

# Как определить возраст горных пород

Алексей Иванов

*Центр коллективного пользования  
«Геодинамика и геохронология»  
Института земной коры СО РАН*



# INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART

www.stratigraphy.org

International Commission on Stratigraphy

v 2016/12



Eonothem / Eon	Erathem / Era	System / Epoch	Series / Epoch	Stage / Age	GSSP	numerical age (Ma)
Phanerozoic	Cenozoic	Quaternary	Holocene			present
			Upper	0.0117		
			Middle	0.126		
			Lower	0.781		
				1.80		
		Pleistocene	Calabrian	1.80		
			Gelasian	2.58		
			Pliocene	3.600		
			Zanclean	5.333		
			Messinian	7.246		
	Neogene	Miocene	Tortonian	11.63		
			Serravallian	13.82		
			Langhian	15.97		
			Burdigalian	20.44		
			Aquitanian	23.03		
		Chatthian	28.1			
		Oligocene	Rupelian	33.9		
			Priabonian	37.8		
			Bartonian	41.2		
			Eocene	47.8		
	Lutetian		56.0			
	Paleogene	Ypresian	59.2			
		Thanetian	61.6			
		Selandian	66.0			
		Danian	72.1 ± 0.2			
Maastrichtian		83.6 ± 0.2				
Mesozoic	Cretaceous	Campanian	86.3 ± 0.5			
		Santonian	89.8 ± 0.3			
		Coniacian	93.9			
		Turonian	100.5			
		Cenomanian	~ 113.0			
	Lower	Albian	~ 125.0			
		Aptian	~ 129.4			
		Barremian	~ 132.9			
		Hauterivian	~ 139.8			
		Valanginian	~ 145.0			

Eonothem / Eon	Erathem / Era	System / Period	Series / Epoch	Stage / Age	GSSP	numerical age (Ma)	
Phanerozoic	Mesozoic	Jurassic	Upper	Tithonian		~ 145.0	
				Kimmeridgian	152.1 ± 0.9		
					157.3 ± 1.0		
				Oxfordian	163.5 ± 1.0		
				Callovian	166.1 ± 1.2		
			Middle	Bathonian	168.3 ± 1.3		
				Bajocian	170.3 ± 1.4		
				Aalenian	174.1 ± 1.0		
				Toarcian	182.7 ± 0.7		
				Pliensbachian	190.8 ± 1.0		
		Lower	Sinemurian	199.3 ± 0.3			
			Hettangian	201.3 ± 0.2			
			Rhaetian	~ 208.5			
			Norian	~ 227			
			Carnian	~ 237			
	Triassic	Upper	Ladinian	~ 242			
			Anisian	247.2			
			Olenekian	251.2			
			Induan	251.902 ± 0.024			
			Changhsingian	254.14 ± 0.07			
		Lower	Wuchiapingian	259.1 ± 0.5			
			Capitanian	265.1 ± 0.4			
			Wordian	268.8 ± 0.5			
			Roadian	272.95 ± 0.11			
			Kungurian	283.5 ± 0.6			
	Permian	Cisuralian	Artinskian	290.1 ± 0.26			
			Sakmarian	295.0 ± 0.18			
			Asselian	298.9 ± 0.15			
			Gzhelian	303.7 ± 0.1			
			Kasimovian	307.0 ± 0.1			
		Upper	Moscovian	315.2 ± 0.2			
			Bashkirian	323.2 ± 0.4			
			Serpukhovian	330.9 ± 0.2			
			Visean	346.7 ± 0.4			
			Tournaisian	~ 358.9 ± 0.4			
Paleozoic	Carboniferous	Mississippian	Upper				
			Middle				
			Lower				
		Permian	Guadalupian				
			Lopingian				

Eonothem / Eon	Erathem / Era	System / Period	Series / Epoch	Stage / Age	GSSP	numerical age (Ma)
Phanerozoic	Paleozoic	Devonian	Upper	Famennian		372.2 ± 1.6
					382.7 ± 1.6	
				Frasnian	387.7 ± 0.8	
				Givetian	393.3 ± 1.2	
				Eifelian	407.6 ± 2.6	
			Middle	Pragian	410.8 ± 2.8	
				Emsian	419.2 ± 3.2	
				Lochkovian	423.0 ± 2.3	
				Ludfordian	425.6 ± 0.9	
				Gorstian	427.4 ± 0.5	
		Lower	Wenlock	430.5 ± 0.7		
			Sheinwoodian	433.4 ± 0.8		
			Telychian	438.5 ± 1.1		
			Aeronian	440.8 ± 1.2		
			Rhuddanian	443.8 ± 1.5		
	Silurian	Upper	Hirnantian	445.2 ± 1.4		
			Katian	453.0 ± 0.7		
			Sandbian	458.4 ± 1.9		
			Darriwilian	458.4 ± 0.9		
			Dapingian	467.3 ± 1.1		
		Middle	Floian	470.0 ± 1.4		
			Tremadocian	477.7 ± 1.4		
			Furongian	~ 485.4 ± 1.9		
			Jiangshanian	~ 489.5		
			Paibian	~ 494		
	Ordovician	Series 3	Guzhangian	~ 497		
			Drumian	~ 500.5		
			Stage 5	~ 504.5		
			Stage 4	~ 509		
			Stage 3	~ 514		
		Lower	Stage 2	~ 521		
			Stage 1	~ 529		
			Fortunian	541.0 ± 1.0		

Eonothem / Eon	Erathem / Era	System / Period	Series / Epoch	Stage / Age	GSSP	numerical age (Ma)
Proterozoic	Neoproterozoic	Ediacaran				541.0 ± 1.0
			Cryogenian	~ 635		
			Tonian	~ 720		
		Mesoproterozoic	Stenian	1000		
			Ectasian	1200		
	Paleoproterozoic	Calymmian	1400			
		Statherian	1600			
		Orosirian	1800			
		Rhyacian	2050			
		Siderian	2300			
	Archean	Neo-archean				2500
				2800		
			Meso-archean	3200		
			Paleo-archean	3600		
			Ed-archean	4000		
Hadean						~ 4600

Units of all ranks are in the process of being defined by Global Boundary Stratotype Section and Points (GSSP) for their lower boundaries, including those of the Archean and Proterozoic, long defined by Global Standard Stratigraphic Ages (GSSA). Charts and detailed information on ratified GSSPs are available at the website <http://www.stratigraphy.org>. The URL to this chart is found below.

Numerical ages are subject to revision and do not define units in the Phanerozoic and the Ediacaran; only GSSPs do. For boundaries in the Phanerozoic without ratified GSSPs or without constrained numerical ages, an approximate numerical age (~) is provided.

Numerical ages for all systems except Lower Pleistocene, Cretaceous, Permian and Precambrian are taken from 'A Geologic Time Scale 2012' by Gradstein et al. (2012); those for the Lower Pleistocene, Cretaceous, Triassic, Permian and Precambrian were provided by the relevant ICS subcommissions.

Colouring follows the Commission for the Geological Map of the World (<http://www.cgm.org>)

Chart drafted by K.M. Cohen, D.A.T. Harper, P.L. Gibbard (c) International Commission on Stratigraphy, October 2016

To cite: Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2013, updated) The ICS international Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204.

URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2016-12.pdf>



# Относительная хронология

1. Стратиграфия

2. Палеонтология

3. Геологические взаимоотношения

4. Палеомагнитные корреляции

5. Хемостратиграфия

# Абсолютная хронология

1. Астрономическая калибровка

2. Изотопные методы

Первые представления о стратиграфии были сформулированы датским естествоиспытателем Николаусом Стено (Nicholas Steno) в книге: «Предварительные рассуждения к диссертации о твердых телах естественно находящихся в твердом» (*solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus*), 1669 г.

1. Странные твердые объекты треугольной формы – это зубы древних акул.
2. Горизонты, лежащие выше, моложе тех, что ниже.
3. Участки, удаленные друг от друга, но с одинаковыми зубами – имеют один и тот же возраст.





## Уильям Смит (William Smith)

1815 г. – первая геологическая карта с использованием принципов стратиграфии

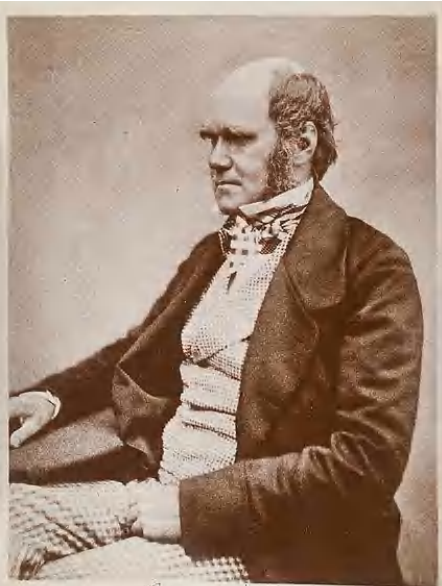
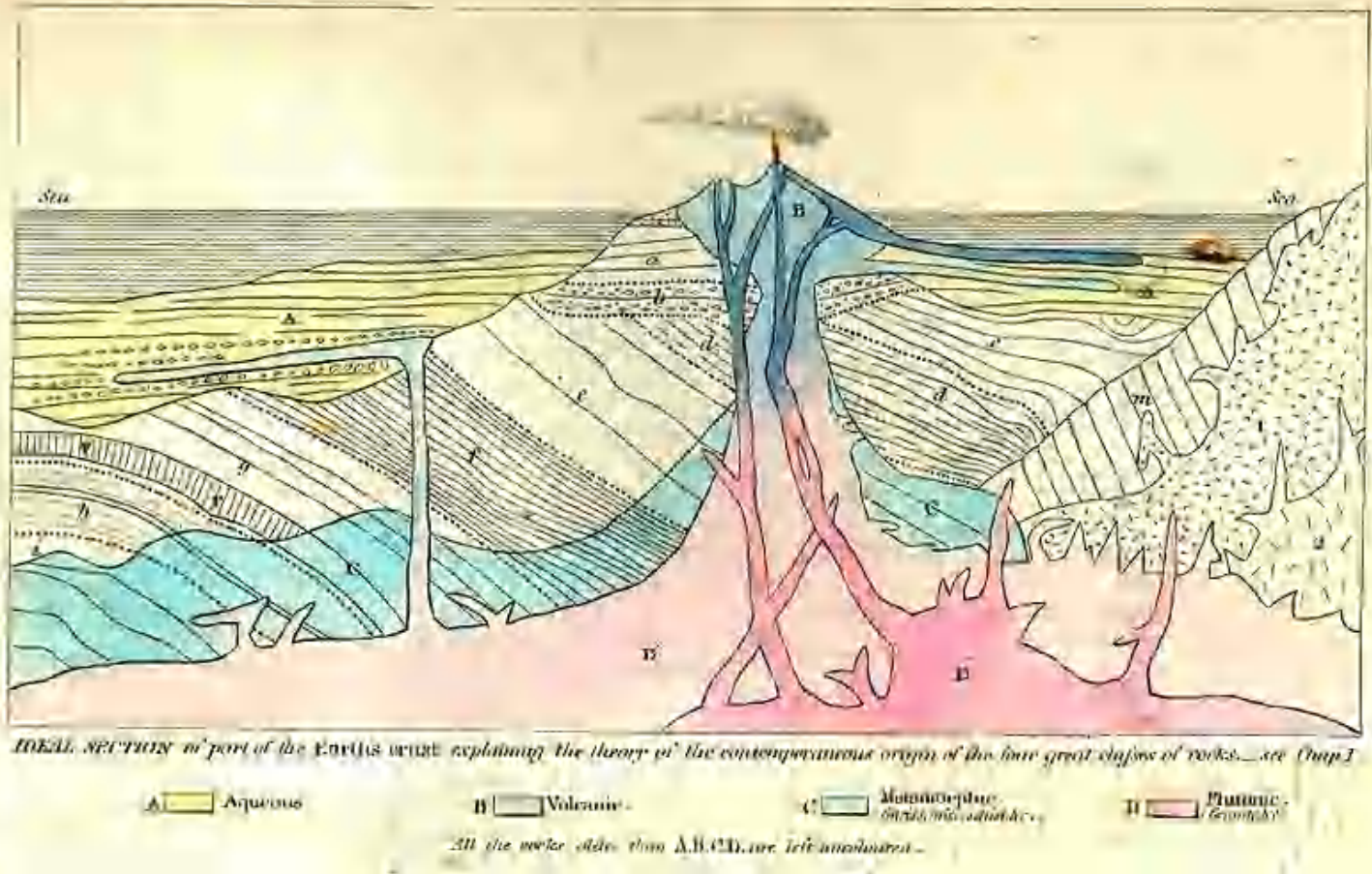






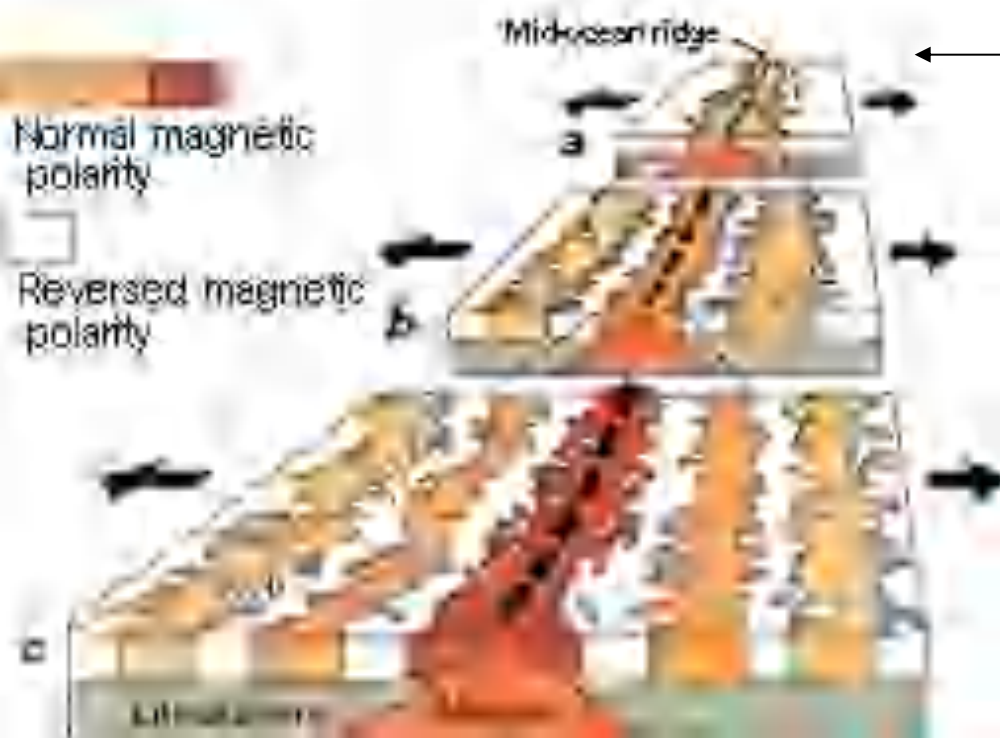
Чарльз Лайель, 1797-1875 гг

Униформизм,  
актуализм



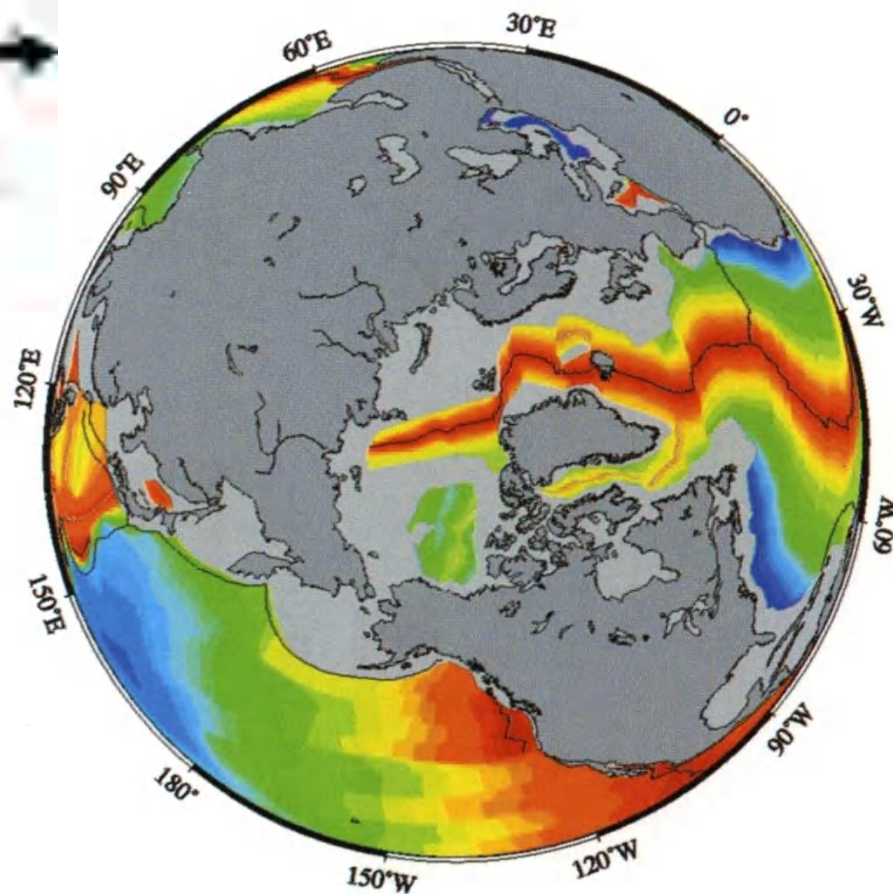
Charles Darwin

Чарльз Дарвин, 1809-1882 гг

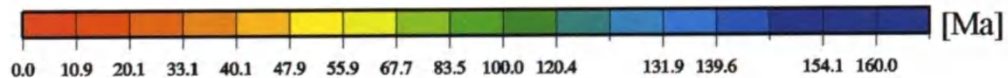


## Магнитные аномалии

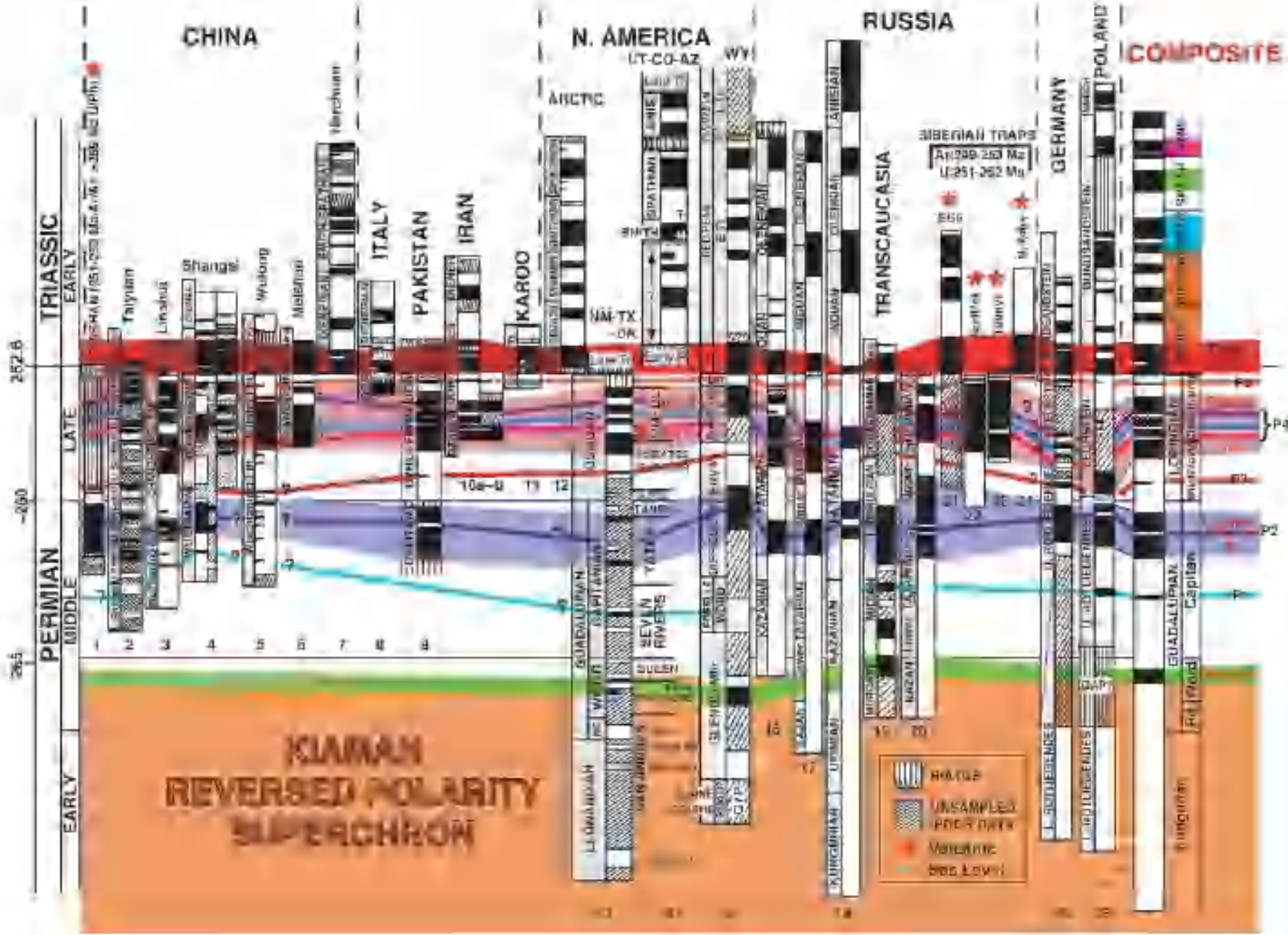
Обнаружены в середине 1950-х, оказались одним из ключевых фактов в тектонике плит



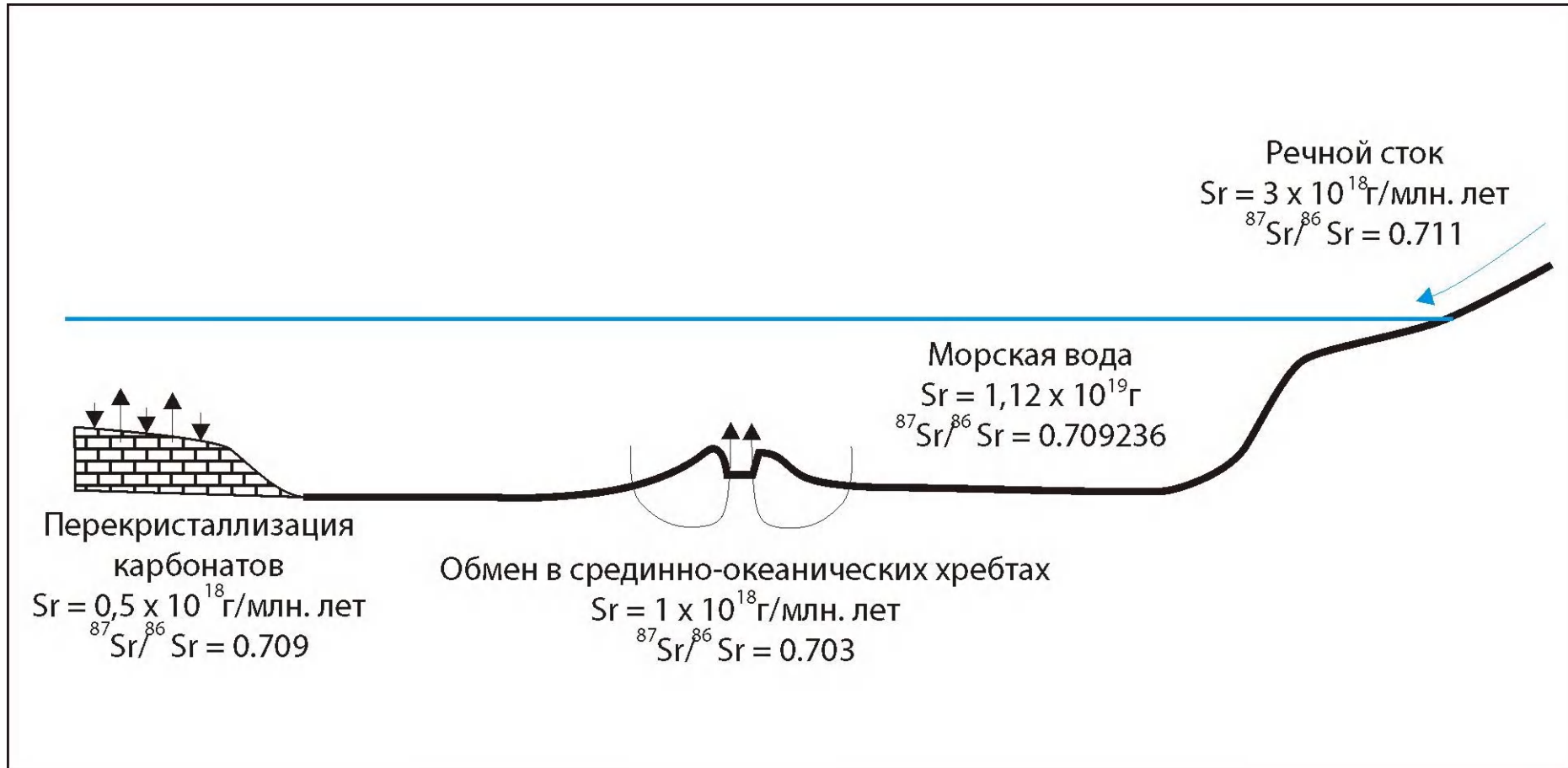
Карта возраста океанического дна

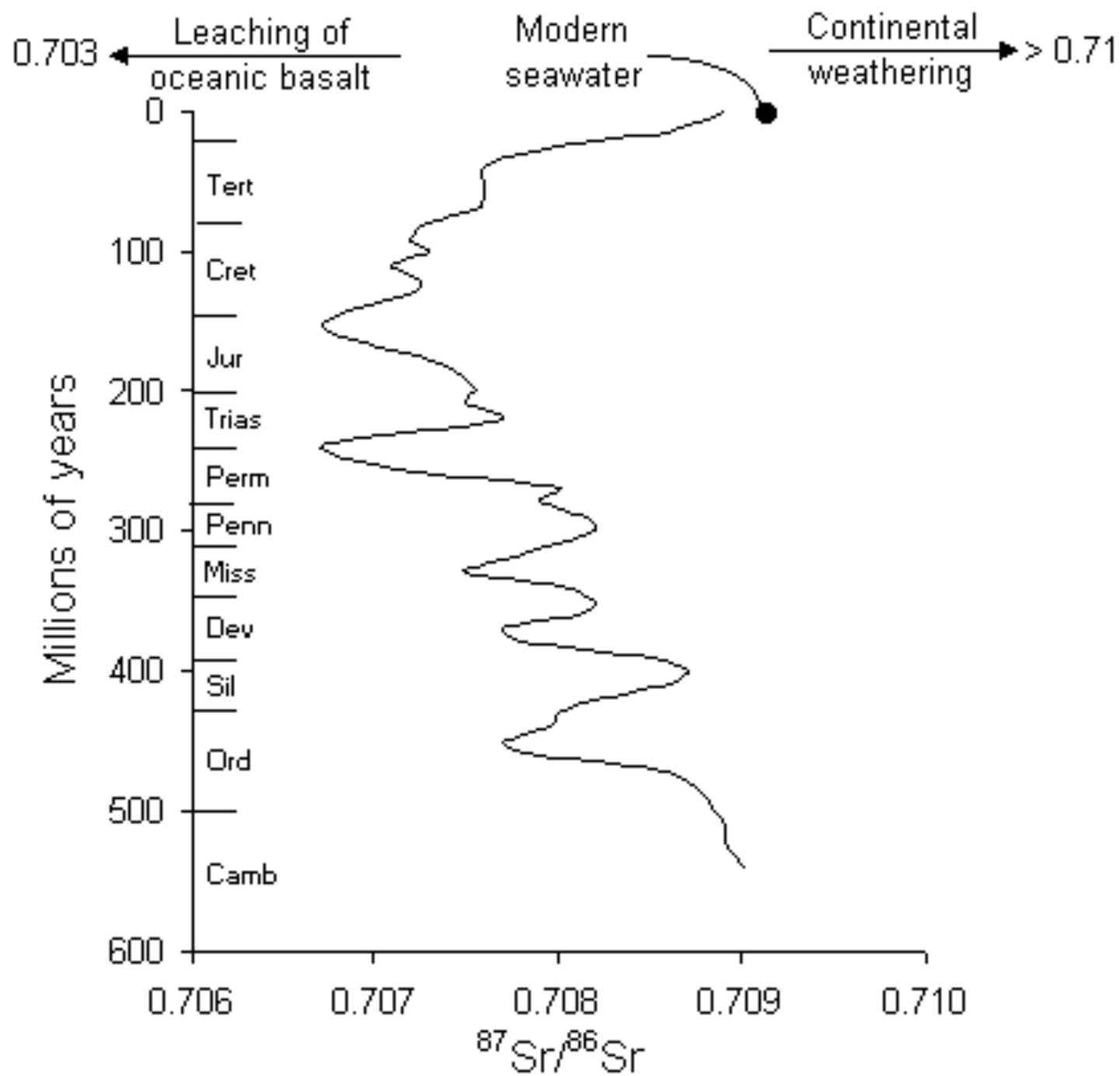




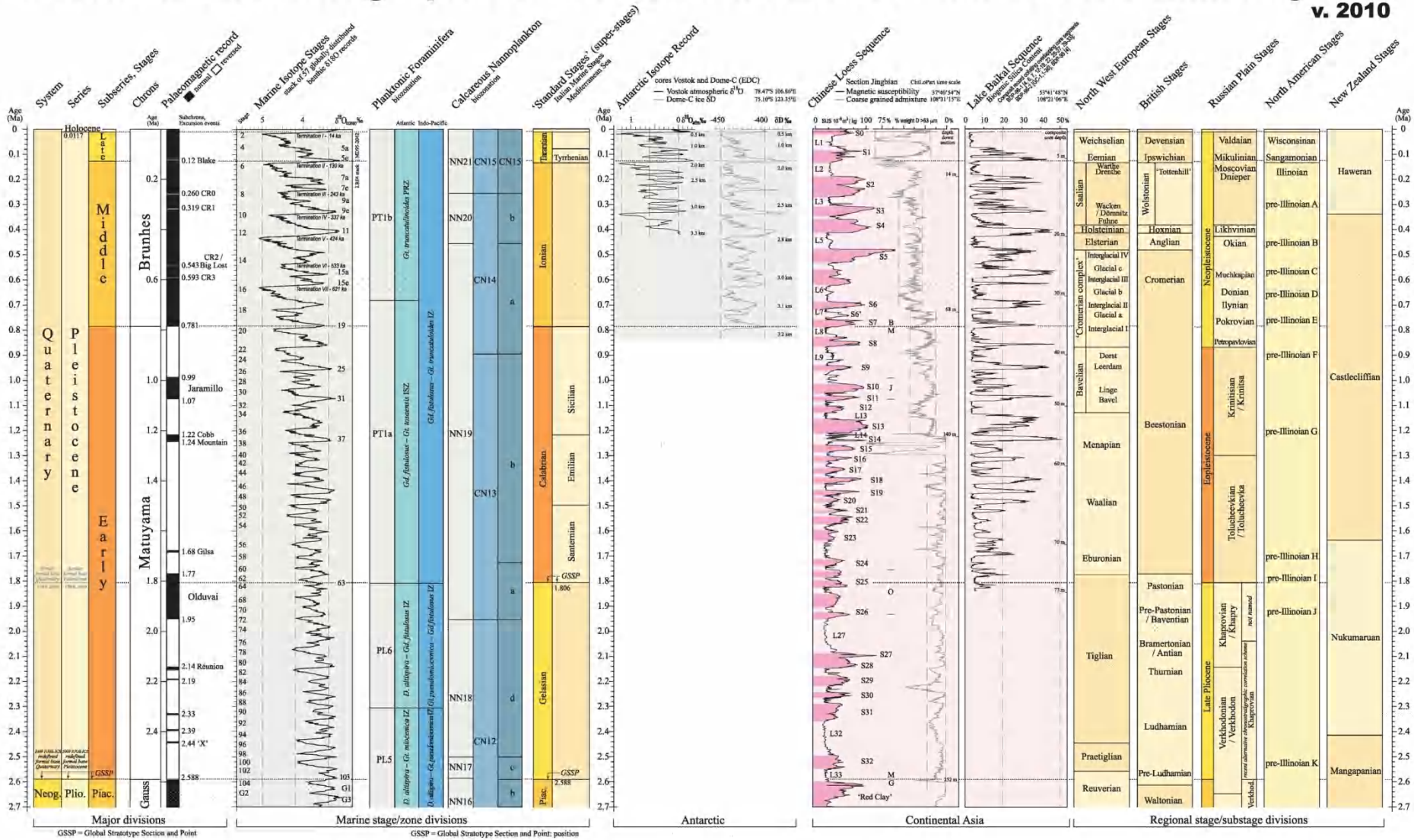


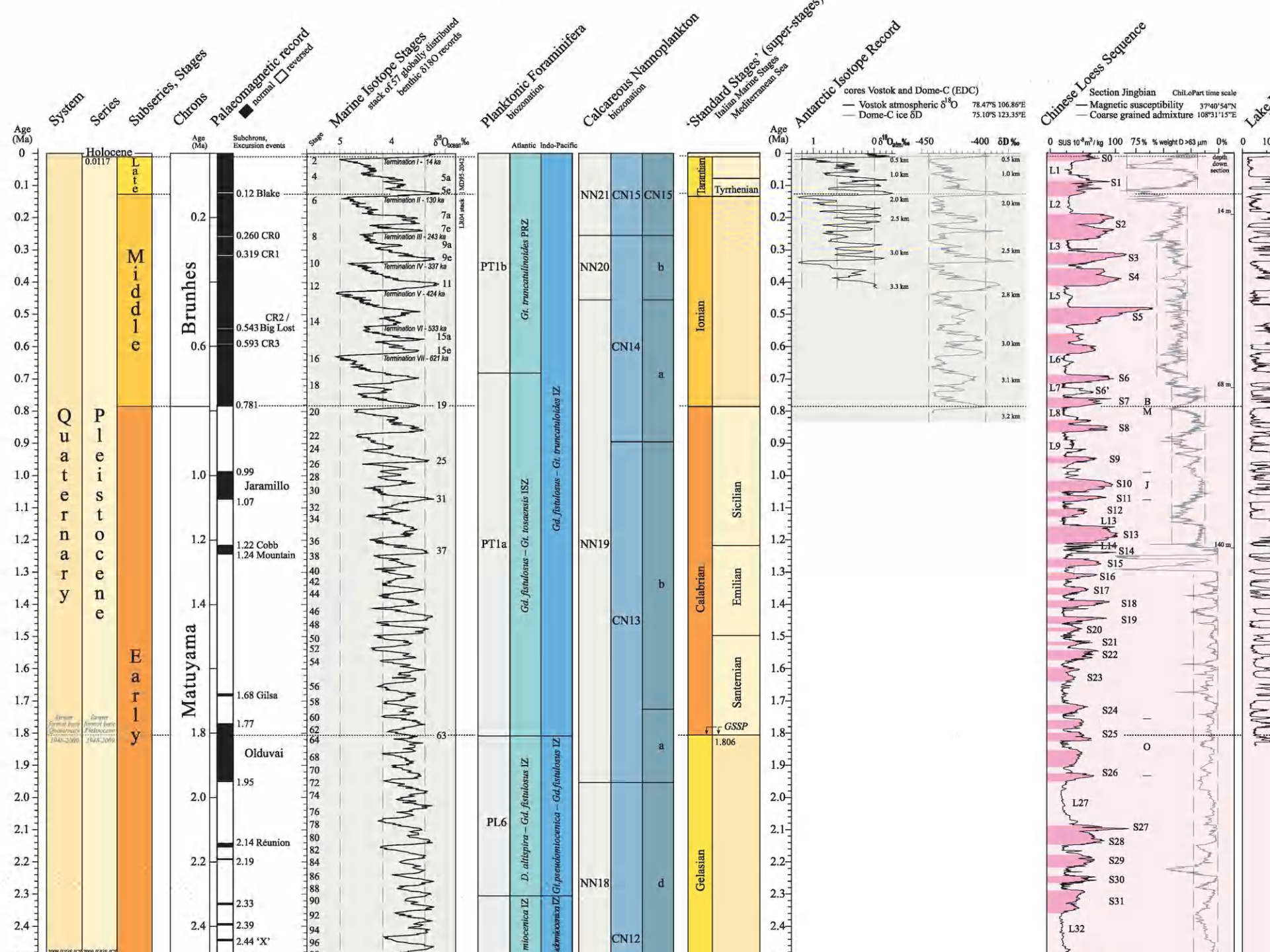
# Хемотратиграфия





# Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years v. 2010

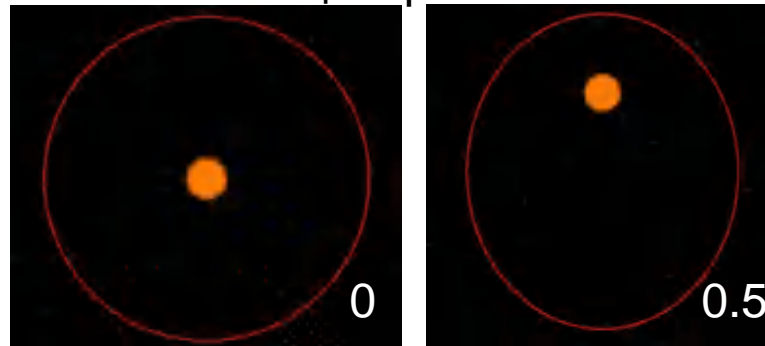




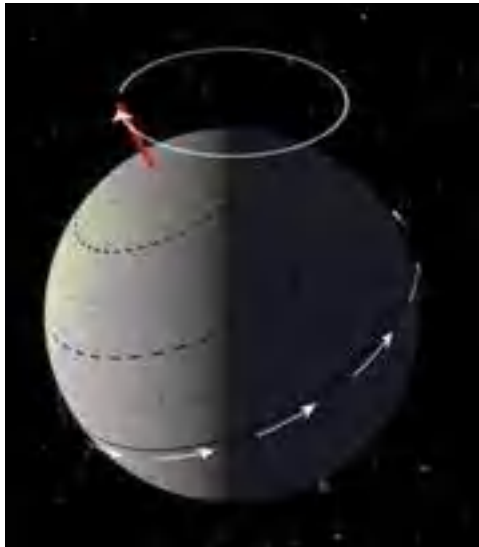
# Астрономическая калибровка

## Orbital tuning

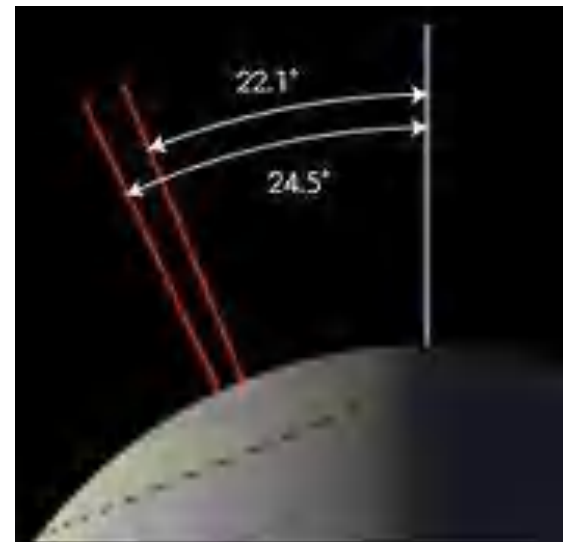
Эксцентриситет

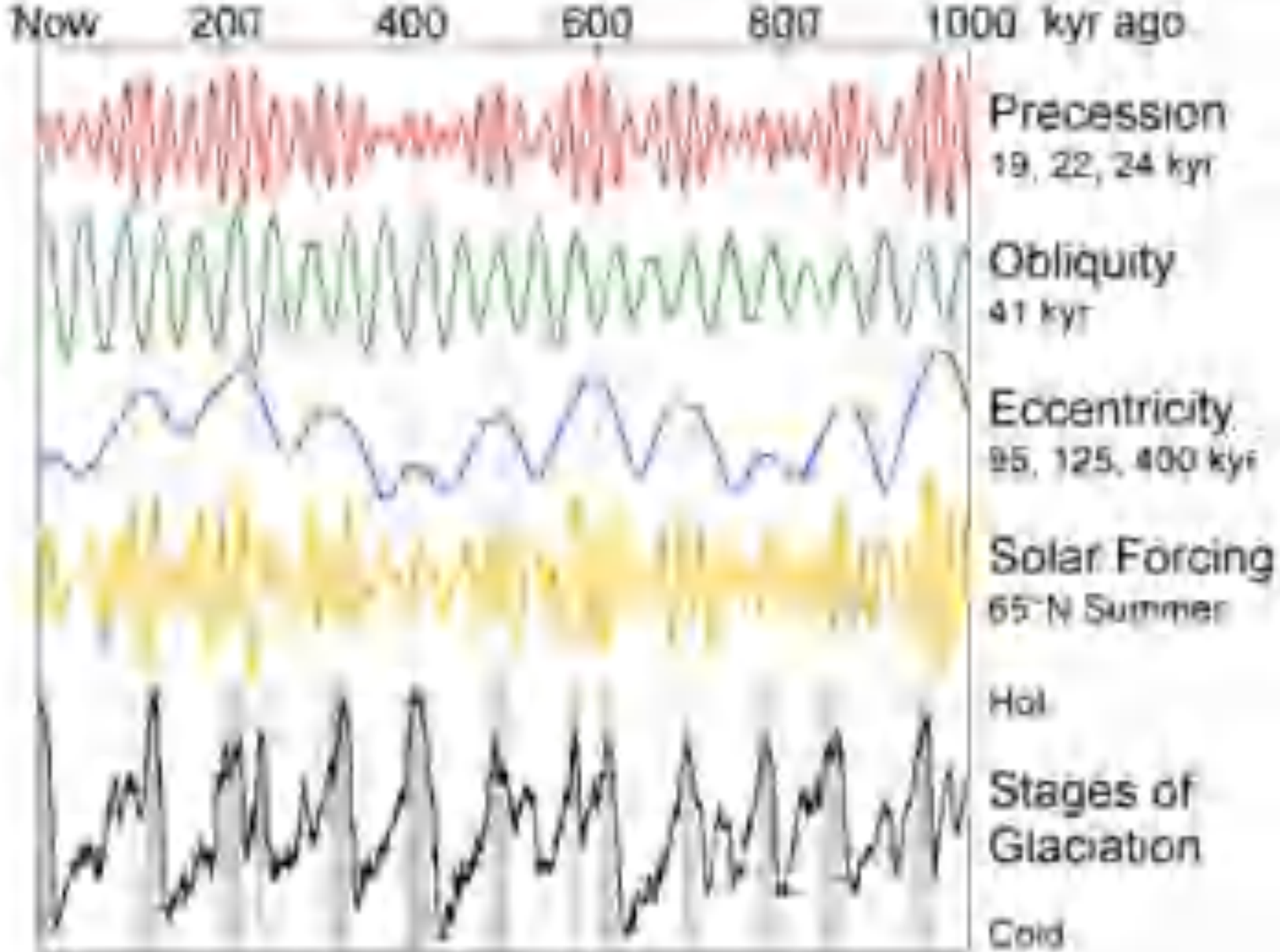


Прецессия



Наклон орбиты





Эксцентриситет

Химические индексы  
для осадков оз. Байкал  
Golberg et al., 2000

96 72

413

Наклон орбиты

Прецессия

123

41

23

54

19

spectral density, a.u.

0

0

0.02

0.04

0.06

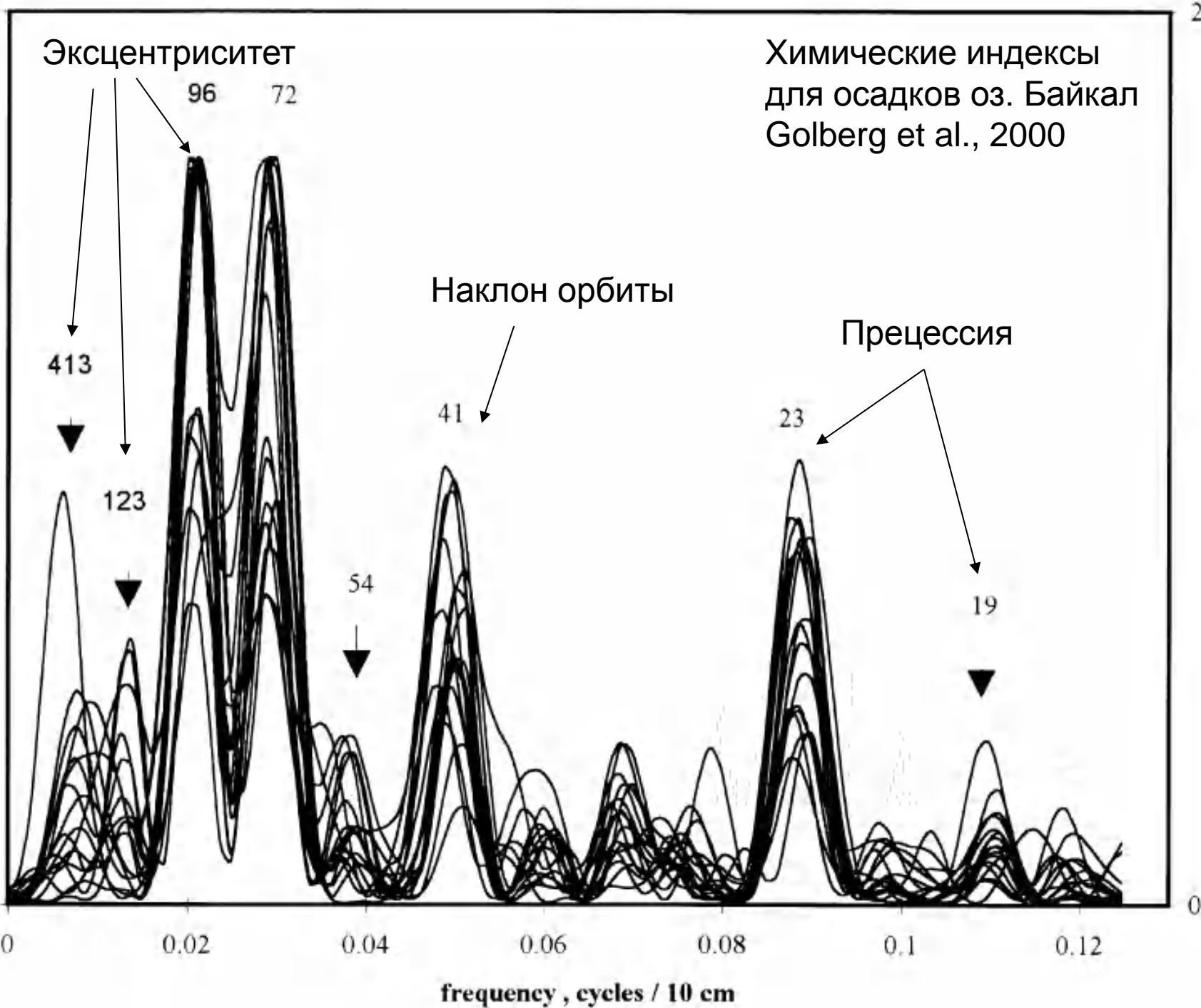
0.08

0.1

0.12

0

frequency, cycles / 10 cm





## Изотопные методы в геохронологии:

1. Анри Беккерель – 1896 г. Открытие радиоактивности.
2. Пьер Кюри и Эрнест Резерфорд – 1902-1904 г.г. Идея датирования.
3. Артур Холмс – 1912 г. Первая книга по геохронологии.
4. Альфред Нир – 1940 г. Начало систематических измерений.

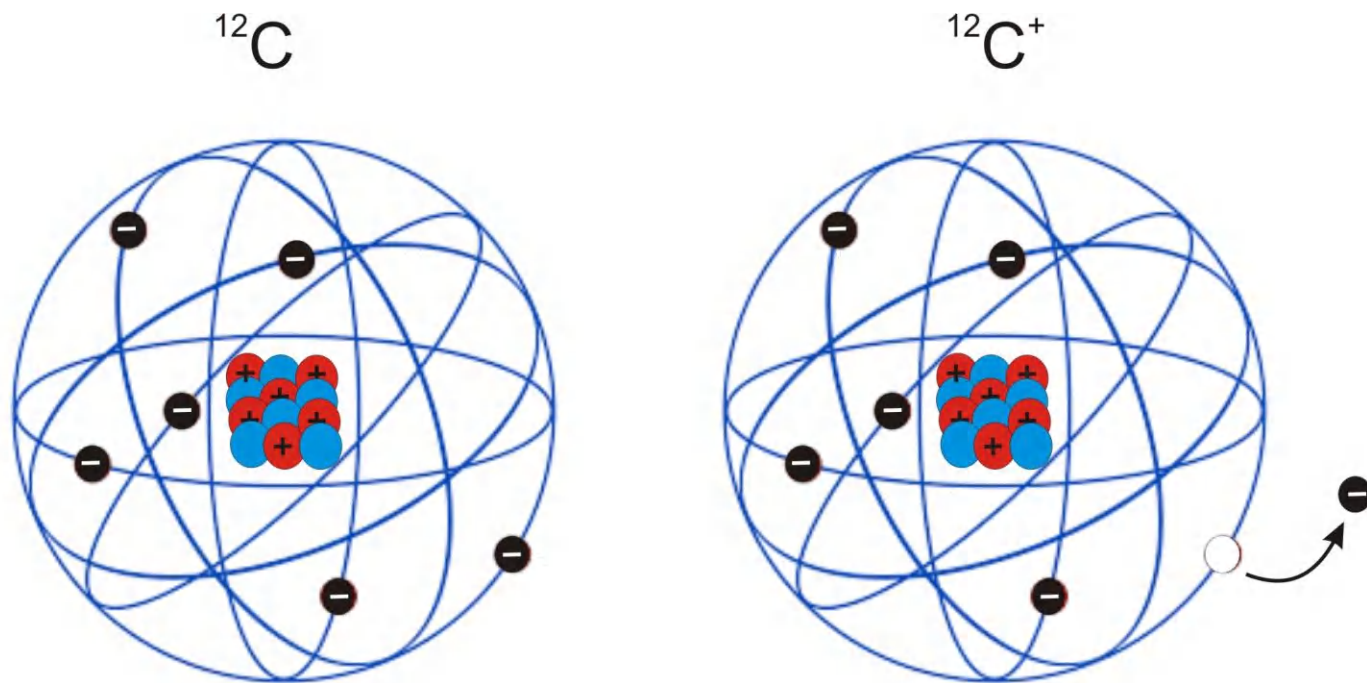


Альфред Нир  
(1911-1994)

<https://www.physics.umn.edu/about/history/>

$$r^2 \sim m$$





Протоны и нейтроны – определяют массу. Их число называется массовым числом. Протоны – положительно заряжены (число протонов или заряд соответствует порядковому номеру в таблице Менделеева).

Нейтроны не имеют заряда, их число у одного и того же химического элемента может варьировать. Химический элемент с разным числом нейтронов называется изотопом.

Электроны – отрицательно заряженные частицы. В нейтральном атоме их число равно числу протонов.

Группы Периоды	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	VIII		
1	H 1,0079 1s <sup>1</sup> Водород						He 4,0026 1s <sup>2</sup> Гелий				
2	Li 6,94 2s <sup>1</sup> Литий	Be 9,012 2s <sup>2</sup> Бериллий	B 10,81 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup> Бор	<b>C 12,011 2s<sup>2</sup> 2p<sup>2</sup> Углерод</b>	N 14,0067 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> Азот	O 15,999 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup> Кислород	F 18,998 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup> Фтор	Ne 20,179 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> Неон			
3	Na 22,989 3s <sup>1</sup> Натрий	Mg 24,305 3s <sup>2</sup> Магний	Al 26,981 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> Алюминий	Si 28,086 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> Кремний	P 30,973 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> Фосфор	S 32,06 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> Сера	Cl 35,453 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> Хлор	Ar 39,948 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> Аргон			
4	K 39,098 4s <sup>1</sup> Калий	Ca 40,08 4s <sup>2</sup> Кальций	Sc 44,956 3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup> Скандий	Ti 47,90 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup> Титан	V 50,942 3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup> Ванадий	Cr 51,996 3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup> Хром	Mn 54,938 3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup> Марганец		Fe 55,847 3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> Железо	Co 58,933 3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> Кобальт	Ni 58,70 3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> Никель
	Cu 63,546 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> Медь	Zn 65,38 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> Цинк	Ga 69,72 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> Галлий	Ge 72,59 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> Германий	As 74,921 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> Мышьяк	Se 78,96 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> Селен	Br 79,904 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> Бром	Kr 83,80 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> Криптон			
5	Rb 85,47 5s <sup>1</sup> Рубидий	Sr 87,62 5s <sup>2</sup> Стронций	Y 88,906 4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup> Иттрий	Zr 91,22 4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup> Цирконий	Nb 92,906 4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup> Нибобий	Mo 95,94 4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup> Молибден	Tc 98,91 4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup> Технеций		Ru 101,07 4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup> Рутений	Rh 102,905 4d <sup>8</sup> 5s <sup>1</sup> Родий	Pd 106,4 4d <sup>10</sup> Палладий
	Ag 107,868 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup> Серебро	Cd 112,41 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> Кадмий	In 114,82 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> Индий	Sn 118,71 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> Олово	Sb 121,75 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup> Сурьма	Te 127,60 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup> Телур	I 126,904 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup> Йод	Xe 131,30 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> Ксенон			
6	Cs 132,905 6s <sup>1</sup> Цезий	Ba 137,33 6s <sup>2</sup> Барий	La 138,91 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Лантан	Hf 178,49 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> Гафний	Ta 180,948 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> Тантал	W 183,85 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup> Вольфрам	Re 186,21 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup> Рений		Os 190,2 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> Осмий	Ir 192,2 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> Иридий	Pt 195,09 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup> Платина
	Au 196,967 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup> Золото	Hg 200,59 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> Ртуть	Tl 204,37 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup> Таллий	Pb 207,19 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup> Свинец	Bi 208,98 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup> Висмут	Po (209) 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup> Полоний	At (210) 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup> Астат	Rn (222) 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup> Радон			
7	Fr (223) 7s <sup>1</sup> Франций	Ra 226,025 7s <sup>2</sup> Радий	Ac (227) 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Актиний	Ku (241) 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> Курчатовий	Ns (269) 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> Нильсенов						

Лантаноиды

58	Ce 140,12 4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Церий	59	Pr 140,90 4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> Прометий	60	Nd 144,24 4f <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup> Неодим	61	Pm (145) 4f <sup>5</sup> Прометий	62	Sm 150,36 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> Самарий	63	Eu 151,96 4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> Европий	64	Gd 157,25 4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Гадолиний	65	Tb 158,925 4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup> Тербий	66	Dy 162,50 4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> Диспрозий	67	Ho 164,93 4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup> Гольмий	68	Er 167,26 4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup> Ербий	69	Tm 168,93 4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup> Термий	70	Yb 173,04 4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup> Иттербий	71	Lu 174,967 4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> Лютеций
----	---	----	--	----	--	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	--	----	--	----	--	----	---	----	---	----	---

Актиноиды

90	Th 232,038 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> Торий	91	Pa 231,036 5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Пакорий	92	U 238,0289 5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Уран	93	Np 237,048 5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Нептуний	94	Pu 244,064 5f <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup> Плутоний	95	Am 243,061 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup> Америций	96	Cm 247,077 5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Курчатовий	97	Bk 247,077 5f <sup>7</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> Берклий	98	Cf 251,083 5f <sup>10</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Калифорний	99	Es 254,083 5f <sup>11</sup> 7s <sup>2</sup> Эйнштейний	100	Fm 257,103 5f <sup>12</sup> 7s <sup>2</sup> Фермий	101	Md 258,103 5f <sup>13</sup> 7s <sup>2</sup> Менделеев	102	[259] 5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup> Нобелий	103	Lr 260,103 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> Лоренций
----	--	----	--	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	--	----	--	----	--	-----	--	-----	---	-----	--	-----	--



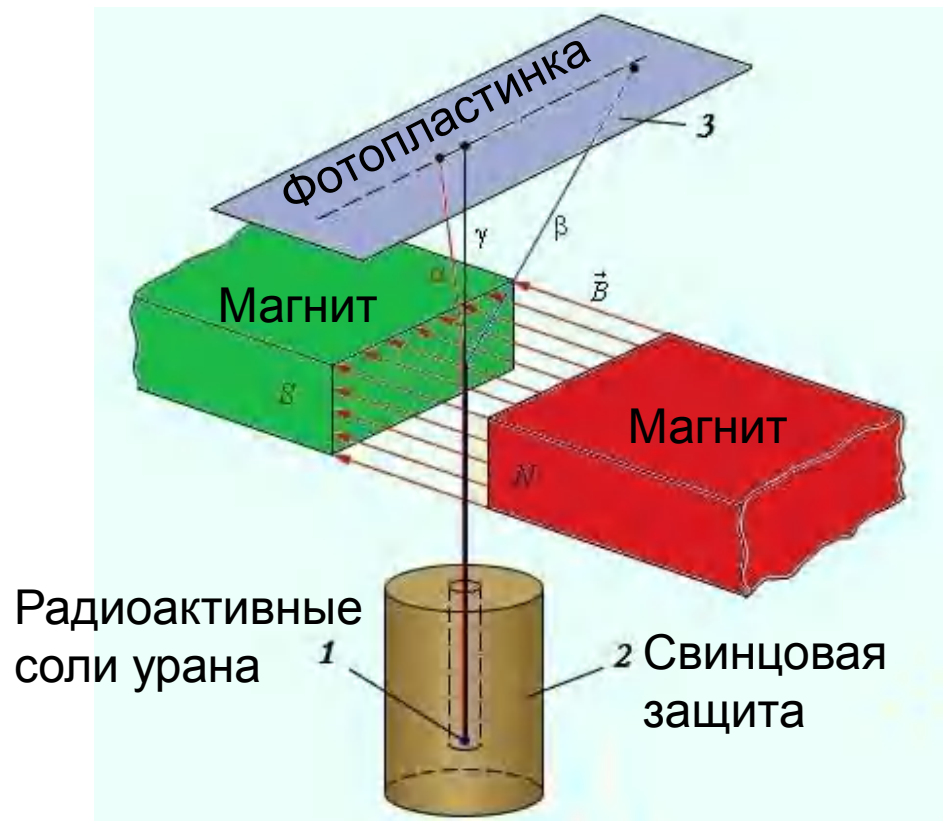
Радиоактивный распад – спонтанное изменение  $Z$  и  $Z+N$ , сопровождающееся испусканием частиц или более легких ядер.

Скорость радиоактивного распада постоянна, не зависит ни от температуры, ни от давления [прим.: для любых геологических целей].

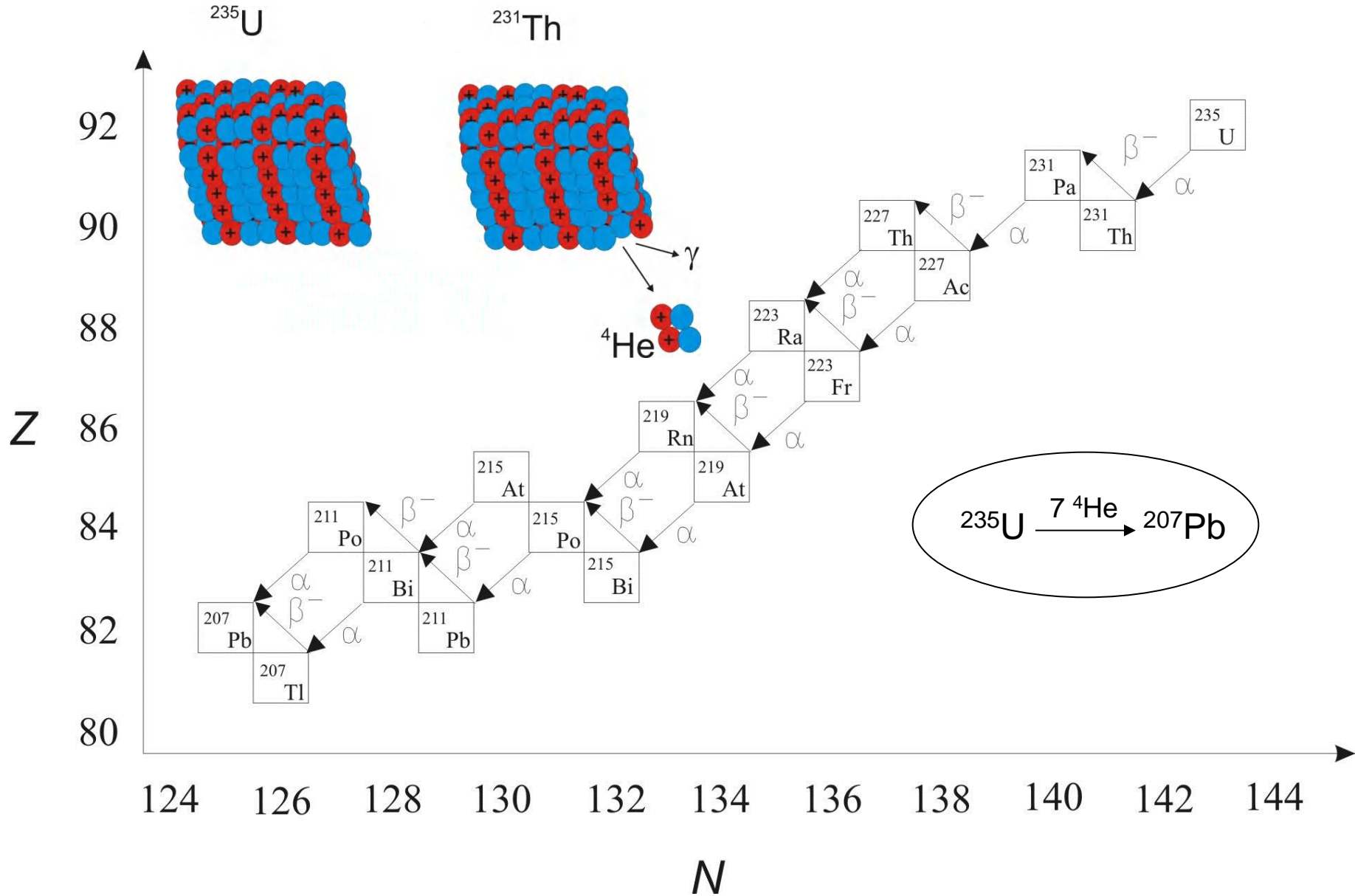
# Радиоактивность

Альфа ( $\alpha$ ), бета ( $\beta$ ), гамма ( $\gamma$ )

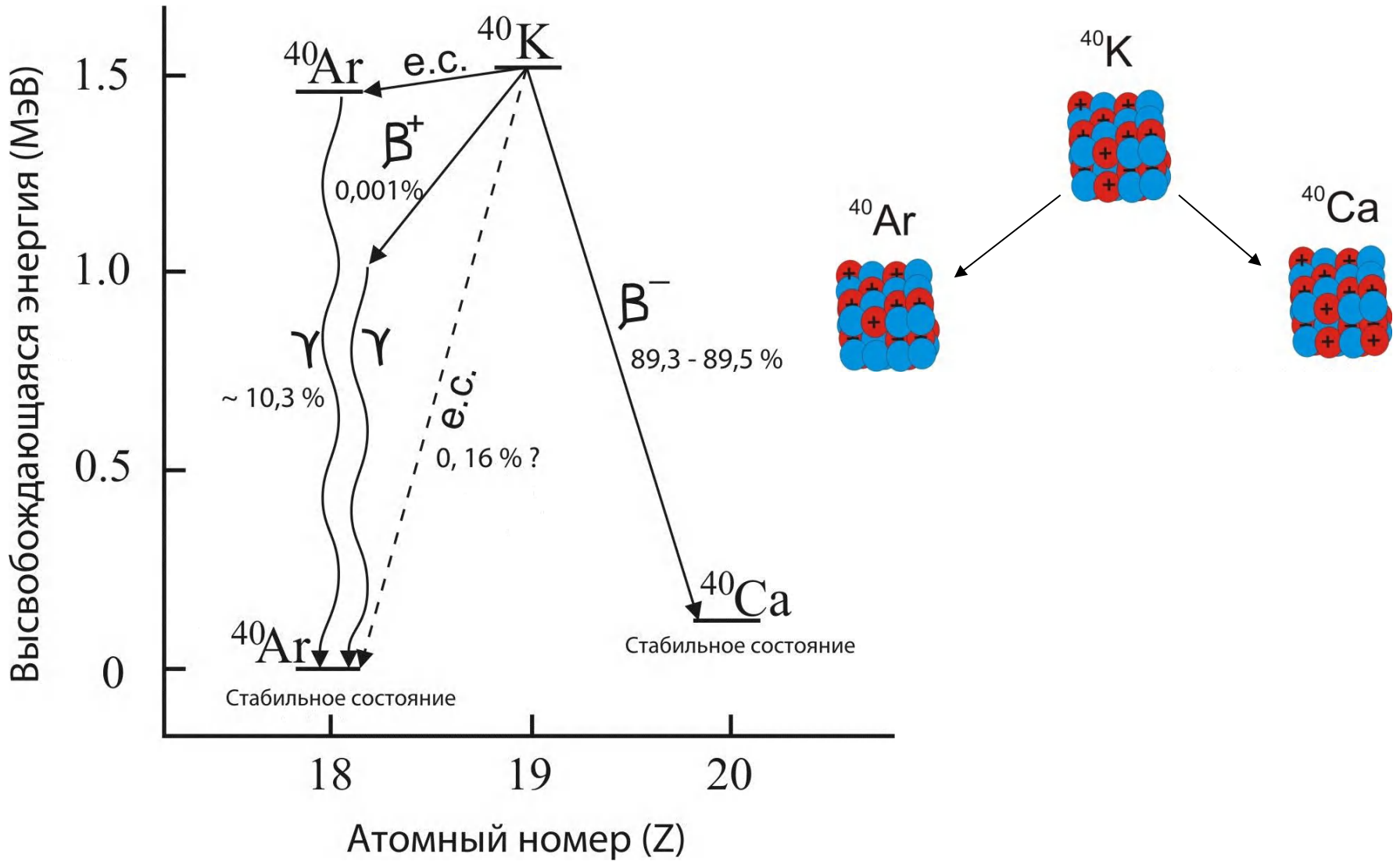
Эрнест Резерфорд  
1871-1937



$\alpha$  частица – атом гелия  
 $\alpha$ -распаду подвержены только тяжелые ядра



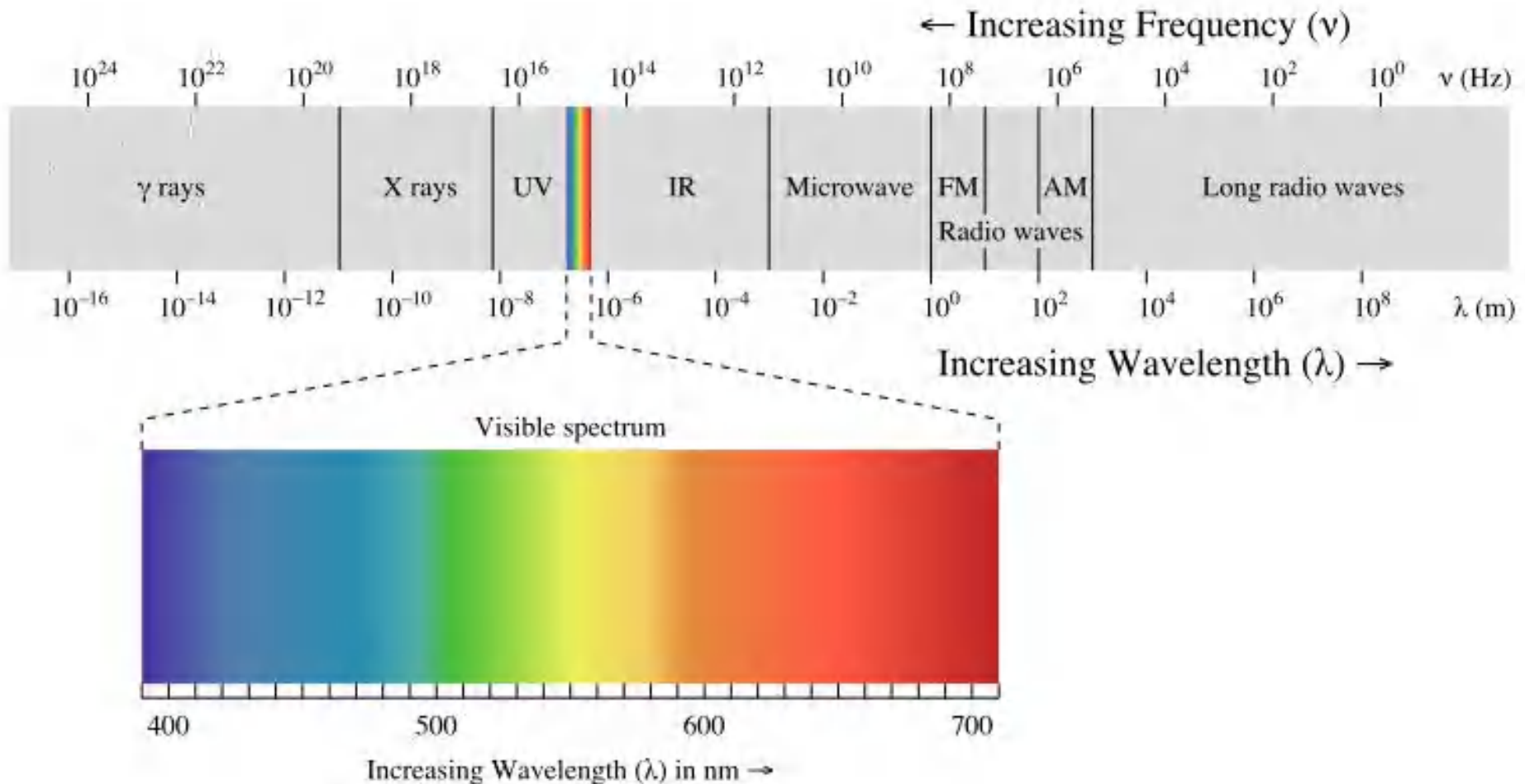
При  $\beta$  превращении происходит изменение заряда на 1



$\beta^-$ ,  $\beta^+$  и захват электрона



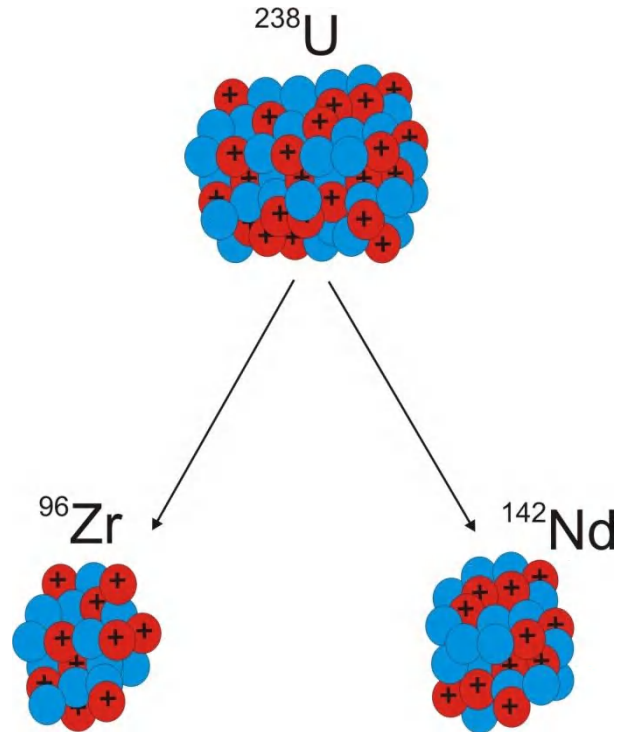
$\gamma$  – электромагнитное излучение с очень маленькой длиной волны  
 $\gamma$ -квант – фотон с энергией  $> 10$  кэВ.



# Радиоактивный распад – деление ядер



**Георгий Николаевич  
Флёров (1913-1990)**

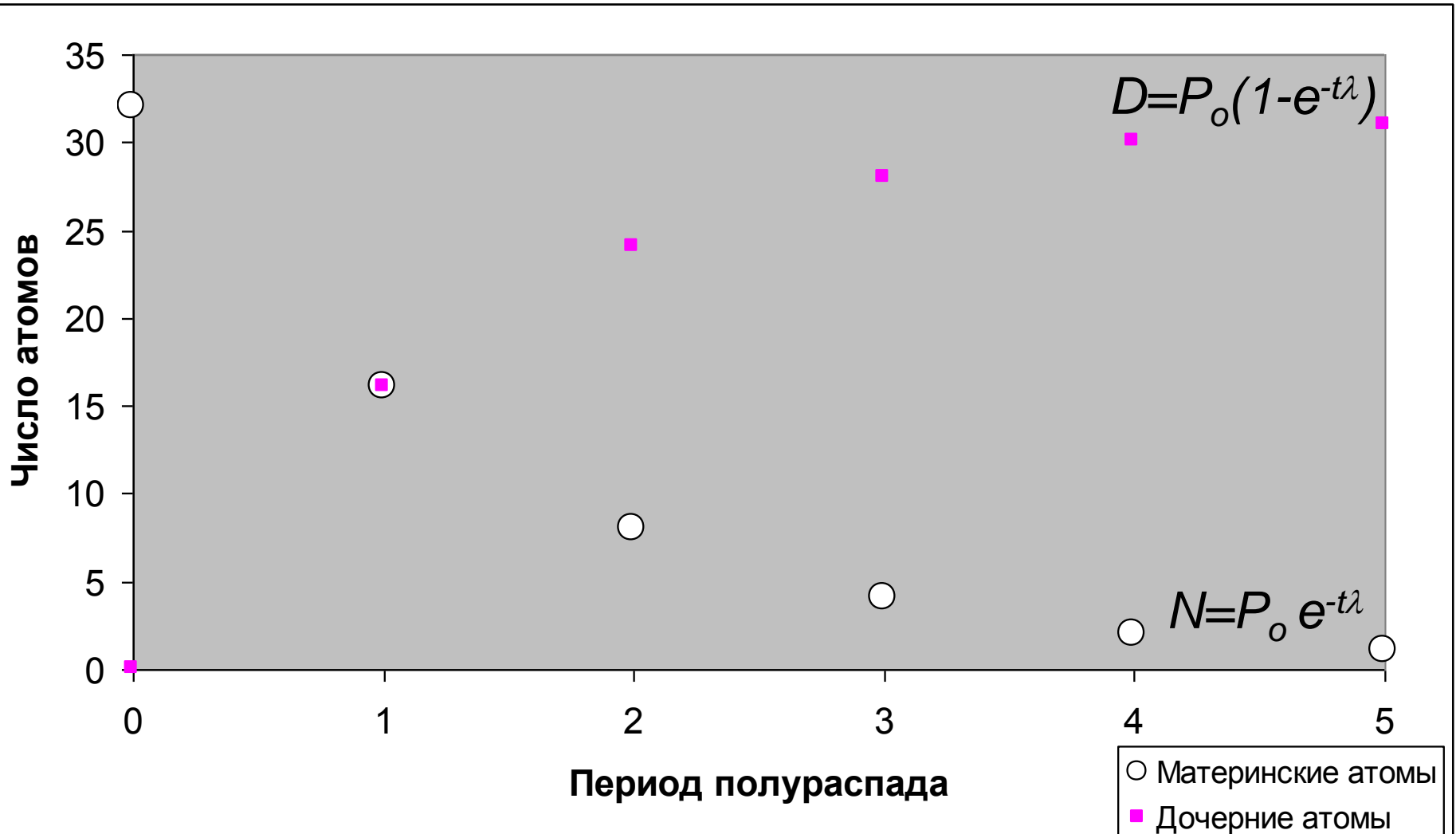


**Константин Антонович  
Петржак (1907-1998)**

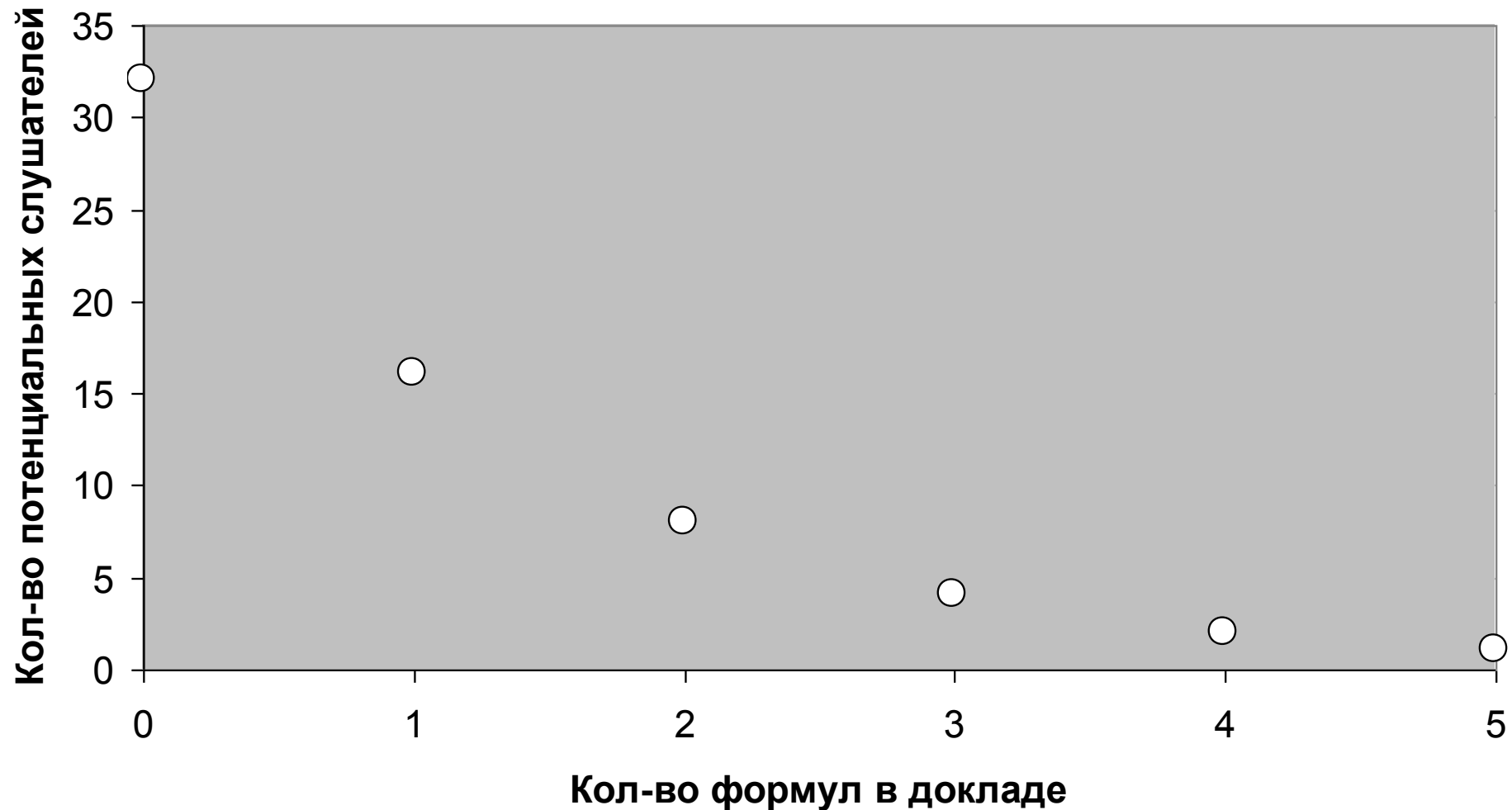
Флеров Г.Н., Петржак К.А. Спонтанное деление урана //  
Доклад на Совещании по атомному ядру, 1940

# Константа распада и период полураспада

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$



*«Редактор [научно-популярной книги] мне сказал, - каждая формула сокращает число потенциальных слушателей вдвое». Стивен Хокинг*



Методы:

## 1. Радиоактивный распад

1.1. По отношению материнского и дочернего изотопа ( $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ ,  
 $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{235,238}\text{U}$ - $^{207,206}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ - $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{187}\text{Re}$ - $^{187}\text{Os}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Sr}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  и др.)

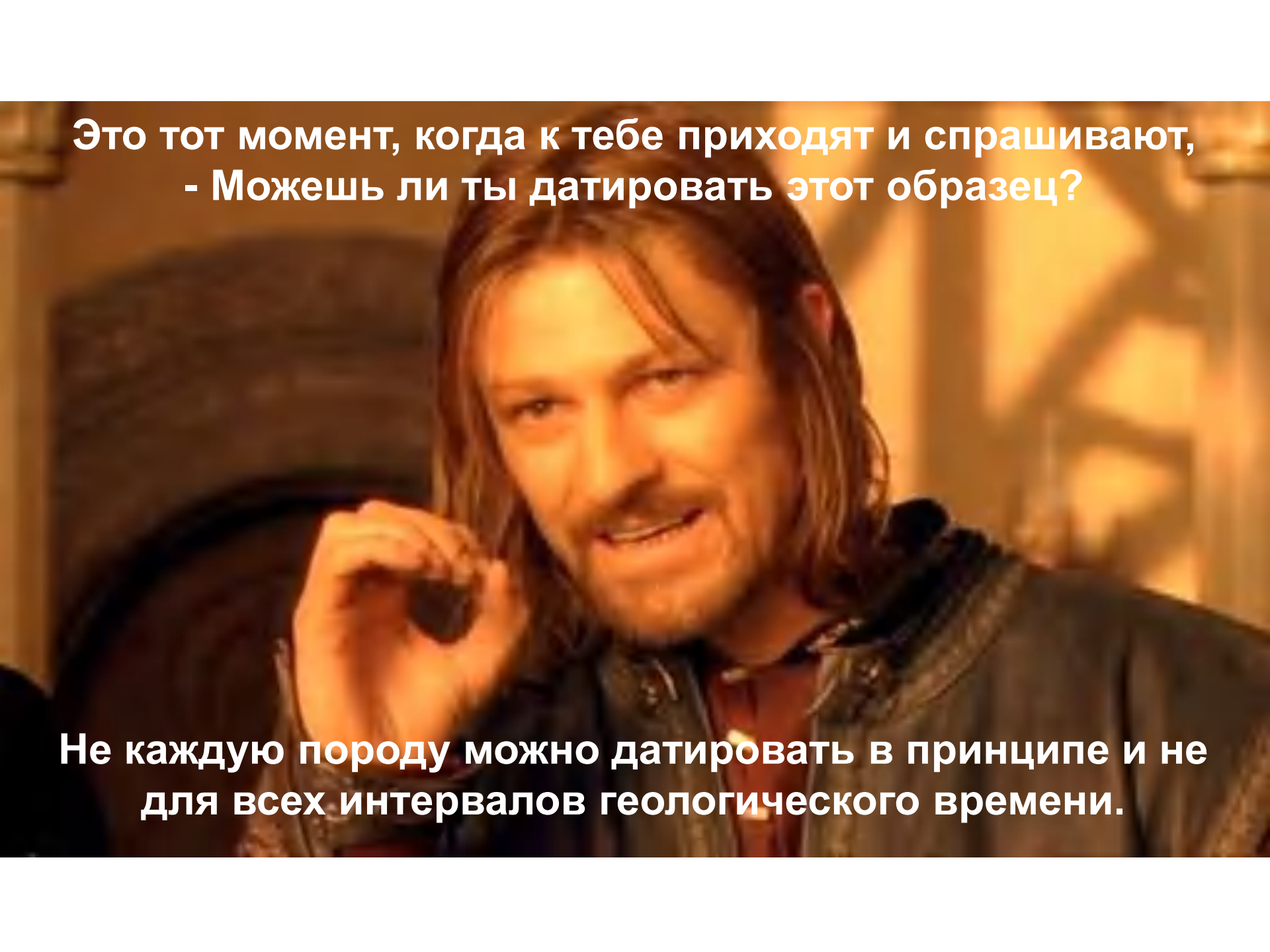
1.2. По остаточному количеству радиоактивного изотопа  
( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$  и др.)

2. Накопление изотопа под воздействием космического излучения  
( $^3\text{He}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{38}\text{Ar}$  и др.)

3. Радиационные дефекты в кристаллах  
(TL, OSL, FT и др.)

4. Химические изменения в веществе (например, в вулканических стеклах)

Методов много, Но!



**Это тот момент, когда к тебе приходят и спрашивают,  
- Можешь ли ты датировать этот образец?**

**Не каждую породу можно датировать в принципе и не  
для всех интервалов геологического времени.**