

УДК 543.429.3+549-11

Поп О.М., інж.; Стець М.В., н.с.; Маслюк В.Т., д.ф.-м.н., проф.

**ОЦІНКА ЗАКРИТОСТІ ХІМІЧНИХ СИСТЕМ НУКЛІДІВ  
РЯДІВ  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$** 

*Інститут електронної фізики НАН України,  
вул. Університетська 21, м. Ужгород, 88017, Україна;  
e-mail: oksana\_pop@i.ua*

**Вступ**

Для визначення віку подій (порушення радіоактивної рівноваги [1-4]) у зразках можна використати фізичні і хімічні процеси, які залежать від часу, і які спричиняють до кількісно зареєстрованої зміни в досліджуваних системах. При цьому необхідно знати характер часової залежності цих процесів. Ще одною попередньою умовою визначення віку якоїсь геологічної або археологічної події є чіткий зв'язок між цією подією і початком залежного від часу процесу. Зокрема, для цілей датування використовується радіоактивність, як процес, що залежить від часу. У різноманітних дослідженнях найбільший інтерес представляють радіонукліди, які розпадаються від материнських до дочірніх і т.д. Представниками даного процесу є природні ряди розпаду –  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  [1-4].

Радіоактивні ряди, родоначальниками яких є  $^{238}\text{U}$  і  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  містять радіоактивні ізотопи різних елементів. За рахунок геохімічних процесів і відмінності фізико-хімічних властивостей, елементи виносяться газовою або рідкою фазою з системи, роблячи її відкритою. Оскільки існують відмінності в геохімічних властивостях дочірніх продуктів U, Th ці процеси порушують рівновагу між членами радіоактивних рядів. Отже, закритість систем, що містять радіоактивні ряди, порушується або внаслідок природних явищ, або за рахунок видобутку руд. У природних процесах порушення радіоактивної рівноваги відбувається за рахунок геохімічного фракціонування, яке обумовлене переважно відмінностями у розчинності різних нуклідів – членів ряду, і яке відбувається у процесах

вивітрювання, переносу, утворення мінералу і при осадженні [1-4]. При цьому порушується радіоактивна рівновага між членами цих рядів. В умовах радіоактивної нерівноваги співвідношення між окремими членами радіоактивних рядів буде залежати від того, коли була відкрита, а потім закрита система, з якою частотою вона відкривається. У природі порушення радіоактивної рівноваги, тобто перехід від закритої системи до відкритої, відбувається за рахунок міжфазних процесів у геологічних формаціях: розчинення у водних розчинах, (Т → Ж) або виділення радону з водних розчинів і геологічних формацій (Т, Ж → Г). Радіоактивність природних рядів у відкритій системі суттєво відрізняється від закритої системи. Для оцінки радіоактивності уранових і торієвих руд необхідно знати ступінь і час відкритості систем з природними радіоактивними рядами. З причини великої рухливості радю та радону, та накопичення їх у пластових водах, які вилучаються при видобутку нафти чи газу спостерігаються значні (в десятки тисяч разів) перевищення радіоактивності в місцях їх видобутку над фоном регіону.

На дослідженні цих явищ основане використання ряду геохронометрів, що дозволяють вимірювати геологічний вік у межах від декількох років до мільйона років і більше [2]. Через велику різницю у періодах напіврозпаду між ізотопами рядів U та Th (діапазон від мікросек. до 240 тис. років), їх можна використовувати для дослідження (біо)геологічних формувань, час утворення яких від декількох днів до приблизно мільйонна років тому.

У результаті виникають два типи ситуацій, які можуть використовуватися для вирішення геохронологічних проблем [2]:

1) член радіоактивного ряду відділяється від материнського нукліда і після цього розпадається зі швидкістю, яка визначається тільки його періодом напіврозпаду;

2) дочірній нуклід утворюється при розпаді материнського нукліда (попередньо відокремленого від дочірнього) до тих пір, поки знову не встановлюється стан рівноваги.

### 1. Математичні моделі радіоактивного розпаду

Методи ядерної хронометрії використовують радіонукліди природних рядів розпаду –  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  як ізотопні хронометри. Найбільш геологічно важливими ізотопними хронометрами, які охоплюють досить широкий відрізок часу є:  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ ,  $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$  і  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ . Всі ці хронометри мають свій діапазон, у якому вони можуть бути використані. Однак використання більш ніж одного хронометра для зразків з однією подією є дуже корисним для геологічної інтерпретації даних зразка.

Методи ядерних хронометрів визначають вік подій у зразках, використовуючи основний закон радіоактивного розпаду. Перша форма аналітичного розв'язку для множини послідовних ізотопів рядів розпаду була отримана Батеманом (Bateman, 1910) та Рубінсоном (Rubinson, 1947) [5, 6]. Розв'язок системи рівнянь, яке дає число ядер всіх нуклідів у лінійному ланцюгу радіоактивних перетворень, у будь-який момент часу  $t$ : буде аналітичний (тобто абсолютно точний) вираз для кількості  $N_n(t)$  ядер  $n$ -го члена лінійного ланцюга, справедливий для будь-яких значень  $\lambda$  [1–4]:

$$N_n(t) = N_{10}(C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t}) \quad (1)$$

Коефіцієнти  $C_1, \dots, C_n$  – безрозмірні функції констант розпаду і мають наступні систематичні значення [1–4]:

$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1} N_1^0}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)}$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1} N_1^0}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)}$$

$$C_n = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1} N_1^0}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)}$$

Таким чином, можна використати рівняння (1) для визначення числа ядер будь-якого нукліда в ланцюгу радіоактивних перетворень, у будь-який момент часу, якщо спочатку в системі присутній тільки материнський нуклід.

Природні радіоактивні ряди розпаду  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  можна описати системою лінійних диференціальних рівнянь Батемана-Рубінсона, та їх розв'язками.. Найпростіший розв'язок характерний при:

- розпаді материнських радіонуклідів до стабільних дочірніх нуклідів, не беручи до уваги проміжні ланки;
- розпаді материнських радіонуклідів до дочірніх нуклідів, які накопичилися у результаті розпаду за умови вікової рівноваги.

Отже, в результаті розв'язку рівняння (1) після низки припущень отримаємо рівняння, на якому ґрунтуються методи ядерних хронометрів:

$$T_e = -\frac{1}{\lambda_D} \ln \left[ 1 - \frac{A_D}{A_M} \right] \quad (2)$$

де  $T_e$  – власний час – тривалість існування системи материнського  $M$  та дочірнього  $D$  нуклідів (подія);  $\lambda_D$  – стала розпаду дочірнього нукліду.

Однак, для всіх методів важливо мати наступну інформацію:

- закритість системи;
- врахувати поправки на вміст нуклідів внаслідок відкритості системи (початковий вміст дочірнього нукліду в момент утворення зразка).

Основними передумовами закритості системи, які використовуються при визначенні віку подій у зразках є [1]:

1. Тривалість порушення системи мала у порівнянні із періодом напіврозпаду дочірнього нукліда.
2. Початковий вміст дочірнього нукліда в момент закриття системи дуже малий, або відомий.
3. Після порушення (події) радіоактивна система залишається закритою і, таким чином, всі подальші зміни вмісту материнських та дочірніх нуклідів відбуваються виключно в наслідок радіоактивного розпаду.

Наприклад, метод  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  хронометрів використовується для дослід-

ження місто народжень торфу [1-4]. Модель датування торф'яників основана на припущенні, що уран адсорбується органічною речовиною із ґрунтових вод у процесі утворення торфу, у той час як після утворення шарів (т.зв. події) виключається подальший обмін між торфом та ґрунтовими водами (система стає закритою).

Якщо відношення ізотопів  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  є або близько знаходиться до вікової рівноваги, розпад U може бути упущений, оскільки це повністю підтримується  $^{238}\text{U}$  [1 – 4]. Тоді активність  $^{230}\text{Th}$  можна віднести не до активності  $^{238}\text{U}$ , а до активності його материнського радіонукліда  $^{234}\text{U}$  [1 – 4]:

$$t = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(1 - \frac{^{230}\text{Th}}{^{234}\text{U}}\right)_A$$

Хронометри

$^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$  використовуються для визначення віку руд. Рівновага у ряду  $^{235}\text{U}$  була порушена одномоментно за рахунок повного виносу протактинію (т.зв. події – момент закриття системи), тоді вік цієї події у зразках руд [7]:

$$t = -\frac{1}{\lambda_{231}} \cdot \ln\left(1 - \frac{^{231}\text{Pa}}{^{235}\text{U}}\right)_A$$

Однак, забезпечити і гарантувати закритість системи протягом тривалого контакту зразка з навколишнім середовищем практично неможливо. У закритій системі встановлюється радіоактивна рівновага між всіма радіонуклідами ряду [Вагнер, с.100...]. Якщо система порушена, для відновлення радіоактивної рівноваги треба час. Момент події (порушення радіоактивної рівноваги) може бути визначена по степені встановлення цієї нової радіоактивної рівноваги.

Отже, матеріальним носієм інформації про склад зразка і процесів у зразку є нукліди ряду, які можна розглядати як певну множину (сукупність) нуклідів. Досліджувані зразки, в свою чергу, можна розглядати як системи, котрі складаються з різноманітних хімічних підсистем нуклідів. Тому досліджувані зразки можна розглядати як хімічні системи – впорядковані множини нуклідів – членів рядів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ . Хімічні системи – це загальна назва геохімічних, біохімічних та інших систем нуклідів у зразках.

Для дослідження таких систем використовують методи ядерної гамма-

спектрометрії з напівпровідниковими детекторами. Подія, у даному випадку, розглядається як акт / факт внаслідок чого відбуваються зміна вмісту радіонуклідів у зразку.

## 2. Метод стандартних множин

Розроблений нами метод стандартних множин можна розглядати як подальший розвиток гамма-спектрометричного варіанту методу ядерних хронометрів. Він ґрунтується на вимірюванні експериментальних нуклідних спектрів гамма - активностей максимально можливої кількості нуклідів рядів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ . В якості стандартів (еталонів порівняння) для вимірювання використовуються модельні (розрахункові) нуклідні спектри, які розглядаємо як стандартні нуклідні спектри (стандарти). Для отримання цих спектрів використовуємо власні розрахунки (1). Результатом вимірювання експериментальних нуклідних спектрів активностей буде:

- оцінка закритості хімічної системи множини нуклідів рядів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ;
- врахування поправок на вміст нуклідів внаслідок відкритості системи;
- час (тривалість) існування такої системи.

Одночасно це також – розробка простого та нескладного, при можливості, методу визначення реєстрованих подій, та дати цих подій.

*Розв'язки рівнянь Батемана – Рубінсона.* Активність  $A_n(T_e)$  кожного  $n$ -го нукліда ряду до події можна представити виразом – розв'язком системи диференціальних рівнянь Батемана-Рубінсона:

$$A_n(T_e) = A_{10} \sum_j \prod_i b_{ij} \sum_i C_{ij} e^{-\lambda_j T_e} \quad (3)$$

де  $A_{10}$  – початкові значення активності материнського ядра;  $b_{ij}$  – коефіцієнти розгалуження («внутрішні» брэнчінги, значення яких є ядерними константами);  $b_{ij} \leq 1$ ;  $C_{ij}$  – коефіцієнти, що залежать від сталих розпаду  $\lambda_{ij}$ ,  $T_e$  – власний час – час що фігурує у розрахунках активностей. Такі розрахунки виконані для одного моля речовини:  $N_{10} = N_A$

$= 6,022 \cdot 10^{23}$  ядер (число Авогадро):  $^{232}\text{Th}$  (від 0 до  $3,17\text{E}+12$  років);  $^{235}\text{U}$  (від 0 до  $3,17\text{E}+12$  років);  $^{238}\text{U}$  (від 0 до  $3,17\text{E}+16$  років). Бренчіни  $b_i$  з утворенням кластерів не розглядаються [8].

Активності  $A(T_e)$  нуклідів рядів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  (див. рівняння (3)) отримані для певного набору умов – стандартних умов:

- активності всіх нуклідів, окрім материнського (активності  $A_{i0}$ ) у момент власного часу  $T_e=0$ , будуть рівними нулю;
- для будь-якого моменту часу  $T_e$  ніяких інших можливостей надходження чи втрати ядер, окрім процесів утворення / розпаду, немає.

Стандартні умови використовуємо для знаходження розв'язків системи диференціальних рівнянь Батемана – Рубінсона.

Важливим є те, що як активності  $A(T_e)$ , так і вся множина цих активностей - нуклідний спектр активностей ряду є функціями одного і того ж власного часу  $T_e$ .

*Закриті системи.* Стандартні умови можна вважати математичним записом умов закритості геохімічних систем. Тобто, зміст поняття «стандартні умови» співпадає зі змістом поняття «умови закритості зразка, як хімічної системи». В обох системах: хімічній системі нуклідів та стандартній множині нуклідів, єдиним джерелом зміни вмісту нуклідів у рядах, є радіоактивний розпад / утворення нуклідів ряду. Початок існування закритої хімічної системи є початком існування стандартної множини. Можна вважати, що: тривалість закритості хімічної системи є тривалістю існування стандартної множини. Як стандартні умови, так і умови закритості хімічної системи ґрунтуються на умовах для розрахунку рівнянь Батемана.

Отже, стандартні множини нуклідів представляють собою закриті системи.

Розрахувавши значення активностей в (3) для достатньо великої кількості точок власного часу  $T_e$ , отримуємо часову залежність активностей  $A=f(T_e)$  для всіх нуклідів рядів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ . Розраховану таблицю перераховуємо до експериментальних значень активностей  $A$ , і отримуємо таблицю стандартів.

*Відкриті системи.* Зміна вмісту нуклідів рядів у зразку внаслідок події призводить до утворення стандартних

множин нуклідів нових дочірніх рядів – дочірніх стандартних множин нуклідів. Результатом утворення нових дочірніх стандартних множин буде поява нестандартних множин [9]. Нестандартні множини представляють відкриті системи.

Множини нуклідів, зареєстровані ядерною гамма-спектрометрією материнських та дочірніх нуклідів рядів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  у зразках, є експериментальними множинами нуклідів. Їх моделями можуть бути стандартні або нестандартні множини. Експериментальні множини нуклідів також представити графічно, у вигляді експериментальних нуклідних спектрів [9].

*Вимірювання стандартності.* Єдиним джерелом інформації про закритість / відкритість системи зразка є сама експериментальна множина, а саме її «стандартність», чи «нестандартність». Цю інформацію можна оцінити шляхом порівняння експериментального нуклідного спектра ЕНС із стандартними нуклідними спектрами СНС (напр., див. рис. 1):

$$A(T_{emin}) \leq A_n(T_m) \leq A(T_{emax}) \quad (4)$$

$A(T_{emin})$  належить стандарту СНС  $A(T_{emin})$ , який обмежує кожен  $A_n(T_m)$  «знизу» (на рис. 1 – ліві світлі прямокутники);

$A(T_{emax})$  належить стандарту СНС  $A(T_{emax})$ , який обмежує кожен  $A_n(T_m)$  «зверху» (на рис. 1 – праві світлі прямокутники);

$A_n(T_m)$  належить експериментальному нуклідному спектру ЕНС ( $T_m$ ).

Вибравши стандарт СНС  $A(T_{emin})$  та стандарт СНС  $A(T_{emax})$  із таблиці стандартів, вибираємо значення часів  $T_{emin}$ , та  $T_{emax}$ .

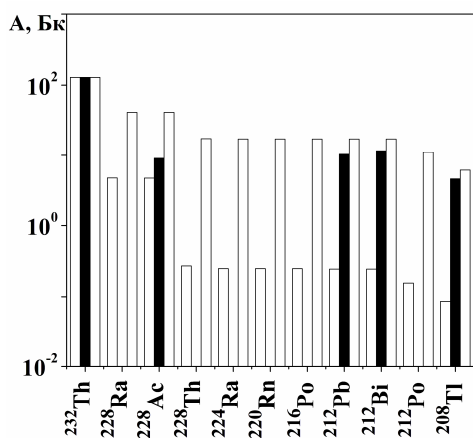
Маючи значення  $T_{emin}$ ,  $T_{emax}$ , визначаємо часовий проміжок  $\Delta T$ :

$$\Delta T = T_{emax} - T_{emin}$$

$\Delta T$  можна розглядати як певний «проміжок стандартності» ЕНС ( $T_m$ ). Всередині цього проміжку  $\Delta T$  експериментальна множина, представлена експериментальним нуклідним спектром ЕНС ( $T_m$ ), вважається стандартною множиною.

Якщо виконується рівність (4), тоді, стандартний нуклідний спектр – стандарт. Отже і експериментальний нуклідний спектр є стандартним спектром, тобто відповідає стандартним умовам. Отже, експериментальна множина нуклідів – стандартна. Тому досліджуваний зразок можна вважати закритою хімічною системою. Якщо ж не

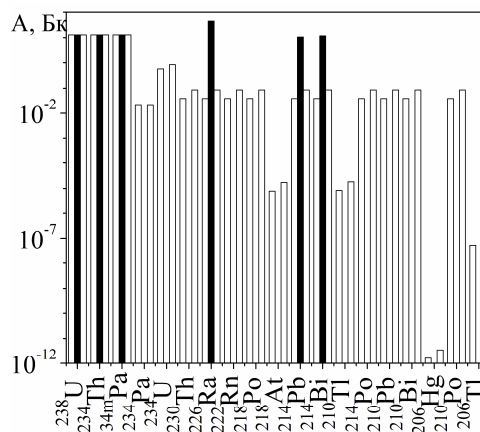
виконується умова (4), то причиною цього буде не лише нерівно важність – відкритість системи.



**Рис. 1.** Експериментальний нуклідний спектр А активностей зразка (виділено чорним) та модельні нуклідні спектри А стандартних множин  $^{232}\text{Th}$  (світлі прямокутники).

На рис. 1 наведені експериментальний нуклідний спектр (чорні прямокутники) та модельні нуклідні спектри ( $T_{emin}$  – світлі прямокутники зліва та  $T_{emax}$  світлі прямокутники справа) стандартної множини  $^{232}\text{Th}$ . У даному випадку видно, що експериментальний нуклідний спектр близький до стандартних, бо знаходиться між ними. Отже, порівняння експериментального нуклідного спектру і стандартних спектрів, є виміром "стандартності" (закритості системи зразка) – деякої властивості множини нуклідів рядів.

**Декомпозиція.** На рис. 2 наведені експериментальний нуклідний спектр (чорні прямокутники) та модельні нуклідні спектри ( $T_{emin}$  – світлі прямокутники зліва та  $T_{emax}$  світлі прямокутники справа) для ряду  $^{238}\text{U}$ . Як видно з рисунку, активність дочірніх радіонуклідів є дещо вищою, у порівнянні з материнськими радіонуклідами, що свідчить про те, що в зразку відбулось надходження радіонуклідів – відбулась подія (система відкрита). У даному випадку, ми маємо справу з нестандартною множиною – сумою двох стандартних множин: стандартної множини  $^{238}\text{U}$  та стандартної множини  $^{226}\text{Ra}$ . Тому нестандартну множину ми розкладаємо на дві стандартні множини – здійснюємо декомпозицію.



**Рис. 2.** Експериментальний нуклідний спектр А активностей зразка (виділено чорним) та МНС А стандартної множини  $^{238}\text{U}$  (світлі прямокутники).

Особливість декомпозиції нуклідних спектрів – вона є результатом почленного віднімання відповідних однойменних активностей експериментального і стандартного (модельного) спектрів. Декомпозиція експериментальних нуклідних спектрів вирішує проблему невизначеності стану (закритості / відкритості) досліджуваної хімічної системи. Вона змінює значення активностей нуклідів, здійснюючи цим самим поправки на відкритість (нестандартність) системи. Тому декомпозиція змінює значення часових параметрів нуклідних спектрів. Також зазначимо, що здійснивши декомпозицію, можна потім використати один із вже відомих методів ядерних хронометрів для визначення власного часу  $T_e$ . Декомпозиція не є обов'язковою процедурою, якщо виконується умова (4) для кожного нукліда.

Отже, у стандартну множину всіх нуклідів ряду входять пари нуклідів, які використовують у методах ядерних хронометрів (1). Тому стандартна множина нуклідів як ціле може самостійно виступати у ролі ядерного хронометра.

## Висновки

У нашому методі використовується інформація про всі зареєстровані нукліди – члени стандартної множини ряду. Отримується і використовується множина активностей – нуклідний спектр активностей. Тому метод дає змогу визначати закритість хімічної системи зразка. Інформацію про

закритість / відкритість системи отримати на основі тільки двох гамма-активних нуклідів, важко, або неможливо. Однак ця інформація про закритість / відкритість системи стає доступною у нашому методі. Ця інформація міститься у вигляді експериментальних нуклідних спектрів активностей – «стандартність / нестандартність» (що є математичним аналогом термінів «закритість / відкритість») які ми в змозі оцінити.

Інформацію про «стандартність / нестандартність» можна використати для декомпозиції експериментального нуклідного спектра активностей – розкладу його на стандартні нуклідні спектри. У методах ядерних хронометрів, декомпозицію експериментального нуклідного спектра здійснити важко, або неможливо.

#### Список використаних джерел

1. Вагнер Г.А. Научные методы датирования в геологии, археологии и истории. М.: *ТЕХНОСФЕРА*, 2006. С. 543.
2. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: *Мир*, 1989. С. 590.

3. Мейер В.А., Ваганов П.А. Основы ядерной геофизики. Л.: *Изд-во Ленингр. Гос. Ун-та*, 1978. С. 360.
4. Титаева Н.А. Ядерна геохімія: М.: *Изд. МГУ*, 2000. С. 336.
5. Маслов И.А., Лукницкий В.А., Справочник по нейтронному активационному аналізу. Л.: *Наука*, 1971. С. 320.
6. Bateman H. The solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations. *Proc. Camb. Phil. Soc.* 1910, 15, 423.
7. Вальтер А.А., Дикий Н.П., Довбня А.Н., Ляшко Ю.В., Писанский А.И., Сторишко В.Е. Ядерно-физическое исследование радиоактивного равновесия в древних урановых рудах Украины. *Доповіді Національної академії наук України*. 2009, 7, 76-82.
8. Table of Isotopes CD-ROM, 8 Edition, Version 1.0. By Richard B. Firestone, 1996.
9. Поп О.М., Стець М.В., Маслюк В.Т., Мацків Б.В., Хомутник Р.В. Нуклідні спектри гамма-активностей рядів торія і урана, та їх використання в спектрометрії зразків гірських порід. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. 2014, 36, С. 93-99.

Стаття надійшла до редакції: 27.05.2015.

### AN ESTIMATION OF CLOSENESS OF CHEMICAL SYSTEM OF THE NUCLIDES OF SERIES $^{232}\text{Th}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$

Pop O.M., Stets M.V., Maslyuk V.T.

The investigated samples it is possible to consider as chemical systems – the ordered sets of nuclides being the members of the  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  series. For definition of time parametres (duration of existence, age of the event) chemical systems of nuclides  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  series in samples, is taking into account of corrections for not closed geochemical systems: taking into account of the loss and revenues nuclides  $M$  and  $D$ ; proof and ensuring of system closure.

Our method is based on the measurement of the experimental nuclide spectra of activities of all nuclides of  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  series. The results of measurements of the experimental nuclide spectrum of activity will be: estimation of closeness of chemical system of set of nuclides of  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  series; time (duration) of the existence of such system.