

Андрій Мартинюк*, Ярослава Кульбашна

Національний медичний університет імені О. О. Богомольця, Київ, Україна

* Автор-кореспондент: andreytrnk@gmail.com

Сучасні підходи до аналізу стану кісткової тканини в прогнозуванні стабільності дентальних імплантатів

► **Мета.** Проаналізувати сучасні дані щодо діагностичної та прогностичної значущості методів оцінки стабільності дентальних імплантатів, окремо розглянути можливості фрактального аналізу кісткової тканини та визначити невирішені питання.

Матеріали та методи. Проведено пошук у базах даних PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science та в реєстрі ClinicalTrials.gov за період 2016–2026 рр. Пошук виконано за шістьма тематичними запитами англійською мовою. До огляду включено 28 джерел, що відповідали критеріям включення: клінічні дослідження за участю людей, систематичні огляди та метааналізи, експериментальні дослідження біомеханічних характеристик системи «кістка–імплантат», а також роботи з методології фрактального аналізу зображень щелеп.

Результати. Торк введення та резонансно-частотний аналіз відображають різні фізичні характеристики системи «кістка–імплантат»; дані щодо зв'язку між ними суперечливі. Прогностична значущість інтегральних показників щільності кісткової тканини обмежена: щільність пояснює 42,3 % дисперсії коефіцієнта стабільності імплантата, разом із шириною альвеолярного гребеня — 53,9 %. Комбінація структурних характеристик трабекулярної кістки за даними конусно-променевої комп'ютерної томографії пояснює до 71 % варіабельності стабільності. Фрактальна розмірність значуще корелює зі стабільністю, проте її обчислення не стандартизоване.

Висновки. Розробка стандартизованого протоколу фрактального аналізу кісткової тканини за даними конусно-променевої комп'ютерної томографії є передумовою впровадження методу в прогнозування стабільності імплантатів. Перспективним напрямом є створення прогностичних моделей, спрямованих на прогнозування динаміки стабільності, а не її значення в окремій точці спостереження.

Ключові слова: дентальна імплантація, первинна стабільність, остеointegraція, фрактальна розмірність, конусно-променева комп'ютерна томографія, резонансно-частотний аналіз, прогностична модель.

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.uk>



Вступ

Дентальна імплантація посідає провідне місце серед методів заміщення дефектів зубних рядів. Показники успішності імплантаційного лікування перевищують 90 % на терміні спостереження від 5 до 10 років [1, 2]. За даними електронного реєстру, що охопив 158 824 імплантати у 53 874 пацієнтів, загальна частота невдач становить 2,21 %, з яких 1,56 % припадає на ранню невдачу до етапу протезування [3].

Первинна стабільність імплантата є механічною характеристикою, що виникає внаслідок

взаємодії імплантата з кістковими стінками безпосередньо після встановлення; вторинна стабільність формується в процесі остеointegraції та на момент операції відсутня [4]. Перехід між ними не є плавним: кістка на межі з імплантатом, травмована під час препарування ложа, резорбується в межах фізіологічного ремоделювання раніше, ніж утворюється нова. Виникає період зниження сумарної стабільності, який у літературі позначають як «провал стабільності» (*stability dip*).

Цей період пов'язаний із підвищеним ризиком дезінтеграції імплантата. Якщо мікрорухи

на межі «кістка-імплантат» перевищують поріг, сумісний із остеоінтеграцією, замість кісткової тканини формується фіброзна інкапсуляція. У літературі наводиться пороговий діапазон 50–150 мкм, отриманий переважно в експериментальних дослідженнях [4]; прямої клінічної валідації цього діапазону не проведено.

Терміни настання «провалу стабільності» варіюють. За узагальненими кривими розвитку первинної та вторинної стабільності він припадає на 2–4-й тиждень після імплантації [5]; за іншими даними, найнижче значення реєструється на 4–5-му тижні й залежить, переважно, від застосованої системи імплантатів [6]. Негайне протезування зміщує інтервал ризику приблизно на тиждень раніше [6].

Оцінка стану кісткової тканини за даними променевих методів, зокрема конусно-променевої комп'ютерної томографії (КПКТ), реєстрація торку введення (ТВ) та резонансно-частотний аналіз (РЧА) відображають різні аспекти одного процесу. У доступній літературі не виявлено прогностичних моделей, які поєднували б ці показники для індивідуального визначення термінів навантаження. У цьому контексті особливий інтерес становить фрактальний аналіз — обчислювальний метод кількісної оцінки складності трабекулярної структури кістки [7]. На відміну від інтегральних показників щільності, він характеризує не кількість, а просторову організацію кісткової тканини. Метод дедалі ширше застосовується в стоматології, проте його стандартизація залишається невирішеною проблемою [7, 8].

Мета дослідження: проаналізувати сучасні дані щодо діагностичної та прогностичної значущості методів оцінки стабільності дентальних імплантатів, оцінити можливості фрактального аналізу як методу характеристики просторової організації кісткової тканини та встановити чинники, що обмежують його відтворюваність.

Матеріали та методи

Об'єкт аналізу — наукові публікації, присвячені оцінці та прогнозуванню стабільності дентальних імплантатів.

Бази даних: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, реєстр клінічних досліджень ClinicalTrials.gov.

Пошукові запити (англійською): *implant stability prediction; insertion torque ISQ correlation; bone density CBCT primary stability; resonance frequency analysis secondary stability; fractal dimension implant stability; fractal analysis CBCT standardization*.

Критерії виключення: клінічні дослідження за участю людей; систематичні огляди та метаана-

лізи; експериментальні дослідження біомеханічних характеристик системи «кістка-імплантат»; дослідження методології фрактального аналізу зображень щелеп.

Критерії виключення: поодинокі клінічні спостереження без описаного періоду динамічного нагляду; публікації без доступу до повного тексту або структурованої анотації; джерела, старші за встановлені хронологічні межі.

Оскільки огляд не є систематичним, метааналіз отриманих даних не проводився; результати подано в описовій формі з наведенням статистичних показників першоджерел.

Результати та обговорення

Методи оцінки стабільності дентальних імплантатів, які домінують у сучасній імплантології

Торк введення (ТВ) відображає силу тертя, яку долає імплантат під час просування в кістковому ложі, і вимірюється в Н·см [9]. Для досягнення остеоінтеграції наводиться робочий діапазон 20–40 Н·см; при значеннях нижче 20 Н·см виживаність імплантатів знижується [9]. Для негайної імплантації у фронтальній ділянці верхньої щелепи (*anterior maxilla*) необхідним вважається значення від 35 Н·см [10]. ТВ понад 50 Н·см розглядається як чинник підвищеного навантаження на періімплантні тканини [9], а надмірна компресія кістки асоціюється зі зменшенням її кровопостачання та ризиком невдалої остеоінтеграції [4].

Обмеженням методу є одномоментність: ТВ реєструється лише під час встановлення імплантата, тоді як РЧА може застосовуватися і під час операції, і протягом усього періоду загоєння [11].

Резонансно-частотний аналіз (РЧА) є неінвазивним методом: в імплантат вкручується трансдюсер, який збуджується імпульсом, а прилад реєструє резонансну частоту коливань і перетворює її в коефіцієнт стабільності імплантата (KCI, *implant stability quotient*, ISQ) у межах від 1 до 100 [10]. Значення понад 70 відповідають високій стабільності, 60–69 — помірній, менше 60 — низькій [12]. Значення нижче 70–75 на момент встановлення або протягом перших 3–4 місяців асоціюються з підвищеним ризиком невдачі [13].

Конусно-променева комп'ютерна томографія (КПКТ) дозволяє передопераційно оцінити щільність кісткової тканини, товщину кортикальної пластинки та ширину альвеолярного гребеня. Щільність виражають в одиницях Гаунсфілда (*Hounsfield units*, HU) — умовній шкалі рентгеновського ослаблення, у якій значенню 0 відпо-

відає вода, а -1000 — повітря; у зображеннях КПКТ відповідні величини також позначають як сірі значення (*gray values*). Одиниці Гаунсфілда, отримані за допомогою КПКТ, дають відносну оцінку щільності в межах однієї системи візуалізації, але не мають універсальної стандартизації між приладами [14].

Прогностична значущість інтегральних променевих показників

Зв'язок між передопераційно визначеною щільністю кістки та первинною стабільністю підтверджений у численних роботах, однак його сила варіює.

У клінічному дослідженні із застосуванням КПКТ виявлено кореляцію між сірими значеннями та KCI ($r = 0,811$; $p < 0,0001$), при цьому 66,3 % варіації KCI могло бути передбачено значеннями сірої шкали [14]. Слід зважати на обсяг цієї роботи — 17 імплантатів у трьох пацієнтів, — тому наведений коефіцієнт має розглядатися як орієнтовний.

У проспективному клінічному дослідженні за участю 42 пацієнтів із 80 імплантатами кореляція між щільністю та KCI становила $r = 0,65$, між щільністю та ТВ — $r = 0,58$ ($p < 0,001$); ширина гребеня в коронковій третині корелювала з KCI на рівні $r = 0,47$ [15]. Регресійний аналіз показав, що щільність пояснює 42,3 % дисперсії KCI та 33,6 % дисперсії ТВ, а модель, яка включала щільність і ширину гребеня на трьох рівнях, — 53,9 % дисперсії KCI [15].

Дисперсія в цьому контексті означає розкид значень показника між окремими спостереженнями, а частка поясненої дисперсії відображає, яку частину цього розкиду можна передбачити за допомогою відповідної моделі. Отже, у наведеному дослідженні понад 45% розкиду значень KCI не пояснювалося жодним із двох досліджених променевих показників. Це вказує на обмеженість інтегральних показників щільності як самостійних предикторів.

Зв'язок модифікується дизайном імплантата: в експериментальному дослідженні *ex vivo* кореляція між щільністю та стабільністю була значущою для самонарізних імплантатів, але не підтверджувалася для несамонарізних у частині моделей [16].

Співвідношення торку введення та резонансно-частотного аналізу

Дані щодо зв'язку двох основних клінічних методів оцінки первинної стабільності дещо суперечливі. Зокрема, систематичний огляд, виконаний за протоколом PRISMA, охопив 2017 знайдених досліджень і включив 12. Статистично значущої кореляції між KCI та ТВ не виявлено ($r_s = 0,366$;

$p = 0,079$); автори дійшли висновку, що методи є незалежними та непорівнюваними, і рекомендували обирати для кожного імплантата лише один метод оцінки [17]. Водночас автори огляду знизили оцінку якості доказів через ризик систематичної похибки та непрямість, визначивши певність доказів як низьку [17].

Натомість у клінічному дослідженні на 80 імплантатах однієї системи виявлено значущий зв'язок між ТВ і KCI ($r = 0,72$; $p < 0,001$) [15]. Значущу кореляцію для вибірки в цілому отримано також у дослідженні на 75 імплантатах однієї системи [18].

Зіставлення результатів у наведених вище прикладах дає змогу припустити щонайменше три чинники, здатні пояснити розбіжність.

Нелінійність залежності. У дослідженні на 75 імплантатах із ножеподібним дизайном різьби, розподілених на три групи за ТВ, у групі низького ТВ середній KCI становив $71,8 \pm 6,6$ при ТВ $18,8 \pm 6,0$ Н·см, у групі середнього — $75,6 \pm 9,2$ при $41,2 \pm 7,2$ Н·см, у групі високого — $78,0 \pm 6,4$ при $68,2 \pm 12,1$ Н·см. Кореляція була значущою для вибірки в цілому та для групи середнього ТВ, але не в групах низького й високого ТВ. Авторі дійшли висновку, що KCI та ТВ корелюють приблизно до 50 Н·см, а подальше зростання ТВ не забезпечує приросту стабільності [18].

Неоднорідність досліджуваного матеріалу. Обидві роботи, у яких зв'язок виявлено, виконані на одній системі імплантатів за стандартизованого хірургічного протоколу [15, 18], тоді як систематичний огляд об'єднує дослідження з різними системами, дизайнами різьби та протоколами препарування [17].

Чутливість ТВ до хірургічної техніки. У дослідженні *in vitro* на 120 імплантатах у поліуретанових блоках зміна ступеня субпрепарування змінювала ТВ більш ніж удвічі ($25,1 \pm 8,3$ Н·см при 0,2 мм проти $63,2 \pm 14,9$ Н·см при 0,8 мм; $p < 0,001$), тоді як KCI між протоколами статистично не відрізнявся ($p = 0,166$) [19].

Слід підкреслити, що наведене пояснення є інтерпретацією зіставлених результатів, а не встановленим фактом: цілеспрямованих досліджень, які перевіряли б ці три чинники в межах єдиного протоколу, не виявлено.

Актуальність упровадження фрактального аналізу кісткової тканини для оцінювання стабільності імплантата

Сутність методу. Фрактальний аналіз є обчислювальним методом кількісної оцінки складності трабекулярної структури кістки [7]. Найпошире-

нішим способом обчислення є метод підрахунку квадратів (*box-counting*): зображення накривається сіткою квадратів різного розміру, підраховується кількість квадратів, що містять частину структури, а фрактальну розмірність (ФР) визначають як нахил прямої в координатах логарифма розміру квадрата та логарифма їх кількості [20]. Обчислення виконують у програмному середовищі ImageJ [20].

Принципова відмінність інтегральних показників від фрактального аналізу полягає в тому, що середнє значення щільності характеризує кількість кісткової тканини, тоді як ФР — її просторову організацію. Кістки з однаковою середньою щільністю можуть мати різну трабекулярну архітектуру і, відповідно, різні механічні властивості.

Зв'язок структурних характеристик кістки зі стабільністю імплантата. У дослідженні на 23 кісткових зразках стабільність оцінювали за частотою відгуку на ударний вплив, а мікроструктуру — за даними мікрокомп'ютерної томографії та КПКТ [21]. Стабільність мала значущі позитивні кореляції з об'ємною часткою кістки, об'ємом і поверхнею кістки, поверхневою щільністю, товщиною та кількістю трабекул, а також із ФР; негативні кореляції отримано для трабекулярної сепарації, фактора трабекулярного патерну та індексу структурної моделі ($p < 0,01$). Покроковий регресійний аналіз зі спільним використанням об'ємної частки кістки, поверхневої щільності та індексу структурної моделі за даними КПКТ дозволив пояснити до 71% варіабельності стабільності [21].

Зіставлення цієї частки поясненої варіабельності (71 %) з часткою дисперсії, поясненою щільністю та шириною гребеня (53,9 % [15]), дає орієнтовне уявлення про можливий внесок структурної інформації. Пряме порівняння двох величин, однак, є некоректним: дослідження виконані на різному матеріалі (кісткові зразки проти клінічної вибірки), використовували різні методи оцінки стабільності та різні набори предикторів. Тому наведене зіставлення слід розглядати як підставу для гіпотези, а не як кількісну оцінку приросту точності. Перевірка цього припущення потребує дослідження, у якому обидва набори предикторів оцінювались би на одній вибірці.

Прямі клінічні дані щодо зв'язку ФР зі стабільністю імплантата отримані в дослідженні на 50 імплантатах однакової марки, діаметра та довжини, встановлених у бічних відділах верхньої та нижньої щелепи. ФР обчислювали за цифровими періапікальними знімками до імплантації, стабільність вимірювали методом

РЧА, а щільність кістки визначали за масою та об'ємом трепанобіоптатів із ділянки імплантації. Виявлено кореляції як між ФР і КСІ, так і між ФР і щільністю кістки [22].

У дослідженні тих самих авторів на 50 імплантатах значення ФР, обчислені за передопераційними внутрішньоротовими знімками, статистично відповідали щільності кісткової тканини трепанобіоптатів, визначеній гістологічно з використанням скануючої електронної мікроскопії та атомно-абсорбційної спектроскопії. Автори роблять висновок, що рентгенологічна оцінка якості кістки за ФР може бути корисним неінвазивним інструментом прогнозування щільності кістки в ділянці імплантації, із застереженнями щодо типу знімків і розміру зони інтересу (ЗІ) [23].

Проблема стандартизації обчислення. Попри широке застосування, стандартизація фрактального аналізу залишається невирішеною [7]. На результат впливають розмір, форма та розташування зони інтересу (ЗІ), параметри отримання й реконструкції зображення, а також протоколи обробки та методи обчислення [8].

Встановлено вплив низки конкретних чинників. У дослідженні на панорамних знімках 226 осіб значення ФР достовірно відрізнялися між ЗІ, орієнтованими під кутами 0°, 22,5°, 45° та 67,5°, у всіх трьох досліджених ділянках [7]. Значення ФР зростали також зі збільшенням розміру ЗІ ($p < 0,0001$) [24]. У дослідженні на КПКТ 18 пацієнтів встановлено, що операторозалежні параметри навігаційного програмного забезпечення впливають на результати обчислення; найбільш придатними визначено сагітальну площину з товщиною зрізу 1 мм, а найпридатнішою ділянкою для аналізу — тіло нижньої щелепи [8]. Реалізація фільтрів шуму різниться між програмними платформами, що обмежує перенесення результатів між системами [8]. У дослідженні пацієнтів із медикаментозно-асоційованим остеонекрозом щелеп значення ФР зростали з віком ($p = 0,2895$; $p < 0,05$), причому вплив віку та статі був достовірним лише в групі захворювання і не простежувався в контрольній групі [24].

Водночас за умови стандартизованого протоколу відтворюваність методу є прийнятною: за шести повторних вимірювань у 10 осіб коефіцієнт внутрішньокласової кореляції становив 0,87 [24]. Отже, нестандартизованість є не властивістю методу, а наслідком відсутності узгодженого протоколу, що визначає його розробку як самостійне наукове завдання.

Автоматизація обчислення. Розробка автоматизованих модулів фрактального аналізу розглядається як шлях до підвищення відтворюваності.

У порівняльному дослідженні на 10 панорамних знімках, у яких аналізували по 10 зон інтересу, автоматизований модуль потребував у середньому 31,3 с на знімок проти 717,6 с за класичною методикою в ImageJ. Різниця значень ФР між двома методами була мінімальною ($0,0571 \pm 0,0764$), а кількість помилок скоротилася з 29 до однієї [20]. Автори зазначають, що усунення етапів, здатних спричиняти похибки, може підвищити узгодженість і надійність результатів [20].

Фрактальний аналіз широко застосовується в панорамній рентгенографії, для якої характерні накладання анатомічних структур, особливості проєкційної геометрії та вплив алгоритмів обробки зображення [25]. Тривимірні методи візуалізації здатні надати додаткову структурну інформацію, проте стандартизація вибору ЗІ, протоколів попередньої обробки та методів обчислення залишається необхідною незалежно від модальності візуалізації [25].

Серед відібраних джерел робіт, у яких фрактальний аналіз застосовано до даних КПКТ у контексті прогнозування стабільності імплантатів, виявлено незначну кількість [21], тоді як саме КПКТ застосовують для передопераційного планування імплантації.

Зміна прогностичної значущості показників у часі

У проспективному когортному дослідженні, що включало 60 імплантатів у 31 пацієнта, КСІ вимірювали на етапі встановлення та на 8-му й 12-му тижнях [26]. Якість кісткової тканини достовірно впливала на КСІ на вихідному етапі ($p < 0,05$), однак цей вплив не простежувався на 8-му та 12-му тижнях.

Результати наукових досліджень, наведених вище, прогнозують первинну стабільність, тобто її значення на момент встановлення імплантата. Досліджень, у яких предметом прогнозування були б параметри динаміки стабільності — глибина та терміни «провалу», швидкість наростання вторинної стабільності, — серед відібраних джерел не виявлено. Дані щодо зникнення впливу якості кісткової тканини на 8–12-му тижнях [26] стосуються абсолютних значень КСІ в дискретних точках вимірювання; питання про те, чи зберігають структурні характеристики прогностичну значущість щодо параметрів динаміки, у цій роботі не розглядалося.

Обмежений вплив модифікації хірургічної техніки

Систематичний огляд і метааналіз семи досліджень, присвячених порівнянню остеоденсифі-

кації та конвенційного препарування в кістці типів III–IV, не виявив статистично значущих відмінностей ні щодо первинної стабільності (середня різниця 4,13; $p = 0,13$), ні щодо вторинної (середня різниця 1,78; $p = 0,11$) [4]. Автори наголошують на низькій певності доказів і помірному ризику систематичної похибки включених робіт. Отже, модифікація хірургічного протоколу не забезпечує передбачуваного приросту стабільності, що підкреслює роль вихідних характеристик кісткової тканини пацієнта.

Сучасні підходи до прогнозування

Гомогенізовані скінченно-елементні моделі, побудовані на даних КПКТ, порівнювалися з результатами механічних випробувань 23 імплантатів, встановлених у кісткові біоптати з трьох трупних нижніх щелеп [11]. Прогнозоване моделлю граничне навантаження корелювало з експериментальним ($R^2 = 0,66$) і виявилось кращим оцінювачем, ніж періімплантна щільність за КПКТ ($R^2 = 0,39$) або об'ємна частка кістки за мікрокомп'ютерною томографією ($R^2 = 0,57$).

Автори пояснюють перевагу скінченно-елементного підходу тим, що модель враховує не лише кількість кісткової тканини, а й її просторовий розподіл, механічні властивості, геометрію імплантата та напрямок навантаження [11]. Водночас вони вказують на обмеження: результати отримані на одному типі апарата КПКТ, на ізольованих щелепах без м'яких тканин та на матеріалі від трьох донорів однієї статі; передопераційне прогнозування стабільності визначено як невіршену задачу.

Паралельно розвивається напрям машинного навчання: глибокі нейронні мережі застосовують для валідації вимірювань мінеральної щільності за даними КПКТ [27]. У клінічному дослідженні за участю 49 пацієнтів коефіцієнти мінеральної щільності, обчислені за допомогою класифікації на основі штучного інтелекту, значуще позитивно корелювали з КСІ в коронковій, середній та сумарній зонах періімплантної кістки ($p < 0,05$), тоді як в апікальній зоні значущої кореляції не виявлено ($p > 0,05$); значення коефіцієнта були вищими в ділянках з більшим ТВ ($p < 0,05$) [28].

Ця топографічна закономірність узгоджується з фізичною природою резонансно-частотного аналізу, за якого максимальний згинальний момент виникає на рівні кісткового гребеня, тоді як апікальні відділи впливають на резонансну частоту значно менше.

Серед відібраних джерел не виявлено досліджень, виконаних на українській популяції, а

також не наведено розробленого алгоритму прогнозування стабільності імплантата.

Висновки

1. Дані щодо зв'язку торку введення та резонансно-частотного аналізу є досить суперечливими: систематичний огляд низької певності доказів не виявляє значущої кореляції, тоді як дослідження на однорідному матеріалі демонструє помірний зв'язок. Зіставлення результатів дозволяє припустити, що співвідношення показників є нелінійним і залежить від системи імплантатів та хірургічного протоколу, а отже жоден із них не характеризує первинну стабільність вичерпно.

2. Інтегральні променеві показники пояснюють близько половини дисперсії первинної стабільності, тоді як комбінації структурних характеристик трабекулярної кістки в окремих дослідженнях відповідає вища частка поясненої варіабельності. Це обґрунтовує доцільність багатоваріантного підходу до прогнозування.

3. Фрактальна розмірність значуще пов'язана зі стабільністю імплантата та щільністю кісткової тканини, однак її обчислення суттєво залежить від параметрів зони інтересу, реконструкції зображення та програмної платформи, що робить результати різних досліджень незіставними. За стандартизованого протоколу відтворюваність методу є прийнятною, що актуалізує розробку стандартизованого й відтворюваного протоколу фрактального аналізу за даними конусно-променевої комп'ютерної томографії як передумову впровадження методу в прогнозування стабільності дентальних імплантатів.

Перспективи подальших досліджень

Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка інтегрованої прогностичної моделі, яка поєднувала б клінічні, променеві та функціональні показники та була б спрямована на прогнозування параметрів динаміки стабільності імплантата — глибини «провалу», терміну настання мінімуму та швидкості відновлення.

Внесок авторів

А. Мартинюк

<https://orcid.org/0009-0001-4534-7441>

пошук і відбір джерел, аналіз та інтерпретація даних, написання тексту.

Я. Кульбашна

<https://orcid.org/0000-0002-2571-091X>

концепція огляду, аналіз та інтерпретація даних, критичне редагування тексту.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Використання штучного інтелекту

Під час підготовки рукопису використано інструмент генеративного штучного інтелекту Claude (Anthropic, Opus 5) для підтримки пошуку літератури, структурування аналізу та мовного редагування тексту. Усі наведені дані, числові показники та бібліографічні посилання верифіковано авторами за первинними джерелами. Штучний інтелект не є співавтором і не несе наукової відповідальності; повна відповідальність за зміст належить авторам.

ПОСИЛАННЯ / REFERENCES

1. Alghamdi, H. S., & Jansen, J. A. (2020). The development and future of dental implants. *Dental Materials Journal*, 39(2), 167–172. DOI: <https://doi.org/10.4012/dmj.2019-140>.
2. Chappuis, V., Rahman, L., Buser, R., Janner, S. F. M., Belser, U. C., & Buser, D. (2018). Effectiveness of contour augmentation with guided bone regeneration: 10-year results. *Journal of Dental Research*, 97(3), 266–274. DOI: <https://doi.org/10.1177/0022034517737755>.
3. Tobias, G., Chackartchi, T., Haim, D., Mann, J., & Findler, M. (2025). Dental implant survival rates: Comprehensive insights from a large-scale electronic dental registry. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(2), 60. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfb16020060>.
4. Mohammadi, M., Mohamadi Moghadam, M., & Arab-Zozani, M. (2025). Primary and secondary stability in implants placed in low-density bone using conventional vs. osseodensification technique: A systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health*, 25, 1847. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-025-07201-w>.
5. Bergamo, E. T., Zahoui, A., Barrera, R. B., Huwais, S., Coelho, P. G., Karateew, E. D., et al. (2021). Osseodensification effect on implants primary and secondary stability: Multicenter controlled clinical trial. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 23(3), 317–328. DOI: <https://doi.org/10.1111/cid.13007>.

6. Qi, M., Deng, S., & Tan, Z. (2023). Clinical study to assess influence of immediate provisionalization and various implant morphologies on implant stability: A prospective clinical study. *Frontiers in Surgery*, 9, 1095741. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.1095741>.
7. Pekince, A., Azlağ Pekince, K., & Yasa, Y. (2025). How does the direction of region of interest selection affect the fractal dimension? *Oral Radiology*, 41(2), 180–189. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11282-024-00786-y>.
8. Alves, T. K. C., Lima, B. L. F., Ferreira, A. C. G. C., Manzi, G. C. M., Jeunon, F. A., Alves e Silva, M. R. M., et al. (2025). Influence of cone-beam computed tomography reconstruction parameters on bone fractal dimension: A cross-sectional observational study. *Imaging Science in Dentistry*, 55(3), 261–270. DOI: <https://doi.org/10.5624/isd.20250018>.
9. Manfredini, M., Ghizzoni, M., Cusaro, B., Beretta, M., Maiorana, C., Souza, F. Á., & Poli, P. P. (2025). High insertion torque — Clinical implications and drawbacks: A scoping review. *Medicina*, 61(7), 1187. DOI: <https://doi.org/10.3390/medicina61071187>.
10. Dkheel, I. A., Al-Quisi, A. F., & AlOtaibi, N. (2024). The reliability of insertion torque as an indicator for primary stability in immediate dental implant: A prospective clinical study. *Journal of Baghdad College of Dentistry*, 36(3). DOI: <https://doi.org/10.26477/jbcd.v36i3.3735>.
11. Vautrin, A., Thierrin, R., Wili, P., Klingler, S., Chappuis, V., Varga, P., et al. (2025). Prediction of dental implants primary stability with cone beam computed tomography-based homogenized finite element analysis. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 27, e70016. DOI: <https://doi.org/10.1111/cid.70016>.
12. Gupta, G. (2022). Implant stability quotient (ISQ): A reliable guide for implant treatment. In D. Gabrić & M. Vuletić (Eds.), *Current concepts in dental implantology — From science to clinical research*. IntechOpen. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.101359>.
13. Andersson, P., Pagliani, L., Verrocchi, D., Volpe, S., Sahlin, H., & Sennerby, L. (2019). Factors influencing resonance frequency analysis (RFA) measurements and 5-year survival of Neoss dental implants. *International Journal of Dentistry*, 2019, 3209872. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/3209872>.
14. Haghanifar, S., Malekzadeh Shafaroudi, A., Nasiri, P., Mirzaie Amin, M., & Mehrani Sabet, J. (2022). Evaluation of bone density by cone-beam computed tomography and its relationship with primary stability of dental implants. *Dental Research Journal*, 19, 22. DOI: <https://doi.org/10.4103/1735-3327.338780>.
15. Chakraborty, N., Sharma, R., Patidar, A., Nazir, A., Saha, D., Agarwal, A., et al. (2025). The impact of alveolar bone density and width on primary implant stability: A prospective clinical study. *Bioinformation*, 21(7), 1854–1859. DOI: <https://doi.org/10.6026/973206300211854>.
16. Mikic, M., Vlahovic, Z., Stevanović, M., Arsic, Z., & Mladenovic, R. (2022). The importance of correlation between CBCT analysis of bone density and primary stability when choosing the design of dental implants — Ex vivo study. *Tomography*, 8(3), 1293–1306. DOI: <https://doi.org/10.3390/tomography8030107>.
17. Lages, F. S., Douglas-de-Oliveira, D. W., & Costa, F. O. (2017). Relationship between implant stability measurements obtained by insertion torque and resonance frequency analysis: A systematic review. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 20(1), 26–33. DOI: <https://doi.org/10.1111/cid.12565>.
18. Baldi, D., Lombardi, T., Colombo, J., Cervino, G., Perinetti, G., Di Lenarda, R., et al. (2018). Correlation between insertion torque and implant stability quotient in tapered implants with knife-edge thread design. *BioMed Research International*, 2018, 7201093. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/7201093>.
19. Rosas-Díaz, J., Guerrero, M. E., Córdova-Limaylla, N., Galindo-Gómez, M., García-Luna, M., & Cayo-Rojas, C. (2024). The influence of the degree of dental implant insertion compression on primary stability measured by resonance frequency and progressive insertion torque: In vitro study. *Biomedicines*, 12(12), 2878. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomedicines12122878>.
20. Balel, Y., & Sağtaş, K. (2025). Single-click automated fractal analysis for dental radiographs: A comparative evaluation with classic ImageJ method. *BMC Oral Health*, 25, 1360. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-025-05932-4>.
21. Kang, S. R., Bok, S. C., Choi, S. C., Lee, S. S., Heo, M. S., Huh, K. H., et al. (2016). The relationship between dental implant stability and trabecular bone structure using cone-beam computed tomography. *Journal of Periodontal & Implant Science*, 46(2), 116–127. DOI: <https://doi.org/10.5051/jpis.2016.46.2.116>.
22. Hayek, E., Aoun, G., Bassit, R., & Nasseh, I. (2020). Correlating radiographic fractal analysis at implant recipient sites with primary implant stability: An in vivo preliminary study. *Cureus*, 12(1), e6539. DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.6539>.
23. Hayek, E., Aoun, G., Geha, H., & Nasseh, I. (2020). Image-based bone density classification using fractal dimensions and histological analysis of implant recipient site. *Acta Informatica Medica*, 28(4), 272–277. DOI: <https://doi.org/10.5455/aim.2020.28.272-277>.
24. Bachtler, R., Walter, C., & Schulze, R. K. W. (2021). Fractal dimension in CBCT images as predictor for MRONJ: A retrospective cohort study. *Clinical Oral Investigations*, 25(4), 2113–2118. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03523-x>.
25. Fathani, S. F., Kiswanjaya, B., Syahraini, S. I., Saraswati, I., Wijanarko, A. P., Putra, B. T., et al. (2026). Influence of panoramic image acquisition and digitization methods on fractal dimension measurement in panoramic radiographs. *Frontiers in Oral Health*, 7, 1877247. DOI: <https://doi.org/10.3389/froh.2026.1877247>.

26. Vallecillo-Rivas, M., Reyes-Botella, C., Vallecillo, C., Lisbona-González, M. J., Vallecillo-Capilla, M., & Olmedo-Gaya, M. V. (2021). Comparison of implant stability between regenerated and non-regenerated bone: A prospective cohort study. *Journal of Clinical Medicine*, 10(15), 3220. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm10153220>.
27. Park, C.-S., Kang, S.-R., Kim, J.-E., Huh, K.-H., Lee, S.-S., Heo, M.-S., et al. (2023). Validation of bone mineral density measurement using quantitative CBCT image based on deep learning. *Scientific Reports*, 13, 11921. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38943-8>.
28. Xiao, Y., Lv, L., Xu, Z., Zhou, L., Lin, Y., Lin, Y., et al. (2024). Correlation between peri-implant bone mineral density and primary implant stability based on artificial intelligence classification. *Scientific Reports*, 14(1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52930-7>.

Current Approaches to Bone Tissue Assessment in Predicting Dental Implant Stability

Martyniuk, A.*, Kulbashna, Y.

Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

Author-correspondent E-mail: andreymrtnk@gmail.com

Aim. To analyze current evidence on the diagnostic and prognostic significance of methods for assessing dental implant stability, to examine separately the potential of fractal analysis of bone tissue, and to identify unresolved questions.

Materials and methods. A search was performed in PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science and the ClinicalTrials.gov registry for the period 2016–2026, using six thematic queries in English. A total of 28 sources meeting the inclusion criteria were included: clinical studies in humans, systematic reviews and meta-analyses, experimental studies of the biomechanical characteristics of the bone–implant construct, and studies on the methodology of fractal analysis of jaw images.

Results. Insertion torque and resonance frequency analysis reflect different physical characteristics of the bone–implant construct; evidence on the relationship between them is conflicting. The prognostic significance of integral bone density measures is limited: density explains 42.3% of the variance in the implant stability quotient, and together with alveolar ridge width — 53.9%. A combination of trabecular bone structural characteristics obtained from cone-beam computed tomography explains up to 71% of stability variability. Fractal dimension significantly correlates with stability; however, its calculation is not standardized.

Conclusions. The development of a standardized protocol for fractal analysis of bone tissue on cone-beam computed tomography is a prerequisite for introducing of the method into the prediction of implant stability. A promising direction is the development of prognostic models aimed at predicting the dynamics of stability rather than its value at a single time point.

Keywords: dental implantation, primary stability, osseointegration, fractal dimension, cone-beam computed tomography, resonance frequency analysis, prognostic model.

Стаття: надійшла до редакції 25.05.2026 р.;
прийнята до друку 15.07.2026 р.,
опублікована 30.07.2026 р.

Мартинюк Андрій Богданович

лікар-стоматолог,
стоматологічна клініка «Villa Louisa»,
м. Київ, Україна.

 <https://orcid.org/0009-0001-4534-7441>

Кульбашна Ярослава Аркадіївна

доктор медичних наук,
професор кафедри хірургічної стоматології,
Національний медичний університет
імені О. О. Богомольця,
м. Київ, Україна

 <https://orcid.org/0000-0002-2571-091X>