

DOI: <https://doi.org/10.33295/1992-576X-2026-2-ORSR-3>

УДК 616.314.23-007.13-031.23-053.5/.6-07(045)

Олена Дорошенко¹, Наталія Малашенко²¹ Національний університет охорони здоров'я імені П. Л. Шупика, м. Київ, Україна² ПП «Стоматологія Престиж», м. Київ, Україна

Прогностична модель оцінки складності ортодонтичного лікування ретенуваних верхніх ікол за даними конусно-променевої комп'ютерної томографії

Вступ. Ретенція верхніх ікол є однією з найпоширеніших аномалій прорізування зубів (поширеність 0,92–3,0 %) та становить значну клінічну проблему через ризик резорбції коренів сусідніх зубів, порушення оклюзії та естетичні дефекти. Попри наявність різноманітних класифікацій (наприклад, KPG, TDI), більшість із них є описовими та не надають кількісної прогностичної оцінки складності майбутнього лікування. Крім того, існуючі моделі здебільшого ігнорують краніофасціальний контекст, зокрема тип росту лицевого скелета та стан верхніх дихальних шляхів, які можуть суттєво впливати на ефективність ортодонтичної тяги.

Мета дослідження. Розробити та внутрішньо валідувати багатофакторну прогностичну модель на основі кількісних КПКТ-параметрів (локальних характеристик ретенуваного ікла та глобальних краніофасціальних показників) для об'єктивної оцінки складності ортодонтичного лікування ретенуваних верхніх ікол у дітей та підлітків 10–14 років.

Матеріали та методи. Проведено ретроспективне когортне дослідження за участю 174 пацієнтів основної когорти (102 — LOI 0, 44 — LOI 1, 28 — LOI 2) та 47 осіб контрольної групи. Рівень ортодонтичного втручання (LOI) визначали *post hoc* за медичною документацією. Усім пацієнтам виконано КПКТ до початку лікування на апараті i-CAT Gendex CB-500. Оцінювали 7 краніофасціальних параметрів (SNA, SNB, ANB, SN-GoGn, SN-PP, PNS-PPA, об'єм носоглотки) та 7 локальних параметрів ретенуваного ікла (кути β та α , глибина, відстань до кореня бічного різця, контакт, ширина фолікулярного простору, дилацерація). Вимірювання виконували два незалежні калібровані дослідники (ICC > 0,90). Для побудови моделі використовували порядкову логістичну регресію з покроковим відбором, перевіркою мультиколінеарності (VIF) та тестом Бранта. Внутрішню валідацію проводили методом 10-кратної крос-валідації.

Результати. У фінальну модель увійшли чотири незалежні предиктори: глибина розташування ікла (OR = 2,85; 95 % CI 1,90–4,28; $p < 0,001$), найкоротша відстань до кореня бічного різця (OR = 0,42; 95 % CI 0,28–0,63; $p < 0,001$), об'єм носоглотки (OR = 0,55; 95 % CI 0,38–0,79; $p = 0,001$) та кут до площини оклюзії (OR = 1,78; 95 % CI 1,12–2,83; $p = 0,015$). Модель мала добру пояснювальну здатність (Nagelkerke $R^2 = 0,62$) та статистичну значущість ($\chi^2 = 68,4$; $p < 0,001$). Розроблено математичне рівняння для розрахунку лінійного предиктора Z та порогові значення ($\tau_1 = 0,8$; $\tau_2 = 2,1$) для стратифікації пацієнтів на три рівні складності: LOI 0 ($Z \leq 0,8$), LOI 1 ($0,8 < Z \leq 2,1$) та LOI 2 ($Z > 2,1$).

Висновки. Запропонована прогностична модель дозволяє кількісно оцінити складність ортодонтичного лікування ретенуваних верхніх ікол до його початку на основі чотирьох КПКТ-параметрів. Модель потребує зовнішньої валідації на багатоцентрових вибірках, але вже зараз може слугувати допоміжним інструментом для стратифікації пацієнтів, оптимізації вибору тактики лікування (спостереження, раннє хірургічне оголення, трансплантація) та ознайомлення пацієнтів із прогнозованою тривалістю й ризиками втручання.

Ключові слова: ретенувані верхні ікла, конусно-променева комп'ютерна томографія, прогностична модель, порядкова логістична регресія, складність лікування, об'єм носоглотки.

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



Вступ

Ретенівані постійні зуби є однією з найскладніших проблем у дитячій та ортодонтичній стоматології. Серед усіх зубів, окрім третіх молярів, найчастіше ретенуються саме верхні ікла. За даними сучасної літератури, поширеність ретенції верхніх ікол коливається від 0,92 до 3,0 % залежно від популяції та методів діагностики [1, 2]. Ретенція ікла не лише створює значний естетичний дефект, але й може призводити до резорбції коренів сусідніх зубів, порушення оклюзії, формування кіст та психологічного дискомфорту у пацієнта [2, 3].

Етіологія ретенції верхніх ікол є багатофакторною. Факторами ризику є наявність надкомплектних зубів, одонтом, кіст, дилацерація кореня, а також затримка резорбції кореня тимчасового ікла [1, 3]. Крім того, важливу роль відіграють скелетні аномалії та дефіцит місця в зубному ряду [2].

Лікування ретеніваних ікол є тривалим, технічно складним та потребує мультидисциплінарного підходу, що поєднує хірургічне оголення зуба з наступною ортодонтичною тягою [3, 4]. Сучасні методи прискорення ортодонтичного переміщення зубів (мікроперфорація кістки, низькоінтенсивне лазерне опромінення, хірургічне прискорення) можуть скорочувати терміни лікування, однак їхня ефективність при тязі ретеніваних ікол потребує подальшого вивчення [5]. Систематичний огляд Магажан D. зі співавт. (2025) визначив, що вік пацієнта, положення та кут нахилу ретеніваного ікла відносно середньої лінії та бічного різця мають статистично значущий вплив на тривалість лікування [6]. Проте попри наявність різноманітних класифікацій, більшість із них оцінюють переважно анатомічне положення зуба, не надаючи кількісної прогностичної оцінки загальної складності майбутнього лікування.

У цьому контексті конусно-променева комп'ютерна томографія (КПКТ) стала «золотим стандартом» діагностики ретеніваних зубів. На відміну від традиційної панорамної рентгенографії, КПКТ дозволяє точно визначити тривимірне положення ретеніваного зуба, його орієнтацію, глибину розташування, взаємовідношення з коренями сусідніх зубів, а також оцінити стан навколишніх кісткових тканин та наявність патологічних змін [7, 8].

Останніми роками з'явилися роботи, присвячені створенню прогностичних моделей на основі КПКТ-даних. Так, Brands L. зі співавт. (2025) розробили модель для прогнозування тривалості тяги ретеніваних ікол із точністю 91 %, включивши до неї такі параметри, як горизонтальне положення

ікла, розмір фолікула, вертикальна висота та положення апекса [9]. Однак ці моделі зосереджені переважно на окремих анатомічних параметрах ретеніваного зуба й часто ігнорують загальний краніофациальний контекст, зокрема тип росту лицевого скелета та стан верхніх дихальних шляхів.

Варто зазначити, що сучасні дослідження підтверджують тісний взаємозв'язок між морфологією краніофациальної області, параметрами верхніх дихальних шляхів і розвитком зубощелепної системи в цілому [7, 10]. Обструкція верхніх дихальних шляхів, зумовлена гіпертрофією аденоїдів, призводить до формування аденоїдного типу обличчя з вертикальним типом росту, ретрогнатією щелеп та звуженням верхньої щелепи, що створює додаткові несприятливі умови для прорізування та ортодонтичної тяги зубів [8, 10]. Таким чином, складність лікування ретеніваного ікла визначається не лише його власним анатомічним положенням, але й тим «скелетним середовищем», у якому воно перебуває.

Мета дослідження. Зважаючи на викладене, метою нашої роботи стала розробка та валідація багатофакторної прогностичної моделі, яка на основі кількісних КПКТ-параметрів (як локальних характеристик ретеніваного ікла, так і глобальних краніофациальних показників) дозволяє об'єктивно оцінити складність ортодонтичного лікування ретеніваних верхніх ікол у дітей та підлітків.

Матеріали та методи

1. Дизайн дослідження та етичні аспекти

Дослідження виконано як ретроспективне когортне. Використано архівні дані конусно-променевої комп'ютерної томографії (КПКТ) та медичні записи пацієнтів, яким було проведено ортодонтичне та/або хірургічне лікування з приводу затримки прорізування або ретенції верхніх ікол.

Дослідження проведено на базі кафедри стоматології Національного університету охорони здоров'я України імені П. Л. Шупика (Київ, Україна). Архівні КПКТ-дані отримано з Центру лабораторної діагностики голови (ЦЛДГ, Київ, Україна) за період 2016–2022 років.

Протокол дослідження схвалено етичним комітетом НУОЗ України імені П. Л. Шупика (протокол № 9 від 02.12.2019). Усі батьки або законні опікуни надали письмову інформовану згоду на участь у дослідженні та обробку персональних даних. Дослідження проведено відповідно до принципів Гельсінкської декларації (2013).

2. Віковий діапазон та обґрунтування

Для всіх пацієнтів визначено єдиний віковий діапазон — 10–14 років. Вибір обґрунтовано та-

Таблиця 1.

**Розподіл пацієнтів за рівнями фактичної складності лікування
відповідно до шкали LOI (n = 174)**

LOI	Назва	Критерії (оцінені <i>post hoc</i> за медичною документацією)	n
0	Без хірургічного втручання	Самостійне прорізування ікла після створення місця в зубному ряду (розширення, дисталізація). Хірургічне втручання не проводилося.	102
1	Помірне втручання	Виконано хірургічне оголення (просте або з частковою остеотомією). Тривалість активної ортодонтичної тяги менше ніж 12 місяців. Резорбція кореня бічного різця (за даними післяопераційної КПКТ) менше ніж 2 мм. Кількість ускладнень — не більше одного (втрата ортодонтичної кнопки без повторного втручання).	44
2	Високе втручання	Наявність хоча б одного з таких критеріїв: повна остеотомія або трансплантація зуба; тривалість активної ортодонтичної тяги більше ніж 12 місяців; резорбція кореня бічного різця більше ніж 2 мм; два або більше ускладнень (повторне хірургічне оголення, повторна втрата кнопки, запальні ускладнення, що потребували додаткового лікування).	28

кими чинниками: (1) фізіологічне прорізування верхніх ікол відбувається в середньому в 11–12 років; (2) за попередніми даними авторів, середній вік дітей із затримкою прорізування ікол становить $10,91 \pm 0,24$ року; (3) обмеження вікового діапазону дозволяє мінімізувати вплив віку як змішувального фактора (confounding factor) при проведенні порівняльного та регресійного аналізу.

3. Формування вибірки та критерії відбору

З архівних даних відібрано пацієнтів, які відповідали таким *критеріям включення*:

- вік 10–14 років на момент проведення КПКТ;
- наявність КПКТ-дослідження, виконаного до початку лікування;
- діагностована затримка прорізування або ретенція верхнього ікла (одно- або двостороння);
- наявність повної медичної документації щодо проведеного ортодонтичного та/або хірургічного лікування.

Критерії виключення:

- системні або синдромні захворювання, що впливають на ріст і розвиток зубощелепної системи;
- попереднє ортодонтичне лікування з використанням фіксованої техніки до моменту проведення КПКТ;
- анкілоз ретенуваного зуба;
- виражена дилаceraція кореня (більше ніж 30°);
- відмова батьків або законних опікунів від участі у дослідженні.

Загалом до основної когорти включено 174 пацієнти (табл. 1).

Розподіл пацієнтів за групами виконували два незалежні дослідники, які не брали участі в подальшому аналізі КПКТ-параметрів. У разі розбіжностей застосовували консенсус. Коефіцієнт

узгодженості між дослідниками (каппа Коена) становив 0,92 ($p < 0,001$), що свідчить про майже ідеальну згоду.

КПКТ-параметри (розділи 6, 7) не використовувалися для визначення LOI. Індекс LOI базується виключно на клінічних результатах лікування та використовувався як залежна змінна (outcome) при побудові прогностичної моделі.

Слід зазначити, що визначення LOI частково може залежати від клінічної тактики та досвіду лікаря, що потенційно обмежує універсальність отриманої моделі.

4. Група порівняння (контроль)

Для порівняльної оцінки краніофасціальних параметрів та стану верхніх дихальних шляхів сформовано окрему групу порівняння (контрольну групу). Ця група не включалася до основної когорти та не використовувалася для побудови прогностичної моделі.

Критерії включення до групи порівняння:

- вік 10–14 років (відповідає віковому діапазону основної когорти);
- наявність КПКТ-дослідження, виконаного з ортодонтичною метою (на тому ж апараті та за аналогічним протоколом);
- фізіологічний прикус або незначні зубощелепні аномалії (діастеми, тремі, легка скупченість), які не потребували активного ортодонтичного лікування;
- відсутність затримки прорізування або ретенції постійних зубів (за даними КПКТ та клінічного обстеження);
- відсутність клінічно значущих порушень носового дихання (за анамнезом та даними оториноларингологічного обстеження).

Критерії виключення: аналогічні до основної когорти (системні та синдромні захворювання,

попереднє ортодонтичне лікування з використанням фіксованої техніки тощо).

Джерело відбору: архівні КПКТ-дані Центру лабораторної діагностики голови (ЦЛДГ, Київ, Україна) за період 2016–2022 років.

Після застосування критеріїв включення та виключення до групи порівняння увійшло 47 пацієнтів (23 хлопчики, 24 дівчинки; середній вік — $11,18 \pm 0,35$ року).

Дані контрольної групи використано для формування референтних значень краніофасціальних параметрів (SNA, SNB, ANB, SN-GoGn, SN-PP, PNS-PPA, об'єм носоглотки) та оцінки їх відмінностей у пацієнтів із затримкою прорізування або ретенцією верхніх ікол (LOI 0, LOI 1, LOI 2). У побудові прогностичної моделі ця група участі не брала.

5. Протокол КПКТ-дослідження

Усім пацієнтам основної когорти та групи порівняння виконано конусно-променево комп'ютерну томографію (КПКТ) до початку лікування.

Сканування проводили на апараті i-CAT Gendex CB-500 (Imaging Sciences International, Hatfield, PA, США) із використанням стандартного протоколу: поле зору (FOV) — 16×13 см, розмір вокселя — 300 мкм, час сканування — 20 с. Дослідження виконували з дотриманням принципу мінімізації променевого навантаження (ALARA).

Пацієнтів інструктували займати природне положення голови (погляд спрямований вперед, франкфуртська горизонталь паралельна підлозі), зімкнути зуби в положенні центральної оклюзії, не ковтати та підтримувати спокійне носове дихання під час сканування.

Отримані DICOM-дані експортували та аналізували за допомогою програмного забезпечення i-CATVision (v1.9.2.17, Imaging Sciences International) та Dolphin Imaging (v11.9, Dolphin Imaging & Management Solutions, Chatsworth, CA, США).

6. Тривимірний цефалометричний аналіз

На основі КПКТ-даних проводили стандартизований тривимірний цефалометричний аналіз, що включав оцінку краніофасціальних параметрів відповідно до методики, описаної в попередньому дослідженні авторів [Дорошенко О. М., Малашенко Н. Ю., 2026].

Оцінювали такі показники:

- SNA, ° — положення верхньої щелепи відносно передньої основи черепа;
- SNB, ° — положення нижньої щелепи відносно передньої основи черепа;
- ANB, ° — сагітальне співвідношення верхньої та нижньої щелеп;

- SN-GoGn, ° — кут нахилу нижньої щелепи (вертикальний тип росту);

- SN-PP, ° — нахил площини твердого піднебіння;

- PNS-PPA, мм — товщина аденоїдної тканини (відстань між задньою носовою остю та аденоїдними вегетаціями);

- об'єм носоглотки, см³ — визначали автоматично за допомогою інструмента сегментації дихальних шляхів у програмі Dolphin Imaging.

Усі вимірювання виконували два незалежні калібровані дослідники, які були засліплені щодо клінічних результатів лікування. Для оцінки внутрішньо- та міжекспертної надійності 20 % вибірки було повторно проаналізовано через 2 тижні. Надійність оцінювали за допомогою внутрішньокласного коефіцієнта кореляції (ICC); для всіх параметрів отримано відмінну узгодженість (ICC більше ніж 0,90).

7. Оцінка параметрів ретененованого ікла

Для всіх пацієнтів основної когорти (LOI 0, LOI 1 та LOI 2) на підставі КПКТ-даних, отриманих до початку лікування, проводили тривимірну оцінку положення ретененованого (або такого, що затримується у прорізуванні) верхнього ікла.

Аналізували такі параметри:

- *Кут нахилу до середньосагітальної площини* β , ° — визначали у корональній проєкції як кут між довгою віссю зуба та лінією, паралельною середньосагітальній площині;

- *Кут до площини оклюзії* α , ° — визначали у сагітальній проєкції як кут між довгою віссю зуба та площиною оклюзії;

- *Глибина розташування*, мм — відстань від кісткового гребеня альвеолярного відростка до найбільш корональної точки коронки зуба;

- *Найкоротша відстань до кореня бічного різця*, мм — мінімальна відстань між поверхнею кореня ікла та коренем бічного різця;

- *Контакт із коренем бічного різця* — бінарна змінна (1 — контакт наявний, 0 — контакт відсутній);

- *Ширина фолікулярного простору*, мм — максимальна відстань між коронкою зуба та стінкою кісткової крипти;

- *Дилацерація кореня* — бінарна змінна (1 — наявна при куті вигину понад 20°, 0 — відсутня).

Усі вимірювання виконували два незалежні калібровані дослідники, які були засліплені щодо належності пацієнтів до груп LOI. Для оцінки внутрішньо- та міжекспертної надійності 20 % вибірки було повторно проаналізовано через 2 тижні. Надійність оцінювали за допомогою внутрішньокласного коефіцієнта кореляції (ICC); для

всіх параметрів отримано відмінну узгодженість (ICC більше ніж 0,90).

8. Оцінка факторів ризику (за даними анкетування та клінічного обстеження)

Для виявлення потенційних предикторів, окрім КПКТ-параметрів, використовували дані клінічного обстеження та анкетування батьків, виконаного за розробленою нами анкетною (патент № 107129). Анкетування проводили для всіх пацієнтів основної когорти та групи порівняння. До аналізу включали такі *фактори ризику*:

- *спадковість* (наявність ортодонтичного лікування у батьків);
 - *патологія першого триместру вагітності матері* (токсикоз, хронічний стрес);
 - *тип вигодовування* (грудне, штучне, змішане);
 - *шкідливі звички* (смоктання пальця, предметів, язика);
 - *характер жувального навантаження* (переважання м'якої їжі, знижена жувальна активність);
 - *травми в анамнезі* (тимчасових зубів, підборіддя, губ);
 - *передчасне видалення тимчасових ікол*;
 - *затримка фізіологічної зміни тимчасових ікол*;
 - *частота гострих респіраторних інфекцій* (понад 3–4 рази на рік);
 - *тип дихання* (носове, ротове, змішане) та наявність нічного хрипіння;
 - *ЛОП-патологія* (аденоїдні вегетації, викривлення носової перегородки);
 - *наявність алергічних захворювань*.
- Зазначені фактори були включені до багатфакторного аналізу як потенційні модифікатори ризику.

9. Статистичний аналіз

Статистичну обробку даних виконували з використанням програм IBM SPSS Statistics v. 26.0 (IBM, Armonk, NY, USA) та R (v. 4.2.1; пакети rms, ordinal, pROC).

Нормальність розподілу кількісних змінних оцінювали за допомогою критерію Шапіро–Вілка. Дані з нормальним розподілом подано як середнє значення та стандартне відхилення ($M \pm SD$), з ненормальним — як медіана та міжквартильний розмах ($Me [Q1; Q3]$).

Порівняльний аналіз між групами (LOI 0, LOI 1, LOI 2 та контроль) проводили за допомогою таких методів:

- для кількісних змінних — *однофакторний дисперсійний аналіз* (ANOVA) або *критерій Краскела–Уолліса* (залежно від розподілу);

- для категоріальних змінних — *критерій χ^2 Пірсона* або *точний критерій Фішера*.

Кореляційний аналіз

Зв'язок між кількісними предикторами та рівнем LOI оцінювали за допомогою коефіцієнта рангової кореляції Спірмена (r_s).

Побудова прогностичної моделі

Для визначення факторів, асоційованих із вищим рівнем ортодонтичного втручання, застосовували порядкову логістичну регресію (ordinal logistic regression) із залежною змінною LOI (0, 1, 2).

До моделі включали незалежні змінні, які демонстрували рівень значущості $p < 0,10$ в уніваріантному аналізі. Перевірку мультиколінеарності виконували за допомогою фактора інфляції дисперсії (VIF). Припущення пропорційності шансів оцінювали за допомогою тесту Бранта.

Результати подано як коефіцієнти регресії (B), скориговані відношення шансів (adjusted OR) та 95%-ві довірчі інтервали (95% CI).

Якість моделі оцінювали за допомогою псевдо- R^2 Нагелкерке, а також за результатами класифікаційного аналізу (точність, чутливість та специфічність для кожної категорії LOI).

Валідація моделі

Внутрішню валідацію моделі виконували методом 10-кратної крос-валідації. Калібрування моделі оцінювали за допомогою калібрувальних кривих.

Для клінічного застосування побудовано номограму на основі пакета rms у середовищі R, яка дозволяє оцінювати індивідуальну ймовірність належності до кожної категорії LOI (0, 1 або 2).

Розмір вибірки

Мінімальний необхідний обсяг вибірки розраховували за правилом «10 подій на один предиктор» (10 events per variable, EPV) для порядкової логістичної регресії.

За умови включення 7–8 предикторів мінімальний необхідний обсяг вибірки, розрахований за правилом «10 подій на один предиктор» (10 EPV), становив 80–100 пацієнтів.

Фактична вибірка включала 174 пацієнтів, з яких 102 — з LOI 0, 44 — LOI 1 та 28 — пацієнтів з LOI 2, що забезпечує достатню статистичну потужність для побудови стабільної моделі.

Додаткові зауваження щодо дизайну аналізу

Усі порівняння КПКТ-параметрів між групами LOI виконували після формування груп, без використання цих параметрів у процесі класифікації, що

Таблиця 2.

Порівняння краніофациальних параметрів між досліджуваними групами ($M \pm SD$)

Параметр	LOI 0 ($n = 102$)	LOI 1 ($n = 44$)	LOI 2 ($n = 28$)	Контроль ($n = 47$)	p (ANOVA)
SNA, °	79,2 ± 2,0	77,8 ± 2,3	76,5 ± 2,5	80,8 ± 1,9	< 0,001
SNB, °	76,9 ± 2,1	75,5 ± 2,4	74,2 ± 2,6	78,5 ± 1,8	< 0,001
ANB, °	4,8 ± 1,3	5,6 ± 1,5	6,9 ± 1,7	3,2 ± 1,0	< 0,001
SN–GoGn, °	39,2 ± 3,8	41,5 ± 4,1	44,8 ± 4,5	36,8 ± 3,5	< 0,001
SN–PP, °	10,0 ± 1,5	10,8 ± 1,7	11,5 ± 1,9	8,5 ± 1,4	< 0,001
PNS–PPA, мм	5,6 ± 1,0	4,8 ± 0,9	3,9 ± 0,8	7,8 ± 1,2	< 0,001
Об'єм носоглоткового простору, см ³	9,8 ± 1,8	8,5 ± 1,6	7,2 ± 1,4	12,8 ± 2,1	< 0,001

Примітка: дані подано як середнє значення ± стандартне відхилення ($M \pm SD$);

p — загальний рівень значущості для однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) між усіма групами.

Таблиця 3.

Порівняння параметрів верхнього ікла (за даними КПКТ) між групами з різним рівнем ортодонтичного втручання (LOI 0, LOI 1, LOI 2)

Параметр	LOI 0 ($n = 102$)	LOI 1 ($n = 44$)	LOI 2 ($n = 28$)	p
Кут до середньосагітальної площини β , °	12,3 ± 4,1	18,5 ± 5,2	28,3 ± 6,8	<0,001
Кут до площини оклюзії α , °	35,6 ± 7,2	42,1 ± 8,4	55,6 ± 10,2	<0,001
Глибина розташування, мм	2,1 ± 0,9	4,2 ± 1,3	7,8 ± 2,1	<0,001
Найкоротша відстань до кореня бічного різця, мм	3,1 ± 0,9	2,5 ± 0,8	0,9 ± 0,5	<0,001
Контакт із коренем бічного різця, n (%)	12 (11,8 %)	8 (18,2 %)	19 (67,9 %)	<0,001
Ширина фолікулярного простору (мм)	1,2 ± 0,4	1,8 ± 0,5	3,2 ± 0,9	<0,001
Дилацерація кореня (>20°), n (%)	2 (2,0 %)	3 (6,8 %)	9 (32,1 %)	<0,001

Примітка: дані подано як $M \pm SD$ або n (%);

p — для ANOVA (кількісні змінні) або χ^2 (категоріальні). *Post hoc* аналіз (Tukey HSD) показав статистично значущі відмінності між більшістю пар груп для всіх параметрів, за винятком відстані до кореня бічного різця та наявності контакту між LOI 0 та LOI 1 ($p > 0,05$).

забезпечувало принцип засліплення щодо результатів лікування.

Результати

Загальна кількість пацієнтів, включених до основної когорти для побудови прогностичної моделі, становила 174 особи: 102 пацієнти із затримкою прорізування верхніх ікол без хірургічного оголення (LOI 0), 44 пацієнти з помірним рівнем втручання (LOI 1) та 28 пацієнтів із високим рівнем втручання (LOI 2). Група порівняння включала 47 осіб із фізіологічним прикусом та відсутністю затримки прорізування зубів.

Середній вік пацієнтів поступово збільшувався від групи LOI 0 до LOI 2 (10,91 ± 0,24; 11,52 ± 0,48; 12,06 ± 0,62 року відповідно), однак статистично значущих відмінностей між групами не виявлено ($p = 0,072$).

У структурі статі спостерігалася тенденція до більшої частки дівчат у групах із вищим рівнем втручання (LOI 1 — 59,1 %, LOI 2 — 64,3 %) по-

рівняно з LOI 0 (45,1 %), однак ці відмінності не досягли статистичної значущості ($p = 0,084$).

Щодо сторони ретенції, у всіх групах переважала одностороння локалізація. Частота двосторонньої ретенції зростала від LOI 0 до LOI 2 (30,4 % — 34,1 % — 50,0 %), проте статистично значущих відмінностей між групами не виявлено ($p = 0,215$).

Оскільки метою дослідження є оцінка впливу краніофациальних та дихальних параметрів на складність лікування, далі проведено порівняльний аналіз цефалометричних показників між групами LOI та контрольною групою (табл. 2).

Post hoc аналіз (критерій Тьюкі) виявив статистично значущі відмінності між більшістю пар груп для всіх досліджуваних параметрів, за винятком показника SN–PP між групами LOI 0 та LOI 1, де різниця не досягла статистичної значущості ($p = 0,08$).

У пацієнтів із високим рівнем ортодонтичного втручання (LOI 2) відзначалися найбільш виражені зміни краніофациальних параметрів, зокрема

**Кореляційний аналіз (рангова кореляція Спірмена)
між рівнем ортодонтичного втручання (LOI) та досліджуваними
краніофациальними та локальними КПКТ-параметрами**

Параметр	ρ (Spearman's rho)	p
Краніофациальні параметри		
SNA, °	- 0,52	< 0,001
SNB, °	- 0,48	< 0,001
ANB, °	+ 0,61	< 0,001
SN-GoGn, °	+ 0,58	< 0,001
SN-PP, °	+ 0,44	< 0,001
PNS-PPA, мм	- 0,65	< 0,001
Об'єм носоглотки, см ³	- 0,71	< 0,001
Локальні параметри ікла		
Кут до середньосагітальної площини β , °	+ 0,68	< 0,001
Кут до площини оклюзії α , °	+ 0,72	< 0,001
Глибина розташування, мм	+ 0,81	< 0,001
Найкоротша відстань до кореня бічного різця, мм	- 0,74	< 0,001
Контакт з коренем бічного різця (1 — так)	+ 0,69	< 0,001
Ширина фолікулярного простору (мм)	+ 0,59	< 0,001
Дилацерація кореня (>20°) (1 — так)	+ 0,62	< 0,001

Примітка: LOI розглянуто як порядкову змінну (0, 1, 2).

ρ — коефіцієнт рангової кореляції Спірмена; додатне значення вказує на прямий зв'язок (більше значення параметра — вищий LOI), від'ємне — на обернений. Усі кореляції є статистично значущими ($p < 0,001$).

зменшення кутів SNA та SNB, а також збільшення кута ANB ($6,9 \pm 1,7^\circ$) і SN-GoGn ($44,8 \pm 4,5^\circ$), що вказує на більш виражений вертикальний тип росту. У групі LOI 0 відповідні показники були менш змінні, однак також відрізнялися від контрольної групи (зокрема ANB: $4,8 \pm 1,3^\circ$ проти $3,2 \pm 1,0^\circ$ у контролі).

Показники, що характеризують стан верхніх дихальних шляхів, демонстрували аналогічну тенденцію. Товщина аденоїдної тканини (PNS-PPA) була найменшою у групі LOI 2 ($3,9 \pm 0,8$ мм) порівняно з LOI 0 ($5,6 \pm 1,0$ мм) та контрольною групою ($7,8 \pm 1,2$ мм). Об'єм носоглоткового простору також поступово зменшувався від контрольної групи до LOI 2 ($12,8 \pm 2,1$ см³ — $9,8 \pm 1,8$ см³ — $8,5 \pm 1,6$ см³ — $7,2 \pm 1,4$ см³).

Для оцінки впливу локальних характеристик ретенаного (або такого, що затримується у прорізуванні) верхнього ікла на рівень необхідного ортодонтичного втручання проведено порівняльний аналіз КПКТ-параметрів між групами LOI 0, LOI 1 та LOI 2. Результати наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 демонструє виражену градацію змін локальних КПКТ-параметрів верхнього ікла залежно від рівня ортодонтичного втручання. У групі LOI 0 відзначалися менші значення кутів нахилу та глибини розташування, а також біль-

ша відстань до кореня бічного різця. У групі LOI 2 спостерігалось збільшення кутових показників і глибини розташування, а також зменшення відстані до кореня бічного різця та вища частота контакту з ним. Частота дилацерації кореня також зростала зі збільшенням рівня LOI.

Далі проведено аналіз асоціацій між КПКТ-параметрами та рівнем ортодонтичного втручання (LOI) з використанням кореляційного та регресійного аналізу.

Для кількісної оцінки взаємозв'язку між рівнем ортодонтичного втручання (LOI) та досліджуваними параметрами проведено кореляційний аналіз із використанням рангової кореляції Спірмена у всій основній когорті ($n = 174$). Результати наведено в таблиці 4.

Найвищі за абсолютним значенням кореляції ($|\rho| \geq 0,70$) спостерігали для таких параметрів, як глибина розташування ікла ($\rho = +0,81$), найкоротша відстань до кореня бічного різця ($\rho = -0,74$), об'єм носоглоткового простору ($\rho = -0,71$) та кут до площини оклюзії ($\rho = +0,72$).

Помірні кореляції ($0,50 \leq |\rho| < 0,70$) виявлено для ANB ($\rho = +0,61$), SN-GoGn ($\rho = +0,58$), PNS-PPA ($\rho = -0,65$), кута до середньосагітальної площини ($\rho = +0,68$), ширини фолікулярного простору ($\rho = +0,59$) та дилацерації кореня ($\rho = +0,62$).

Слабкіші, але статистично значущі кореляції відзначено для SNA ($\rho = -0,52$), SNB ($\rho = -0,48$) та SN-PP ($\rho = +0,44$).

Усі зв'язки були статистично значущими ($p < 0,001$).

Побудова та характеристика моделі

З метою визначення незалежних предикторів складності лікування було побудовано модель порядкової логістичної регресії із включенням змінних, що демонстрували рівень значущості $p < 0,10$ в уніваріантному аналізі. До початкового набору предикторів увійшли як краніофациальні параметри (SNA, SNB, ANB, SN-GoGn, SN-PP, PNS-PPA, об'єм носоглоткового простору), так і локальні характеристики ретенаного ікла (кут нахилу до середньосагітальної площини, кут до площини оклюзії, глибина розташування, найкоротша відстань до кореня бічного різця, контакт із коренем, ширина фолікулярного простору, дилацерація кореня).

Модель будували методом покрокового відбору з урахуванням мультиколінеарності (коефіцієнта інфляції дисперсії, VIF) та перевіркою припущення пропорційності шансів (тест Бранта).

У результаті покрокового відбору предикторів у фінальну модель порядкової логістичної регресії було включено чотири незалежні змінні: глибину розташування ретенаного ікла, найкоротшу відстань до кореня бічного різця, об'єм носоглоткового простору та кут до площини оклюзії. Інші досліджувані параметри втратили статистичну значущість після багатофакторної корекції та були виключені з моделі.

Фінальна модель була статистично значущою ($\chi^2 = 68,4$; $p < 0,001$) та демонструвала добру пояснювальну здатність варіабельності рівня ортодонтичного втручання (Nagelkerke $R^2 = 0,62$). Перевірка припущення пропорційності шансів за тестом Бранта не виявила статистично значущих порушень ($p > 0,05$), що підтверджує коректність застосування порядкової логістичної регресії.

Незалежні предиктори моделі

Глибина розташування ретенаного ікла була найсильнішим незалежним предиктором підвищення рівня LOI ($OR = 2,85$; 95 % CI 1,90–4,28; $p < 0,001$), що свідчить про істотне зростання складності лікування зі збільшенням глибини залягання зуба.

Найкоротша відстань до кореня бічного різця мала обернений зв'язок із рівнем LOI ($OR = 0,42$; 95 % CI 0,28–0,63; $p < 0,001$): зменшення цього показника асоціювалося зі значним підвищенням складності ортодонтичного лікування.

Об'єм носоглоткового простору також виступав незалежним протективним фактором ($OR = 0,55$; 95 % CI 0,38–0,79; $p = 0,001$), що вказує на підвищення ризику складного перебігу лікування при зменшенні об'єму верхніх дихальних шляхів.

Кут до площини оклюзії залишався статистично значущим предиктором ($OR = 1,78$; 95 % CI 1,12–2,83; $p = 0,015$), що відображає вплив вертикальної орієнтації ретенаного ікла на складність його ортодонтичного переміщення.

Математична форма моделі

Фінальна модель порядкової логістичної регресії була представлена у вигляді:

$$\begin{aligned} \text{logit}(P) = Z = \\ = -4,12 + 1,05 X_1 - 0,87 X_2 - 0,6 X_3 + 0,58 X_4. \end{aligned} \quad (1)$$

де:

X_1 — глибина розташування ікла, мм;

X_2 — найкоротша відстань до кореня бічного різця, мм;

X_3 — об'єм носоглоткового простору, см³;

X_4 — кут до площини оклюзії, °.

Оскільки модель є порядковою, ймовірність кожного рівня LOI визначається через порогові значення (cut-points), що дозволяє оцінювати ймовірність переходу між категоріями LOI 0, LOI 1 та LOI 2.

Практичне застосування моделі

Для клінічного використання запропонованої моделі необхідно виконати послідовний розрахунок лінійного предиктора (Z) на основі індивідуальних КПКТ-параметрів пацієнта. Отримане значення Z надалі використовується для стратифікації пацієнта за рівнем складності ортодонтичного лікування.

Алгоритм розрахунку:

1. Визначити значення КПКТ-параметрів:

- глибина розташування ікла (X_1 , мм);
- найкоротша відстань до кореня бічного різця (X_2 , мм);
- об'єм носоглоткового простору (X_3 , см³);
- кут до площини оклюзії (X_4 , °).

2. Підставити отримані значення у рівняння (1). Отримане значення Z інтерпретується як інтегральний показник складності лікування.

Інтерпретація результату

На основі оцінених коефіцієнтів порядкової логістичної регресії розраховано два порогові значення (cut-points): $\tau_1 = 0,8$ та $\tau_2 = 2,1$ (отримані з моделі як константи, що відповідають переходу між категоріями LOI). Ці значення можуть дещо

варіювати залежно від вибірки; у наведеному прикладі вони становлять 0,8 та 2,1.

Рівень складності лікування визначається за лінійним предиктором Z , який обчислюється за формулою (1).

Правило класифікації:

- $Z \leq \tau_1$ ($Z \leq 0,8$) — низька складність лікування (LOI 0);
- $\tau_1 < Z \leq \tau_2$ ($0,8 < Z \leq 2,1$) — помірна складність лікування (LOI 1);
- $Z > \tau_2$ ($Z > 2,1$) — висока складність лікування (LOI 2).

Приклад клінічного розрахунку (узгоджений із порогоми)

Для пацієнта віком 11,5 років за даними КПКТ отримано такі значення:

$$X_1 = 4,2 \text{ мм}; X_2 = 2,0 \text{ мм}; X_3 = 9,5 \text{ см}^3; X_4 = 38^\circ.$$

Підставляємо значення у формулу (1):

$$Z = -4,12 + 1,05 \cdot 4,2 - 0,87 \cdot 2,0 - 0,6 \cdot 9,5 + 0,58 \cdot 38,$$

$$Z = -4,12 + 4,41 - 1,74 - 5,70 + 22,04,$$

$$Z = 14,89.$$

Отримане значення $Z = 14,89$ значно перевищує $\tau_2 = 2,1$, тому пацієнт класифікується як LOI 2 (висока складність). Це вказує на необхідність прогнозування тривалого ортодонтичного лікування з високою ймовірністю хірургічного етапу.

Узагальнення моделі

Отримана модель демонструє, що рівень ортодонтичного втручання при лікуванні ретенуваних верхніх ікол визначається комбінацією локальних анатомічних параметрів зуба та загальних краніофациальних характеристик, зокрема стану верхніх дихальних шляхів. Найбільший внесок у прогнозування складності лікування мають глибина розташування ікла та його просторові взаємовідношення з коренем бічного різця, тоді як параметри дихальних шляхів виконують модулюючу роль.

Клінічна цінність моделі

Запропонована модель має практичне значення для клінічної ортодонції та може бути використана як інструмент прогнозування складності лікування ретенуваних верхніх ікол до початку терапії. Її застосування дозволяє об'єктивізувати прийняття клінічних рішень, стратифікувати пацієнтів за рівнем ризику та оптимізувати планування лікувальної тактики.

Обговорення

У цьому дослідженні ми розробили та внутрішньо валідували багатофакторну прогностичну модель для кількісної оцінки складності ортодонтичного

лікування ретенуваних верхніх ікол на основі даних КПКТ, виконаних до лікування. На відміну від попередніх підходів, наша модель інтегрує як локальні анатомічні характеристики ретенуваного зуба (глибина, кути, відстань до кореня бічного різця), так і глобальні краніофациальні показники (вертикальний тип росту, об'єм носоглотки), що відображає сучасне розуміння багатофакторної етіології ретенції [1, 3, 10].

Більшість існуючих систем, зокрема індекс KPG, оцінюють переважно анатомічне положення ікла (кут до середньої лінії, глибину, мезіодистальне положення), але є описовими і не надають кількісного прогностичного рівняння для індивідуального пацієнта [1, 6, 11]. Mahmood et al. (2025) показали, що більшість випадків ретенції верхніх ікол класифікуються як «складні» за KPG, причому щільність кістки не корелює з KPG, що підкреслює необхідність незалежної оцінки обох факторів при плануванні лікування [11].

Ciger et al. (2024) оцінили клінічну валідність KPG та виявили, що прогностична точність індексу варіює від 50 % для складних випадків до 100 % для дуже складних, що підтверджує його обмежену чутливість для помірних та складних випадків [12]. Nucci et al. (2024) запропонували новий індекс складності лікування (TDI) для непрорізаних верхніх ікол, який включає аналіз КПКТ-зображень та дозволяє прогнозувати тривалість і складність ортодонтичного лікування [13]. Наша модель, на відміну від KPG та TDI, дає конкретне чисельне значення Z та порогові значення для стратифікації пацієнтів на три рівні складності, що робить її більш клінічно орієнтованою.

Систематичний огляд Mahajan et al. (2025) підтвердив, що вік пацієнта, положення та кут нахилу ретенуваного ікла мають значущий вплив на тривалість лікування, однак автори не запропонували інтегральної моделі [6]. Brands et al. (2025) розробили статистичну модель для прогнозування тривалості тяги ретенуваних ікол із точністю 91 %, включивши горизонтальне положення ікла, розмір фолікула, вертикальну висоту та положення апекса [9].

Це важливе досягнення, але їхня модель зосереджена виключно на тривалості активної тяги та ігнорує загальний краніофациальний контекст. Крім того, Brands et al. розробили окрему модель для прогнозування резорбції кореня з точністю 76 %, виявивши факторами ризику агенезію (за винятком бічних різців), мікродонтію бічного різця та положення апекса ікла [9]. Натомість наша модель оцінює комплексну складність — необхідність хірургічного втручання, ризик резорбції кореня бічного різця та ускладнень — що є

більш клінічно релевантним для вибору тактики лікування [3, 4, 6].

Однією з ключових знахідок нашого дослідження є те, що об'єм носоглотки $\rho = -0,71$ та вертикальний тип росту (SN-GoGn, $\rho = +0,58$) незалежно асоціюються з рівнем LOI. Це підтверджує гіпотезу про те, що «скелетне середовище» модулює складність лікування ретенуваних ікол. Сучасні дослідження демонструють тісний взаємозв'язок між обструкцією верхніх дихальних шляхів, вертикальним типом росту та розвитком зубощелепної системи [7, 8, 10, 22, 23].

Fagundes et al. (2022) у метааналізі показали, що діти з обструктивним апное сну мають виражені краніофасціальні зміни, включаючи збільшення кута SN-GoGn та ретрогнатію щелеп [10]. Salazar et al. (2024) у систематичному огляді з мережевим метааналізом виявили значні відмінності в об'ємі верхніх дихальних шляхів між різними сагітальними та вертикальними скелетними конфігураціями, що узгоджується з нашими висновками [22]. Di Carlo et al. (2024) підтвердили кореляцію між дентоскелетними параметрами краніофасціальної морфології та об'ємом верхніх дихальних шляхів [23]. Shen et al. (2025) виявили, що відношення об'єму аденоїдів до об'єму носоглотки (AV/NPV) позитивно корелює з АНІ, тоді як ширина верхньої щелепи (Mx-Mx) та мінімальна площа повітряного простору (MAA) є незалежними предикторами АНІ [8]. Savoldi et al. (2024) підкреслили, що КПКТ є «золотим стандартом» для діагностики зубощелепних аномалій, однак використання КПКТ для аналізу верхніх дихальних шляхів потребує подальшої валідації [7]. Наше дослідження робить внесок у цю валідацію, демонструючи клінічну значущість вимірювання об'єму носоглотки у пацієнтів із ретенцією ікол.

Найсильнішим предиктором у нашій моделі виявилася глибина розташування ікла ($OR = -2,85$; $\rho = +0,81$), що узгоджується з даними Brands et al. (2025) про вплив вертикальної висоти на тривалість тяги [9]. Poggio et al. (2024) показали, що наявність ретенуваного верхнього ікла подовжує тривалість ортодонтичного лікування, причому погіршення зміщення та ротації ікла значно подовжують час лікування [17]. Migliorati et al. (2024) дослідили техніку «canine first» та виявили, що кут $\alpha < 22^\circ$ є сприятливим прогностичним фактором, а загальний рівень успіху склав 88,85% [18]. Vasočić et al. (2025) підтвердили, що вік пацієнта, положення ікла та кут нахилу до середньої лінії мають статистично значущий вплив на тривалість лікування [19].

Найкоротша відстань до кореня бічного різця ($OR = 0,42$; $\rho = -0,74$) мала обернений зв'язок,

що підтверджує результати Topsakal et al. (2024), які виявили, що медіальне положення ікла та контакт із коренем бічного різця є факторами ризику резорбції кореня [1]. Türker et al. (2025) у КПКТ-дослідженні показали, що піднебінне положення та контакт ретенуваного верхнього ікла з сусідніми зубами збільшують частоту резорбції кореня, особливо впливаючи на бічні різці [20]. Kapila et al. (2024) у систематичному огляді та мета-аналізі підтвердили, що КПКТ є клінічно більш інформативним, ніж панорамна рентгенографія, для оцінки резорбції коренів сусідніх зубів [21]. У нашій роботі контакт із коренем бічного різця спостерігався у 67,9% пацієнтів групи LOI 2 порівняно з 11,8% у групі LOI 0 ($p < 0,001$), що підкреслює необхідність ранньої діагностики таких випадків за допомогою КПКТ [3, 7].

Кут до площини оклюзії (α , $OR = 1,78$; $\rho = +0,72$) також виявився значущим предиктором: більш вертикальна орієнтація ікла (наближена до нормальної) полегшує його переміщення, тоді як горизонтальне положення або дивергенція потребують складнішої біомеханіки [6, 9, 18].

У біваріантному аналізі (табл. 4) такі параметри, як кут до середньосагітальної площини (β) ($\rho = +0,68$), дилацерація кореня ($\rho = +0,62$) та ширина фолікулярного простору ($\rho = +0,59$), демонстрували сильні кореляції з LOI. Однак вони не були включені до фінальної мультифакторної моделі порядкової логістичної регресії. Це не протиріччя, а очікуваний статистичний феномен, зумовлений мультиколінеарністю — тобто високим ступенем взаємозв'язку між предикторами. Іншими словами, β , дилацерація та ширина фолікула несуть інформацію, яка частково дублюється іншими, більш сильними предикторами: глибиною розташування ($\rho = +0,81$), кутом α ($\rho = +0,72$) та відстанню до кореня бічного різця ($\rho = -0,74$). Коли ці три параметри вже включені до моделі, додатковий внесок β , дилацерації та ширини фолікула стає статистично незначущим.

Відсутність ширини фолікулярного простору в нашій фінальній моделі не суперечить даним Brands et al. (2025), оскільки вони оцінювали тривалість тяги, тоді як наша модель оцінює комплексну складність (LOI) [9]. Крім того, наша вибірка обмежена віком 10–14 років, тоді як у дослідженні Brands et al. віковий діапазон був ширшим, що могло вплинути на значущість цього параметра. Важливо підкреслити: відсутність деяких параметрів у фінальній моделі не применшує їхньої клінічної важливості, а лише вказує на те, що їхній прогностичний ефект уже врахований через інші, тісніше пов'язані з ре-

зультатом змінні. Це типова ситуація при побудові багатофакторних регресійних моделей.

Епідеміологічний контекст, етіологія та інтерцептивне лікування

Поширеність ретенції верхніх ікол, за даними Lövgren et al. (2019), при систематичному впровадженні інтерцептивного лікування становить 1,1 % ($N=601$), причому серед пацієнтів переважають дівчата (65 %) [2]. У нашій вибірці частка дівчат у групах з вищим рівнем втручання (LOI 2 — 64,3 %) узгоджується з цими даними.

Jang et al. (2023) у своєму огляді зазначають, що поширеність ретенції верхніх ікол коливається від 1,1 до 3,0 % залежно від популяції, причому у західних популяціях переважає піднебінна ретенція, тоді як у деяких азійських популяціях частіше зустрічається вестибулярна [3]. Автори також підкреслюють, що вестибулярно зміщені ікла асоціюються з вузькою міжкікловою шириною верхньої щелепи, загальним скупченням зубів та скелетним класом III [3]. Peck et al. (2024) у систематичному огляді та метааналізі показали, що етіологія ретенції верхніх ікол є складною комбінацією генетичних та локальних факторів, причому агенезія бічних різців часто асоціюється з піднебінною ретенцією ікол [25].

Philip-Alliez et al. (2025) у своєму огляді продемонстрували, що раннє видалення тимчасових ікол сприяло спонтанному прорізуванню постійних ікол у 87 % випадків. Невдачі були пов'язані з більшою початковою ангільацією, більш вираженим зміщенням ікла, запаленням перікоронального мішка та відсутністю резорбції кореня тимчасового ікла [4]. Bazargani et al. (2024) підтвердили довгострокову ефективність раннього видалення тимчасових ікол для профілактики ретенції постійних ікол, зазначивши, що невдачі пов'язані з більшою початковою ангільацією та більш вираженим зміщенням [26]. Ці дані підкреслюють важливість ранньої діагностики, яку забезпечує наша прогностична модель.

Дорошенко О. М. та співавт. (2025) у систематичному огляді сучасних методів прискорення ортодонтичного переміщення зубів дійшли висновку, що хірургічні методи (кортикотомія, п'єзоцизія, мікроостеоперфорації) демонструють найбільш значний та надійний вплив на прискорення руху зубів [5]. Alikhani et al. (2024) у систематичному огляді підтвердили ефективність хірургічно-ортодонтичних методів для лікування ретенованих ікол [24]. Наша модель може допомогти ідентифікувати пацієнтів, які найбільше потребуватимуть таких додаткових методів прискорення.

Savoldi et al. (2024) підкреслили, що КПКТ є «золотим стандартом» для діагностики зубощелепних аномалій [7]. Turkoglu et al. (2025) розробили модель глибокого навчання nnU-Net v2 для автоматичної сегментації ретенованих ікол у КПКТ-об'ємах, яка демонструє високу ефективність та підкреслює потенціал штучного інтелекту для підвищення діагностичної ефективності [14]. Lee et al. (2025) показали, що AI-система на основі 228 КПКТ-сканів досягла точності 96,2 % у визначенні положення ретенованих ікол, покращила клінічне розуміння складності та підтримує прийняття обґрунтованих рішень щодо лікування [15]. Park et al. (2024) виявили, що 3D КПКТ-дані надають ортодонтам більш повне розуміння просторових взаємозв'язків між ретенованими іклами та сусідніми зубами, що суттєво впливає на прийняття клінічних рішень [16]. Van der Heyden et al. (2025) дослідили AI-модель для прогнозування шляху прорізування верхніх ікол; при достатній точності така модель може бути використана для ранньої діагностики та інтерцепції ретенції [27].

Наше дослідження підтверджує, що тривимірна оцінка положення ікла є критично важливою для прогнозування складності, але для широкого впровадження подібних моделей у клінічну практику необхідні подальші дослідження з зовнішньою валідацією та розробка зручних програмних інструментів.

Lombardo et al. (2025) у систематичному огляді показали перспективний потенціал систем елайнерів у лікуванні ретенованих ікол, особливо в комбінації з гібридним підходом або TADs (тимчасовими ортодонтичними мінігвинтами), що значно знижує потребу в складних ортодонтичних апаратах [28]. Це відкриває нові можливості для лікування пацієнтів з LOI 1 та LOI 2, які раніше потребували складнішої біомеханіки. Наша модель може допомогти в ідентифікації пацієнтів, які потенційно можуть отримати користь від таких сучасних підходів.

Обмеження дослідження

Слід чесно визнати кілька обмежень нашої роботи. По-перше, ретроспективний дизайн несе ризик селекційного зміщення, хоча чіткі критерії включення та заслплення мінімізують його. По-друге, LOI як залежна змінна частково залежить від клінічної тактики та досвіду лікаря, а не лише від біологічної складності. Тому модель може краще прогнозувати «ймовірну інтенсивність лікування в даній клінічній системі», ніж абсолютну анатомічну складність. Це обмеження спільне для багатьох прогностичних

моделей в ортодонції [4, 9]. По-третє, недостатнє співвідношення EPV (при 7–8 предикторах та 28 пацієнтах у LOI 2 EPV \approx 3,5) збільшує ризик перенавчання (overfitting). Хоча ми застосували покрововий відбір та 10-кратну крос-валідацію, майбутні дослідження мають підтвердити нашу модель на незалежних більших вибірках, бажано з використанням LASSO-регресії або методів машинного навчання [9, 14, 15]. По-четверте, відсутність зовнішньої валідації в інших центрах з різними популяціями та протоколами лікування обмежує генералізованість отриманих результатів. По-п'яте, група порівняння (контроль) використовувалася лише для демонстрації краніофасціальних відмінностей, але не входила до прогностичної моделі, що є дизайнерським рішенням, а не обмеженням *per se*.

Напрямки подальших досліджень

Для підвищення надійності нашої моделі доцільним є:

- 1) проведення багатоцентрового проспективного дослідження із зовнішньою валідацією;
- 2) застосування LASSO-регресії або методів машинного навчання для відбору предикторів та зменшення ризику overfitting [14, 15];
- 3) оцінка клінічної користі за допомогою decision curve analysis (DCA);
- 4) розробка спрощеної версії моделі з меншою кількістю змінних (наприклад, лише глибина та відстань до кореня) для рутинного використання в умовах обмежених ресурсів;
- 5) вивчення можливості інтеграції AI-сегментації для автоматичного вимірювання параметрів нашої моделі [14, 15, 27];

6) дослідження зв'язку між типом дихання (ротове, носове), аденоїдними вегетаціями та ефективністю ортодонтичної тяги ретенуваних ікол, що може відкрити нові можливості для міждисциплінарної корекції [7, 10, 22, 23];

7) оцінка застосовності моделі для прогнозування успіху лікування системами елайнерів [28].

Висновок

Наше дослідження демонструє, що комбінація локальних КПКТ-параметрів ретенуваного верхнього ікла (глибина, відстань до кореня бічного різця, кут до площини оклюзії) та глобальних краніофасціальних характеристик (об'єм носоглотки) дозволяє створити прогностичну модель із доброю пояснювальною здатністю (Nagelkerke $R^2 = 0,62$). Модель потребує зовнішньої валідації, але вже зараз може слугувати допоміжним інструментом для стратифікації пацієнтів за рівнем складності лікування ретенуваних верхніх ікол та оптимізації клінічних рішень.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Згода на публікацію

Автори ознайомлені з результатами і схвалили остаточний варіант рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори стверджують, що під час написання статті штучний інтелект не використовувався.

ПОСИЛАННЯ / REFERENCES

1. Topsakal, K. G., Gökmen, Ş., Uçaker, Y. E., et al. (2024). Assessment of the positional and morphological differences of unilaterally impacted canines: A cross-sectional study. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg*, 125(4), 101920. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jormas.2024.101920>.
2. Lövgren, M. L., Dahl, O., Uribe, P., Ransjö, M., & Westerlund, A. (2019). Prevalence of impacted maxillary canines—an epidemiological study in a region with systematically implemented interceptive treatment. *Eur J Orthod*, 41(5), 454–459. DOI: <https://doi.org/10.1093/ejo/cjz056>.
3. Ki-Taeg Jang. (2023). Management of Maxillary Impacted Canines. *J Korean Acad Pediatr Dent*, 50(2), 142–154. DOI: <https://doi.org/10.5933/JKAPD.2023.50.2.142>.
4. Philip-Alliez, C., et al. (2025). Prophylaxis of impacted canines: Prevention, diagnosis, and early management. *Orthod Fr*, 96(1), 79–104. DOI: <https://doi.org/10.1684/orthodfr.2025.183>.
5. Doroshenko, O. M., Doroshenko, M. V., & Omelianenko, O. A. (2025). Modern Methods of Accelerating Orthodontic Tooth Movement in Delayed Eruption: a Systematic review. *Actual Dentistry*, (3), 4–10. [Дорошенко, О. М., Дорошенко, М. В., & Омеляненко, О. А. (2025). Сучасні методи прискорення ортодонтичного переміщення зубів при затримці їх прорізування: систематичний огляд. *Сучасна стоматологія*, (3), 4–10]. DOI: <https://doi.org/10.33295/1992-576X-2025-3-4> [in Ukrainian].

6. Mahajan, D., Parihar, A. V., Mairal, S., et al. (2025). Canine conundrum: Deciphering the factors at play—A systematic review. *J Orthod Sci*, 14(1), 13. DOI: https://doi.org/10.4103/jos.jos_94_24.
7. Savoldi, F., Dagassan-Berndt, D., Patcas, R., et al. (2024). The use of CBCT in orthodontics with special focus on upper airway analysis in patients with sleep-disordered breathing. *Dentomaxillofac Radiol*, 53(3), 178–188. DOI: <https://doi.org/10.1093/dmfr/twae001>.
8. Shen, W., Jin, C., Li, N., et al. (2025). Correlation between 3D craniofacial and upper airway structures and apnea hypopnea index in children. *Journal of Shandong University (Health Sciences)*, 63(7), 44–53. DOI: <https://doi.org/10.6040/j.issn.1671-7554.0.2025.0618>.
9. Brands, L., Kerbrat, J.-B., & Schouman, T. (2025). Maxillary impacted canines: Statistical modeling of traction duration and resorption. *L'Orthodontie Française*, 96(2), 203–215. DOI: <https://doi.org/10.1684/orthodfr.2025.187>.
10. Fagundes, N., et al. (2022). Obstructive sleep apnea and craniofacial morphology in children: a systematic review and meta-analysis. *Sleep Med Rev*, 62, 101589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2022.101589>.
11. Mahmood, H., et al. (2025). 3D Assessment of Orthodontic Treatment Difficulty of Maxillary Impacted Canine Using KPG Index and Qualitative Bone Measurement. *Jaypee Brothers Medical Publishers*, DOI: <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-3926>.
12. Ciger F., et al. (2024). Assessment of clinical validity of KPG index for 3D classification of impacted maxillary canines by cone beam computed tomography. *Orthod Craniofac Res*, 27(5), 712–719. DOI: <https://doi.org/10.1111/ocr.12788>.
13. Nucci L., et al. (2024). A treatment difficulty index for unerupted maxillary canines. *Eur J Paediatr Dent*, 25(2), 112–118.
14. Turkoglu, K., et al. (2025). Deep learning-based 3D automatic segmentation of impacted canines in CBCT scans. *BMC Oral Health*, 25(1), 89. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-025-07117-5>.
15. Lee J. H., et al. (2025). AI-Assisted 3D diagnosis of impacted maxillary canines: A validation study. *J Clin Med*, 14(2), 456. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm14020456>.
16. Park, J. H., et al. (2024). The Influence of Three-Dimensional Cone Beam Computed Tomography (CBCT) Data on Decision-Making for Maxillary Impacted Canines. *Appl Sci*, 14(8), 3210. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14083210>.
17. Poggio, P. M., et al. (2024). Treatment duration by morphology and location of impacted maxillary canines: A cone-beam computed tomography investigation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 165(4), 401–410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2023.12.014>.
18. Migliorati, M., et al. (2024). The “canine first technique” in maxillary impacted canines: analysis of the treatment duration and success of therapy. *Front Oral Health*, 5, 123456. DOI: <https://doi.org/10.3389/froh.2024.1444018>.
19. Vasović, D., et al. (2025). Factors influencing treatment duration of impacted maxillary canines. *Angle Orthod*, 95(3), 266–273. DOI: <https://doi.org/10.2319/080824-643.1>.
20. Türker, N., et al. (2025). Effect of maxillary impacted canine teeth on root resorption of adjacent teeth: a CBCT-based observational study. *BMC Oral Health*, 25(1), 234. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12903-025-07218-1>.
21. Kapila, S., et al. (2024). CBCT vs panoramic radiography in assessment of impacted upper canine and root resorption of the adjacent teeth: A systematic review and meta-analysis. *Dentomaxillofac Radiol*, 53(2), 89–101. DOI: <https://doi.org/10.1093/dmfr/twae008>.
22. Salazar, L. M., et al. (2024). Do patients with different craniofacial patterns have differences in upper airway volume? A systematic review with network meta-analysis. *Eur J Orthod*, 46(3):cjae015. DOI: <https://doi.org/10.1093/ejo/cjae015>.
23. Di Carlo, G., et al. (2024). Upper airway dimensions and craniofacial morphology: a correlation study using cone beam computed tomography. *Eur J Paediatr Dent*, 25(3), 187–193.
24. Alikhani, M., et al. (2024). Surgically facilitated orthodontic treatment of impacted canines: a systematic review. *J Oral Maxillofac Surg*, 82(5), 567–578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joms.2024.01.012>.
25. Peck, S., et al. (2024). The genetic basis of maxillary canine impaction: A systematic review and meta-analysis. *Orthod Craniofac Res*, 27(S1), 45–56. DOI: <https://doi.org/10.1111/ocr.12725>.
26. Bazargani, F., et al. (2024). Long-term outcomes of early extraction of primary canines for prevention of permanent canine impaction. *Eur J Orthod*, 46(4): cjae025. DOI: <https://doi.org/10.1093/ejo/cjae025>.
27. Van der Heyden H., et al. AI-based prediction of maxillary canine eruption pathway. KU Leuven Research Portal. 2024-2025.
28. Lombardo L., et al. (2025). Aligners as a Therapeutic Approach in Impacted Canine Treatment: A Systematic Review. *J Clin Med*, 14(6), 1892. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm14061892>.

A Predictive Model for Assessing the Difficulty of Orthodontic Treatment of Impacted Maxillary Canines Using Cone-Beam Computed Tomography

Doroshenko, O.¹, Malashenko, N.²

¹ Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine,

² Prestige Dentistry Clinic, Kyiv, Ukraine

Introduction. Impaction of maxillary canines is one of the most common eruption anomalies (prevalence: 0.92–3.0%) and represents a significant clinical challenge due to the risks of root resorption of adjacent teeth, occlusal disturbances, and aesthetic defects. Despite the existence of various classification systems (e.g., KPG, TDI), most are purely descriptive and fail to provide a quantitative prognostic assessment of future treatment difficulty. Moreover, existing models largely ignore the craniofacial context — particularly the facial skeletal growth pattern and the condition of the upper airways, which may significantly affect the efficiency of orthodontic traction.

Aim. To develop and internally validate a multifactorial predictive model based on quantitative CBCT-derived parameters (local characteristics of the impacted canine and global craniofacial variables) for the objective assessment of orthodontic treatment difficulty for impacted maxillary canines in children and adolescents aged 10–14 years.

Materials and Methods. A retrospective cohort study was conducted involving 174 patients of the main sample (102 — LOI 0, 44 — LOI 1, 28 — LOI 2) and 47 healthy controls. The Level of Orthodontic Intervention (LOI) was determined post hoc from the medical records. All patients pre-treatment CBCT using an i-CAT Gendex CB-500 device. Seven craniofacial parameters (SNA, SNB, ANB, SN–GoGn, SN–PP, PNS–PPA, and nasopharyngeal volume) and seven local parameters of the impacted canine (angles β and α , vertical depth, shortest distance to the lateral incisor root, contact, follicular space width, and root dilaceration) were assessed. Measurements were performed by two blinded, calibrated examiners (ICC > 0.90). Ordinal logistic regression with stepwise selection, a multicollinearity check (using variance inflation factor, VIF), and the Brant test were used for model building. Internal validation was performed using 10-fold cross-validation.

Results. Four independent predictors entered the final model: vertical depth of the canine ($OR = 2.85$; 95% CI: 1.90–4.28; $p < 0.001$), shortest distance to the lateral incisor root ($OR = 0.42$; 95% CI: 0.28–0.63; $p < 0.001$), nasopharyngeal volume ($OR = 0.55$; 95% CI: 0.38–0.79; $p = 0.001$), and angle to the occlusal plane ($OR = 1.78$; 95% CI 1.12–2.83; $p = 0.015$). The model showed good explanatory power (Nagelkerke $R^2 = 0.62$) and statistical significance ($\chi^2 = 68.4$; $p < 0.001$). A mathematical equation for the linear predictor Z and cut-off values ($\tau_1 = 0.8$; $\tau_2 = 2.1$) were developed to stratify patients into three difficulty levels: LOI 0 ($Z \leq 0.8$), LOI 1 ($0.8 < Z \leq 2.1$), and LOI 2 ($Z > 2.1$).

Conclusions. The proposed predictive model allows for a quantitative assessment of orthodontic treatment difficulty for impacted maxillary canines prior to treatment initiation based on four key CBCT parameters. Although the model requires external validation on multicenter samples, it can currently serve as an auxiliary tool for patient stratification, treatment strategy optimization (observation, early surgical exposure, or autotransplantation), and for counseling patients regarding expected treatment duration and risks.

Keywords: impacted maxillary canines, cone-beam computed tomography (CBCT), predictive model, ordinal logistic regression, treatment difficulty, nasopharyngeal volume.

Стаття: надійшла до редакції 10.02.2026 р.;
прийнята до друку 15.04.2026 р.;
опублікована 29.05.2026 р.

Дорошенко Олена Миколаївна

Доктор медичних наук, професор,
професор кафедри ортопедичної
стоматології та імплантології
Національного університету охорони
здоров'я України імені П. Л. Шупика,
м. Київ, Україна

 <https://orcid.org/0000-0001-8859-3610>

Малашенко Наталія Юріївна

Кандидат медичних наук,
лікар стоматолог-ортодонт
вищої категорії,
ПП «Стоматологія Престиж»,
м. Київ, Україна

 <https://orcid.org/0000-0002-2714-7606>