

УДК 539.162

## МОДЕЛЬНЫЕ ЭТАЛОНЫ В ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАТЫ СОБЫТИЯ

О.М. ПОП\*, М.В. СТЕЦ

Институт электронной физики НАН Украины, Ужгород, Украина

\*e-mail: oksana\_pop@i.ua

(Поступила в редакцию 25 ноября 2015 г.)

Рассмотрен метод стандартных множеств, в котором образец–стандарт не используется. В этом методе используется множество упорядоченных последовательностей активностей радионуклидов рядов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ . Упорядочение активностей нуклидов определяется решением системы дифференциальных уравнений Бейтмена–Рубинсона. Рассчитанные активности нуклидов систематизированы в виде таблицы стандартов. Таблица стандартов выполняет функцию внутреннего математического эталона (образца-стандарта).

### 1. Введение

Методы геологического датирования в большинстве случаев представлены радиоизотопными хронометрами [1–3]. Основными предпосылками использования радиоизотопных хронометров являются:

1. Предположение об отсутствии в образце дочерних продуктов распада в момент времени  $T_e = 0$ . Наличие в образованной породе (современные застывшие лавы) дочерних продуктов распада ( $^{40}\text{Ar}$  для К-Аг метода) подтверждено в образцах лавовых потоков, возраст которых исторически известен [1–6].

2. Предположение о замкнутости систем, т.е. невозможности процессов приношения – выноса как материнских, так и дочерних компонентов.

3. В радиоуглеродном методе датирования, например, считается, что соотношение изотопов  $^{12}\text{C}/^{14}\text{C}$  постоянно во времени и пространстве (не учитывается состояние неустойчивого равновесия этих изотопов в атмосфере).

Итак, радиоизотопные методы имеют недостатки, как с теоретической, так и практической точек зрения [6,7].

Наиболее геологически важными изотопными хронометрами являются  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ ,  $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ , которые базируются на законе радиоактивного распада. Первая форма аналитического решения для множества последовательных изотопов рядов распада была получена Бейтменом [8]. Детальный анализ этих уравнений проведен также в [2]. Эти дифференциальные уравнения, описывающие неравновесность радионуклидов, могут быть решены аналитически подстановкой основных коэффициентов для определенного множества условий [2].

Примерами цепей радиоактивных превращений, которые описываются решениями дифференциальных уравнений, являются природные радиоактивные ряды. Родоначальниками этих рядов являются  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , однако их использование ограничено из-за сложности решения дифференциальных уравнений. Самое простое решение характерно при распаде материнских радионуклидов в стабильные дочерние нуклиды без учета промежуточных звеньев. Решение дифференциальных уравнений при распаде материнского радионуклида в дочерние радионуклиды, которые в свою очередь распадаются, является очень сложным. Таким образом, методы изотопных хронометров основываются на использовании уравнения типа

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

где  $T_e$  – собственное время, т.е. продолжительность существования системы материнского М и дочернего D нуклидов (событие – изменение содержания нуклидов ряда в образце);  $\lambda_D$  – постоянная распада. Эти методы связывают активности двух нуклидов: материнского  $A_M$  и дочернего  $A_D$ , в основном, для пар долгоживущих нуклидов  $A_D$   $^{234}\text{U}$  и  $A_M$   $^{238}\text{U}$ ;  $A_D$   $^{230}\text{Th}$  и  $A_M$   $^{234}\text{U}$ ;  $A_D$   $^{231}\text{Pa}$  и  $A_M$   $^{235}\text{U}$ .

Предпосылки, на которых базируются радиоизотопные хронометры, могут считаться допустимыми после использования методик определения возраста на эталонных объектах. Однако нет таких эталонных объектов, возраст которых был бы известен наверняка. Исключение составляют только самые молодые вулканические объекты, время образования которых зафиксировано исторически. Проблема эталонных объектов ставит задачу их создания с использованием математической модели. Математическая модель представляет собой систему уравнений (дифференциальных, интегральных и алгебраических), в которой конкретные величины заменяются постоянными и переменными величинами, функциями.

Все естественные и общественные науки, использующие математический аппарат, по сути, занимаются математическим моделированием, т.е. заменяют объект его математической моделью и затем изучают последнюю. Связь математической модели с реальностью осуществляется с помощью цепочки гипотез, идеализаций и упрощений. С помощью математических методов описывается, как правило, идеальный объект, построенный на этапе содержательного моделирования. Математические модели многих задач, возникающих в науках о Земле, хорошо описываются уравнениями математической физики. Более того, ряд важных геофизических задач представляет собой классические задачи математической физики. Нами предложен метод, который использует модельный подход. Он основывается на классических решениях системы дифференциальных уравнений, описывающих распад/образование линейной цепи радиоактивных ядер нуклидов рядов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ .

## 2. Метод стандартных множеств

К безэталонным методам, которые не используют вещественные эталоны (стандарты) сравнения, можно, с известной степенью осторожности, отнести методы определения даты событий в образцах, которые используют зависимости

$$T_e = f_1(A_M, A_D, T_{1/2M}, T_{1/2D}) + f_2(A_{MO}, A_{DO}),$$

где  $T_e$  – время,  $A_M$  и  $A_D$  – активности материнского М и дочернего D радиоактивных нуклидов, связанных генетической цепью распада;  $T_{1/2M}$  и  $T_{1/2D}$  – периоды полураспада;  $A_{MO}$  и  $A_{DO}$  – начальные активности нуклидов.

Зависимость  $f_1$  описывает количественно эту связь (закон радиоактивного распада) и не зависит от образца. Таким образом, зависимость  $f_1$  выполняет функцию математического эталона, заменяющего эталон (стандарт) вещественный. Зависимость  $f_2$  должна учитывать особенности образца как геохимической системы, взаимодействующей с внешней для нее системой – окружающей средой. Знание зависимости  $f_2$  по сути эквивалентно требованию внешней априорной информации о содержании  $A_{MO}$  и  $A_{DO}$ , т.е. необходимости в отдельном вещественном эталоне.

Развивая метод ядерных хронометров, рассмотрим метод определения даты события (метод стандартных множеств), где вещественный эталон не нужен. В этом методе используется множество упорядоченных последовательно-стей активностей радионуклидов рядов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ . Упорядочение активностей радионуклидов определяется решением системы дифференциальных уравнений Бейтмена–Рубинсона.

Активность каждого  $n$ -го нуклида ряда можно представить обобщенным для случая разветвленных цепей выражением – решением системы дифференциальных уравнений Бейтмена–Рубинсона [9,10]

$$A_n = \lambda_n N_n(T_e) = N_{10} \sum_j \left( \prod b_{rij} \right) \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{ij} e^{-\lambda_i T_e}, \quad (2)$$

где  $N_{10}$  – начальное количество материнского ядра,  $\prod b_{rij} = b_{12} \times b_{23} \times \dots \times b_{n-1n}$  – произведение всех коэффициентов ветвления  $b_{ij}$  (коэффициентов, учитывающих нелинейность цепи) в  $r$ -м линейном участке этой цепи,  $b_{ij} \leq 1$ ,  $C_{ij}$  – коэффициенты, зависящие от постоянных распада  $\lambda_{ij}$ ,  $C_{ij} = \prod_{ij}^n \lambda_j / (\lambda_j - \lambda_i)$ .

Расчеты выполнены для одного моля вещества, где  $N_{10} = N_A = 6.022 \times 10^{23}$  ядер (число Авогадро), и собственного времени  $T_e$  для  $^{232}\text{Th}$  (от 0 до  $3.17 \times 10^{12}$  лет),  $^{235}\text{U}$  (от 0 до  $3.17 \times 10^{12}$  лет),  $^{238}\text{U}$  (от 0 до  $3.17 \times 10^{12}$  лет).

Ядерные данные взяты из работы [11]. Коэффициенты ветвления  $b_{ij}$  с образованием кластеров не рассматриваются. Для расчетов системы дифференциальных уравнений Бейтмена–Рубинсона выделим следующие условия:

- стартовое (начальное) количество ядер материнского нуклида в момент собственного времени  $T_e = 0$  равно  $N_{10} > 0$  ( $A_M > 0$ );

- все остальные количества нуклидов для  $T_e = 0$  равны 0 ( $A_D = 0$ );
- для любого момента времени  $T_e$  никаких других возможностей поступления или потери ядер кроме процессов образования/распада нет.

Совокупность всех указанных условий, аналитических выражений (2) и их решений назовём стандартными условиями. Множества активностей, полученных для этих начальных условий, будут стандартными (эталонными) множествами активностей нуклидов.

Стандартное множество нуклидов – это упорядоченная совокупность нуклидов одного ряда, генетически связанных взаимным распадом и образованием. Количественной характеристикой стандартного множества нуклидов является стандартный нуклидный спектр. Рассчитанные активности нуклидов рядов для достаточно большого количества точек собственного времени  $T_e$  (выражение (2)) систематизированы в виде таблицы значений активностей радионуклидов рядов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ . Систематизированную таблицу активностей пересчитаем в экспериментальные значения активностей и получим таблицу стандартов. Таблица стандартов, рассчитанная для всех радионуклидов ряда, выполняет функцию внутреннего математического эталона (стандарта) образца. Это обеспечивает метрологию экспериментальных стандартных множеств нуклидов рядов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , обнаруженных в образце [12]. Каждая строка из таблицы стандартов представляет собой стандартный нуклидный спектр активностей – стандарт для времени  $T_e$ . В колонках таблицы приведены значения активностей для соответствующих нуклидов рядов.

Дальнейшее измерение заключается в сравнении экспериментального нуклидного спектра активностей ЕНС  $A(T_m)$  нуклидов рядов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  со стандартами, соответствующими стандартным (расчетным) нуклидным спектрам активностей СНС  $A(T_e)$ :

$$\text{ЕНС } A(T_m) = \text{СНС } A(T_e). \quad (3)$$

Сравнение (3) ставит в соответствие дате времени  $T_m$  собственное время  $T_e$ . Значение этого собственного времени  $T_e$  толкуется как возраст стандартного множества нуклидов, которое образовалось в результате события.

Одновременно с разработкой и детализацией алгоритма нашего метода нами было осуществлено его практическое использование на основе уже полученных гамма-спектрометрических данных и сравнение его с методом ядерных хронометров. Практическое использование метода для определения длительности существования стандартных множеств в образцах керамики и горных пород приведено в [13–16].

### 3. Заключение

Рассмотрен метод стандартных множеств, в котором в качестве внутреннего математического эталона (стандарта) образца используется таблица стандартов. Метод основан на измерении экспериментальных нуклидных спектров

активностей всех нуклидов рядов. Дальнейшие измерения заключаются в сравнении экспериментальных нуклидных спектров активностей нуклидов рядов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  со стандартными нуклидными спектрами активностей. Результатом измерения экспериментальных нуклидных спектров активностей является время  $T_e$ . Полученную величину  $T_e$  можно интерпретировать как продолжительность существования стандартного множества – промежуток времени с момента события, в результате которого это множество возникло, до момента измерения. Расчетные данные использованы для определения возраста событий в образцах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Г.А. Вагнер.** Научные методы датирования в геологии, археологии и истории. Москва, Техносфера, 2006.
2. **Г. Фор.** Основы изотопной геологии. Москва, Мир, 1989.
3. **В.А. Мейер, П.А. Ваганов.** Основы ядерной геофизики. Ленинград, изд. ЛГУ, 1978.
4. **G.B. Dalrymple.** Earth and Planetary Science Letters, **6**, 47 (1969).
5. **А.А. Вальтер, Н.П. Дикий, А.Н. Довбня, Ю.В. Ляшко, А.И. Писанский, В.Е. Сторижко.** Доповіді Національної академії наук України, **7**, 76 (2009).
6. **G.H. Gill.** Creation Research Society Quarterly, **33**, 105 (1996).
7. **A.A. Snelling.** Proc. Third Inter. Conf. on Creationism, Creation Science Fellowship, Pittsburgh, 497 (1994).
8. **H. Bateman.** Proc. Camb. Phil. Soc., **15**, 423 (1910).
9. **И.А. Маслов, В.А. Лукницкий.** Справочник по нейтронному активационному анализу. Ленинград, Наука, 1971.
10. **О.М. Поп, М.В. Стець.** Доповіді Національної академії наук України, **4**, 65 (2013).
11. Table of Isotopes CD-ROM, B. Firestone, 1996.
12. **И.Ф. Шишкин** Теоретическая метрология. Часть первая. Общая теория измерений. С.-Петербург, изд. Питер, 2010.
13. **О.М. Поп, М.В. Stets.** Abstracts. LXIV Intern. Conf. Nucleus 2014, July 1–4, Minsk, 240 (2014).
14. **О.М. Поп, М.В. Стец, В.Т. Маслюк.** Известия НАН Армении, Физика, **50**, 159 (2015).
15. **О.М. Поп, П.С. Пеняк, М.В. Стець.** Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика, **34**, 101 (2013).
16. **О.М. Поп, М.В. Стець, В.Т. Маслюк, Б.В. Мацків, Р.В. Хомутник.** Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика, **36**, 89 (2014).

#### MODEL STANDARDS IN NUCLEAR-PHYSICAL METHODS OF DETERMINING OF THE EVENT DATE

O.M. POP, M.V. STETS

The method of standard sets in which reference sample is not used, was considered. This method uses the set of ordered sequences of activities of the nuclides being the members of the  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$  series. The ordering activities of the nuclides were determined by solving a system of the Bateman–Rubinson differential equations. Calculated activities of nuclides were systematized in the table of standards. The table of standards plays the role of function of the internal mathematical standard (reference samples).