

УДК 616.716.85:57.017.64:54

Хоменко Л.О., Антонишин Б.В.Національний медичний університет ім. О.О. Богомольця, м. Київ,
каф. дитячої терапевтичної стоматології та профілактики стоматологічних
захворювань (зав. – проф. Л.О. Хоменко)L.O. Khomenko, B.V. Antonyshyn

Порівняльний аналіз хімічного складу альвеолярної кістки при прорізуванні зуба і формуванні його кореня

Comparative Analysis of Chemical Composition Alveolar Bone when Teeth Eruption and Root Formation

РЕЗЮМЕ У статті наведено результати дослідження вмісту основних хімічних елементів структури апатитів міжзубної кісткової перегородки при її побудові в період прорізування зуба та формування коренів. Описано біологічну активність цих елементів, яка проявляється їх участю в окисно-відновних реакціях при ремоделюванні та мінералізації кістки.

Summary The results of investigation contents main chemical elements in apatite of interdental bone membrane during it construction in teeth eruption and root formation was describe. Biological activity by means of oxidation-reduction reaction which were in the bone during it simulation and mineralization was shown.

КЛЮЧОВІ СЛОВА хімічний склад, альвеолярна кістка, міжзубна перегородка, апатит, ремоделювання
KEY WORDS chemical composition, alveolar bone, interdental membrane, apatite, simulation

Відомо, що альвеолярний відросток, зокрема, його міжзубні кісткові перегородки остаточно формуються одночасно з прорізуванням зубів і ростом їх коренів. Це формування відбувається внаслідок ремоделювання кістки на основі анаболічних та катаболічних процесів, що постійно проходять в ній і залежать від складної регуляції метаболізму кісткової тканини. Воно починається із верхівок, з моменту прорізування зуба і порушується з формуванням коренів і тканин періодонту відповідних зубів. Також встановлено, що деструктивні процеси в кістці, пов'язані з порушенням у ній обмінних процесів за наявності місцевих чинників чи загальносоматичних захворювань, переважно починаються

в ділянці верхівок міжзубних кісткових перегородок [1]. Очевидно, що чим більш сформована кістка, тим вона повинна мати більший потенційний запас стійкості до впливу агресивних чинників, які викликають її деструкцію.

Мета дослідження – вивчити хімічний склад альвеолярної кістки в ділянці верхівки міжзубної перегородки при її остаточному формуванні в період прорізування зуба та формування його коренів у тварин різного віку.

Матеріали та методи дослідження

Вивчено хімічний склад міжзубної перегородки у різні періоди її форму-

вання під час прорізування зубів у 7-ми вікових групах білих щурів (по 5 тварин у кожній) віком 20 днів; 1, 1,5; 2; 3; 4 і 6 місяців, які утримували на дієті віварію.

З огляду на те, що в будові альвеолярної кістки виділяють компактну (кортикальну) пластинку і губчасту тканину, які значно відрізняються співвідношенням волокнистих структур і активних елементів, дослідження її мінерального складу проведено у ділянках кортикальної пластинки, а також губчастої тканини верхівки міжзубної перегородки. Всього досліджено 35 шліфів альвеолярного відростка з використанням рентгеноспектрального мікроаналізатора Jeol – 733 фірми «Jeol» (Японія). Визначено вміст 12

хімічних елементів структури апатитів кістки (Ca, P, Mg, Fe, Zn, Mn, Pb, K, Na, S, F, Cl) у вигляді відсоткового співвідношення їх масових часток (мас %).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Встановлено, що вміст кальцію та фосфору в досліджуваних ділянках альвеолярної кістки залежить від її структурної ділянки та віку тварин (періоду ремоделювання кістки). Їх вміст менший у компактній пластинці порівняно з губчастою тканиною. Так, у компактній пластинці 20-денних тварин (на момент прорізування зуба) кальцію виявлено $22,45 \pm 0,26$ мас %, тоді як у губчастій тканині $23,70 \pm 0,31$ мас %, а фосфору – $15,92 \pm 0,07$ мас % та $17,42 \pm 0,09$ мас % відповідно. З віком кількість кальцію і фосфору у досліджуваних ділянках міжзубної перегородки збільшується і досягає найвищих показників для фосфору в кортикальній пластинці 1,5-місячних тварин ($16,20 \pm 0,07$ мас %), а в губчастій тканині – 2 – 3-місячних ($17,64 \pm 0,08$ мас %) тоді як для кальцію вони продовжують зростати до 4-місячного віку зі збереженням принципу їх розподілу як у 20-денних (у губчастій структурі їх показники вищі і становлять $27,09 \pm 0,19$ мас % проти $25,04 \pm 0,16$ мас % у компактній пластинці). Це свідчить, що утворення мінералізованої структури компактної пластинки на верхівці міжзубної перегородки відбувається швидше і закінчується у 1,5-місячному віці, тоді як губчаста тканина продовжує формуватися до 3-місячного віку. Тобто, у ці періоди мінералізується органічна основа верхівки альвеолярного відростка, утворюючи апатити з вільними місцями в їх кристалічній решітці. Заповнення вільних місць продовжується до 4-місячного віку, про

що свідчить збільшення відсоткової частини кальцію у досліджуваних ділянках (у кортикальній – його вміст $25,04 \pm 0,16$ мас %, а в губчастій – $27,09 \pm 0,19$ мас %). У 6-місячних тварин вміст кальцію і фосфору у досліджуваних ділянках альвеолярного відростка залишається практично без змін.

Підтвердженням наведених даних є показник кальцій-фосфорного співвідношення (Ca / P) у досліджуваних ділянках альвеолярного відростка тварин різного віку. Необхідно зазначити, що до 3-місячного віку саме структура кортикальної пластинки містить сформованіші апатити (з вищим ступенем заповнення місць у їх кристалічній решітці), тобто з вищим Ca / P показником. Саме тому у 20-денних тварин показник Ca/P становить у кортикальній частині $1,41 \pm 0,003$, а в губчастій – $1,36 \pm 0,005$, тоді як у 3-місячних – $1,52 \pm 0,001$ в обох досліджуваних частинах кістки. У наступних вікових групах Ca / P показник практично залишається без змін і для 4-місячних тварин дорівнює $1,55 \pm 0,001$ і $1,54 \pm 0,002$ та 6-місячних – $1,54 \pm 0,002$ відповідно у кортикальній і губчастій частинах кістки. Під час формування мінералізованих структур кістки, одночасно з виявленою динамікою розподілу кальцію і фосфору спостерігається також чітка закономірність розподілу хімічних елементів основних груп структури апатитів (група кальцію, фосфору і ОН-заміщувальних), яка переважно залежить від структурної ділянки кістки (компактна чи губчаста) і періоду перебудови (віку тварини).

Під час дослідження розподілу магнію у структурі міжзубної кісткової перегородки в процесі її формування виявлено приблизно однакову його кількість до 3-місячного віку тварин, однак з перевагою у губчас-

тій частині кістки: у кортикальній пластинці 20-денних тварин його кількість становить $0,016 \pm 0,002$ мас % і в губчастій – $0,009 \pm 0,001$ мас %, а у 3-місячних – відповідно $0,015 \pm 0,002$ мас % і $0,020 \pm 0,002$ мас %. У наступні вікові періоди спостерігається поступове зменшення вмісту магнію і в 6-місячних тварин у компактній частині його виявлено $0,010 \pm 0,001$ %, а в губчастій – $0,015 \pm 0,001$. Такий кількісний його розподіл пояснюється тим, що магній у кістці виконує подвійну роль. Як пластичний матеріал, він входить до структури кристалів апатитів (основна його маса знаходиться або на поверхні кристалів, або в гідратній оболонці), а також є специфічним активатором і кофактором ряду ферментативних систем. У мітохондріях клітин іони Mg активують процеси окислювального фосфорилювання, які різко сповільнюються при їх дефіциті. Іони Mg також є активаторами ферментів, які переносять фосфатні групи в обмінних реакціях (аденілаткінази, NAD-кінази, креатинкінази). До того ж, вони активують піруваткарбоксилазу і оксидазу піровиноградної кислоти, які беруть участь у циклі Кребса, а також лужну фосфатазу [2]. Ймовірно, саме цим пояснюється підвищений вміст магнію у період активного формування структури кістки (до 2 – 3 місячного віку), що забезпечує повноцінну і активну діяльність її основних клітин. У сформованій кістці його кількість дещо зменшується, оскільки активність обмінних процесів у ній значно знижується і залишається переважно магній, який виконує роль пластичного матеріалу у складі структури апатитів.

Вміст заліза у досліджуваних частинах кістки залежить від ступеня її сформованості. Заліза більше у міжзубній перегородці молодих тварин (до 1,5 – 2-місячного віку), особли-

во у її губчастій частині, де формування структурних одиниць кістки ще не завершилось. У цей період (як показали дані розподілу фосфору) ще утворюються неорганічні структури кістки, а також кристали апатитів із вільними місцями в їх кристалічній решітці, заповнення яких триває ще 2 – 2,5 місяці. Так, у компактній пластинці 20-денних тварин його виявлено $0,015 \pm 0,001$ мас %, а в губчастій – $0,018 \pm 0,002$ мас %. З віком відбувається зменшення кількості заліза в губчастій частині і тварин старшого віку (3 – 6 місяців), спостерігається його кількісна перевага у кортикальній пластинці. Так, у 3-місячних тварин у кортикальній пластинці виявлено $0,016 \pm 0,002$ мас % заліза і в губчастій – $0,013 \pm 0,002$ мас %, а у 6-місячних – $0,011 \pm 0,001$ мас % і $0,008 \pm 0,001$ мас % відповідно.

Вміст цинку у досліджуваних ділянках міжзубної перегородки в процесі її формування залежить переважно від віку тварин, тобто сформованості її структур і меншою мірою від виду кістки (компактна чи губчаста). Його значно більше у кістці на етапі незавершеного формування, ніж у кістці з повністю мінералізованою структурою. Так, у 20-денних тварин його виявлено у компактній частині перегородки $0,064 \pm 0,011$ мас %, а в губчастій – $0,069 \pm 0,013$ мас %, тоді як у 3-місячних – $0,025 \pm 0,004$ мас % та $0,016 \pm 0,002$ мас % відповідно. У тварин старшого віку вміст цинку майже не змінюється і у компактній пластинці 6-місячних тварин становить $0,022 \pm 0,001$ мас %, а в губчастій – $0,014 \pm 0,001$ мас %.

Очевидно, такий розподіл цинку в міжзубній перегородці альвеолярного відростка тварин різного віку зумовлений його основними властивостями. Будучи мікроелементом для побудови структури апатитів, він

також виконує біохімічну роль, пов'язану з ферментативними процесами. Цинк бере участь в обміні нуклеїнових кислот і синтезі білка, а через окисно-відновні реакції – в обміні білків, жирів та вуглеводів [3], у мінеральному обміні, входячи до складу таких ферментів, як лужна фосфатаза та карбонатдегідратаза. Отже, підвищення вмісту цинку на етапі формування кісткової тканини, очевидно, пояснюється його біохімічною активністю (входженням до складу ферментів, гормонів та вітамінів).

Під час аналізу розподілу свинцю виявлено, що у всіх вікових групах його більше в губчастій частині кістки, ніж в компактній. Водночас, зі зростанням ступеня мінералізації кістки і надалі підвищується його концентрація. Так, на верхівці міжзубної перегородки 20-денних тварин свинець міститься в компактній частині $0,021 \pm 0,002$ мас % та в губчастій – $0,030 \pm 0,002$ мас %, у 3-місячних – $0,022 \pm 0,001$ мас % та $0,053 \pm 0,003$ мас %, в у 6-місячних – $0,034 \pm 0,002$ мас % та $0,062 \pm 0,003$ мас % відповідно. Тобто свинець залучається у структуру мінералізованої тканини як в процесі її формування, так і в сформований мінеральний компонент унаслідок гетероіонного обміну. Одержані результати підтверджують, що цинк є остеотропним і має безпосереднє відношення до обміну кальцію і фосфору, а також глікозоаміногліканів кістки.

У процесі ремоделювання верхівки міжзубної кісткової перегородки тварин від 20-денного до 3-місячного віку марганець у незначній кількості рівномірно розподілений у досліджуваних її частинах, а починаючи з 4-місячного віку – у досліджуваних її частинах, а починаючи з 4-місячного віку він активніше залучається в структуру кістки (в компактну і губчасту частини), притому його вміст у губчастій частині дещо підвищується,

проте з перевагою у компактній частині. Так, у 2-денних тварин його виявлено в обох ділянках кістки по $0,002 \pm 0,001$ мас %, у 3-місячних – $0,003 \pm 0,001$ мас % та $0,002 \pm 0,001$ мас %, а у 6-місячних – $0,008 \pm 0,002$ мас % та $0,005 \pm 0,001$ мас % відповідно у компактній та губчастій частинах. Такий розподіл марганцю у кістці тварин різного віку пояснюється, ймовірно, тим, що на етапі формування кістки він здебільшого виконує роль активатора багатьох ферментативних процесів. Марганець входить до складу пірваткарбоксілази, аргінази і є необхідним для активації дегідрогеназ ізолімонної та яблучної кислот, декарбоксілази пірвіноградної кислоти [4]. Його безпосередня дія на кістку зумовлена, ймовірно, активізуючим впливом на лужну фосфатазу і синтез кислих глікозаміногліканів у матриці кістки. Марганець бере участь в окислювальному фосфорилуванні і усередині клітин, концентруючись у мітохондріях. У мінералізованій кістці марганець знаходиться переважно в її неорганічній частині і лише незначна його кількість пов'язана з органікою.

Розподіл калію значною мірою залежить від сформованості кістки та виду її досліджуваної ділянки. На етапі незавершеного формування його більше в місцях активного формування кістки. У тварин 20-денного та місячного віку вміст калію переважає у компактній кістці при його високих показниках у губчастій. Отже, до 3-місячного віку його вміст поступово зменшується, але кількісна перевага постійно спостерігається у губчастій частині. У 20-денних тварин калію виявлено в компактній частині $1,492 \pm 0,109$ мас % і в губчастій – $0,829 \pm 0,026$ мас %, у місячних – $0,934 \pm 0,092$ мас % і $0,559 \pm 0,021$ мас %, а у 3-місячних – $0,221 \pm 0,011$ мас % і $0,236 \pm$

0,014 мас % відповідно. У старшому віці його вміст майже не змінюється, що свідчить, на нашу думку, про стабільність структури та обмінних процесів у молодій сформованій кістковій тканині.

Такий розподіл калію зумовлено його вмістом як у клітинах, так і в позаклітинному середовищі. Будучи основним внутрішньоклітинним одновалентним катіоном, калій бере участь у реалізації екзогенних і ендогенних імпульсів клітин нервової системи, забезпечуючи у такий спосіб координаційні та трофічні процеси в організмі [2]. За участю іонів K^+ , які містяться в еритроцитах, відбувається перенос кисню гемоглобіном. Калій є кофактором ферменту, який переносить фосфатну групу з АТФ на піровиноградну кислоту і, ймовірно, активує ряд інших ферментів внутрішньоклітинного метаболізму. Тому на етапі мінералізації органічних структур кістки вміст калію підвищений у декілька разів. У сформованій кістці він може виконувати роль буфера для нейтралізації H^+ – іонів у разі закислення внутрішнього середовища тканини.

Натрій переважає у компактній частині кістки на етапі її незавершеного формування, тобто у тварин молодшого віку (від 20 днів до 2 місяців). У губчастій частині кістки тварин цього віку його виявлено менше. Так, у 20-денних тварин натрій міститься у компактній частині кістки $0,692 \pm 0,021$ мас % і в губчастій – $0,351 \pm 0,017$ мас %, а у 2-місячних відповідно $0,301 \pm 0,01$ мас % і $0,239 \pm 0,012$ мас %. У старшому віці продовжується незначне зниження його вмісту в компактній частині кістки, а у губчастій кістці показники натрію залишаються майже стабільними і у 6-місячних тварин його виявлено $0,091 \pm 0,004$ мас % та $0,216 \pm 0,01$ мас % відповідно у цих частинах. Підвищений вміст натрію у кістці

тварин молодшого віку, очевидно, пов'язаний з його функцією як основного катіона позаклітинного середовища, який підтримує осмотичний тиск у позаклітинній рідині, забезпечуючи побудову основних її структур. У мінералізованій кістці іони Na^+ також дифундують із тканинної рідини в гідратний шар кристалів апатиту або, проникаючи всередину кристалу, можуть довгий час знаходитись у ньому чи при гетероіонному обміні заміщувати інші іони кристалу, наприклад Ca^{2+} [2].

Отже, такий розподіл хімічних елементів групи кальцію зумовлено тим, що крім пластичної функції їм властива біологічна активність, пов'язана з ферментативними процесами, які відбуваються у кістці. Входячи до складу ферментів, гормонів і вітамінів, вони через окисно-відновні реакції беруть участь в обміні білків, жирів і вуглеводів. Це, очевидно, і зумовлює їх підвищений вміст у структурах молодшої кісткової тканини. Елементи групи кальцію беруть участь як у формуванні органічного компонента кістки, так і в його мінералізації, входячи на різних структурних рівнях (гідратна оболонка, поверхневий шар кристалу, вузли кристалічної решітки) до складу апатитів. Такі хімічні елементи як магній, калій, натрій переважно розміщуються у гідратній оболонці або на поверхні кристалу (натрій, магній) і здебільшого не проникають у глибину кристалічної решітки. Ці елементи беруть участь у знищенні асиметрії поверхневого заряду кристалу при нестачі кальцію у його структурі (у разі наявності вільних місць у кристалічній решітці). У процесі залучення кальцію у структуру апатитів їх вміст зменшується, що підтверджують результати хімічного складу кістки у тварин старшого віку (2 – 3-місячного).

Залізо, цинк, свинець і марганець здатні залучатися у структуру кри-

сталу апатиту (проникаючи всередину кристалу, ставати на місце кальцію у вузлах кристалічної решітки) та утримуватись у ньому довгий час, корегуючи водночас міжіонні зв'язки кристалу. Проте, якщо залізо та цинк залучаються у структуру кристалу здебільшого на етапі його формування і тоді їх концентрація у структурі сформованої емалі утримується приблизно на однаковому рівні, то інші елементи (свинець, марганець) беруть участь у гетероіонному обміні між сформованим кристалом і тканинною рідиною, яка його омиває, змінюючи свою концентрацію в структурі апатитів сформованої кістки.

Із елементів групи фосфору структури апатитів вивчено розподіл сірки при формуванні верхівки міжзубної перегородки. Встановлено, що сірки більше в молодій кістці (особливо у компактній частині) і в процесі її формування та мінералізації кількість сірки значно зменшується (до 3-місячного віку). У 20-денних тварин її виявлено $0,0283 \pm 0,009$ мас % і $0,237 \pm 0,01$ мас %, а у 3-місячних – $0,089 \pm 0,002$ мас % і $0,097 \pm 0,004$ мас % відповідно у компактній і губчастій частині. Отже, з віком вміст сірки майже не змінюється у компактній та дещо зменшується в губчастій частині і у 6-місячних тварин він становить $0,074 \pm 0,002$ мас % та $0,069 \pm 0,006$ мас % відповідно у досліджуваних частинах.

Такий вміст сірки в кістці тварин різного віку зумовлено її входженням до складу багатьох органічних і неорганічних сполук. У білках, а саме в їх сірковмісних амінокислотах (цистин і метионін), сірка виступає не лише як фізіологічно активний елемент, але, входячи в дисульфідні мостики, вона стабілізує, а значить, визначає їх структуру. Очевидно, саме тому при ремоделюванні кістки значна частка сірки припадає на її органічні сполуки. У структурі мінералі-

зованої тканини сірка входить до складу апатитів, унаслідок заміщення фосфатної групи на сульфатну. А тому у сформованій кістці її вміст порівняно стабільний.

Серед ОН-заміщувальних елементів (фтор і хлор) виявлено неоднаковий їх розподіл у досліджуваних частинах кістки — хлору більше у компактній, а фтору — у губчастій. З віком кількість хлору зменшується, а фтору — збільшується. Найменше фтору визначено у компактній частині кістки 20-денних тварин ($1,107 \pm 0,043$ мас %). У губчастій частині його дещо більше ($1,877 \pm 0,092$ мас %). З віком вміст фтору збільшується, особливо у губчастій кістці, і у місячному віці його виявлено $2,031 \pm 0,076$ мас %, тоді як у компактній — $1,397 \pm 0,061$ мас %, у 2-місячному — $2,273 \pm 0,035$ мас % і $1,576 \pm 0,026$ мас %, а у 3-місячному — $2,426 \pm 0,029$ мас % і $1,622 \pm 0,031$ мас % відповідно. У наступних вікових групах суттєвих змін у розподілі фтору не спостерігається, зокрема, у 6-місячних тварин його міститься відповідно $2,325 \pm 0,017$ мас % та $1,658 \pm 0,013$ мас %. Отже, дані розподілу фтору, які ми отримали, збігаються з результатами досліджень Габовича Р.Д. і Мінха А.А., які довели, що вміст фтору в кістці збільшується протягом всього життя, але активне залучення до складу кісткової тканини усе ж таки відбувається під час її формування і мінералізації. Вищий вміст фтору в губчастій частині кістки, очевидно,

пояснюється кращим її кровопостачанням, а також наявністю більшої кількості позаклітинної рідини, що сприяє кращому перебігу в ній обмінних процесів.

Під час вивчення розподілу хлору виявлено його перевагу в губчастій частині кістки порівняно з компактною. Так, у 20-денних тварин вміст хлору становить $0,349 \pm 0,017$ мас % та $0,248 \pm 0,011$ мас % відповідно. У старшому віці спостерігається зменшення його кількості зі збереженням такого принципу розподілу. Суттєве зменшення хлору в обох ділянках кістки відбувається до 2-місячного віку і у цьому віці його вміст у компактній частині кістки становить $0,166 \pm 0,014$ мас %, а в губчастій — $0,278 \pm 0,015$ мас %. Зазначимо, що у компактній частині міжзубної перегородки незначне зменшення вмісту хлору відбувається до 4-місячного віку при його стабільній кількості у губчастій. У 6-місячних тварин вміст хлору становить $0,141 \pm 0,01$ мас % та $0,273 \pm 0,014$ мас % відповідно у компактній та губчастій частинах.

Переважає хлору в губчастій частині кістки пов'язана з кращим її кровопостачанням і більшим вмістом у ній позаклітинної рідини, що сприяє кращому обміну між нею і гідратною оболонкою кристалу, а отже, і самим кристалом. Як відомо, основна маса хлору в організмі міститься у позаклітинних рідинах. З моменту завершення мінералізації губчастої

кістки співвідношення пористих структур і компактних перегородок стає сталим, що визначає стабільність рідини в кістці, а також і вміст цього елемента в ній. Хлор, як найважливіший аніон водяної фази організму, бере участь у підтримці осмотичного тиску і кислотно-лужної рівноваги. Іони Cl^- сприяють переміщенню інших іонів між плазмою і еритроцитами, посилюючи у такий спосіб обмінні процеси у тканинах.

Висновки

Хімічний склад верхівки міжзубної кісткової перегородки залежить від періоду перебудови альвеолярної кістки під час прорізування зуба і формування кореня (ступеня її сформованості) та особливостей її структурних частин (компактної чи губчастої).

Виявлена динаміка вмісту як основних хімічних елементів (кальцію і фосфору), так і тих, які здатні замінити їх у структурі апатитів при гетероіонному обміні, пояснює високий рівень чутливості кісткової тканини в період її морфологічної незрілості, а також агресивність перебігу захворювань тканини пародонта у дітей та підлітків у період змінного і становлення постійного прикусу.

Отримані результати підтверджують вплив стану обмінних процесів в організмі на формування та мінералізацію міжзубної кісткової перегородки, а також можливі механізми розвитку остеопорозу на тлі порушення її трофіки.

Література

1. Поворознюк В.В. Костная система и заболевания пародонта / В.В. Поворознюк, И.П. Мазур. — К., 2005. — 445 с.
2. Москалев Ю.И. Минеральный обмен / Ю.И. Москалев. — М.: Медицина, 1985. — 288 с.
3. Ноздрюхина Л.Р. Биологическая роль микроэлементов в организме животных и человека / Л.Р. Ноздрюхина. — М.: Наука, 1977. — 183 с.
4. Ребров В.Г. Витамины, макро- и микроэлементы / В.Г. Ребров, О.А. Громова. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. — 960 с.
5. Габович Р.Д. Гигиенические проблемы фторирования питьевой воды / Р.Д. Габович, А.А. Минх. — М.: Медицина, 1979. — 199 с.