

УДК 616.314-089.818.1.

DOI <https://doi.org/10.35220/2078-8916-2023-49-3.7>**Ю.М. Ожоган,**

асистент кафедри патофізіології,  
Івано-Франківський національний медичний  
університет,  
вул. Галицька, 2, м. Івано-Франківськ, Україна,  
індекс 76000

**Р.З. Ожоган,**

доктор філософії, асистент кафедри стоматології ПО  
Івано-Франківський національний  
медичний університет,  
вул. Галицька, 2, м. Івано-Франківськ, Україна,  
індекс 76000

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІДБІЛЮЮЧИХ СИСТЕМ НА МІКРО- ТА НАНОСТРУКТУРУ ЗУБНОЇ ЕМАЛІ

Корекція дисколоритів твердих тканин зубів є важливим елементом у сучасній естетичній стоматології. У світовій стоматологічній практиці все більше уваги приділяють розробці методів, що забезпечують задоволення естетичних потреб пацієнтів. **Мета дослідження.** Встановлення впливу відбілювальних середників на мікро- та наноструктурні особливості морфології поверхонь зубної емалі (*in vitro*), визначення найбільш ефективних та безпечних методів відбілювання зубів. **Матеріали і методи дослідження.** Проводили дослідження на постійних зубах, що були видалені за ортодонтичними показаннями у пацієнтів віком 18-39 років. Було створено експериментальні групи, кожна з яких складалась із 10 зразків зубів: зразки норми (інтактні зуби); відбілювання зубів методикою Opalescence 35% гель /30 хв / 7 разів; професійна гігієна зубів, Air Flow, відбілювання зубів сучасною методикою Beyond 35 % гель H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / 12 хв + світло/ 3 рази /ремінералізуюча терапія. Використовували методи СЗМ, такі як атомно-силова мікроскопія (АСМ) і на макрорівні поверхня зразків характеризувалась засобами цифрової оптичної мікроскопії за допомогою мікроскопу Carl Zeiss NU2E. **Результати дослідження.** На типових оптичних мікрофотографіях поверхонь емалі досліджуваних зразків зубів, оброблених за методикою Opalescence, характерною є поява ділянок розмірами порядку сотні мікрон із порушеною комірчастою структурою. Схожих особливостей на поверхнях зубів, відбілених за методикою Beyond не спостерігалось. Як слідує із АСМ зображень та відповідних розподілів висот нанорельєфу, вплив на структуру рельєфу емалі процедури Opalescence є найбільш суттєвим. Ширина розподілу висот рельєфу є найбільшою, а зображення містить чимало нано-заглибин і яскраво виражену зернисту структуру. Виміряні відповідні значення шорсткості рельєфів цих зразків емалі складають 6, 16 та 12 нм, для інтактної поверхні та поверхонь оброблених за методиками Opalescence і Beyond, відповідно. Статистичний аналіз розмірів нанозерен зазначених рельєфів засвідчує

наступні величини: 52±17 нм, 109±31 нм та 79±25 нм. Перехресний кореляційний аналіз вибірок розмірів зерен оброблених поверхонь (*t*-тест) підтверджує їх статистичну значимість. Таким чином, виходячи з приведених результатів АСМ вимірювань, можна стверджувати, що процедури відбілювання безперечно модифікують наноструктуру рельєфу поверхні емалі зубів. Шорсткість поверхні може збільшуватись у два і більше разів і супроводжуватись змінами зернистості поверхні призм зубної емалі. Пропонований спосіб оцінки впливу відбілювання на наноструктуру рельєфу емалей дозволяє ефективно оцінювати дію реагентів та обирати оптимальні засоби відбілювання.

**Висновки.** 1. Атомно силова мікроскопія є ефективним методом виявлення впливу сучасних процедур відбілювання на наноструктуру рельєфу поверхні емалей. При цьому відтворені, статистично значимі результати можна отримати при дослідженнях у чітко визначених ділянках зубів, з використанням фрагментів одного і того ж зразка. 2. При аналізі мікроструктури емалі в дослідженнях із застосуванням АСМ нами встановлено, що професійна методика відбілювання зубів Beyond 35 % гель H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 3 рази по 12 хв із використанням лампи і проведенням ремінералізуючої терапії маючи найкращий естетичний ефект, суттєво менше руйнує верхні шари емалевих призм товщиною 40-100 нм у порівнянні з методикою Opalescence.

**Ключові слова:** емаль зубів, відбілювання зубів, мікрота наноструктура, атомно-силова мікроскопія.

**Yu.M. Ozhohan,**

Assistant of the Department of Pathophysiology,  
Ivano-Frankivsk National Medical University,  
2 Galitskaya street, Ivano-Frankivsk, Ukraine,  
postal code 76000

**R.Z. Ozhohan,**

Doctor of Philosophy, Assistant of the Department  
of Dentistry,  
Ivano-Frankivsk National Medical University,  
2 Galitskaya street, Ivano-Frankivsk, Ukraine,  
postal code 76000

## ANALYSIS OF THE WHITENING SYSTEMS INFLUENCE ON THE TOOTH ENAMEL AT THE MICRO AND NANOSTRUCTURAL LEVEL

Correction of the discolored teeth hard tissues is an important issue at modern aesthetic dentistry nowadays. In global dental practice, more and more attention is being paid to the development of methods that ensure the satisfaction of the aesthetic needs of patients. **Purpose.** To establish the effect of whitening agents at the micro and nanostructural level, to discover the whitening effect on the morphology of the tooth enamel surfaces (*in vitro*) and to determine the most effective and safe methods of teeth whitening procedures. **Materials and methods.** All our studies were conducted on permanent teeth that were

extracted for orthodontic indications at patients aged from 18 to 39 years. Experimental groups were created, each of which consisted of 10 tooth samples: normal samples (intact teeth); teeth whitening using Opalescence 35 % gel /30 min / 7 times; professional dental hygiene, Air Flow, teeth whitening using Beyond system 35 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gel / 12 min + light/ 3 times /remineralization therapy. We have also used SPM methods, such as atomic force microscopy (AFM) and the surface of the samples has been characterized at the macro level by means of digital optical microscopy using a Carl Zeiss NU2E microscope.

**Results.** Typical optical microphotographs of the enamel surfaces of the examined teeth samples processed by the Opalescence technique has shown us affected areas of hundreds microns in size with a broken cellular structure. We have not similar features on the surfaces of teeth bleached with a help of the Beyond system. As follows from the AFM images and the corresponding nanorelief height distributions, the influence of the Opalescence procedure on the enamel relief structure is the most significant. The width of the relief height distribution is the largest and the image contains a lot of nano concavities and a pronounced grain structure. The measured corresponding roughness values of the reliefs of these enamel samples are 6, 16 and 12 nm, for the intact surface and the surfaces treated by the Opalescence and Beyond techniques, respectively. A statistical analysis of the nano grain sizes of the mentioned reliefs confirms the following values: 52±17 nm, 109±31 nm and 79±25 nm. Cross-correlation analysis of grain size samples of treated surfaces (t-test) confirms their statistical significance. Thus, based on the above results of the AFM measurements, it can be stated that whitening procedures definitely modify the nanostructure of the topography of the tooth enamel surface. The roughness of the surface can increase by two or more times and be accompanied by changes in the graininess of the surface of the tooth enamel prisms. The proposed method of evaluating the effect of bleaching on the nanostructure of the enamel relief allows us to effectively evaluate the effect of reagents and choose optimal bleaching agents. **Conclusions.** 1. Atomic force microscopy is an effective method of detecting the impact of modern bleaching procedures on the nanostructure of enamel surface relief. At the same time, reproducible and statistically significant results can be obtained during research in clearly defined areas of teeth, using fragments of the same sample. 2. Analyzing the microstructure of the enamel at our studies using the AFM, we have found that the professional teeth whitening procedure with a help of Beyond 35 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gel, 3 times for 12 minutes with the usage of a lamp and carrying out remineralization therapy after procedure significantly less has destroyed the upper layers of enamel prisms (40-100 nm) in comparison with the Opalescence technique and the best aesthetic effect has been achieved.

**Key words:** tooth enamel, teeth whitening, micro and nanostructural, atomic force microscopy.

**Постановка проблеми.** Дискolorити твердих тканин зубів є досить поширеною естетичною проблемою багатьох людей [1]. Зміна кольору зубів може негативно вплинути на самооцінку, соціальні взаємодії та загальну якість життя пацієнтів. Як вирішення даної проблеми були розро-

блені різні методи відбілювання зубів, включаючи лікування в стоматологічному кабінеті, а також засоби для відбілювання в домашніх умовах [2, 3]. Незважаючи на те, що ці методи лікування виявилися досить ефективними, виникло занепокоєння щодо їх впливу на зубну емаль [4, 5]. Початковий вигляд гідроксиапатиту – білий, тому натуральна емаль має білий колір із деякою прозорістю. Однак, внаслідок постійного хімічного та механічного зношування емалі з віком вона стає тоншою та прозорішою, а дентин – більш помітним, тому колір зуба темніє. Крім того, білий колір зубів часто змінюється внаслідок частого споживання напоїв – вина, чаю, кави, а також через тютюнопаління [6]. Зростає кількість доказів того, що методи відбілювання зубів можуть змінювати мікроструктуру, механічні властивості та хімічний склад зубної емалі, що може призвести до підвищення чутливості зубів, ерозії емалі та інших несприятливих ефектів [7, 8].

Корекція дискolorитів твердих тканин зубів є важливим елементом у сучасній естетичній стоматології. У світовій стоматологічній практиці все більше уваги приділяють розробці методів, що забезпечують задоволення естетичних потреб пацієнтів. За даними ВООЗ, в наш час понад 90 % дантистів США активно використовують різні методи відбілювання зубів [9].

Процес відбілювання зубів передбачає нанесення на зуби відбілюючого агента, який може проникати крізь шари емалі та дентину, щоб досягти пігментів, які викликають зміну кольору. Найпоширенішими відбілюючими агентами, які використовуються для відбілювання зубів, є перекис водню та перекис карбаміду. Ці агенти діють, розщеплюючи пігменти та перетворюючи їх на безбарвні молекули. Хоча відбілювання зубів показало ефективність у лікуванні дискolorитів і покращенні зовнішнього вигляду зубів, вони також пов'язані з негативним впливом на мікроструктуру зубної емалі. Під дією хімічних сполук відбілюючої речовини може відбуватися ерозія (руйнування) зубної емалі, ступінь якої можна оцінити засобами мікроскопії з високим просторовим розрізненням [10-13]. Результати цього дослідження допоможуть розробити ефективніші та максимально безпечні методи відбілювання зубів, а також поінформувати лікарів-стоматологів і пацієнтів про потенційні ризики та переваги даних методик.

**Мета дослідження.** Встановлення впливу відбілювальних середників на мікро- та наноструктурні особливості морфології поверхонь зубної

емалі (in vitro), визначення найбільш ефективних та безпечних методів відбілювання зубів.

**Матеріали і методи дослідження.** Досліджувались поверхні емалей постійних зубів, що були видалені за ортодонтичними показаннями у пацієнтів віком 18-39 років (свіжо видалені, премоляри та моляри верхньої та нижньої щелеп без проявів патологічних руйнувань емалі). Відібрані зразки промивали в проточній воді від крові та слизу, очищали від залишків м'яких тканин. У подальшому зразки піддавалися циклам індукованої демінералізації та подальшої ремінералізації, згідно методик відбілювання, рекомендованих виробниками. Для цього було створено три експериментальні групи, кожна з яких складалась із 10 зразків зубів:

1 група – зразки норми (інтактні зуби);

2 група – відбілювання зубів методикою Opalescence 35 % гель [14]. Тривалість відбілювання 30 хв, кількість оброблень 7 разів;

3 група – професійна гігієна зубів Air Flow, відбілювання зубів сучасною методикою Beyond 35 % гель  $H_2O_2$  [15]. Тривалість відбілювання 12 хв, кількість оброблень 3 рази. Також проводилась ремінералізуюча терапія.

З метою мінімізування впливу стану поверхні вихідних поверхонь зубів на результати досліджень, зразки відбирались із однієї групи зубів, а порівняння ефективності відбілювання проводились на двох частинах розділених навпіл зубів. Розділення здійснювалось в поздовжньому напрямі по осі зуба. Приклад підготовлених зразків показані на рис. 1,а. Оскільки товщина емалі та напрям емалевих призм є різними на різних ділянках зубів, дослідження рельєфів поверхонь здійснювались на однаковій поверхні зубів

(оклюзійна або вестибулярна поверхня зуба), як показано на рис. 1,б,в.

Мікро-/наноструктура рельєфів зразків зубних емалей до та після відбілювання характеризувалась з використанням сканувального зондового мікроскопі NanoScope IIIa Dimension 3000™ методом атомно силової мікроскопії (АСМ), в режимі періодичного контакту з використанням кремнієвих зондів із номінальним радіусом вістря 10 нм (рис. 1,в). Вимірювання проводилися при кімнатних умовах. Ніяких додаткових обробок поверхні зразків, окрім відбілювання, не проводилось.

На макрорівні поверхня зразків характеризувалась засобами цифрової оптичної мікроскопії [16] за допомогою мікроскопу Carl Zeiss NU2E. Для збільшення глибини фокусу застосовувались алгоритми стекування зображень (знімалися серії по 30-50 зображень на різних фокусних відстанях із подальшим формуванням одного зображення з покращеним фокусом). Фрагмент роботи виконано в лабораторії мікроскопічних досліджень Інституту фізики напівпровідників ім. С. Лашкарьова НАН України (зав. лабораторії – к.фіз.-мат. наук, Литвин П.М.

**Результати дослідження.** Типові оптичні мікрофотографії поверхонь досліджуваних зразків наведені на рис. 2. На інтактних поверхнях (рис. 2,а) та поверхнях, які пройшли процедуру відбілювання (б, в), присутня характерна комірчаста структура, утворена виходами на поверхні емалевих призм, що формують внутрішню мікроструктуру емалі (рис. 2 г). Крізь оптично прозорий шар емалі добре простежується округла форма внутрішньої частини призм (діаметром 4-6 мкм) та мереживо стінок між ними. Для поверхонь емалей зубів, оброблених за методикою

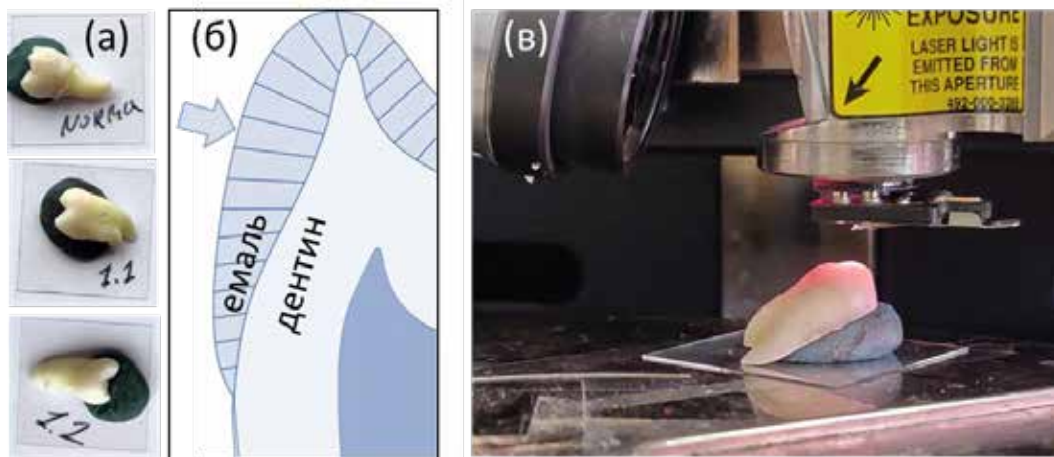


Рис. 1. Приклад зразків зубів, які піддавались відбілюванню за різними методиками та вивчались в АСМ (а).

Схема розташування досліджуваних ділянок поверхні емалі (б) та загальний вигляд зразка під сканером АСМ (в)

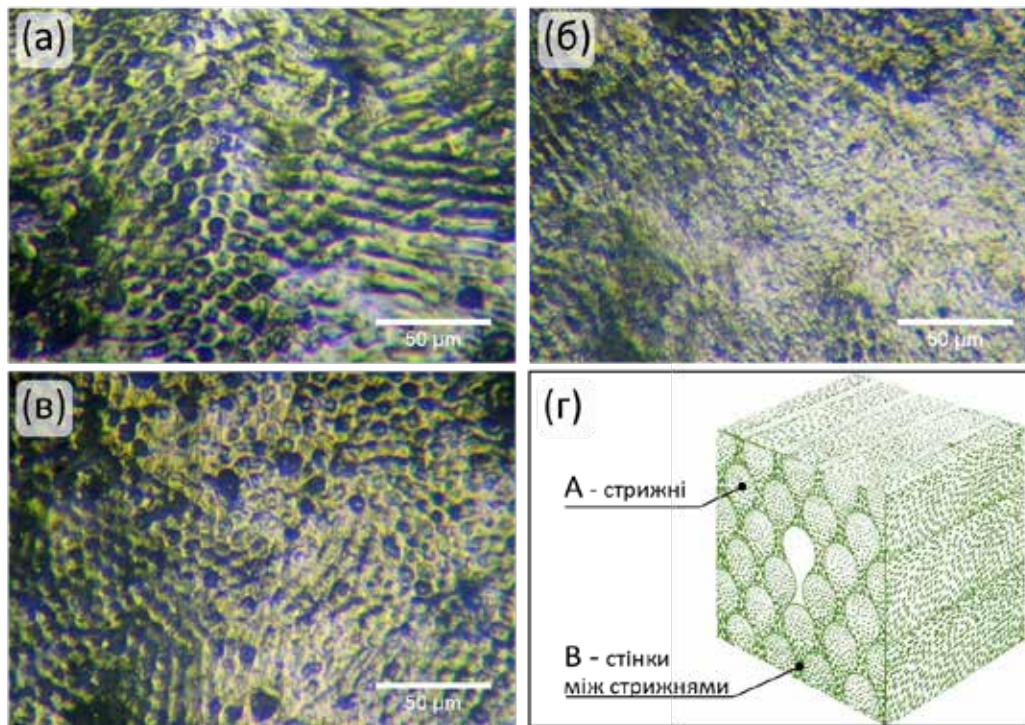


Рис. 2. Оптичні мікрофотографії поверхонь емалі інтактного зуба (а) та зубів, оброблених за методикою Opalescence (б) і Beyond (в). Схема внутрішньої структури емалі (г)

Opalescence, характерною є поява ділянок розмірами порядку сотні мікрон із порушеною комірчастою структурою (рис. 2,б). Схожих особливостей на поверхнях зубів, відбілених за методикою Beyond не спостерігалось (рис. 2 в).

Тривимірне картографування мікро-/наноструктури поверхонь методом АСМ часто застосовуються в стоматологічних дослідженнях [12, 13, 17, 18]. Одна з переваг АСМ полягає в тому, що її можна використовувати для характеристики зубної емалі без кропіткої пробопідготовки, тобто не потрібно робити зрізи чи спеціально готувати емаль до проведення вимірювань. Це важливо для вивчення впливу процедури відбілювання зубів на поверхню емалі, оскільки підготовка та зрізи можуть суттєво змінити рельєф та структуру емалі.

АСМ зображення великих фрагментів поверхонь зубів не виявляють суттєвих змін мікроструктури рельєфу емалей після проведення процедур відбілювання. Типовим є тільки більш чіткий прояв випадкових механічних ушкоджень у вигляді потертостей та подряпин. Закономірні зміни рельєфу оброблених емалей виявлено на рівні деталей рельєфу нанометрових розмірів.

На рис. 3а приведено тривимірне АСМ зображення фрагменту поверхні емалі інтактного зуба, що містить центральну частину призми (заглибина «В») та оточуючу стінку («А»). Оскільки

відомо [17, 18, 19], що стінка та центральна частина мають різну густину та механічні властивості фібрильної структури то можна сподіватись, що вплив відбілювача буде різним на призми та стінки між ними. Важливо встановити наявність/відсутність різниці в наноструктурі цих ділянок на необроблених поверхнях. Відповідні зображення показані на рис 3 б,в. Дійсно, середній розмір нанозерен поверхні ділянки А (стінка), які є проявом тонкої фібрильної структури, складає 70 нм, при ефективній шорсткості поверхні (без впливу загальних нерівностей поверхні) 4 нм. Для ділянки В (центр стрижня) середній розмір нанозерен є меншим, 55 нм, і відповідне значення шорсткості складає 7 нм. Аналогічні вимірювання в інших точках поверхні показують такі ж тенденції. Отже різниця в наноструктурі поверхонь границь між емалевими призмами та в самих призмах ще до проведення процедури відбілювання є статистично значимою. Для запобігання можливим некоректним оцінкам впливу відбілювання на рельєф емалі, а також з огляду на те, що менш щільна фібрильна структура центральної частини призм є потенційно більш сприйнятливою до дії реагентів, подальші порівняльні дослідження впливу реагентів проводились в центральних ділянках призм.

На рис. 4., як приклад, приведені АСМ зображення поверхні емалі двох частин розділеного

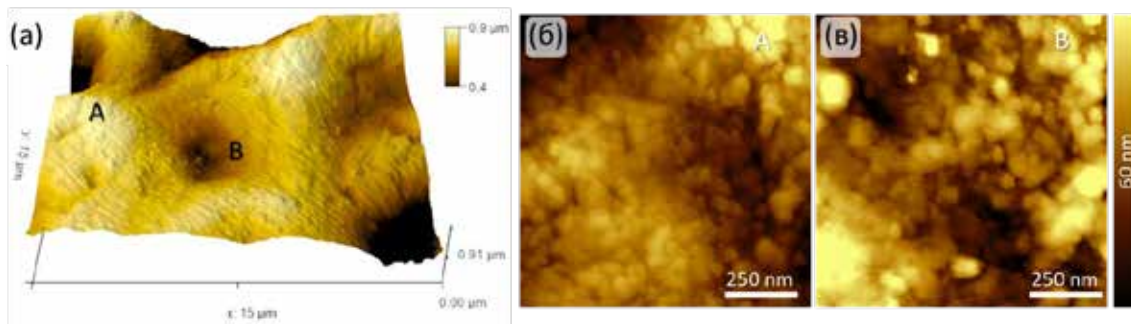


Рис. 3. 3D АСМ зображення поверхні інтактної емалі розміром  $15 \times 15 \mu\text{m}^2$  (а). 2D зображення фрагменту поверхні стінки емалі між призмами (б) та у центральній частині призми (в) розміром  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ . Стінка та центральна частина призми позначені літерами А та В, відповідно

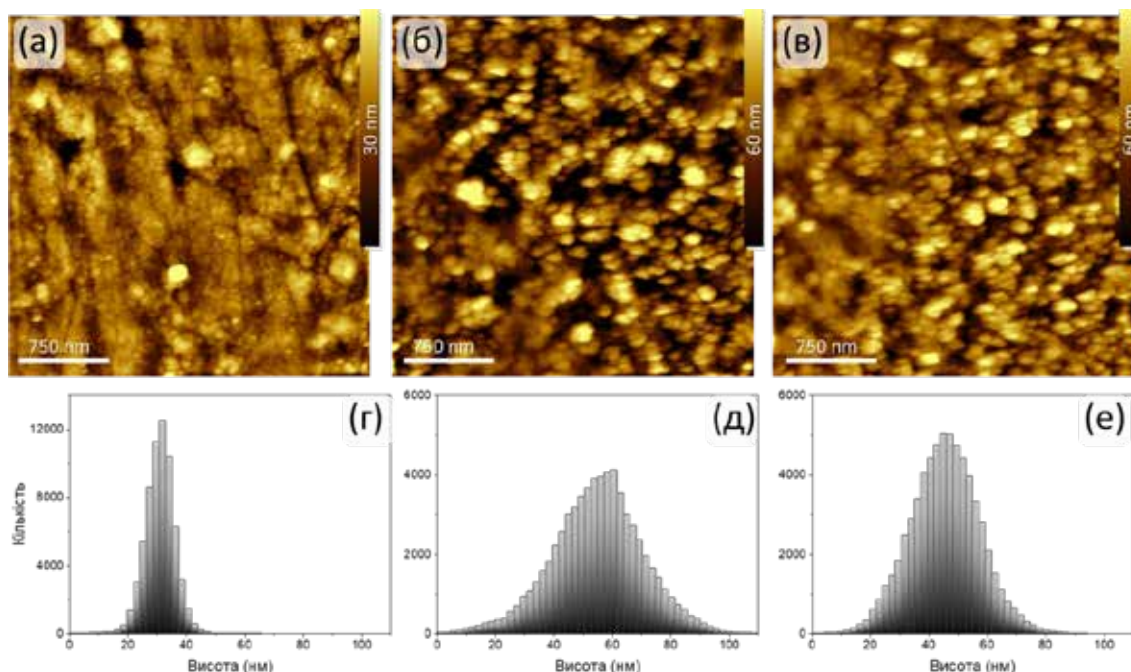


Рис. 4. АСМ зображення поверхонь емалі інтактного зуба (а) та зубів, оброблених за методикою Oralescence (б) і Beyond (в). Відповідні розподіли висот рельєфу поверхні показані на (г-е)

навіл зуба. Нанорельєф однієї частини вимірювався у вихідному стані (рис. 4а), та після процедури відбілювання за методикою Oralescence (рис. 4б). Інша частина цього ж зуба була оброблена за методикою Beyond (рис. 4,в). Як слідує із АСМ зображень та відповідних розподілів висот нанорельєфу (рис. 4 г-е), вплив на структуру рельєфу емалі процедури Oralescence є найбільш суттєвим. Ширина розподілу висот рельєфу є найбільшою, а зображення містить чимало наноуглибин і яскраво виражену зернисту структуру. Виміряні відповідні значення шорсткості рельєфів цих зразків емалі складають 6, 16 та 12 нм, для інтактної поверхні та поверхонь оброблених за методиками Oralescence і Beyond, відповідно. Статистичний аналіз розмірів нанозерен зазначе-

них рельєфів засвідчує наступні величини:  $52 \pm 17$  нм,  $109 \pm 31$  нм та  $79 \pm 25$  нм. Перехресний кореляційний аналіз вибірок розмірів зерен оброблених поверхонь (t-тест) підтверджує їх статистичну значимість.

Таким чином, виходячи з приведених результатів АСМ вимірювань, можна стверджувати, що процедури відбілювання безперечно модифікують наноструктуру рельєфу поверхні емалі зубів. Шорсткість поверхні може збільшуватись у два і більше разів і супроводжуватись змінами зернистості поверхні призми зубної емалі. Разом з тим, відбілювання з використанням реагентів та протоколів різних виробників впливає на наноструктуру рельєфу емалі у різній мірі. Пропонований спосіб оцінки впливу відбілювання на нанострук-

туру рельєфу емалей дозволяє ефективно оцінювати дію реагентів та обирати оптимальні засоби відбілювання.

**Висновки.** 1. Атомно силова мікроскопія є ефективним методом виявлення впливу сучасних процедур відбілювання на наноструктуру рельєфу поверхні емалей. При цьому відтворені, статистично значимі результати можна отримати при дослідженнях у чітко визначених ділянках зубів, з використанням фрагментів одного і того ж зразка.

2. При аналізі мікроструктури емалі в дослідженнях із застосуванням АСМ нами встановлено, що професійна методика відбілювання зубів Beyond 35 % гель  $H_2O_2$ , 3 рази по 12 хв із використанням лампи і проведенням ремінералізуючої терапії маючи найкращий естетичний ефект, суттєво менше руйнує верхні шари емалевих призм товщиною 40-100 нм у порівнянні з методикою Opalescence.

#### Література:

1. Рожко М.М. Ортопедична стоматологія: підручник. Київ: : Книга плюс; 2020. 752 с
2. Виноградова О.М. (2011). Електронно-мікроскопічне дослідження поверхні емалі зубів при застосуванні домашніх методів вибілювання, *Практична медицина*. 2011. Т. 3, С. 90–101.
3. Животовський І. В., Силенко Ю. І., Хребор М.В. Стоматологічний статус і пацієнтів з дисколоритами зубів, *Український стоматологічний альманах*. 2015. № 4. С. 17–19.
4. Motevasselian F., Kermanshah H., Dortaj D., Lippert F. Effect of pH of In-Office Bleaching Gels and Timing of Fluoride Gel Application on Microhardness and Surface Morphology of Enamel, *Int. J. Dent.* 2023. Vol. 2023, P. 1–8 <https://doi.org/10.1155/2023/1041889>.
5. Dionysopoulos D., Papageorgiou S., Malletzidou L., Gerasimidou O., Tolidis K. Effect of novel charcoal-containing whitening toothpaste and mouthwash on color change and surface morphology of enamel, *J. Conserv. Dent.* 2020. Vol. 23, 6. P. 624. [https://doi.org/10.4103/JCD.JCD\\_570\\_20](https://doi.org/10.4103/JCD.JCD_570_20).
6. Eppler M., Meyer F., Enax J. A Critical Review of Modern Concepts for Teeth Whitening. *Dent. J.* 2019. Vol. 7, 3. P. 79. <https://doi.org/10.3390/dj7030079>.
7. Palandi S. da S., Kury M., Cavalli V. Influence of violet LED and fluoride-containing carbamide peroxide bleaching gels on early-stage eroded/abraded teeth, *Photodiagnosis Photodyn. Ther.* 2023. Vol. 42, P. 103568. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2023.103568>.
8. Papazisi N., Dionysopoulos D., Naka O., Strakas D., Davidopoulou S., Tolidis K. Efficiency of Various Tubular Occlusion Agents in Human Dentin after In-Office Tooth Bleaching. *J. Funct. Biomater.* 2023. Vol. 14, 8. P. 430. <https://doi.org/10.3390/jfb14080430>.

9. Cavalli V., Kury M., Melo P.B.G., Carneiro R.V.T.S.M., Esteban Florez F.L. Current Status and Future Perspectives of In-office Tooth Bleaching, *Front. Dent. Med.* 2022. Vol. 3,. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2022.912857>.

10. Grazioli G., Valente L.L., Isolan C.P., Pinheiro H.A., Duarte C.G., Münchow E.A. Bleaching and enamel surface interactions resulting from the use of highly-concentrated bleaching gels, *Arch. Oral Biol.* 2018. Vol. 87, P. 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2017.12.026>.

11. Mohamad Saberi F.N., Sukumaran P., Ung N.M., Liew Y.M. Assessment of demineralized tooth lesions using optical coherence tomography and other state-of-the-art technologies: a review. *Biomed. Eng. Online.* 2022. Vol. 21, 1. P. 83. <https://doi.org/10.1186/s12938-022-01055-x>.

12. Braga P.C., Ricci D. Atomic Force Microscopy in Biomedical Research, Humana Press, Totowa, NJ, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-1-61779-105-5>.

13. Yildirim E., Koc Vural U., Yalcin Cakir F., Gurgan S. Effects of Different Over-the-Counter Whitening Products on the Microhardness, Surface Roughness, Color and Shear Bond Strength of Enamel. *Acta Stomatol. Croat.* 2022. Vol. 56, 2. P. 120–131. <https://doi.org/10.15644/asc56/2/3>.

14. Opalescence Teeth Whitening, n.d. <https://www.opalescence.com/>.

15. Products E.U., Beyond, n.d. <https://beyonddent.com/products-eu/>.

16. Fan Y., Li J., Lu L., Sun J., Hu Y., Zhang J., Li Z., Shen Q., Wang B., Zhang R., Chen Q., Zuo C. Smart computational light microscopes (SCLMs) of smart computational imaging laboratory (SCILab). *PhotonIX.* 2021. Vol. 2, 1. P. 19. <https://doi.org/10.1186/s43074-021-00040-2>.

17. Cui F.-Z., Ge J. New observations of the hierarchical structure of human enamel, from nanoscale to microscale, *J. Tissue Eng. Regen. Med.* 2007. Vol. 1, 3. P. 185–191. <https://doi.org/10.1002/term.21>.

18. Li P., Oh C., Kim H., Chen-Glasser M., Park G., Jetybayeva A., Yeom J., Kim H., Ryu J., Hong S. Nanoscale effects of beverages on enamel surface of human teeth: An atomic force microscopy study, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2020. Vol. 110, P. 103930. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103930>.

19. Nezafat N.B., Ghoranneviss M., Elahi S.M., Shafiekhani A., Ghorannevis Z., Solaymani S. Microstructure, micromorphology, and fractal geometry of hard dental tissues: Evaluation of atomic force microscopy images, *Microsc. Res. Tech.* 2019. P. jemt.23356. <https://doi.org/10.1002/jemt.23356>.

#### References:

1. Rozhko, M.M. (2020). Ортопедична стоматологія: підручник [Orthopedic dentistry: textbook], Kyiv: Knyha plus [in Ukrainian].

2. Vynogradova, O.M. (2011). Elektronno-mikroskopichne doslidzhennia poverkhni emali zubiv pry zastosuvanni domashnikh metodiv vybilivannia [Electron microscopic examination of the surface of tooth enamel when using home bleaching methods]. *Praktychna medycyna – Practical medicine*, 3, 90–101 [in Ukrainian].
3. Zhyvotovskiy I.V., Sylenko Yu.I., & Khrebor M.V. (2015). Stomatologichnyj status ipacijentiv z dyskolorytamy zubiv [Dental status and patients with dental dyscoloritis]. *Ukrainskyi Stomatolohichnyi Almanakh – Ukrainian dental Almanac*, 4, 17–19 [in Ukrainian].
4. Motevasselian, F., Kermanshah, H., Dortaj, D., & Lippert, F. (2023). Effect of pH of In-Office Bleaching Gels and Timing of Fluoride Gel Application on Microhardness and Surface Morphology of Enamel, *Int. J. Dent.*, 1, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2023/1041889>.
5. Dionysopoulos, D., Papageorgiou, S., Malletzidou, L., Gerasimidou, O., & Tolidis, K. (2020). Effect of novel charcoal-containing whitening toothpaste and mouthwash on color change and surface morphology of enamel, *J. Conserv. Dent.*, 23, 6. 624. [https://doi.org/10.4103/JCD.JCD\\_570\\_20](https://doi.org/10.4103/JCD.JCD_570_20).
6. Epple, M., Meyer, F., & Enax, J. (2019). A Critical Review of Modern Concepts for Teeth Whitening, *Dent. J.*, 7, 3. 79. <https://doi.org/10.3390/dj7030079>.
7. Palandi, S. da S., Kury, M., & Cavalli, V. (2023). Influence of violet LED and fluoride-containing carbamide peroxide bleaching gels on early-stage eroded/abraded teeth, *Photodiagnosis Photodyn. Ther.*, 42, 103568. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2023.103568>.
8. Papazisi, N., Dionysopoulos, D., Naka, O., Strakas, D., Davidopoulou, S., & Tolidis, K. (2023). Efficiency of Various Tubular Occlusion Agents in Human Dentin after In-Office Tooth Bleaching, *J. Funct. Biomater.*, 14, 8. 430. <https://doi.org/10.3390/jfb14080430>.
9. Cavalli, V., Kury, M., Melo, P.B.G., Carneiro, R.V.T.S.M., & Esteban Florez F.L. (2022). Current Status and Future Perspectives of In-office Tooth Bleaching. *Front. Dent. Med.*, 3. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2022.912857>.
10. Grazioli, G., Valente, L.L., Isolani, C.P., Pinheiro, H.A., & Duarte, C.G., Münchow, E.A. (2018). Bleaching and enamel surface interactions resulting from the use of highly-concentrated bleaching gels. *Arch. Oral Biol.*, 87, 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2017.12.026>.
11. Mohamad, Saberi F.N., Sukumaran, P., Ung, N.M., & Liew, Y.M. (2022). Assessment of demineralized tooth lesions using optical coherence tomography and other state-of-the-art technologies: a review. *Biomed. Eng. Online.*, 21, 1. 83. <https://doi.org/10.1186/s12938-022-01055-x>.
12. Braga, P.C., & Ricci, D. (2011). Atomic Force Microscopy in Biomedical Research, Humana Press, Totowa, NJ. <https://doi.org/10.1007/978-1-61779-105-5>.
13. Yildirim, E., Koc, Vural U., Yalcin, Cakir F., & Gurgan, S. (2022). Effects of Different Over – the – Counter Whitening Products on the Microhardness, Surface Roughness, Color and Shear Bond Strength of Enamel. *Acta Stomatol. Croat.*, 56, 2, 120–131. <https://doi.org/10.15644/asc56/2/3>.
14. Opalescence Teeth Whitening, n.d. <https://www.opalescence.com/>.
15. Products, E.U., Beyond, n.d. <https://beyonddent.com/products-eu/>.
16. Fan, Y., Li, J., Lu, L., Sun, J., Hu, Y., Zhang, J., Li, Z., Shen, Q., Wang, B., Zhang, R., Chen, Q., & Zuo, C. (2021). Smart computational light microscopes (SCLMs) of smart computational imaging laboratory (SCILab). *Photonix*, 2, 1, 19. <https://doi.org/10.1186/s43074-021-00040-2>.
17. Cui, F.-Z., & Ge, J. (2007). New observations of the hierarchical structure of human enamel, from nanoscale to microscale. *J. Tissue Eng. Regen. Med.*, 1, 3, 185–191. <https://doi.org/10.1002/term.21>.
18. Li, P., Oh, C., Kim, H., Chen-Glasser, M., Park, G., Jetybayeva, A., Yeom, J., Kim, H., Ryu, J., & Hong, S. (2020). Nanoscale effects of beverages on enamel surface of human teeth: An atomic force microscopy study. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 110, 103930. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103930>.
19. Nezafat, N.B., Ghoranneviss, M., Elahi, S.M., Shafiekhani, A., Ghorannevis, Z., & Solaymani, S. (2019). Microstructure, micromorphology, and fractal geometry of hard dental tissues: Evaluation of atomic force microscopy images. *Microsc. Res. Tech.*, P. jemt.23356. <https://doi.org/10.1002/jemt.23356>.