УДК 004.94:616.314.15
DOI https://doi.org/10.35220/2523-420X/2026.3.7

І.І. Заболотна,
кандидат медичних наук, доцент,
Донецький національний медичний університет,
вул. Юрія Коваленка, 4а, м. Кропивницький, Україна,
індекс 25031,
myhelp200@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-3284-0392

Т.Л. Богданова,
кандидат педагогічних наук, доцент,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
проспект Берестейський, 37, м. Київ, Україна,
індекс 03056, bogdanovatatyana2408@gmail.com
http://orcid.org/0000-0001-5501-132X

ЛОГІСТИЧНІ СКРИНІНГОВІ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИНИКНЕННЯ ПРИШИЙКОВИХ УРАЖЕНЬ ЗУБІВ

Мета дослідження. *Розробити логістичні скринінгові моделі прогнозування ризику виникнення пришийкових уражень зубів у пацієнтів молодого віку.* **Методи дослідження.** *Було проведено обстеження та анкетування 272 пацієнтів (середній вік 24,3±6,9 роки). Методом логістичного регресійного аналізу у них було визначено незалежні предиктори виникнення клиновидного дефекту (КД), пришийкового карієсу (ПК) та ерозії (Е) емалі зубів. Для моделювання прогнозу була обрана логістична регресія, реалізована на мові програмування Python із застосуванням бібліотек scikit-learn. У зв'язку з різною поширеністю пришийкових уражень зубів було використано балансування класів (class_weight=»balanced»). Для оцінки моделей було розраховано Receiver Operating Characteristic curve-Area under the curve (ROC-AUC).* **Наукова новизна.** *Провідними незалежними предикторами КД було визначено рецесію ясен і надмірний тиск на зубну щітку, ПК – звичку вживати чай з додаванням лимону та патологічний вид прикусу, Е емалі – наявність тріщин емалі на вестибулярній поверхні зубів та оклюзійної стертості. Аналіз ефективності логістичної моделі прогнозування КД зубів показав максимальну чутливість (recall=1,00) і помірну, але недостатню дискримінаційну здатність (ROC-AUC=0,677), що відповідає задовільному рівню розділення класів. Модель прогнозування ПК зубів також продемонструвала високу recall=0,98 та дискримінаційну здатність (ROC-AUC=0,651), що є прийнятним для інструментів раннього скринінгу, метою яких є мінімізація хибнонегативних результатів. Модель прогнозування Е емалі зубів показала recall=0,87 та ROC-AUC=0,604, що свідчить про недостатню дискримінаційну здатність в умовах обмеженої підвибірки. Отримання деяких предикторів з від'ємними коефіцієнтами у моделі прогнозування ПК зумовлено обмеженнями лінійного підходу логістичної регресії та особливостями досліджуваної вибірки.* **Висновки.** *Розроблені логістичні моделі можуть бути використані лікарем-стоматологом для оцінки індивідуального ризику виникнення КД, ПК та Е емалі зубів у пацієнтів молодого віку і визначення найбільш значущих предикторів з подальшою їх корекцією.*

Ключові слова*: карієс, ерозія, ротова рідина, тріщини, профілактика, предиктори.*

I.I. Zabolotna,
PhD of Medical Sciences, Assistant Professor,
Donetsk National Medical University,
4a Yuri Kovalenko street, Kropyvnytskyi, Ukraine,
postal code 25031,
myhelp200@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-3284-0392

T.L. Bohdanova,
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute»,
37 Beresteyskyi avenue, Kyiv, Ukraine, postal code 03056,
bogdanovatatyana2408@gmail.com
http://orcid.org/0000-0001-5501-132X

LOGISTIC SCREENING MODELS FOR PREDICTING THE DEVELOPMENT OF CERVICAL LESIONS OF TEETH

Purpose of the study. *To develop logistic screening models for predicting the risk of cervical lesions in young patients.* **Research methods.** *There were examined and surveyed 272 patients (average age 24.3±6.9 years). Using the method of logistic regression analysis, independent predictors of the development of a wedge-shaped defect (WSD), cervical caries (CC) and enamel erosion (E) of teeth were identified. For prediction modeling, logistic regression was chosen, implemented in the Python programming language using scikit-learn libraries. Due to different prevalence of cervical lesions, class balancing (class_weight="balanced") was used. To evaluate the models, the Receiver Operating Characteristic curve-Area under the curve (ROC-AUC) was calculated.* **Scientific novelty.** *The leading independent predictors of WSD were gingival recession and excessive pressure on a toothbrush, CC – the habit of drinking tea with lemon and a pathological bite, enamel E – the presence of enamel cracks on the vestibular surface of the teeth and occlusal attrition. The analysis of the effectiveness of the logistic model for predicting WSD of teeth showed maximum sensitivity (recall=1.00) and moderate, but insufficient discriminatory ability (ROC-AUC=0.677) that corresponds to a satisfactory level of class separation. The model for predicting CC of teeth also demonstrated high recall=0.98 and discriminatory ability (ROC-AUC=0.651) that is acceptable for early screening tools aimed at minimizing false negative results. The model for predicting enamel E of teeth showed recall=0.87 and ROC-AUC=0.604 that indicates insufficient discriminatory ability in conditions of a limited subsample. Obtaining some predictors with negative coefficients in the model for predicting CC is due to the limitations of the*

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

© І.І. Заболотна, Т.Л. Богданова, 2026

linear logistic regression approach and the characteristics of the studied sample. ***Conclusions.*** *The developed logistic models can be used by a dentist to assess the individual risk of WSD, CC and enamel E of teeth in young patients and determine the most significant predictors with their subsequent correction.*

Key words: *caries, erosion, oral fluid, cracks, prevention, predictors.*

Постановка проблеми. Пришийкові ураження зубів є поширеною патологією, особливо серед пацієнтів у віці старше 30-ти років. Своєчасне виявлення осіб, що мають предиктори їх виникнення, дозволить запобігти прогресуванню уражень і позитивно вплине на загальні показники стоматологічного здоров'я. Тому актуальними є розробка та впровадження в практику лікаря-стоматолога інноваційних стратегій профілактики [1].

З метою прогнозування розвитку патології зубів все частіше використовується математичне моделювання, підходи до якого постійно змінюються та удосконалюються [2]. Це виглядає складним завданням для пришийкових уражень зубів через багатофакторність їх етіопатогенезу та обмежені знання про предиктори. Крім того, на сьогоднішній день відсутні скринінгові моделі щодо прогнозування виникнення патології зубів у пришийковій ділянці (ПД) у пацієнтів молодого віку. Тому для їх побудови обґрунтованим є проведення популяційних досліджень і визначення впливу багатьох чинників.

Серед сучасних підходів більш затребуваним стає логістичний регресійний аналіз, який дозволяє не тільки прогнозувати імовірність розвитку захворювання, але й кількісно оцінити вплив кожного предиктору на результат у формі коефіцієнтів [3]. За допомогою методів логістичної регресії на основі набору незалежних предикторів стало можливим визначити найважливіші з них [4]. Такий підхід значно полегшує процес скринінгу, додає йому об'єктивізму, а також дозволяє надійно обирати осіб для профілактиктичних заходів, тому позитивно впливає на якість стоматологічної допомоги та збільшує її економічну ефективність [5].

Але неправильні або спотворені оцінки дослідження призводять до невизначеності щодо прогнозу, що обмежує корисність моделей у прийнятті клінічних рішень [6]. Хоча існують деякі однакові етіологічні чинники пришийкових уражень зубів, більшість предикторів відрізняється або має різний ефект в залежності від виду патології у ПД та специфічні наслідки у різних вікових групах [7]. Тому було запропоновано розробити окремі логістичні моделі для клиновидного дефекту (КД), пришийкового карієсу (ПК) та ерозії (Е) емалі зубів.

Мета дослідження. Розробити логістичні скринінгові моделі прогнозування ризику виникнення пришийкових уражень зубів (КД, ПК та Е емалі) та оцінити їх ефективність у пацієнтів молодого віку.

Матеріали і методи дослідження. У рамках дослідження було обстежено 272 пацієнта (174 жінок і 98 чоловіків) 18-44 років (середній вік 24,3±6,9 роки) різних соціальних груп і професій. Додатково було визначено біофізичні показники нестимульованої слини (pH і буферної ємності в ум. од., швидкість слиновиділення [Шс] у мл/хв) та психоемоційний стан за рівнем особистісної тривожності за опитувальником C.D. Spielberger et al. в адаптації Ю.Л. Ханіна [8]. Інформація про поведінкові фактори та системне здоров'я була зібрана методом анкетування за розробленою «Анкетою/опитувальником для пацієнта».

Критеріями включення пацієнтів у дослідження були молодий вік згідно класифікації ВООЗ (2016), відсутність алко- та наркозалежності, новоутворень, туберкульозу, ВІЛ/СНІДу, гепатиту С, розладів психіки, вагітності, періоду лактації та професійних шкідливостей. За результатами обстеження у 125 пацієнтів було діагностовано пришийкові ураження зубів (у 60 осіб КД, у 50 – ПК, у 15 – Е емалі зубів) та виділено потенційні чинники виникнення пришийкової патології зубів (n=84) [8].

Для визначення предикторів були застосовані однофакторний аналіз (таблиці спряженості 2×2) та багатофакторний аналіз методом логістичної регресії з L1-регуляризацією (LASSO) [4]. Для кожної змінної двома методами були розраховані відношення шансів (ВШ) та їх 95% довірчі інтервали (95% ДІ). Фактор вважали значущим, якщо ДІ не включав одиницю. При аналізі первинних даних враховували наявність або відсутність змінної та її індивідуальні характеристики. Для кількісних показників за граничні значення були прийняті середні значення серед усіх обстежених (n=272). Для бінарних змінних (0/1) не проводилось додаткове встановлення порогів.

Інтерпретацію отриманих результатів здійснювали по величині ВШ, ширині ДІ та напрямку їх зміни при введенні контролю. Для побудови скринінгових моделей були відібрані лише незалежні предиктори (первинні етіологічні, що є значущими при обох логістичних регресійних аналізах зі зміною ВШ меншою за 20%) [9]. Серед них були клінічні маркери, анатомічні особливості,

поведінкові звички та біофізичні показники РР. З аналізу були виключені фактори з кількістю спостережень меншою за 10.

Дослідження було проведено з дотриманням принципів Гельсінської декларації та повністю виключало обмеження інтересів пацієнта та нанесення шкоди його здоров'ю (висновок Комісії з біоетики Донецького національного медичного університету № 43 від 21.01.2021 р.). Усі пацієнти надали письмову інформовану згоду на участь у дослідженні.

Для моделювання прогнозу була обрана логістична регресія, реалізована на мові програмування Python (версія 3.9.12, www.python.org) із застосуванням бібліотек Scikit-learn. У зв'язку з різною поширеністю пришийкових уражень зубів серед обстежених пацієнтів, у моделі Е емалі зубів було використано балансування класів (class_weight=»balanced»). Це дозволило компенсувати дисбаланс між наявними та відсутніми випадками патології зубів. З метою оцінки ефективності моделі було застосовано Stratified K-Fold Cross-Validation (n=5) з випадковим перемішуванням, що забезпечило збереження пропорцій класів у кожному фолді. Прогнозні ймовірності були отримані у форматі out-of-fold, що сприяло уникненню надмірного підстроювання моделі та дозволило оцінити її здатність до узагальнення на нових даних. Для кожної патології було розраховано метрику ROC-AUC (Receiver Operating Characteristic curve-Area under the curve), яка характеризує здатність моделі правильно розрізняти пацієнтів з пришийковим ураженням зубів і без нього.

Для оцінки важливості предикторів було використано стандартний підхід логістичної регресії з нормалізацією коефіцієнтів на стандартне відхилення відповідного предиктору. Відносна величина коефіцієнта дозволяє визначити найбільш впливові фактори, що підвищують або знижують ймовірність розвитку патології зубів.

Для кожного пацієнта імовірність виникнення пришийкового ураження зубів розраховувалась за класичною формулою логістичної регресії:

$$P(Y)=\frac{1}{1+e^{-(\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\ldots+\beta_nX_n)}}, \qquad (1)$$

де P (Y=1) – імовірність виникнення конкретної патології; β0 – константа моделі; β1…βn – коефіцієнти логістичної регресії; X1…Xn – значення предикторів для певного пацієнта. Значення коефіцієнтів логістичної регресії відображали внесок відповідних предикторів у прогнозування ймовірності виникнення патології.

З метою підвищення клінічної інтерпретованості результатів коефіцієнти регресії (β), отримані у межах логістичної моделі, були додатково трансформовані у показники ВШ. Такий підхід дозволяє визначити, у скільки разів змінюються шанси розвитку пришийкової патології зубів при збільшенні відповідного предиктора на одну умовну одиницю при незмінених інших факторах. Це забезпечує перехід від статистичних коефіцієнтів до клінічної оцінки впливу предикторів та їх порівняння між собою. Слід зазначити, що ВШ за математичним визначенням є строго додатною величиною, оскільки розраховується як exp(β)>0 для будь-якого значення β.

Коефіцієнти β_i були визначені методом максимізації правдоподібності (Maximum Likelihood Estimation) під час тренування моделі на даних. Кожен з них відображає логарифмічну зміну ВШ пришийкової патології зубів при зміні фактору на одиницю. Для більш зручного порівняння впливу предикторів коефіцієнти нормалізуються на стандартне відхилення відповідного фактору, що дозволило виділити найбільш значущі з них.

Ефективність логістичних моделей прогнозування оцінювали при пороговому значенні імовірності (threshold=0,10), що відповідає їх скринінговому призначенню та передбачає пріоритет виявлення максимальної кількості пацієнтів з патологією навіть за рахунок зростання частки хибнопозитивних результатів. Для кожного ураження зубів також були побудовані ROC-криві, що дозволило визначити компроміс між чутливістю (recall) та точністю (precision) моделі. Значення recall та специфічності розроблених моделей інтерпретували як низькі (<60%), помірні (60–79%) або високі (≥80%). Значення ROC-AUC розцінювали як низькі (0,50–0,70), помірні (0,71–0,90) та високі (>0,90) [10].

Результати та їх обговорення. Імовірність виникнення КД зубів для конкретного пацієнта була розрахована за формулою логістичної регресії:

$$P(КД=1)=\frac{1}{1+\exp(-Z_{КД})}, \qquad (2)$$

де лінійний предиктор ZКД має вигляд:

$Z_{КД}$= -2,7080+0,0827·*Вік*+0,5534·*Приклад ання тиску на зубну щітку*+0,0447·*Видалені зуби*+0,6434·*Рецесія ясен*+0,3305·*Шс*.

Таким чином, індивідуальне значення імовірності розвитку КД зубів можна розрахувати шляхом внесення конкретних значень незалеж-

них предикторів у логістичну формулу. У табл. 1 наведені предиктори, включені до моделі, з відповідними коефіцієнтами та показниками ВШ. Усі чинники показали позитивний напрям впливу (ВШ>1), що свідчить про їх роль у збільшенні ризику виникнення КД зубів. Найбільший внесок мали наявність у пацієнта рецесії ясен (ВШ=1,90) і гігієнічної звички прикладати тиск на мануальну зубну щітку (ВШ=1,74), що підтверджується іншими дослідженнями [7].

Було визначено, що вік пацієнта 25 років і старше (ВШ=1,09) та Шс менша за 0,5 мл /хв (ВШ=1,39) також збільшують ризик виникнення КД зубів. Відомо, що вік понад 30 років тісно пов'язаний з некаріозними пришийковими ураженнями зубів [11]. Зменшення Шс частіше розглядається в якості етіопатогенетичного чинника карієсу зубів [12]. Наявність у ротовій порожнині (РП) порушення цілісності зубного ряду за рахунок видалених зубів має відносно незначний (ВШ=1,05), проте позитивний вплив. Інші дослідники також визначили, що пацієнти з меншою кількістю зубів у РП мають більший шанс зносу твердих тканин у ПД і, відповідно, більшу кількість некаріозних пришийкових уражень [11].

Для наочної оцінки відносної ваги предикторів було побудовано діаграму їх внеску, який був розрахований як добуток абсолютного значення коефіцієнта регресії та стандартного відхилення відповідної змінної (рис. 1). Такий підхід дозволяє врахувати як силу впливу фактору, так і варіабельність його значень у досліджуваній вибірці.

Дані, наведені у табл. 1 і на рис. 1, відображають різні характеристики логістичної моделі. Коефіцієнти регресії в табл. 1 використовуються безпосередньо для розрахунку індивідуальної імовірності виникнення КД зубів і показують напрям та силу впливу кожного окремого пред-

Таблиця 1

Коефіцієнти логістичної моделі прогнозування КД зубів

Предиктор	β-коефіцієнт	ВШ=exp(β)	Характер впливу
Вік	+0,083	1,09	↑ ризику
Прикладання тиску на зубну щітку	+0,553	1,74	↑ ризику
Видалені зуби	+0,045	1,05	↑ ризику
Рецесія ясен	+0,643	1,90	↑ ризику
Шс	+0,331	1,39	↑ ризику

Примітка: ВШ – відношення шансів; β – коефіцієнт регресії; exp(β) – експоненційоване значення коефіцієнта регресії (ВШ); Шс – швидкість слиновиділення.

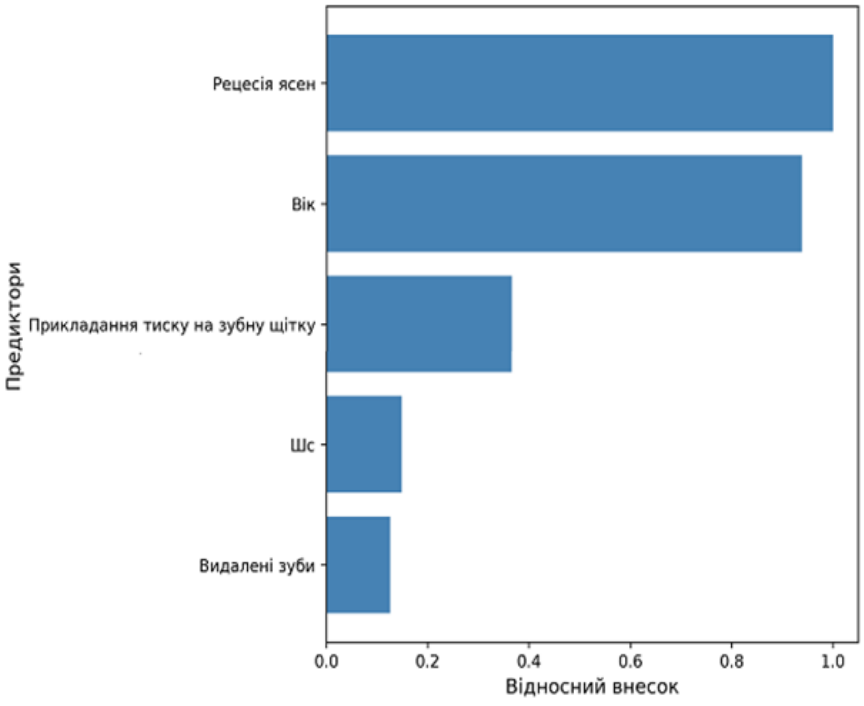


Рис. 1. Відносна значущість предикторів КД зубів

иктора при фіксації інших змінних. Водночас значення відностного внеску, наведені на рис. 1, не входять до формули прогнозу, проте наочно ілюструють, які предиктори мають найбільший внесок на результат моделювання.

Аналіз ефективності представленої моделі показав високе значення recall=1,00, що свідчить про здатність коректно ідентифікувати всіх пацієнтів, що мають ризик виникнення КД зубів, без пропущених випадків. Значення ROC-AUC становило 0,677, що відповідає невисокій, але стабільній дискримінаційній здатності моделі (рис. 2).

Отримана ROC-крива істотно відхиляється від діагоналі випадкового класифікатора, що підтверджує наявність інформативного сигналу в сукупності використаних предикторів. Незважаючи на відносно невисоке значення precision=0,22, така характеристика є очікуваною для скринінгових моделей з низьким діагностичним порогом (threshold=0,10), в яких пріоритетом є мінімізація хибнонегативних результатів.

Таким чином, запропонована логістична модель прогнозування КД зубів може стати первинним інструментом скринінгу для виявлення пацієнтів з підвищеним ризиком його розвитку. Максимальна чутливість моделі забезпечує відсутність пропущених випадків КД, що є важливим з огляду на тривалий і часто безсимптомний перебіг патології у ПД зубів. Використання для розробки логістичної моделі виключно незалежних факторів дозволило уникнути проблеми конкуренції між змінними та отримати прямий напрям впливу для всіх включених предикторів, що підвищує клінічну інтерпретованість і практичну спрямованість результатів.

На наступному етапі дослідження була обчислена імовірність виникнення ПК зубів для конкретного пацієнта за формулою логістичної регресії, інтерпретованою для незалежних предикторів ПК зубів:

$$P(ПК=1)=\frac{1}{1+\exp(-Z_{ПК})}, \qquad (3)$$

де лінійний предиктор ZПК визначається як зважена сума значень предикторів з відповідними коефіцієнтами моделі:

$Z_{_ПК}$=+1,2279–0,4174·*Вкорочена вуздечка язика*+0,7897·*Патологічний вид прикусу*–0,2305·*Буферна ємність ротової рідини (РР)*+1,0753·*Вживання чаю з лимоном*–0,0669·*Вживання фруктів*–1,0515·*Шс*+0,378·*Оклюзійна стертість зубів*+0,3782·*Тріщини емалі зубів.*

Наведена формула дозволяє провести індивідуальний розрахунок імовірності розвитку ПК зубів на основі даних пацієнта. У табл. 2 представлені

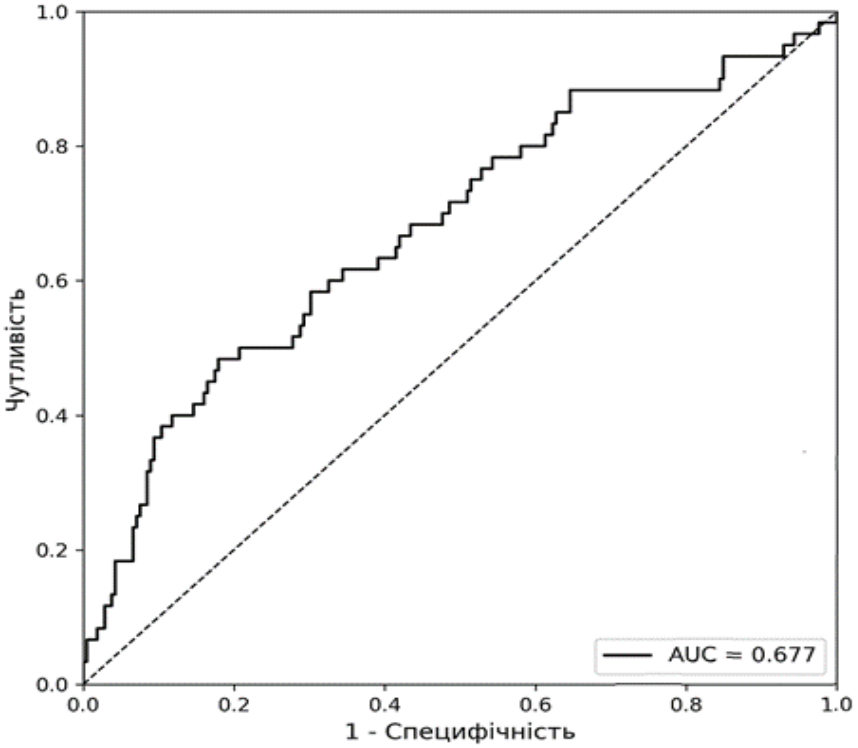


Рис. 2. ROC-крива для КД зубів

Таблиця 2

Коефіцієнти логістичної моделі прогнозування ПК зубів

Предиктор	β-коефіцієнт	ВШ=exp(β)	Характер впливу
Вживання чаю з лимоном	+1,075	2,93	↑ ризику
Патологічний вид прикусу	+0,790	2,20	↑ ризику
Шс	−1,052	0,35	↓ ризику
Оклюзійна стертість зубів	+0,378	1,46	↑ ризику
Тріщини емалі зубів	+0,378	1,46	↑ ризику
Вживання фруктів	−0,067	0,94	↓ ризику
Вкорочена вуздечка язика	−0,417	0,66	↓ ризику
Буферна ємність РР	−0,231	0,79	↓ ризику

Примітка: ВШ – відношення шансів; β – коефіцієнт регресії; exp(β) – експоненційоване значення коефіцієнта регресії (ВШ); Шс – швидкість слиновиділення; РР – ротова рідина.

предиктори, включені до моделі, з відповідними коефіцієнтами та показниками ВШ. Найбільший внесок у збільшення ризику виникнення ПК зубів мали звичка вживати чай з лимоном (ВШ=2,93) і патологічний вид прикусу (ВШ=2,20). З літературних джерел відомо, що деякі особливості дієти пацієнта збільшують поширеність карієсу, у тому числі, зловживання лимонним соком [13]. Але, вірогідно, зв'язок між наявністю звички додавати лимон до чаю та виникненням ПК зубів не є прямим. Швидше за все, визначене дієтичне вподобання створює у РП додаткові умови для зсуву pH у кислу сторону, що сприяє карієсогенній ситуації та домінуванню процесів демінералізації над ремінералізацією. Негативний вплив також може мати фактор додавання цукру, що не був врахований при аналізі цього предиктора. Все це створює додаткові умови уразливості ПД зуба при дії карієсогенних бактерій у РП [14]. Внесок патологічного виду прикусу у збільшення шансу виникнення ПК зубів, вірогідно, пов'язаний з погіршенням гігієнічного статусу пацієнта при наявності аномалій співвідношення зубних дуг, хоча більш досліджена їх роль у розвитку некаріозних пришийкових уражень зубів [15].

Логістична модель також визначила фактори з ВШ<1, зокрема буферну ємність РР меншу за 6,5 ум. од., Шс меншу за 0,5 мл⁄хв, наявність вкороченої вуздечки язика, що не відповідає сучасним дослідженням. Навпаки, відомо, що високі показники Шс та буферної ємності РР відіграють вирішальну нейтралізуючу роль у РП [12, 14]. Значення ВШ<1 не доводять від'ємного або захисного впливу у прямому розумінні, а свідчать лише про те, що шанси виникнення ПК зубів у пацієнта з даним предиктором є нижчими порівняно з референтною групою в контексті конкретної багатофакторної моделі. Крім того, отримання предикторів з ВШ<1 може бути зумовлено обмеженнями лінійного підходу логістичної регресії при моделюванні нелінійних залежностей та особливостями структури досліджуваної вибірки. Також було визначено, що пацієнти, які вживають фрукти (цитрусові, яблука, ківі у загальній середньодобовій кількості 2,5 штуки і більше) мають нижчий шанс виникнення ПК зубів, що підтверджується результатами інших дослідників [13].

Діаграма на рис. 3 демонструє домінування наявності звички вживати чай з лимоном і патологічного виду прикусу у пацієнта серед усіх включених до моделі предикторів.

Аналіз ефективності представленої моделі показав високе значення recall=0,98, що свідчить про її здатність коректно ідентифікувати переважну більшість пацієнтів з ризиком виникнення ПК зубів. Значення ROC-AUC=0,651 відповідає невисокій дискримінаційній здатності моделі, що є прийнятним для багатофакторних скринінгових інструментів (рис. 4).

ROC-крива моделі ПК зубів демонструє виражене відхилення від лінії випадкового класифікатора, що вказує на стабільний прогностичний сигнал обраних предикторів. Значення precision=0,18 відповідає очікуваному рівню для інструментів раннього виявлення, де допустима кількість хибнопозитивних результатів є необхідною компенсацією за мінімізацію пропущених випадків. Такий баланс між чутливістю та точністю є клінічно виправданим, оскільки наслідки пропущеного ураження зуба ПК мають гірший прогноз, ніж проведення додаткового обстеження пацієнта без патології у ПД та його динамічний моніторинг.

Для прогнозування розвитку Е емалі також була побудована окрема логістична скринінгова модель. Імовірність виникнення патології для конкретного пацієнта обчислювалась за стандартною формулою логістичної регресії:

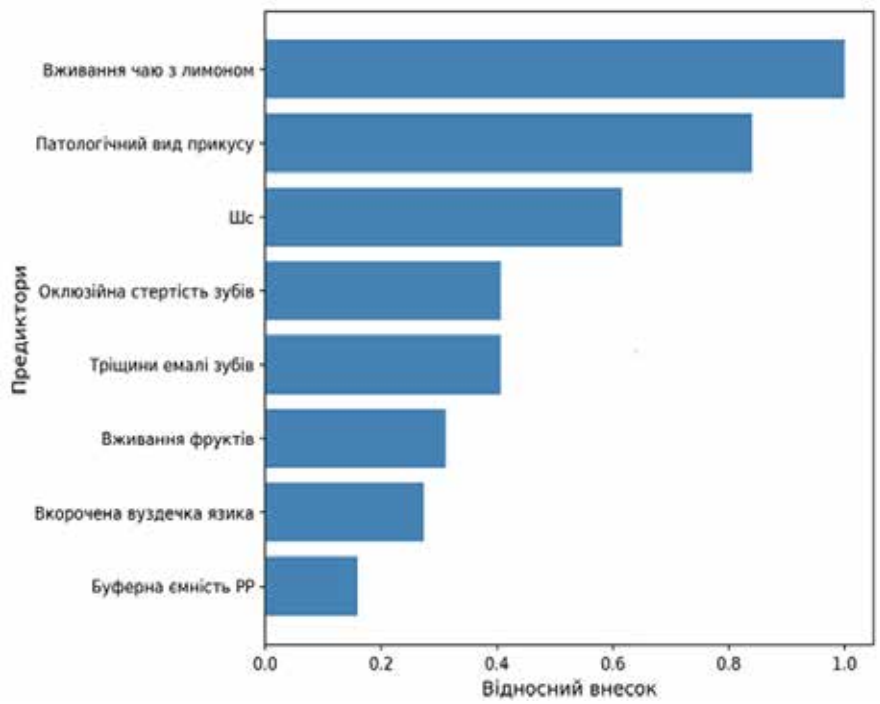


Рис. 3. Відносна значущість предикторів ПК зубів

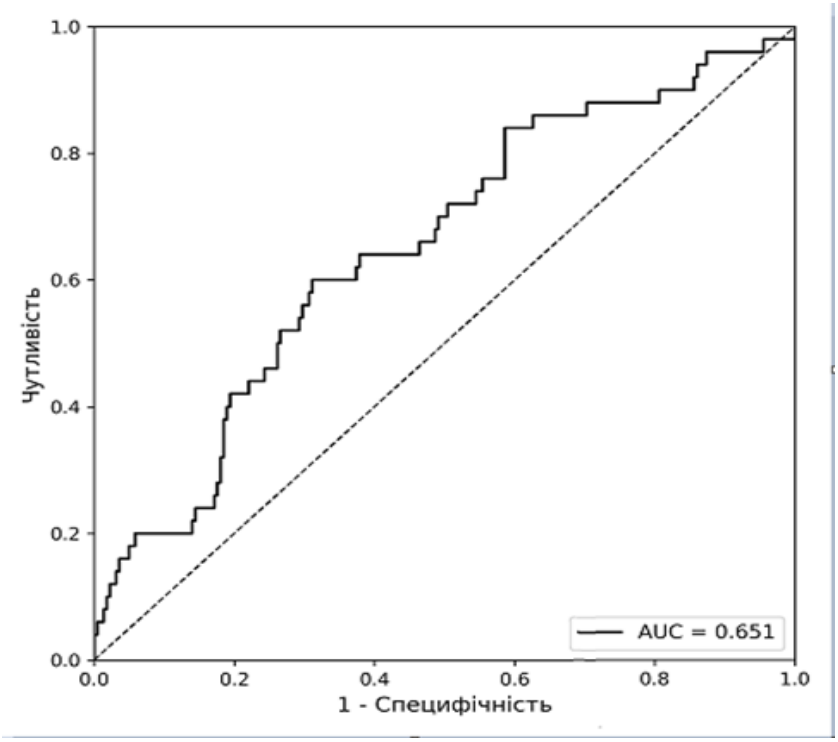


Рис. 4. ROC-крива для ПК зубів

$$P(E=1)=\frac{1}{1+\exp(-Z_E)}, \qquad (4)$$

де лінійний предиктор ZE аналогічно попереднім моделям визначається як зважена сума значень факторів з відповідними коефіцієнтами. У загальному вигляді лінійний предиктор має форму:

Z_E=–1,2103+0,846·*Тріщини емалі зубів*+0,846·*Оклюзійна стертість зубів*

У табл. 3 наведені предиктори, включені до моделі, з відповідними коефіцієнтами та показниками ВШ. Модель Е емалі суттєво відрізняється від моделей КД та ПК зубів як за кількістю предикторів, так і за їх характером. До складу моделі

Таблиця 3

Коефіцієнти логістичної моделі прогнозування Е емалі зубів

Предиктор	β-коефіцієнт	ВШ=exp(β)	Характер впливу
Тріщини емалі зубів	+0,846	2,33	↑ ризику
Оклюзійна стертість зубів	0,846	2,33	↑ ризику

Примітка: ВШ – відношення шансів; β – коефіцієнт регресії; exp(β) – експоненційоване значення коефіцієнта регресії (ВШ).

увійшли лише два клінічні маркери, а сама підвибірка мала обмежений розмір (n=15). На відміну від інших моделей, обидва предиктори моделі Е емалі продемонстрували однаковий за силою та напрямом внесок (ВШ=2,33 для кожного), підвищуючи шанс виникнення патології більш ніж удвічі. Предикторів з ВШ<1 у моделі Е емалі, на відміну від моделі ПК зубів, виявлено не було.

Для наочної оцінки відносної ваги предикторів було побудовано діаграму (рис. 5).

Рівний внесок обох предикторів підтверджує їх однаково визначальну роль у межах даної моделі. Це, вірогідно, зумовлено тим, що тріщини емалі на вестибулярній поверхні зубів, які діагностуються під час візуального огляду при природному і/або штучному освітленні та висушуванні, і наявність оклюзійної стертості зубів є патогенетично спорідненими проявами оклюзійного зносу, який розглядається в якості одного з основних етіологічних факторів некаріозних пришийкових уражень зубів [16].

Аналіз ефективності моделі показав recall=0,87, що свідчить про виявлення переважної більшості пацієнтів з ризиком виникнення Е емалі зубів. Значення ROC-AUC=0,604 вказує на невисоку дискримінаційну здатність моделі, що є очікуваним результатом за умови обмеженої кількості спостережень (рис. 6).

Precision=0,05 є надзвичайно низькою, що зумовлено як скринінговим характером моделі з порогом 0,10, так і вираженим дисбалансом класів у вибірці. Також слід зауважити, що інтерпретація результатів даної моделі потребує особливої обережності з огляду на малий розмір підвибірки. Отримані коефіцієнти та метрики слід розглядати як попередні, що підлягають валідації на більшій когорті пацієнтів з Е емалі зубів. Тим не менш, навіть у межах наявних даних модель демонструє стабільний прогностичний сигнал і може бути основою для подальших досліджень. Крім того, для покращення якості прогнозування необхідні дані з більш різноманітної популяції.

Таким чином, порівняльний аналіз трьох побудованих логістичних моделей показав суттєві відмінності як у складі предикторів, так і в характері їх впливу. Це підтвердило доцільність розробки окремих прогностичних моделей. Їх спільною рисою є виражена скринінгова спрямованість. Це реалізується через використання зниженого порогового значення імовірності (threshold=0,10) та

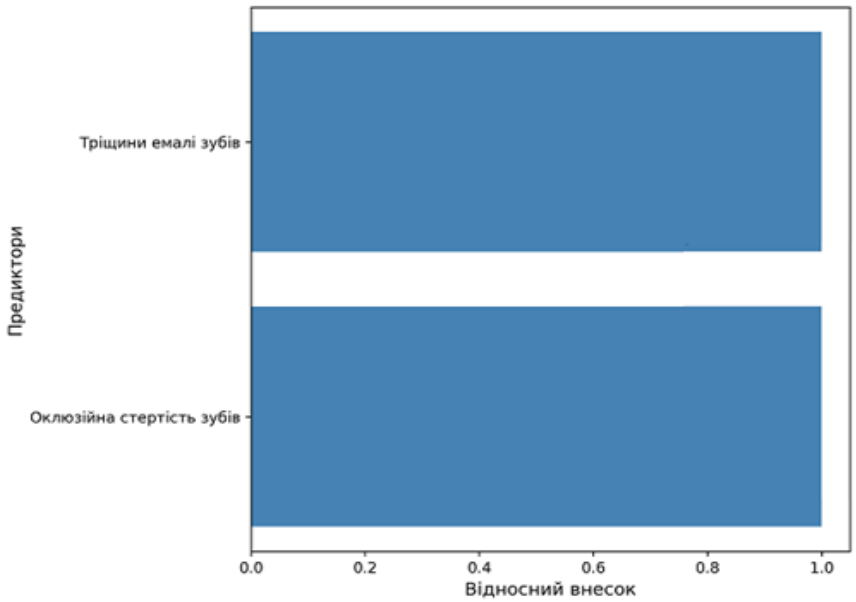


Рис. 5. Відносна значущість предикторів Е емалі зубів

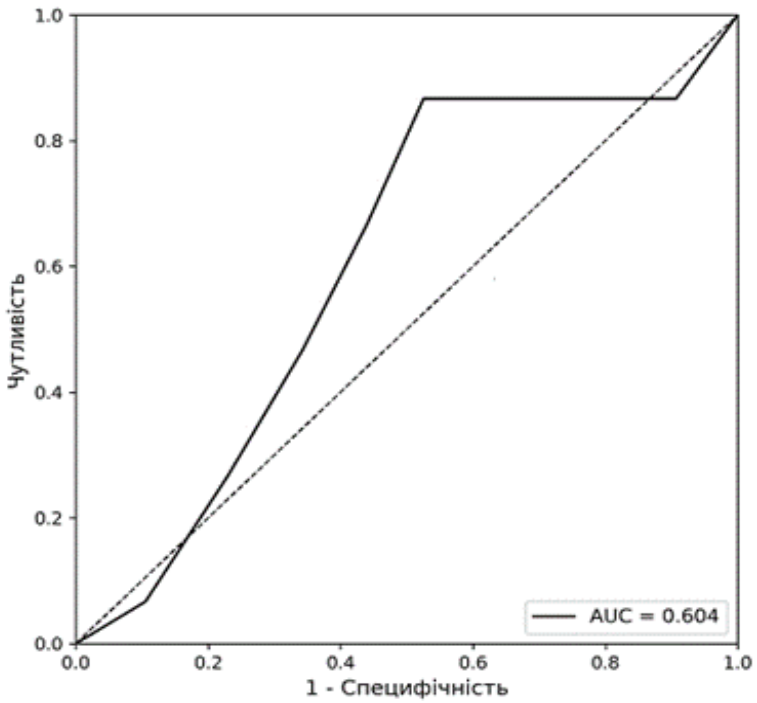


Рис. 6. ROC-крива для моделі прогнозування Е емалі зубів

пріоритет максимізації чутливості, що забезпечує високі значення показника recall і мінімізує кількість пропущених випадків патології у ПД зубів.

Водночас було визначено наявність предикторів з від'ємними коефіцієнтами регресії (ВШ<1). Даний факт свідчить про обмеженість методів логістичної регресії для моделювання складних багатофакторних систем, а також підкреслює необхідність застосування більш гнучких алгоритмів машинного навчання, які зможуть підвищити прогностичну точність і клінічну інтерпретованість результатів.

Крім того, проведене дослідження мало деякі обмеження в узагальненні отриманих результатів. По-перше, усі обстежені мешкали в одному географічному регіоні та були молодого віку; по-друге, 64% пацієнтів були жіночої статі; по-третє, підвибірка обстежених з Е емалі була малого розміру; по-четверте, не можливо вважати повністю об'єктивною інформацію, одержану з анкет/опитувальників.

Висновки. Результати дослідження підтвердили існування відмінностей незалежних предикторів виникнення КД, ПК та Е емалі зубів, що обґрунтувало доцільність розробки окремих логістичних моделей для їх прогнозування. Визначення предикторів з ВШ<1, вірогідно, зумовлено обмеженнями лінійного підходу логістичної регресії при моделюванні нелінійних залежностей, а також особливостями структури досліджуваної вибірки.

Запропоновані моделі можуть бути використані лікарем-стоматологом в якості об'єктивного інструменту для оцінки індивідуального ризику розвитку пришийкової патології зубів у пацієнтів молодого віку та визначення найбільш значущих предикторів із цілеспрямованим впливом на них.

Перспективи подальших досліджень. З метою подальшого удосконалення прогнозування виникнення пришийкових уражень зубів актуальною є розробка та апробація комбінованих підходів. Перспективним бачиться використання методу випадкового лісу (Random Forest), який не потребує припущення про лінійність зв'язків, природно враховує взаємодії між предикторами та є стійким до дисбалансу класів. На відміну від логістичної регресії, випадковий ліс здатний моделювати складні нелінійні залежності та забезпечує вищу прогностичну точність при збереженні можливості інтерпретації результатів через оцінку важливості предикторів.

References:

1. Li, Y., Xiang, Y., Ren, H., Zhang, C., Hu, Z., Leng, W., & Xia, L. (2024). Association between periodontitis and dental caries: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig*, 28 (6), 306. https://doi.org/10.1007/s00784-024-05687-2

2. Alsubai, S. (2023). Enhancing prediction of tooth caries using significant features and multi-model classifier. *PeerJ Comput Sci*, 9, e1631. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1631

3. Kong, W., Ma, H., Qiao, F., Xiao, M., Wang, L., Zhou, L., Chen, Y., Liu, J., Wang, Y., & Wu, L. (2024). Risk factors for noncarious cervical lesions: A case-control study. *J Oral Rehabil*, 51 (9), 1684–1691. https://doi.org/10.1111/joor.13772

4. Ogwo, C., Brown, G., Warren, J., Caplan, D., & Levy, S. (2024). Predicting dental caries outcomes in young adults using machine learning approach. *BMC Oral Health*, 24 (1), 529. https://doi.org/10.1186/s12903-024-04294-7

5. Hayes, M., Da Mata, C., McKenna, G., Burke, F.M., & Allen, P.F. (2017). Evaluation of the Cariogram for root caries prediction. *J Dent*, 62, 25–30. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.04.010

6. Havsed, K., Hänsel Petersson, G., Isberg, P.E., Pigg, M., Svensäter, G., Foresight Research Consortium; & Rohlin, M. (2023). Multivariable prediction models of caries increment: a systematic review and critical appraisal. *Syst Rev*, 12 (1), 202. https://doi.org/10.1186/s13643-023-02298-y

7. Levrini, L., Di Benedetto, G., & Raspanti, M. (2014). Dental wear: A scanning electron microscope study. *BioMed Research International*, 10, Article ID 340425. https://doi.org/10.1155/2014/340425

8. Zabolotna, I.I., Bogdanova, T.L., Potapov, Yu.O., & Genzytska, O.S. (2023). Correlation of dentine hypersensitivity (DH) with manifestations of psycho-emotional stress, its features in patients with cervical teeth pathology. *Protet Stomatol*, 73 (2), 97–110. https://doi.org/10.5114/ps/168064

9. Chavance, M., Escolano, S., Romon, M., Basdevant, A., de Lauzon-Guillain, B., & Charles, M.A. (2010). Latent variables and structural equation models for longitudinal relationships: an illustration in nutritional epidemiology. *BMC Med Res Methodol*, 10, 37. https://doi.org/10.1186/1471-2288-10-37

10. Deng, K., Zonta, F., Yang, H., Pelekos, G., & Tonetti, M.S. (2024). Development of a machine learning multiclass screening tool for periodontal health status based on non-clinical parameters and salivary biomarkers. *J Clin Periodontol*, 51 (12), 1547–1560. https://doi.org/10.1111/jcpe.13856

11. Ramsay, D.S., Marilynn Rothen, M., Scott, J., & Cunha-Cruz, J. (2015). Tooth wear and the role of salivary measures in general practice patients. *Clin Oral Investig*, 19 (1), 85–95. https://doi.org/10.1007/s00784-014-1223-4

12. Gao, X., Jiang, S., Koh, D., & Hsu, C.Y. (2016). Salivary biomarkers for dental caries. *Periodontol 2000*, 70 (1), 128–141. https://doi.org/10.1111/prd.12100

13. Ibrahim, M.O. (2021). Dietary habits, eating practices and DMFT index among adults attending dental clinics in Amman, Jordan. *Nutr Clín Diet Hosp*, 41 (4), 48–54. https://doi.org/10.12873/414mohammed

14. Southward, K. (2015). A hypothetical role for vitamin K2 in the endocrine and exocrine aspects of dental caries. *Med Hypotheses*, 84 (3), 276–280. https://doi.org/10.1016/j.mehy.2015.01.011

15. Dioguardi, M., Polverari, D., Spirito. F., Iacovelli, G., Sovereto. D., Laneve, E., Caloro, G.A., Ballini, A., & Lo Muzio, L. (2023). Introspection of the Etiopathological Mechanisms Underlying Noncarious Cervical Lesions: Analysis of the Different Theories and Their Impact on the Mineralized Structures of the Tooth. *Int J Dent*, 2023, 8838314. https://doi.org/10.1155/2023/8838314

16. Femiano, F., Femiano, R., Femiano, L., Festa, V.M., Rullo, R., & Perillo, L. (2015). Noncarious cervical lesions: correlation between abfraction and wear facets in permanent dentition. *Open Journal of Stomatology*, 5, 152–157. https://doi.org/10.4236/ojst.2015.56021

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.08.2026
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.09.2026
Дата публікації: 11.11.2026