

УДК 549.903:539.219.3

**ВЛАСТИВОСТІ ПАРАМАГНІТНИХ РАДИКАЛІВ,  
ЛОКАЛІЗОВАНИХ У ЗУБНІЙ ЕМАЛІ, ТА ДОСТОВІРНІСТЬ  
РЕЗУЛЬТАТІВ РЕТРОСПЕКТИВНОЇ ЕПР-ДОЗИМЕТРІЇ**

**В. Радчук**

*Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України  
03186 м. Київ, Чоколівський бульвар, 13  
E-mail: itc\_nasu@ukr.net*

Описано радіоспектроскопічні властивості емалі зубів, які найсуттєвіше впливають на результати ретроспективної дозиметрії, що ґрунтується на електронному парамагнітному резонансі. Основну увагу приділено нативним радикалам, які мають нерадіаційну природу, однак суттєво впливають на процедуру реконструкції доз, а також карбонатним радіаційно-стимульованим радикалам, за допомогою яких визначають дозові навантаження людини. Проаналізовано вплив різних чинників на достовірність результатів ретроспективної дозиметрії.

*Ключові слова:* біогенні мінерали, ретроспективна дозиметрія, електронний парамагнітний резонанс, емаль зубів, нативні радикали, реконструкція доз опромінення.

Емаль зубів є найтипівішим представником мінералів біогенного походження [3]. Вивчення властивостей емалі зубів важливо не тільки для розвитку біомінералогії як нового розділу мінералогії, а й для вирішення широкого кола прикладних завдань. Серед таких завдань важливе місце посідають завдання ретроспективної дозиметрії, які дають змогу визначити дозу опромінювання, отриману людиною в минулому внаслідок виникнення різного роду нештатних ситуацій [2]. Актуальність досліджень у галузі ретроспективної дозиметрії зумовлена щораз більшою роллю атомних електростанцій у виробництві електроенергії, ширшим застосуванням радіоактивних ізотопів у науці й техніці, а також можливими терористичними актами, під час яких можуть бути використані радіоактивні ізотопи. Розвиток методів ретроспективної дозиметрії стимульований атомними бомбардуваннями Хіросіми й Нагасакі, а також аварією на Чорнобильській АЕС [6, 7]. Недавні події на японських атомних електростанціях, що пов'язані з землетрусами, також підтверджують важливість розвитку й удосконалення методів ретроспективної дозиметрії людини.

Відомо, що один з найефективніших методів визначення дози опромінювання, яку людина отримала в минулому, ґрунтується на визначенні кількості радіаційних центрів в емалі зубів за допомогою електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) [2, 6, 7]. Розробці методів ретроспективної ЕПР дозиметрії емалі зубів присвячена значна кількість досліджень [1, 4–7]. Водночас багато важливих питань у галузі ретроспективної дозиметрії емалі зубів досліджено недостатньо. Це стосується, зокрема, властивостей нерадіаційних (так званих нативних) радикалів  $R_n$ , радіаційно-стимульованих карбонатних  $\text{CO}_2^-$ -радикалів, а також впливу метаболізму і захворювань емалі зубів на стабільність та

інші характеристики зазначених радикалів. Недостатня вивченість властивостей радикалів  $R_n$  і  $\text{CO}_2^-$  знижує достовірність результатів ретроспективної дозиметрії і, відповідно, утруднює вирішення завдань, пов'язаних з мінімізацією негативних наслідків радіаційного опромінювання, отриманого людиною у минулому.

Наша мета – опис властивостей радикалів  $R_n$  і  $\text{CO}_2^-$ , локалізованих в емалі зубів, а також аналіз впливу характеристик цих радикалів на достовірність результатів ретроспективної дозиметрії людини.

**Властивості нативних радикалів в емалі зубів.** У всіх взірцях емалі зубів, як і в багатьох інших біомінералах, наявні так звані нативні радикалі  $R_n$ , що пов'язані з розірваними хімічними зв'язками в органічній матриці емалі [4]. Відповідно, у всіх зразках емалі зубів можна зареєструвати сигнали ЕПР, що зумовлені нативними радикалами  $R_n$ . Вигляд сигналів ЕПР від радикалів  $R_n$  показано на рис. 1. Для цих сигналів фактор спектроскопічного розщеплення ( $g$ -фактор) дорівнює  $2,0045 \pm 0,0005$ , а ширина ліній  $\Delta B = (9 \pm 2) \cdot 10^{-4}$  Тл. Сигнали ЕПР, що зумовлені радикалами  $R_n$ , називають фоновими сигналами, оскільки вони не залежать від опромінення та заважають вирішенню завдань ретроспективної дозиметрії.

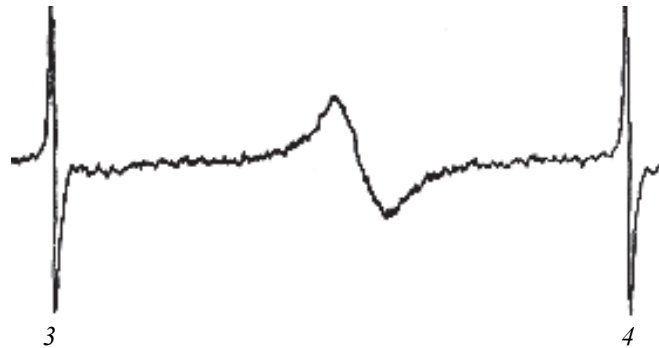


Рис. 1. Сигнал ЕПР неопроміненої емалі, зумовлений нативними радикалами  $R_n$ . Цифрами 3 і 4 позначено третю й четверту лінії надтонкої структури йонів  $\text{Mn}^{2+}$  в еталонному взірці ( $\text{MgO}:\text{Mn}^{2+}$ ).

Сигнали ЕПР, подібні до сигналу, зображеного на рис. 1, можна зареєструвати і в інших високомінералізованих біологічних тканинах, зокрема в дентині. У дентині інтенсивність сигналів, зумовлених  $R_n$ , у декілька разів більша, ніж в емалі. Тому для зменшення інтенсивності фонових сигналів потрібно ретельно відділяти емаль від дентину.

Відпалювання взірців призводить до збільшення інтенсивності сигналів, зображених на рис. 1. Залежність інтенсивності сигналів ЕПР ( $I$ ) від температури відпалювання взірців показано на рис. 2. Як бачимо, унаслідок відпалювання емалі за  $T > 150$  °С інтенсивність сигналів ЕПР збільшується. Водночас важливо, що за температури відпалу вище 300 °С, крім збільшення інтенсивності сигналу, відбувається також зміна  $g$ -фактора і ширини сигналів ЕПР [4].

На підставі цих даних можна припустити, що в інтервалі температури 100–300 °С природа парамагнітних центрів, які зумовлюють сигнал ЕПР, зберігається, а за температури вище 300 °С є генерація нових парамагнітних центрів, пов'язаних з вигоранням органічної матриці емалі. З огляду на ці припущення можна вважати (див. рис. 2), що під час відпалювання взірців кількість радикалів  $R_n$  в емалі зубів визначена кривою 1, а кількість центрів, пов'язаних з вигоранням органіки, – кривою 2.

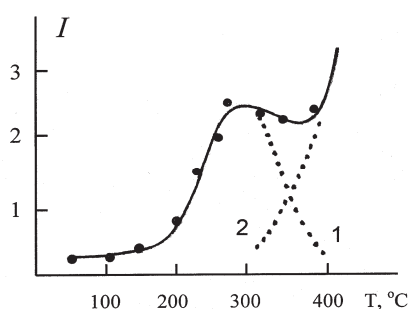


Рис. 2. Вплив відпалювання на інтенсивність нативного сигналу ЕПР у неопроміненій емалі. Крива 1 відповідає радикалам  $R_n$ , крива 2 – радикалам, що формуються під час вигорання органіки.

Механізми формування нативних радикалів у мінералізованих біологічних тканинах пов'язані з процесами життєдіяльності біологічного об'єкта. Ці механізми можна пояснити за допомогою такої схеми:



де  $R_o$  означає фрагмент органічної матриці, який унаслідок процесів життєдіяльності або зовнішніх чинників здатний втратити електрон ( $e^-$ ), перейти в парамагнітний стан  $R_n$  та, відповідно, сформувати нативні радикали.

Дослідження впливу гамма-опромінення на кількість радикалів  $R_n$  в емалі зубів виявляється утрудненим, оскільки після опромінення в магнітних полях, у яких перебувають сигнали ЕПР від радикалів  $R_n$ , з'являються інтенсивніші сигнали, зумовлені радикалами  $\text{CO}_2^-$ . Отже, питання про вплив гамма-опромінювання на кількість радикалів  $R_n$  в емалі зубів є відкритим. Зовнішнє гамма-опромінення може впливати на кількість радикалів  $R_n$  побічно, оскільки воно веде до інтенсифікації біостимульованих процесів окиснення, унаслідок яких формуються вільні радикали. Водночас на підставі експериментальних даних можна зробити висновок, що вплив гамма-опромінювання на радикали  $R_n$  принаймні більш ніж на порядок слабше, ніж на радикали  $\text{CO}_2^-$ , за допомогою яких виконують реконструкцію дозових навантажень.

Вплив ультрафіолетового випромінювання на сигнали ЕПР порошкоподібних взірців емалі достатньо складний. Ультрафіолетове випромінювання ефективно продукує різні органічні парамагнітні радикали, які мають широкі сигнали ЕПР. Відділити сигнали ЕПР від радикалів  $R_n$  на тлі цих широких сигналів виявилось важко. Проте стабільність парамагнітних органічних радикалів, продукованих ультрафіолетом, невелика, і протягом декількох днів інтенсивність відповідних сигналів ЕПР значно зменшується. Можна припустити, що ультрафіолетове випромінювання призводить до розриву хімічних зв'язків в органічній матриці емалі й, відповідно, до утворення вільних радикалів, які формують сигнали ЕПР.

Оскільки стабільні сигнали ЕПР, зумовлені радикалами  $R_n$ , характерні для високомінералізованих біологічних тканин, то можна зробити висновок, що стабільні радикали  $R_n$  формуються в тих фрагментах органічних макромолекул, які асоційовані з мінеральними наночастинками цих тканин.

Ми вважаємо, що кількість радикалів  $R_n$  у мінералізованих біологічних тканинах відображає ступінь дефектності (кількість розірваних хімічних зв'язків) органічних макромолекул, асоційованих з мінеральною компонентою. Відповідно, ступінь дефектності макромолекул органічної матриці емалі та кісток визначений станом і захворюваннями

цих біологічних тканин, а це дає змогу використовувати ЕПР нативних радикалів для вивчення механізмів захворювань емалі зубів і кісток.

**Властивості радіаційно-стимульованих карбонатних радикалів.** Після опромінення взірців емалі рентгенівськими або гамма-променями в цих взірцях можна зареєструвати сигнали ЕПР, зумовлені радикалами  $\text{CO}_2^-$  [1, 4]. Вигляд типового сигналу ЕПР у порошкоподібних взірцях емалі після її опромінення рентгенівськими променями показаний на рис. 3. Сигнали ЕПР від  $\text{CO}_2^-$ -радикалів наявні в усіх опроміненіх біомінералах, а також у всіх типах синтетичного карбонатапатиту. Радикали  $\text{CO}_2^-$  продуковані у зазначених вище матеріалах різними видами випромінювань, у тім числі гамма-променями, рентгенівськими променями та електронами.

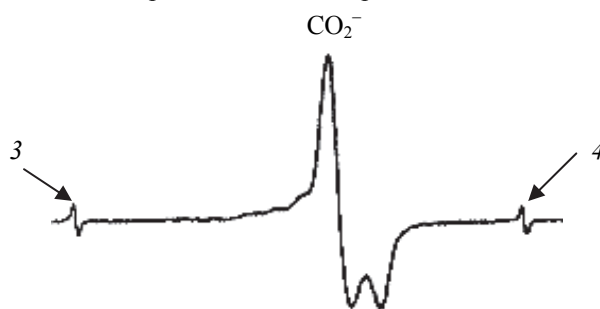
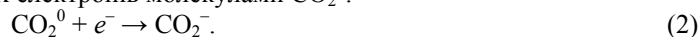


Рис. 3. Сигнал ЕПР у порошкоподібному взірці емалі, опроміненої гамма-променями. Цифрами 3 і 4 позначено лінії еталонного взірця ( $\text{MgO:Mn}^{2+}$ ).

Спектр, зображений на рис. 3, в першому наближенні можна описати аксіальним  $g$ -тензором, перпендикулярна та паралельна компоненти якого такі:  $g_{\perp} = 2,0035 \pm 0,0005$ ,  $g_{\parallel} = 1,9974 \pm 0,0005$ . Радикали  $\text{CO}_2^-$  утворюються під час опромінення емалі головню завдяки захопленню електронів молекулами  $\text{CO}_2$ , локалізованими на поверхні та всередині нанокристалів мінеральної компоненти емалі. Залежно від місця розташування радикали  $\text{CO}_2^-$  мають різні властивості. Більшість  $\text{CO}_2^-$ -радикалів в емалі зубів сформована захопленням вторинних електронів молекулами  $\text{CO}_2^0$ :



Інший можливий механізм утворення  $\text{CO}_2^-$ -радикалів відповідає відриванню протонів з карбоксильних груп амінокислот під час опромінювання емалі. За дуже великих доз опромінення можливі також інші механізми формування  $\text{CO}_2^-$ -радикалів.

Зазначимо про унікально високу радіаційну чутливість (радіаційний вихід) емалі зубів. Сигнали ЕПР від  $\text{CO}_2^-$ -радикалів можна зареєструвати в емалі після опромінення взірців дозами в діапазоні  $(15-30) \cdot 10^{-2}$  Грей, що є унікальним для ЕПР-спектроскопії. Такий унікально високий радіаційний вихід емалі зумовлений, очевидно, двома чинниками. По-перше, це висока ефективність продукування вторинних електронів органічною матрицею емалі під дією гамма-, рентгенівського або ультрафіолетового випромінювання; по-друге, перетин захоплення вторинних електронів передцентрами  $\text{CO}_2^-$ -радикалів порівняно з іншими пастками вторинних електронів є дуже великим. Відповідно, основну масу вторинних електронів, створених іонізуювальним випромінюванням, захоплюють саме передцентри  $\text{CO}_2^-$ -радикалів, що й зумовлює високий радіаційний вихід емалі зубів.

Наведені чинники виникають завдяки унікальній внутрішній структурі емалі зубів, яка на 95–96 % представлена нанокристалами гідроксилапатиту, відокремленими один

від одного нанорозмірними водно-органічними прошарками. Саме наявність водно-органічних прошарків забезпечує високу ефективність продукування вторинних електронів в емалі зубів. Мала товщина цих прошарків сприяє тому, що вторинні електрони не розсіюються (не захоплюються) в органічних прошарках, а локалізуються на передцентрах  $\text{CO}_2^-$ -радикалів, розташованих поблизу поверхні нанокристалів гідроксилапатиту.

Підтвердженням описаної вище моделі продукування  $\text{CO}_2^-$ -радикалів слугують такі експериментальні факти. Відомо, що дентин, а також міжклітинну речовину кісткової тканини теж можна трактувати як нанокристали гідроксилапатиту, які занурені в органічну матрицю [3]. Проте в дентині й кістках органічна компонента становить близько 15–20 і 35–50 % їхньої маси, відповідно. Як зазначено вище, радіаційний вихід  $\text{CO}_2^-$ -радикалів у дентині й у кістках менший, ніж в емалі. У цьому разі зменшення радіаційного виходу в дентині й кістках, порівняно з емаллю, виявляється приблизно пропорційним до співвідношення кількості органічної компоненти в цих високомінералізованих тканинах. Збільшення товщини органічних прошарків, що розділяють нанокристали гідроксилапатиту в дентині й кістці, призводить до розсіяння і захоплення електронів у цих прошарках.

Сигнал, зображений на рис. 3, є суперпозицією сигналів від різних груп  $\text{CO}_2^-$ -радикалів, локалізованих у різних підсистемах емалі зубів. Ці різні групи  $\text{CO}_2^-$ -радикалів мають достатньо близькі, проте не однакові значення компонент  $g$ -тензора. Також різною є стабільність  $\text{CO}_2^-$ -радикалів, локалізованих у різних підсистемах емалі зубів. Цей факт засвідчує, що в емалі зубів є декілька груп передцентрів, які локалізовані в різних підсистемах емалі. Відповідно, радіаційні дефекти, сформовані з різних груп передцентрів, також матимуть різну стабільність. Залежність кількості радіаційних дефектів  $i$ -го типу від часу  $N_i(t)$  (після опромінення емалі та формування відповідних дефектів) можна визначити такими формулами:

$$N_i(t) = N_{o,i} \exp(-t_o / \tau_i); \quad (3)$$

$$1 / \tau_i = \nu_i \exp(-E_i / kT), \quad (4)$$

де  $N_{o,i}$  – кількість радіаційних дефектів  $i$ -го типу одразу після опромінення;  $t_o$  – час, який минув після опромінення;  $\tau_i$  – час життя радіаційних дефектів за температури  $T$ . Значення  $E_i$  та  $k$  у формулі (4) відповідають глибині потенціальної ями, у якій локалізований неспарений електрон, та сталій Больцмана. Значення  $E_i$  та  $\tau_i$  можна визначити експериментально за допомогою відпалювання взірців за різної температури протягом різного інтервалу часу.

Дозові навантаження емалі зубів визначають за допомогою радіаційно-стимульованих радикалів  $\text{CO}_2^-$ . Наголосимо, що температурна стабільність різних груп  $\text{CO}_2^-$ -радикалів є неоднаковою. Результати експериментальних досліджень, що характеризують кінетику розпаду  $\text{CO}_2^-$ -радикалів в емалі зубів під впливом відпалювання за різної температури, показано на рис. 4. На підставі даних, відображених на рис. 4, можна зробити висновок, що в емалі зубів є декілька груп  $\text{CO}_2^-$ -радикалів, які мають суттєво різну температурну стабільність. За допомогою цих експериментів можна визначити як величину  $N_{o,i}$  – кількість радіаційних дефектів, що відповідають  $i$ -й групі, так і величину  $\tau_i$ , яка фігурує в формулах (3), (4). Різні групи радикалів  $\text{CO}_2^-$ , що мають різну стабільність, локалізовані в водно-органічній матриці емалі, а також на поверхні та всередині нанокристалів. Для достовірної реконструкції дозових навантажень необхідно зіставити час життя радіаційних центрів  $\tau_i$ , який фігурує в формулах (3), (4), з часом  $t_o$ , який минув з моменту опромінення людини до початку процедури реконструкції дози. Для достові-

рної реконструкції доз потрібно виконання умови  $\tau_i \gg t_0$ . Якщо ця умова не виконується, то необхідно ввести відповідні корекції. Отже, застосування формул (3), (4), які описують кінетику розпаду радіаційних дефектів, дає змогу розширити можливості ретроспективної дозиметрії та розробляти кінетичні методи реконструкції дозових навантажень.

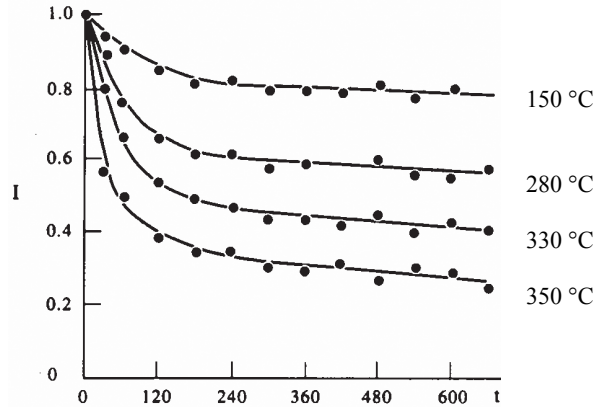


Рис. 4. Кінетика розпаду  $\text{CO}_2^-$ -радикалів в емалі зубів за різної температури відпалювання. По осі абсцис – час відпалювання, хв, по осі ординат – інтенсивність сигналів.

**Вплив властивостей  $R_n$  і  $\text{CO}_2^-$ -радикалів та результати ретроспективної дозиметрії.** Опромінення продукує в емалі зубів багато різних типів радіаційних дефектів [1, 4, 5]. Для більшості цих дефектів фактор спектроскопічного розщеплення ( $g$ -фактор) дорівнює приблизно двом ( $g \approx 2,0$ ). Однак, крім сигналів ЕПР від радіаційних центрів, в інтервалі  $g \approx 2,0$  реєструють також сигнали ЕПР від нативних радикалів  $R_n$ , які мають нерадіаційну природу. Наявність нерадіаційних сигналів ЕПР робить процедуру реконструкції доз нетривіальною та потребує отримання детальної інформації про різні характеристики сигналів ЕПР, що реєстровані поблизу  $g \approx 2,0$ . Якщо дози опромінення емалі невеликі (до 1 Грей), то, зазвичай, в емалі зубів домінують сигнали ЕПР від нерадіаційних нативних радикалів та від радикалів  $\text{CO}_2^-$ , які мають радіаційну природу. Вигляд сигналу ЕПР від такого типу взірців показано на рис. 5.

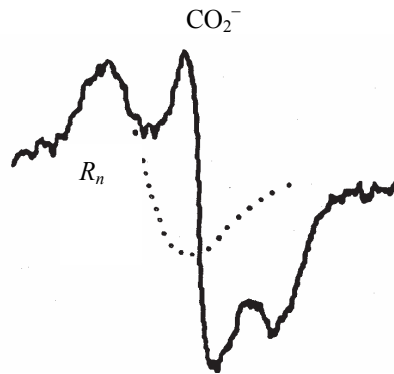


Рис. 5. Спектр ЕПР емалі зубів, зумовлений нативними радикалами  $R_n$  і радіаційно-стимульованими радикалами  $\text{CO}_2^-$ .

Доза опромінення взірця становить 0,2 Грей. Точкова лінія відображає частину сигналу ЕПР від радикалів  $R_n$ , яку перекриває сигнал ЕПР від радіаційних центрів.

Як бачимо, сигнал ЕПР від нерадіаційних радикалів  $R_n$  перешкоджає реконструкції дозових навантажень, яку виконують за допомогою радіаційних сигналів від  $\text{CO}_2^-$ -радикалів. Для збільшення достовірності результатів ретроспективної дозиметрії і зниження порогу доз, які можна реконструювати за допомогою емалі зубів, потрібна детальна інформація про властивості сигналів, що формуються як нативними, так і  $\text{CO}_2^-$ -радикалами.

Оскільки наявність сигналів ЕПР від радикалів  $R_n$  збільшує значення порогових доз, то одним з важливих завдань ретроспективної дозиметрії є зменшення внеску нативних радикалів  $R_n$  у сумарний сигнал ЕПР, який використовують для реконструкції доз. Відповідно, виникає потреба в розробці способів, що дають змогу зменшити інтенсивність фонових сигналів, зумовлених нативними радикалами. Оскільки дентин має інтенсивніші фонові сигнали, ніж емаль, то в процесі приготування проб потрібне ретельне відділення емалі від дентину. Крім того, під час приготування проб за допомогою стоматологічного інструменту необхідно унеможливити локальне нагрівання взірців, оскільки, згідно з рис. 2, за  $T > 150^\circ\text{C}$  відбувається збільшення інтенсивності фонового сигналу ЕПР.

Під час вирішення завдань ретроспективної дозиметрії важливе значення має співвідношення інтенсивності сигналів ЕПР від нативних радикалів  $R_n$  та від радіаційно-стимульованих радикалів  $\text{CO}_2^-$ . Це співвідношення можна змінювати, якщо сигнали ЕПР реєструвати за різних рівнів мікрохвильової потужності. На рис. 6 зображено залежність інтенсивності сигналів ЕПР від нативних радикалів  $R_n$  та радіаційно-стимульованих радикалів  $\text{CO}_2^-$ . Оскільки час спін-граткової релаксації нативних радикалів та радикалів  $\text{CO}_2^-$  не однаковий, то криві насичення сигналів ЕПР від цих двох радикалів різні. За великих значень потужності мікрохвильового поля сигнал ЕПР від радикалів  $R_n$  насичується, що призводить до зменшення інтенсивності сигналу. Водночас сигнал від радикалів  $\text{CO}_2^-$  не виявляє насичення, і його інтенсивність збільшується в разі збільшення мікрохвильової потужності. Відповідно, у випадку збільшення мікрохвильової потужності внесок радикалів  $R_n$  у сумарний сигнал ЕПР зменшується.

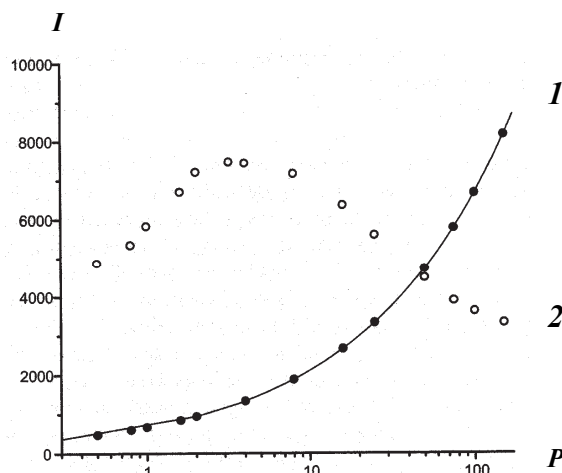


Рис. 6. Криві насичення сигналів ЕПР в емалі зубів.

Крива 1 відповідає нативним радикалам  $R_n$ , крива 2 – радикалам  $\text{CO}_2^-$ . По осі абсцис – потужність мікрохвильового поля  $P$ , мВт.

На підставі даних експерименту можна зробити висновки, що оптимальна потужність, за якої треба реєструвати сигнали ЕПР в емалі зубів під час вирішення завдань ретроспективної дозиметрії, дорівнює приблизно 50 мВт.

У разі захворювання зубів на карієс інтенсивність сигналів ЕПР, зумовлених радикалами  $R_n$ , збільшується. Ми з'ясували, що інтенсивність сигналів ЕПР, які зумовлені радикалами  $R_n$ , у взірцях емалі, ураженої карієсом, у два–три рази більша, ніж інтенсивність у відповідних взірцях здорової емалі. Для взірців, які були сумішшю проб, отриманих з декількох зубів, співвідношення інтенсивності сигналів у разі карієсу та в здоровій емалі дорівнювало  $2,5 \pm 0,3$ . Характерні сигнали ЕПР від нативних радикалів у здоровій емалі та емалі, ураженій карієсом, показано на рис. 7.

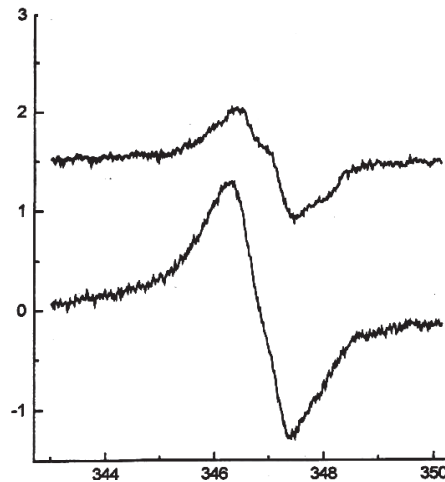


Рис. 7. Вигляд сигналів ЕПР, зумовлених нативними радикалами у здоровій емалі (верхня крива) та емалі, ураженій карієсом (нижня).

По осі абсцис – значення індукції магнітного поля  $B$ , мТл, по осі ординат – інтенсивність сигналів ЕПР  $I$ , відносні одиниці.

Отже, у разі захворювань емалі змінюються властивості не тільки мінеральної, а й органічної компоненти. Можна припустити, що в разі захворювань емалі на карієс зміни в органічній компоненті є первинними і спричиняють вторинні зміни в мінеральній компоненті. Оскільки інтенсивність ЕПР сигналів від радикалів  $R_n$  в емалі, ураженій карієсом, зростає, то це знижує можливості ретроспективної дозиметрії.

Карієс та процеси метаболізму можуть впливати також на характеристики радіаційно-стимульованих карбонатних радикалів  $\text{CO}_2^-$  і зменшувати їхній час життя відповідно до формул (3), (4). Для збільшення достовірності результатів ретроспективної дозиметрії в ході реконструкції дозових навантажень за допомогою емалі, яка зазнала впливу карієсу, необхідно використовувати тільки радикали  $\text{CO}_2^-$ , які мають високу стабільність. Відповідно до рис. 4, виділення сигналів від стабільних радикалів  $\text{CO}_2^-$  можна виконати прогріванням взірців за  $T \approx 150^\circ\text{C}$ . Важливо, що за такої температури, відповідно до рис. 2, ще не відбувається значне збільшення сигналів від нативних радикалів. Тому внесок стабільних радикалів  $\text{CO}_2^-$  у сумарний сигнал ЕПР треба виділяти з урахуванням описаної вище кінетики розпаду парамагнітних радикалів  $\text{CO}_2^-$  за різної температури відпалювання, а також процесів генерування радикалів  $R_n$  під час відпалювання взірців.



Важливу роль у виділенні сигналів від стабільних радикалів відіграють також ефекти анізотропії сигналів ЕПР, які описані в праці [1].

Отже, інформація про діапазон температур, за яких збільшуються сигнали ЕПР від нативних радикалів  $R_n$ , наявність декількох груп радикалів  $CO_2^-$  з різною термостабільністю та неоднакову залежність інтенсивності сигналів ЕПР, зумовлених радикалами  $R_n$  та  $CO_2^-$ , від потужності мікрохвильового поля є дуже важливою для вдосконалення методів ретроспективної дозиметрії. Наведена інформація про властивості нативних радикалів  $R_n$  і радіаційно-стимульованих радикалів  $CO_2^-$  сприяє успішному вирішенню прикладних завдань, пов'язаних з реконструкцією доз опромінення, які людина отримала в минулому. Ця інформація має важливе значення для вирішення фундаментальних проблем біомінералогії, оскільки емаль зубів є найбільш мінералізованою біологічною тканиною, та, відповідно, вивчення саме цього біомінералу важливе для вирішення проблем, пов'язаних з механізмами взаємодії органічної і мінеральної матерії в біомінералах. Інформація про механізми формування нативних радикалів  $R_n$ , а також місця локалізації і стабільність радіаційно-стимульованих радикалів  $CO_2^-$  слугує науковою основою для розвитку нових підходів у ретроспективній ЕПР дозиметрії. Підвищення достовірності результатів ретроспективної ЕПР дозиметрії, а також розширення кола ситуацій, для яких можна використати цю методику, мають важливе значення для вирішення екологічних і соціальних проблем, пов'язаних з атомною енергетикою, а також зі щораз більшим використанням радіонуклідів у науці й техніці. Інформація про характеристики сигналів ЕПР емалі зубів також потрібна для розробки методів і технічних приладів, які дають змогу реконструювати дозу опромінення без вилучення зубів з організму людини.

1. Анизотропия сигналов ЭПР в биогенном апатите эмали зубов и проблемы ретроспективной дозиметрии / В. В. Радчук, А. Б. Брик, А. П. Клименко, О. И. Щербина // *Мінерал. журн.* – 2008. – Т. 30, № 1. – С. 41–47.
2. Брик А. Б. Ретроспективная инструментальная дозиметрия / А. Б. Брик, В. В. Радчук // *Природа.* – 1994. – № 2. – С. 3–11.
3. Кораго А. А. Введение в биомінералогію / А. А. Кораго. – СПб. : Недра, 1992. – 280 с.
4. Радчук В. В. Свойства нативных и радиационно-стимулированных радикалов в эмали зубов и проблемы ретроспективной ЭПР дозиметрии / В. В. Радчук, А. Б. Брик // *Мінерал. журн.* – 2006. – Т. 28, № 4. – С. 21–31.
5. Metabolism in tooth enamel and reliability retrospective EPR dosimetry connected with Chernobyl accident / A. Brik, V. Radchuk, O. Scherbina [et al.] // *Radiological consequences Chernobyl accident* / [Ed. A. Karaoglou]. – Brussels : Europ. Commiss., 1996. – P. 1055–1058.
6. Retrospective dosimetry and dose reconstruction. Experimental collaboration project No 10 / [Ed. I. Bailiff, V. Stepanenko]. – Brussels : Europ. Commiss., 1996. – 115 p.
7. Use electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. IAEA-TECDOC-1331. – Vienna : IAEA, 2002. – 57 p.

**PROPERTIES OF PARAMAGNETIC RADICALS,  
LOCALIZED IN DENTAL ENAMEL,  
AND AUTHENTICITY OF RETROSPECTIVE EPR-DOSIMETRY RESULTS**

*Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU  
Chokolivskyi Boulevard 13, UA – 03186 Kyiv, Ukraine  
E-mail: itc\_nasu@ukr.net*

The radiospectroscopic properties of tooth enamel which have the most essential effect on the results of the retrospective dosimetry, based on the electron paramagnetic resonance, are described. The main attention was given to native radicals of a non-radiation nature but they essentially affect the doze reconstruction procedure. Attention was also spared to carbonate radiation-induced radicals by means of which dose loading in humans is determined. The effect of various factors on reliability of retrospective dosimetry results was analyzed.

*Key words:* biogenic minerals, retrospective dosimetry, paramagnetic resonance, enamel of teeth, native radicals, dose reconstruction.

**СВОЙСТВА ПАРАМАГНИТНЫХ РАДИКАЛОВ,  
ЛОКАЛИЗОВАННЫХ В ЗУБНОЙ ЭМАЛИ, И ДОСТОВЕРНОСТЬ  
РЕЗУЛЬТАТОВ РЕТРОСПЕКТИВНОЙ ЭПР-ДОЗИМЕТРИИ**

**В. Радчук**

*Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАНУ  
03186 г. Киев, Чоколовский бульвар, 13  
E-mail: itc\_nasu@ukr.net*

Описано радиоспектроскопические свойства эмали зубов, которые наиболее существенно влияют на результаты ретроспективной дозиметрии, основанной на электронном парамагнитном резонансе. Главное внимание уделено нативным радикалам, которые имеют нерадиационную природу, но существенно влияют на процедуру реконструкции доз. Проанализировано влияние различных факторов на достоверность результатов ретроспективной дозиметрии.

*Ключевые слова:* биогенные минералы, ретроспективная дозиметрия, парамагнитный резонанс, эмаль зубов, нативные радикалы, реконструкция доз облучения.

Стаття надійшла до редколегії 12.04.2012

Прийнята до друку 29.05.2012