

УДК 549.514.51:577.346:543.429.2

ВЛАСТИВОСТІ РАДІАЦІЙНИХ ЦЕНТРІВ В КВАРЦІ, ЩО НАЙБІЛЬШ СУТТЄВО ВПЛИВАЮТЬ НА МЕТОДИКИ РЕТРОСПЕКТИВНОЇ ЕПР ДОЗИМЕТРІЇ

*В.В. Радчук, канд. геол.-мін. наук
(Інститут телекомунікацій та глобального
інформаційного простору НАН України);
О.Б. Брик, д-р фіз.-мат. наук, проф.
(Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення
ім. М.П. Семененка НАН України)*

Описані особливості властивостей радіаційно-активованих парамагнітних центрів в кварці, які найбільш суттєво впливають на методики ретроспективної дозиметрії, основані на електронному парамагнітному резонансі. Основну увагу приділено алюмінієвим центрам, які пов'язані з ізоморфним заміщенням іону Si^{4+} на іон Al^{3+} в структурі кварцу. Описано механізми формування, а також спектроскопічні, магнітоелектричні та радіаційні характеристики парамагнітних центрів, які є важливими для розробки нових підходів до реконструкції дозових навантажень кварцу. Приведено результати апробації отриманих результатів для реконструкції дозових навантажень кварцу приуроченому до зони аварії на Чорнобильській атомній електростанції.

Описаны особенности свойств радиационно-активированных парамагнитных центров в кварце, которые наиболее существенно влияют на методики ретроспективной дозиметрии, основанной на электронном парамагнитном резонансе. Основное внимание уделено алюминиевым центрам, которые связаны с изоморфным замещением иона Si^{4+} на ион Al^{3+} в структуре кварца. Описано механизмы формирования, а также спектроскопические, магнитоэлектрические и радиационные характеристики

© В.В. Радчук, О.Б. Брик, 2011

парамагнитных центров, которые являются важными для разработки новых подходов к реконструкции дозовых нагрузок кварца. Приведены результаты апробации полученных результатов для реконструкции дозовых нагрузок кварца приуроченного к зоне аварии на Чернобыльской атомной электростанции.

The special properties of radiation-activated paramagnetic centers in quartz that are most important for retrospective dosimetry based on electron paramagnetic resonance. The basic attention were devoted to aluminum centers, which connected with isomorphic substitution of Si^{4+} ions by Al^3 ions in the quartz structure. The formation mechanism, spectroscopic, magnetoelectric and radiation characteristics of the paramagnetic centers those are most important for development of new approaches for reconstruction of dose loading of quartz. The results related to approbation of the obtained results for dose reconstruction of quartz from area of Chernobyl accident have been described.

1. Вступ

Ретроспективна дозиметрія є важливим розділом радіаційної мінералогії, яка досліджує відгук мінералів на радіаційне опромінення. За допомогою ретроспективної дозиметрії, вивчаючи кількість та тип радіаційних пошкоджень в мінералах та біомінералах, можна визначити дозу опромінювання, яку отримали в минулому об'єкти довкілля або людина [1, 2]. Ретроспективна дозиметрія сприяє вирішенню багатьох геологічних, екологічних та медичних проблем, обумовлених неконтрольованим антропогенним радіаційним впливом на оточуюче середовище, технічні об'єкти та на людину.

Відомо, що найбільш поширеними та найбільш ефективними мінералами та біомінералами, за допомогою яких проводять реконструкцію дозованих навантажень, є кварц і емаль зубів [1, 2]. За допомогою кварцу реконструюють дозові навантаження місцевості та технічних об'єктів, а за допомогою емалі зубів дозові навантаження людини. При вирішенні задач ретроспективної дозиметрії кількість радіаційних дефектів у матеріалі дозиметра визначають за допомогою різних експериментальних методів. Одним з найефективніших методів, за допомогою якого реконструюють дозові навантаження об'єктів, що досліджуються, є метод електронного парамагнітного резонансу.

нансу [3]. Для отримання достовірних результатів, пов'язаних з реконструкцією доз, необхідно мати детальну інформацію про властивості радіаційних дефектів в матеріалах, які використовуються в якості дозиметра.

Незважаючи на великий обсяг досліджень, присвячених ретроспективній дозиметрії [2, 4–8], багато важливих питань в цій області знань залишаються не з'ясованими. Це ускладнює вирішення прикладних задач, пов'язаних з техногенною безпекою і екологічним моніторингом середовища, а також знижує достовірність результатів ретроспективної дозиметрії. Для напрацювання нових підходів в ретроспективній дозиметрії необхідна детальна інформація про природу, механізми формування, місця локалізації, стабільність та інші характеристики радіаційних дефектів у матеріалі дозиметра.

Метою даної роботи є аналіз основних принципів ретроспективної ЕПР дозиметрії, дослідження властивостей радіаційно-активованих парамагнітних центрів в кварці, а також наведення прикладів застосування інформації про властивості радіаційних центрів в кварці для реконструкції дозових навантажень об'єктів із зони аварії на Чорнобильській атомній електростанції.

2. Основні принципи ретроспективної дозиметрії

Основні принципи та ідеї ретроспективної дозиметрії полягають в наступному [1, 2, 4]. Ретроспективна дозиметрія ґрунтується на припущенні, що під дією радіаційного опромінення в досліджуваному матеріалі дозиметра формуються радіаційні дефекти, кількість яких є функцією дози опромінення. Вважають також, що інтенсивність сигналів застосованого інструментального методу є пропорційною кількості радіаційних дефектів у матеріалі дозиметра. Після визначення інтенсивності сигналу в вихідних зразках, проводять лабораторне доопромінення матеріалу дозиметра та будують калібрувальну криву. Апроксимуючі цю криву до перетинання з віссю абсцис знаходять дозу, що отримав матеріал дозиметра в минулому. Описані вище принципи ретроспективної дозиметрії проілюстровано за допомогою рис. 1.

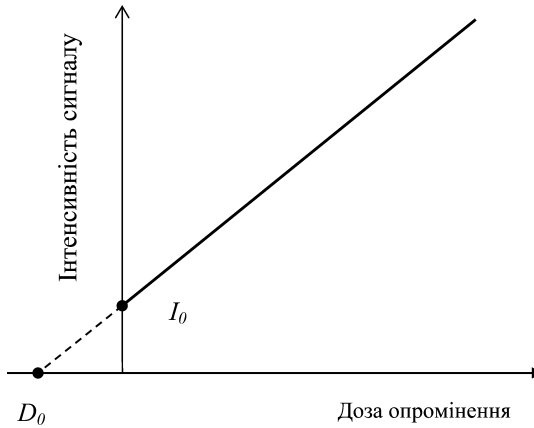


Рис. 1. Схема, що ілюструє методику реконструкції доз в ретроспективній дозиметрії.

В найпростішому випадку залежність інтенсивності сигналу, який реєструється за допомогою того чи іншого методу, від дози опромінення $I(D)$ можна апроксимувати формулою

$$I(D) = I_0 + k \cdot D, \quad (1)$$

де D — доза опромінення матеріалу дозиметра, k — коефіцієнт пропорційності, який визначає радіаційну чутливість (радіаційний вихід) матеріалу дозиметра, I_0 — інтенсивність сигналу у вихідних зразках, тобто в зразках до лабораторного опромінення. Якщо використовується метод ЕПР, то I_0 відповідає інтенсивності сигналу ЕПР. Після визначення I_0 зразки декілька разів опромінюють на каліброваних джерелах гамма-випромінювання і знову реєструють сигнали ЕПР. На підставі даних експерименту будують залежність величини $I(D)$ від дози лабораторного опромінення (суцільна лінія на рис. 1). Потім припускають, що

$$I_0 = k_0 \cdot D_0, \quad (2)$$

де D_0 — доза опромінення, яку матеріал дозиметра отримав у минулому. Припускають також, що $k = k_0$. Після цих припу-

щень суцільну лінію на рис. 1 апроксимують до перетину з віссю абсцис і знаходять дозу D_0 , тобто дозу яку матеріал дозиметра отримав в минулому.

Таким чином основні припущення ретроспективної дозиметрії полягають в наступному: інтенсивність сигналів ЕПР пропорційна дозі опромінення (1), парамагнітні радіаційні дефекти стабільні в часі (2), процедура приготування проб не впливає на кількість радіаційних центрів в матеріалі дозиметру (3). Для обґрунтування цих припущень, та для отримання достовірних результатів, необхідно мати детальну інформацію про властивості радіаційних центрів в матеріалі дозиметру. Ця інформація важлива також для розробки нових підходів в ретроспективної дозиметрії, для збільшення чутливості методів реконструкції доз, для підвищення достовірності отриманих результатів та для розширення кола інформації, яка може бути отримана за допомогою ретроспективної дозиметрії.

3. Структура та властивості радіаційно-активованих центрів у кварці

Для реконструкції дозових навантажень будівельних споруд, технічних об'єктів та довкілля використовують в основному кварц. Важливою є ситуація, коли кварц виділяють з різних будівельних матеріалів, наприклад, з цеглини або черепиці. Специфіка цих об'єктів полягає в тому, що в результаті технологічних операцій під час виготовлення вищезгаданих будівельних матеріалів вони піддаються високотемпературному відпалу. Під дією цього відпалу радіаційно-активовані парамагнітні центри (за допомогою яких реконструюють дозу) переходять в непарамагнітний стан. Відповідно, можна сказати, що свідчення такого матеріалу-дозиметра автоматично виставляються на нульові показники.

Структуру та властивості радіаційних дефектів в кварці, що використовуються для реконструкції доз, зручно пояснити за допомогою структури, яка зображена на рис. 2. Ця структура являє собою завити у спіралі SiO_4 тетраедри [9]. Ці тетраедри є спотвореними оскільки довжина хімічних зв'язків Si-O у тетраедрах (короткі та довгі) для двох пар іонів кисню є не однаковими [9].

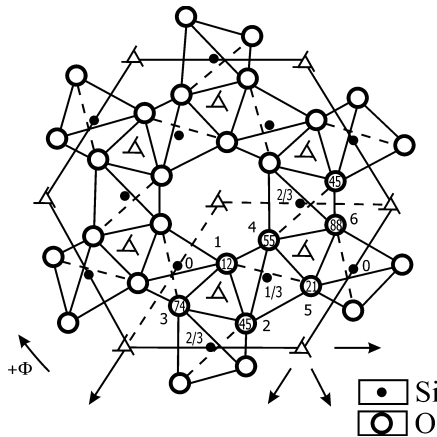


Рис. 2. Структура високотемпературного альфа-кварцу.

Найбільш важливі радіаційні дефекти, що можуть бути зареєстровані в кварці за допомогою ЕПР, пов'язані з ізоморфним заміщенням іона Si^{4+} на іони Al^{3+} , Ti^{4+} , Ge^{4+} , а також з вакансіями кисню. Під впливом опромінення зазначені дефекти структури кварцу захоплюють або втрачають електрони та переходять в парамагнітний стан, що дозволяє визначати кількість цих радіаційно-активованих центрів за допомогою ЕПР.

Найпоширенішою ізоморфною домішкою в кварці, яка під дією опромінення формує парамагнітний центр, є іон Al^{3+} , який заміщує кремній в SiO_4 тетраедрі. При цьому компенсація електричного заряду здійснюється за рахунок лужних іонів (наприклад іону Li^+), які локалізуються поруч з AlO_4 тетраедром. Відповідний парамагнітний центр Al-O^- є найпоширенішим радіаційним центром в опромінених синтетичних і природних зразках кварцу [9]. Його утворення можна представити як втрату електрона іоном кисню, сусіднім з іоном Al^{3+} , що замістив іон Si^{4+} у вузлі решітки. При цьому лужний іон-компенсатор дифундує від дефектного тетраедру і захоплюється на інших дефектах кристалу. За достатньо низької температури (77 К і нижче), за якої ми спостерігали ці центри, вони перебувають в основному стані, коли дірка локалізується лише на двох з чотирьох іонів кисню, що мають велику довжину

зв'язку в AlO_4 -тетраедрі [9]. Таким чином, в структурі кварцу є шість структурно нееквівалентних положень для центрів Al-O^- , зв'язаних з трьома нееквівалентними тетраедрами, що входять до складу елементарної комірки кварцу.

Спектр ЕПР Al-O^- центру в кварці можна описати аксіальним тензором спектроскопічного розщеплення (g -тензором). Паралельна та перпендикулярна компоненти g -тензора алюмінієвого центру дорівнюють $g_{\parallel} = 2.0589 \pm 0.0005$, $g_{\perp} = 1.9987 \pm 0.0005$ [9]. Неспарений електрон алюмінієвого центру взаємодіє з магнітним ядром ^{27}Al , який має поширеність 100% та ядерний спіни $I = 5/2$. Ця взаємодія призводить до розщеплення резонансних ліній. На рис. 3 зображено спектр ЕПР алюмінієвих центрів у порошкоподібних зразках кварцу.

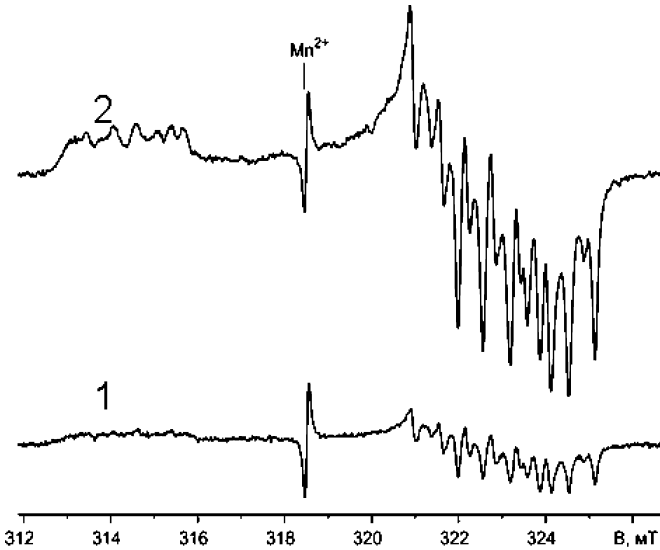


Рис. 3. Вигляд спектрів ЕПР Al-O^- центрів в порошкоподібних зразках кварцу, опромінених гама-променями дозою 0,5 Гр (спектр 1) та 2,0 Гр (спектр 2) відповідно. Символ Mn^{2+} вказує сигнал ЕПР від еталонного зразка ($\text{MgO} : \text{Mn}^{2+}$). Вісь абсцис вказує величину магнітного поля у міліТеслах.

Компоненти спектра ЕПР алюмінієвого центру в кварці (рис. 3), що знаходяться ліворуч та праворуч від еталонного сигналу, відповідають паралельній та перпендикулярній компонентам g -тензора, а багатокомпонентність спектра обумовлена взаємодією неспареного електрона з магнітним ядром ^{27}Al .

У кварці вельми поширеною є ізоморфна домішка, що пов'язана з іоном Ti^{4+} у позиції кремнію (рис. 2). Ця домішка формує декілька електронних парамагнітних центрів, що мають радіаційне походження. Найпоширенішим серед них є парамагнітний центр $\text{Ti}^{3+}/\text{Li}^{+}$ з компенсатором Li^{+} . Спектр ЕПР титанових центрів у кварці може бути описаним тривісним тензором спектроскопічного розщеплення з компонентами $g_1 = 1.9789 \pm 0.0005$, $g_2 = 1.9309 \pm 0.0005$, $g_3 = 1.9119 \pm 0.0005$. На спектрах ЕПР титанових центрів фіксується також багатокомпонентна структура, яка обумовлена взаємодією неспареного електрона з ядрами іонів компенсаторів. Подібна ситуація має місце також для германієвого центру, який пов'язаний з ізоморфним заміщенням іона Si^{4+} на іон Ge^{4+} [9].

Для вирішення задач ретроспективної дозиметрії кварцу важливими також є центри, що пов'язані з вакансіями кисню в решітці кварцу. Ці електронні центри прийнято називати E -центрами [9]. Вигляд спектрів ЕПР таких центрів в зразках порошкоподібного кварцу наведено на рис. 4.

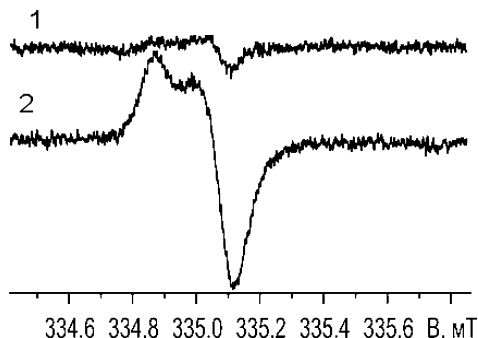


Рис. 4. Спектр ЕПР E -центру в порошкоподібних зразках кварцу, опромінених гамма променями дозою 2,0 Гр (спектр 1) та 8,0 Гр (спектр 2). Вісь абсцис вказує величину магнітного поля.

Ця група електронних центрів, званих *E*-центрами, має фактор спектроскопічного розщеплення, близький до *g*-фактора вільного електрона. Для найпростішого з таких центрів, *E*₁-центру, який є вакансією кисню, що захопила електрон, компоненти *g*-тензора дорівнюють $g_1 = 2.00173 \pm 0.00001$, $g_2 = 2.0046 \pm 0.0005$, $g_3 = 2.00024 \pm 0.0005$.

Відповідно до приведених вище даних про фактори спектроскопічного розщеплення, сигнали ЕПР від алюмінієвих і титанових центрів у кварці реєструють у різних магнітних полях. Інакше кажучи, спектри ЕПР цих центрів не перекриваються, що спрощує вирішення задач ретроспективної дозиметрії. Однак спектри ЕПР алюмінієвих центрів і електронних *E*-центрів, відповідно до значень факторів спектроскопічного розщеплення цих центрів, реєструються в однакових магнітних полях. Проте завдяки тому, що ширини сигналів ЕПР цих центрів істотно різні, то не зважаючи на перекриття, вплив радіації на сигнали ЕПР цих центрів можна аналізувати окремо. Крім того, алюмінієві центри можна зареєструвати тільки за температури рідкого азоту, а електронні *E*-центри можна реєструвати також і за кімнатної температури.

Важливу роль в ретроспективній дозиметрії грає кінетика накопичення парамагнітних центрів під впливом опромінення. Дослідження кінетики накопичення парамагнітних центрів дозволяє уточнити їх природу і структуру. Для розуміння кінетичних кривих накопичення парамагнітних центрів потрібні знання як прямих процесів, що призводять до утворення центрів, так і зворотних рекомбінаційних процесів. Нами досліджено процеси накопичення Al-O⁻ центрів у кварці. Встановлено, що кількість Al-O⁻ центрів зростає до доз порядку 10⁵ Гр, а потім має місце повільне зменшення кількості радіаційних центрів при збільшенні дози опромінення. Дозова залежність титанових та германієвих центрів має екстремум при дозах приблизно 10⁵ Гр, після якого кількість парамагнітних центрів при збільшенні дози опромінення стрімко зменшується. Дозові залежності для *E*-центрів суттєво залежать від радіаційної та термічної історії зразка та можуть бути суттєво не однаковими для різних ситуацій.

Нами знайдено та вивчено ефект незалежності радіаційного відгуку алюмінієвих центрів в кварці від концентрації домішок

алюмінію, а також встановлено критерії, що необхідні для наявності даного ефекту [8]. Сутність цього ефекту полягає в тому, що на початкової ділянці дозової кривої (до доз приблизно 200 Грей) радіаційний відгук алюмінієвих центрів в кварці є універсальним, тобто для зразків з різною кількістю домішкового алюмінію є однаковим. Нами показано, що цей ефект істотно спрощує процедуру реконструкції дозових навантажень та збільшує достовірність результатів ретроспективної дозиметрії [8].

Важливими характеристиками парамагнітних центрів є їх температурна стабільність і кінетика переходу в непарамагнітний стан, тобто кінетика відпалювання. Нами встановлено, що парамагнітні центри $Al-O^-$ ефективно переходять в непарамагнітний стан за температури відпалювання $T \approx 300^\circ C$, а центри Ti^{3+}/Li^+ за $T \approx 200^\circ C$. Таким чином, температурна стабільність титанових центрів є меншою в порівнянні з алюмінієвими центрами. Відповідно, титанові центри є менш вдалими для цілей ретроспективної дозиметрії в порівнянні з алюмінієвими центрами. Для E -центрів під час відпалювання за $T \approx 300^\circ C$ має місце збільшення кількості парамагнітних центрів, що обумовлено викиданням одного з двох електронів, які захоплюються під час опромінення вакансією кисню. Цей факт, завдяки одночасному вивченню як діркових $Al-O^-$, так і електронних E -центрів, може бути використаним для отримання детальної інформації про радіаційну історію об'єкта, що досліджується.

4. Застосування магнітоелектричних ефектів в кварці для цілей ретродозиметрії

Для більшості мінералів, а також твердих тіл взагалі, магнітні та електричні властивості являються незалежними. Тобто електричне поле впливає тільки на електричну поляризацію, а магнітне поле тільки на намагніченість та інші магнітні характеристики зразка. Але в деяких кристалах можливі так звані магнітоелектричні ефекти [9, 10]. Для таких кристалів за допомогою магнітних полів можна впливати на електричну поляризацію, а за допомогою електричних полів на магнітні характеристики. Одним з кристалів в якому можуть реалізуватися магнітоелектричні ефекти є кварц [9, 10].

Відомо, що за допомогою зовнішніх електричних полів, які діють на зразок кварцу під час реєстрації сигналів ЕПР від алюмінієвих центрів, можна суттєво впливати на інтенсивність сигналів ЕПР цих центрів [9, 10]. За допомогою зовнішніх змінних електричних полів можна приблизно на порядок збільшити інтенсивність сигналів ЕПР, обумовлених алюмінієвими цитрами. Крім дослідження впливу електричних полів на інтенсивність сигналів ЕПР, за допомогою електричних полів можна також визначати динамічні властивості парамагнітних центрів та уточнювати їхню структуру, а також вирішувати різні прикладні задачі. Нами показано, що магнітоелектричні ефекти, що реалізуються на алюмінієвих центрах в кварці, можна використовувати для вирішення задач ретроспективної дозиметрії.

Дослідження впливу змінного електричного поля на спектри ЕПР кварцу проводили в основному на центрах $Al-O^-$. Кінетика і механізм виявленого на них магнітоелектричного ефекту описані в роботах [9, 10]. Вплив змінного електричного поля на інтенсивність сигналів ЕПР від алюмінієвих центрів в кварці проілюстровано на рис. 5.

Як можна бачити з цього рисунка, електричне поле істотно збільшує інтенсивність сигналу ЕПР. Механізм розглянутих магнітоелектричних ефектів пов'язаний з тим, що алюмінієві центри в кварці володіють одночасно як магнітним, так і електричним дипольним моментами. При цьому електричне поле поляризує електричні диполі, що пов'язані з алюмінієвими центрами, а потім, завдяки магнітоелектричним (спін-орбітальним) взаємодіям поляризація електричних диполів може передаватися магнітним

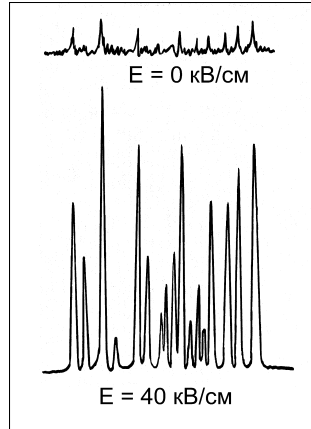


Рис. 5. Вплив електричного поля на інтенсивність сигналу ЕПР від алюмінієвих центрів в монокристалічному кварці. Верхній спектр зареєстровано за відсутності електричного поля, а нижній — під час дії на зразок змінного електричного поля з частотою 600 Гц та напруженістю 40 кВ/см.

диполям, пов'язаним з цими ж самими алюмінієвими центрами. Збільшення поляризації магнітних диполів, завдяки дії електричного поля, призводить до зростання намагніченості зразка і, відповідно, до зростання інтенсивності сигналів ЕПР.

Описані вище магнітоелектричні ефекти вперше використано нами для збільшення чутливості методу ЕПР і, відповідно, для зниження порогу чутливості під час реконструкції дозових навантажень кварцу за допомогою ЕПР. Попередні роботи, що були пов'язані з магнітоелектричними ефектами, було виконано на монокристалічних зразках кварцу. Нами розроблено методику прикладення зовнішніх електричних полів до зразків кварцу в режимі реєстрації сигналів від порошкоподібних зразків. Ця методика включає розміщення зразка між двома паралельними діамагнітними пластинками на які наносять електричні контакти, що робляться за допомогою графіту. Нами визначено частоту та напруженість зовнішніх електричних полів які треба прикладати до порошкоподібних зразків при реконструкції дозових навантажень кварцу. Встановлено, що оптимальні значення частоті електричного поля дорівнюють приблизно 600 Гц, а напруженість електричного поля дорівнює приблизно 40 кВ/см. Завдяки використанню магнітоелектричних ефектів та збільшенню інтенсивності сигналів ЕПР нам вдалося знизити поріг чутливості методу ЕПР дозиметрії приблизно в п'ять разів і довести це значення приблизно до 0,5 Грей.

5. Приклади апробація методів реконструкції дозових навантажень кварцу

На основі виконаних досліджень властивостей радіаційних центрів в кварці нами було проведено апробацію розроблених підходів до реконструкції дозових навантажень зразків кварцу, виділеного з будівельних матеріалів, одержаних з зони аварії на ЧАЕС. Матеріалом, з якого виділяли кварц, була цегла. Реконструкцію дозових навантажень методом ЕПР виконували за допомогою алюмінієвих центрів. Лабораторне доопроміювання зразків виконували за допомогою g-променів ізотопу ^{60}Co в Інституті хімічної фізики НАН України. Для

підтвердження достовірності отриманих результатів, крім методу ЕПР, для реконструкції дозових навантажень зразків використовували також інші методи, такі як термостимульована люмінесценція та рентгенолюмінесценція. На рис. 6 наведено характерні калібрувальні криві, отримані за допомогою різних методів.

Калібрувальні криві, що представлені на рис. 6, відповідають зразку з міста Чорнобиль. Реконструйована доза для даного зразка дорівнює $0,9 \pm 0,2$ Гр. Важливо підкреслити, що дози, визначені за допомогою трьох незалежних методів, відповідно до рис. 6, приблизно співпадають. Результати, представлені на рис. 6, демонструють, що значення доз, виміряні за допомогою різних методів, у межах експериментальних похибок є однаковими. Для реконструкції дозових навантажень нами було відібрано по 5–6 проб кварцу вилученого з цегли в різних населених пунктах з зони аварії на ЧАЕС. Точність вимірів, пов'язаних з реконструкцією доз, дорівнювала приблизно 20%. Для різних проб з одного й того ж населеного пункту результати знаходились в деякому інтервалі, які для нижчеазначених населених пунктів виявились наступними: м. Чорнобиль (0.6–0.9) Гр, с. Шепеличі (3–4) Гр, с. Нова Красниця (3.5–4.5) Гр, с. Товстий Ліс (4–9) Гр, Станція Янів (17–19) Гр, Управління будівництва АЕС (10–12) Гр, гаражі заводу «Юпітер» (17–20) Гр, гаражі біля хутору «Підлісний» — (30–35) Гр, насосна станція ЧАЕС (20–24) Гр.

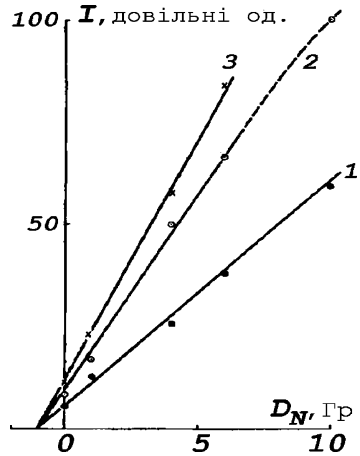


Рис. 6. Калібрувальні криві для реконструкції дозових навантажень кварцу. Криві 1 та 2 отримано методами термостимульованої люмінесценції і рентгенолюмінесценції, а крива 3 за допомогою методу ЕПР. Величини I та D_N відповідають інтенсивностям сигналів у відносних одиницях, та дозі опромінення у Греях.

Отримані нами результати були обговорені в рамках міжнародного проекту «Experimental collaboration project No 10 «Retrospective dosimetry and dose reconstruction» [11], який виконували на замовлення Європейської Комісії дослідники з Великої Британії, Німеччини, Сполучених Штатів Америки, України, Росії та Білорусі. В рамках цього проекту, крім зазначених вище результатів, отриманих методом ЕПР, реконструкцію дозових навантажень виконували також за допомогою інших методів (термо- та рентгеностимульована люмінесценція), а також за допомогою комп'ютерного моделювання. Порівняння результатів, отриманих за допомогою різних методів, підтвердили достовірність результатів отриманих за допомогою ЕПР дозиметрії.

Відзначимо, що при реконструкції дозових навантажень кварцу метод ЕПР має ряд суттєвих переваг у порівнянні з іншими методами реконструкції доз. При використанні методу термолюмінесценції, завдяки нагріванню зразка в процесі вимірювання, інформація про радіаційну історію дослідженого зразка втрачається. Подібна ситуація має місце також і при використанні методу рентгенолюмінесценції, при якому в процесі вимірювання має місце опромінення зразка. На відміну від цих методів, при визначенні дози опромінення методом ЕПР властивості дослідженого зразка не змінюються і відповідно після вимірів зразок зберігає інформацію про свою радіаційну історію.

6. Висновки

Отримані нами результати про властивості радіаційно-активованих центрів в кварці мають велике значення для вирішення як фундаментальних проблем радіаційної мінералогії, та і для вирішення прикладних задач ретроспективної дозиметрії. Дослідження в галузі ретроспективної дозиметрії сприяють мінімізації негативних наслідків антропогенного радіаційного втручання в геологічне середовище. Оцінка впливу цього втручання на місцевість та людину, а також розробка засобів, пов'язаних з мінімізацією негативного радіаційного впливу на людину та довкілля, є важливими для вирішення широкого кола мінералогічних, екологічних та медичних проблем. Дані

ретроспективної дозиметрії можуть грати визначальну роль в радіаційному матеріалознавстві. Ці дані можуть бути використані для прогнозу стійкості будівельних конструкцій та зокрема будівельних конструкції зведених над зруйнованим Четвертим енергоблоком Чорнобильської атомної електростанції.

Важливість досліджень, пов'язаних з ретроспективною дозиметрією, окрім вивчення наслідків аварії на ЧАЕС та на інших атомних об'єктах, обумовлена тим, що у наш час збільшується вірогідність різних ситуацій, в яких населення може бути піддано неконтрольованому радіаційному опромінюванню і значні території можуть бути забруднені радіонуклідами. Зокрема, збільшення вірогідності вказаних ситуацій обумовлено зростаючою роллю атомних електростанцій в енергетиці, все більш широким застосуванням радіоактивних елементів для вирішення наукових і технічних задач, а також можливим несанкціонованим використанням радіоактивних елементів, у тому числі під час можливих терористичних актів з застосуванням радіоактивних ізотопів.

* * *

1. Брик А.Б. Ретроспективная инструментальная дозиметрия / А.Б. Брик, В.В. Радчук // *Природа*. — 1994. — № 2. — С. 3—11.

2. New application of electron spin resonance. Dating, Dosimetry and Microscopy / M. Ikeya. — Singapore: World Scientific, 1993. — 500 p.

3. Вертц Дж., Болтон Дж. Теория и практические приложения метода ЭПР / Дж. Вертц, Дж. Болтон. — М.: Мир, 1975. — 548 с.

4. Радчук В. В., Брик А. Б. Свойства нативных и радиационно-стимулированных радикалов в эмали зубов и проблемы ретроспективной ЭПР дозиметрии / В.В. Радчук, А.Б. Брик // *Минералогический журнал*. — 2006. — Т. 28. — № 4. — С. 21—31.

5. Радчук В.В. Ретроспективная дозиметрия, основанная на электронном парамагнитном резонансе эмали зубов и кварца / В.В. Радчук // *Збірник наукових праць / Ін-т геохімії навколиш. середовища НАН та МНС України*. — К., 2007. — Вип. 14. — С. 115—118.

6. Анизотропия сигналов ЭПР в биогенном апатите эмали зубов и проблемы ретроспективной дозиметрии / В.В. Радчук, А.Б. Брик, А.П. Клименко, О.И. Щербина // *Мінералогічний журнал*. — 2008. — Т. 30. — № 1. — С. 41–47.

7. Радчук В.В. Особливості процесів масопереносу і розпаду радіаційних центрів в емалі зубів та вплив цих процесів на результати ретроспективної дозиметрії / В.В. Радчук // *Мінералогічний журнал*. — 2009. — Т. 31. — № 2. — С. 58–65.

8. Радчук В.В. Аномальний радіаційний відгук алюмінієвих центрів у кварці та ретроспективна ЕПР дозиметрія / В.В. Радчук // *Доповіді НАН України*. — 2009. — № 3. — С. 99–104.

9. Радиоспектроскопия кварца / И.В. Матяш, А.Б. Брик, А.П. Заяц, В.В. Мазыкин. — К.: Наук. думка, 1987. — 167 с.

10. Brik A.V. Magnetoelectric tunnel effects in paramagnetics / A.V. Brik // *Ferroelectrics*, — 1994. — V. 161. — No 1–4. — P. 59–63.

11. Retrospective dosimetry and dose reconstruction. Experimental collaboration project No 10 / Ed. I. Bailiff, V. Stepanenko. — Brussels: Europ. Commiss., 1996. — 115 p.

Отримано: 20.05.2011 р.