



# Общая геохимия

## Лекция 8

### Изотопная геохимия.

### **U-Pb метод**

# U-Pb метод

## U, Th and Pb in the periodic table

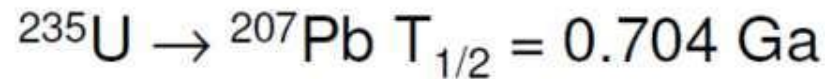
1																	2	
H																	He	
3	4											5	6	7	8	9	10	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
11	12											13	14	15	16	17	18	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37	38	39	40	41	42	43	44	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.

( $U^{4+}=1.05\text{\AA}$ ,  $Th^{4+}=1.10\text{\AA}$ )

# U-Th-Pb method

Method is based on the following three decay reactions:



$^{204}\text{Pb}$  is a non-radiogenic, stable isotope. We can therefore write:

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda_1 t} - 1)$$

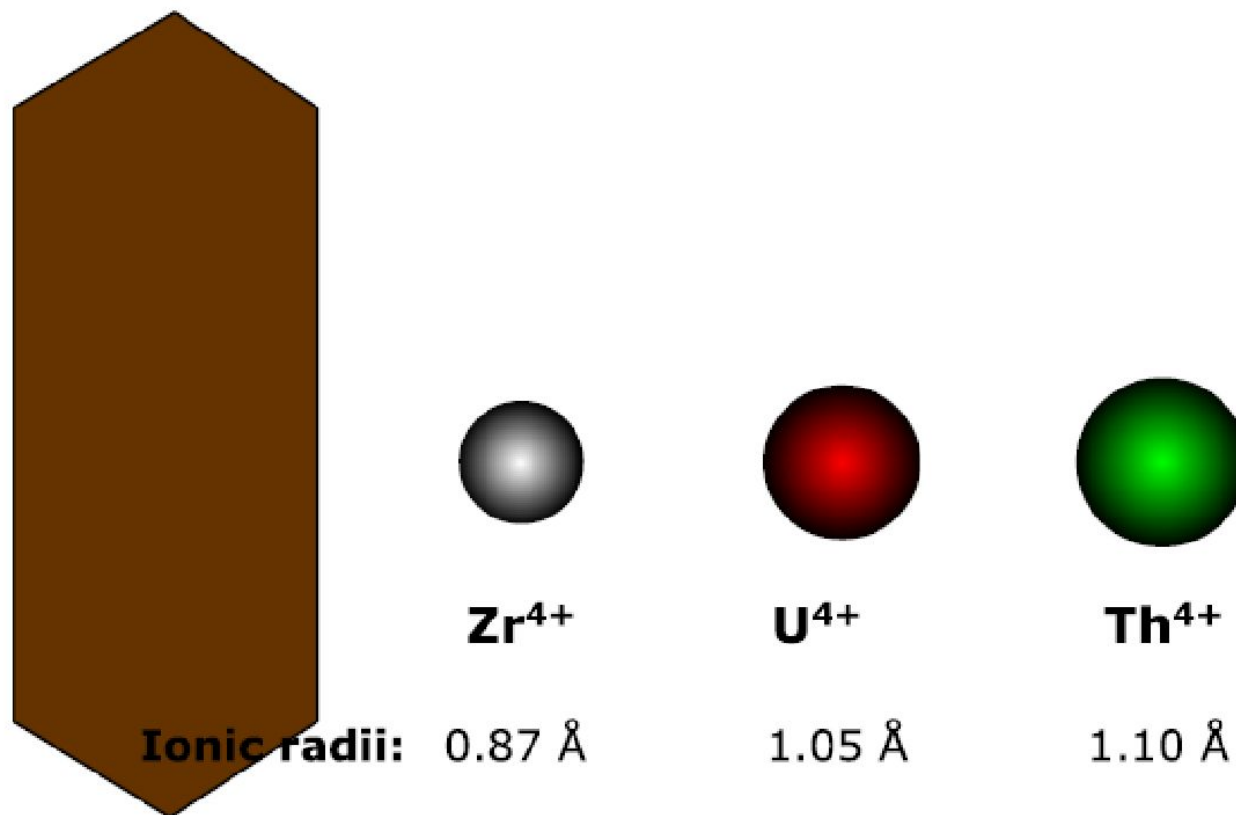
$$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda_2 t} - 1)$$

$$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = \left( \frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)_0 + \frac{^{232}\text{Th}}{^{204}\text{Pb}} (e^{\lambda_3 t} - 1)$$

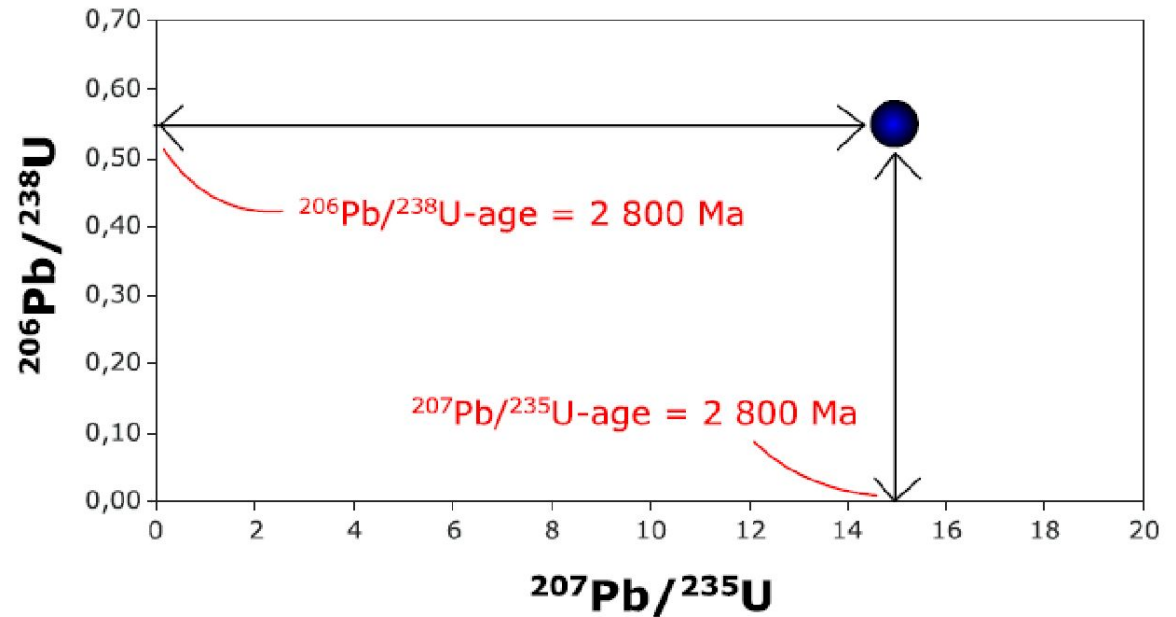
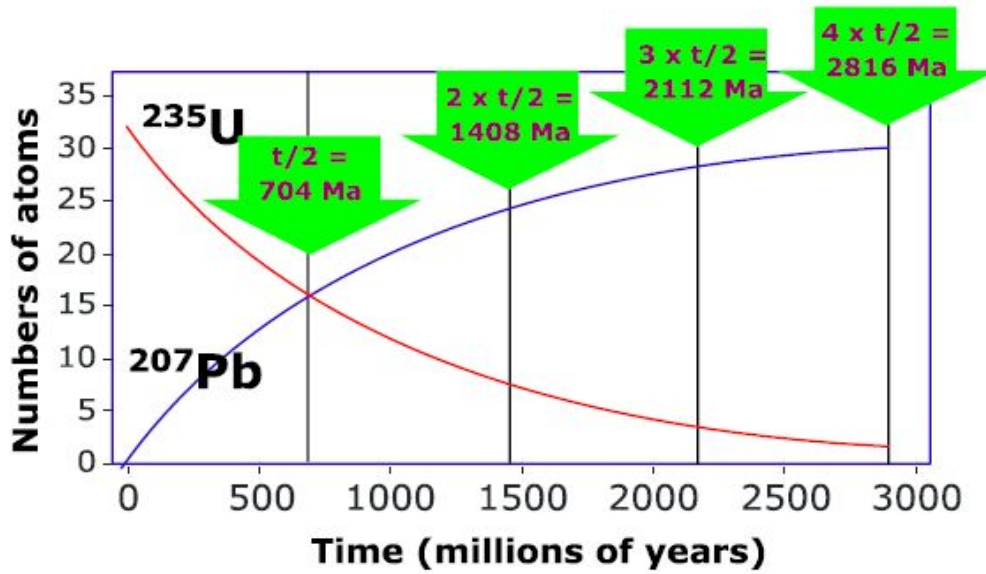
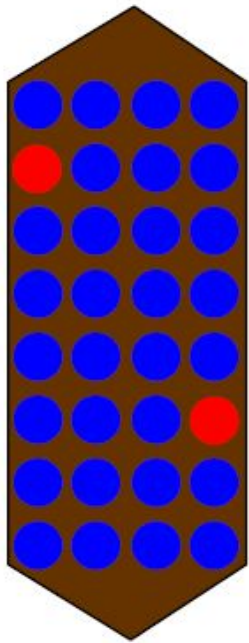


У Рb большой ионный радиус и низкая валентность 2, чтобы удерживаться в структуре циркона

Циркон

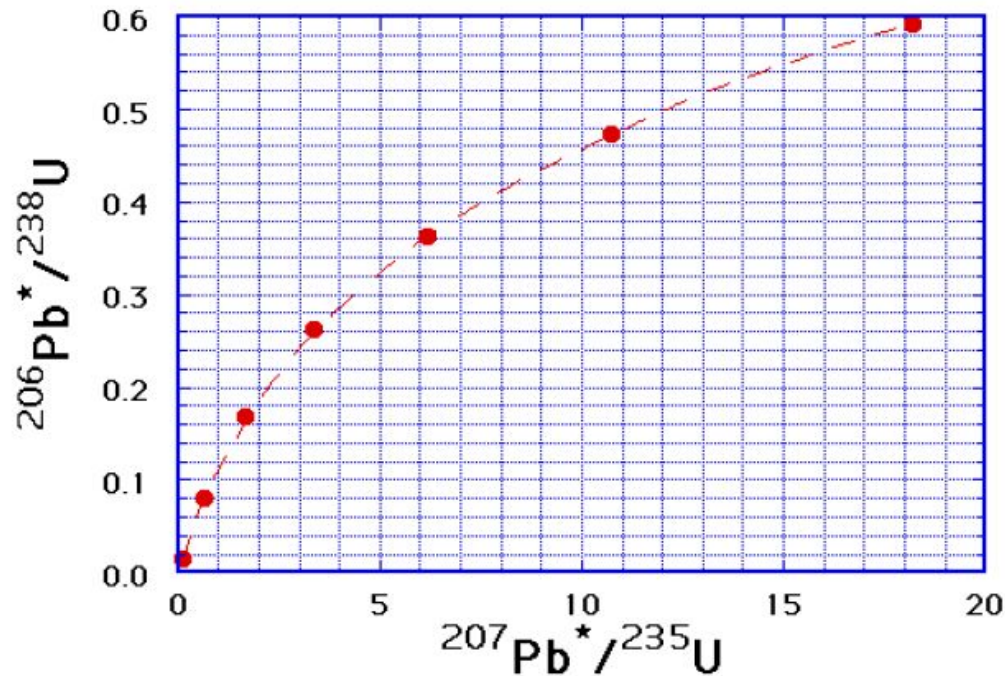






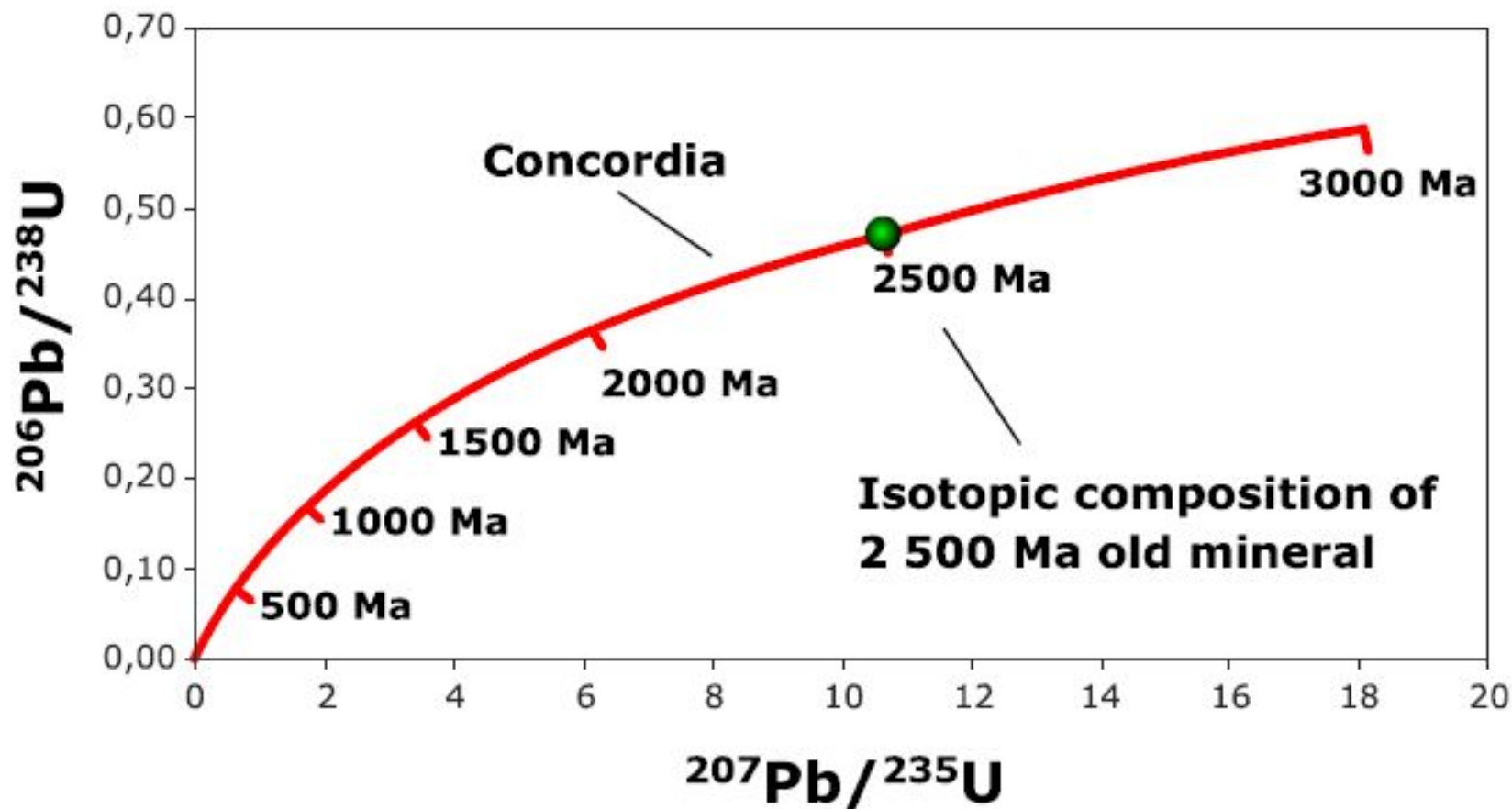
# U-Pb Concordia diagram

$$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U} = (e^{\lambda t_1} - 1), \quad ^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U} = (e^{\lambda t_2} - 1)$$



# Конкордия графическое представление двух независимых геохронометров

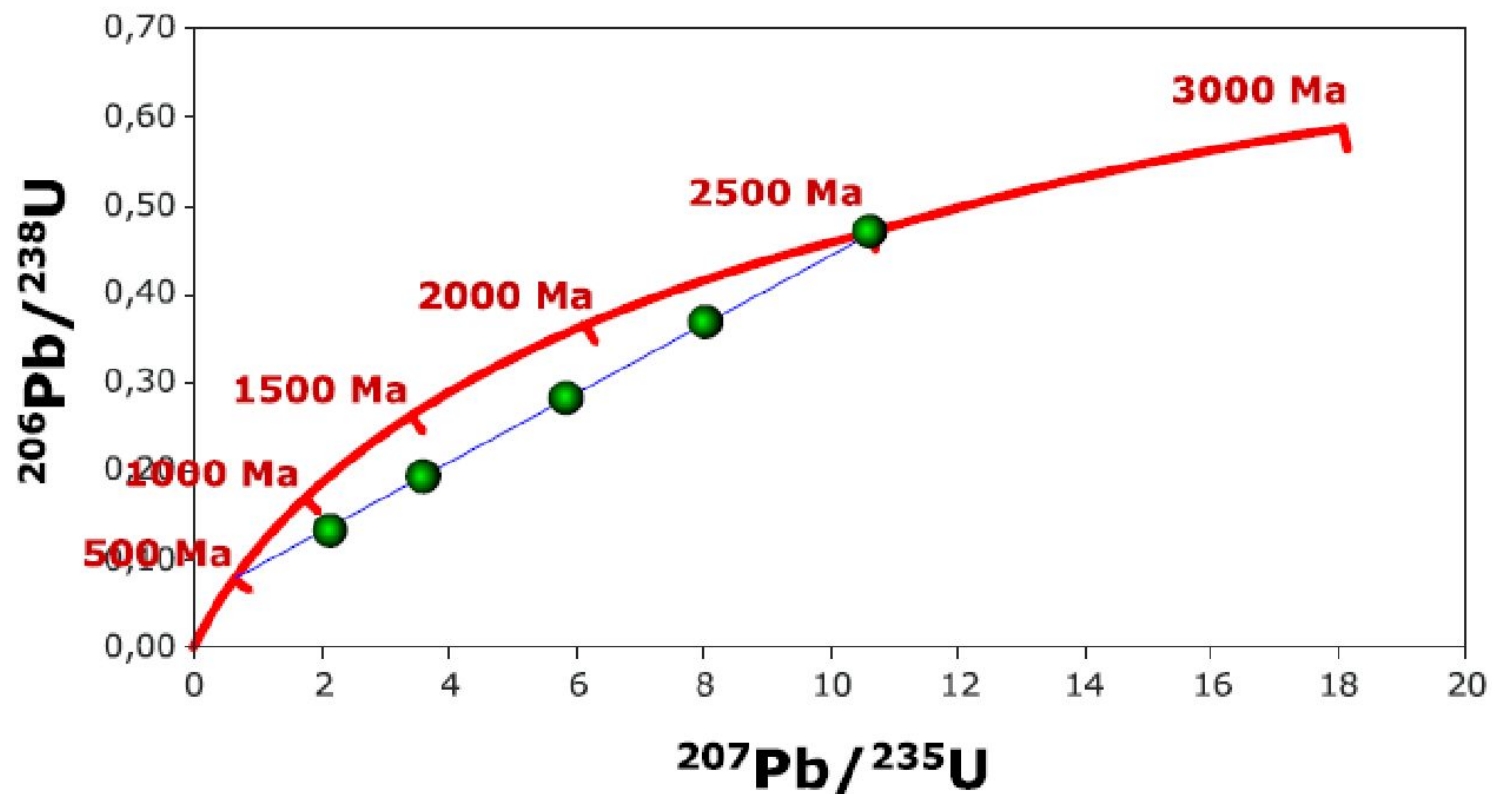
## The concordia diagram



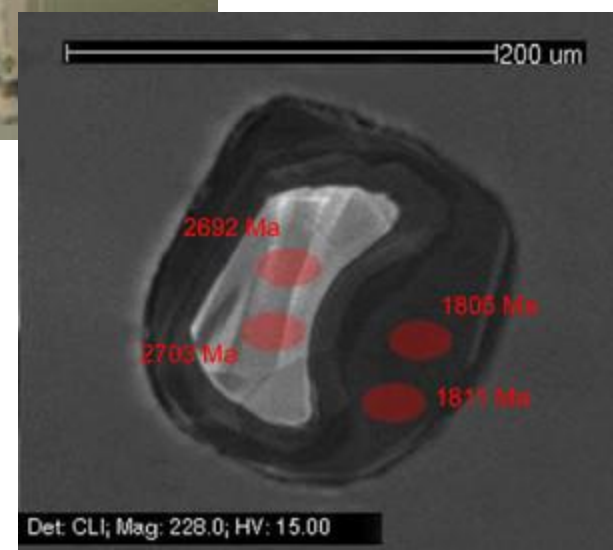


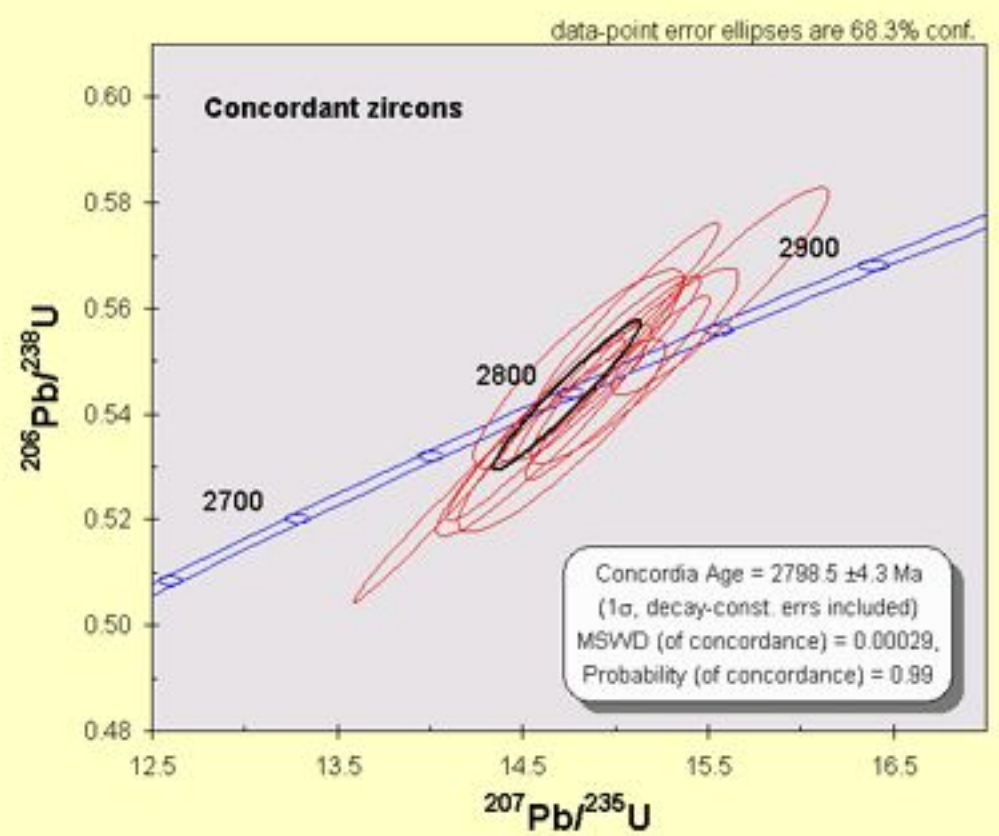
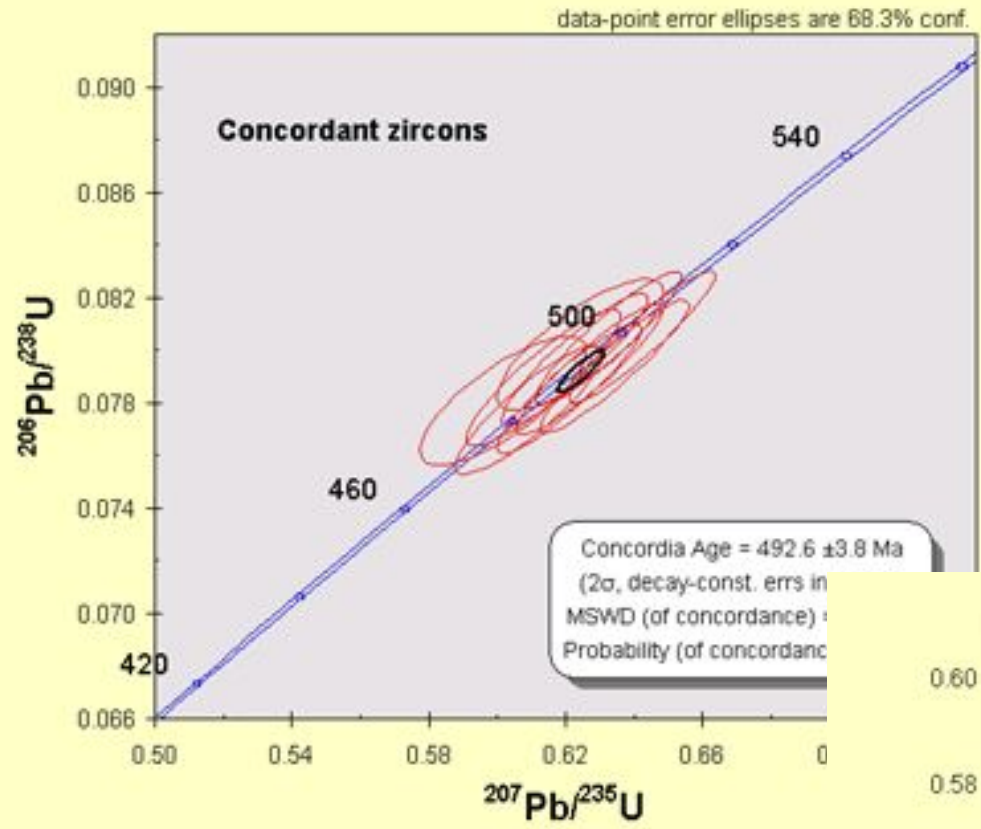
**Дискордия** - в римской мифологии богиня раздора

**Дискордия** – линия, соединяющая несогласующиеся (расходящиеся) значения возраста, получаемые U-Pb методом при отсутствии изотопного равновесия.

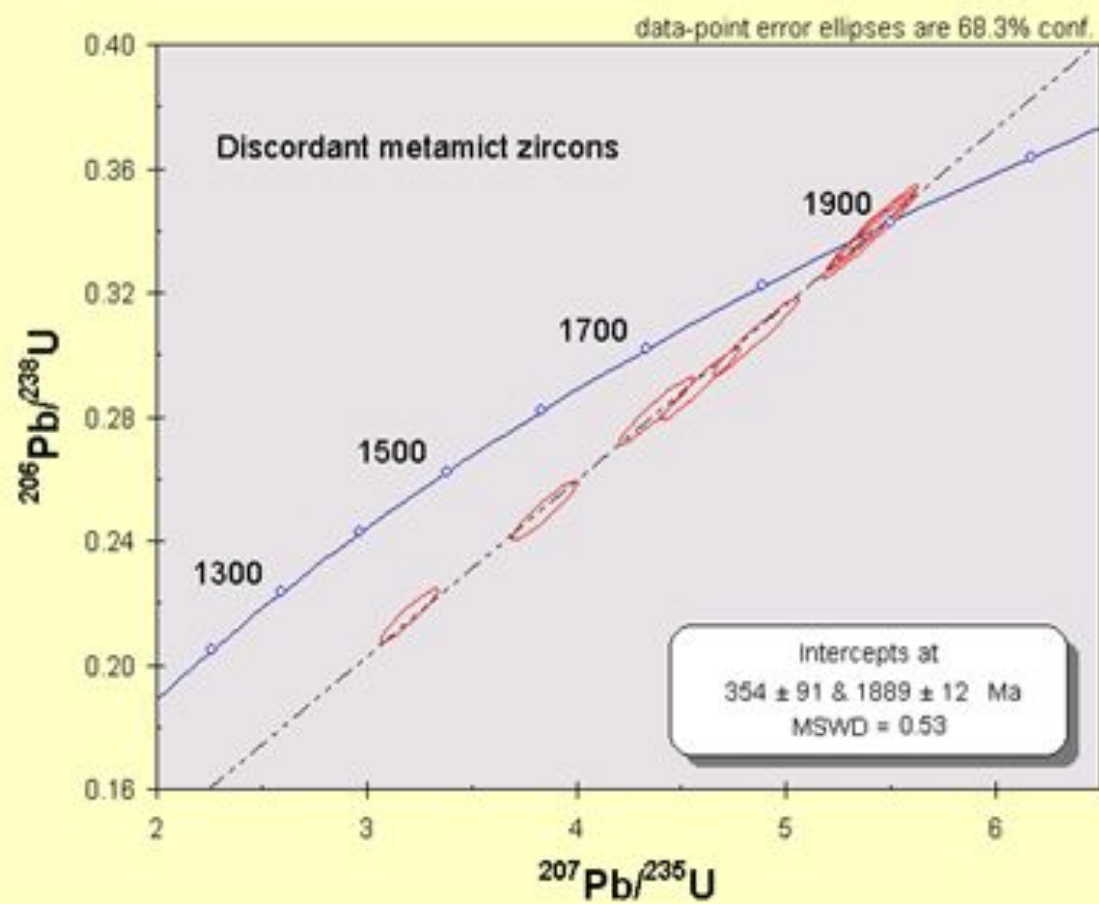
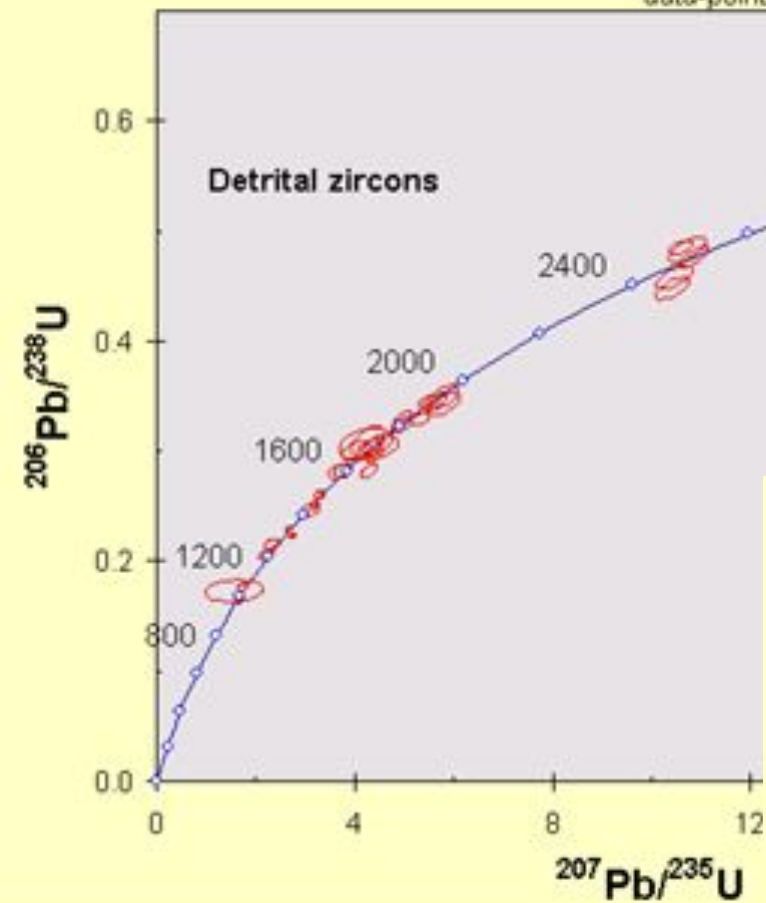


# Ионный микрозонд SHRIMP-II (ЦИИ ВСЕГЕИ)





data-point error ellipses are 68.3% conf.

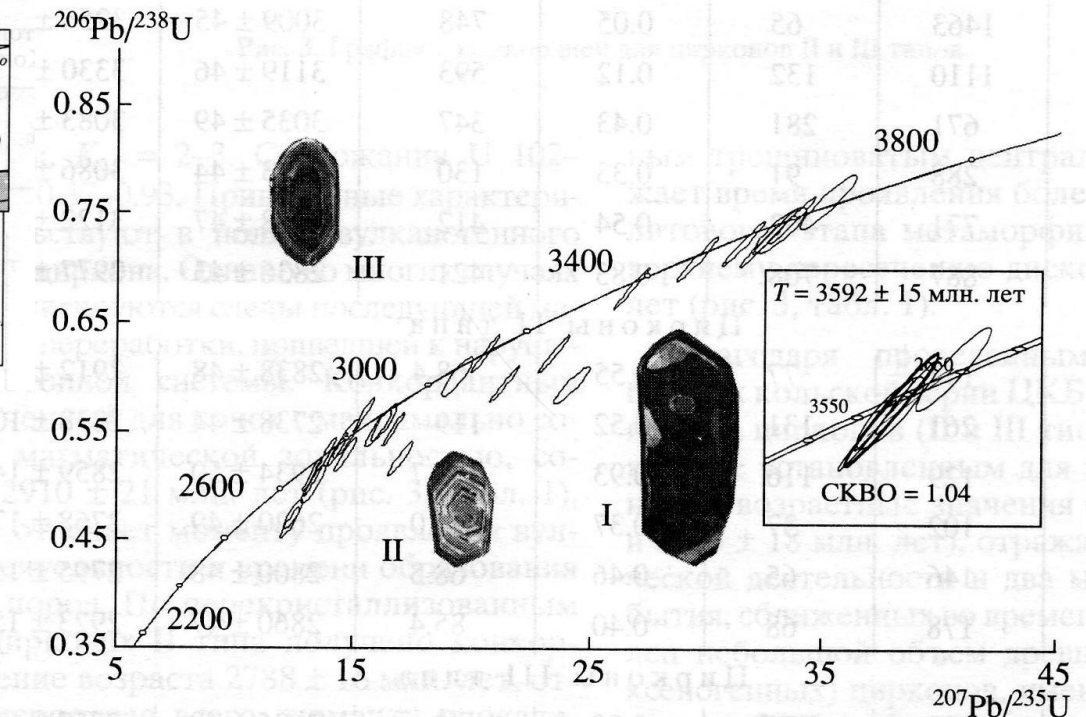
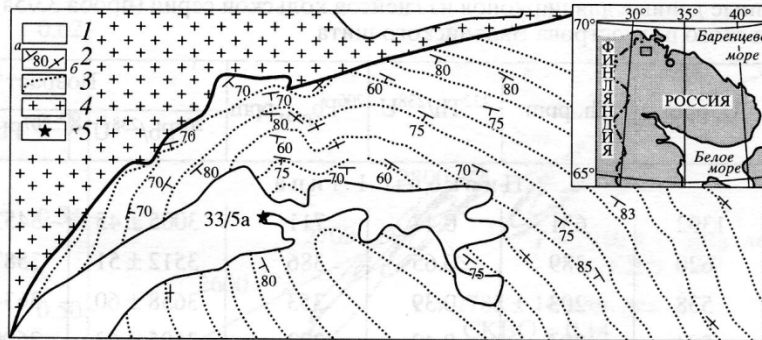




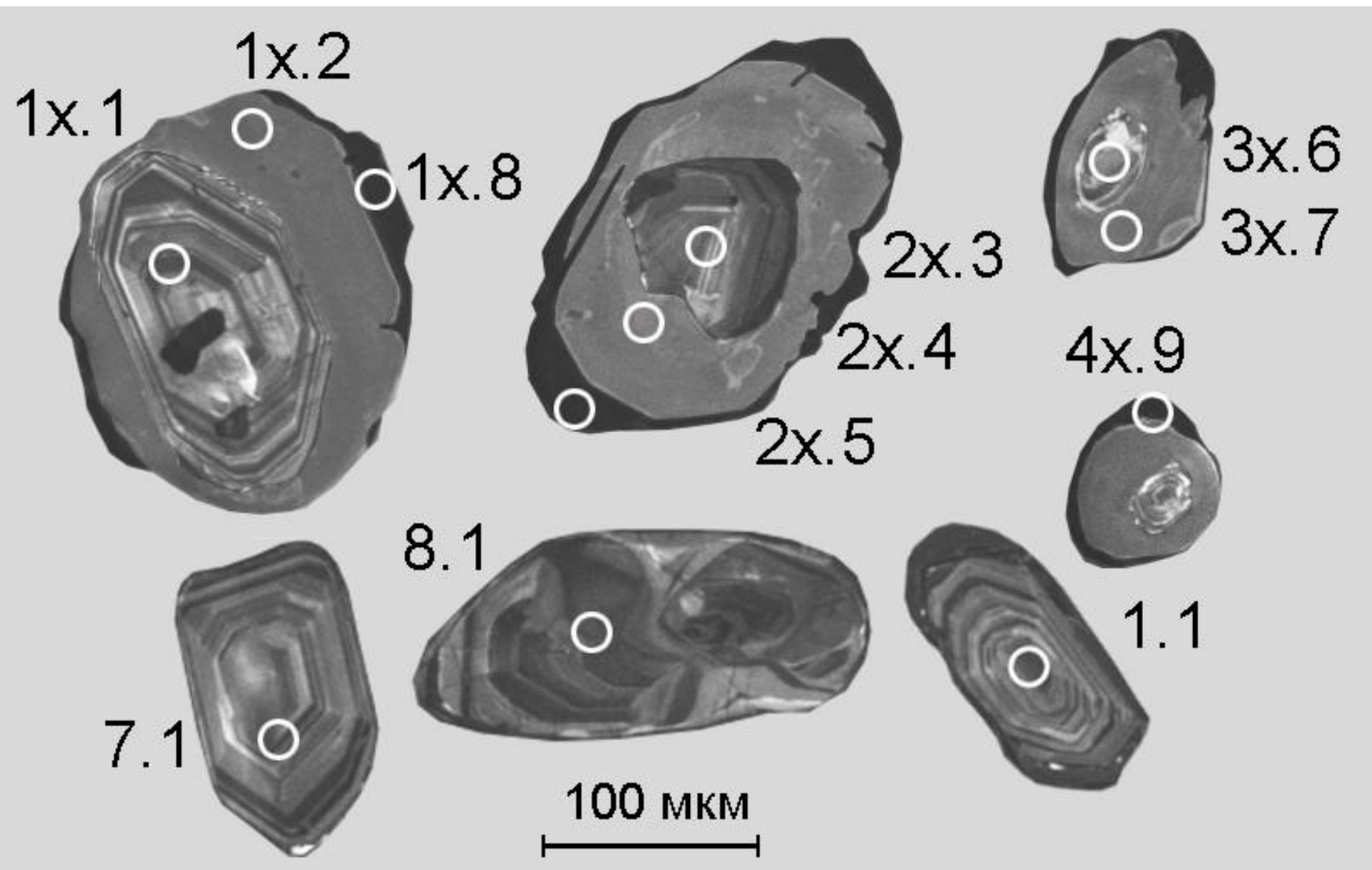
УДК 549.514.81

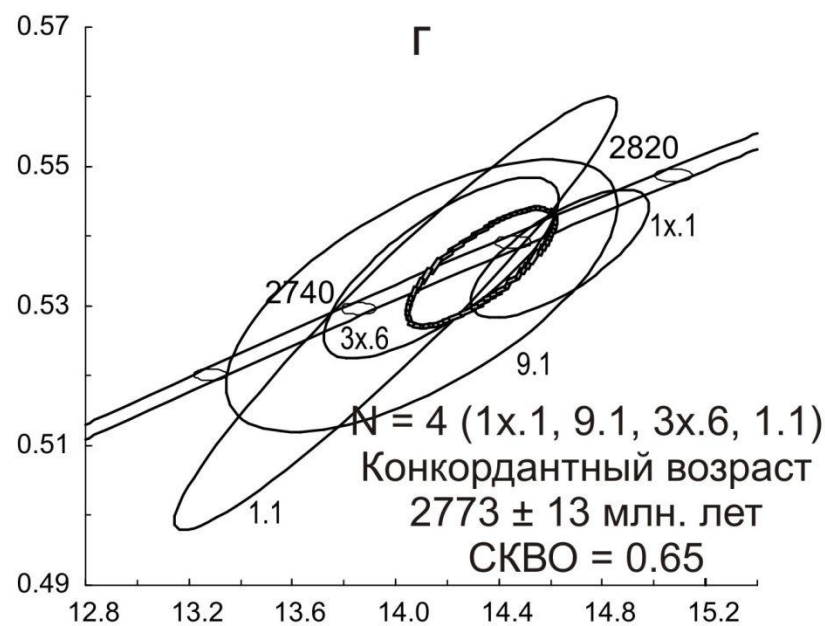
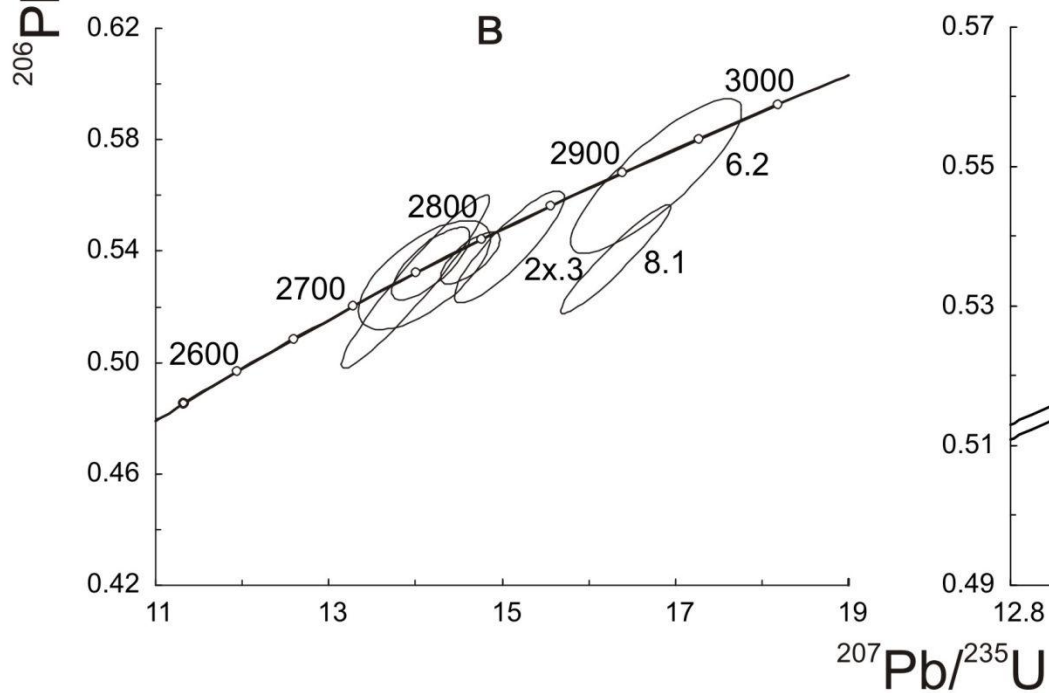
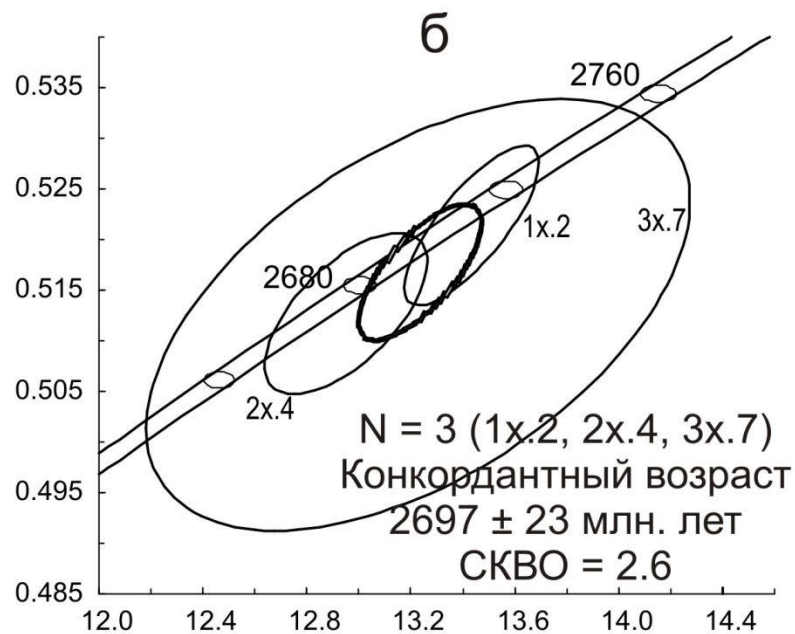
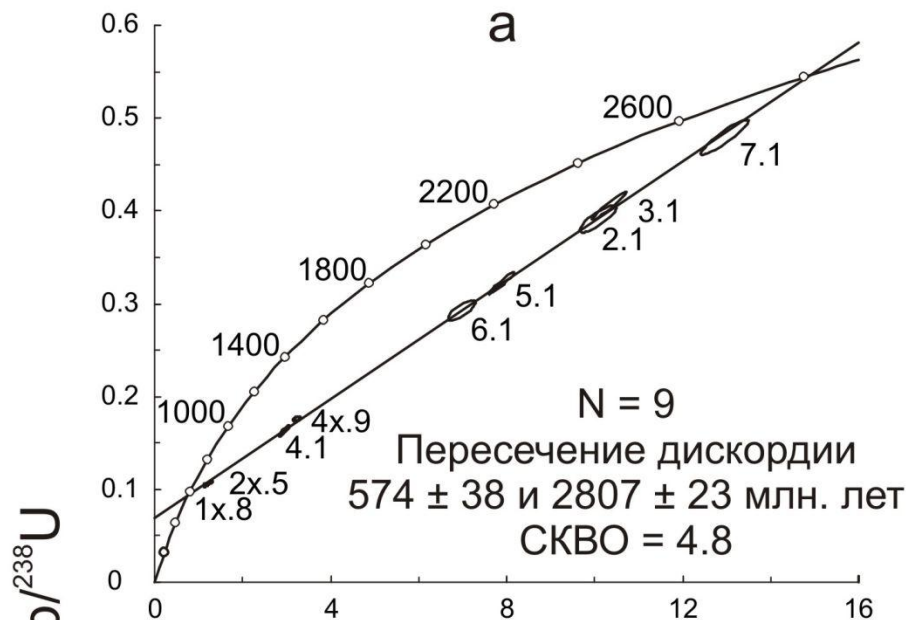
# ГЕОХИМИЯ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ КАЙМ ЦИРКОНА В ГНЕЙСАХ КОЛЬСКОЙ СЕРИИ (SIMS, SHRIMP-II) И ПРОБЛЕМА РАННЕКАЛЕДОНСКОЙ ТЕРМАЛЬНОЙ АКТИВИЗАЦИИ КОЛЬСКОГО КРАТОНА

© 2013 г. С. Г. Скублов, Т. А. Мыскова, член-корреспондент РАН Ю. Б. Марин,  
Б. Ю. Астафьев, Е. С. Богомолов, П. А. Львов





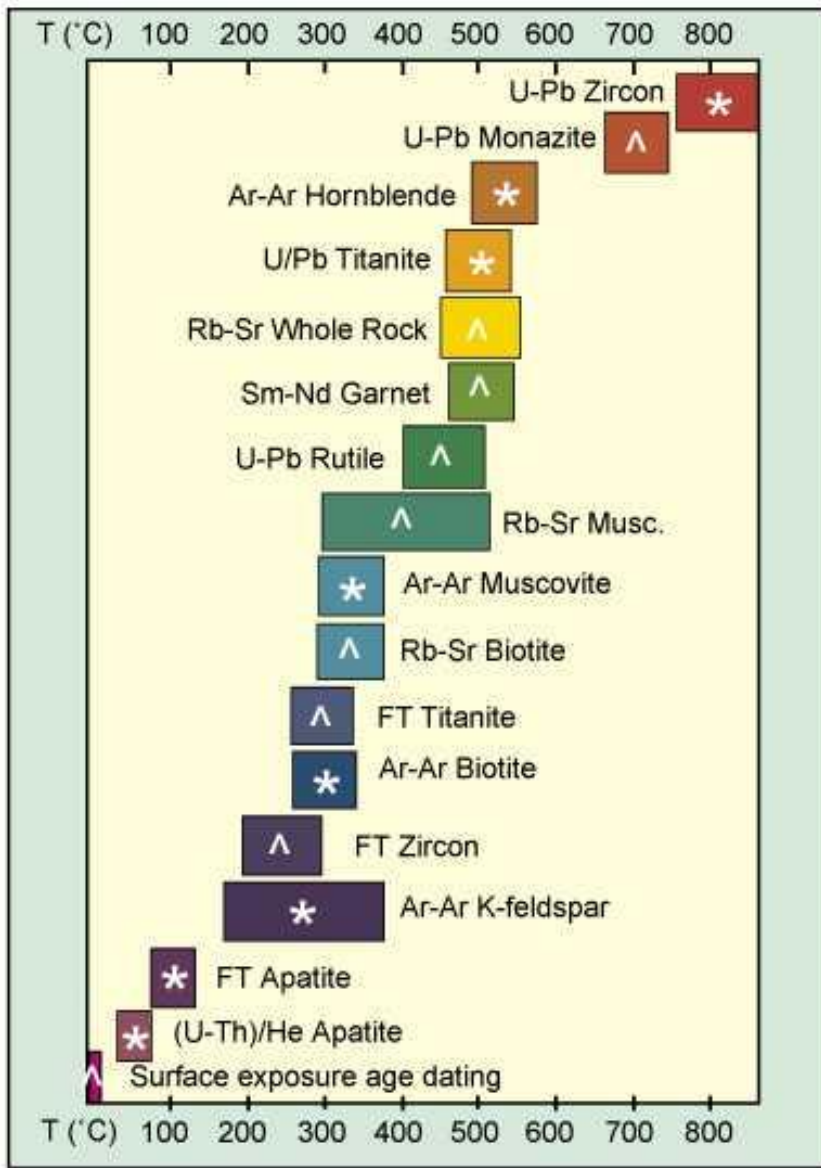




# Термохронология

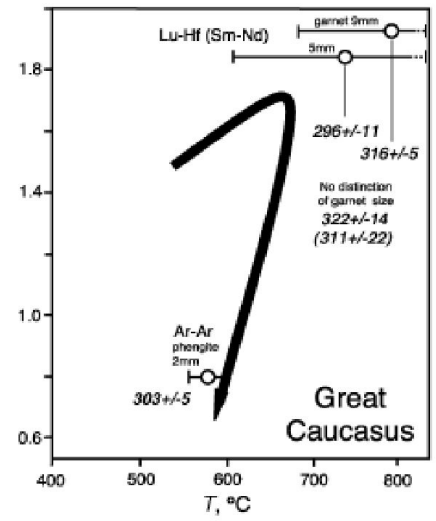
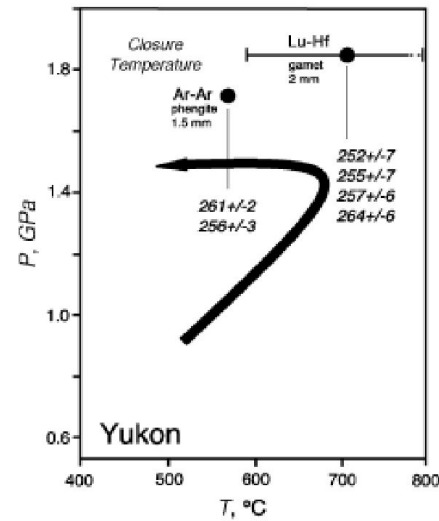
- Температуры закрытия U-Pb системы для парагенных циркона – около  $900^{\circ}\text{C}$ , сфена – до  $700^{\circ}\text{C}$ , апатита – около  $450^{\circ}\text{C}$ . U-Pb датирование этих минералов дает возможность оценить скорость охлаждения при магматической кристаллизации или метаморфизме.
- Температура 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).



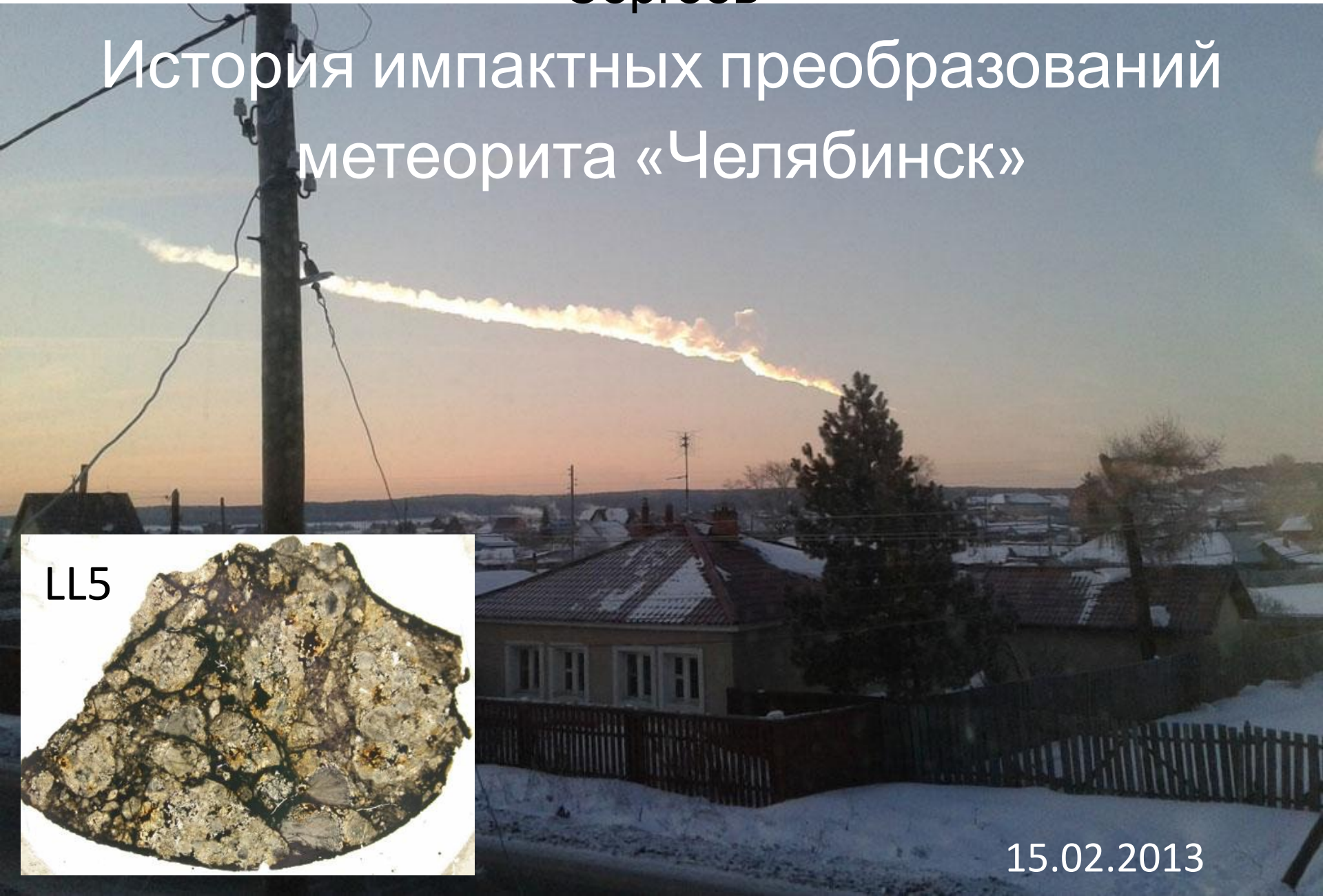
**Изотопно-геохимические (генетические)  
(возможности и требо**

**методы и изотопное датирование  
вания к образцам)**

Горные породы	Исследуемый минерал	Требования к пробам	Метод определения возраста получения генетической информации
<p><b>Магматические</b></p> <p>Кислые</p> <p>Основные, ультраосновные</p> <p>Щелочные</p> <p>С платинометаллической минерализацией</p> <p>Сульфидные руды</p>	<p>Циркон, бадделент, монацит, валовая порода, плагиоклаз, гранат</p> <p>Циркон, бадделент, монацит, валовая порода, плагиоклаз, гранат, пироксены, амфибол, оливин</p> <p>Циркон, монацит, валовая порода, плагиоклаз, гранат, пироксены, амфибол, оливин</p> <p>Os-содержащие минералы ЭПГ</p> <p>Галенит, арсенопирит и др. сульфиды с содержанием Pb &gt;500 ppm</p>	<p>Не менее 10 единичных зерен минерала размером &gt;50 мкм или проба породы 3 – 5 кг</p> <p>Не менее 5 навесок породы и минералов по 250 мг</p> <p>Не менее 5 навесок породы и минералов по 250 мг</p> <p>Единичные зерна размером &gt;50 мкм</p> <p>Единичные зерна сульфидов размером &gt;500 мкм</p>	<p>U-Pb(локальный) Rb-Sr, Sm-Nd, Nd(модельный), Th/U, REE, IR Sr, εNd, εHf</p> <p>U-Pb, Sm-Nd, Hf, Nd (модельные), IR Sr, εNd, εHf</p> <p>Rb-Sr, Sm-Nd, Hf, Nd (модельные), IR Sr, Nd, Hf</p> <p>Os(модельный) / εOs</p> <p>Pb-Pb(модельный)</p>
<p><b>Метаморфические</b></p> <p>Кислые, основные</p>	<p>Циркон, бадделент, монацит</p>	<p>Не менее 10 единичных зерен минерала размером &gt;50 мкм или проба породы 3 – 5 кг</p>	<p>U-Pb(локальный), Th/U, REE</p>
<p><b>Метасоматические</b></p> <p>Высокотемпературные метасоматиты</p> <p>Гидротермальные образования</p>	<p>Циркон, бадделент, монацит</p> <p>Слюды, галенит, арсенопирит и др. сульфиды с содержанием Pb &gt;500 ppm; сфен, уранинит и другие U-содержащие минералы</p>	<p>Не менее 10 единичных зерен минерала размером &gt;50 мкм или проба породы 3 – 5 кг</p> <p>Навеска мономинеральной фракции слюды &gt;50 мг, единичные зерна сульфидов размером &gt;500 мкм; не менее 20 единичных зерен U-содержащих минералов размером &gt;50 мкм или проба породы весом 3 – 5 кг</p>	<p>U-Pb(локальный), Th/U, REE</p> <p>Rb-Sr, Pb-Pb(модельный, локальный), IR Sr, Pb-Pb</p>
<p><b>Осадочные</b></p>	<p>Карбонаты, слюда из цемента песчаников, циркон из терригенной составляющей</p>	<p>Навеска карбоната &gt;100 мг, навеска мономинеральной фракции слюды &gt;50 мг, 50 – 70 зерен циркона</p>	<p>Изотопная хемотратиграфия, Rb-Sr, <sup>210</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb / IR Sr, δ<sup>13</sup>C, δ<sup>18</sup>O, <sup>87</sup>Sr-<sup>86</sup>Sr</p>

С.Г. Скублов, Е.С. Богомоллов, С.Л. Пресняков, С.А.  
Сергеев

# История импактных преобразований метеорита «Челябинск»



15.02.2013



# Изотопно-геохимическое исследование метеорита

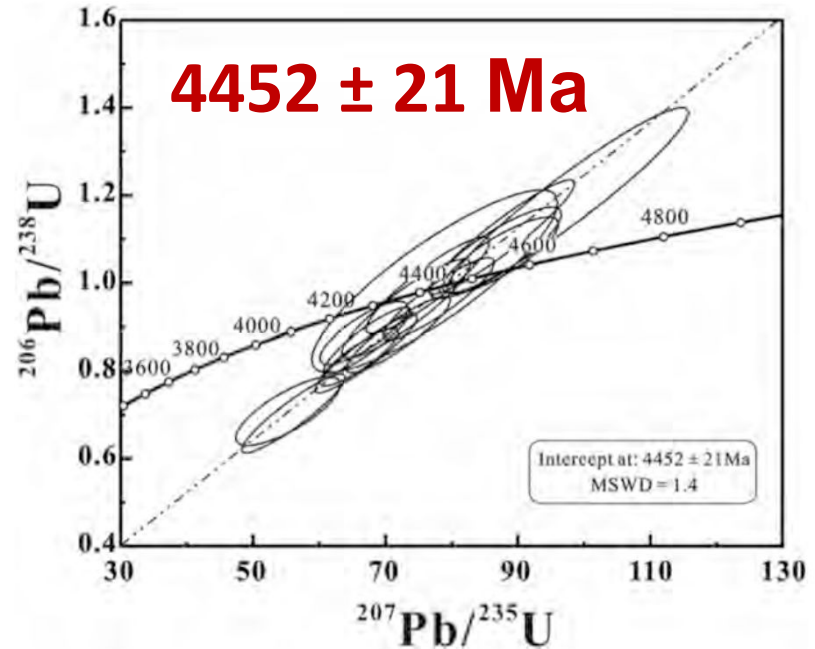
- локальное U-Pb датирование апатита in situ

Scienceexpress

Res

## Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization

Olga P. Popova,<sup>1</sup> Peter Jenniskens,<sup>2,3\*</sup> Vacheslav Emel'yanenko,<sup>4</sup> Anna Kartashova,<sup>4</sup> Eugeny Biryukov,<sup>5</sup> Sergey Khaibrakhmanov,<sup>6</sup> Valery Shuvalov,<sup>1</sup> Yuriy Rybnov,<sup>1</sup> Alexandr Dudorov,<sup>6</sup> Victor I. Grokhovsky,<sup>7</sup> Dmitry D. Badyukov,<sup>8</sup> Qing-Zhu Yin,<sup>9</sup> Peter S. Gural,<sup>2</sup> Jim Albers,<sup>2</sup> Mikael Granvik,<sup>10</sup> Láslo G. Evers,<sup>11,12</sup> Jacob Kujper,<sup>11</sup> Vladimir Kharlamov,<sup>1</sup> Andrey Soloyyov,<sup>13</sup> Yuri S. Rusakov,<sup>14</sup> Stanislav Korotkiy,<sup>15</sup> Ilya Serdyuk,<sup>16</sup> Alexander V. Korochantsev,<sup>8</sup> Michail Yu Larjonov,<sup>7</sup> Dmitry Glazachev,<sup>1</sup> Alexander E. Mayer,<sup>6</sup> Galen Gisler,<sup>17</sup> Sergei V. Gladkovsky,<sup>18</sup> Josh Wimpenny,<sup>9</sup> Matthew E. Sanborn,<sup>9</sup> Akane Yamakawa,<sup>9</sup> Kenneth L. Verosub,<sup>9</sup> Douglas J. Rowland,<sup>19</sup> Sarah Roeske,<sup>9</sup> Nicholas W. Botto,<sup>9</sup> Jon M. Friedrich,<sup>20,21</sup> Michael E. Zolensky,<sup>22</sup> Loan Le,<sup>23,22</sup> Daniel Ross,<sup>23,22</sup> Karen Ziegler,<sup>24</sup> Tomoki Nakamura,<sup>25</sup> Insu Ahn,<sup>25</sup> Jong Ik Lee,<sup>26</sup> Qin Zhou,<sup>27,28</sup> Xian-Hua Li,<sup>28</sup> Qiu-Li Li,<sup>28</sup> Yu Liu,<sup>28</sup> Guo-Qiang Tang,<sup>28</sup> Takahiro Hiroi,<sup>29</sup> Derek Sears,<sup>3</sup> Ilya A. Weinstein,<sup>7</sup> Alexander S. Vokhmintsev,<sup>7</sup> Alexei V. Ishchenko,<sup>7</sup> Phillipe Schmitt-Kopplin,<sup>30,31</sup> Norbert Hertkorn,<sup>30</sup> Keisuke Nagao,<sup>32</sup> Makiko K. Haba,<sup>32</sup> Mutsumi Komatsu,<sup>33</sup> Takashi Mikouchi<sup>34</sup> (the Chelyabinsk Airburst Consortium)



# Изотопно-геохимическое исследование метеорита

- локальное U-Pb датирование апатита in situ

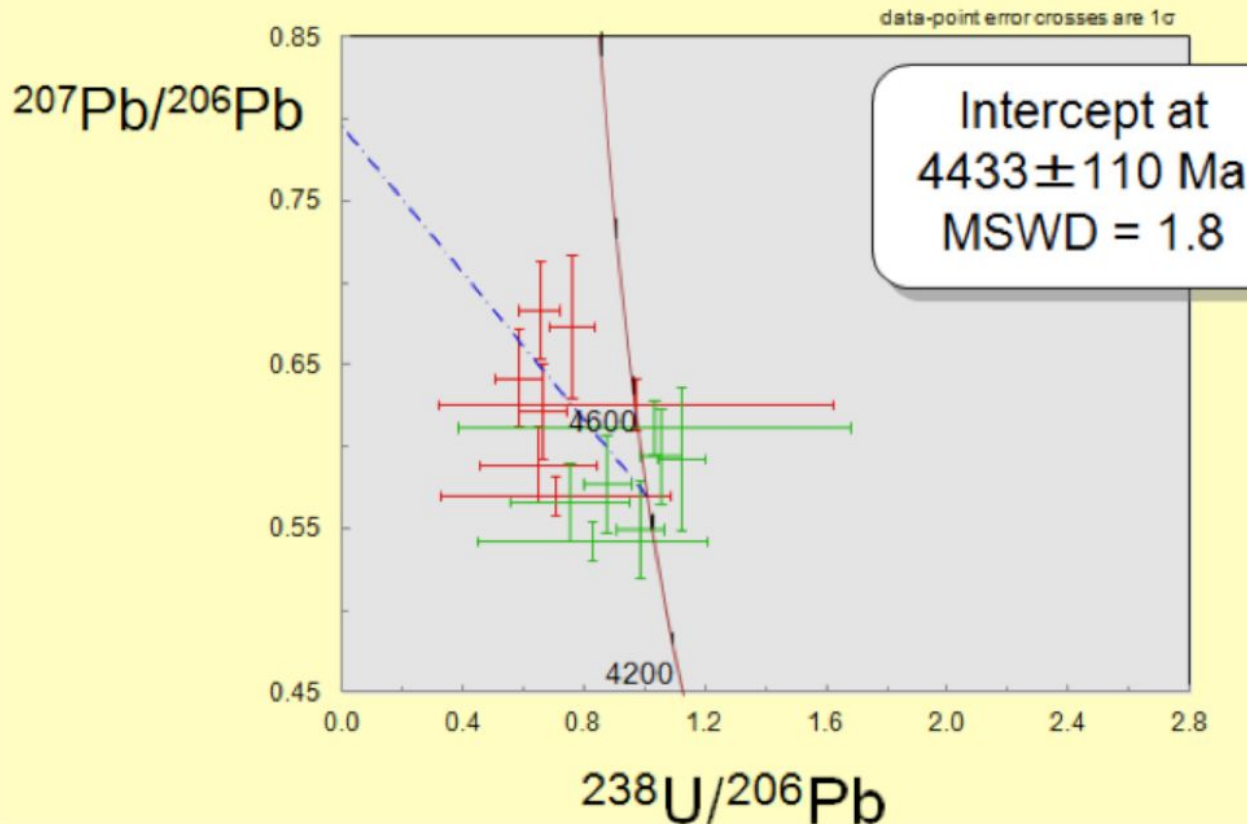
## SHRIMPによるChelyabinsk隕石の年代分析

上岡萌 (1\*; 寺田健太郎 (1; 日高洋 (2; 木村光佑 (2; Skublov Sergey (3

KAMIOKA, Moe (1\*; TERADA, Kentaro (1; HIDAKA, Hiroshi (2; KIMURA, Kosuke (2; SKUBLOV, Sergey (3

1) 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, 2) 広島大学大学院理学研究科, 3) Institute of Precambrian Geology and Geochronology,

1) Osaka University, Department of Earth and Space Science, 2) Graduate school of Science, Hiroshima University, 3) Institute of Precambrian Geology and Geochronology,



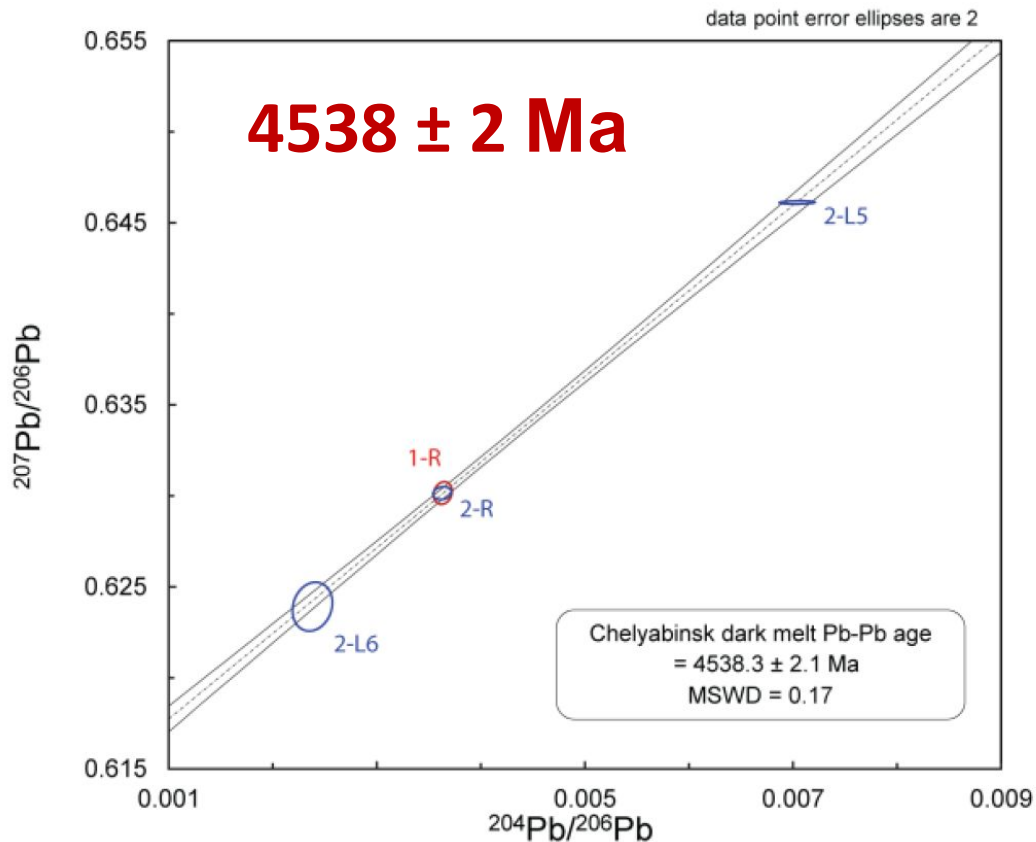
# Изотопно-геохимическое исследование метеорита

## • Pb-Pb изохронный метод по выщелокам

Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution V (2013)

3087.pdf

**PB-PB CHRONOMETRY OF THE DARK MELT LITHOLOGY OF THE CHELYABINSK LL CHONDRITE.** A. Bouvier, University of Minnesota, Department of Earth Sciences, Minneapolis, MN 55455, USA (abouvier@umn.edu).





# Изотопно-геохимическое исследование метеорита

- Время распада материнского тела метеорита «Челябинск» (возраст экспозиции) оценено по содержанию космогенных нуклидов приблизительно в 1.2 млн. лет

## **COSMOGENIC RADIONUCLIDES AND NOBLE GASES IN CHELYABINSK METEORITE.**

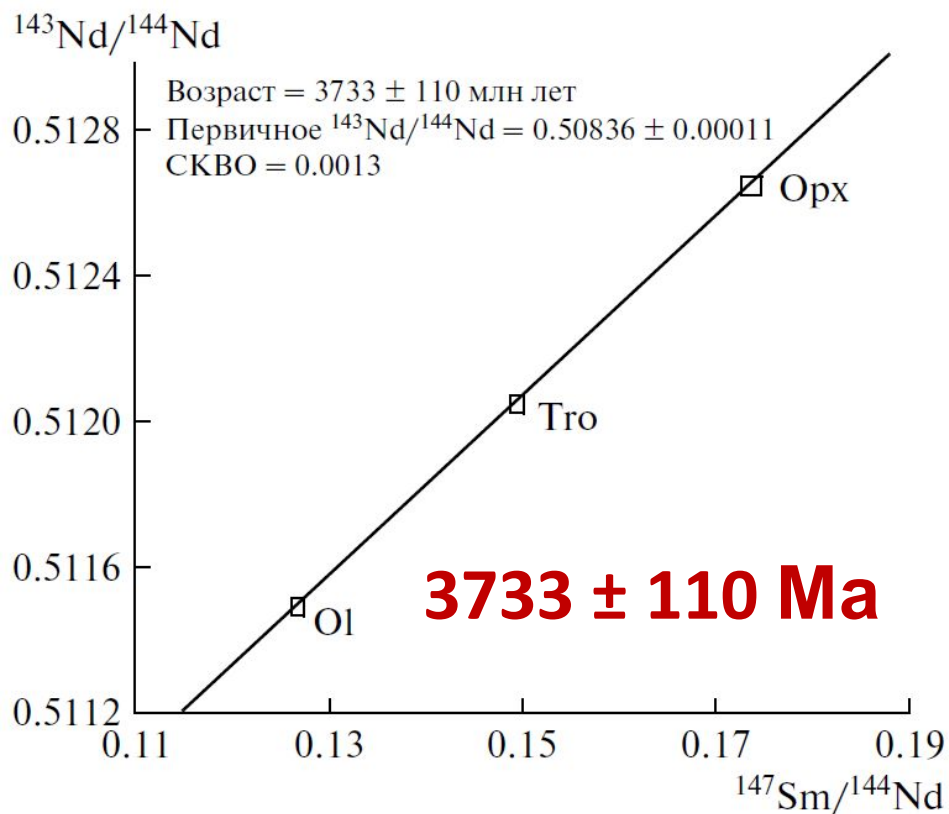
K. Nishiizumi<sup>1</sup>, M. W. Caffee<sup>2</sup>, L. Huber<sup>3</sup>, K. C. Welten<sup>1</sup> and R. Wieler<sup>3</sup>. <sup>1</sup>Space Sciences Laboratory, Univ. of California, Berkeley, CA 94720-7450, USA. E-mail: kuni@ssl.berkeley.edu. <sup>2</sup>Dept. of Physics, Purdue Univ., West Lafayette, IN 47907-1396, USA. <sup>3</sup>ETH Zürich, CH-8092, Switzerland.

phase as shielding indicator [e.g.,5]. A very approximate <sup>36</sup>Cl-<sup>21</sup>Ne age is ~1.2 Myr. Based on our preliminary data we conclude that the exposure age of Chelyabinsk is much shorter than most LL chondrites, which have an exposure age distribution with a ~15 My peak [6]. Our preliminary exposure ages place Chelyabinsk near that of Appley Bridge, an LL6 with the shortest exposure age of all LL chondrites, 1.2 Myr [7]. Assuming a pre-atmospheric size of ~10 m, we estimate that the three samples

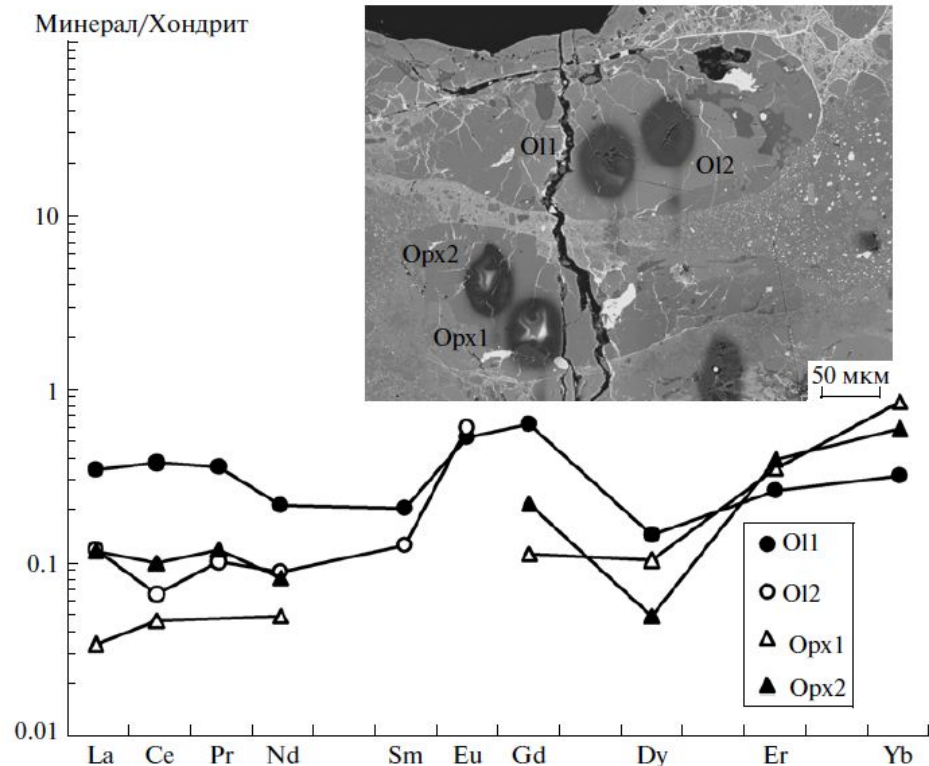
УДК 552.63

# Sm–Nd-ВОЗРАСТ И ГЕОХИМИЯ МИНЕРАЛОВ МЕТЕОРИТА “ЧЕЛЯБИНСК”

© 2013 г. Е. С. Богомолов, С. Г. Скублов, член-корреспондент РАН Ю. Б. Марин,  
С. Ю. Степанов, А. В. Антонов, О. Л. Галанкина

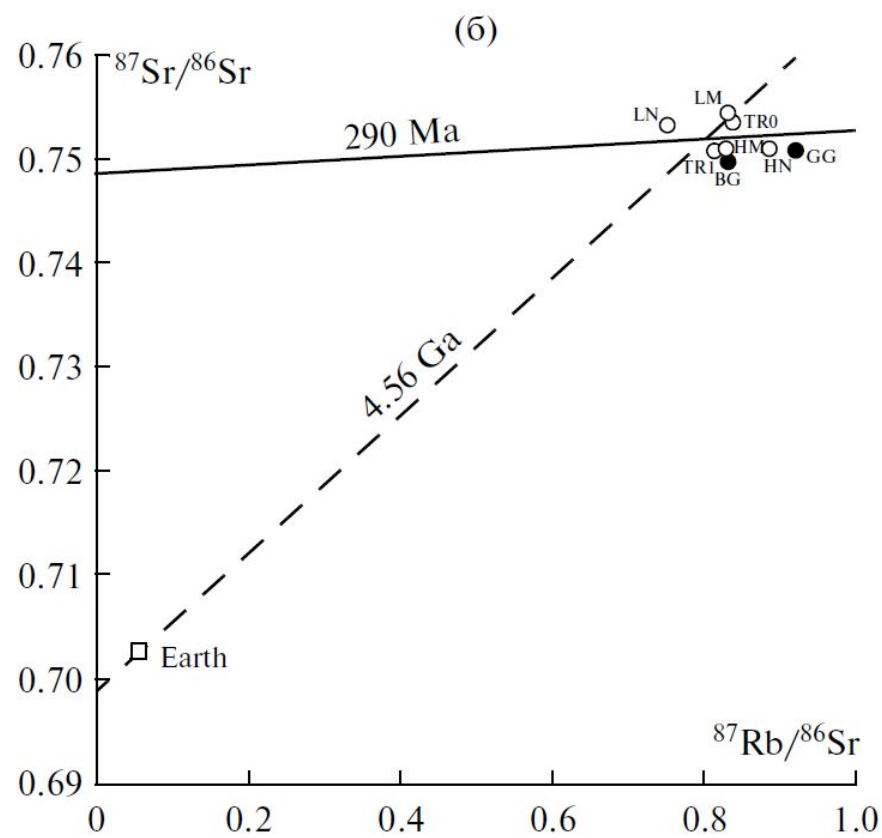
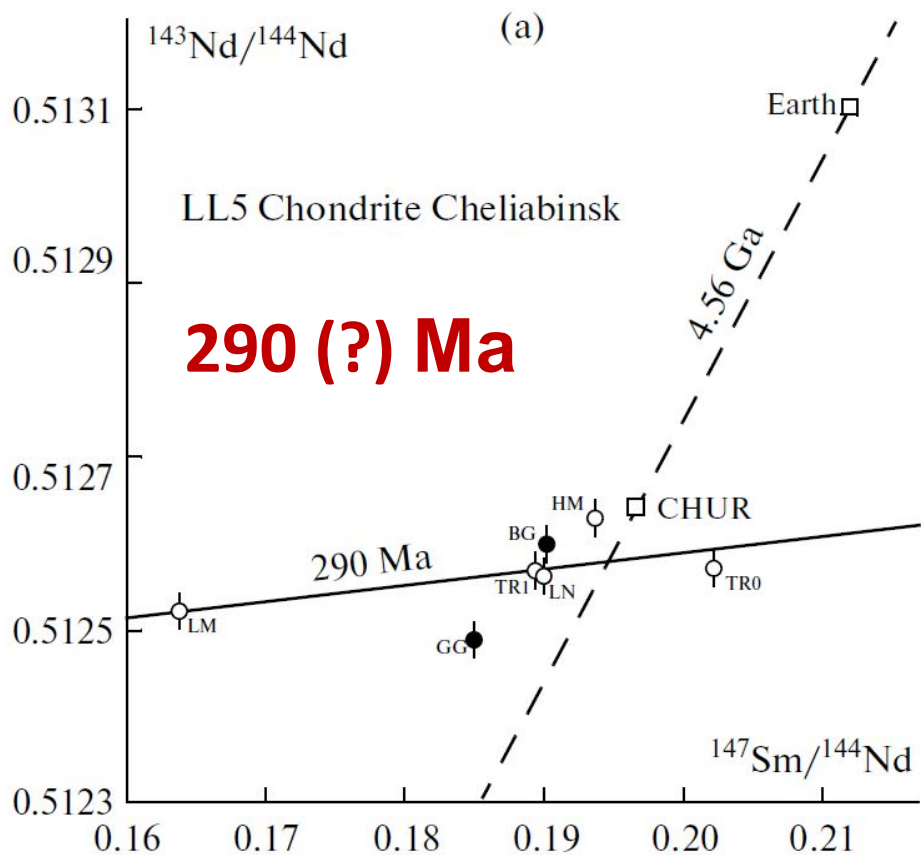


БОГОМОЛОВ и др.



# РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕЩЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК

© 2013 г. Э. М. Галимов, В. П. Колотов, М. А. Назаров, Ю. А. Костицын, И. В. Кубракова,  
Н. Н. Кононкова, И. А. Рощина, В. А. Алексеев, Л. Л. Кашкаров,  
Д. Д. Бадюков, В. С. Севастьянов

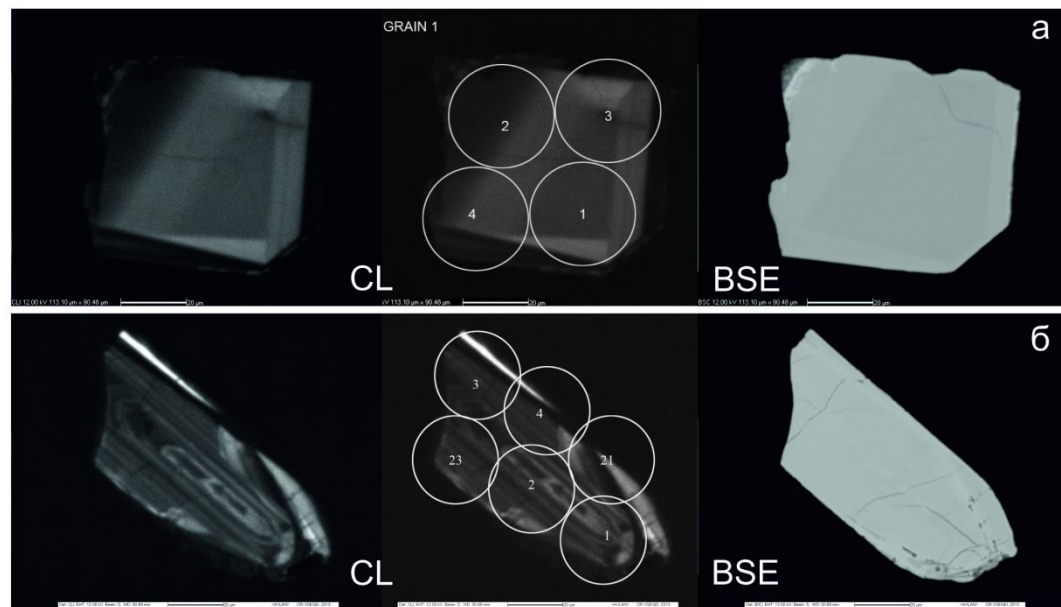
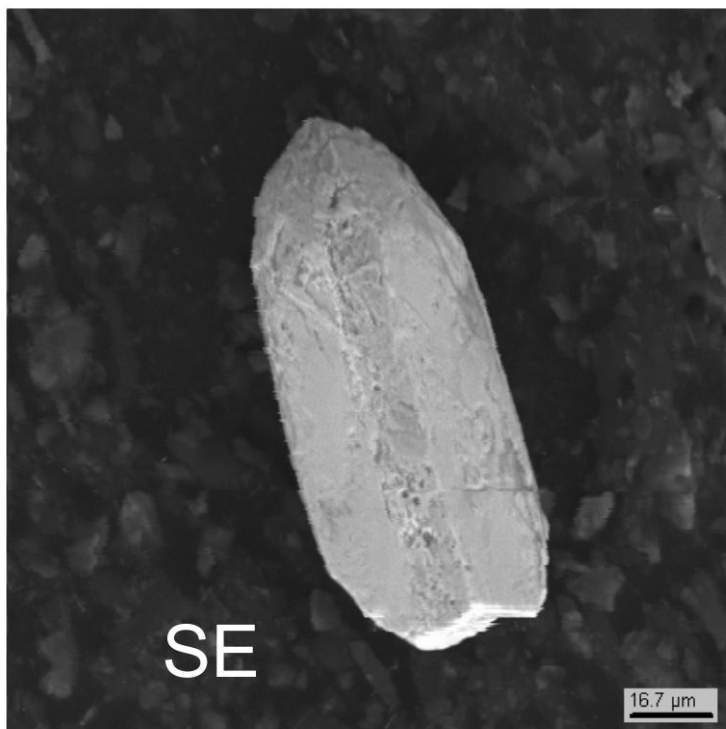


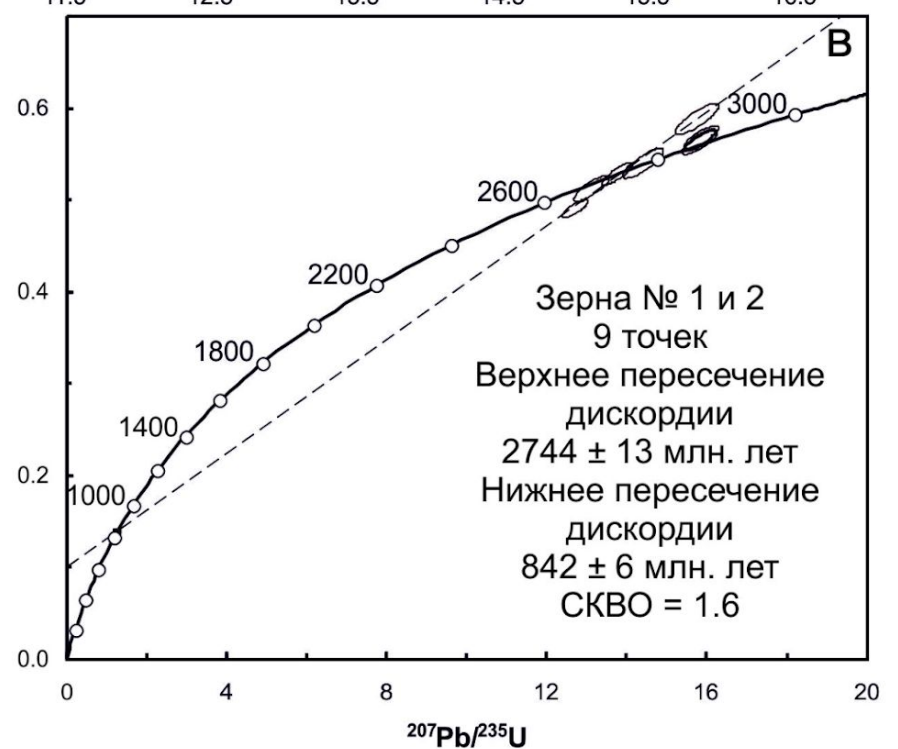
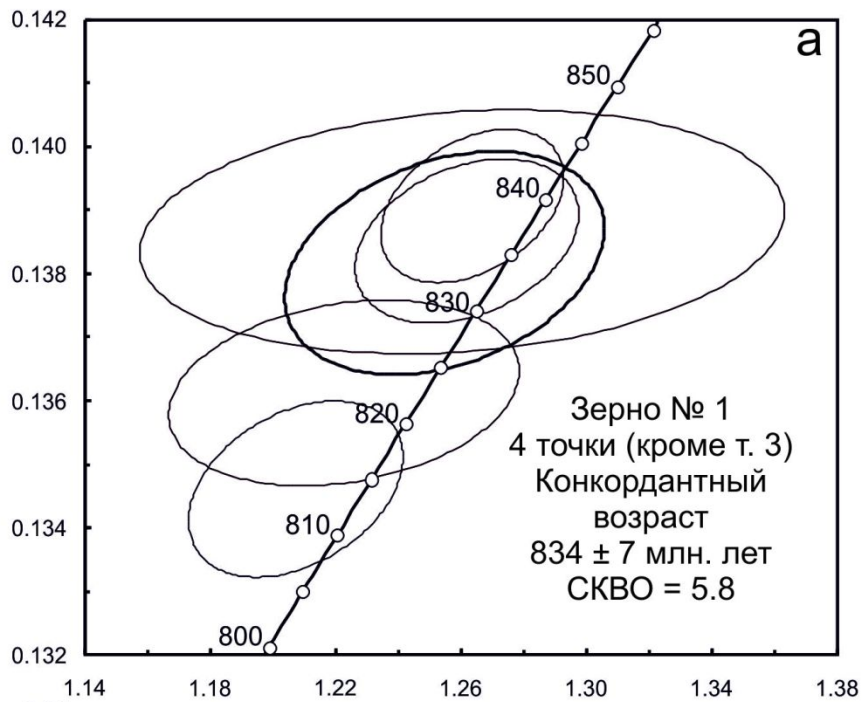


УДК 552.63

## U–Pb-ВОЗРАСТ ЦИРКОНА И ИСТОРИЯ ИМПАКТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ МЕТЕОРИТА “ЧЕЛЯБИНСК”

© 2015 г. С. Г. Скублов, Н. С. Гусева, С. Л. Пресняков, С.-Х. Ли,  
член-корреспондент РАН Ю. Б. Марин, С. А. Сергеев,  
Н. Г. Бережная, Н. В. Тюленева, В. И. Алексеев

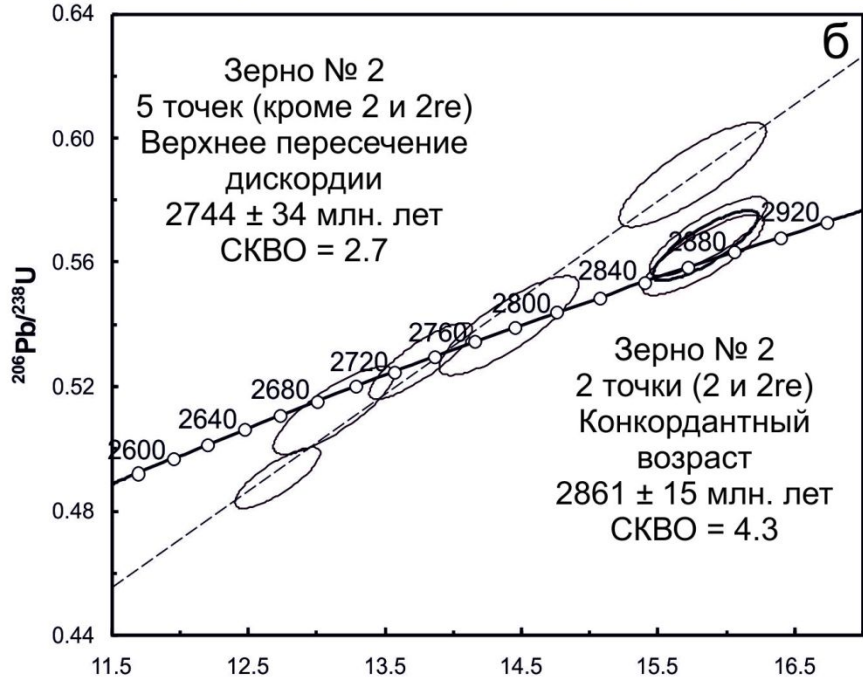




**$2861 \pm 15$  Ma**

**$2744 \pm 13$  Ma**

**$834 \pm 7$  Ma**





# ВЫВОДЫ

- Впервые реконструирована последовательность многократных импактных событий (соударений) материнского тела метеорита «Челябинск» с иными космическими телами.
- Датирование U-Pb методом апатита *in situ* дало значение возраста **~ 4450-4430 Ma**, отстающее от события образования метеорита более чем на 100 Ma.
- Сильное импактное событие со значительными переплавлением метеорита фиксируется Sm-Nd изохроной по Ol, Орх и Tro с возрастом **~3730 Ma**.
- Датирование 2 зерен Zrn (SIMS SHRIMP II), выделенных по технологии “ppm-минералогия), определило группу возрастов (**~ 2860, 2740 и 830 Ma**),

УДК 552.63+523.681.2

## ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО И ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕТЕОРИТА “ЧЕЛЯБИНСК”

© 2013 г. С. В. Берзин, Ю. В. Ерохин, К. С. Иванов, В. В. Хиллер

чительно силикатами. В черных фрагментах метеорита наблюдаются ударные прожилки и ветвящиеся сульфидные микропрожилки, образовавшиеся в результате трех этапов импактного воздействия, которые сопровождались полным или частичным плавлением метеоритного вещества. Во фрагментах се-

### Impact history of the Chelyabinsk meteorite: electron microprobe and LA-ICP-MS study of sulfides and metals

A.V. Andronikov\*, I.E. Andronikova, D.H. Hill

Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, 1415 North 6<sup>th</sup> Ave, Tucson, USA

involvement of shock-related processes during the evolution of the parent body. Multiple heavy impact events occurred on the parent asteroid and on the Chelyabinsk meteoroid itself over the time period from ca. 4.5 Ga until ca. 1.2 Ma. The shock veins were produced *in situ* on the parent

