

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ Sm-Nd МОДЕЛЬНЫХ ДАТИРОВОК

Ю. Л. Ронкин, К.-Х. Хойман

В настоящее время Sm-Nd модельное датирование является широко распространенным методом оценки параметров эволюции изотопов неодима в геологических объектах [4, 7–10, 12–18 и др.]. Суть метода заключается в том, что для конкретного образца породы в целом, тем или иным способом (чаще всего масс-спектрометрическим методом изотопного разбавления), определяются современные изотопные отношения $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_S$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_S$ и, далее, вычисляется Sm-Nd модельный возраст в соответствии с известными соотношениями [7, 8, 12–16]:

$$T_M = \frac{1}{\lambda} \times \ln \left[\frac{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_S - \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_M}{\left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} \right)_S - \left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} \right)_M} + 1 \right] \quad (1),$$

где: λ – постоянная распада ^{147}Sm (6.42×10^{-12} год $^{-1}$), а индексы S и M характеризуют параметры исследуемого материала и модельного резервуара соответственно.

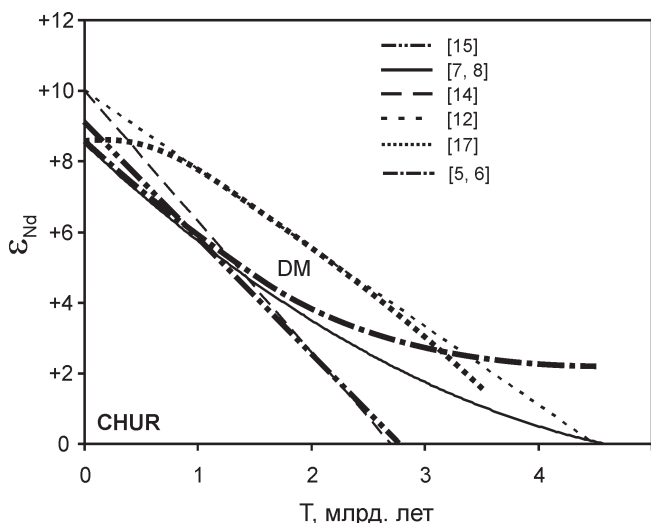


Рис. 1. Эволюция изотопов неодима (по [18] с добавлениями) в CHUR и DM.

Представлены шесть трендов, аппроксимированных прямолинейными и криволинейными зависимостями. Линейные, по [12, 14, 16], дифференцируются по начальным и конечным величинам ϵ_{Nd} и T (табл. 1). Криволинейные: $\epsilon_{Nd} = 0.25 \times T^2 - 3 \times T + 8.5$ [7, 8]; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{DM} = A \times T^2 + B \times T + C$, где $A = 1.53077 \times 10^{-5}$, $B = -0.22073 \times 6.54 \times 10^{-3}$ и $C = 0.513078$ [5, 6] рассчитана на базе данных по MORB, офиолитам, коматиитам и метеоритам.

Иными словами, на графике в координатах $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ для фигуративных точек, соответствующих синхронизированным во времени Sm-Nd изотопным составам анализируемого образца (S) и некоего модельного резервуара (M), проводится линия регрессии, наклон которой и определяется искомым модельный возраст.

В качестве модельных резервуаров чаще всего используются CHUR (CHondritic Uniform Reservoir) и DM (Depleted Mantle), характеристика которых дана в табл. 1.

При интерпретации экспериментальных Sm-Nd данных результаты модельных представлений обычно предлагаются в табличном, а также графическом виде – в координатах ϵ_{Nd} – T , где:

T – возраст, млрд. лет,

$$\epsilon_{Nd}^0 = \left[\frac{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_S}{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_M} - 1 \right] \cdot 10^4, \quad \epsilon_{Nd}^T = \left[\frac{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_S^T}{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_M^T} - 1 \right] \cdot 10^4 \quad (2),$$

а индексы 0 и T характеризуют современные и экстраполированные ко времени T значения ϵ_{Nd} соответственно.

На рис. 1, в координатах ϵ_{Nd} – T , отображена эволюция изотопов неодима в соответствии с различными представлениями [7, 8, 12–16].

К нынешнему моменту в зарубежной и отечественной литературе фигурирует огромное количество Sm-Nd модельных датировок, однако к немалому удивлению, погрешность их значений в подавляющем (!) большинстве случаев не приводится, поэтому корректное сравнение этих величин, к примеру, для одного и того же (или нескольких) объекта, провинции и т. д., не может быть реализовано, в связи с чем в настоящем изложении приводятся соотношения, позволяющие вычислить погрешности, характеризующие конкретные параметры Sm-Nd модельных систем.

Таблица 1. Некоторые параметры модельных резервуаров

Резервуар	T_{CHUR} , млрд. лет	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	Литература
CHUR	0	0.1967	0.512638	[15]
DM	4.61	0.2140	0.513160	[12]
	4.50	0.2117	0.513079	[9]
	3.52	0.2190	0.513151	[13]
	2.88	0.2220	0.513114	[16]
	2.72	0.2250	0.513142	[14]

Таблица 2. Nd модельные параметры аргиллитов верхнего венда Шкаповско-Шиханской впадины [2]

Образцы	Уровень разреза	T _{страт} [*] , млн. лет	Sm, ppm	Nd, ppm	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ	ε _{Nd} ^T ±	δε _{Nd} ^T ±	T _{DM} ^{**} , млн. лет	δT _{DM} , ± млн. лет
ИМ-12	V ₂ kar	550	2.80	16.0	0.1056	0.0005	0.51164	0.00003	-13.1	0.6	1924	40
ИМ-14		550	2.08	9.40	0.1335	0.0007	0.51198	0.00003	-8.4	0.6	1947	53
ИШ-17		550	6.46	40.2	0.0971	0.0005	0.51129	0.00002	-19.3	0.4	2217	26
ИМ-19		550	1.91	10.5	0.1099	0.0005	0.51173	0.00003	-11.6	0.6	1876	41
ИМ-1	V ₂ sal	560	11.9	64.2	0.1119	0.0006	0.51198	0.00002	-6.8	0.4	1567	29
ИМ-5		560	10.1	49.4	0.1232	0.0006	0.51209	0.00002	-5.4	0.4	1577	32
ИМ-27		560	5.45	35.3	0.0933	0.0005	0.51177	0.00003	-9.5	0.6	1588	36
ИМ-29	V ₂ stp	580	7.67	39.8	0.1166	0.0006	0.51157	0.00002	-14.9	0.4	2224	31
ИМ-17		580	12.1	51.8	0.1408	0.0007	0.51209	0.00003	-6.6	0.6	1916	58
ИМ-32	V ₂ bkb	590	4.92	30.7	0.0969	0.0005	0.51129	0.00002	-18.8	0.4	2213	26

Примечания: * – принятые для расчета ε_{Nd}^T значения стратиграфического возраста условные, ** – по данным [16]. Свиты: V₂bkb – байкибашевская; V₂stp – старопетровская; V₂sal – салиховская; V₂kar – карлинская. Определение концентраций и изотопного состава Sm и Nd выполнено масс-спектрометрическим методом изотопного разбавления с использованием смешанного трассера ¹⁴⁹Sm + ¹⁵⁰Nd и кислотного разложения исходного материала. Воспроизводимость измеренных отношений ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd контролировалась по стандартам La Jolla и BCR-2.

Расчеты основаны на использования известного закона накопления погрешностей [1, 3]. Как известно, в общем случае для функции

$$Y = f(X_1, \dots, X_k) \quad (3),$$

предельная абсолютная погрешность зависит от составляющих ее погрешностей следующим образом:

$$\delta^2 Y = \left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} \right)^2 \times (\delta X_1)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_k} \right)^2 \times (\delta X_k)^2 \quad (4),$$

где: δY – предельная погрешность; δX₁, ..., δX_k – погрешности составляющих величин.

С другой стороны, предельная относительная погрешность:

$$\frac{\delta Y}{Y} = \left| \frac{\delta Y}{f(X_1, \dots, X_k)} \right| \quad (5),$$

где δY – значение корня квадратного из выражения (3).

Таким образом, процедура вычисления погрешностей определения Nd модельного возраста и параметра ε_{Nd}, вычисленных в соответствии с выражениями (1) и (2), формально сводиться к нахождению частных производных и делению найденных δ на соответствующие функциональные зависимости. Опуская, для краткости, промежуточные выкладки, описанный выше алгоритм приводит к окончательным выражениям:

$$\delta T_M = \frac{1}{\lambda} \times \sqrt{\left[\frac{\delta \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_S}{A+B} \right]^2 + \left[\frac{\delta \left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} \right)_S \times A}{(A+B) \times B} \right]^2} \quad (6),$$

где:

$$A = \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_S - \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_M; \quad B = \left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} \right)_S - \left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} \right)_M \quad (7).$$

Вычисление погрешностей для выражений (2) определяется как:

$$\delta \epsilon_{Nd} = \frac{\delta \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_S}{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_{CHUR}} \cdot 10^4 \quad (8).$$

Приведенные выражения (6–8) справедливы и к другим изотопным системам, таким как Lu-Hf, Re-Os и т. д., в основе модельных построений которых используются аналогичные зависимости. Следует отметить, что для вычисления неопределенностей для ε_{Nd}, в литературе описан альтернативный способ [11].

В заключении приводятся Sm-Nd данные (табл. 2), по которым вычислены обсуждаемые параметры на примере серии образцов аргиллитов Шкаповско-Шиханской впадины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайдель А.Н. Погрешности измерения физических величин. Л.: Наука, 1984. 112 с.
2. Маслов А.В., Ронкин Ю.Л., Ишарская М.В. и др. Систематика редкоземельных элементов и Nd-модельный возраст аргиллитов верхнего венда Шкаповско-Шиханской впадины // Докл. АН. 2006. Т. 410. № 6. С. 799–803.
3. Налимов В.В. Применение математической статистики при анализе вещества. М.: Физматгиз, 1960. 430 с.
4. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
5. Allègre C. J., Rousseau D. The growth of the continents through geological time studied by the Nd isotopic analysis of shales // Earth Planet. Sci. Lett. 1984. V. 67. P. 19–34.
6. Ben Othman D., Polve M., Allègre C. J. Nd-Sr isotopic composition of granulites and constraints on the evolution of the lower continental crust // Nature. 1984. V. 307. P. 510–515.

7. *DePaolo D.J.* Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. V. 53. P. 189–202.
8. *DePaolo D.J.* Neodymium isotopes in the Colorado Front range and crust-mantle evolution in the Proterozoic // *Nature*. 1981. V. 291. P. 193–196.
9. *DePaolo D.J., Linn A.M., Schubert G.* The Continental Crustal Age Distribution: Method of Determining Mantle Separation Ages From Sm-Nd Isotopic Data and Application to the Southwestern United States // *J. Geophys. Res.* 1991. № 96. P. 2071–2088.
10. *Dickin A.P.* Radiogenic Isotope Geology. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995. 452 p.
11. *Fletcher I.R., Rosman K.J.R.* Precise determination of initial ϵ_{Nd} from Sm-Nd isochron data // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1982. V. 46. P. 1983–1987.
12. *Goldstein S.L., O’Nions R.K., Hamilton P.J.* A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems // *EPSL.* 1984. V. 70. P. 221–236.
13. *Liew T.C., Hofmann A.* Precambrian crustal components, plutonic associations, plate environment of the Hercynian Fold Belt of central Europe: Indications from a Nd and Sr isotopic study // *Contr. Min. Petrol.* 1988. V. 98. P. 129–138.
14. *Liew T.C., McCulloch M.T.* Genesis of granitoid batholiths of Peninsular Malaysia and implications for models of crust evolution: Evidence from a Nd-Sr isotopic and U-Pb zircon study // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1985. V. 49. P. 587–600.
15. *McCulloch M.T., Wasserburg G.J.* Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation // *Science.* 1978. V. 200. P. 1003–1011.
16. *Michard A., Gurriet P., Soudant M., Albarede F.* Nd isotopes in French Phanerozoic shales: external vs. internal aspects of crustal evolution // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1985. V. 49. P. 601–610.
17. *Nelson B.K., DePaolo D.J.* 1700 Myr greenstone volcanic successions in southwestern North America and isotopic evolution of Proterozoic mantle // *Nature.* 1984. № 312. P. 143–146.
18. *Rollinson H.R.* Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation, 1993, Longman, UK. 352 p.