

Білей Анастасія Михайлівна,
аспірантка кафедри хірургічної стоматології та клінічних дисциплін,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
ORCID ID: 0009-0002-7673-6930
м. Ужгород, Україна

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

КЛАСИФІКАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ВИПАДКІВ ПЕРЕЛОМІВ ЕНДОДОНТИЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ: ПРОПОЗИЦІЯ ФОРМУВАННЯ ПРЕДИКТОРІВ ТА СХЕМИ ПРОГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗВИТКУ УСКЛАДНЕННЯ

Вступ. В літературі описані підходи до прогнозування успішності видалення зламаних ендодонтичних інструментів, які сприяють вибору того чи іншого підходу до менеджменту клінічного випадку, однак досі описані моделі для прогнозування саме ризику розвитку даного ускладнення базуються лише на регресійному опрацюванні даних різних за характеристиками вибірок, що провокує нівелювання можливості генералізації одержаних висновків.

Мета дослідження. Проаналізувати існуючі підходи до класифікації випадків перелому ендодонтичних файлів з урахуванням значущості основних факторів впливу, та виокремити категорії та чинники, котрі потенційно могли б бути використані у якості предикторів в структурі прогностичної моделі розвитку ускладнення.

Матеріали та методи. Опрацювання відібраних даних здійснювали з використанням багаторівневого аналітичного підходу, який передбачав: порівняльний аналіз різних класифікаційних систем з врахуванням їх дискримінаційної функції та прогностичної цінності; групування факторів ризику за логікою їх походження (клінічні умови, властивості інструмента, параметри проведення лікування); оцінку потенційної ролі окремих змінних як регресорів у мультипараметричних прогностичних моделях; аналіз можливості динамічного перегляду ризику перелому інструмента в процесі лікування. Розробка пропозиції прогностичної моделі оцінки ризику перелому ендодонтичних інструментів ґрунтувалася на поетапному аналітичному опрацюванні даних з метою трансформації описових і асоціативних факторів у формалізовані прогностичні змінні, придатні для подальшого математичного та алгоритмічного моделювання з урахуванням можливостей їх опрацювання із залученням обчислювальних потужностей алгоритмів машинного навчання.

Результати досліджень та їх обговорення. Отримані в ході аналізу дані засвідчили про доцільність переходу від статичних критеріїв оцінки зношування інструментів (кількість використань) до динамічних параметрів, що відображають реальні умови навантаження, тривалість функціонування та ступінь взаємодії з дентинними стінками в конкретних анатомічних умовах, котрі можуть бути використані в якості елементів прогностичної моделі. До найбільш стабільно відтворюваних факторів ризику перелому ендодонтичних файлів належать: вираженість і локалізація кривизни кореневого каналу, тип і кінематика рухів інструмента, швидкість обертання, геометричні параметри та металургійні властивості NiTi-файлів, а також досвід оператора й особливості клінічної техніки обробки кореневого каналу. Узагальнення отриманих даних дозволяє виокремити три базові групи детермінант ризику перелому ендодонтичних інструментів: фактори, пов'язані з вихідними клінічними умовами; фактори, обумовлені властивостями та станом інструмента; фактори, асоційовані з процесом лікування та оператором. Дана структуризація є методологічно доцільною основою для побудови багатопараметричної прогностичної моделі розвитку даного ускладнення.

Висновки. Проведений аналіз сучасних наукових джерел засвідчив відсутність уніфікованої, прогностично-орієнтованої класифікації випадків перелому ендодонтичних інструментів, оскільки більшість наявних підходів зосереджені переважно на описі локалізації фрагмента та виборі тактики менеджменту ускладнення, а не на оцінці ймовірності виникнення ускладнення як події в ході клінічного лікування. Наявні класифікації пошкоджень і деформацій ендодонтичних інструментів (зокрема, морфологічні та кінематичні) демонструють потенціал для використання окремих категорій як предикторів ризику перелому, однак їх прогностична цінність залишається недостатньо валідованою в умовах багатфакторного аналізу.

Ключові слова: стоматологія, зуб, ендодонтія, кореневий канал, інструмент, нікель-титановий сплав, ротаційний файл, сепарація (злам), ускладнення, прогноз, фактори ризику.

© Білей А. М., Гончарук-Хомин М. Ю., 2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

CLASSIFICATION APPROACHES OF ENDODONTIC INSTRUMENTS' FRACTURES CASES: PROPOSALS FOR THE FORMATION OF PREDICTORS AND PROGNOSTIC MODEL SCHEME REGARDING COMPLICATION DEVELOPMENT

Introduction. Literature sources describe approaches for the success prediction of fractured endodontic instrument retrieval, which facilitate the selection of appropriate management strategies for such clinical cases. However, existing models aimed at predicting the risk of occurrence for such complication itself are still primarily based on regression analyses of heterogeneous datasets, which limits the generalizability of the obtained conclusions.

Objective of the research. To analyze existing approaches for the classification of endodontic file fracture cases with the consideration of significance levels among key influencing factors, and to identify categories and determinants that could potentially be used as predictors within prognostic model of such complication development.

Materials and methods. Selected data was processed using multilevel analytical approach that included: comparative analysis of various classification systems with respect to their discriminatory capacity and prognostic value; grouping process of risk factors according to their origin (clinical conditions, instrument properties and treatment parameters); assessment of potential role of individual variables as regressors in multiparametric prognostic models; analysis of the feasibility for using dynamic reassessment of instrument fracture risk during treatment. Proposed prognostic model for assessing the risk of endodontic instrument fracture was developed through a stepwise analytical process aimed at transforming descriptive and associative factors into formalized prognostic variables suitable for further mathematical and algorithmic modeling, including processing using machine learning computational capabilities.

Results and discussion. Provided analysis demonstrated the expediency of shifting from static criteria for instrument wear assessment (such as the number of uses) toward dynamic parameters that reflect actual loading conditions, duration of functional use, and the degree of interaction with dentinal walls under specific anatomical conditions, which may serve as elements of prognostic model. The most consistently reproducible risk factors for endodontic file fracture include the severity and localization of root canal curvature, type and kinematics of instrument motion, rotational speed, geometric characteristics and metallurgical properties of NiTi files, as well as operator experience and specific clinical instrumentation techniques. Generalization of the obtained data allowed to identify three basic groups of determinants for endodontic instrument fracture risk: factors related to initial clinical conditions; factors determined by instrument properties and conditions; and factors associated with the treatment process and the operator. Such structuring approach represents methodologically appropriate basis for constructing a multiparametric prognostic model for this type of complication.

Conclusions. The analysis of contemporary scientific sources revealed the absence of unified, prognostically oriented classification of endodontic instrument fracture cases, as most existing approaches are primarily focused on describing fragment localization, while also at selecting complication management strategies rather than estimating the probability of its occurrence. Existing classifications of endodontic instrument damage and deformation (including morphological and kinematic classifications) demonstrate potential for using certain categories as predictors of fracture risk; however, their prognostic value remains insufficiently validated under conditions of multifactorial analysis.

Key words: dentistry, tooth, endodontics, root canal, instrument, nickel-titanium alloy, rotary file, separation (fracture), complication, prognosis, risk factors.

Вступ. В науковій літературі відмічається лише обмежена кількість публікацій присвячених прогнозуванню результатів ендодонтичних втручань на основі різних типів статистичних моделей, адаптованих до гетерогенних вибірок дослідження [1, 2, 3]. Сучасні обчислювальні потужності технологій машинного навчання та штучного інтелекту розширили можливості до обробки великих масивів даних та статистичного опрацювання нестандартизованих вибірок, що в свою чергу потенційно сприяє оптимізації підходів до предикції наслідків стоматологічного лікування, в тому числі і ендодонтичних маніпуляцій [4, 5, 6, 7]. Проте, тематика предикативних алгоритмів розвитку ускладнень в ендодонтичній практиці із застосуванням принципів машинного навчання досі залишається недостатньо опрацьованою [6, 7]. До прикладу, більшість доступних для аналізу публікацій, присвячених досвіду використання можливостей машинного навчання у вивченні проблеми сепарації ендодонтичних інструментів, описують підходи, сфокусовані на детекції фрагментів зламаних файлів за даними рентгенологічних досліджень, а не на обрахунку ймовірностей виникнення даного ускладнення, зважаючи на вихідні клінічні умови [8, 9, 10].

При цьому потребує зазначити, що поширеність розвитку ускладнень у формі перелому ендодонтичних інструментів під час лікування кореневих каналів за результатами аналізу клінічних та рентгенологічних даних 2911 пацієнтів складає 6% на рівні когорти досліджуваних ендодонтично-пролікованих зубів [11]. Хоча слід відмітити, що поширеність випадків даного ускладнення варіює за результатами різних досліджень, і дані мета-регресійного опрацювання пулу цільових публікацій дозволили констатувати поширеність такого на рівні 2,2% [12].

Проблема сепарації ендодонтичних інструментів в клінічній стоматологічній практиці залишається актуальною одразу з декількох аспектів: 1) по причині відсутності адекватних підходів до прогнозування ризику, а відтак – і системного попередження розвитку даного ускладнення, приймаючи до уваги варіативний вплив сукупності вихідних умов у кожній окремій клінічній ситуації; 2) по причині непрогнозованої ефективності застосованих підходів до менеджменту даного ускладнення, зважаючи на те, що прийняття клінічних рішень у ситуаціях з переломом ендодонтичного файлу всередині кореневого каналу часто базується на суб'єктивній оцінці вірогідності успішності специфічної методики їх

вилучення, обраної безпосередньо лікарем-стоматологом, без врахування імпаку супутніх клінічно-значущих факторів [8, 9, 12, 13, 14].

В літературі описані підходи до прогнозування успішності вилучення зламаних ендодонтчних інструментів, які сприяють вибору того чи іншого підходу до менеджменту даного клінічного випадку [14], однак досі описані моделі для прогнозування саме ризику розвитку даного ускладнення базуються лише на регресійному опрацюванні даних різних за характеристиками вибірок, що провокує нівелювання можливості генералізації одержаних висновків.

Мета. Проаналізувати існуючі підходи до класифікації випадків перелому ендодонтчних файлів з урахуванням значущості основних факторів впливу, та виокремити категорії та чинники, котрі потенційно могли б бути використані у якості предикторів в структурі прогностичної моделі розвитку ускладнення.

Матеріали та методи. Дослідження було виконано у форматі аналітичного опрацювання та концептуального узагальнення даних, екстрагованих із цільових наукових джерел, із фокусом на реалізації структурного аналізу підходів до класифікації випадків переломів ендодонтчних інструментів та ідентифікації детермінант ризику, які можуть бути використані як змінні у прогностичних моделях розвитку даного ускладнення. Загальна методологія дослідження була спрямована на перехід від ретроспективного опису факторів ризику до їх прогностичної інтерпретації із подальшою можливістю використання відібраних змінних у структурі моделей машинного навчання або інших інструментів кількісної оцінки ризику перелому ендодонтчних інструментів у клінічній практиці.

Цілеспрямований пошук наукових публікацій здійснювали в електронних базах PubMed/MEDLINE (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), Scopus (www.scopus.com), а також та через пошукову систему Google Scholar (scholar.google.com). Відбір наукових робіт передбачав акумуляцію таких, опублікованих в період з 2000 по 2025 роки, що дозволило охопити еволюцію підходів до проблематики перелому ендодонтчних інструментів від класичних концепцій до сучасних предикативних і цифрових моделей.

Верифіковані цільові публікації були аналітично опрацьовані у разі репрезентації в структурі таких первинних або вторинних даних, релевантних для оцінки факторів ризику та класифікаційних ознак перелому ендодонтчних файлів, а саме:

- кількісні показники частоти або ймовірності сепарації ендодонтчних інструментів;
- опис або формалізація класифікації переломів ендодонтчних інструментів за локалізацією, морфологією ушкодження, кінематикою руху чи механізмом втоми;
- аналіз впливу анатомічних, інструмент-асоційованих, оператор-асоційованих та технічних факторів;
- дані, придатні для подальшої параметризації (кут і радіус кривизни, швидкість обертання, кількість або тривалість використання, тип руху, конусність, досвід оператора тощо).

Публікації, що мали суто описовий характер без аналітичної інтерпретації або оцінки кількісних співвідношень між змінними не підлягали контент-аналізу.

Опрацювання відібраних даних здійснювали з використанням багаторівневого аналітичного підходу, який передбачав:

- порівняльний аналіз різних класифікаційних систем з врахуванням їх дискримінаційної функції та прогностичної цінності;
- групування факторів ризику за логікою їх походження (клінічні умови, властивості інструмента, параметри проведення лікування);
- оцінку потенційної ролі окремих змінних як регресорів у мультипараметричних прогностичних моделях;
- аналіз можливості динамічного перегляду ризику перелому інструмента в процесі лікування.

Отримані дані інтерпретува• и шляхом концептуального моделювання, спрямованого на виокремлення ключових категорій факторів та побудову логічних зв'язків між такими.

Запропонований підхід був орієнтований на трансформацію фрагментованих наукових даних у структуровану систему змінних, придатну для подальшої обробки та калібрації з використанням статистичних моделей квантифікації ризику перелому ендодонтчних інструментів, що має практичну значущість для підвищення безпеки та прогнозованості ендодонтчного лікування.

Розробка пропозиції прогностичної моделі оцінки ризику перелому ендодонтчних інструментів ґрунтувалася на поетапному аналітичному опрацюванні даних, з метою трансформації описових і асоціативних факторів у формалізовані прогностичні змінні, придатні для подальшого математичного та алгоритмічного моделювання з урахуванням можливостей їх опрацювання із залученням обчислювальних потужностей алгоритмів машинного навчання.

Результати дослідження та їх обговорення. В ході реалізації етапу опрацювання первинно відібраних публікацій було проведено систематизацію найбільш значущих факторів впливу, асоційованих із ризиком перелому ендодонтчних файлів, з подальшою оцінкою їх значущості як змінних комплексної прогностичної моделі (при наявності відповідних вихідних даних щодо впливу таких, оцінених на первинних досліджуваних вибірках). Зокрема у тематичному огляді Ogozso-Osamro Y. та колег було виявлено значущість впливу наступних факторів на ризик перелому ендодонтчних інструментів, які можна класифікувати наступним чином: 1) асоційовані з технологією виготовлення файлу (трансформація фаз нікель-титанового (NiTi) інструменту, тип металургійної технології обробки); 2) асоційовані з геометрією файла (маса серцевини файла, площа та форма перерізу, кут різьби, конусність та ін.); 3) асоційовані з роботою файла та прикладеним навантаженням (тип рухів файла, робота в ручному режимі чи в ендонаконечнику, стійкість до торсійної та циклічної втоми); 3) асоційовані із іригацією та стерилізацією (корозійні ефекти використовуваних ірригантів, термовпливи, що провокують деформацію); 4) асоційовані з анатомічними особливостями [15].

Аналіз проведений згідно описаної вище методології дозволив виокремити вплив групи анатомічно-асоційованих факторів, котрі були пов'язані із випадками перелому ендодонтичних файлів, та квантифіковані різним чином у проведених попередньо дослідженнях. Зокрема, у спостереженні Handa A. та колеги, проведеному на когорті майже трьох тисяч досліджуваних зубів, автори відмітили, що найчастіше випадки розвитку переломів ендодонтичних інструментів відмічалися в апікальній ділянці кореня, і при цьому поширеність таких відрізнялася в проекції різних зубів (найчастіше в перших верхніх та нижніх молярах) [11]. Важливо відмітити, що більше половини усіх випадків переломів файлів, які мали місце в апікальній та середній третинах кореня, розвивалися в структурі мезіо-щічних каналів (62,86% та 57,14% відповідно), і лише у випадках перелому в корональній третині такі були в однаковій мірі розподілені між щічними (21,43%) та мезіо-щічними каналами (28,57%), акумулюючи в таких близько половини усіх випадків [11].

Аналогічні показники з вищою частотою розвитку переломів в апікальній частині та в проекції молярів були відмічені і в інших клінічних ретроспективних дослідженнях [16, 17]. Важливо відмітити, що не зважаючи на достатній обсяг первинно досліджуваної вибірки ендодонтично-пролікованих зубів та зареєстрованих випадків ускладнень, автори не проводили додаткового статистичного опрацювання даних для квантифікації показників відносних ризиків, а лише констатували значущість статистичної різниці між окремими порівнюваними категоріями [11, 16, 17].

Rao A. та колеги запропонували дворівневу систему класифікації випадків перелому ендодонтичних інструментів [18]. На першому рівні дана система тотожна уже попередньо повідомленим підходам щодо категоризації випадків ускладнення, виходячи з рівня локалізації фрагменту (у корональній, середній чи апікальній третинах кореня), однак надалі вона була вдосконалена щодо параметру продовжуваності фрагменту із первинної ділянки візуалізації по ходу кореневого каналу в цілому, чи за його межі. Другий рівень класифікації передбачає виокремлення випадків щодо локалізації сепарованого фрагменту перед початком кривизни кореневого каналу, на рівні кривизни, та за кривизною [18]. Підхід запропонований авторам в більшій мірі спрямований для вибору протоколу менеджменту по факту виникнення ускладнення, однак потребує уваги той факт, що в структурі запропонованої класифікації повторно акцентовано значущість параметру кривизни. Більшість проаналізованих авторами випадків переломів файлів були відмічені саме в структурі кривизни (54,3%) [18].

Робота Kosti E. та колеги продемонструвала вплив вираженості вигину кореневого каналу на ймовірність розвитку перелому або критичної деформації ендодонтичних файлів [19]. Зокрема, вигин кореневого каналу з характеристиками $30\pm 10^\circ$ та радіусом в 2 ± 1 мм провокував зниження ймовірності підтримки функціонального стану файлу з розмірними характеристиками в 25/0.06 до 70% після десятикратного використання у вищезазначених умовах, тоді як характеристики

вигину в $60\pm 10^\circ$ та радіусу 2 ± 1 мм знижували таку ймовірність до 45% після аналогічної кількості використань [19]. На отриманих шкалах виживання дослідники відмітили значущість впливу таких факторів як розмір інструменту та кількість використань на ймовірність досягнення ними функціонально-неприйнятнього стану [19].

Базуючись на отриманих даних, автори резюмували, що перелом ендодонтичного файлу не є результатом суто кумулятивного накопичення втоми, а в структурі ризику розвитку такого присутній також елемент ймовірності, котрий базується на комбінації впливу одразу декількох факторів в конкретно визначений момент часу [18, 19]. Ці дані підтверджуються також показники мета-регресійного дослідження, яке засвідчило відсутність статистичної різниці у поширеності випадків перелому ендодонтичних файлів при використанні таких для обробки 1-4 зубів (0,32-0,33%), натомість при обробці файлами більше 4 зубів поширеність даного виду ускладнень підвищувалась до 6,98% для ручних і до 5,79-7,09% для машинних файлів, проте не було встановлено жодних чітких порогових значень, лише межі діапазонів [12]. Така особливість обумовлює потребу перегляду критеріїв, які оцінюють зв'язок між ризиком перелому та впливом експлуатаційних характеристик, які повинні бути систематизовані не навколо кількості циклів використання, а навколо більш клінічно-релевантних параметрів продовжуваного характеру, як наприклад, тривалості використання в певних одиницях часу в перерахунку на специфічні клінічні умови (до прикладу, кількість секунд функціонування на певній глибині кореневого каналу з певним рівнем залученості граней із оточуючими дентинними стінками в попередньо визначених умовах кривизни). Крім фактору вираженості кривизни, квантифікованої за рахунок кута та радіуса, важливо також виокремити ділянку ініціації кривизни, оскільки більш коронально розміщена кривизна з вищою ймовірністю провокуватиме розвиток сепарацій ендодонтичного інструменту, аніж апікально-локалізована [13, 20]. Відтак характеристики вираженості кривизни та її локалізації можуть бути використані як окремі класифікаційні елементи у структурі предикативної моделі оцінки ризику перелому ендодонтичних інструментів.

Особливості первинної обробки кореневих каналів, зокрема формування прямолінійного доступу та вихідне розширення усть, як і підтримка апікальної прохідності, також є факторами впливу на ризик розвитку ускладнень, в тому числі і сепарацій ендодонтичних інструментів, проте об'єктивізація значущості таких виражена у конкретних чисельних показниках потребує подальшого уточнення [21].

Водночас попередні наукові роботи підкреслили наявність виражених взаємозв'язків між анатомічними особливостями випадків ендодонтичного лікування та впливу таких на зміни стану ендодонтичних файлів та модифікацію підходів до інструментації. Зокрема, Gambarini G. та колеги запропонували класифікацію особливостей кінематики ендодонтичних інструментів, що була асоційована із змінами патернів розви-

тку та прогресування циклічної втоми в структурі таких, яку дослідники квантифікували за часом роботи файлу необхідним для виникнення його сепарації [22]. Автори запропонували наступні категорії руху ендодонтичних інструментів: 1) продовжувана ротація з повним обертом; 2) альтернативний реципрокний рух (два реципрокні кути оберту є рівними і меншими за 90°, відтак інструмент не досягає ефекту повного оберту); 3) ротаційний реципрокний рух (один кут руху є більшим за наступний, відтак серійне повторення таких в кінцевому результаті провокує повне обертання інструменту в кореновому каналі); 4) комбіновані рухи (комбінація рухів описаних вище, які, як правило, запрограмовані в структурі ендомотору і не підлягають модифікації) [22]. При апробації інструментів в лабораторних умовах на моделі каналу з 90° вигином та 2 мм радіусу кривизни, дослідники відмітили, що найшвидше перелом виникав саме в умовах продовжуваної повної ротації (8,43 ± 1,27 секунд), тоді як в умовах реципрокного руху з 90° обертом за та проти часової стрілки перелом виникав через 213,39 ± 27,45 секунд [22]. Попередній систематичний огляд та мета-регресійне опрацювання також засвідчили, що поширеність перелому файлів з чистим ротаційним рухом є вищою, аніж з реципрокним рухом (2,43% проти 1,0%), хоча статистично підтвердити дану різницю на основі пулу доступних даних не вдалося [12].

Враховуючи таку значущу різницю, можна констатувати важливість категоризації кінематики рухів ендодонтичних файлів як регресорів мультипараметричної моделі прогнозу та оцінки ризику перелому таких з умовою попередньої їх калібрації та адаптації до різних систем використовуваних файлів, а також з урахуванням розмірних характеристик інструментів. При цьому загально виявлені тенденції також засвідчують, що файли великого діаметру та більшої конусності є менш резистентними до циклічної втоми [13]. Gabel W. та колеги засвідчили чотириохратне зростання ризику перелому ротаційних нікель-титанових інструментів при швидкості їх обертання 333,33 об./хв. в порівнянні із 166,67 об./хв. [23], відтак різні категорії швидкості обертання файлів, а не тільки патернів їх руху, також можуть бути застосовані у якості регресорів прогностичної системи оцінки ризику сепарації ендодонтичних інструментів.

Важливо відмітити, що частина детермінант прогнозу ризику перелому ендодонтичного інструменту в ході ендодонтичного лікування повинна переглядатися динамічно в процесі лікування. Це обґрунтовано результатами дослідження Sattapan B. та колег, в якому автори показали, що 50% інструментів, котрі рутинно і повторно використовуються в ендодонтичній практиці, характеризуються наявністю візуально-видимих дефектів, а 28% – наявністю дефектів без переломів [24]. Shen S. та колеги засвідчили вищу поширеність дефектів в структурі використовуваних ендодонтичних інструментів серед таких з конусністю 0.04 та 0.06 [24]. Аналогічно найвищу поширеність випадків переломів серед ендодонтичних файлів з конусністю в 0.06 було повідомлено в дослідженні Di Fiore P. та колег [26]. Очевидно, що ризик перелому таких є вищим,

аніж ризик перелому інструментів, які використовуються перший раз, а відтак кількість використань також може бути застосована у якості окремої класифікації в структурі комплексної багатопарової моделі прогнозу сепарації ендодонтичних файлів під час їх клінічної експлуатації.

Власне Sotokawa T. запропонував категоризацію випадків пошкоджень ендодонтичних файлів наведену у таблиці 1 [27], яку потенційно можна використати як окремий елемент згорткової нейронної мережі.

Таблиця 1

Категоризація випадків пошкоджень ендодонтичних файлів за Sotokawa T. [27]

Тип пошкодження	Опис
Тип I	Зігнутий інструмент
Тип II	Розтягнення або випрямлення завиток інструменту без згинання
Тип III	Відшарування або розрив металу по краях інструмента без згинання чи випрямлення завиток інструменту
Тип IV	Часткове зворотне скручування інструмента
Тип V	Утворення тріщин уздовж осі файла
Тип VI	Перелом інструмента

В свою чергу типові випадки переломів автори систематизували у наступних варіантах: 1) виражене подовження або зворотне скручування завиток ріжучої частини файла; 2) незначне подовження завиток або майже повна відсутність помітних порушень структури файла; 3) утворення тріщин, паралельних осі файла [27]. Дана класифікація сприяє формуванню двосторонньої категоризаційної системи відповідей з розгалуженням відмінних показників ризиків для різних типів пошкоджень щодо розвитку різних варіантів деформацій та переломів. При цьому також слід враховувати вихідні дефекти файлів, отримані в ході їх виготовлення та металургійної обробки, які можуть бути кількісно та якісно оцінені з використанням додаткових методів дослідження, зокрема з використанням скануючої електронної мікроскопії, та адаптованих для даного методу систем оцінки, що було відображено у роботах Shen S. та колег, Noenko I. та Goncharuk-Khomyn M. [25, 28, 29].

Доцільність динамічного, а не тільки вихідного моніторингу за станом ендодонтичних інструментів також була аргументована результатами реєстрації спектральних показників, на основі котрих було підтверджено значущість акустично-емісійного аналізу для неруйнівного контролю стану NiTi-інструментів у режимі реального часу та подальшого предикативного виявлення структурних змін, які передують перелому файла. Крім того, вплив технології виготовлення та конверсії фаз обґрунтований тип, що нікель-титанові інструменти у фазі мартенситу характеризуються вищою резистентністю до циклічної втоми, аніж файли у фазі аустеніту [13]. На основі отриманих результатів Davril J. та колегами було запропоновано наступну класифікацію спектральних діапазонів, асоційованих з ризиком розвитку деформацій

та зламів в структурі ендодонтичного інструменту: 1) спектральний сегмент 1 – характеризує мікропластичність, динаміку дислокацій, повільну мартенситну трансформацію або початок псевдоеластичної фази; 2) спектральний сегмент 2 – характеризує активну мартенситну трансформацію, ініціацію внутрішніх і поверхневих мікротріщин у ділянках попередньо наявних дефектів поверхні; 3) спектральний сегмент 3 – характеризує динамічне поширення ушкоджень, формування мікротріщин у структурі інструменту; 4) спектральний сегмент 4 – характеризує злиття мікротріщин із подальшою пропанацією перелому інструменту та розвитком локальної нестабільності матеріалу (декогезія, фрактура) [30]. Таким чином, ця класифікація є спробою перетворити фізичні процеси в металі інструмента на кількісно вимірювані акустичні «ознаки», що мають прогностичну цінність. Ідея динамічного моніторингу полягає в тому, щоб у реальному часі визначати, на якій стадії деградації перебуває інструмент, і ще до зламу виявляти перехід у небезпечні зони. Описаний підхід відображає методологію динамічного моніторингу прогностичної спрямованості, проте така потребує калібрації для інструментів із різними вихідними характеристиками. Доцільним є застосування такого підходу для збору даних в структуру одного із шарів згорткової нейронної мережі.

Аналогічний за своєю спрямованістю моніторингово-прогностичний підхід був запропонований у низці робіт Thakur V. та колег, в яких дослідники запропонували методологію використання принципів машинного навчання для прогнозування стану ендодонтичних інструментів під час обробки корневих каналів [31]. Виходячи з того, що злам файлу часто є неконтрольованим для лікаря та має стохастичний характер, даний феномен потребує об'єктивного, автоматизованого та динамічного моніторингу. У роботах дослідницької групи пропонувалось реєструвати силові сигнали під час роботи інструмента за допомогою динамометра, виділяючи із них статистичні ознаки, які в подальшому обробляються алгоритмами штучного інтелекту [21]. Для усунення дисбалансу між функціонально-здатними та «дефектними» (компрометованими) станами інструментів було запропоновано застосовувати SMOTE-алгоритм, а для класифікації й прогнозу – статистичні моделі Gaussian Naïve Bayes, QSVM, FKNN та ансамблеві моделі обробки даних [31]. Динамічна оцінка стану інструмента в реальному часі базується на основі опрацювання згладжених часових характеристик сигналу та адаптації експоненціальної моделі деградації для прогнозу моменту критичного пошкодження [21]. У сукупності ці дослідження демонструють можливість переходу від реактивної (відповідь на пошкодження чи ускладнення) до предикативної системи ендодонтії, коли критичні рівні зношування та мікропошкоджень інструменту можуть бути виявлені ще до пропанації перелому, відтак клініцист отримує можливість для модифікації клінічних рішень з метою підвищення безпеки, ефективності та прогнозованості ендодонтичного лікування.

Важливим елементом у прогнозі ризиків перелому ендодонтичних інструментів є досвід оператора, котрий проводить втручання, оскільки дані мета-регресійного опрацювання відмітили, що відношення шансів виникнення перелому може змінювати в 34-кратному діапазоні значень при порівнянні груп лікарів-стоматологів загальної практики, ендодонтистів та студентів [12].

Доступні на сьогодні підходи до вихідної оцінки складності ендодонтичного лікування, оціночні складові категорій котрих потенційно могли б бути використані в якості предикторів розвитку різного роду ускладнень, наразі, хоч і демонструють наявність статистичних зв'язків із ризиком розвитку перелому ендодонтичного інструменту [32], проте такі є недостатньо уточненими та класифікаційна значущість таких наразі залишається предметом подальших досліджень переважно ретроспективного, а не проспективного характеру [33, 34, 35]. З іншої сторони досі невідомо, чи категорії виокремлені в структурі шкал оцінки складності випадку ендодонтичного лікування володіють достатньою дискримінаційною здатністю щодо прогнозування ризику перелому ендодонтичного інструменту, оскільки в роботі Herbst S. та колег ці ж категорії виявилися недостатніми для прогнозування ймовірності досягнення конкретної довжини obturaції кореневого каналу при залученні алгоритмів машинного навчання [36].

Відтак дані клінічних і лабораторних досліджень підтверджують мультифакторну природу випадків перелому ендодонтичних файлів, при якій жоден окремих чинник не може бути розцінений в якості достатньо валідного незалежного предиктора, а ризик ускладнення формується внаслідок поєднання впливу факторів, асоційованих із анатомічними особливостями кореневого каналу, характеристиками інструмента та умовами його клінічного використання. Перспективним напрямом є інтеграція даних динамічного моніторингу стану інструментів (акустично-емісійні сигнали, силові та часові характеристики) з методами машинного навчання, що створює передумови для формування предикативних моделей раннього виявлення критичних стадій деградації файлів до моменту їх сепарації. Базуючись на отриманих даних можна виокремити три основні категорії факторів, котрі пов'язані зі змінами показників ризику перелому ендодонтичних інструментів в ході лікування корневих каналів: 1) фактори, асоційовані із вихідними умовами клінічної ситуації; 2) фактори, асоційовані з використанням ендодонтичним інструментом; 3) фактори, асоційовані з реалізацією процесу лікування (включаючи оператор-асоційовані фактори). Враховуючи, що аналогічні підходи до систематизації факторів ризику перелому ендодонтичних інструментів були уже попередньо повідомлені, слід зазначити, що особливість запропонованої нами методології передбачає аналіз впливу окремих факторів не лише перед початком процедури лікування корневих каналів, а й ітеративно по ходу динамічного моніторингу змін стану використовуваних інструментів та характеристик кореневого каналу. Крім того, авторами вперше запропонований

наступний алгоритм до формування прогностичної моделі розвитку ускладнення у формі перелому ендодонтичних файлів, приймаючи до уваги результати проведеного аналізу:

1) структурна декомпозиція факторів ризику із подальшим групуванням їх у логічно однорідні блоки (клініко-анатомічні, інструмент-асоційовані та оператор-асоційовані); для кожного фактора слід оцінювати потенціал кількісної репрезентації, стабільність верифікованих зв'язків із ризиком перелому, а також можливість його незалежного або комбінованого впливу в межах мультипараметричної системи;

2) відбір пулу предикторів на основі сукупності критеріїв (повторюваність впливу, біомеханічна та клінічна обґрунтованість впливу, наявність кількісних порогових або градієнтних характеристик); фактори з дефіцитом обґрунтування чи такі без чіткої тенденції впливу потенційно можуть розглядатися як допоміжні;

3) побудова ієрархічної моделі взаємодії факторів, у якій враховується не лише ізольована дія окремих змінних, але й їх синергійний ефект у конкретних клінічних сценаріях (наприклад, поєднання вираженої кривизни кореневого каналу з підвищеною конусністю інструмента та високою швидкістю обертання); в структурі даного етапу передбачено проведення моніторингу за взаємозмінами факторів, значущість яких може динамічно варіювати в процесі лікування, що обґрунтовує доцільність використання часових або кумулятивних параметрів у майбутній реалізації моделі;

4) концептуалізація ризику як безперервної змінної, а не дискретної події, що дозволяє розглядати перелом інструмента як результат прогресуючої деградації функціонального стану файлу з наявністю стохастичної складової (інтеграція даних щодо кінематики руху, циклічної та торсійної втоми);

5) визначення принципів побудови прогностичної моделі та її перевірка на відповідність таким, які

включають: 1) мультипараметричність із можливістю вагової адаптації факторів; 2) модульну структуру з окремими блоками оцінки вихідного ризику та ризику, що змінюється під час лікування; 3) потенційну інтеграцію методів машинного навчання для обробки нелінійних взаємозв'язків між змінними; 4) можливість калібрації моделі для різних систем ендодонтичних інструментів і клінічних умов.

Запропонований підхід слугує теоретично-методологічною основою для подальших проспективних досліджень та експериментальної валідації прогностичної моделі оцінки ризику перелому ендодонтичних файлів із перспективою її клінічної імплементації як інструменту підтримки прийняття рішень. Запропонована авторами схема будови прогностичної моделі ризику розвитку перелому ендодонтичних файлів з урахуванням результатів систематизації факторів впливу, їх групування у однорідні блоки, а також у відповідності до описаного вище алгоритму побудови з урахуванням можливостей інтеграції обчислювальних можливостей машинного навчання представлена на (рис. 1).

Висновки. Проведений аналіз засвідчив відсутність уніфікованої, прогностично-орієнтованої класифікації випадків перелому ендодонтичних інструментів, оскільки більшість наявних підходів зосереджені переважно на описі локалізації фрагмента та виборі тактики менеджменту ускладнення, а не на оцінці ймовірності виникнення ускладнення як події в ході клінічного лікування. Наявні класифікації пошкоджень і деформацій ендодонтичних інструментів (зокрема, морфологічні та кінематичні) демонструють потенціал для використання окремих категорій як предикторів ризику перелому, однак їх прогностична цінність залишається недостатньо валідованою в умовах багатофакторного аналізу. Крім того отримані в ході аналізу дані засвідчили доцільність переходу від ста-

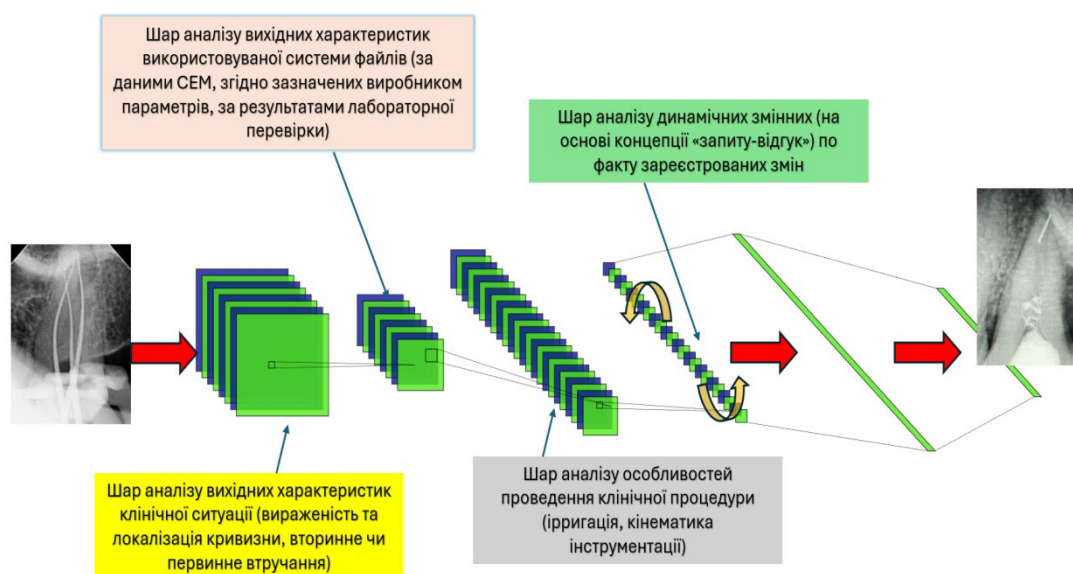


Рис. 1. Авторська схема будови прогностичної моделі розвитку перелому ендодонтичних файлів з урахуванням результатів систематизації факторів ризику, їх групування у однорідні блоки та можливостей залучення потужностей машинного навчання

тичних критеріїв оцінки зношування інструментів (кількість використань) до динамічних параметрів, що відображають реальні умови навантаження, тривалість функціонування та ступінь взаємодії з дентинними стінками в конкретних анатомічних умовах, котрі можуть бути використані в якості елементів прогностичної моделі. До найбільш стабільно відтворюваних факторів ризику перелому ендодонтичних файлів належать: вираженість і локалізація кривизни кореневого каналу, тип і кінематика рухів інструмента, швидкість обертання, геометричні параметри та металургійні властивості NiTi-файлів, а також досвід оператора й особливості клінічної техніки обробки

кореневого каналу. Узагальнення отриманих даних дозволяє виокремити три базові групи детермінант ризику перелому ендодонтичних інструментів, аналіз котрих повинен проводитися в динаміці, а також бути відображений у структурі прогностичної моделі за принципом «запит-відгук»: фактори, пов'язані з вихідними клінічними умовами; фактори, обумовлені властивостями та станом інструмента; фактори, асоційовані з процесом лікування та оператором. Дана структурізація є методологічно доцільною основою для побудови багатопараметричної прогностичної моделі розвитку ускладнення у формі перелому ендодонтичного файлу.

REFERENCES

1. Lu J, Cai Q, Chen K, Kahler B, Yao J, Zhang Y, Zheng D, Lu Y. Machine learning models for prognosis prediction in regenerative endodontic procedures. *BMC Oral Health*. 2025 Feb 13;25(1):234. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05531-3>
2. Jang YE, Kim Y, Kim SY, Kim BS. Predicting early endodontic treatment failure following primary root canal treatment. *BMC Oral Health*. 2024 Mar 12;24(1):327. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-03974-8>
3. Zebouni C, Shirodkar G, Ather A, Sarkis RA. Artificial Intelligence and Prognosis of Treatment in Endodontics. *Dental Clinics*. 2025 Oct 1;69(4):527-40. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2025.05.003>
4. Boreak NM. Effectiveness of artificial intelligence applications designed for endodontic diagnosis, decision-making, and prediction of prognosis: a systematic review. *The Journal of Contemporary Dental Practice*. 2020 Dec 28;21:926-34. <https://doi.org/10.5005/JP-JOURNALS-10024-2894>
5. Qu Y, Lin Z, Yang Z, Lin H, Huang X, Gu L. Machine learning models for prognosis prediction in endodontic microsurgery. *Journal of Dentistry*. 2022 Mar 1;118:103947. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.103947>
6. Lee J, Seo H, Choi YJ, Lee C, Kim S, Lee YS, Lee S, Kim E. An endodontic forecasting model based on the analysis of preoperative dental radiographs: a pilot study on an endodontic predictive deep neural network. *Journal of endodontics*. 2023 Jun 1;49(6):710-9. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2023.03.015>
7. 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>
8. Özbay Y, Kazangirler BY, Özcan C, Pekince A. Detection of the separated endodontic instrument on periapical radiographs using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. *Australian Endodontic Journal*. 2024 Apr;50(1):131-9. <https://doi.org/10.1111/aej.12822>
9. Çatmabacak ED, Çetinkaya İ. Deep learning algorithms for detecting fractured instruments in root canals. *BMC Oral Health*. 2025 Feb 23;25(1):293. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05652-9>
10. İnönü N, Aksoy U, Kırmızı D, Aksoy S, Akkaya N, Orhan K. Deep learning-based detection of separated root canal instruments in panoramic radiographs using a U2-Net architecture. *Diagnostics*. 2025 Jul 9;15(14):1744. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15141744>
11. Handa A, Bhullar KK, Sandhu RM, Kaur M, Khurana S. Incidence of Endodontic Instruments Separation among the Patients Undergoing Endodontic Treatment. *Indian Journal of Dental Research*. 2024 Oct 1;35(4):417-20. https://doi.org/10.4103/ijdr.ijdr_746_23
12. Gomes MS, Vieira RM, Böttcher DE, Plotino G, Celeste RK, Rossi-Fedele G. Clinical fracture incidence of rotary and reciprocating NiTi files: A systematic review and meta-regression. *Australian Endodontic Journal*. 2021 Aug;47(2):372-85. <https://doi.org/10.1111/aej.12484>
13. Terauchi Y, Ali WT, Abielhassan MM. Present status and future directions: removal of fractured instruments. *International Endodontic Journal*. 2022 May;55:685-709. <https://doi.org/10.1111/iej.13743>
14. Lin C, Xu L, Chen YX, Liang Y, Chen XL, Lin Y, Huang XQ, Fang Y, Chen Z. A statistical model for predicting the retrieval rate of separated instruments and clinical decision-making. *Journal of Dental Sciences*. 2015 Dec 1;10(4):423-30. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2015.05.001>
15. Orozco-Ocampo YM, Escobar-Rincón D, Jiménez-García FN, Álvarez-Vargas CA, Jaramillo-Gil PX. Factors influencing NiTi endodontic file separation: A thematic review. *Dental and Medical Problems*. 2024;61(2):269-78. <https://doi.org/10.17219/dmp/156805>
16. Al-Nazhan S, Al-Attas MH, Al-Maflehi N. Retrieval outcome of separated endodontic instruments by Saudi endodontic board residents: A Clinical retrospective study. *Saudi Endodontic Journal*. 2018 May 1;8(2):77-81. https://doi.org/10.4103/sej_sej_13_18
17. Alamoudi RA, Alfarran A, Alnamkani B, Howait M, Alghamdi NS, Ain TS. Assessment of incidence, management and contributory factors of root canal instrument separation in an endodontics post-graduate program: A retrospective clinical study. *Nigerian Journal of Clinical Practice*. 2024 Jan 1;27(1):16-21. https://doi.org/10.4103/njcp.njcp_833_22
18. Rao AS, Surana MA, Shah N, Pawar AM. A nationwide cross-sectional study on endodontic instrument fractures and development of a comprehensive classification system. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*. 2025 Sep 1;28(9):916-24. https://doi.org/10.4103/JCDE.JCDE_307_25

-
19. Kosti E, Zinelis S, Molyvdas I, Lambrianidis T. Effect of root canal curvature on the failure incidence of ProFile rotary Ni-Ti endodontic instruments. *International Endodontic Journal*. 2011 Oct;44(10):917-25. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01900.x>
 20. Peters OA, Paqué F. Current developments in rotary root canal instrument technology and clinical use: a review. *Quintessence International*. 2010 Jun 1;41(6).
 21. Roland DD, Andelin WE, Browning DF, Hsu GH, Torabinejad M. The effect of preflaring on the rates of separation for 0.04 taper nickel titanium rotary instruments. *Journal of Endodontics*. 2002 Jul 1;28(7):543-5. <https://doi.org/10.1097/00004770-200207000-00015>
 22. Gambarini G, Piasecki L, Miccoli G, Gaimari G, Di Giorgio R, Di Nardo D, Azim AA, Testarelli L. Classification and cyclic fatigue evaluation of new kinematics for endodontic instruments. *Australian Endodontic Journal*. 2019 Aug;45(2):154-62. <https://doi.org/10.1111/aej.12294>
 23. Gabel WP, Hoen M, Steiman HR, Pink FE, Dietz R. Effect of rotational speed on nickel-titanium file distortion. *Journal of Endodontics*. 1999 Nov 1;25(11):752-4. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(99\)80124-1](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(99)80124-1)
 24. Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JE, Messer HH. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. *Journal of Endodontics*. 2000 Mar 1;26(3):161-5. <https://doi.org/10.1097/00004770-200003000-00008>
 25. Shen SM, Deng M, Wang PP, Chen XM, Zheng LW, Li HL. Deformation and fracture of K3 rotary nickel-titanium endodontic instruments after clinical use. *International endodontic journal*. 2016 Nov;49(11):1088-94. <https://doi.org/10.1111/iej.12561>
 26. Di Fiore PM, Genov KA, Komaroff E, Li Y, Lin L. Nickel-titanium rotary instrument fracture: a clinical practice assessment. *International Endodontic Journal*. 2006 Sep;39(9):700-8. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2006.01137.x>
 27. Sotokawa T. An analysis of clinical breakage of root canal instruments. *Journal of Endodontics*. 1988 Feb 1;14(2):75-82. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(88\)80005-0](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(88)80005-0)
 28. Noenko I, Goncharuk-Khomyn M. Scanning Electronic Microscopy Surface Characteristics of Six Endodontic Files Systems Available in Ukraine: Observational Study. *Journal of International Dental & Medical Research*. 2023 Jan 1;16(1):24-31.
 29. Noenko I, Goncharuk-Khomyn M, Belun V, Biley A. Counterfeit Endodontic Files Features Objectified with Scanning Electronic Microscopy: Comparative Study of SOCO SC Pro Original and Falsified Rotary Instruments. *Journal of International Dental & Medical Research*. 2023 Apr 1;16(2):565-573.
 30. Davril J, Hocquel R, Vincent M, Balthazard R, Claude S, Mortier E, Baldit A, Rahouadj R. A first step towards the detection of damage processes in endodontic Ni-Ti alloy files, using acoustic emission. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2024 Dec 1;160:106743. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106743>
 31. Thakur VS, Kankar PK, Parey A, Jain A, Jain PK. Health prediction of reciprocating endodontic instrument based on the machine learning and exponential degradation models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2023 Oct;237(10):1202-14. <https://doi.org/10.1177/09544119231196285>
 32. Mumcu AK, Çorak M, Kurnaz S, Kiraz G. Effect of case difficulty on endodontic mishaps: preliminary findings. *International Dental Journal*. 2024 Oct 1;74:S101. <https://doi.org/10.1016/j.identj.2024.07.880>
 33. Almohaimede AA, AlShehri BM, Alaiban AA, AlDakhil RA. Significance of endodontic case difficulty assessment: a retrospective study. *international dental journal*. 2022 Oct 1;72(5):648-53. <https://doi.org/10.1016/j.identj.2022.01.001>
 34. Alamoudi RA, Alharbi AH, Farie GA, Fahim O. The value of assessing case difficulty and its effect on endodontic iatrogenic errors: a retrospective cross-sectional study. *Libyan Journal of Medicine*. 2020;15(1). <https://doi.org/10.1080/19932820.2019.1688916>
 35. Haug SR, Solfeld AF, Ranheim LE, Bårdsen A. Impact of case difficulty on endodontic mishaps in an undergraduate student clinic. *Journal of Endodontics*. 2018 Jul 1;44(7):1088-95. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.03.012>
 36. Herbst SR, Herbst CS, Schwendicke F. Preoperative risk assessment does not allow to predict root filling length using machine learning: a longitudinal study. *Journal of Dentistry*. 2023 Jan 1;128:104378. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104378>

Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 03.04.2026