curvature estimation of the intraoral scans. *BMC oral health*. 2022 Jul 12;22(1):283. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02322-y>
28. Kuralt M, Kučić AC, Fidler A. Evaluation of gingival recessions with conventional versus digital methods. *Journal of Dentistry*. 2022 May 1;120:104093. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104093>
29. Kuralt M, Fidler A. Methods and parameters for digital evaluation of gingival recession: a critical review. *Journal of Dentistry*. 2022 Mar 1;118:103793. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103793>
30. Kuralt M, Fidler A, Kučić AC. Digital assessment of gingival thickness changes after initial periodontal treatment: comparison of central and interdental areas in the anterior maxillary region. *Journal of Dentistry*. 2022 Jun 1;121:103973. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.103973>
31. Lim HC, Lee J, Kang DY, Cho IW, Shin HS, Park JC. Digital assessment of gingival dimensions of healthy periodontium. *Journal of Clinical Medicine*. 2021 Apr 7;10(8):1550. <https://doi.org/10.3390/jcm10081550>
32. Lee S, Jin G, Park JH, Jung HI, Kim JE. Evaluation metric of smile classification by peri-oral tissue segmentation for the automation of digital smile design. *Journal of Dentistry*. 2024 Jun 1;145:104871. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.104871>

-
33. Tian S, Wang M, Ma H, Huang P, Dai N, Sun Y, Meng J. Efficient tooth gingival margin line reconstruction via adversarial learning. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2022 Sep 1;78:103954. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.103954>
 34. Chatterjee S, Malaiappan S, Yadalam PK, kumar Yadalam P. Artificial Intelligence (AI)-Based Detection of Anaemia Using the Clinical Appearance of the Gingiva. *Cureus*. 2024 Jun 20;16(6):e62792. <https://doi.org/10.7759/cureus.62792>
 35. Lakshmi TK, Dheebea J. Digital Decision Making in Dentistry: Analysis and Prediction of Periodontitis Using Machine Learning Approach. *International Journal of Next-Generation Computing*. 2022 Oct 1;13(3). <https://doi.org/10.47164/ijngc.v13i3.614>
 36. Pitchika V, Büttner M, Schwendicke F. Artificial intelligence and personalized diagnostics in periodontology: A narrative review. *Periodontology 2000*. 2024;1:220-231. <https://doi.org/10.1111/prd.12586>
 37. Krasnokutskyy O, Goncharuk-Khomyn M, Rusyn V, Tukalo I, Myhal O, Pal Y. Gingival recession treatment with the use of xenogeneic matrix: optimization of patient-centered outcomes by the digital soft tissue design. *Pesquisa Brasileira em Odontopediatria e Clínica Integrada*. 2022 Dec 5;22:e220098. <https://doi.org/10.1590/pboci.2022.063>
 38. Goncharuk-Khomyn M, Krasnokutskyy O, Boichuk M, Rusyn V, Hliudzyk-Shemota M. Spontaneous Recession Repair after Orthodontic Treatment: Case Report with the Use of Digital Approach for Quantification of Soft Tissue Changes. *Case Reports in Dentistry*. 2023;2023(1):1831125. <https://doi.org/10.1155/2023/1831125>