

Rb-Sr метод определения абсолютного возраста

Введение

Rb и Sr в периодической системе

Rb и Sr в таблице нуклидов

Радиоактивный распад и образование новых изотопов

Rb-Sr изохронная диаграмма

Датирование магматических пород

Датирование метаморфических пород

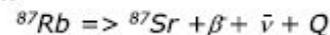
Sr в морских карбонатах

Выводы

Выводы

- Рубидий (Rb) легко замещает калий (K) в минералах. K-содержащие минералы, такие как мусковит, биотит, амфибол и калиевый полевой шпат, подходят для Rb-Sr метода определения возраста.

- Rb-Sr метод основан на радиоактивном распаде ^{87}Rb и превращении его в ^{87}Sr по механизму β^- распада и может быть описан уравнением:



- Радиоактивный распад ^{87}Rb и образование ^{87}Sr во времени (нормированное на ^{86}Sr) может быть описано с помощью уравнения:

$$\text{Уравнение 1} \quad \frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_i + \frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}} (e^{\lambda t} - 1)$$

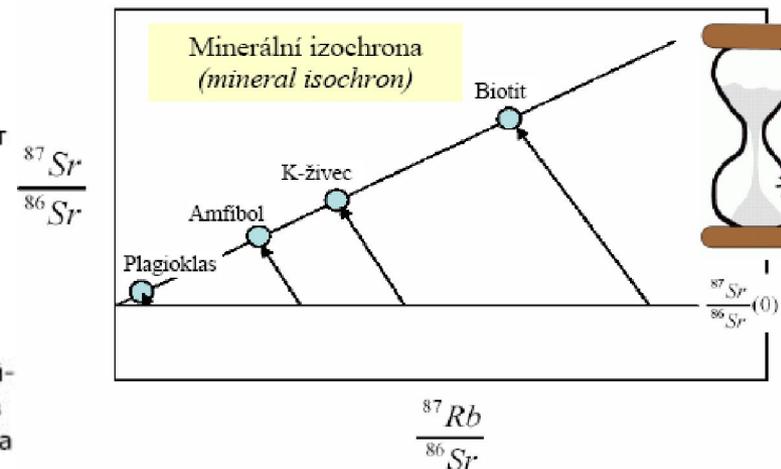
где t (время) является единственным неизвестным.

- Когда $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ отношения в какой-либо геологической системе (в минерале или в породе) известно, время, прошедшее с момента закрытия системы в отношении Rb и Sr может быть рассчитано по уравнению 1.

- Изохронная диаграмма с $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ в качестве горизонтальной оси и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в качестве вертикальной оси является графическим выражением уравнения 1.

- Рассчитанный возраст может представлять время, прошедшее с момента кристаллизации породы или время, прошедшее с какого-то метаморфического события.

- Отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в морских карбонатах может быть использовано для определения возраста отложения осадков.



Большое спасибо «Статойл» за спонсорскую поддержку создания этого раздела.

Sm-Nd метод

Sm и Nd в периодической системе

1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89**	104	105	106	107	108	109									
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									

* 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71
Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu

** 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103
Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lw

Самарий (Sm) и неодим (Nd) принадлежат к группе лантаноидов, которые также

называются редкоземельными элементами (или РЗЭ).

Уменьшение ионных радиусов



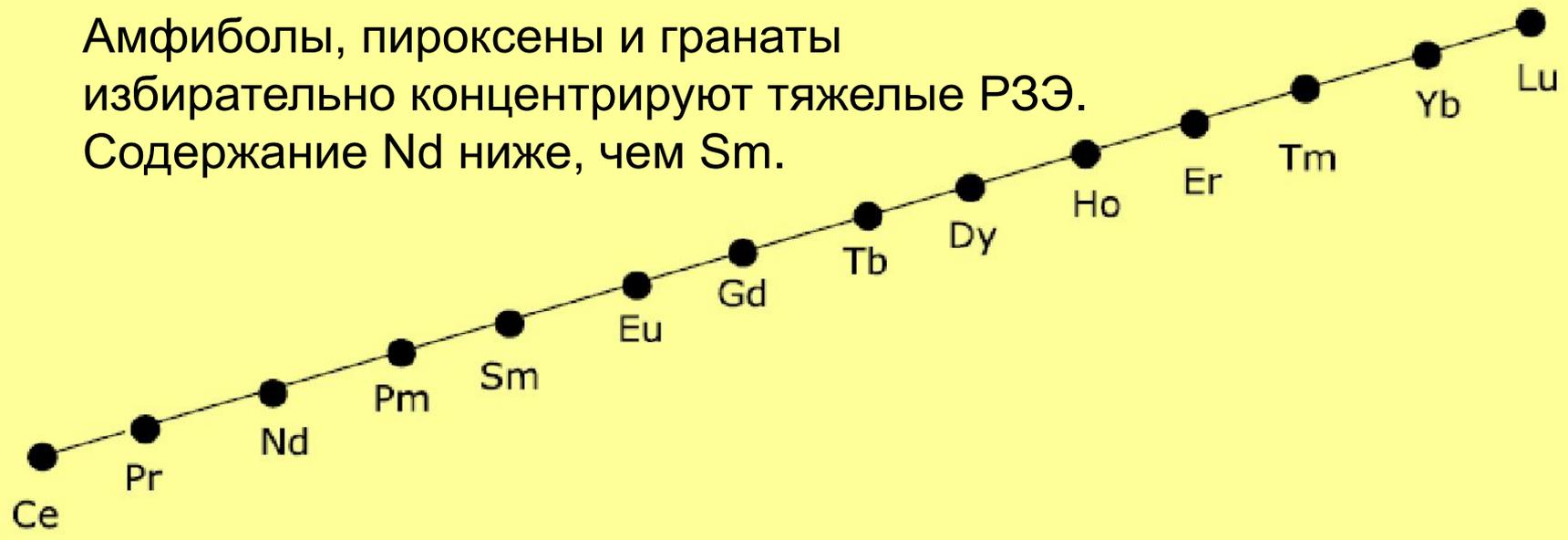
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

Ионный радиус =
1.14 Ангстрем

Ионный радиус
= 0.93 Ангстрем

Гипотетические концентрации
РЗЭ в гипотетическом минерале

Амфиболы, пироксены и гранаты
избирательно концентрируют тяжелые РЗЭ.
Содержание Nd ниже, чем Sm.



Как Sm, так и Nd имеют по 7 изотопов, встречающихся в естественных условиях.

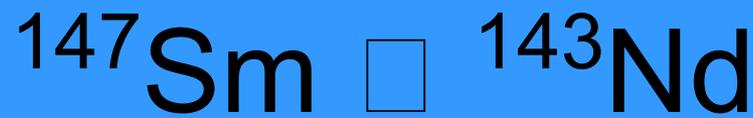
Количество протонов (Z)

62	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154
	Sm	Sm	Sm	Sm	Sm	Sm	Sm	Sm	Sm	Sm	Sm
61	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153
	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm
60	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152
	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
	Количество нейтронов (N)										

Количество протонов (Z)

62	3.1	145	146	15.0	11.2	13.8	7.4	151	26.7	153	22.8
		Sm	Sm					Sm		Sm	
61	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153
	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm	Pm
60	27.1	12.2	23.9	8.3	17.2	147	5.7	149	5.6	151	152
						Nd		Nd		Nd	Nd
	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
	Количество нейтронов (N)										



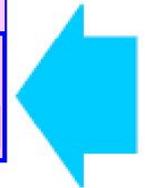


• $T_{1/2} = 1.06 \cdot 10^{11}$ лет

$$\lambda = 6.54 \times 10^{-12}$$

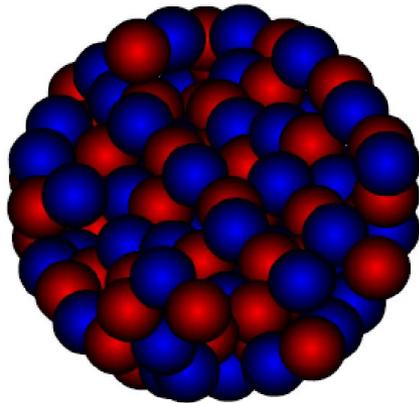
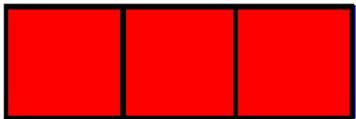
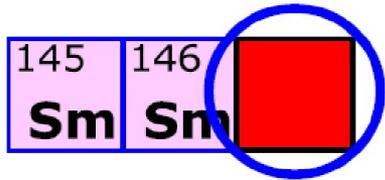
Количество протонов (Z)

62	3.1	145 Sm	146 Sm	15.0	11.2	13.8	7.4	151 Sm	26.7	153 Sm	22.8
61	143 Pm	144 Pm	145 Pm	146 Pm	147 Pm	148 Pm	149 Pm	150 Pm	151 Pm	152 Pm	153 Pm
60	27.1	12.2	23.9	8.3	17.2	147 Nd	5.7	149 Nd	5.6	151 Nd	152 Nd
	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
	Количество нейтронов (N)										



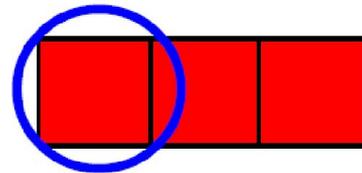
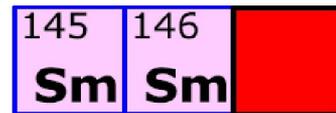
В минерале или горной породе, которая представляет собой закрытую систему в отношении Sm и Nd, количество атомов ^{147}Sm уменьшается с течением времени в результате радиоактивного распада, а количество атомов ^{143}Nd соответственно

увеличивается. Изотоп ^{144}Nd не является радиоактивным или радиогенным. Поэтому количество атомов ^{144}Nd не меняется с течением времени, что делает удобным его использование в качестве стандарта.

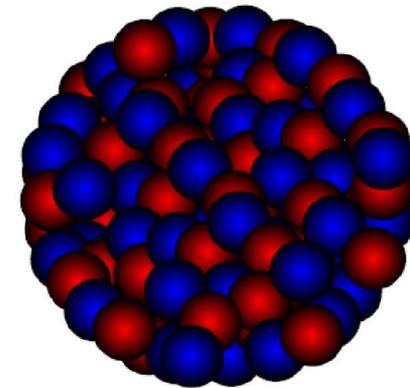
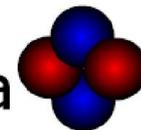


^{147}Sm

α-распад



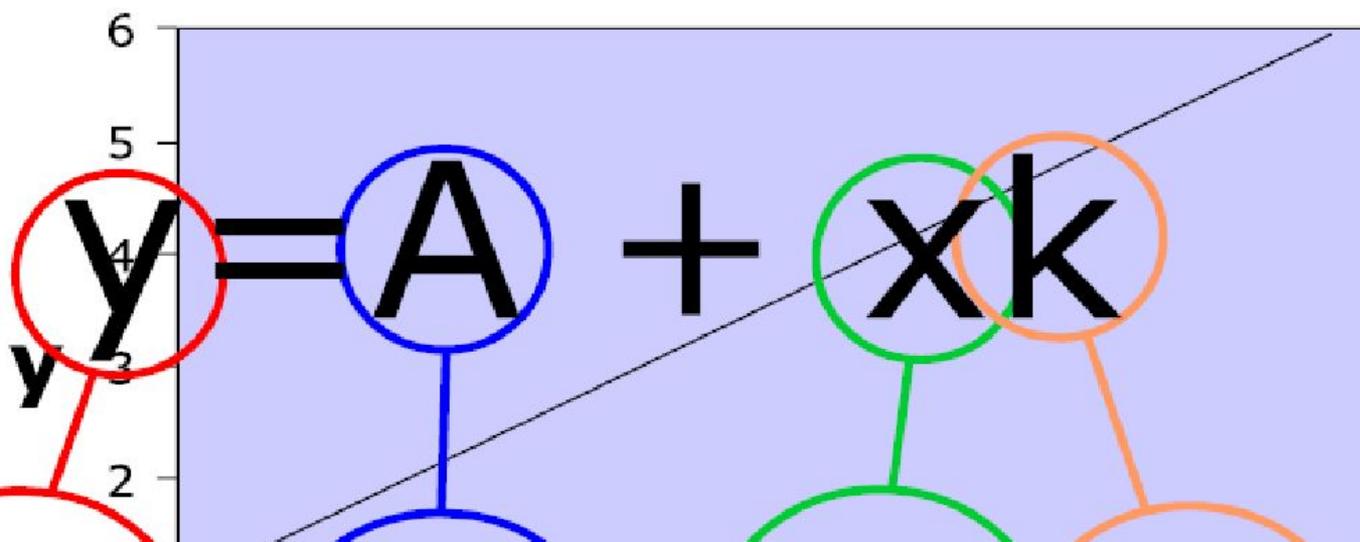
α-частица



^{143}Nd

$$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} = \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}\right)_i + \frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} (e^{\lambda t} - 1)$$

Изохронная диаграмма



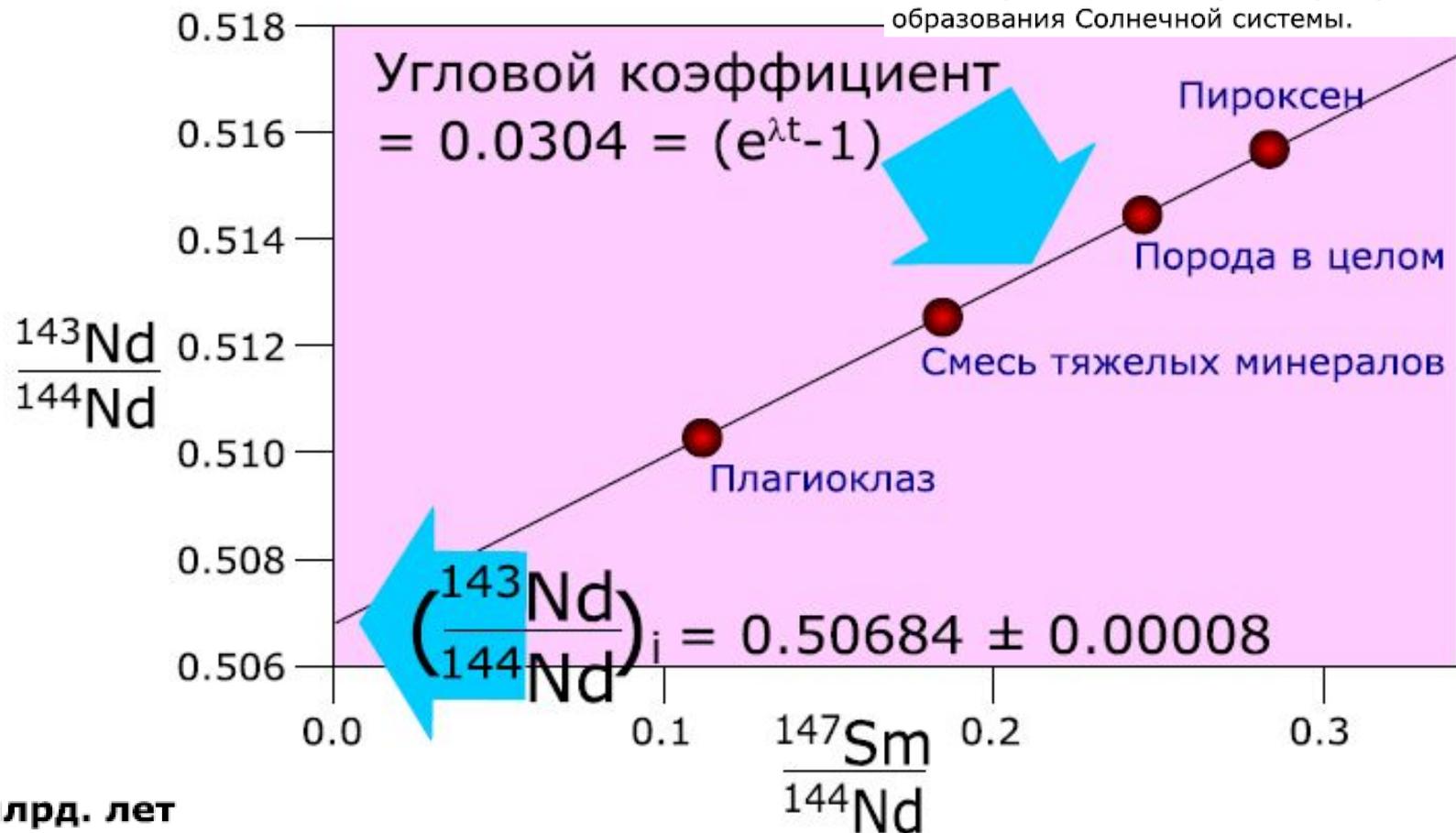
Eq. 1)

$$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} = \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}\right)_i + \frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} (e^{\lambda t} - 1)$$

x

Возраст кристаллизации

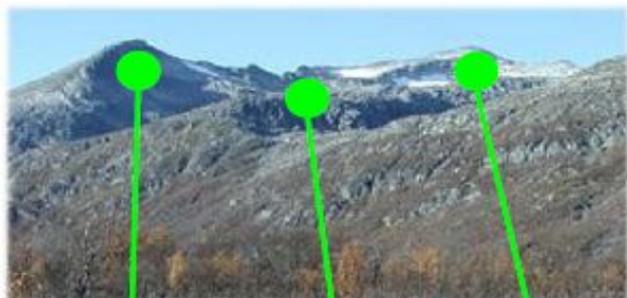
Метеорит Моама это один из многих метеоритов, который образовался примерно 4.58 млрд. лет назад. Предполагается, что этот возраст соответствует возрасту образования Солнечной системы.



Для примера рассмотрим реальные данные, полученные для метеорита Моама (Hamel et al. 1978). Четыре образца из метеорита были подготовлены для анализа на масс-спектрометре: 1) концентрат плагиоклаза, 2) концентрат тяжелых минералов, 3)

концентрат пироксена и 4) небольшой фрагмент самого метеорита (порода в целом). После выполнения анализов их результаты были нанесены на диаграмму, показанную сверху.

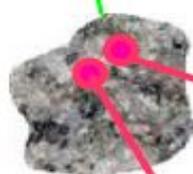
Возраст метаморфизма



R1



R2

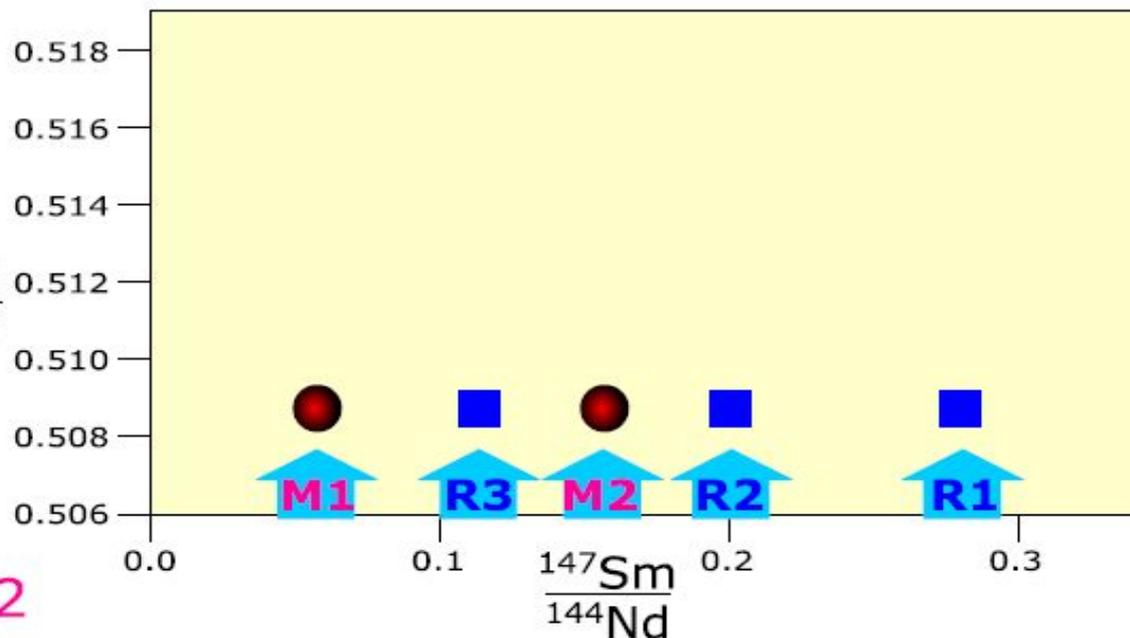


R3

M1

M2

$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$

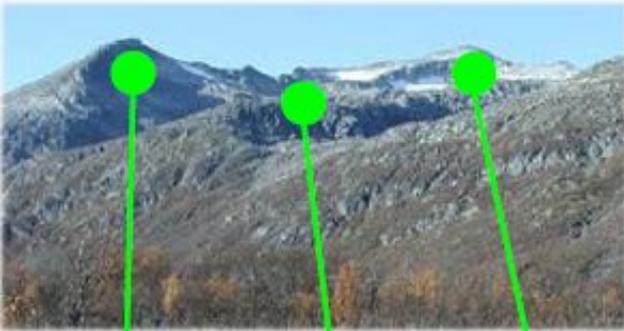


Время = 0 (4.5 млрд. лет назад)

отношения $\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$. Однако, величина отношения $\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$ в разных минералах и в разных объемах породы не была одинаковой, поскольку некоторые минералы во время кристаллизации избирательно концентрируют тяжелые РЗЭ, и поэтому обогащаются Sm по сравнению с Nd, а другие концентрируют легкие РЗЭ, и поэтому обогащаются Nd по сравнению с Sm.

R1, R2 и R3 это три образца магматической горной породы, которая слагает горы на фото сверху. M1 и M2 это два минерала из образца R3. Представим себе, что эта порода образовалась 4.5 млрд. лет назад и рассмотрим момент ее образования. В магме, из которой образовалась порода, изотопы ^{143}Nd и ^{144}Nd были распределены равномерно. Поэтому сразу после кристаллизации магмы все минералы этой породы имели сходные

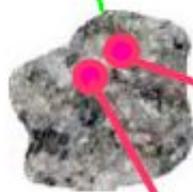
Возраст метаморфизма



R1



R2

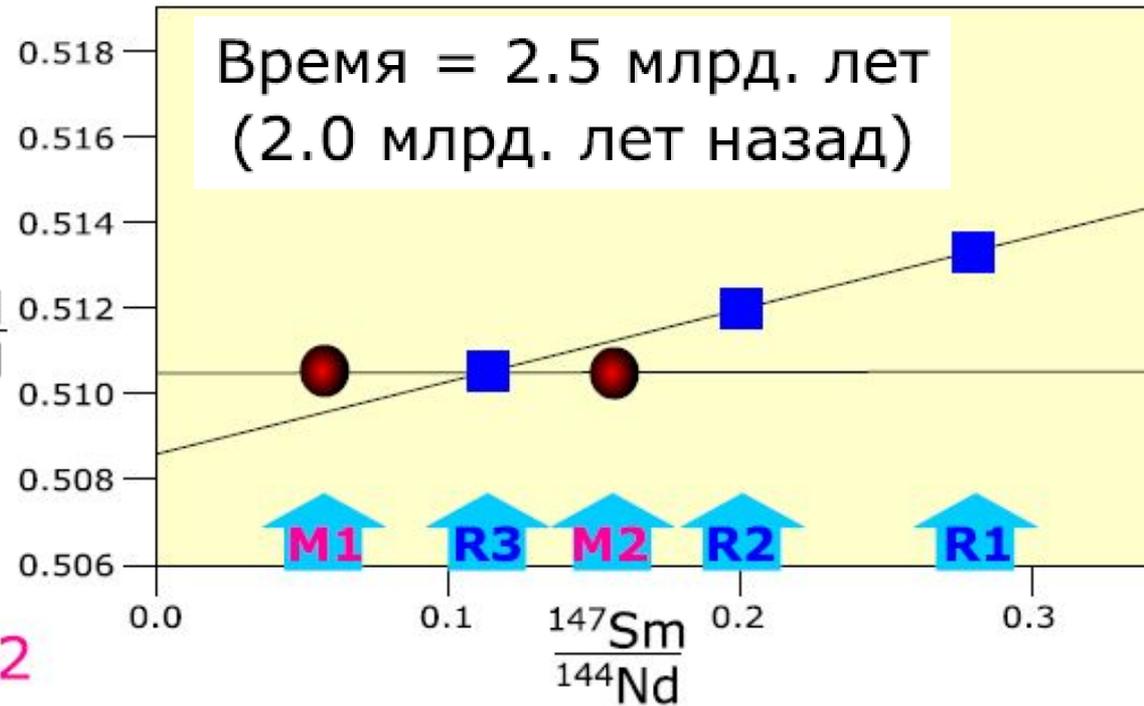


R3

M1

M2

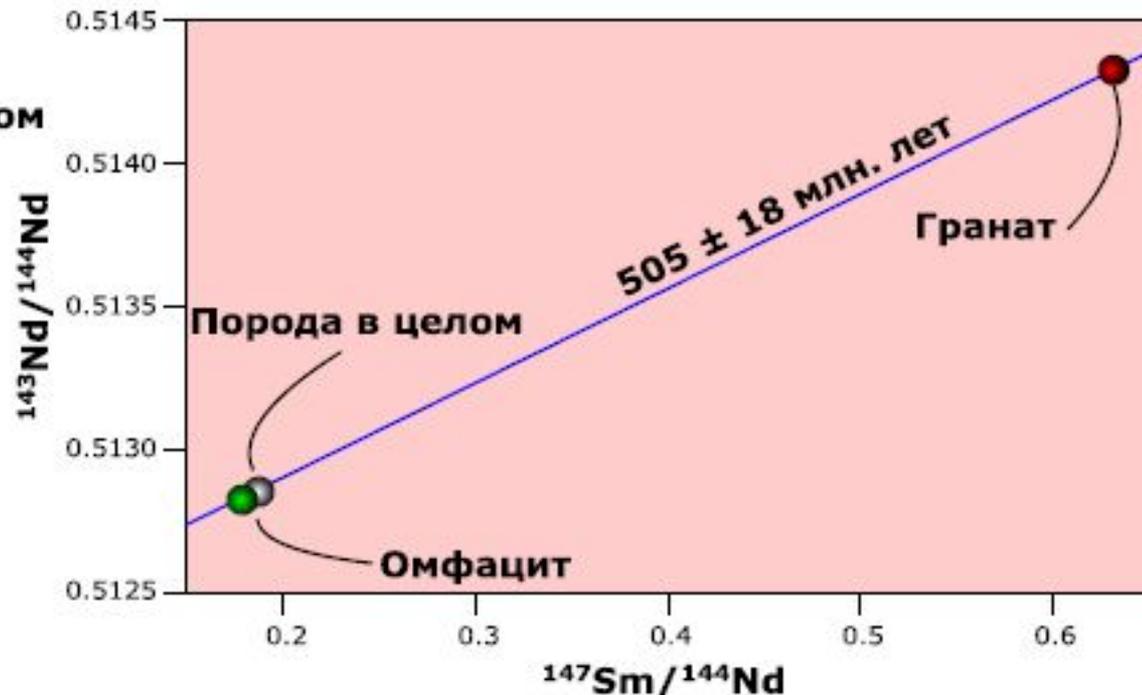
$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$



После понижения температуры Nd перестал быть мобильным и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ отношения в разных минералах стали опять увеличиваться с разной скоростью. Через 4.5 млрд. лет после кристаллизации горной породы различные образцы породы лежат на

изохроне соответствующей возрасту кристаллизации породы. Однако, образец R3 и два минерала из этого образца M1 и M2 лежат на другой изохроне, соответствующей возрасту метаморфического события.

Метаморфизм высокого давления в Скандинавских Каледонидах

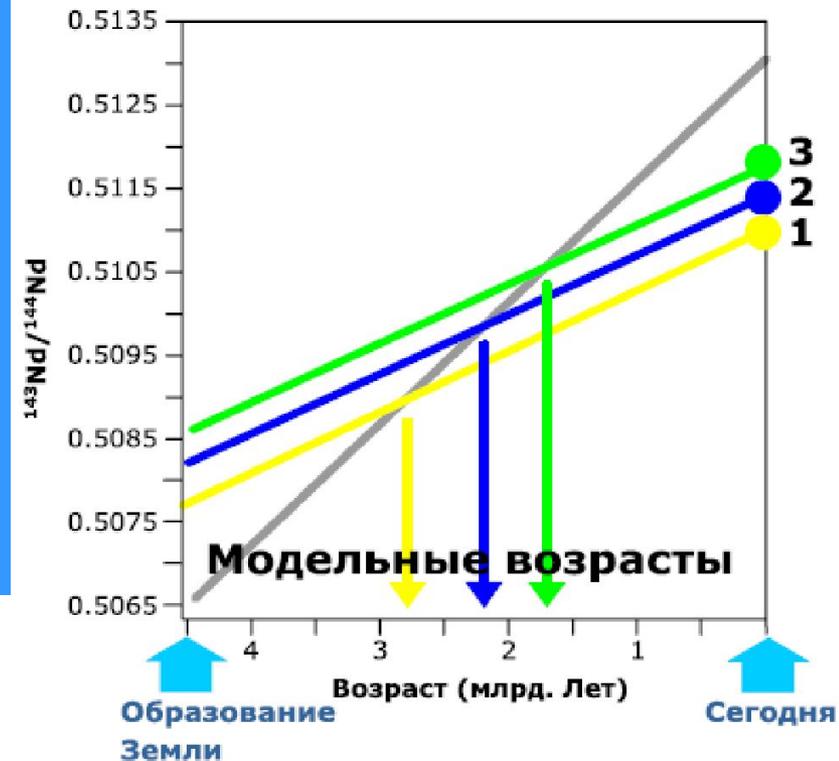


Датированный эклогит, вероятно, образовался в зоне субдукции во время закрытия океана Япетус. Это событие является ранней стадией Каледонской орогении. На более поздней стадии эклогит-

содержащие толщи были надвинуты в составе крупного покрова на докембрийское основание и заняли свое сегодняшнее положение.

Сразу после образования новой коры отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в ней было такое же как в мантии (около 0.5090). Однако, в процессе частичного плавления расплав избирательно обогащается Nd по сравнению с

Sm. Поэтому новообразованная кора имела более низкое отношение $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$, чем мантия. Благодаря этому, последующий рост отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в коровых породах происходил медленнее, чем в мантии.



Если известны значения отношений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ в породе в настоящее время (present), то значение отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в ней в любой другой момент времени (t) может быть вычислен с помощью уравнения:

$$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{present}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{present}} (e^{\lambda t} - 1)$$

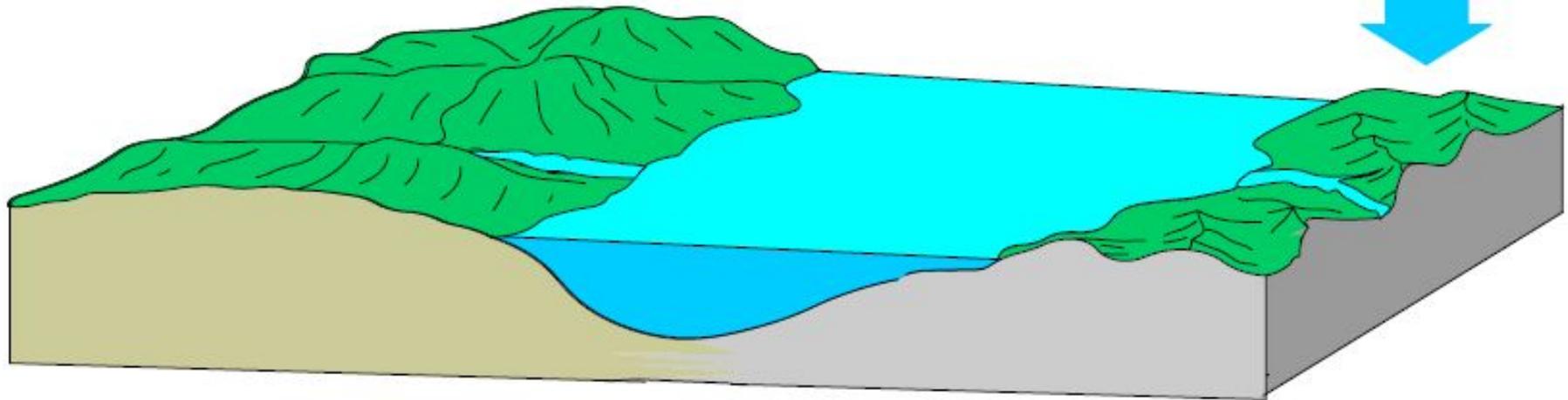
как показано на диаграмме сверху.

Возраст источника вещества осадочных пород

Модельный возраст
пород = 1000 млн. лет

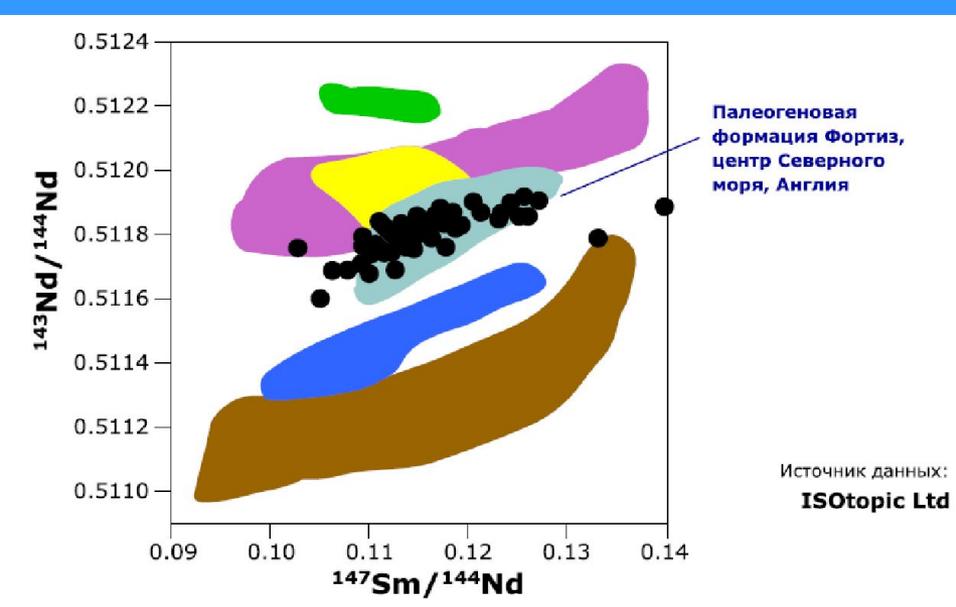
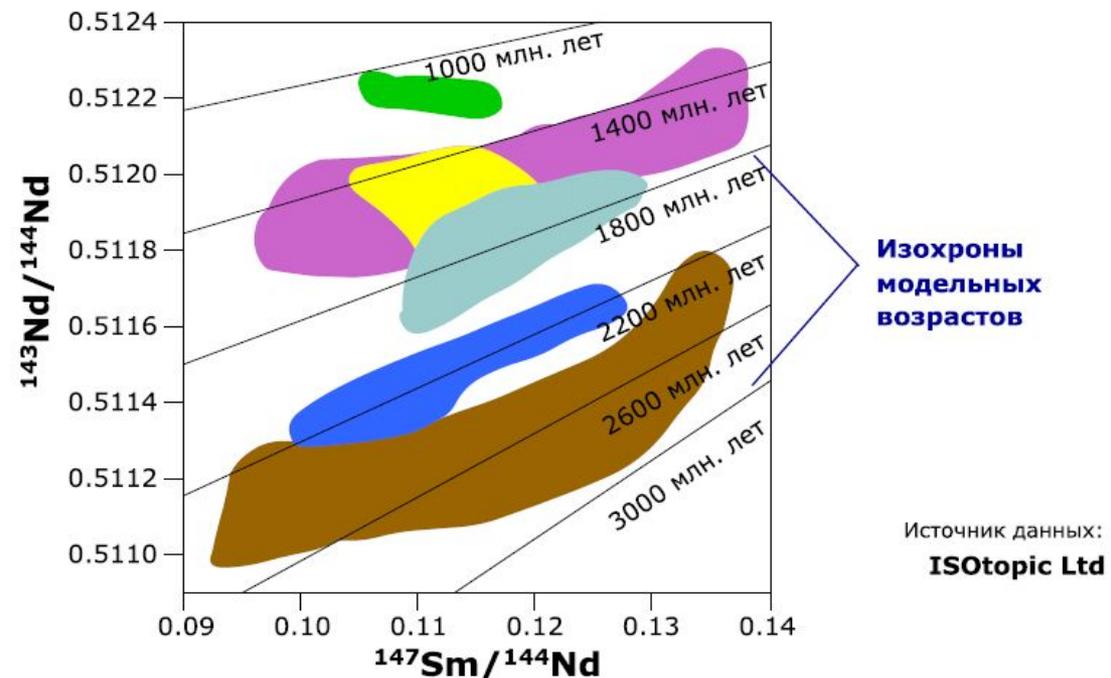
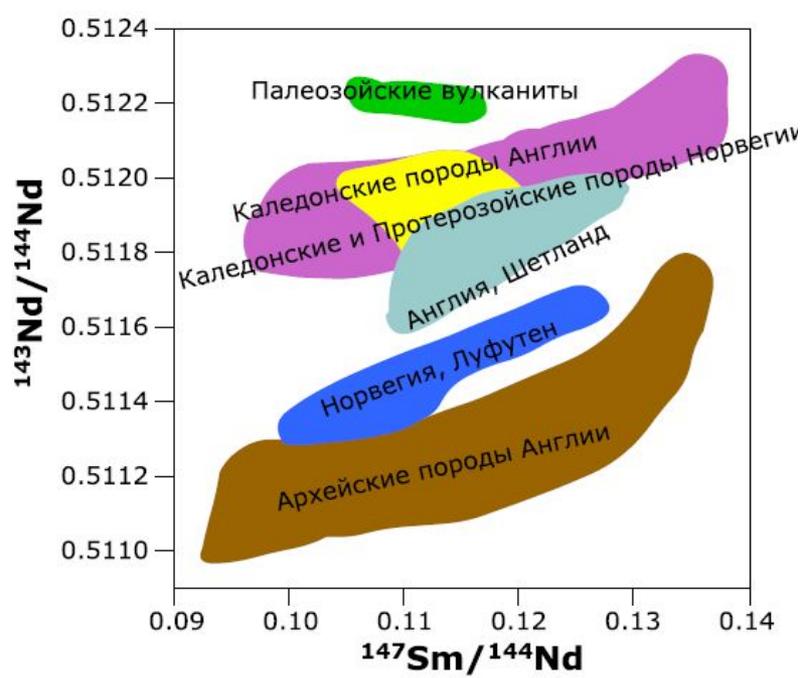


Модельный
возраст пород =
2500 млн. лет



Растворимость Sm и Nd в воде чрезвычайно низка. Поэтому осадки сохраняют Sm-Nd изотопный состав тех пород, при эрозии которых они образовались. Таким образом, Sm-Nd изотопный состав осадочной породы

позволяет оценить средний возраст источника вещества, из которого она образовалась. Этот возраст называется возрастом источника вещества осадочной породы.



● Sm-Nd изотопный состав осадочных пород может использоваться для оценки возраста их источника

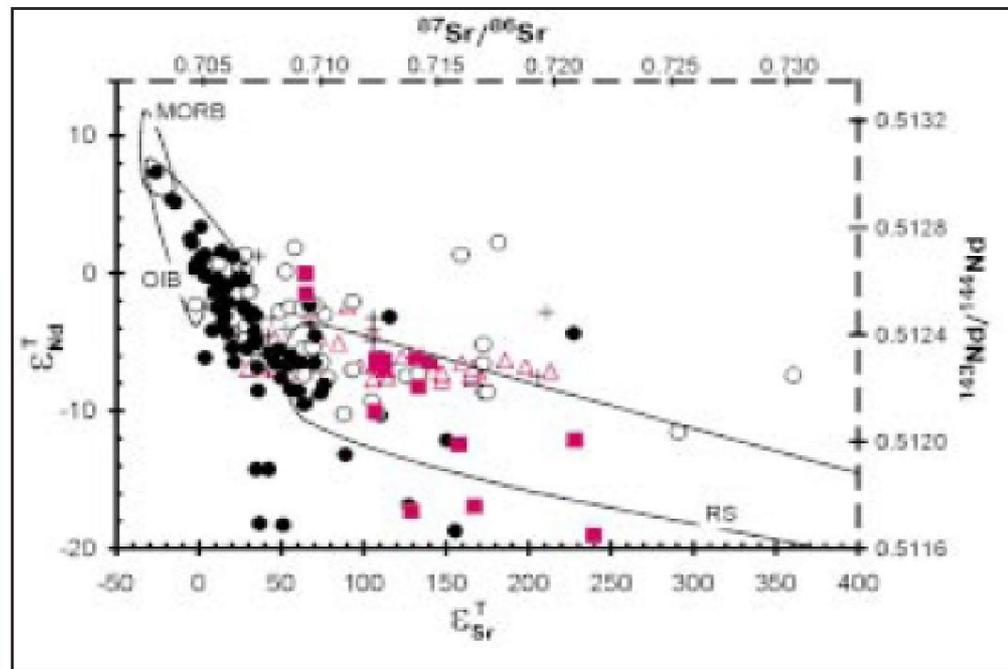
Изотопные отношения на рисунке представлены в виде единиц ϵ (эпсилон), которыми обозначают десятитысячные доли отклонения данного изотопного отношения от величины, средней для Земли:

$$\epsilon_{Nd}^T = 10^4 \times \left(\frac{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})^T_s}{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})^T_{BE}} - 1 \right)$$

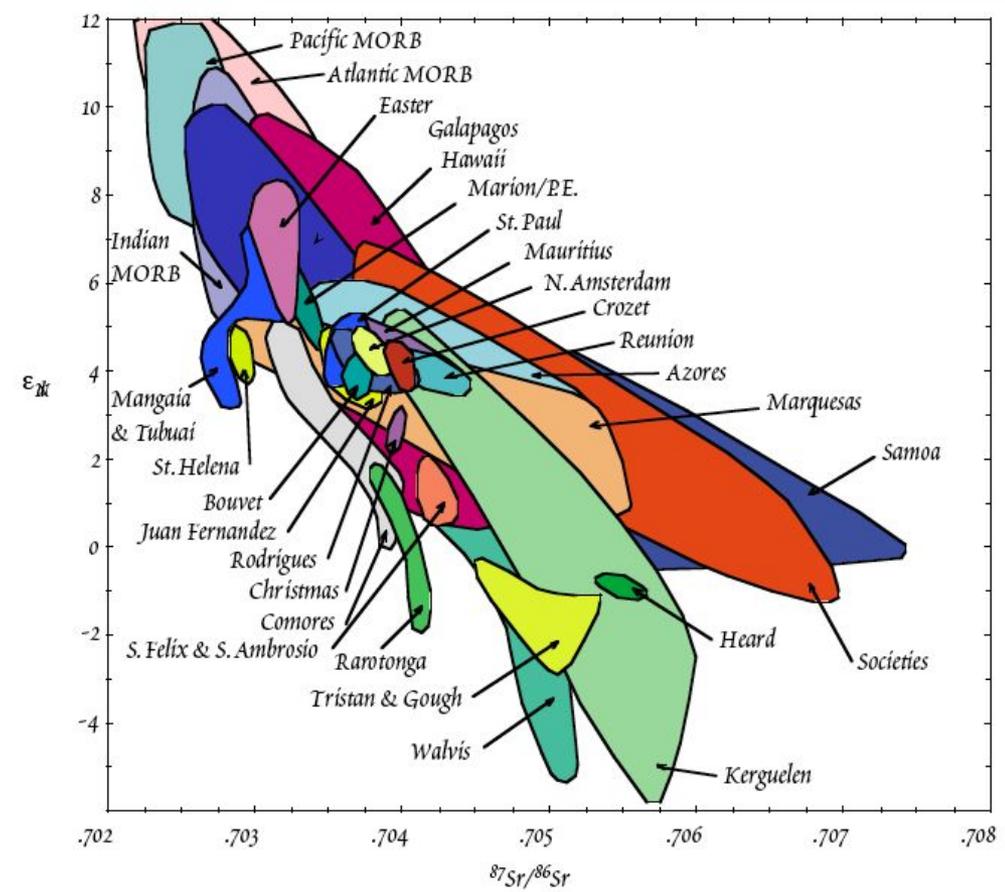
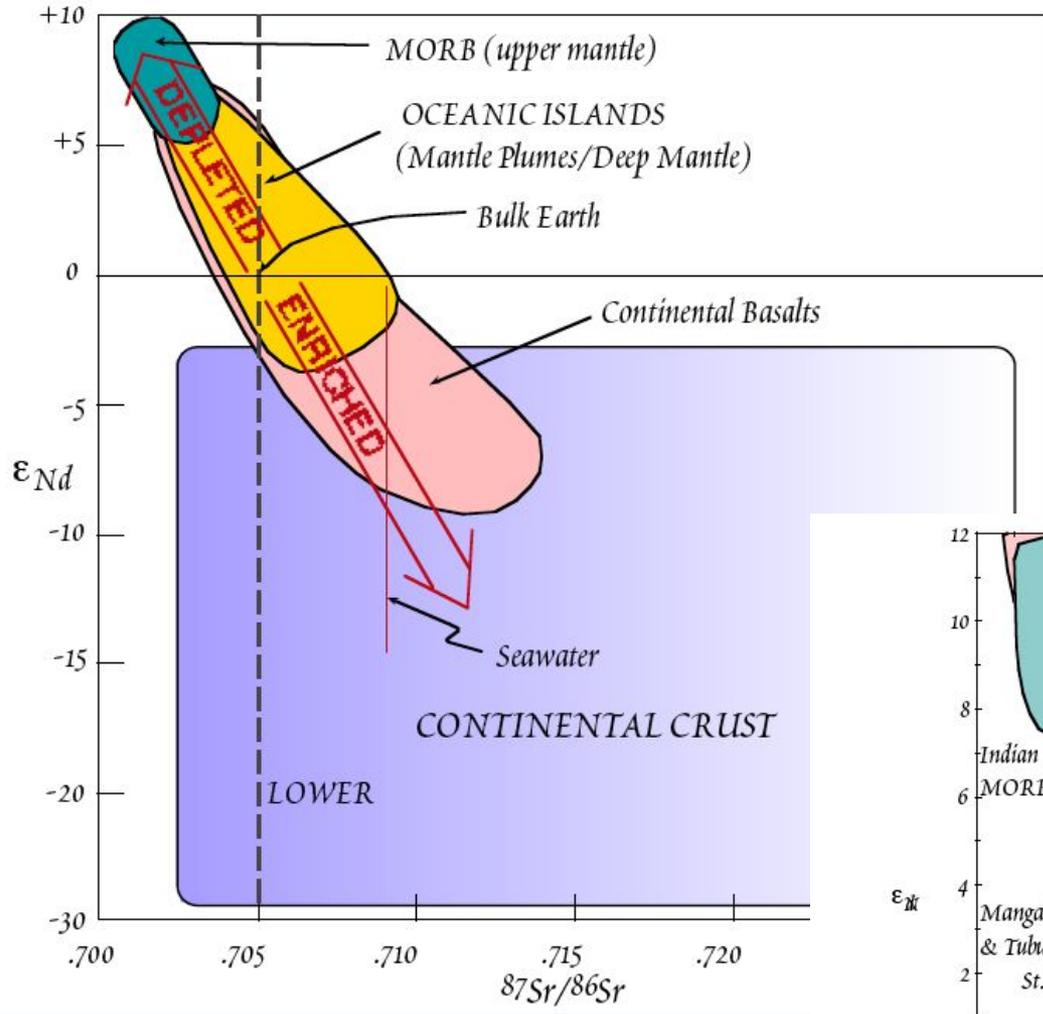
и

$$\epsilon_{Sr}^T = 10^4 \times \left(\frac{(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})^T_s}{(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})^T_{BE}} - 1 \right)$$

Противоположное изменение Rb/Sr (возрастает к кислым г.п.) и Sm/Nd (к основным) в ходе формирования земной коры.



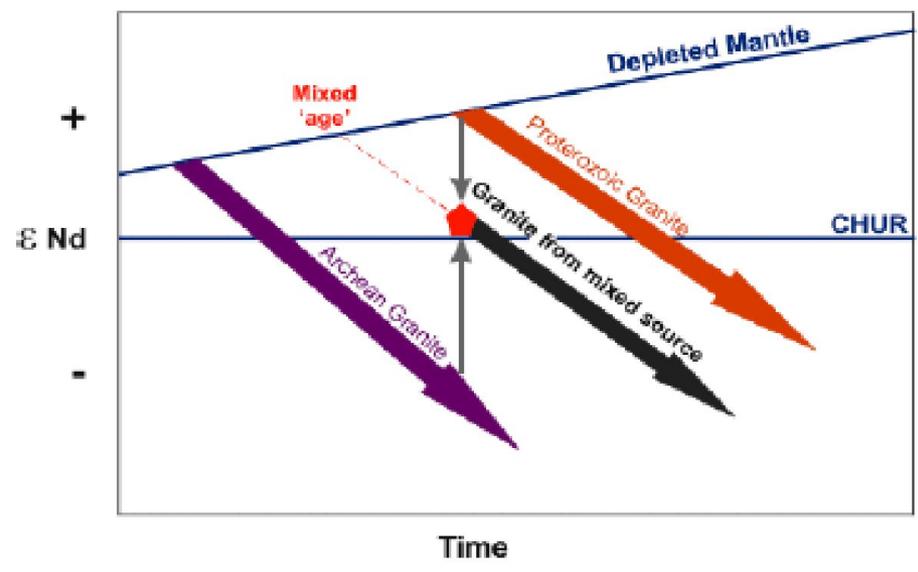
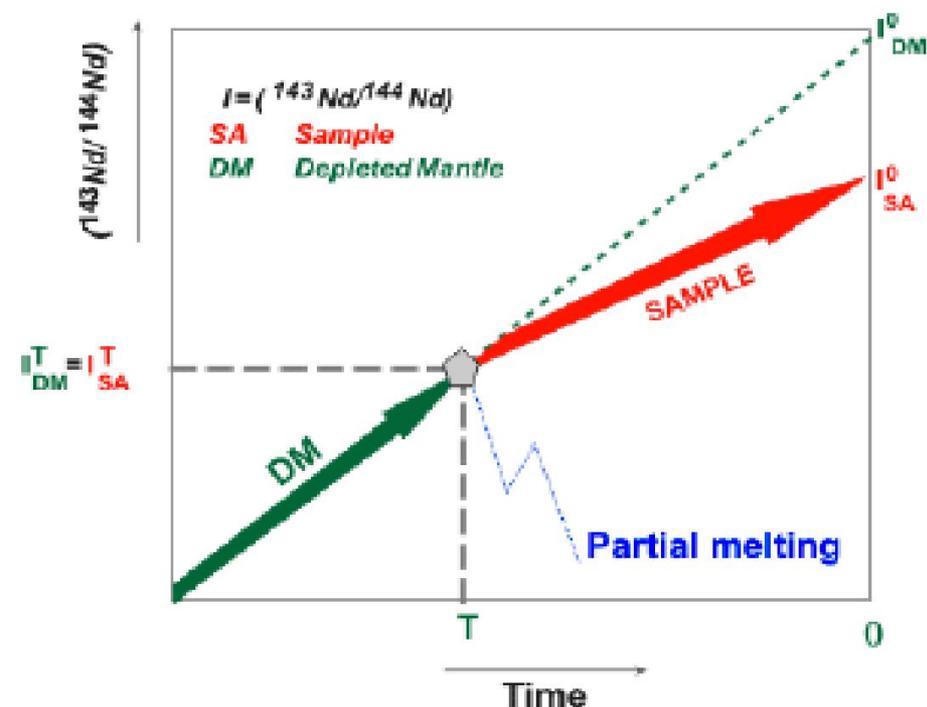
- | | |
|--------------------------|--------------------|
| Редкометалльные граниты: | Безрудные граниты: |
| △ High-P | ● I-тип |
| ○ Low-P | ■ S-тип |
| | + Грейзены |



- Изотопная эволюция Nd на Земле аппроксимируется моделью, называемой CHUR (chondritic uniform reservoir – однородный хондритовый резервуар).
- Модель предполагает, что земной Nd эволюционировал в однородном резервуаре протопланетного вещества. CHUR – это общий резервуар, порождающий магмы путем частичного плавления – имеющие более низкие отношения Sm/Nd и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ по сравнению с CHUR. Ресститы, остающиеся после селективной выплавки, имеют более высокие отношения.

- ϵ **Nd** – отклонения первичных отношений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в магматических и метаморфических породах от соответствующих отношений в CHUR.
- Положительные значения ϵ **Nd** – породы произошли из остаточных твердых фаз резервуара после удаления из него магмы в некоторый более ранний момент времени.
- Отрицательные значения ϵ **Nd** – породы образовались при переработке и ассимиляции древних коровых пород.
- **T(DM)** - предполагаемое время отделения вещества пород (протолита) от обедненной деплетированной мантии по измеренному изотопному составу современного и первичного неодима. Задают нижний возрастной предел для исследованных пород. Нельзя использовать в качестве оценки реального возраста пород.

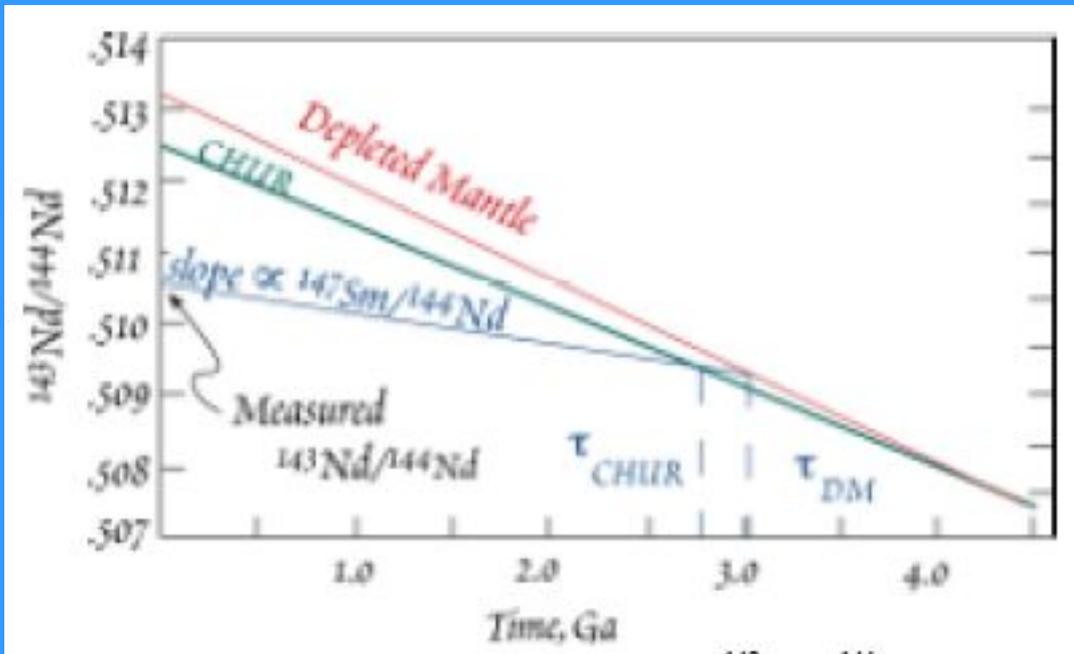
$$\epsilon_{Nd}^i = \left(\frac{\left(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd} \right)_i^{VZ}}{\left(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd} \right)_{CHUR}} - 1 \right) \times 10^4$$



Модельный возраст

- **T(DM)** - предполагаемое время отделения вещества пород (протолита) от обедненной деплетированной мантии по измеренному изотопному составу современного и первичного неодима. Задает нижний возрастной предел для исследованных пород. Нельзя использовать в качестве оценки реального возраста пород.

Sm-Nd модельные возраста



$$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{sam}} = ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_0 + ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{sam}} (e^{\lambda t} - 1)$$

$$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} = ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_0 + ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}} (e^{\lambda t} - 1)$$

$$\tau_{\text{CHUR}} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{sam}} - ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}}{^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{sam}} - ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}} + 1 \right)$$

$$\tau_{\text{DM}} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{sam}} - ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}}}{^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{sam}} - ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}}} + 1 \right)$$

Отличия Sm-Nd и Rb-Sr метода

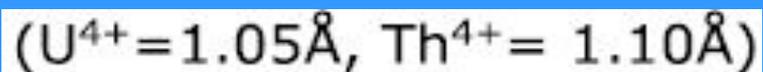
- Схожесть геохимических свойств Sm и Nd, в результате чего Sm/Nd отношение в породах и минералах варьирует слабо. Большой период полураспада Sm – поэтому метод в основном используется для древних пород.
- Sm-Nd метод используется главным образом для датирования основных пород

U-Pb метод

U, Th and Pb in the periodic table

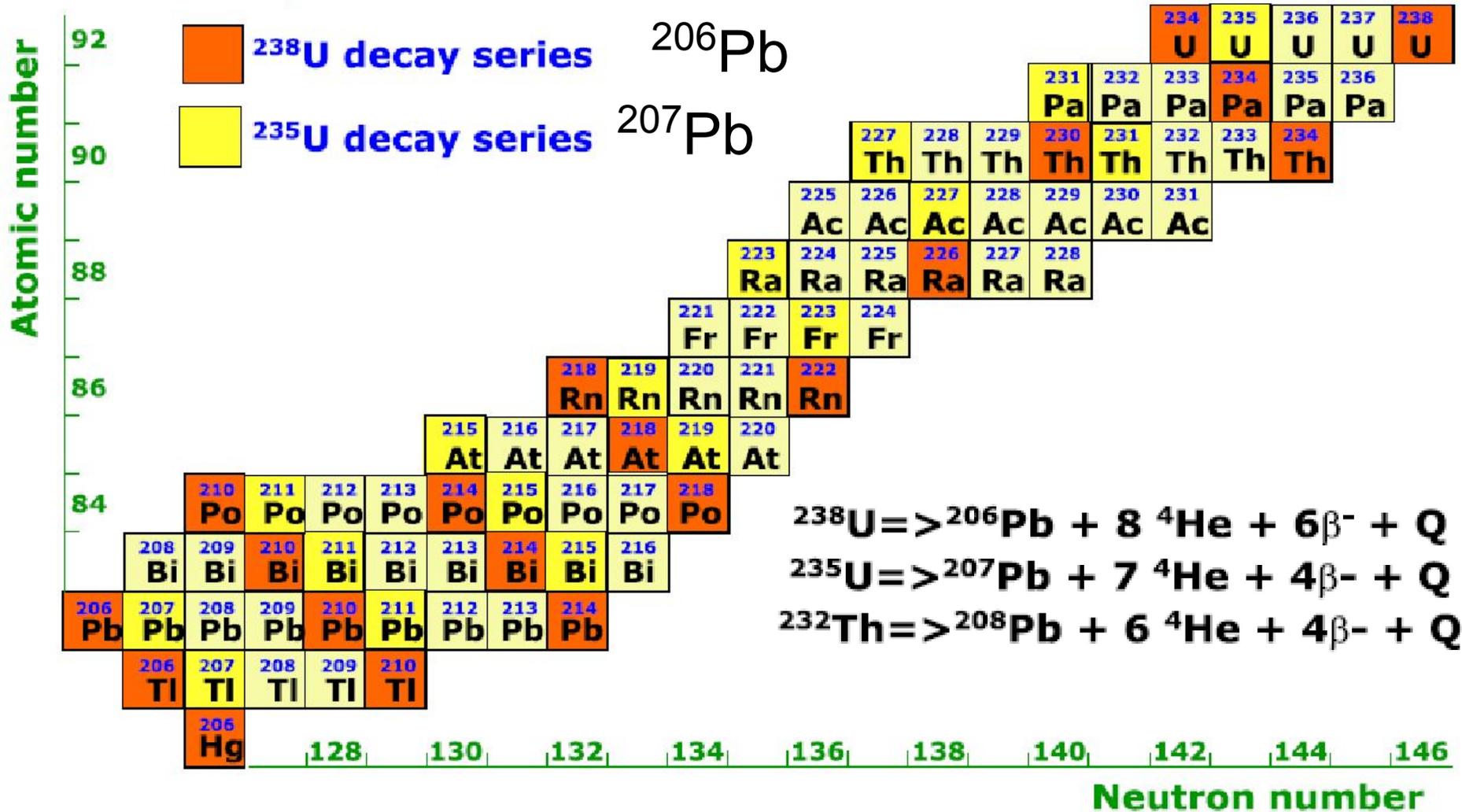
1																	2	
H																	He	
3	4											5	6	7	8	9	10	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
11	12											13	14	15	16	17	18	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
87	88	89	104	105	106	107	108	109										
Fr	Ra	Ac**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
			*58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			**90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw		

U и Th имеют близкий ионный радиус.

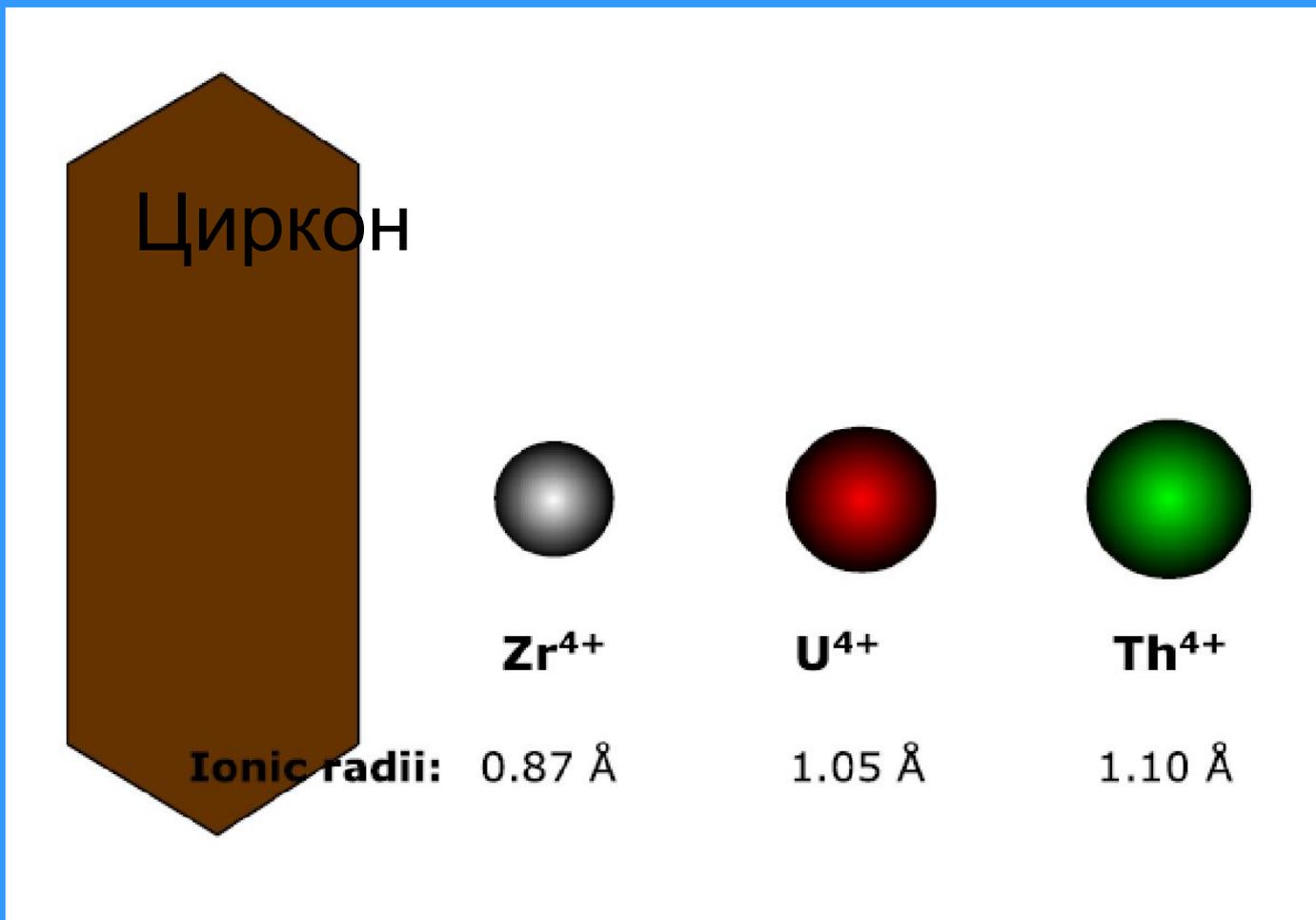


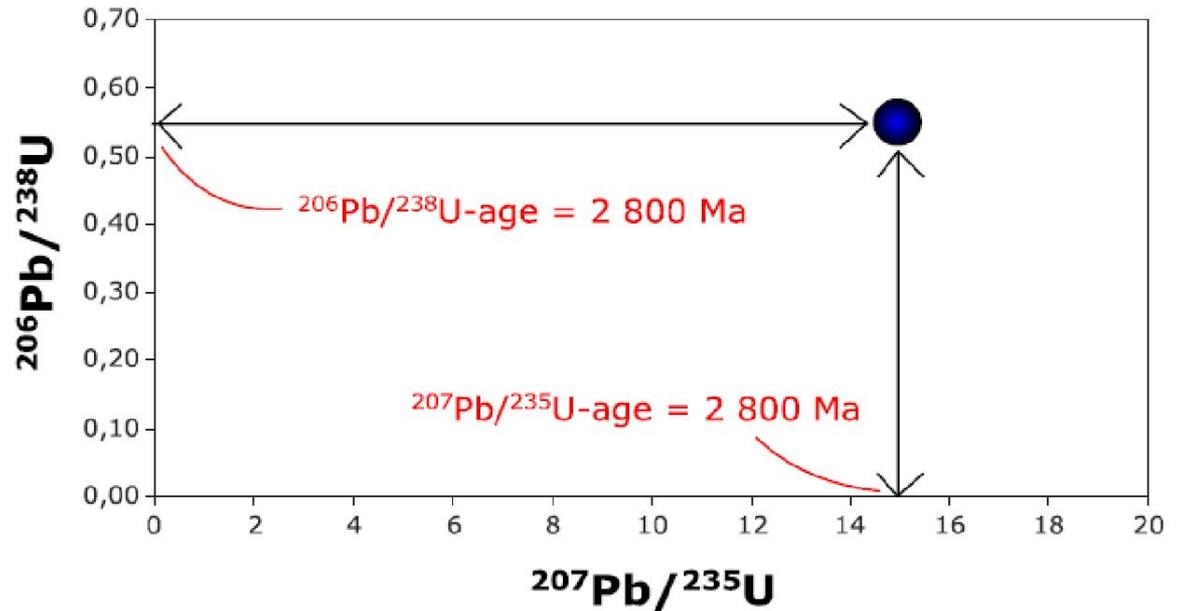
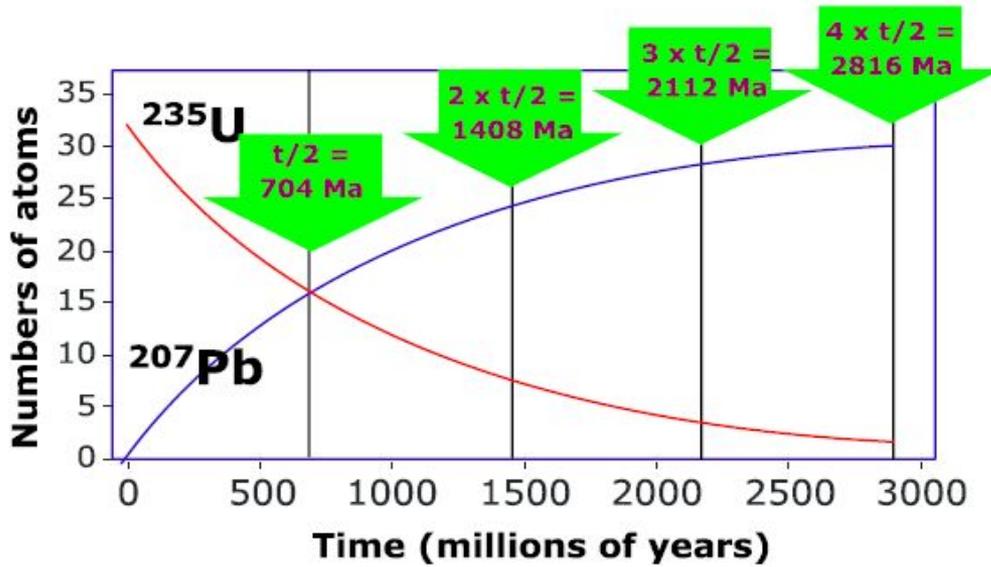
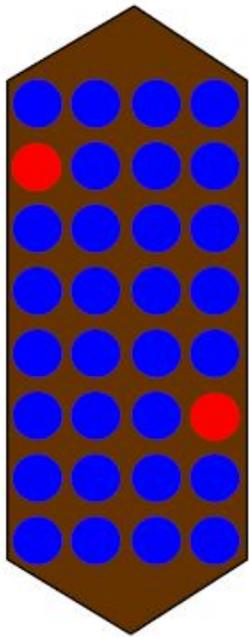
Цепочки распада Th и U

The ^{232}Th decay series ^{208}Pb



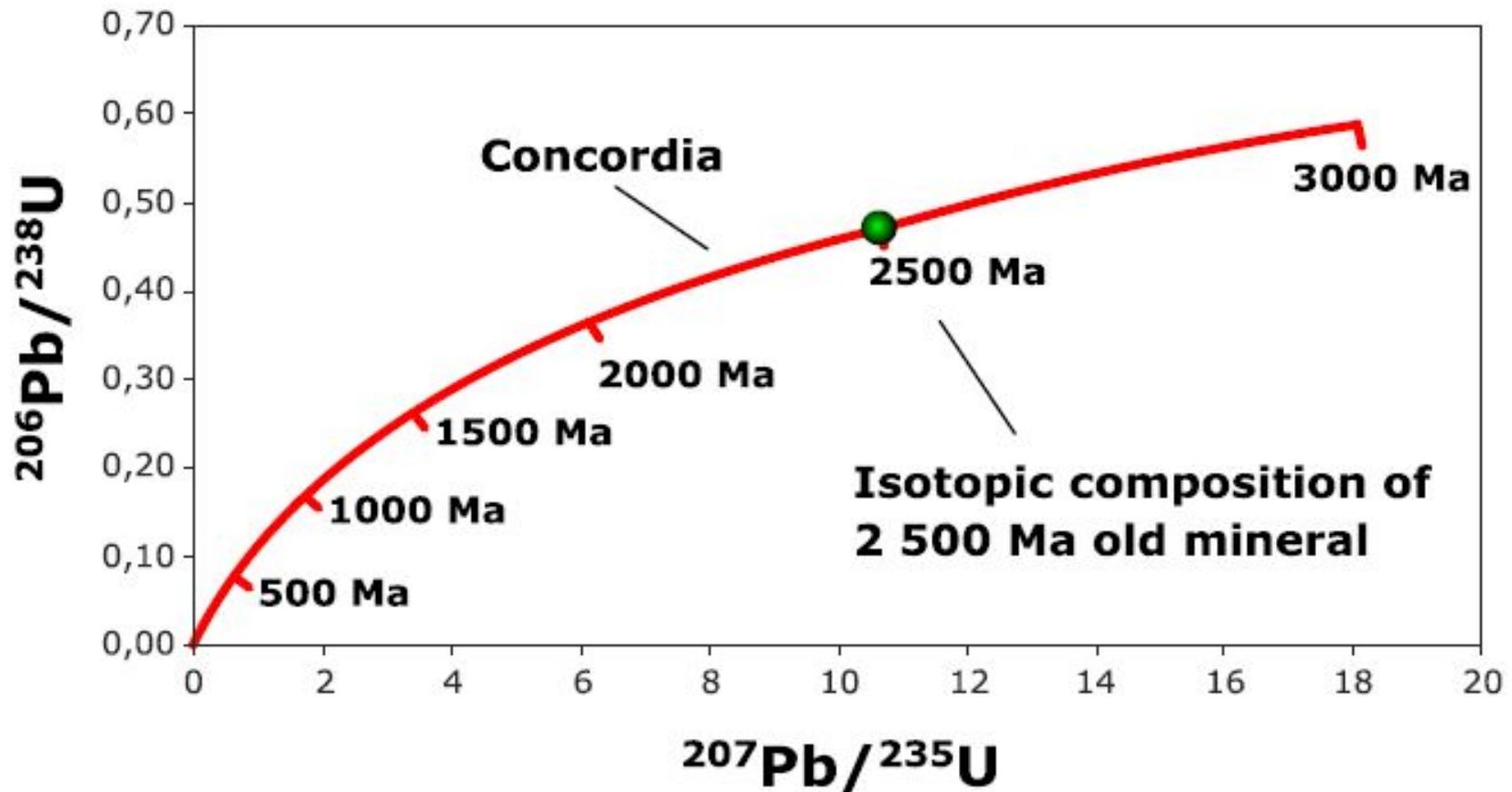
У Rb большой ионный радиус и низкая валентность 2, чтобы удерживаться в структуре циркона



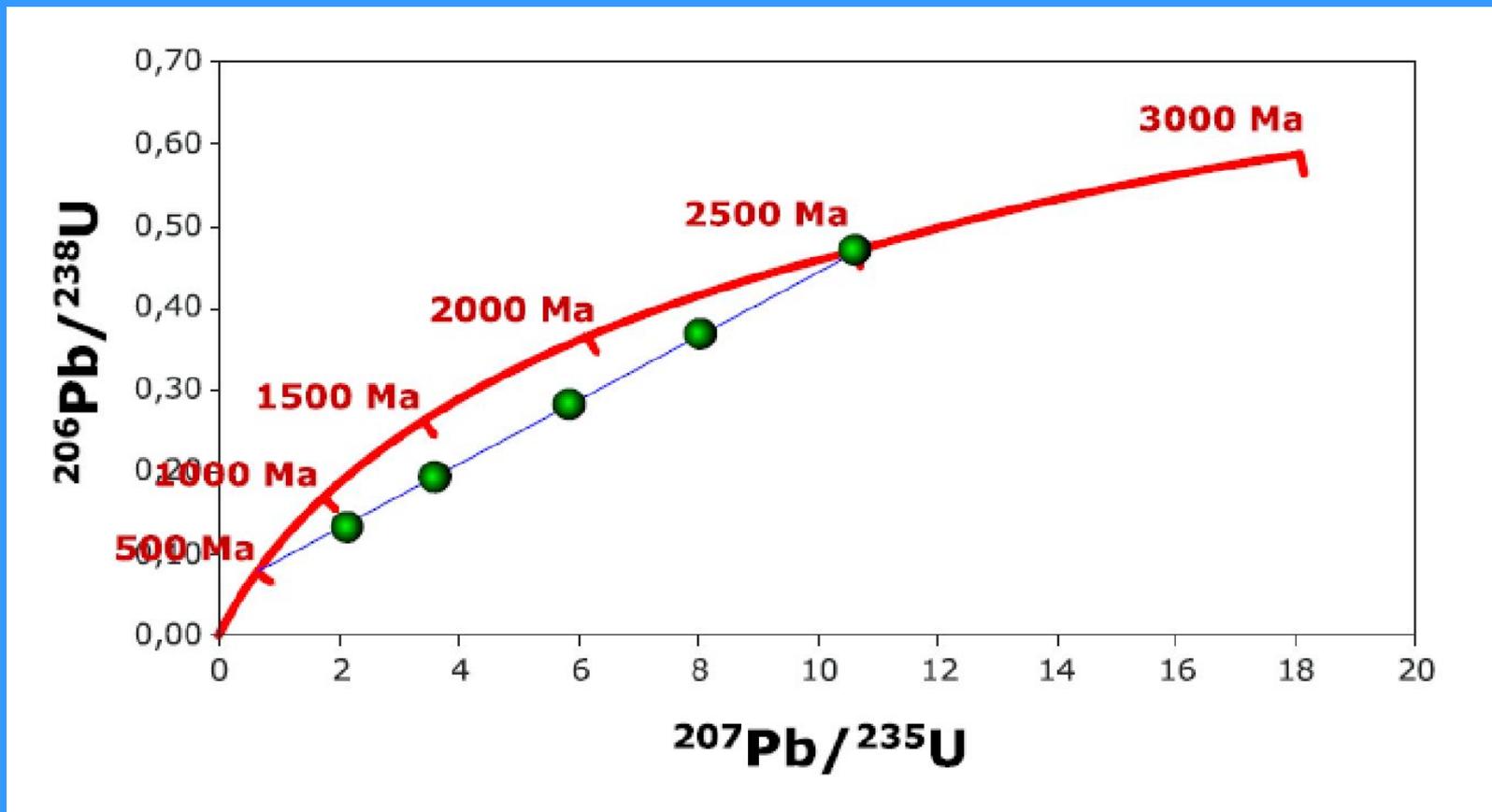


Конкордия графическое представление двух независимых геохронометров

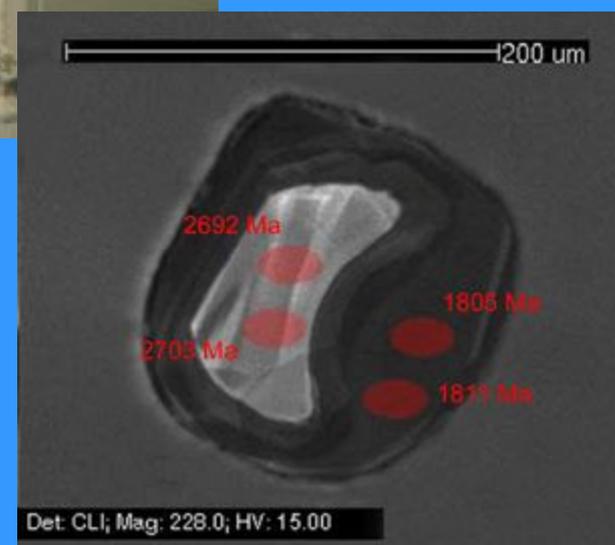
The concordia diagram

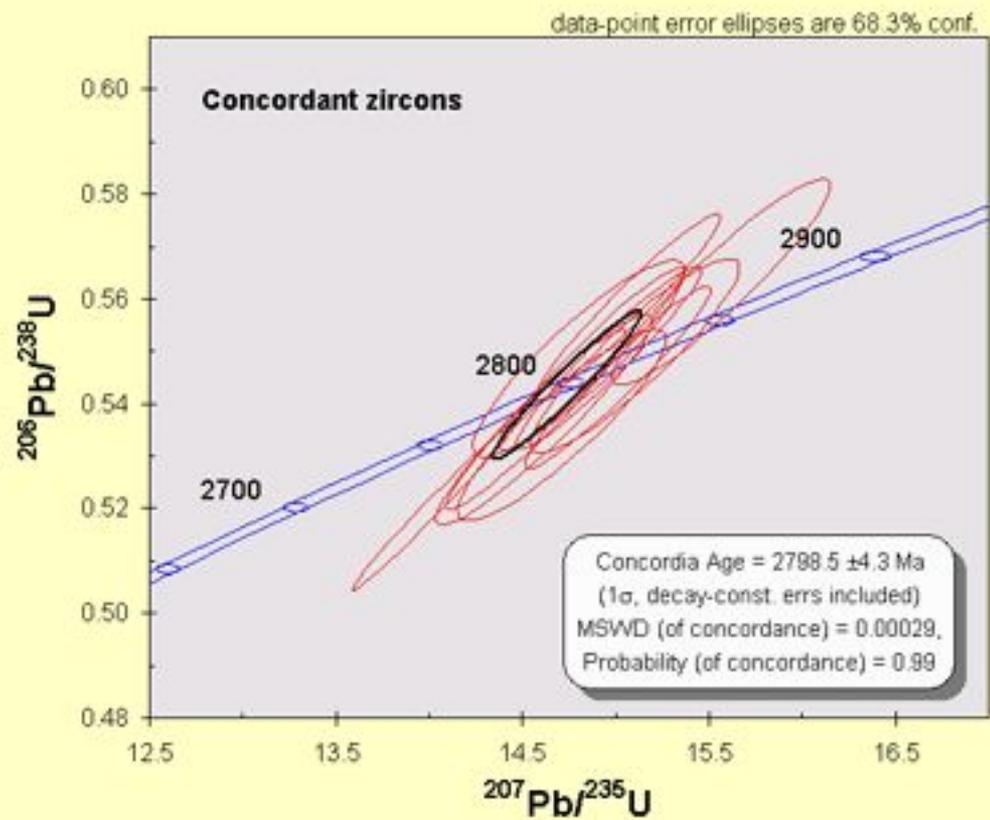
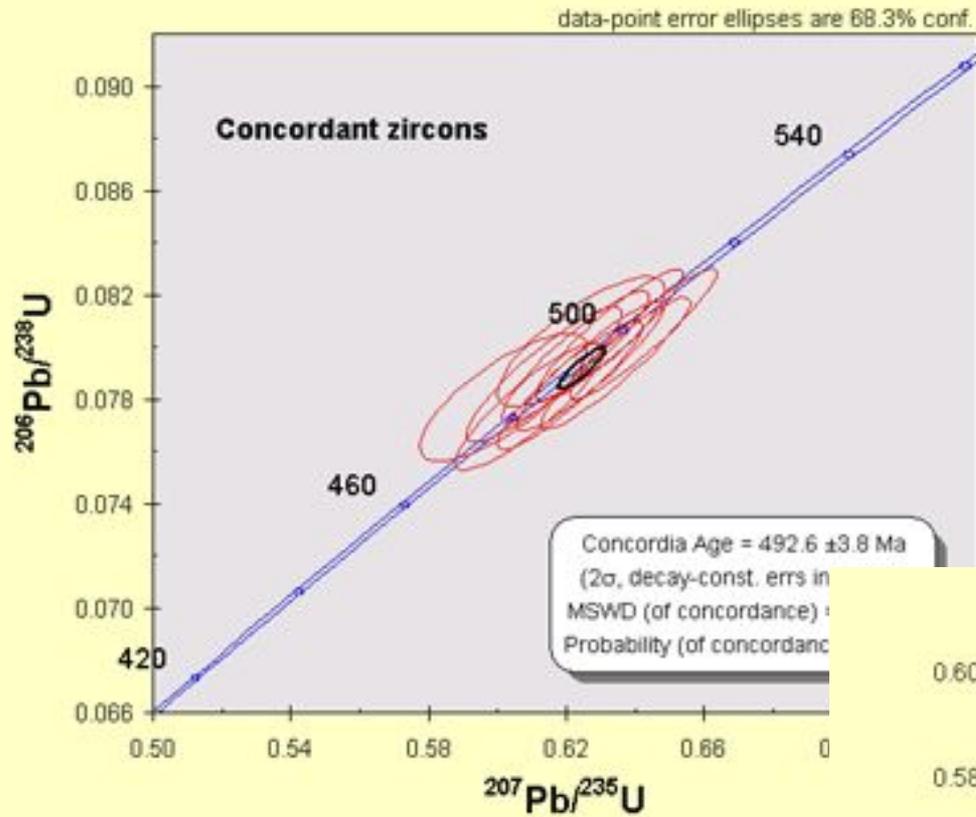


Дискордия - в римской мифологии богиня раздора
Дискордия – линия, соединяющая несогласующиеся (расходящиеся) значения возраста, получаемые U-Pb методом при отсутствии изотопного равновесия.

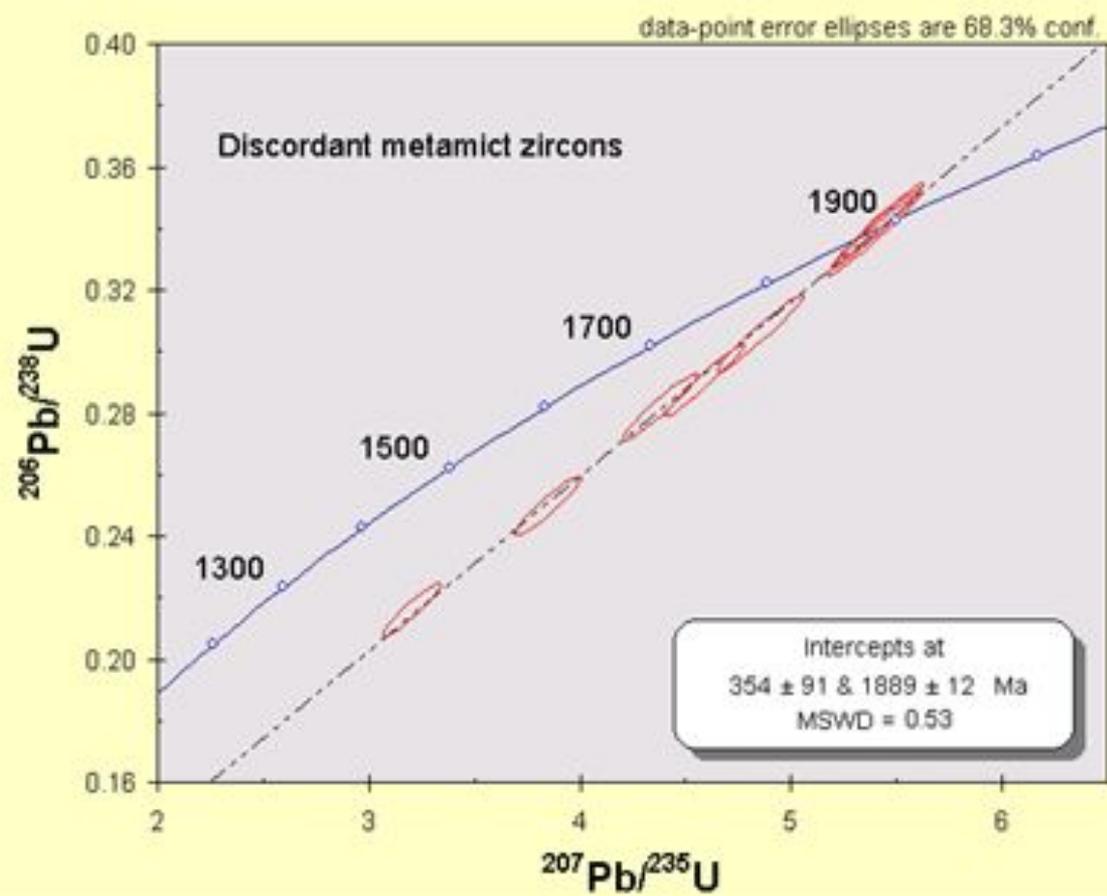
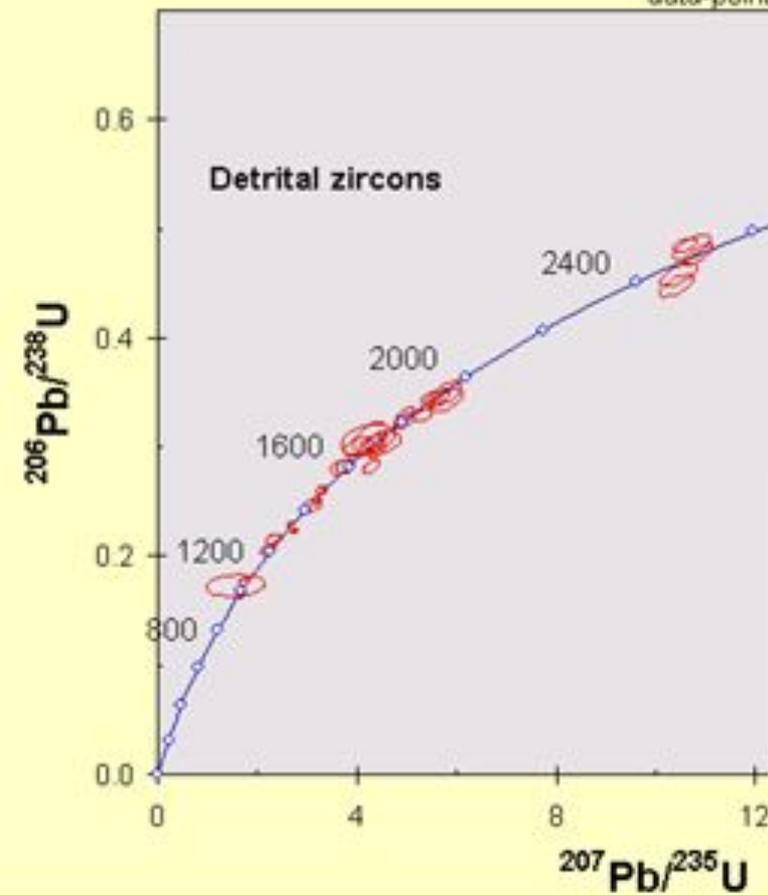


Ионный микронзонд SHRIMP-II (ЦИИ ВСЕГЕИ)





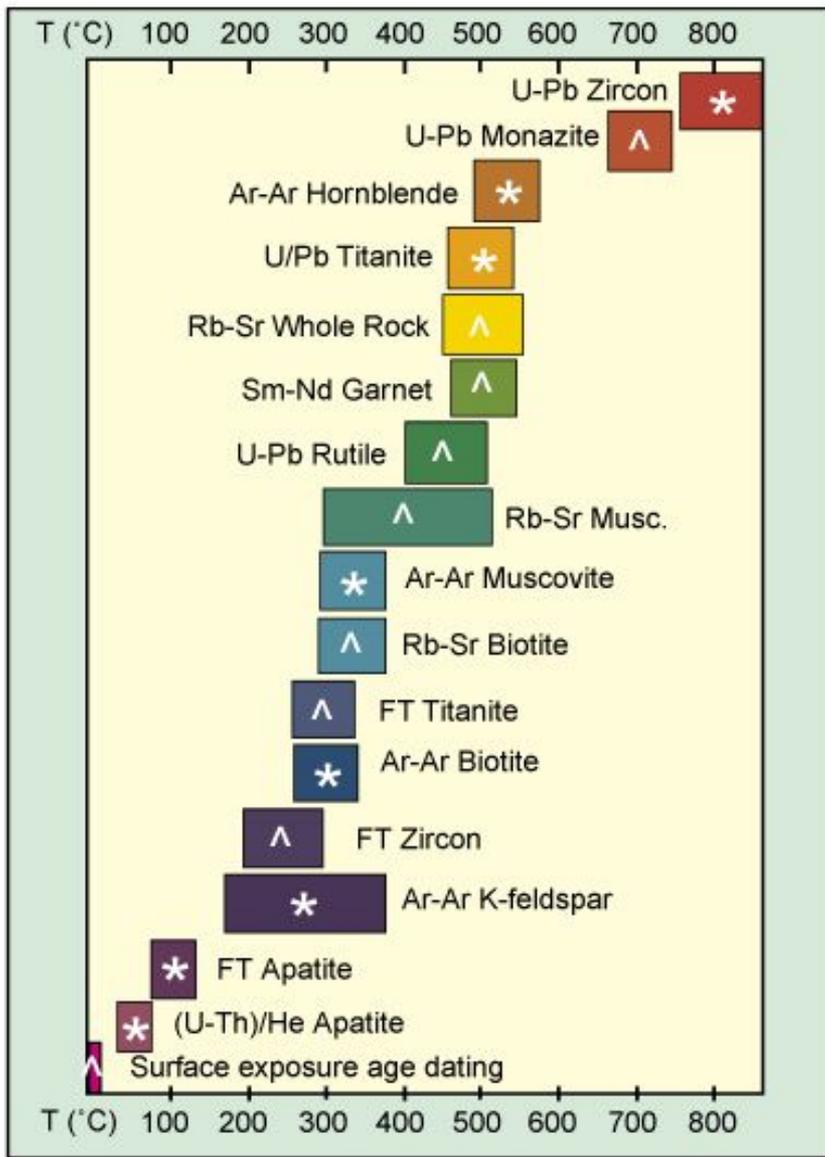
data-point error ellipses are 68.3% conf.



Термохронология

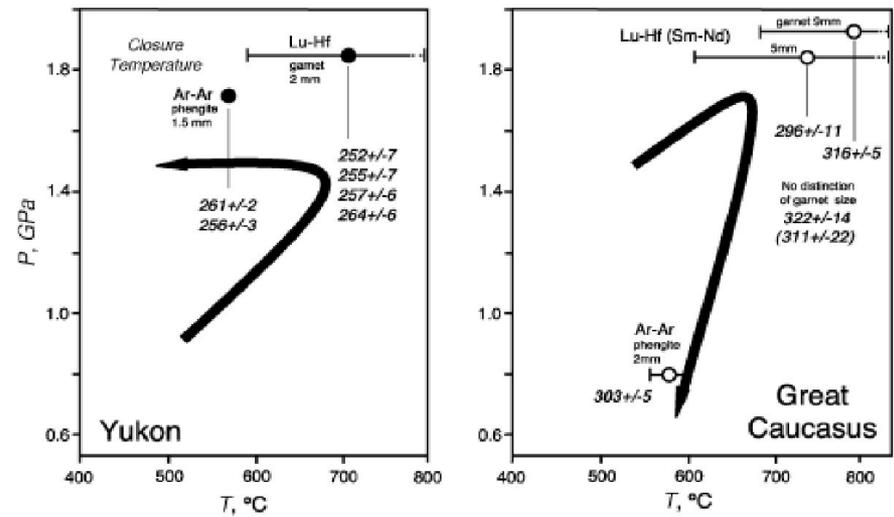
- Температуры закрытия U-Pb системы для парагенных циркона – около 900°C , сфена – до 700°C , апатита – около 450°C . U-Pb датирование этих минералов дает возможность оценить скорость охлаждения при магматической кристаллизации или метаморфизме.
- Температура закрытия изотопной системы – при которой продукты радиоактивного распада начинают полностью сохраняться в кристаллической решетке минерала (диффузия практически прекращается).

Mineral Closure Temperatures



*Denotes routine analysis at SU

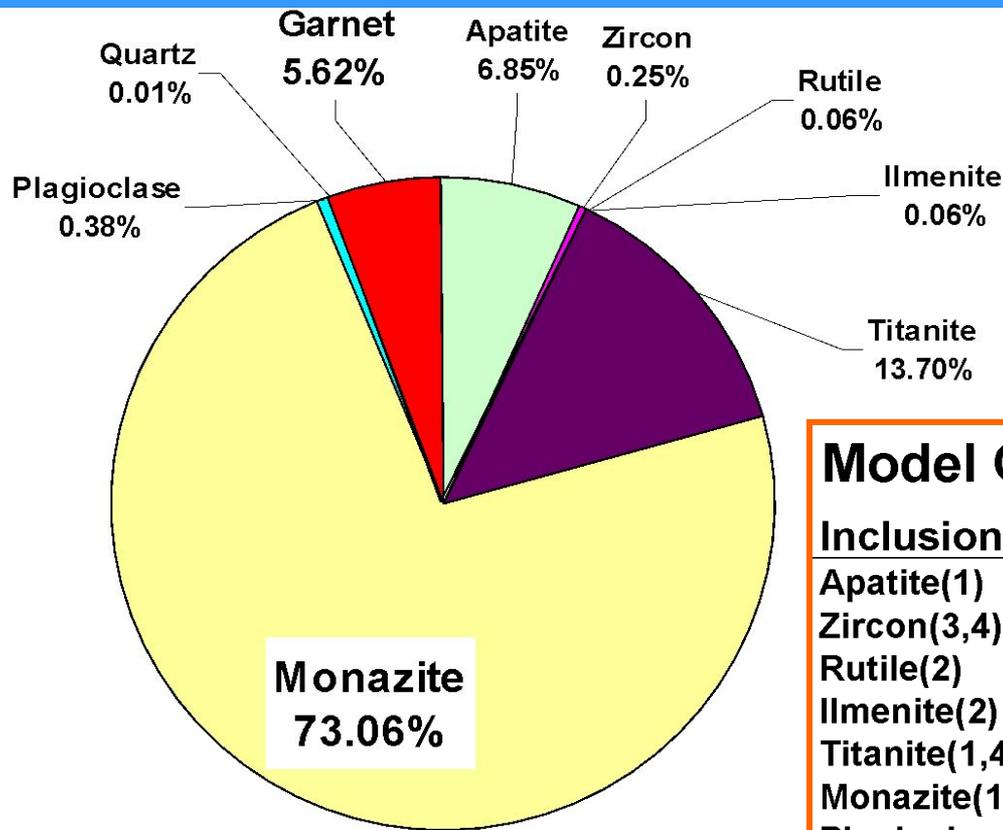
^Denotes SU capability



Реконструкция P-T-t трендов по данным термохронологии

- Циркон – наиболее надежный минерал-геохронометр. Около 70% всех датировок выполняется U-Pb методом по цирконам. Примерно 15% - Sm-Nd методом. Остальные методы в сумме не превышают 15%. (Данные ЦИИ ВСЕГЕИ).
- Датирование осадочных пород – исследование цирконов из переслаивающихся туфов (также ксенотим из осадочных пород).

Проблема чистоты монофракций граната для Sm-Nd метода



Model Garnet

Inclusions Present	wt%	Sm, ppm	Nd, ppm
Apatite(1)	0.1	100	750
Zircon(3,4)	0.1	8.5	27
Rutile(2)	0.1	2	7
Ilmenite(2)	0.1	2	7
Titanite(1,4)	0.1	500	1500
Monazite(1,3)	0.01	22040	80000
Plagioclase(2)	0.1	12.6	41.65
Quartz	0.1	0.34	1.5
Garnet(2)	99.29	3.25	0.62

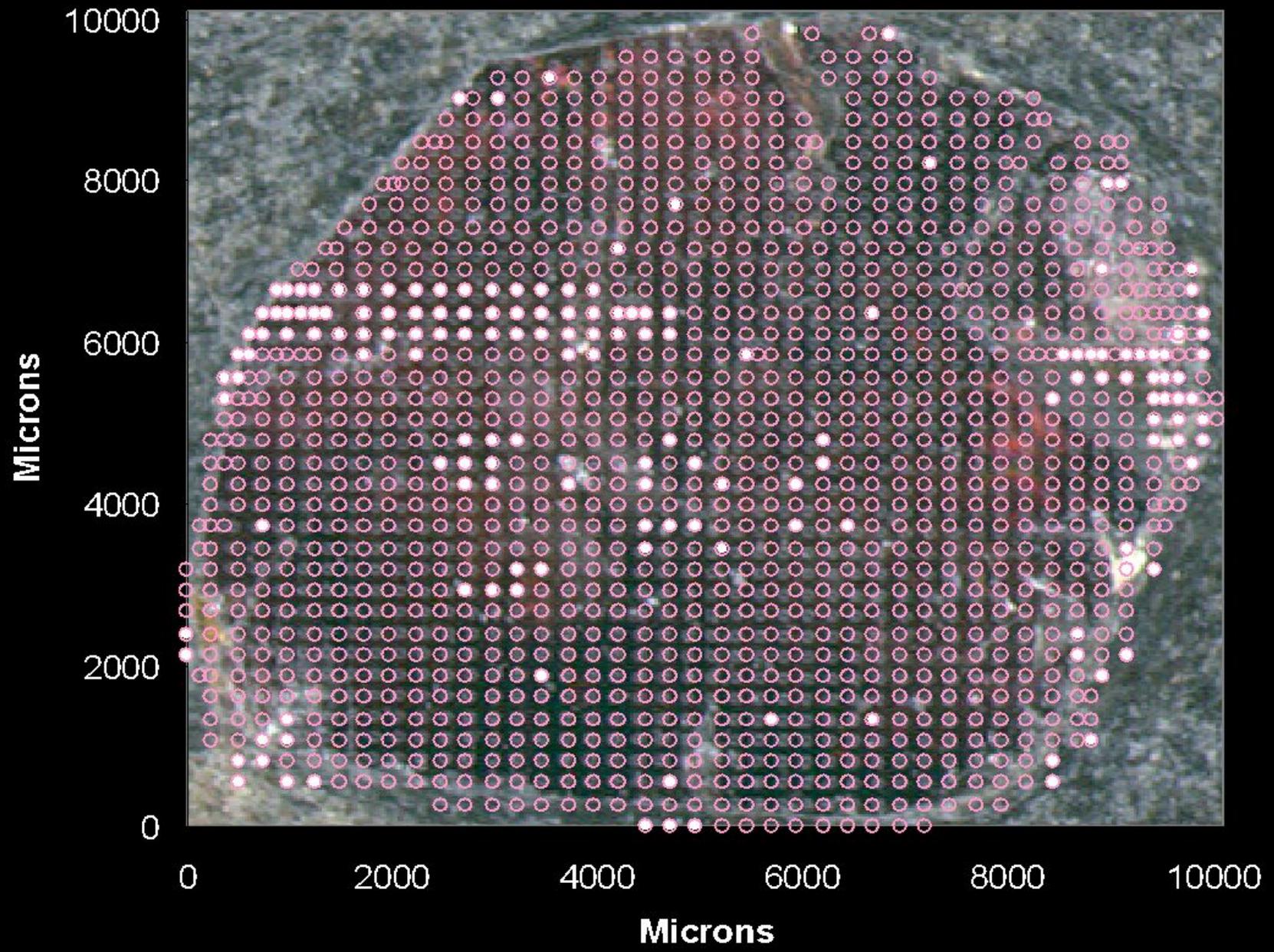
% Nd from each inclusion in model garnet (99.29% pure)

Sources:

- (1) Faure 1986
- (2) Magloughlin 1993
- (3) DeWolf et al. 1996
- (4) von Blanckenburg 1993

1 part monazite to 100,000 parts garnet can contain approximately the same Nd...but this is not necessarily such a terrible thing!

• Inclusions



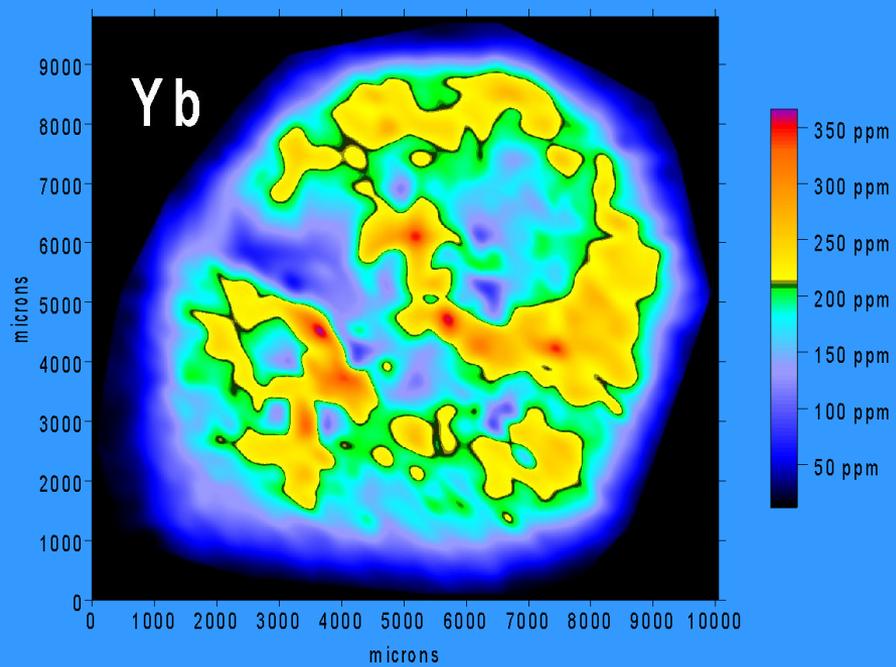
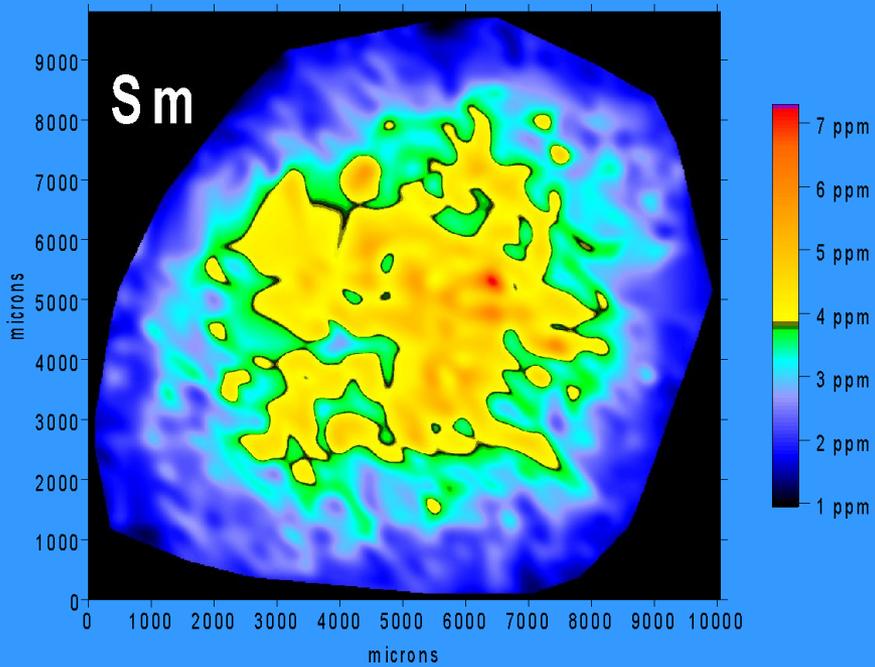
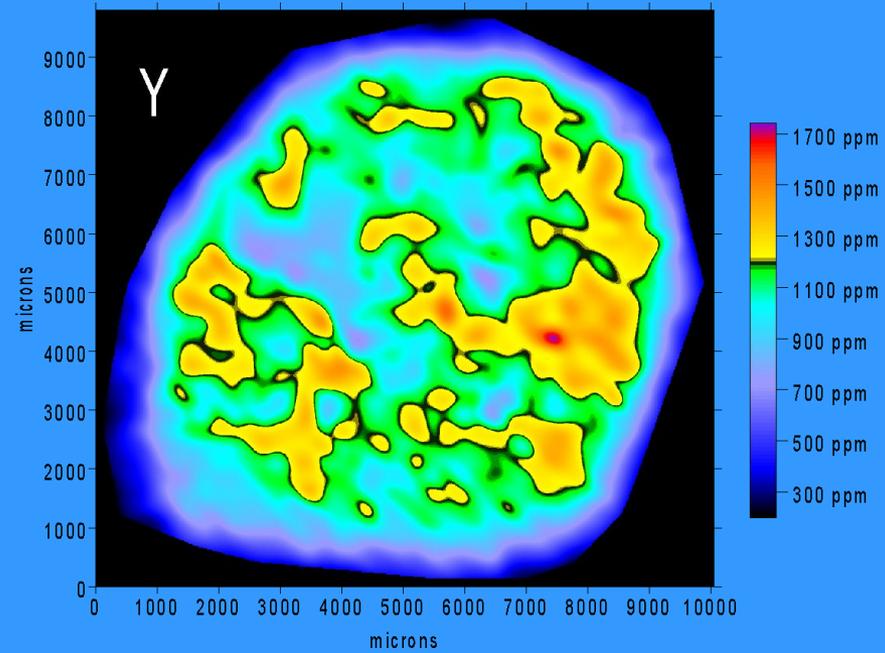
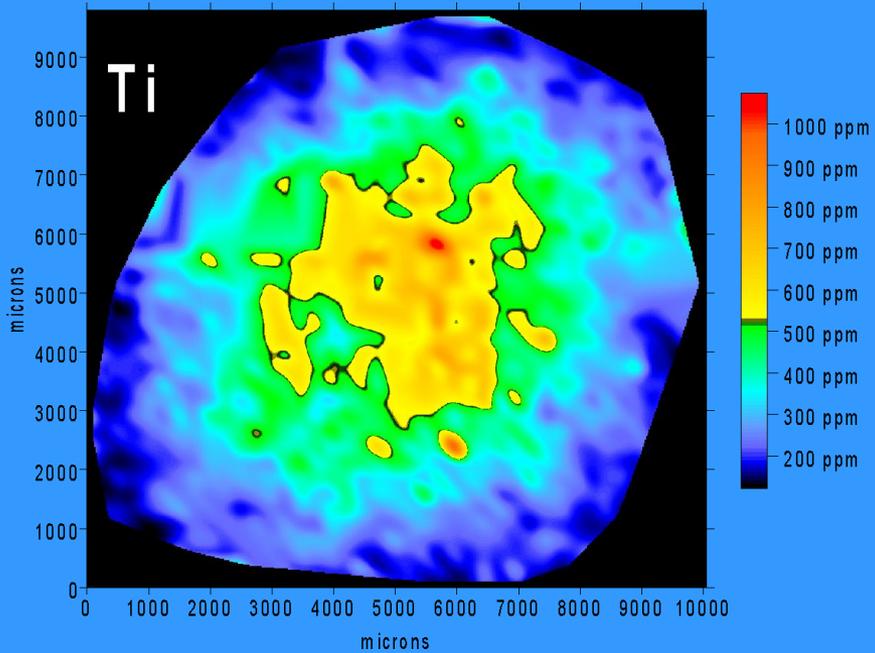
biotite

garnet

monazite

50 microns





Sm, Nd and $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ for radial areas of N297 map

