

УДК 616.314.14

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-2008-2025-6-3>

Н. О. Гевкалюк <http://orcid.org/0000-0002-7718-4616>
Л. Д. Тупол <https://orcid.org/0000-0002-0114-5637>
Н. І. Сидлярчук <https://orcid.org/0000-0001-7515-8425>
В. М. Михайлюк <https://orcid.org/0000-0002-9877-0112>
М. Я. Пинда <https://orcid.org/0000-0002-2029-3993>
В. Я. Крупей <https://orcid.org/0000-0003-3545-2448>

СУЧАСНІ ПОГЛЯДИ НА МІКРОСТРУКТУРУ ТА ФУНКЦІЇ ДЕНТИНУ ЗУБА

Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського
Міністерства охорони здоров'я України, Тернопіль, Україна

УДК 616.314.14

Н. О. Гевкалюк, Л. Д. Тупол, Н. І. Сидлярчук, В. М. Михайлюк, М. Я. Пинда, В. Я. Крупей
СУЧАСНІ ПОГЛЯДИ НА МІКРОСТРУКТУРУ ТА ФУНКЦІЇ ДЕНТИНУ ЗУБА

Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського Міністерства охорони здоров'я України, Тернопіль, Україна

Стаття присвячена вивченню структурно-функціональних особливостей дентину та його компонентів за допомогою світлооптичної та скануючої електронної мікроскопії зрізів дентину з різних його зон. Встановлено, що при світлооптичній мікроскопії смужки дентину внаслідок імпрегнації солями срібла мають різну ширину та інтенсивність забарвлення, що залежить від наявності в дентинних канальцях дентинних трубочок і мікрофібрилярного компонента. Отримані дані корелюють із морфологічною картиною, отриманою з допомогою СЕМ-методу, у разі якого на зрізах дентину під шаром емалі чи цементу на кінцях дентинних трубочок виявлялись вузликподібні утворення у вигляді чорних перлин, у підлягаючій зоні – ділянки кінцевих відділів структурно збережених дентинних трубочок, а в частини – з атрофованими дентинними трубочками. Середня зона дентину відповідає ділянці дентинних канальців із добре збереженими дентинними трубочками та їх системою колагенових фібрил.

Ключові слова: дентин, дентинові смужки, фібрилярний апарат, дентинний каналець, дентинна трубочка.

UDC 616.314.14

N. O. Gevkaliuk, L. D. Tupol, N. I. Sydliaruk, V. M. Mykhailiuk, M. Ya. Pynda, V. Ya. Krupей
MODERN VIEWS ON MICROSTRUCTURE AND FUNCTIONS OF TOOTH DENTIN

Ivan Horbachevsky Ternopil National Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Ternopil, Ukraine

The question of morpho-functional features of dentin and the microstructural composition of its components remains open to this day, therefore requiring in-depth study.

The aim of the study was to examine the microarchitecture of the structural-functional unit of dentin and evaluate the functions of its components – dentinal tubules, odontoblast processes, and microfibrillar apparatus.

Materials and methods. 27 intact teeth, extracted for orthodontic indications, were studied, from which samples were prepared for transverse and longitudinal fractures. Samples were immersed in Karnovsky's fixative solution, washed in cacodylate buffer and demineralized. Dried samples were impregnated with epoxy resin in a VUP-5M vacuum device (VO "SELMИ", Sumy, Ukraine), impregnated with 20% silver nitrate solution and examined using a MICROmed Evolution ES-4140 light optical microscope ("Micromed", Ukraine). After lyophilization by freezing, samples were prepared using the critical point drying method, mounted on copper tables with electrically conductive adhesive, coated with a 20 nm layer of chemically pure aluminum [grade 999], and examined in a "JEOL-25M-T220A" scanning electron microscope (Tokyo, Japan).

Results. The examination of tooth sections at the light optical level with silver nitrate solution impregnation allowed us to describe for the first time the presence of four dentin bands (black, dark, gray, light) of varying width and staining intensity, which was confirmed by scanning electron microscopy. The obtained SEM data indicate the absence of a fibrillar network and filling of the dentinal tubule lumen with crystalline substance during gradual atrophy of the dentinal tubules, which is manifested by the formation of gray and light dentin bands. The middle zone of dentin is visualized with well-preserved dentinal tubules and their collagen fibril systems, creating the appearance of a black band due to good absorption of silver ions.

Keywords: dentin, dentinal bands, fibrillar apparatus, dentinal canalculus, dentinal tubule.

© Н. О. Гевкалюк, Л. Д. Тупол, Н. І. Сидлярчук та ін., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії



Вступ

Відомо, що зуби чутливі до дії карієсогенних факторів, у разі яких внаслідок щільної мікробіологічної колонізації руйнуються мінералізовані тканини емалі та дентину та відбувається проникнення мікроорганізмів у пульпу зуба, незважаючи на її різноманітні складні захисні механізми [1]. У разі патологічних процесів у твердих тканинах зуба одонтобласти беруть участь в утворенні реакційного/репаративного дентину, що є відповідною реакцією завдяки участі одонтобластів у синтезі та секреції неколагенових молекул і колагенових фібрил [2]. Відомо, що в порожнині рота (ПР) присутні сотні видів бактерій, частина з яких після порушення цілісності емалі або цементу зубів бере участь у вторгненні в дентинні каналці (ДК) із подальшим інфікуванням кореневого каналу [3]. Саме персистенція мікроорганізмів у твердих тканинах зубів є основною причиною ендодонтичної патології [4]. У результаті бактеріальної інвазії мікроорганізми та продукти їхньої життєдіяльності дифундують через ДК до пульпи зуба, викликаючи запальні процеси в ній та в периапікальних тканинах. Спостереження за мікроорганізмами в екосистемі ДК показало, що ендодонтичні бактерії були виявлені в дентинних каналцях як у вигляді окремих одиниць, так і у вигляді агрегатів біоплівки. ДК є сприятливими нішами для виживання мікроорганізмів у формі моно- або полімікробних спільнот [5].

Захист від численних мікроорганізмів ПР забезпечує унікальна тканина – пульпа зуба, яка у разі втрати структурної цілісності шару одонтобластів опиняється під загрозою. Зміни мінерального обміну твердих тканин зуба та органічного компонента сполучної тканини призводять до розвитку каріозних уражень [6]. Порушення мікроструктури та мікроелементного складу твердих тканин зуба, органічні зміни в пульпі, зокрема у разі патологічної стертості, призводять до перебудови пульпи з подальшою облітерацією корневих каналів [7].

Високоспеціалізовані клітини пульпи не тільки утворюють мінералізовану тканину, але й виконують важливі функції бар'єрних клітин, розпізнаючи патогени на ранніх стадіях процесу, виділяють антибактеріальні сполуки, нейтралізують бактеріальні токсини та ініціюють імунну відповідь [8]. Результати експериментального дослідження, проведеного M. Gallorini та ін. [9], доводять, що у разі наближення мікроорганізмів до пульпи зуба її клітини, а також судинні та нейронні мережі сприяють різноманітним захисним механізмам – критичним для гомеостазу тканин [10]. Є припущення, що одонтобласти можуть на ранніх стадіях виявляти вторгнення екзогенних патогенів, діючи при цьому як ноцицептивні рецептори [11]. A.T. Weerakoon та співавт. [12] встановили, що склепіння пульпової камери має більшу площу відкритих каналців, вищу їх щільність та більший відсоток зайнятої отворами каналців площі дентину порівняно з дном пульпової камери. Було встановлено, що мінеральна щільність дентину змінюється залежно від його мікроскопічної ділянки – інтертубулярної чи перитубулярної. Результати вивчення розподілу інтерглобулярного дентину,

проведеного H. Sato та ін. [13], свідчать, що в коронковому дентині здебільшого присутній типовий інтерглобулярний дентин. Поряд з цим положення та розмір міжглобулярного дентину були різними за переважанням його в пришийковій частині коренів зубів. Дослідження розгалуженості дентинних каналців і їх щільності в зубах людини дозволило виявити деякі відмінності залежно від локалізації досліджуваних візріців. Кількість ДК у середній частині коронки зуба значно більша, ніж у середній частині кореня зуба, де спостерігається велика кількість розгалужень дентинних каналців зі складною анастомозуючою системою [14]. Механічні властивості дентину, його мікроструктуру за часткою площі дентину та щільності дентинних каналців досліджували J.W. Soukup та ін. [15].

Результати низки досліджень підкреслюють актуальність питання, яке залишається до сьогодні відкритим, щодо довжини дентинних трубочок (ДТ) та їх присутності у ДК на різному рівні товщини дентину чи різній відстані від пульпи зуба [16]. Глибоке розуміння фундаментальних біологічних явищ, пов'язаних із архітектурою дентину, має вирішальне значення для розробки ефективних терапевтичних стратегій, методів лікування та регенерації дентину-пульпи [17].

Мета – вивчити мікроархітектуру структурно-функціональної одиниці дентину та оцінити функції її компонентів – дентинних каналців, відростків одонтобластів і мікрофібрилярного апарату.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проведені згідно з письмовою інформованою згодою пацієнтів і відповідно до принципів біоетики, викладених у Конвенції Ради Європи про права людини та біомедицину (04.04.1997 р.), Гельсінської декларації Всесвітньої асоціації охорони здоров'я про етичні принципи медичних досліджень за участю людей (1964–2000), «Загальній декларації про біоетику та права людини (UNESCO)», наказі МОЗ України № 690 від 23.09.2009 р., що підтверджується Комісією з біоетики Тернопільського національного медичного університету імені І.Я. Горбачевського МОЗ України (протокол № 75 від 01.11.2023).

Дослідженню підлягали 27 інтактних зубів, видалених за ортодонтичними показаннями в осіб віком 19–23 роки. Після екстракції зуба коронки по лінії цементно-емалевого з'єднання відділяли від коренів із використанням твердосплавних борів і високошвидкісного наконечника. Візріці для поперечного сколу готували методом розриву, подаючи силу вздовж осі у спеціальному приладі. В мезіодистальному напрямку коронки зубів розділяли на дві половини, не допускаючи бокових їх зміщень. Візріці занурювали в розчин фіксатора за Карновським на 24 год. при 4 С°, після чого промивали в какодилатному буфері (рН = 7,4) та демінералізували в 5% водному розчині азотної кислоти. Висушені візріці просочували епоксидною смолою у вакуумному приладі ВУП-5М (ВО «SELMI», Суми, Україна), шліфували, монтували на предметні скельця, імпрегнували 20% розчином азотнокислого срібла та досліджували на світлооптичному мікроскопі MICROmed Evolution ES-4140 з цифровою камерою

5 МП («Мікромед», Україна). Після ліофілізації взірці заморожуванням методом уникнення переходу критичної точки наклеювали електропровідним клеєм на мідні столики, покривали шаром хімічно чистого алюмінію [проба⁹⁹⁹] товщиною 20 нм і переглядали у скануючому електронному мікроскопі «JEOL-25M-T220A» (Токіо, Японія).

Результати дослідження та їх обговорення

Структурно-функціональною одиницею дентину в зубах людини є дентинні каналці, відростки одонтобластів і мікрофібрилярні структури, сукупність яких на світлооптичному рівні у разі імпрегнації розчином азотнокислого срібла визначає наявність чотирьох смужок дентину (чорну, темну, сіру, світлу) різної ширини та інтенсивності забарвлення (рис. 1).

Візуалізація їх при світлооптичній мікроскопії залежить від наявності в дентинних каналцях ден-

тинних трубочок і мікрофібрилярного компонента, який з'єднує ДК та відростки одонтобластів і забезпечує в дентинному каналці одонтобластний процес. Саме фібрилярна сітка як білкова структура дентину дозволяє виявляти ДК, які у разі імпрегнації солями срібла виглядають світлішими порівняно з ДК, які розташовані у внутрішній частині дентину. Так, дентинні каналці цієї частини містять ДТ із повним «набором» фіксуючого фібрилярного апарату, тому більш інтенсивно імпрегнуються солями срібла, що добре візуалізуються на шліфах як кореневої, так і коронкової дентину у вигляді темної смужки дентину.

На поздовжньому шліфі дентину коронкової (рис. 1 а, б) та кореневої (рис. 1 в, г) частин зуба під шаром емалі чи цементу виявляються вузликоподібні утворення у вигляді намиста чорних перлин, що відповідають вузливим потовщенням на кінцях ДТ, які виявляються тільки СЕМ-методом. У підлягаючій зоні

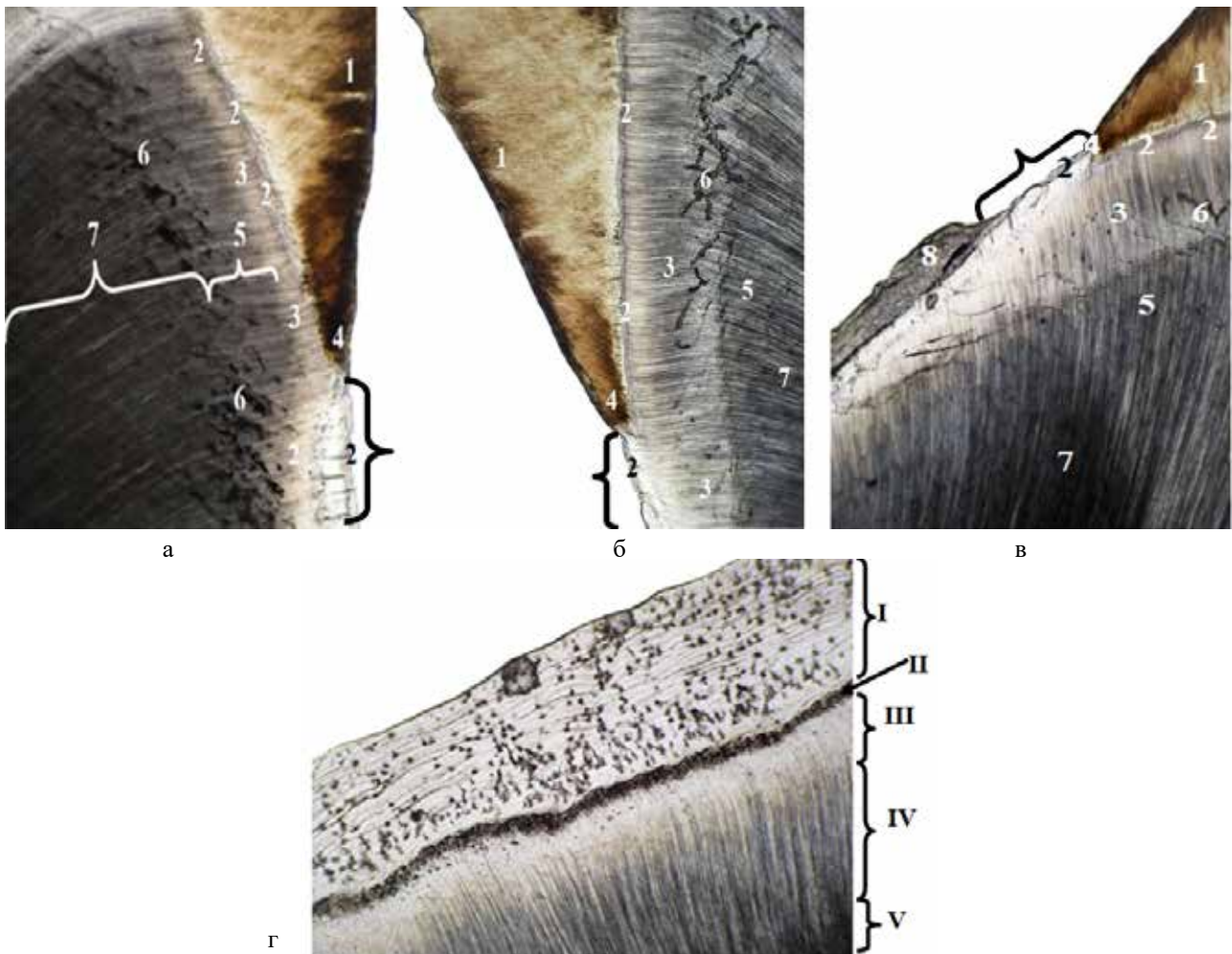


Рис. 1. Загальний вигляд дентину коронкової (а, б) та кореневої (в, г) частин зуба: 1 – шар емалі чи цементу; 2 – вузликоподібні утворення у вигляді «чорних перлин»; 3 – приемалевий чи прицементний дентин (світла смужка); 4 – ділянка емалево-цементного контакту з вузликоподібними утвореннями; 5 – зона кінцевих відділів структурно збережених ДТ (сіра смужка); 6 – артефакти; 7 – середня зона дентину зі збереженими ДТ і мікрофібрилами (темна смужка); 8 – цемент кореня зуба

Позначення (рис. 1 г): I – цемент кореня зуба; II – чорна смужка дентину; III – світла смужка дентину; IV – сіра смужка дентину; V – темна смужка дентину. Метод: Світлова мікроскопія. Поздовжній шліф, імпрегнація розчином нітрату срібла. Збільшення: а – ок. × 10, об. × 20; б, в – ок. × 15, об. × 20; г – ок. × 10, об. × 40.

візуалізуються ділянки з менш інтенсивно імпрегнованими солями срібла ДК (світла смужка) приємалевого чи прицементного дентину, що відповідає зоні кінцевих відділів структурно збережених ДТ і частині ДК із атрофованими дентинними трубочками. Ділянка емалево-цементного контакту, де вузликподібні утворення безпосередньо контактують із середовищем ПР, імовірно визначає гіперчутливість цієї ділянки. Середня зона дентину відповідає частині ДК із добре збереженими дентинними трубочками та їх системи колагенових фібрил (темна смужка).

Компоненти структурно-функціональної одиниці дентину, виявлені на світлооптичному рівні, добре корелюють із морфологічною картиною, отриманою з допомогою СЕМ-методу. Вузликові структури, що беруть участь в утворенні чорної смужки дентину, представлені на рисунку 2. Нами виявлено, що на межі емалево-дентинного з'єднання кінцеві відділи ДТ прикриті кристалічним матеріалом (рис. 2 а). На частково демінералізованих препаратах добре видно всю товщину чорної смужки з тонкими деталями її структури, особливо з вигнутими боковими анкерними мікрофібрилами (рис. 2 б). Треба відзначити, що фібрилярний апарат формується навколо ДТ від самого одонтобласта та виявляється за умови повноцінної структури ДТ, і тільки на емалево-дентинній межі його рідко вда-

ється виявити. Фібрилярні структури відсутні навіть на анкерних відростках ДТ, проте їх багато в зоні предентину, де видно відросток одонтобласта в оточенні сітки колагенових волокон.

У межах чорної смужки фібрилярний апарат ДТ утворений анкерними волокнами значної довжини, які утворюють густе сплетіння, що, власне, і створює картину чорної смужки внаслідок доброї абсорбції іонів срібла та має інтенсивний фон у разі світлооптичного дослідження. Під час СЕМ-дослідження нерідко проступає внутрішня поверхня ДК, яка може бути гладкою або ж містити дрібні мікрофібрили (рис. 3). Ця структура не виявлялась у внутрішній третині дентину, оскільки гранули в цих ділянках були грубими, що пояснює так званий «ефект метелика».

Дані про закономірне виявлення зображення «метелика» на сколах коренів зубів часто вважається «оптичним феноменом». Його описують як оптичне явище, що спостерігається мезіодистально на зрізах коренів, дентин яких твердіший за коронковий, та з меншою щільністю ДК, що й відповідає крилам «метелика» [18]. Попереднє наше СЕМ-дослідження [19] сколів коренів зубів показало, що внутрішня поверхня ДК може містити дуже дрібні мікрогранули, які не виявлялись у зовнішній третині дентину. Оскільки гранули в цій ділянці дентину кореня були грубими, це й пояснює

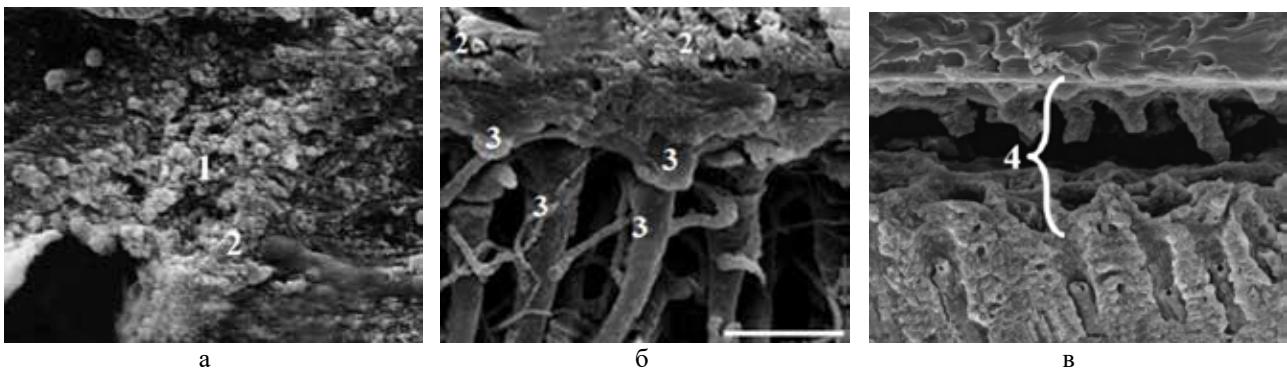


Рис. 2. а: 1 – загальний вигляд емалево-дентинного з'єднання; 2 – кристалічний матеріал; б: 3 – вузликові структури; в: 4 – чорна смужка (фігурна дужка). Метод: СЕМ. Прискорююча напруга: а, б – 10 кВ, в – 25 кВ; оригінальне збільшення: а, б $\times 1800$, в $\times 1200$; масштабний відрізок: а = 2 мкм; б = 50 мкм; в = 10 мкм

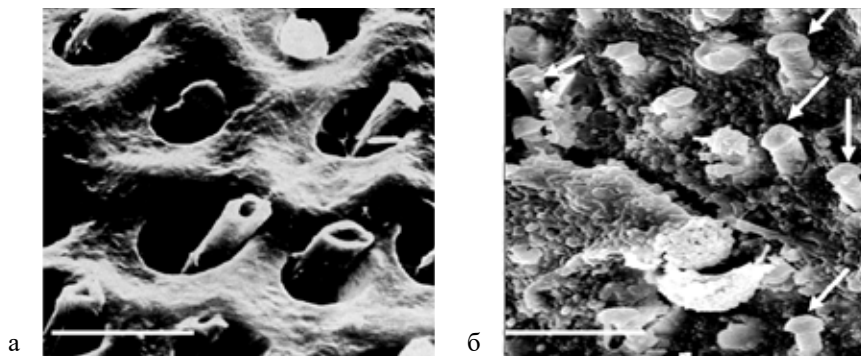


Рис. 3. Структура дентину кореня зуба у середній частині довжини ДК (а) і в зоні чорної смужки (б) з характерними потовщеннями («чорні перлини») на кінцях ДТ (стрілки). Метод: СЕМ. Прискорююча напруга 10 кВ; оригінальне збільшення $\times 8000$; масштабний відрізок = 10 мкм

так званий «ефект метелика». Нами показано, що цей феномен впливає на просторовий розподіл ДК (рис. 4), який і визначає диференціювання одонтобластів у процесі формування дентинних каналців з розподілом їх і ДТ у співвідношенні 1:1.

Нами показано, що ДТ є відростками одонтобластів – мембранними утвореннями, які залягають у ДК. Діаметр ДТ завжди менший від діаметра ДК, що вимагає підтримуючої підсистеми ДТ для своєї центральної стабілізації. Цією системою є фібрилярна, білкова (колагенова) сітчаста структура, що служить підтримуючим елементом ДТ у дентинному каналці – кальцифікованій структурі дентину, яка пролягає через усю його товщу [20]. Нами встановлено, що ДТ відзначаються значною крихкістю, внаслідок чого вони часто руйнуються в процесі приготування сколів дентину після ліофілізації заморожуванням методом переходу

критичної точки. Тому для їх збереження в процесі приготування зрізів для дослідження СЕМ-методом необхідно уникати кутових зміщень сусідніх частин, які призводять до їх руйнування, чим і пояснюється складність і спорадичність візуалізації дентинних трубочок СЕМ-методом. При цьому також необхідно враховувати різницю в щільності ДК у різних місцях сколу поверхні кореня зуба (див. рис. 4), про що ми вказували в попередній публікації [20].

На окремих препаратах виявляється досить строката СЕМ-картина (рис. 5). Так, на поперечному сколі діаметр більшості ДК становить 4–5 мкм, а діаметр ДТ – тільки 1 мкм. В окремих дентинних каналцях між їх стінкою та дентинною трубочкою в одних випадках є фібрилоподібна, в інших – кристалічна речовина. Просвіт інших ДТ запечатаний аморфною або кристалічною речовиною. Однак у деяких дентинних канал-

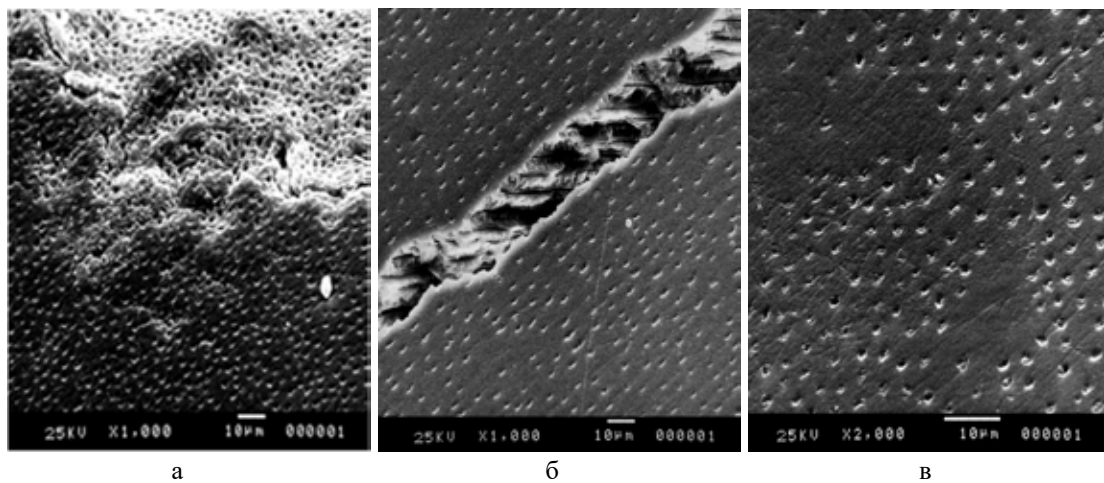


Рис. 4. Щільність дентинних каналців у трьох місцях сколу поверхні кореня зуба: поблизу кореневого каналу (а); посередині між кореневим каналом і цементом (б); поблизу дентинно-цементного з'єднання (в). Метод: СЕМ. Прискорююча напруга 25 кВ; оригінальне збільшення: а, б × 1000, в × 2000; масштабний відрізок = 10 мкм

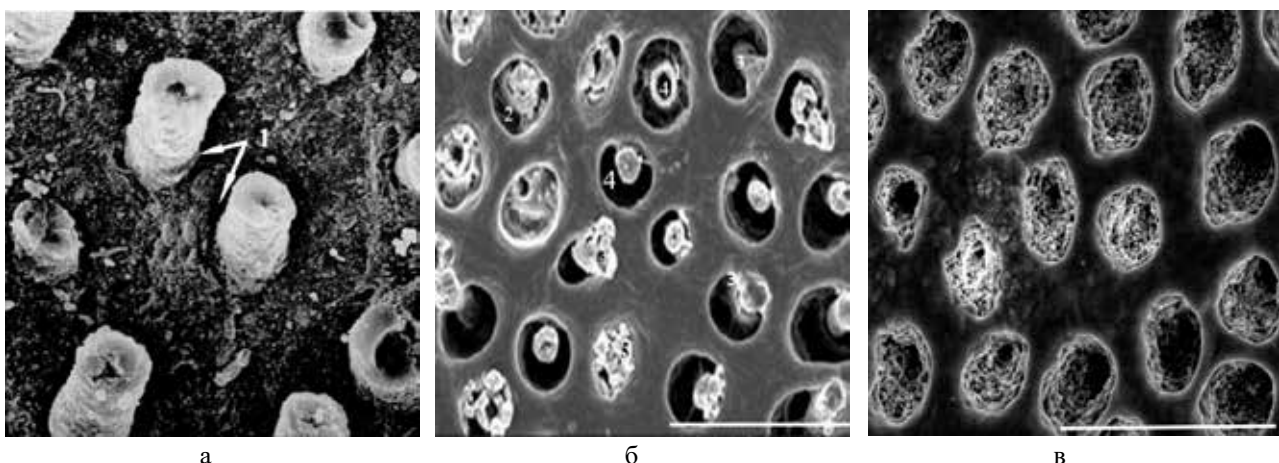


Рис. 5. Загальний вигляд дентинних каналців із дентинними трубочками на поперечному сколі: а, б: 1 – між стінкою дентинного каналця та трубочкою фібрилоподібна речовина; 2 – без додаткових структур; 3 – ДТ щільно прилягає до стінки ДК; 4 – ДТ має чітку порожнину без вмісту; 5 – кристалічна речовина в просвіті дентинної трубочки; в – просвіт ДТ запечатаний аморфною, кристалічною речовиною. Метод: СЕМ. Прискорююча напруга 10 кВ; оригінальне збільшення: а × 4000; б, в × 5000; масштабний відрізок: а = 7,5 мкм; б, в = 10 мкм

цях ДТ контактує з її стінкою однією стороною та тісно прилягає до неї без додаткових структур – має чітку порожнину без вмісту.

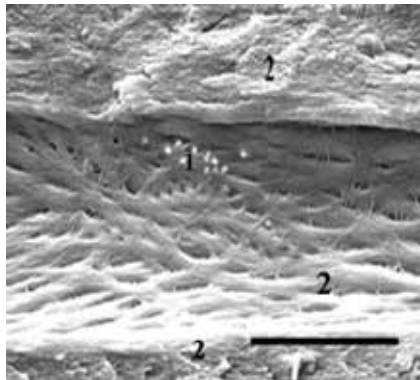
Можемо говорити про існування незалежної фібрилярної мікросистеми дентинного каналця (рис. 6), на яку вказує густа мікрофібрилярна сітка, наявна на стінках поздовжньо розколотого ДК у разі відсутності відростка одонтобласта. В нашій інтерпретації мікрофібрилярна сітка є зоною неспецифічної резистентності зубів проти мікробної кислотної агресії, оскільки коллаген цих мікріволокон, як і всі інші білки, має виражені буферні властивості. Це дозволяє зупинити кислотну мікробну агресію, до якої дуже чутливий мінеральний компонент дентину, та запобігти проникненню мікрофлори вглиб дентинних каналців. Отож, це вказує на ще одну функціональну особливість мікрофібрилярної сітки і дентинних каналців як структурно-функціональних компонентів дентину.

Фіксуєчий фібрилярний апарат – мікрофібрилярна сітка як білкова структура дозволяє виявляти більш

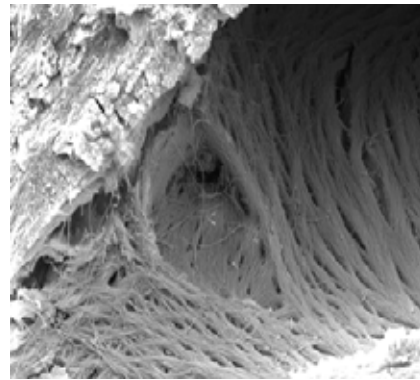
чи менш інтенсивно імпрегновані солями срібла ДК у вигляді смужок дентину різної інтенсивності забарвлення (рис. 7).

СЕМ-корелятом лінії розмежування між сірою та світлою смужками є лінія, яка проходить через кінці дентинних трубочок, а стінки ДК, позбавлені фібрилярних структур, продовжуються вище лінії розмежування. В чорній смужці ділянки емалево-цементного контакту вузликподібні утворення безпосередньо контактують із внутрішнім середовищем ПР. Звертає на себе увагу вузликова конфігурація кінцевих відділів ДТ на межі між внутрішнім шаром емалі та пустотами між ним і «вузликами» – потовщеннями дентинних трубочок (рис. 8).

Результатами СЕМ-дослідження продемонстровано структуру дентину в різних зонах, зокрема, в темній – інтенсивно імпрегнованій зоні, в якій виявляється білкова структура мікрофібрилярної сітки (рис. 9 а). Світла зона пов'язана з відсутністю дентинних трубочок, зумовленою їх атрофією з наступ-



а



б

Рис. 6. Густо переплетена мікрофібрилярна сітка на стінці дентинного каналця (а, б) з локальною коковою мікрофлорою (1) в темній смужці дентину; 2 – перитубулярний дентин. Метод: СЕМ. Прискорююча напруга 10 кВ; оригінальне збільшення $\times 5000$; масштабний відрізок = 10 мкм

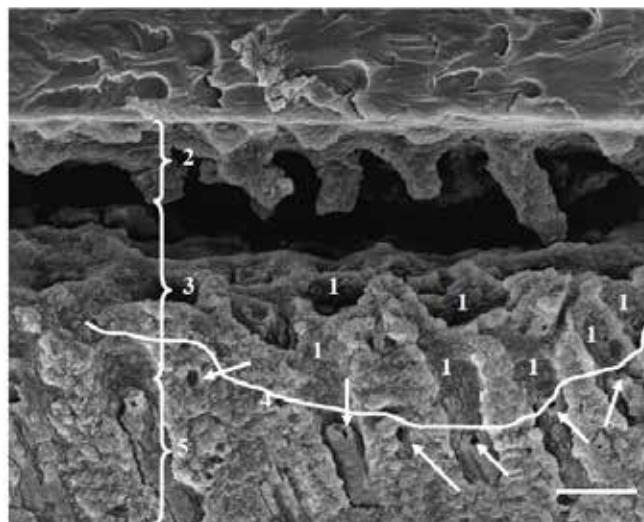


Рис. 7. Лінії розмежування сірої та світлої смужок дентину (позначено білим кольором). 1 – стінки дентинних каналців; 2 – чорна смужка (фігурна дужка); 3 – світла смужка (фігурна дужка); 4 – лінія розмежування (стрілки, дугова лінія); 5 – сіра смужка дентину (фігурна дужка). Метод: СЕМ. Прискорююча напруга 10 кВ; оригінальне збільшення $\times 5000$; масштабний відрізок = 10 мкм

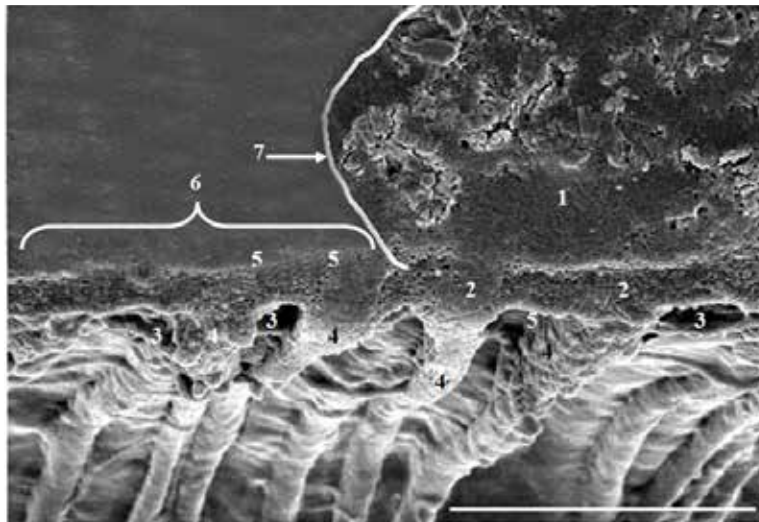


Рис. 8. Чорна смужка ділянки емалево-цементного контакту: 1 – емаль; вузликова конфігурація кінцевих відділів ДТ на межі між внутрішнім шаром емалі (2) і порожинами (3) між ним і потовщеннями ДТ (4); 5 – чорна смужка дентину; 6 – шийка зуба (фігурна дужка), 7 – край емалі (стрілка, дугова лінія). Метод: СЕМ. Прискорююча напруга 10 кВ; оригінальне збільшення $\times 5000$; масштабний відрізок = 10 мкм

ним відкладенням кристалічної речовини (рис. 9 б). Крім того, у світлій зоні стінки ДК повністю позбавлені й фібрилярної сітки, тому іони срібла не можуть фіксуватись на мінералізованому матриксі «голоого» дентину, що й визначає в цій смужці світліший відтінок дентину у разі світлооптичного дослідження.

У разі атрофії ДТ (рис. 9 в) відповідний відрізок ДК поступово заповнюється кристалічною речовиною (рис. 9 г), що є ознакою склерозу дентину та створює «ефект метелика».

Результати проведеного нами дослідження дозволяють розширити сучасну уяву про структуру та функції

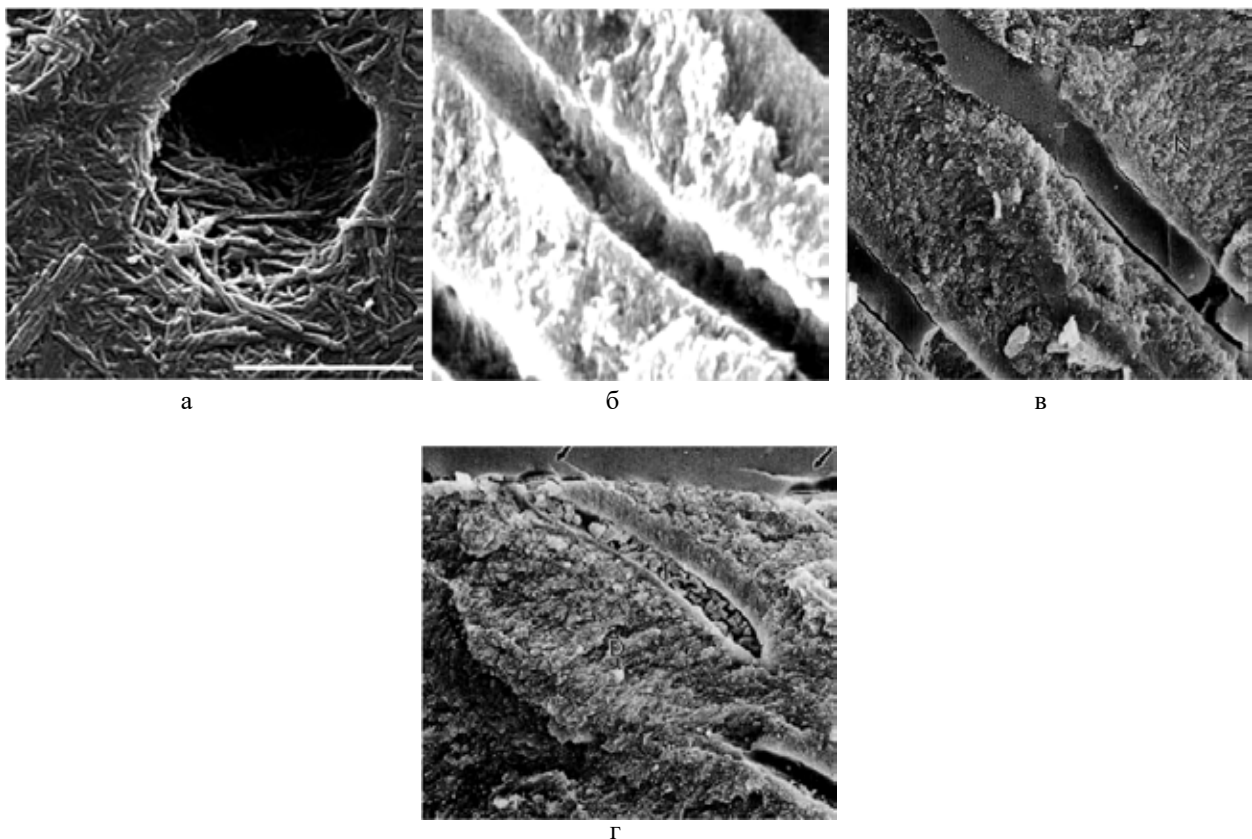


Рис. 9. Загальний вигляд стінок дентинного каналця в темній (а) і світлій (б) зонах дентину, атрофія ДТ (в) з наступним відкладенням кристалічної речовини (г). Метод: СЕМ. Прискорююча напруга 10 кВ; оригінальне збільшення $\times 4000$; масштабний відрізок = 7,5 мкм

дентину зуба, що має велике не тільки теоретичне, але й практичне значення. Детальне знання мікроструктури дентину, функціональних механізмів, пов'язаних з інвазією бактерій у дентинні каналці, має велике значення для розуміння проникності дентину з метою розробки нових стратегій контролю в практичній стоматології для оптимізації лікування карієсу зубів і його ускладнень.

Висновки

Аналіз шліфів зубів на світлооптичному рівні у разі імпрегнації розчином азотнокислого срібла дозволив нам уперше описати наявність чотирьох смужок дентину (чорну, темну, сіру, світлу) різної ширини та інтенсивності забарвлення, наявність яких є постійною структурною ознакою дентину, що добре корелюють із морфологічною картиною, отриманою з допомогою СЕМ-методу.

Нами встановлено, що ДТ займає центральне положення у ДК, а його діаметр вдвічі більший від діаметра ДТ, тому для її утримання в центрі ДК необхідна потужна сітка фібрилярних структур. СЕМ-дослідження свідчать про заповнення просвіту ДК кристалічною речовиною під час поступової атрофії ДТ і відсутності фібрилярної сітки у ДК, та, відповідно,

до низької його спорідненості до іонів срібла, що виявляється утворенням сірої та світлої смужок дентину. Середня зона дентину відповідає частині ДК із добре збереженими ДК та їх системи колагенових фібрил, які утворюють густе сплетіння, що створює картину чорної смужки внаслідок доброї абсорбції іонів срібла та має інтенсивний фон під час світлооптичного дослідження.

Існування кінцевих вузликів утворень – «чорних перлин» – у ДТ на рівні дентино-емалевого та дентино-цементного з'єднань ми схильні віднести до специфічних утворень, або структурно трансформованих механорецепторів, за допомогою яких неспецифічне механічне подразнення може трансформуватись в енергію нервового збудження, що перетворюється в аферентні ланці через таку систему рецепторів: «вузликів закінчення ДТ – одонтобласт – чутливе нервеве закінчення пульпи зуба – відповідна гілка трійчастого нерва – *nucleus tractus solitarii*».

Перспективи подальших досліджень полягають у морфологічному вивченні трансформації дентинних трубочок на межі дентино-емалевого та дентино-цементного з'єднань для з'ясування можливих механізмів і їх ролі у процесах де- та ремінералізації емалі та дентину зубів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Galler KM, Weber M, Korkmaz Y, Widbiller M, Feuerer M. Inflammatory Response Mechanisms of the Dentine-Pulp Complex and the Periapical Tissues. *Int J Mol Sci.* 2021; 22(3): 1480. doi: 10.3390/ijms22031480.
2. Goldberg M, Kulkarni AB, Young M, Boskey A. Dentin: structure, composition and mineralization. *Front Biosci (Elite Ed).* 2011; 3(2): 711–735. doi: 10.2741/e281.
3. Ricucci D, Siqueira JF Jr, Loghin S, Lin LM. Pulp and apical tissue response to deep caries in immature teeth: A histologic and histobacteriologic study. *J Dent.* 2017; 56: 19–32. doi: 10.1016/j.jdent.2016.10.005.
4. Prada I, Micó-Muñoz P, Giner-Lluesma T, Micó-Martínez P, Collado-Castellano N, Manzano-Saiz A. Influence of microbiology on endodontic failure. Literature review. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* 2019; 24(3): e364–e372. doi: 10.4317/medoral.22907.
5. Jayakumar S, Sridhar D, John BM, Arumugam K, Ponnusamy P, Pulidindi H. Biofilm in Endodontic Infection and its Advanced Therapeutic Options – An Updated Review. *J Pharm Bioallied Sci.* 2024;16(Suppl 2): S1104–S1109. doi: 10.4103/jpbs.jpbs_394_23.
6. Garmash O, Sokolova I, Cherepynska Y, Ryabokon E, Gubina-Vakulik G. Indicators of collagen metabolism, content of micro- and macro elements as biomarkers for predicting changes in dental status in rats with experimentally induced fetal macrosomia. *Eastern Ukrainian Medical Journal.* 2024; 12(2): 237–249. doi: 10.21272/eumj.2024;12(2):237-249.
7. Maliuchenko MM, Hasiuk PA, Vorobets AB, et al. Morphological changes in tooth dentin at various stages of abrasion and their impact on the choice of orthopedic treatment. *Clinical and Preventive Medicine.* 2025; 2(40): 23–30. doi: 10.31612/2616-4868.2.2025.03.
8. Van Hassel HJ. Reprint of: Physiology of the Human Dental Pulp. *J Endod.* 2021; 47(5): 690–695. doi: 10.1016/j.joen.2021.03.001.
9. Gallorini M, Krifka S, Widbiller M, et al. Distinguished properties of cells isolated from the dentin-pulp interface. *Ann Anat.* 2021; 234: 151628. doi: 10.1016/j.aanat.2020.151628.
10. Lukic D, Karygianni L, Flury M, Attin T, Thurnheer T. Endodontic-Like Oral Biofilms as Models for Multispecies Interactions in Endodontic Diseases. *Microorganisms.* 2020; 8(5): 674. doi: 10.3390/microorganisms8050674.
11. Kawashima N, Okiji T. Odontoblasts: Specialized hard-tissue-forming cells in the dentin-pulp complex. *Congenit Anom (Kyoto).* 2016; 56(4): 144–153. doi: 10.1111/cga.12169.
12. Weerakoon AT, Cooper C, Meyers IA, et al. Does dentine mineral change with anatomical location, microscopic site and patient age? *J Struct Biol X.* 2022; 6:100060. doi: 10.1016/j.yjsbx.2022.100060.
13. Sato H, Kagayama M, Sasano Y, Mayanagi H. Distribution of interglobular dentine in human tooth roots. *Cells Tissues Organs.* 2000; 166(1): 40–47. PMID: 10671754. doi: 10.1159/000016707.
14. Arola DD, Gao S, Zhang H, Masri R. The Tooth: Its Structure and Properties. *Dent Clin North Am.* 2017; 61(4): 651–668. doi: 10.1016/j.cden.2017.05.001.
15. Soukup JW, Hetzel SJ, Stone DS, Eriten M, Ploeg HL, Henak CR. Structure-function relationships in dog dentin. *J Biomech.* 2022; 141: 111218. PMID: PMC10041743. doi: 10.1016/j.jbiomech.2022.111218
16. Choi YJ, Bae MK, Kim YI, Park JK, Son SA. Effects of microsurface structure of bioactive nanoparticles on dentinal tubules as a dentin desensitizer. *PLoS One.* 2020; 15(8): e0237726. doi: 10.1371/journal.pone.0237726.

17. Fu X, Kim HS. Dentin Mechanobiology: Bridging the Gap between Architecture and Function. *Int J Mol Sci.* 2024; 25(11): 5642. doi: 10.3390/ijms25115642.
18. Lin GSS, Ghani NRNA, Noorani TY. The existence of butterfly effect and its impact on the dentinal microhardness and crack formation after root canal instrumentation. *Odontology.* 2021; 109(3): 672–678. doi: 10.1007/s10266-021-00589-1.
19. Popel SL, Gevkaliuk NO, Sydliaruk NI, et al. Interpretation of the concepts of dentinal tubule and dentinal canalculus. *Regul. Mech. Biosyst.* 2024;15(2):353–360. doi: <https://doi.org/10.15421/022450>.
20. Gevkaliuk NO, Martyts YM, Mykhailiuk VM, Pynda MY, Pudiak VY, Krupei VY. Quantity and diameter of dentinal tubules of human teeth and teeth of experimental animals according to scanning electron microscopy data. *Regul. Mech. Biosyst.* 2023; 14(4): 609–616. doi: 10.15421/022388.

Надійшла до редакції 21.04.2025

Прийнята до друку 02.02.2026

Електронна адреса для листування gevkalyuk@tdmu.edu.ua