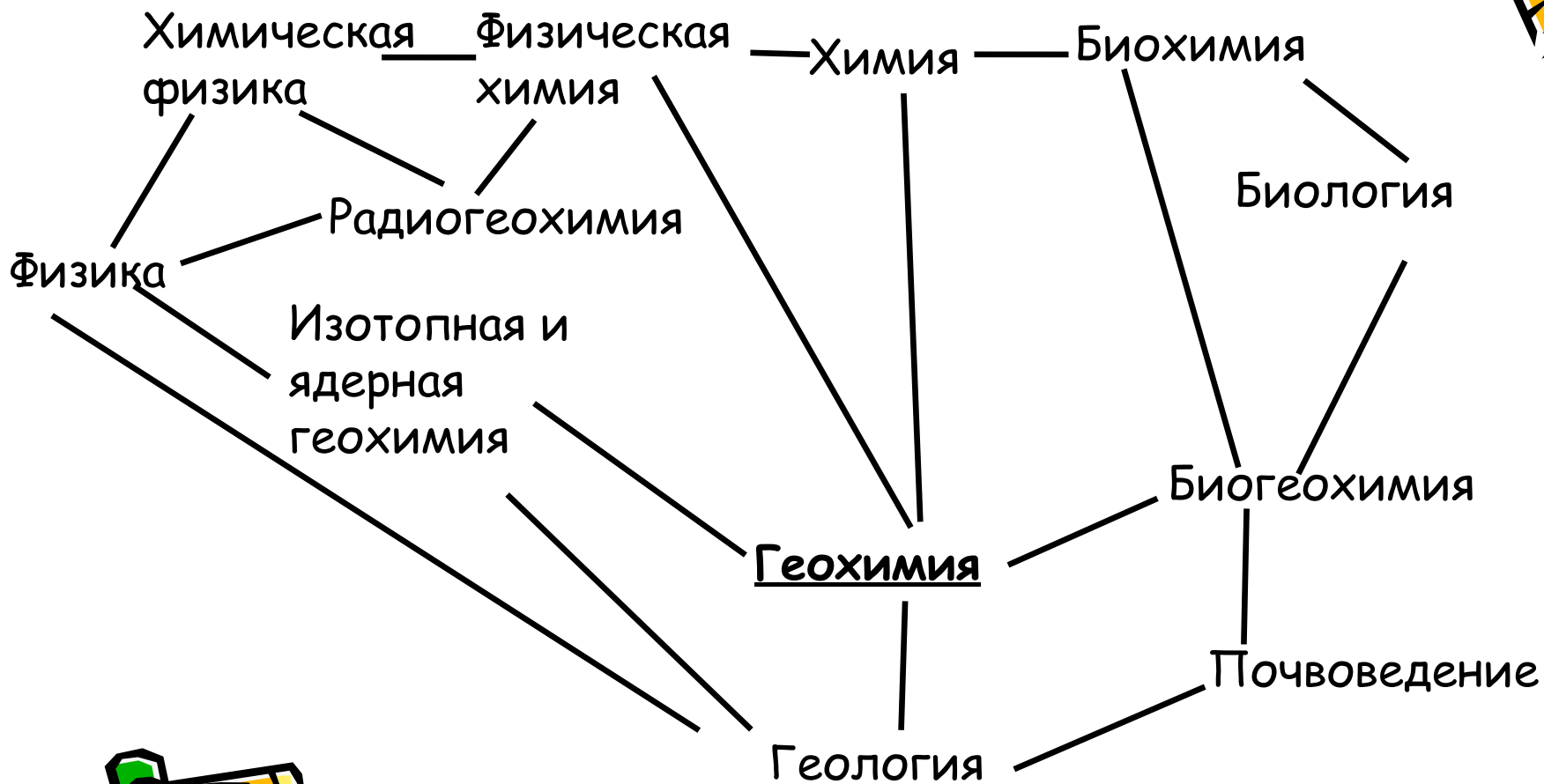
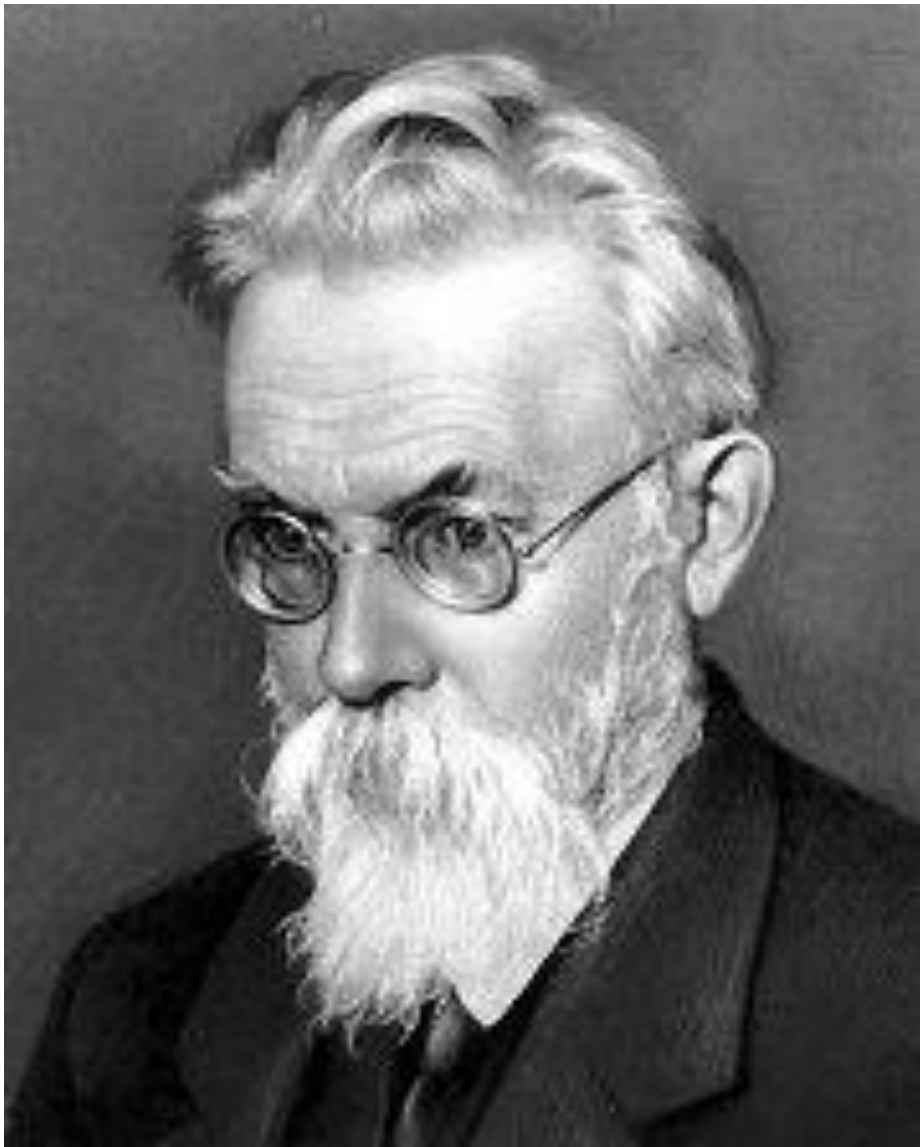


# Общая ГЕОХИМИЯ



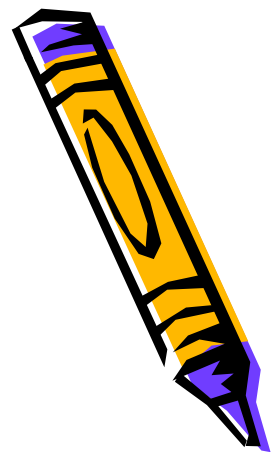
# Положение Геохимии среди главных естественных наук



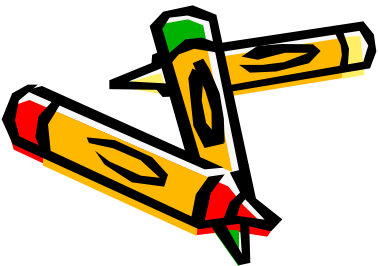


*Вернадский Владимир  
Иванович (1863-1945)*

Русский минералог,  
кристаллограф, геолог,  
геохимик, историк и  
организатор науки,  
философ,  
общественный деятель.



**ГЕОХИМИЯ** – наука, изучающая химический состав Земли, распространенность в ней химических элементов и их стабильных изотопов, закономерности распределения химических элементов в различных геосферах, законы поведения, сочетания и миграции (концентрации и рассеяния) элементов в природных процессах.



# Задачи современной геохимии

- Поведение и формы нахождения химических элементов в различных оболочках Земли (геосферах) и при различных геологических процессах).
- Условия и закономерности миграции - концентрации (образование месторождений) и рассеяния химических элементов.
- Изучение изотопов химических элементов для решения вопросов о возрасте пород, источнике вещества, о палеотемпературах, решение генетических и других вопросов.

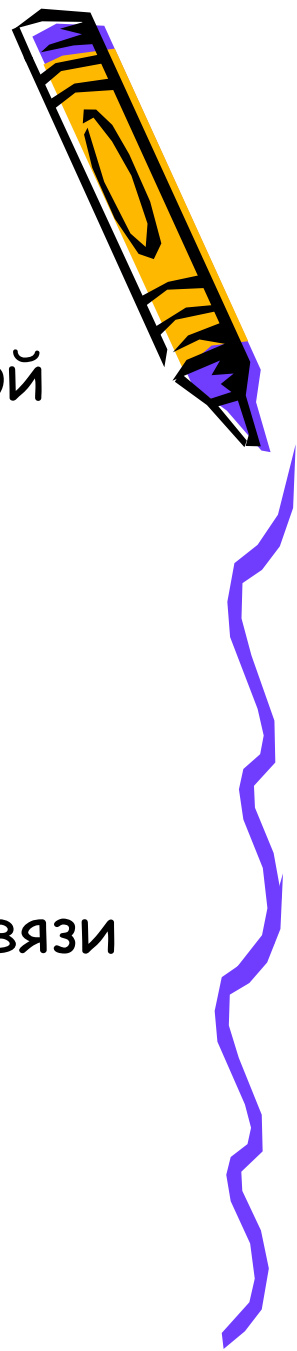


## Задачи современной геохимии

- Изучение изоморфных смесей; типоморфизм минералов.
- Изучение геохимии отдельных регионов земной коры.
- Дальнейшее повышение чувствительности и точности аналитических методов.

Совершенствование методик геохимических исследований.

- Изучение миграции химических элементов в связи с деятельностью человека.
- Изучение космических объектов



# Проблемы современной геохимии

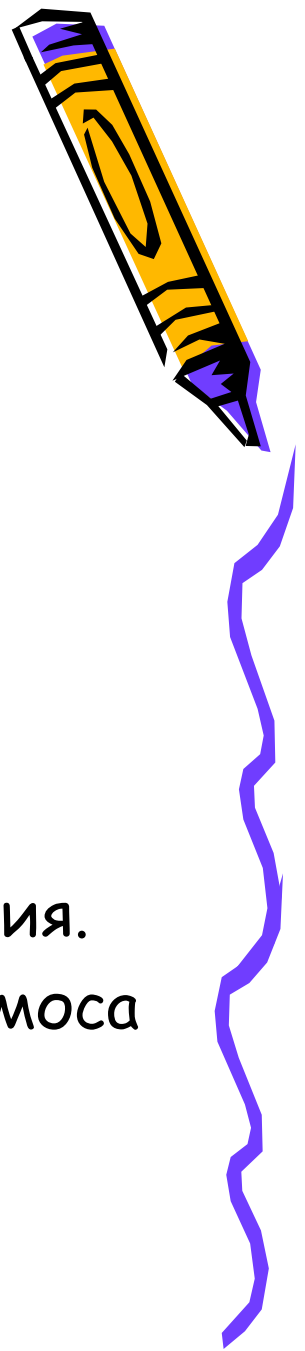
- Геохимическая зональность.
- Законы дифференциации вещества Земли.
- Взаимодействие вещества мантии и коры. Геохимия мантии Земли.
- Кинетика и динамика процессов (магматического, гидротермального и др.).
- Химизм природных процессов минерало- и рудообразования; источники рудного вещества.
- Поиски минерального сырья.





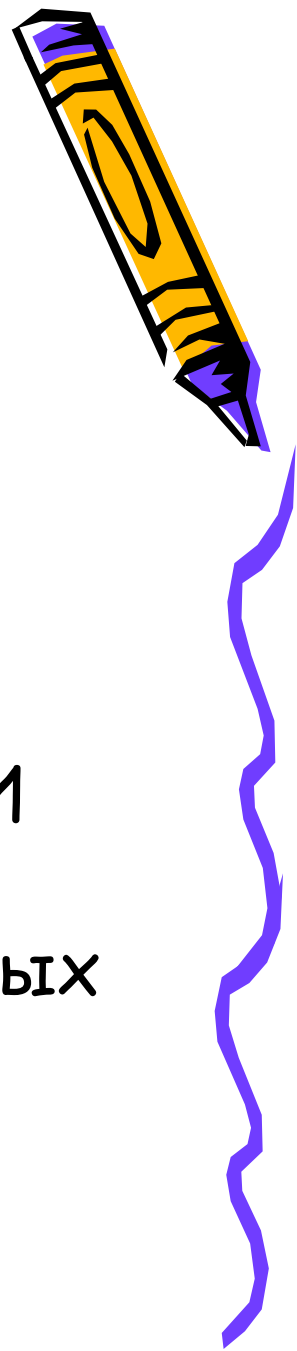
# Проблемы современной геохимии

- Происхождение химических элементов.
- Рациональное (комплексное) использование земных ресурсов.
- Гипергенное минералообразование.
- Геохимия ноосферы.
- Сохранение среды жизнеобитания.
- Геохимия внутриматериковых вод.
- Закономерности и механизмы осадкообразования.
- Проблемы, возникшие в связи с изучением космоса





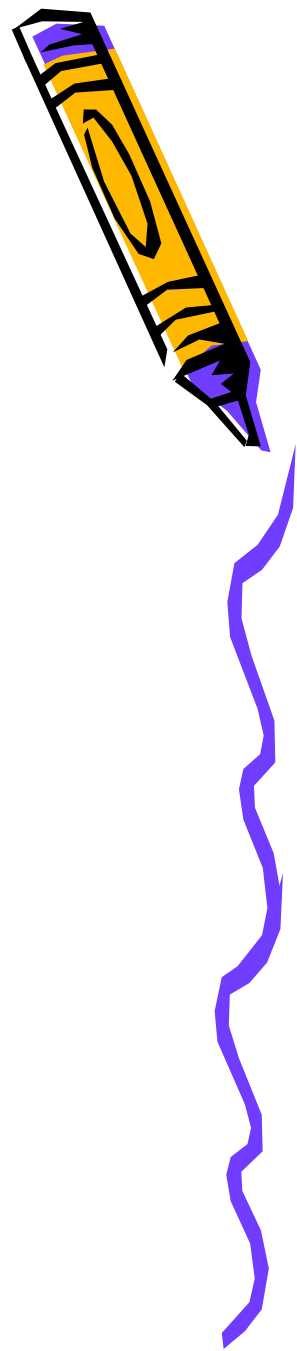
# Методы исследования:



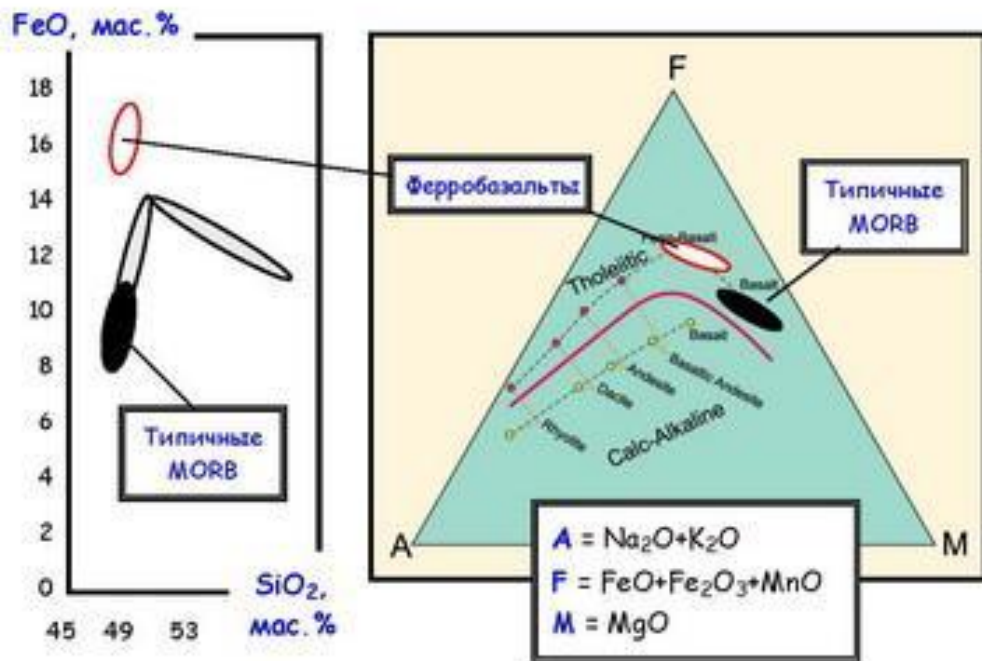
- Химические методы
- Физические методы
- Геологические методы
- Методы составления диаграмм
- Методика петрохимических модулей
- Геохимическое картирование
- Геохимические методы поисков МТИ
- Методы абсолютной геохронологии
- Моделирование химических природных процессов



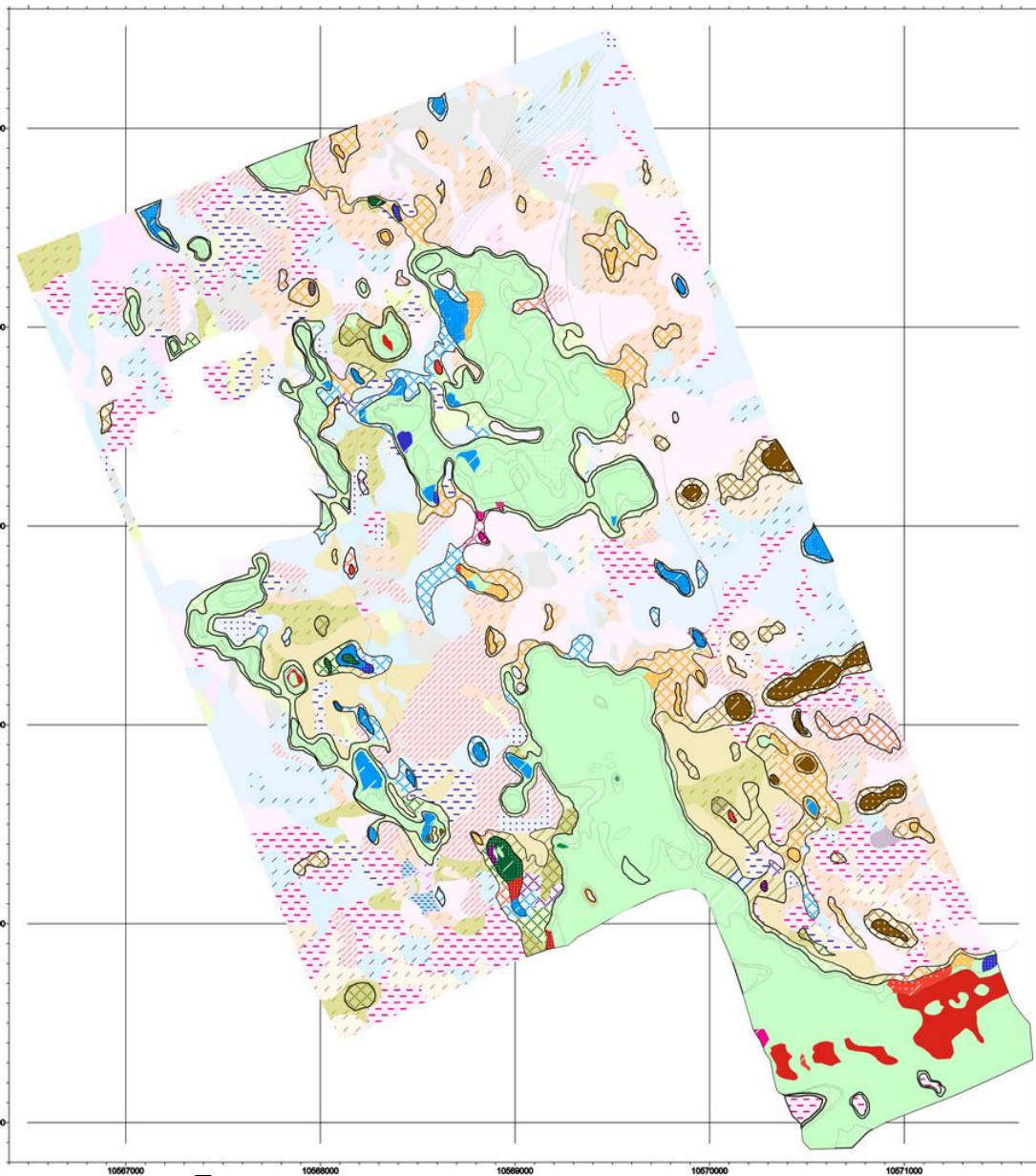
# Методика петрохимических модулей



Петрохимическая специфика толейтового магматизма океанов



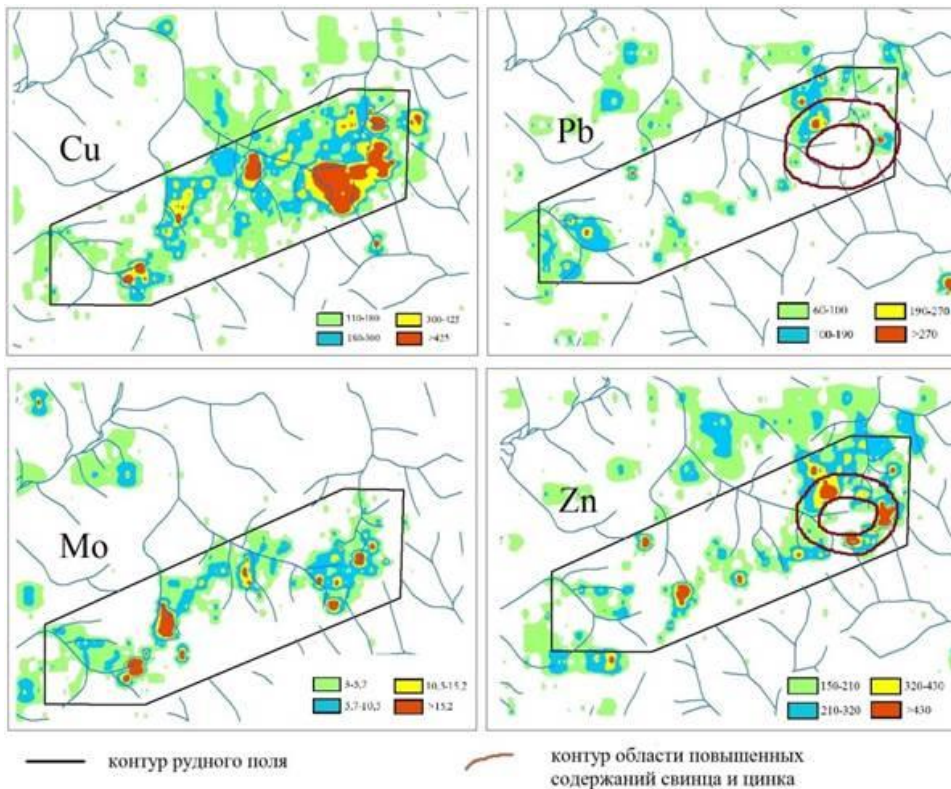
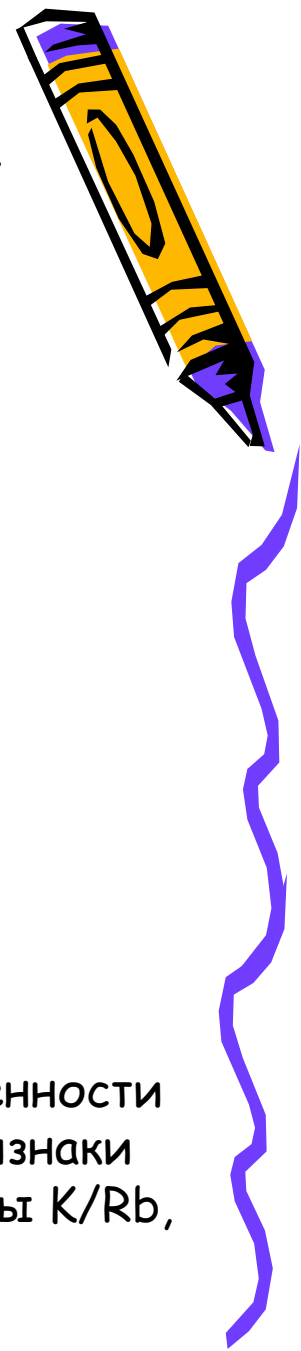
# Геохимическое картирование



В основе метода лежит  
понятие о кларках  
элементов

Карта геохимических  
аномалий

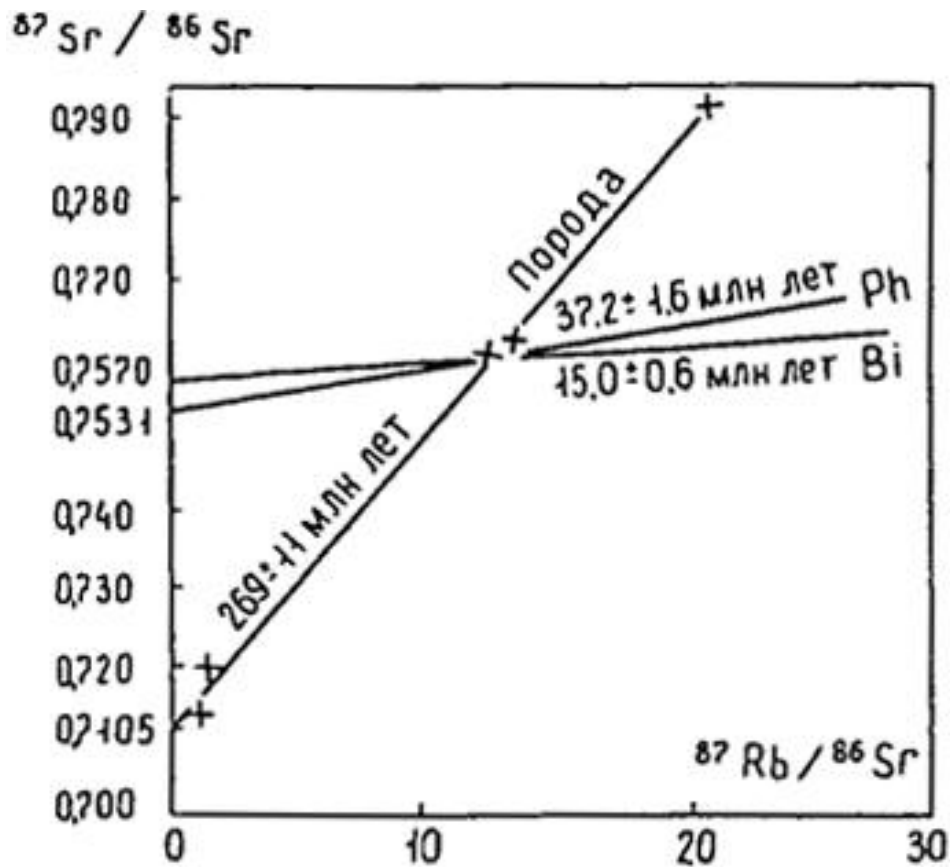
# Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых



Принципы геохимических методов поисков: особенности формирования ореолов, поисковые критерии и признаки (ассоциации элементов, геохимические индикаторы K/Rb, Mg/Li, Zr/Hf, Al/Ga, Th/U, Ca/Sr и др., минералы-концентраторы).

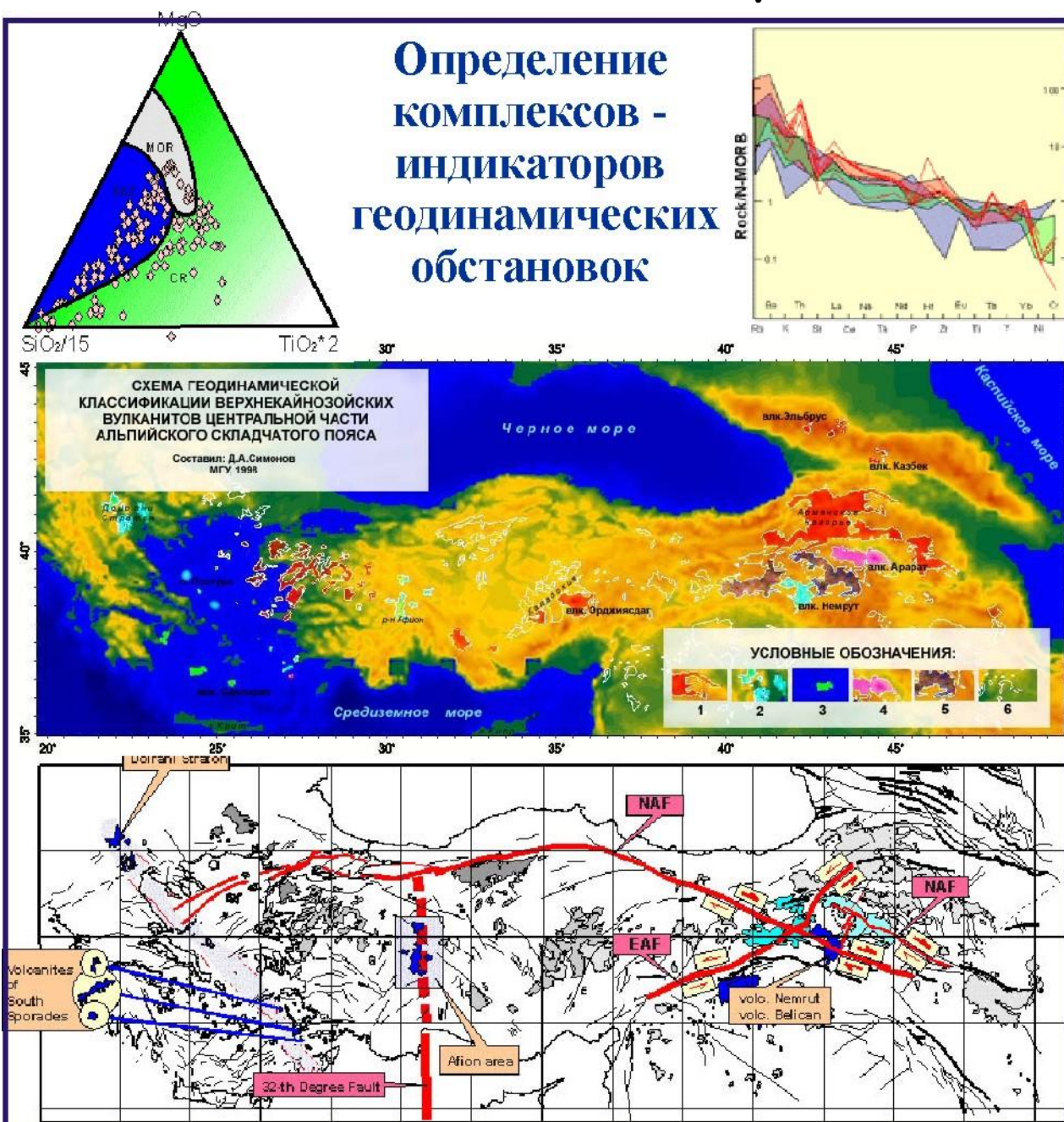
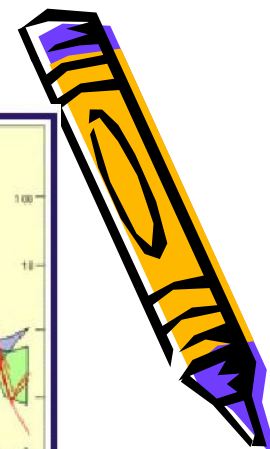


# Методы абсолютной хронологии

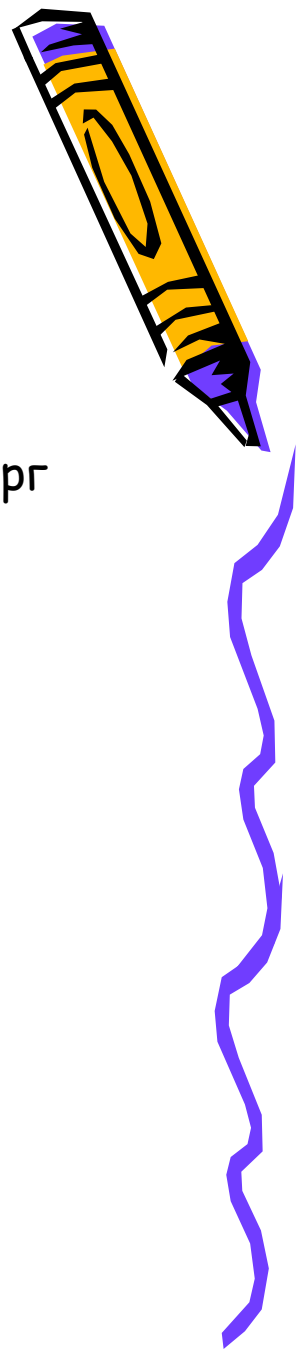




# Методы составления диаграмм



# Александр Евгеньевич Ферсман (1883 - 1945) –



**Дата рождения:** 27 октября (8 ноября) 1883)

**Место рождения:** Санкт-Петербург

**Научная сфера:** геохимия, минералогия

**Место работы:** директор Минералогического музея РАН

**Альма-матер:** МГУ

**Известен как:** один из основателей геохимии

**Награды и премии**  
Премия имени В. И. Ленина (1929)





# Основные направления в геохимии

1. **Физико-химические исследования** процессов формирования минералов, горных пород и руд, земной коры и мантии.

Физическая геохимия - включает изучение всех процессов (магматического, гидротермального и др.), с одной стороны, и физико-химическое моделирование процессов - с другой, задача науки - установление генезиса минералов, пород и руд

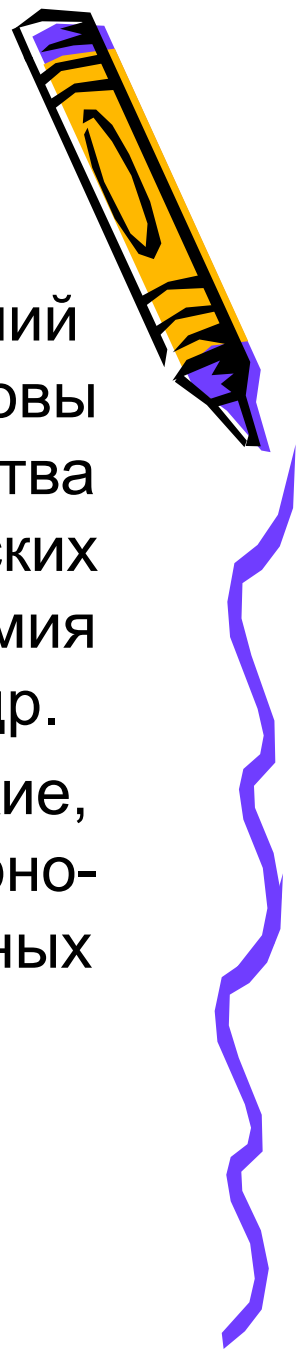
Методы исследования : физико-химический анализ парагенезисов минералов; физико-химические расчеты; экспериментальное моделирование; физико-химическое теоретическое моделирование.



## 2. Прикладная геохимия

Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых, геохимические основы металлогении и прогноза, индикаторные свойства химических элементов в геологических процессах, радиогеохронология, геохимия ноосферы, эволюция природных экосистем и др.

Методы: литохимические, гидрогеохимические, атмосферические, биогеохимические; структурно-геохимический метод изучения окорудных метасоматитов.

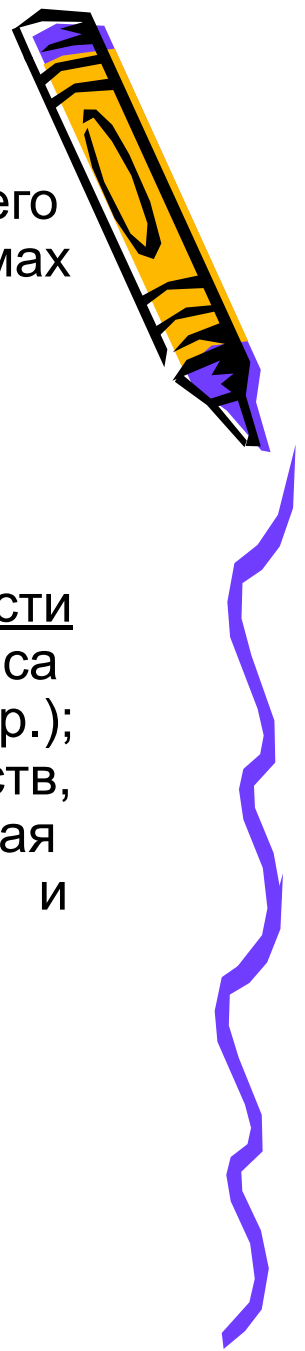


### **3. *Геохимия элементов***

Объектом исследования является конкретный элемент, его поведение и миграция в разных процессах и системах (геохимия редких элементов, геохимия газов).

### **4. *Гидрогеохимия, гидрогеология, геохимия океана.***

Основные вопросы и проблемы: закономерности формирования термальных вод, установление баланса основных компонентов океана (Na, Mg, K, Cl, S и др.); происхождение вод океана и растворенных в нем веществ, эволюция океана; происхождение и геохимическая деятельность подземных вод; сохранение качества и ресурсов пресной воды.

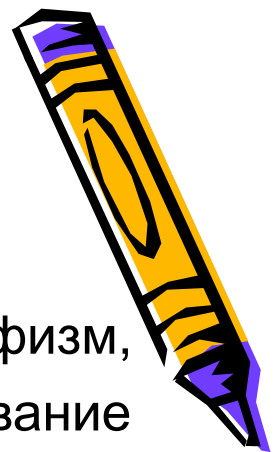


## ***5. Кристаллохимическое направление***

Расшифровка структур минералов, изоморфизм, типоморфизм, энергия кристаллических построек. Совершенствование методов и методик исследования: рентгено-структурный и химический анализы, минералотермометрия, газовой-жидкие включения и др.

## ***6. Направление, связанное с новыми объектами***

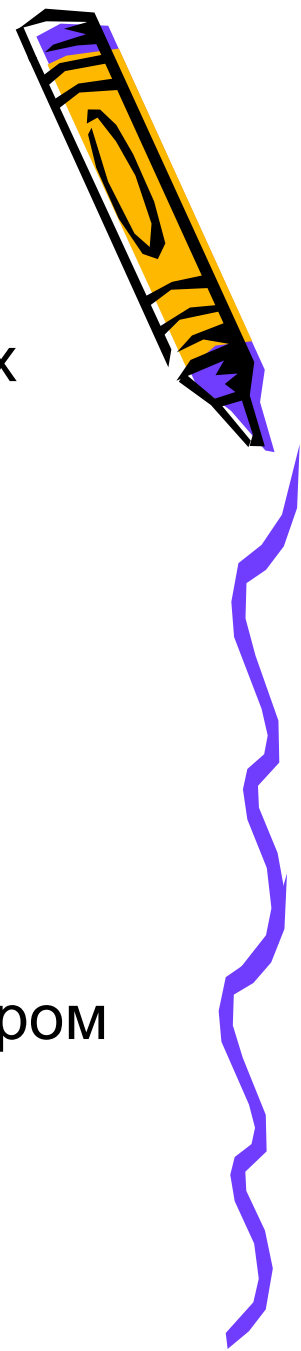
Глубинное бурение, космические объекты.



# Химический состав природных геохимических систем

**Химический элемент** — совокупность однотипных атомов, имеющих единый атомный номер в таблице Д.И. Менделеева, обладающие определенными химическими и физическими свойствами.

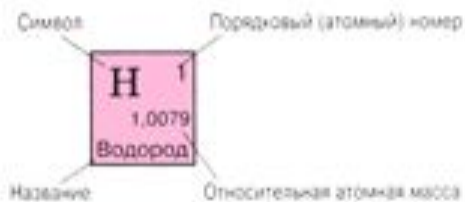
**Химический элемент** – множество атомов с одинаковым зарядом ядра, числом протонов, совпадающим с порядковым или атомным номером в таблице Д.И. Менделеева.



# Периодическая таблица Д.И. Менделеева



ПЕРИОДЫ	ГРУППЫ																	
	1 (IA)	2 (IIA)	3 (IIIB)	4 (IVB)	5 (VB)	6 (VIB)	7 (VIIB)	8 (VIIIB)	9 (VIIIB)	10 (VIIIB)	11 (IB)	12 (IIB)	13 (IIIA)	14 (IVA)	15 (VA)	16 (VIA)	17 (VIIA)	18 (VIIIA)
1	H <sup>1</sup> 1,0079 Водород																H	He <sup>2</sup> 4,00260 Гелий
2	Li <sup>3</sup> 6,941 Литий	Be <sup>4</sup> 9,01218 Бериллий											B <sup>5</sup> 10,81 Бор	C <sup>6</sup> 12,011 Углерод	N <sup>7</sup> 14,0067 Азот	O <sup>8</sup> 15,9994 Кислород	F <sup>9</sup> 18,9984 Фтор	Ne <sup>10</sup> 20,179 Неон
3	Na <sup>11</sup> 22,989 Натрий	Mg <sup>12</sup> 24,305 Магний											Al <sup>13</sup> 26,9815 Алюминий	Si <sup>14</sup> 28,0855 Кремний	P <sup>15</sup> 30,973 Фосфор	S <sup>16</sup> 32,06 Сера	Cl <sup>17</sup> 35,453 Хлор	Ar <sup>18</sup> 39,948 Аргон
4	K <sup>19</sup> 39,0983 Калий	Ca <sup>20</sup> 40,08 Кальций	21 Sc 44,9559 Скандий	22 Ti 47,88 Титан	23 V 50,9415 Ванадий	24 Cr 51,996 Хром	25 Mn 54,938 Марганец	26 Fe 55,847 Железо	27 Co 58,9332 Кобальт	28 Ni 58,69 Никель	29 Cu 63,546 Медь	30 Zn 65,39 Цинк	31 Ga 69,72 Галлий	32 Ge 72,59 Германий	33 As 74,9216 Мышьяк	34 Se 78,96 Селен	35 Br 79,904 Бром	36 Kr 83,80 Криптон
5	Rb <sup>37</sup> 85,4678 Рубидий	Sr <sup>38</sup> 87,62 Стронций	39 Y 88,9059 Иттрий	40 Zr 91,22 Цирконий	41 Nb 92,9064 Ниобий	42 Mo 95,94 Молибден	43 Tc [98] Технеций	44 Ru 101,07 Рутений	45 Rh 102,905 Родий	46 Pd 106,42 Палладий	47 Ag 107,868 Серебро	48 Cd 112,41 Кадмий	49 In 114,82 Индий	50 Sn 118,69 Олово	51 Sb 121,75 Сурьма	52 Te 127,60 Теллур	53 I 126,904 Иод	54 Xe 131,29 Ксенон
6	Cs <sup>55</sup> 132,905 Цезий	Ba <sup>56</sup> 137,33 Барий	57 La <sup>*</sup> 138,905 Лантан	72 Hf 178,49 Гафний	73 Ta 180,9479 Тантал	74 W 183,85 Вольфрам	75 Re 186,207 Рений	76 Os 190,2 Осмий	77 Ir 192,22 Иридий	78 Pt 195,08 Платина	79 Au 196,967 Золото	80 Hg 200,59 Ртуть	81 Tl 204,383 Таллий	82 Pb 207,2 Свинец	83 Bi 208,980 Висмут	84 Po [209] Полоний	85 At [210] Астат	86 Rn [222] Радон
7	Fr <sup>87</sup> [223] Франций	Ra <sup>88</sup> [226] Радий	89 Ac <sup>**</sup> [227] Актиний	104 Rf [261] Резерфордий	105 Db [262] Дубний	106 Sg [266] Сиборгий	107 Bh [264] Борий	108 Hs [269] Гассий	109 Mt [268] Мейтнерий	110 Ds [271] Дармштадтий	111	112	113	114				



## Лантаноиды

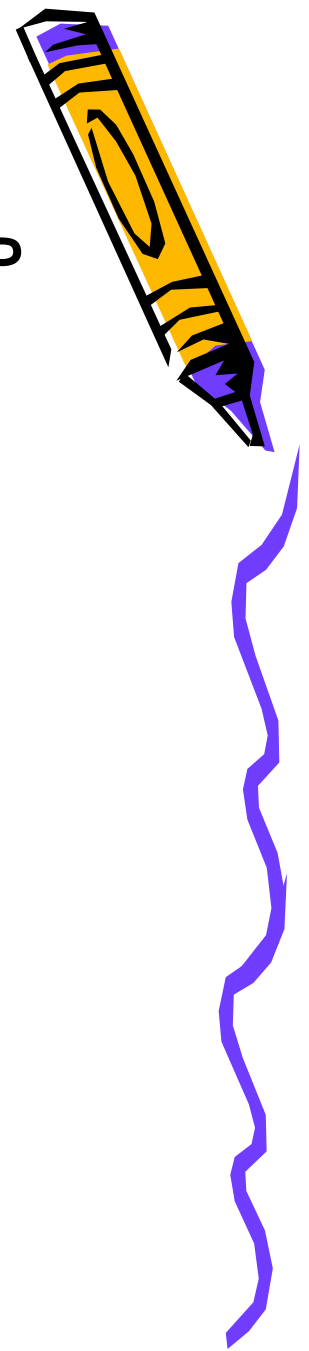
58 Ce 140,12 Церий	59 Pr 140,908 Прозердий	60 Nd 144,24 Неодим	61 Pm [145] Прометий	62 Sm 150,36 Самарий	63 Eu 151,96 Европий	64 Gd 157,25 Гадолиний	65 Tb 158,925 Тербий	66 Dy 162,50 Диспрозий	67 Ho 164,930 Гольмий	68 Er 167,26 Эрбий	69 Tm 168,934 Тулий	70 Yb 173,04 Иттербий	71 Lu 174,967 Лютеций
--------------------------	-------------------------------	---------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	------------------------------	----------------------------	------------------------------	-----------------------------	--------------------------	---------------------------	-----------------------------	-----------------------------

В квадратных скобках приведены значения массового числа наиболее устойчивого изотопа данного элемента

## Актиноиды

90 Th 232,038 Торий	91 Pa [231] Протактиний	92 U 238,029 Уран	93 Np [237] Нептуний	94 Pu [244] Плутоний	95 Am [243] Америций	96 Cm [247] Курций	97 Bk [247] Берклий	98 Cf [251] Калифорний	99 Es [252] Эйнштейний	100 Fm [257] Фермий	101 Md [260] Менделеевий	102 No [259] Нобелий	103 Lr [262] Лоуренсий
---------------------------	-------------------------------	-------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	--------------------------	---------------------------	------------------------------	------------------------------	---------------------------	--------------------------------	----------------------------	------------------------------

Природные вещества могут состоять как из одного химического элемента (простое веществ), так и из разных (сложное веществ или химическое соединение, сложные природные системы ).





# Элементарные частицы и строение атома

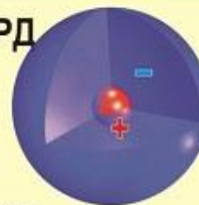
## Строение ядра

Атом - это качественно своеобразная сложная материальная микросистема, обладающая индивидуальностью, но изменчивая, способная к превращениям.



**1**

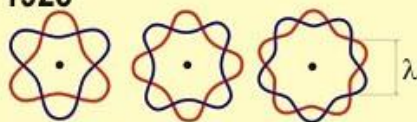
СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА. ХИМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ.

**ИСТОРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ АТОМА****Д. ТОМСОН**  
1895Модель  
"Булка с изюмом"**Э. РЕЗЕРФОРД**  
1911

Ядерная модель

**Н. БОР**  
1913

Планетарная модель

**Л. ДЕ БРОЙЛЬ**  
1923

Волновая модель

**Э. ШРЕДИНГЕР**  
1926

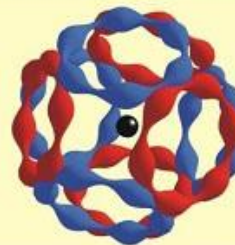
Квантово-механическая модель



Орбитальная модель

**К. СНЕЛЬСОН**  
1963

Кольцевая модель



Волногранная модель

**ХИМИЯ**

«Нуклоны» - это мельчайшие частицы, способных к  
взаимопревращениям.

Атомные ядра состоят из элементарных частиц – протонов  
( $p$ ) и нейтронов ( $n$ ).

$$M_p = 1,67239 \times 10^{-24} \text{ г}$$

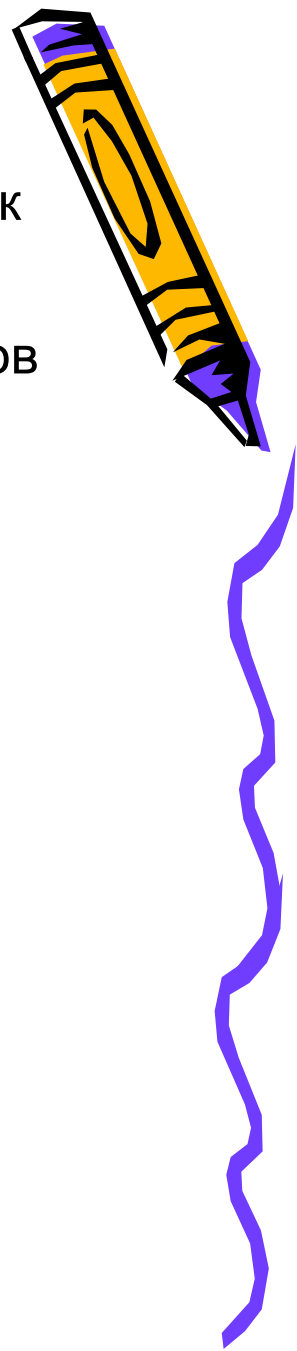
$$M_n = 1,67470 \times 10^{-24} \text{ г}$$

Массовое число ( $A$ ) – общее число нуклонов в ядре

$$A = Z + N$$

$Z$  – число протонов в ядре

$N$  – число нейтронов в ядре



# Строение электронной оболочки



Способность атомов вступать в соединения, образовывать минералы определяется свойствами электронов, их энергетическим состоянием, которое характеризуется квантовыми числами дискретной природы.



Принцип исключения (или запрета)

Паули:

в атоме не может быть двух  
электронов с одинаковыми  
четырьмя квантовыми числами.



## Основные моменты:

- главное квантовое число  $n$  определяет номер периода, который включает ряд элементов, имеющих разное количество электронов на внешних слоях;
- в группах или рядах таблицы элементы различаются только величиной  $n$ , т.е. количеством квантовых слоев (орбит), количество же электронов на внешнем слое одинаковое и соответствует номеру

группы;





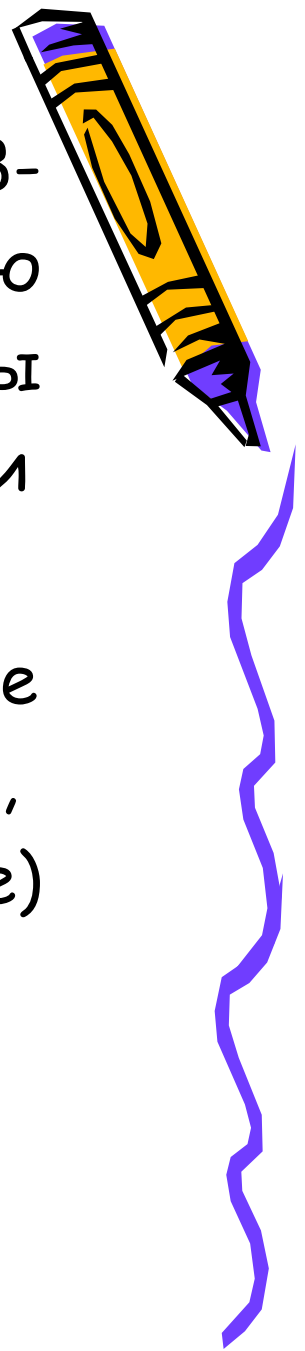
□ на внешней (наружной) электронной оболочке, как уже указывалось, может находиться  $2n^2$  электронов, т.е. 2, 8, 18 и т.д.





Элементы, которые имеют устойчивую 8-электронную оболочку, аналогичную внешнему слою инертных газов, названы элементами типа благородных газов или элементами 8-электронного типа.

Это элементы *s* и *p* подгрупп, составляющие 95% всей массы земной коры, породообразующие (петрогенные) элементы: Na, K, Mg, Ca, Al, Si, Ba и др.:

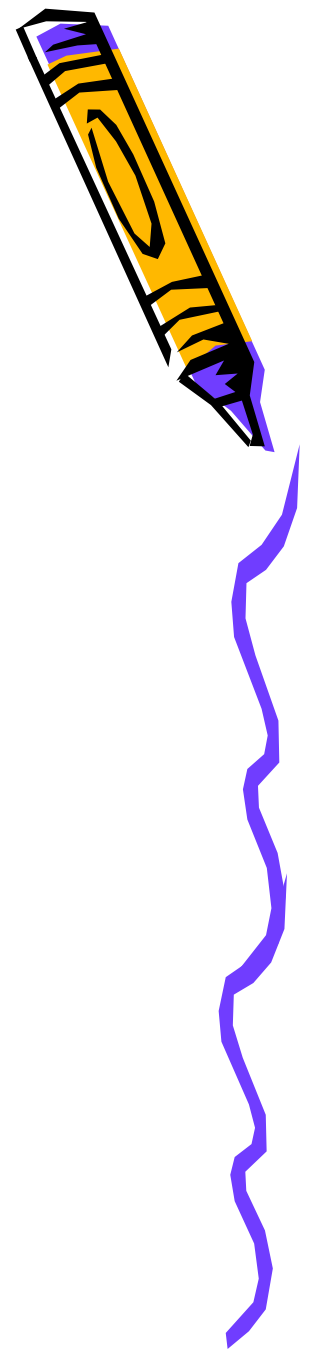


□ элементы, имеющие достроенный до 18 электронов предпоследний слой, называют элементами 18-электронного типа, а в геохимии - типа купро.

Это элементы, следующие после достройки подгруппы  $d$  электронов в  $(n - 1)$  слое, т.е. некоторые  $d$ - и  $p$ -элементы: Cu, Zn, Ga, Ge, As, Ag, Cd, In, Sn, Au, Hg, Tl, Pb, Bi;

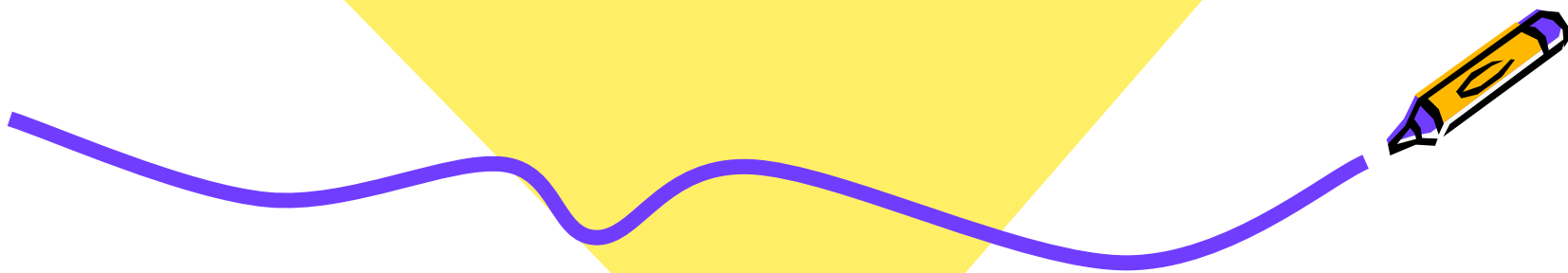


□ элементы, у которых не полностью  
достроена подгруппа  $(n-1)d$   
предпоследнего слоя подгруппы  $(n-2)f$   
третьего снаружи слоя  $(n-2)$ , названы  
промежуточными переходными  
элементами: Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Co.





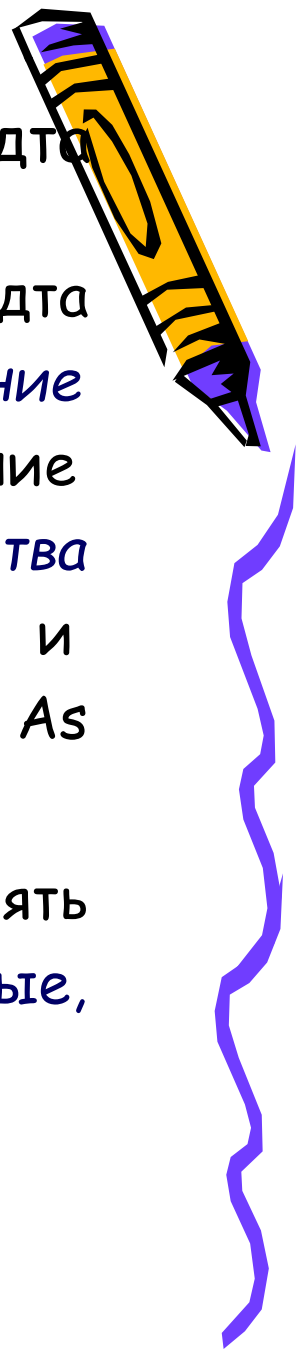
**ГЕОХИМИЧЕСКАЯ  
КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ  
ЭЛЕМЕНТОВ**



# Геохимическая классификация В.М. Гольдшмидта

Геохимическая классификация В.М. Гольдшмидта учитывает *электронное строение атомов, положение элемента на кривой атомных объемов* (отношение атомного веса к удельному весу), *магнитные свойства элементов* (влияние третьего квантового числа) и *химическое сродство* прежде всего к O и S, затем к As и другим элементам.

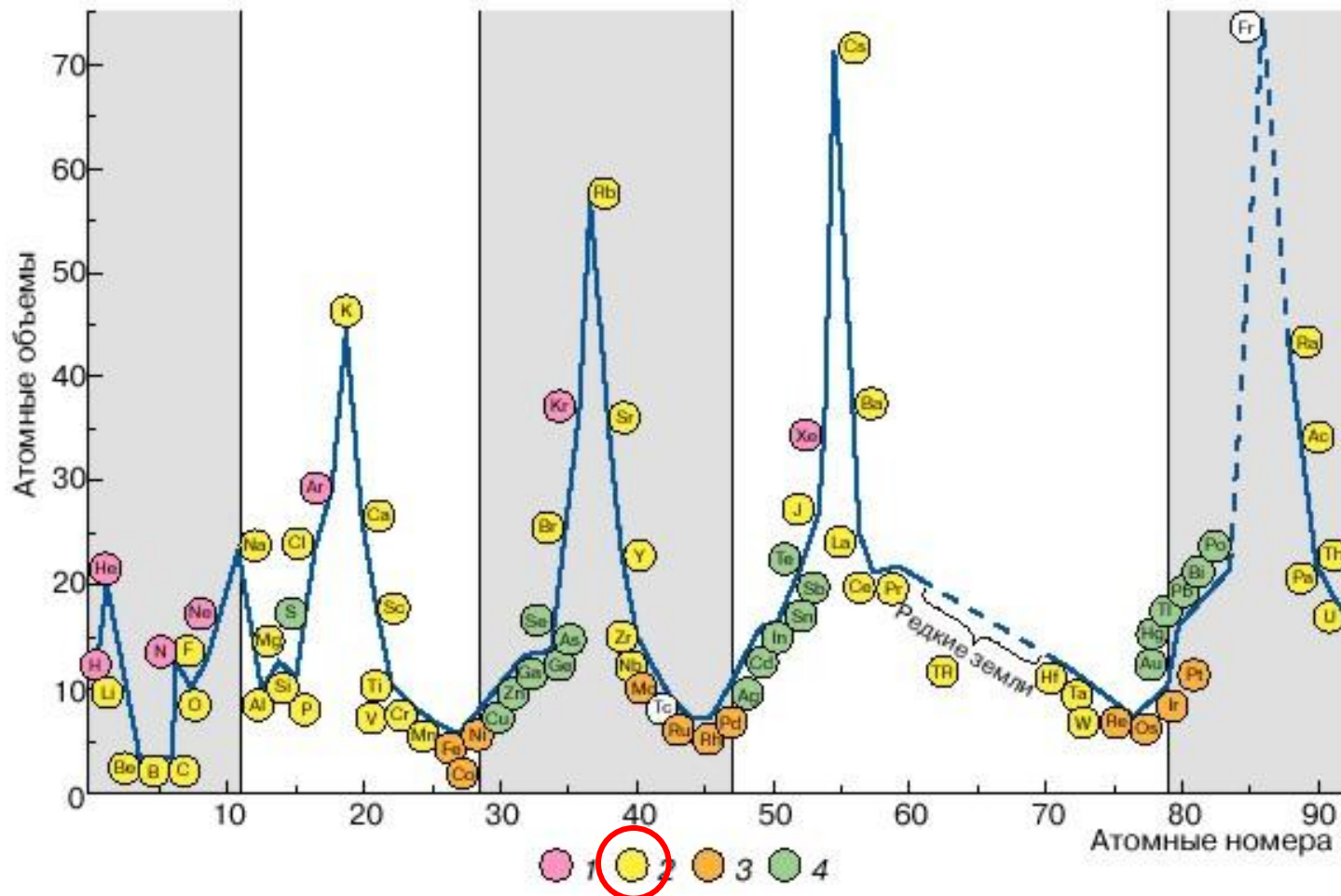
Все химические элементы разделены им на пять геохимических групп: *литофильные, халькофильные, сидерофильные, биофильные, атмофильные.*



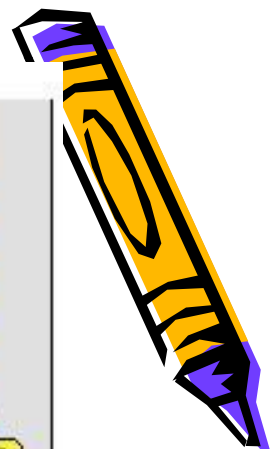
*Литофильные* - это породообразующие элементы, имеющие 2- и 8-электронную достроенную оболочку по типу инертного газа; характеризуются сродством к кислороду (ионные связи), т.е. образуют преимущественно кислородные соединения (оксиды, гидроксиды, силикаты, фосфаты и др.); элементы парамагнитные.

На кривой атомных объемов (по Перельману) располагаются на верхних пиках и на нисходящих участках кривой атомных объемов





Кривая атомных объемов (по А.И. Перельману): 1 - атмосферные элементы; 2 - литофильные элементы; 3 - сидерофильные элементы; 4 - халькофильные элементы

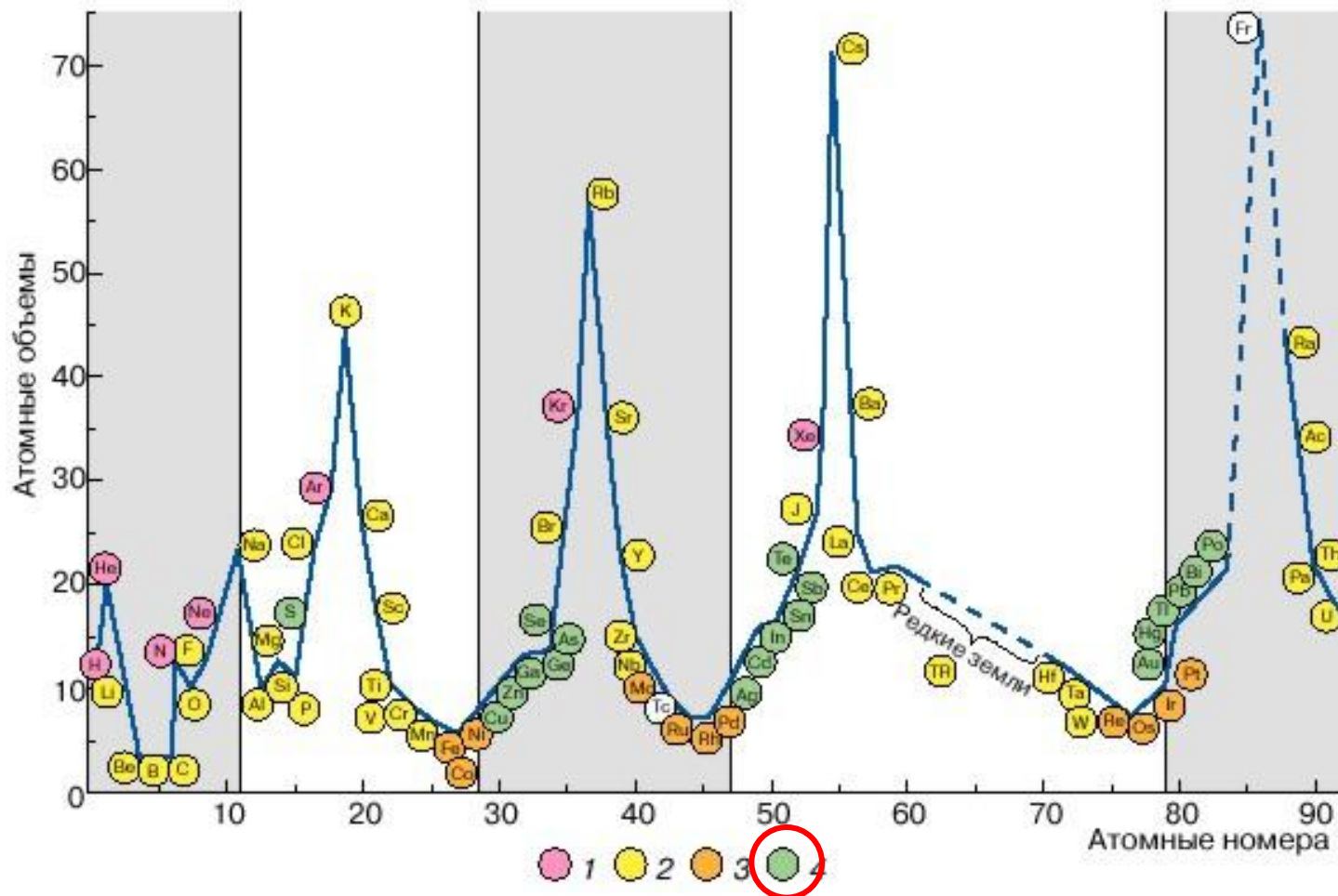




*Халькофильные* - это элементы 18-электронного типа; характеризуются сродством к сере (к Se, Te-элементам 8-электронного типа), т.е. образуют сульфиды, селениды, теллуриды, благодаря ковалентной связи; диамагнетики. Многие из них встречаются в самородном виде.

На кривой атомных объемов располагаются на восходящих участках кривой атомных объемов.





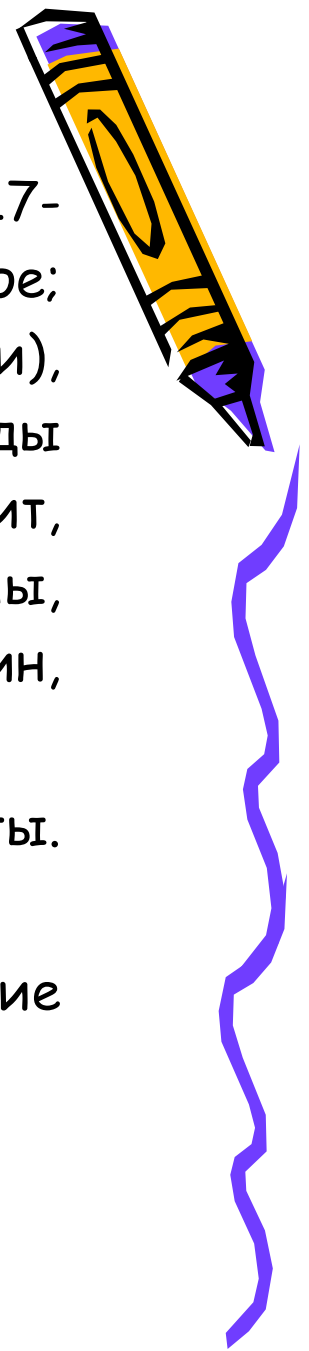
Кривая атомных объемов (по А.И. Перельману): 1 -  
 - атмосферные атомных объемов; 2 - литофильные элементы; 3 -  
 - сидерофильные элементы; 4 - халькофильные элементы

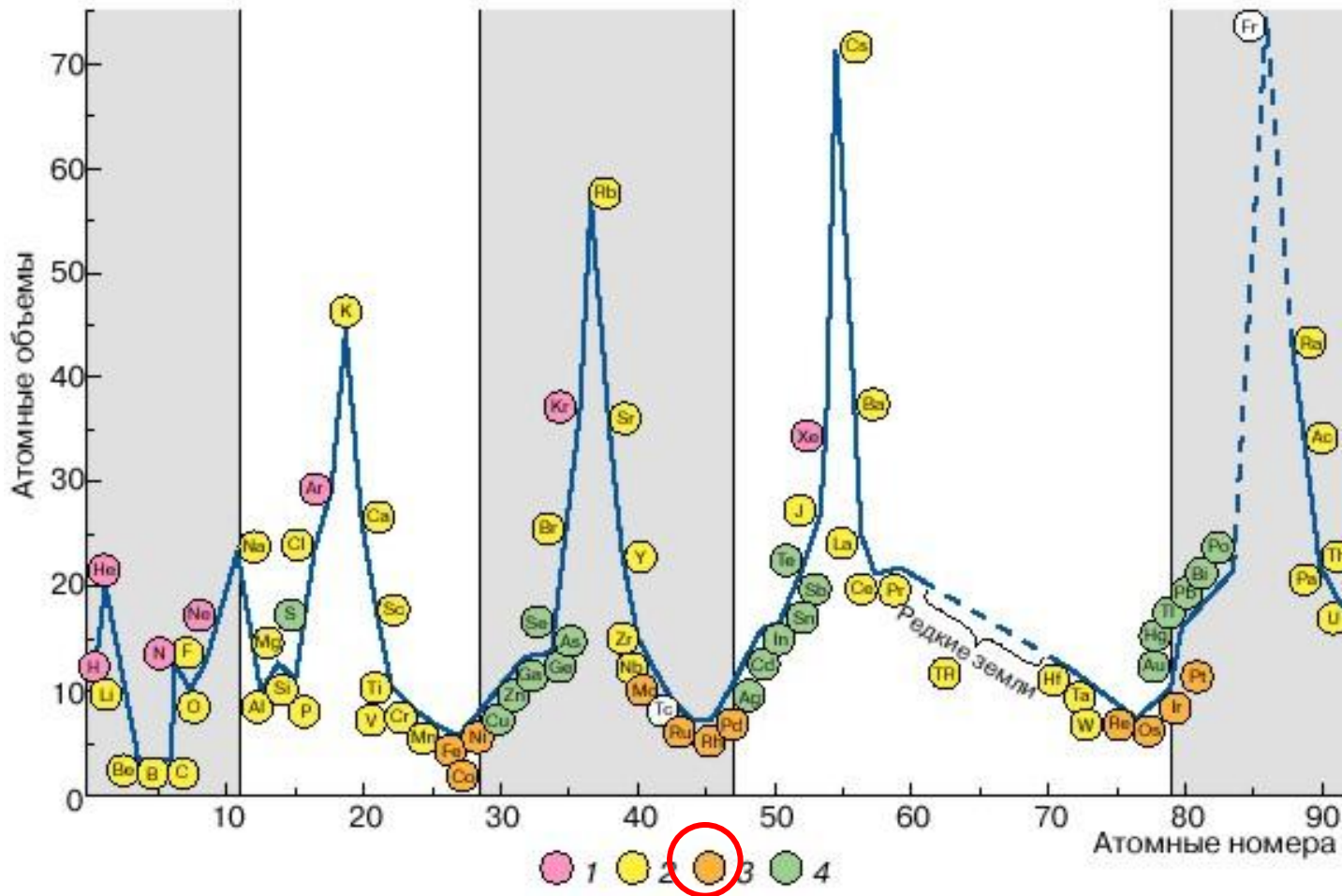


*Сидерофильные элементы* дают переходные ионы 9 - 17-электронной конфигурации на внешнем слое; обнаруживают сродство как к кислороду (ионные связи), так и к сере (ковалентные связи), образуют сульфиды (пирит, арсенопирит и др.), оксиды (магнетит, гематит, ильменит и др.), силикаты (пироксены, амфиболы, слюды и др.). Отмечается сродство к мышьяку (никелин, смальтин и др.).

Это ферромагнитные и парамагнитные элементы. Некоторые встречаются в самородном состоянии.

Имеют очень малые атомные объемы и занимают низкие места на кривой атомных объемов.





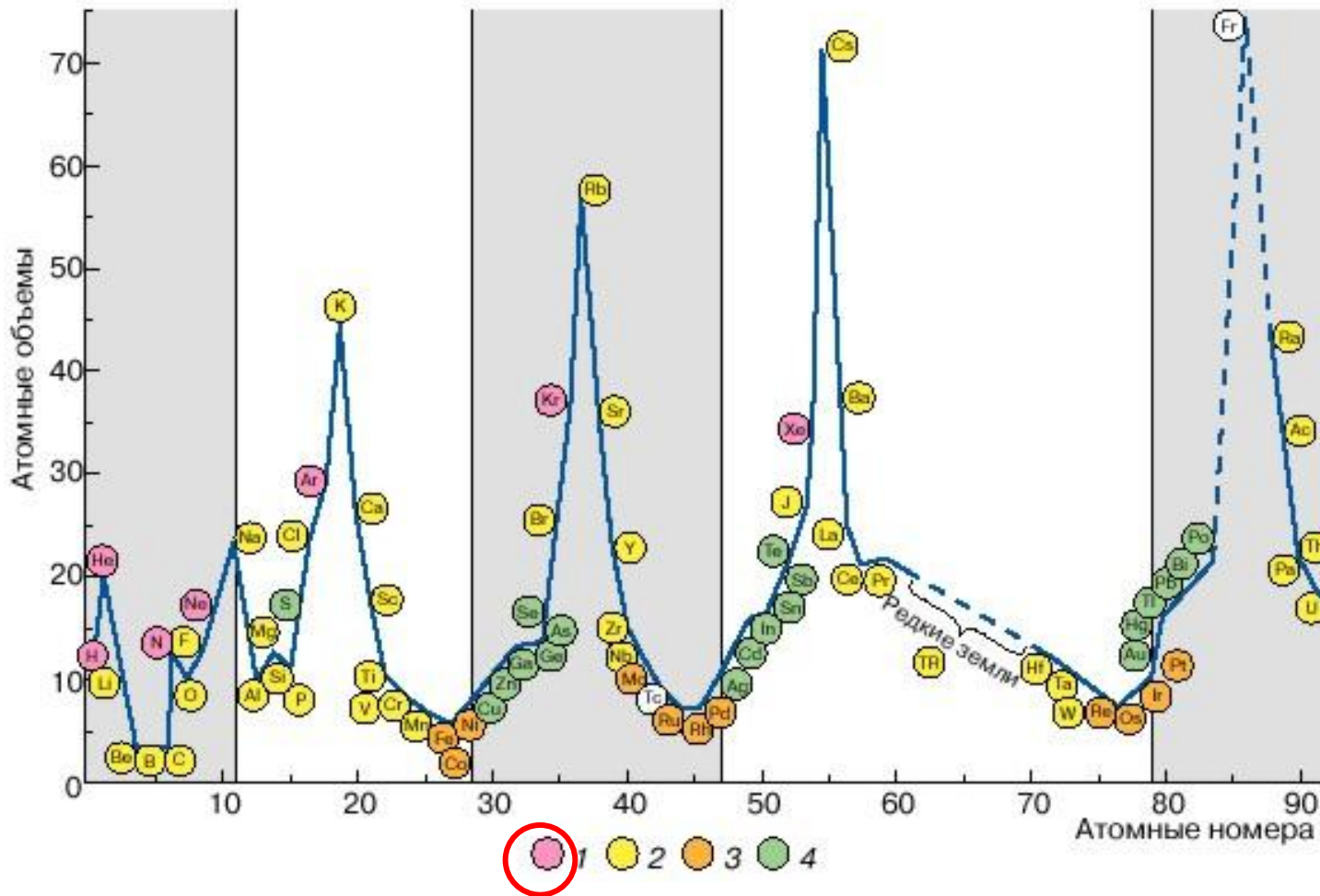
Кривая атомных объемов (по А.И. Перельману): 1 - атмосферные атомных объемов; 2 - литофильные элементы; 3 - сидерофильные элементы; 4 - халькофильные элементы

*Атмофильные* - это элементы, входящие в состав атмосферы: инертные газы (8-электронного типа) N, и H.

На кривой атомных объемов занимают восходящие участки; с трудом вступают в соединения (кроме H) и находятся в элементарном состоянии.

Диамагнитны.





Кривая атомных объемов (по А.И. Перельману): 1 - атмосферные атомных объемов; 2 – литофильные элементы; 3 - сидерофильныеэлементы; 4 - халькофильные элементы

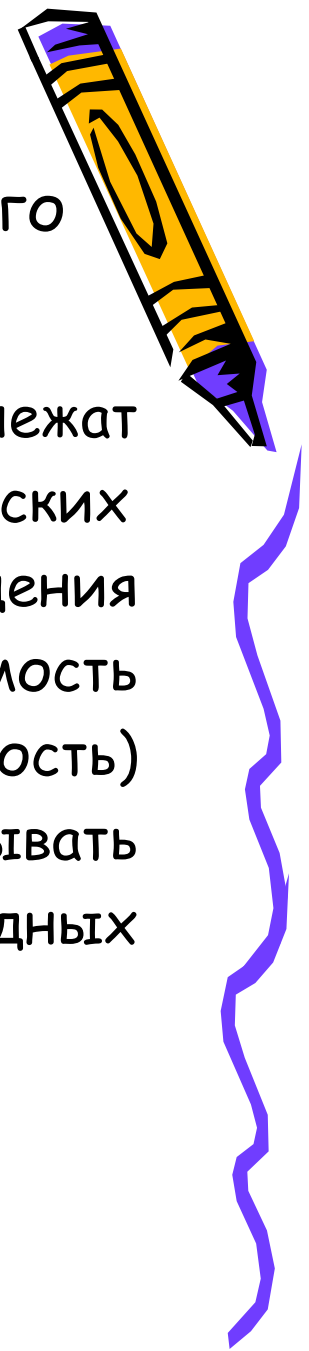
Гидрофильные элементы - это наиболее характерные элементы для гидросферы.



Некоторые элементы могут относиться к разным группам, что связано с их способностью вступать в соединение с кислородом, серой или другими элементами.



## Геохимическая классификация В.И. Вернадского



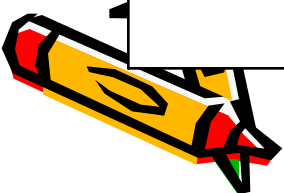
В основе классификации В.И. Вернадского лежат *геохимические факты*: история химических элементов в земной коре, форма нахождения элементов, явления радиоактивности, обратимость или необратимость миграции (цикличность) элементов, способность элементов образовывать минералы, состоящие из нескольких разнородных атомов.

Им выделено 6 групп.

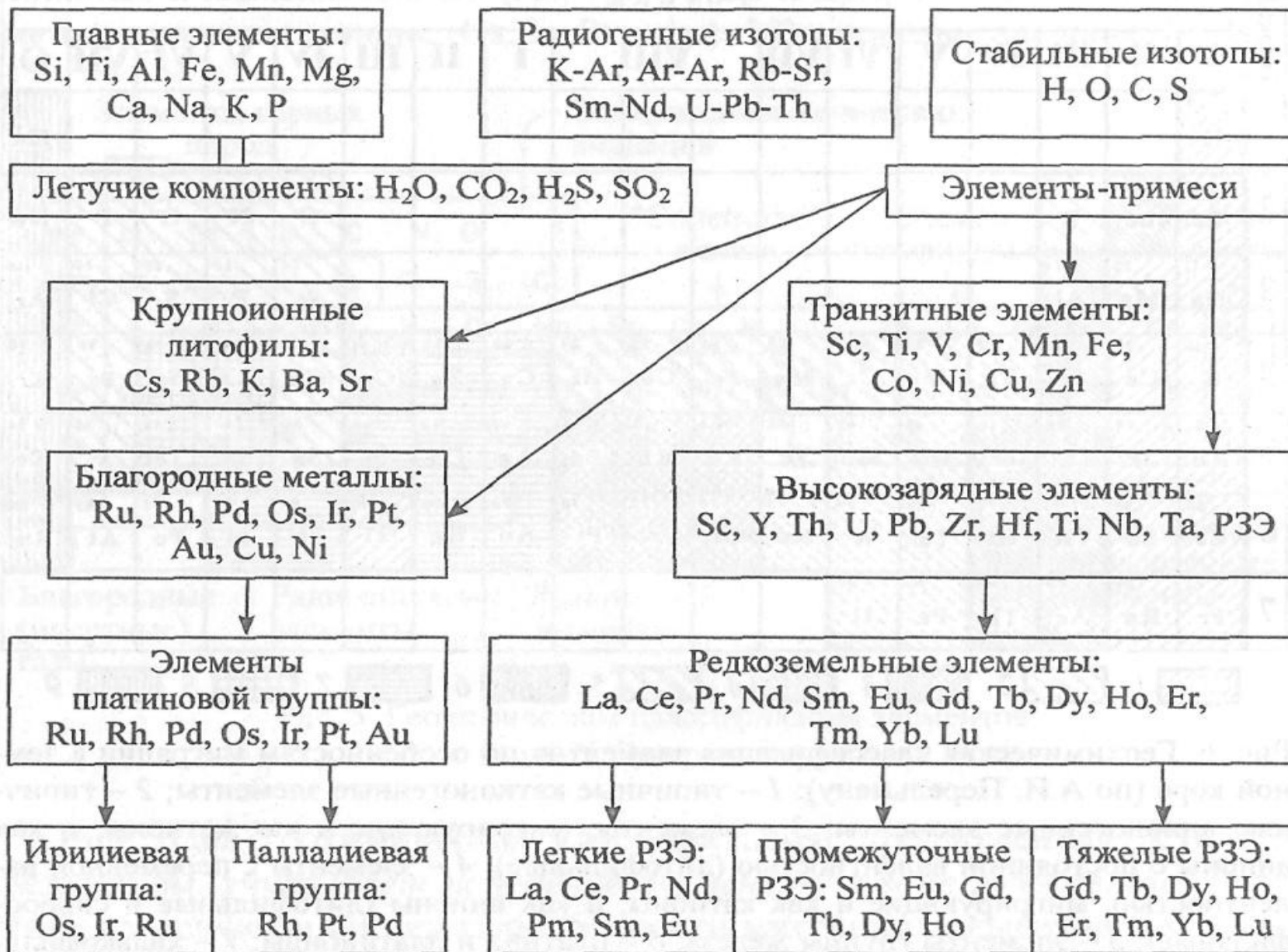




Группы элементов		Ассоциации элементов
По В.М. Гольдшмидту	По В.И. Вернадскому	
Литофильные	Циклические	Be, B, C, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Sr, Zr, Ba, Hf, W
	Рассеянные	Li, Br, Rb, Y, Nb, I, Cs, Ta
	Сильно радиоактивные	U, Th, Ra, Ac, Pa
	Редкоземельные	La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu
Халькофильные	Циклические	S, Cu, Zn, Ge, As, Se, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Hg, Tl, Pb, Bi
	Благородные	Au, Pd
	Рассеянные	In
	Сильно радиоактивные	Po
Сидерофильные	Циклические	Fe, Co, Ni, Mo, P
	Благородные	Ru, Rh, Os, Ir, Pt
Гидрофильные		O, H, Br, I, S
Атмофильные	Циклические	H, N, O, C
	Инертные газы	He, Ne, Ar, Kr, Xe
	Сильно радиоактивные	Rn



# Группы элементов, используемые при геохимических исследованиях



Представление о распространенности  
химических элементов в природе и понятие о  
кларке



**Франк Уиглсуорт Кларк**

19 марта 1847- 23 мая 1931

*F. W. Clarke*





В 1924 г., когда Ф.В. Кларк совместно с Н. С. Вашингтоном опубликовал таблицу распространенности 50 химических элементов.

Распространенность элементов была пересчитана на 100 % за вычетом воды и малых компонентов и в пересчете на окислы:

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$
60,18	15,61	3,14	3,88	3,56	5,17	3,91	3,19	1,06	0,30



В 1923 г. А.Е. Ферсман предложил термин кларк

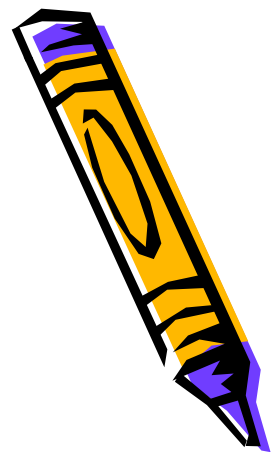
Кларк - среднее содержание химических элементов в земной коре, гидросфере, Земле в целом, космических телах и др. геохимических или космохимических системах



## Закон Кларка-Вернадского

- *Все элементы есть везде и всюду*
- *Для всех химических элементов характерно повсеместное распространение во всех геосферах*

В.И. Вернадский ещё в 1909 г писал: «В каждой капле и пылинке вещества на земной поверхности, по мере увеличения тонкости наших исследований, мы открываем все новые и новые элементы. Получается впечатление микрокосмического их рассеяния. В песчинке или капле, как в микрокосмосе, отражается общий состав космоса».



# Общие закономерности распространения элементов на Земле

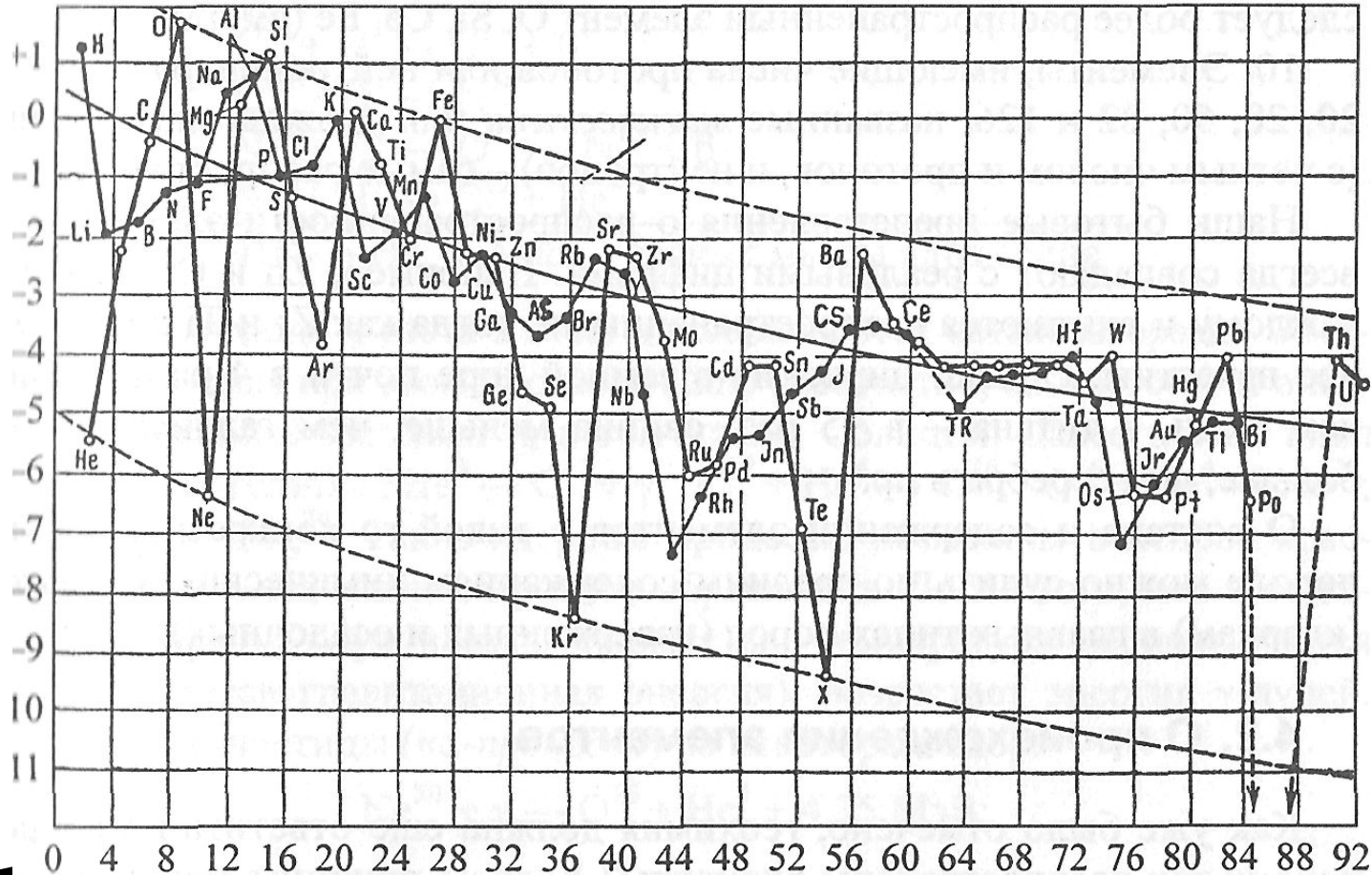
1. В целом распространенность элементов падает от начала к концу таблицы Менделеева, но не плавно, а скачками с «пиками» и «провалами».





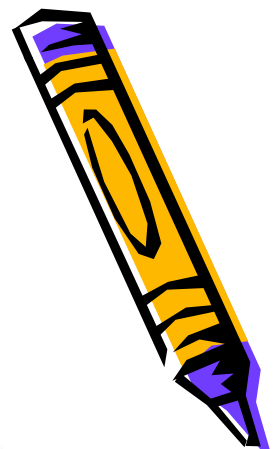
# Логарифмическая кривая атомных кларков земной коры

lg K



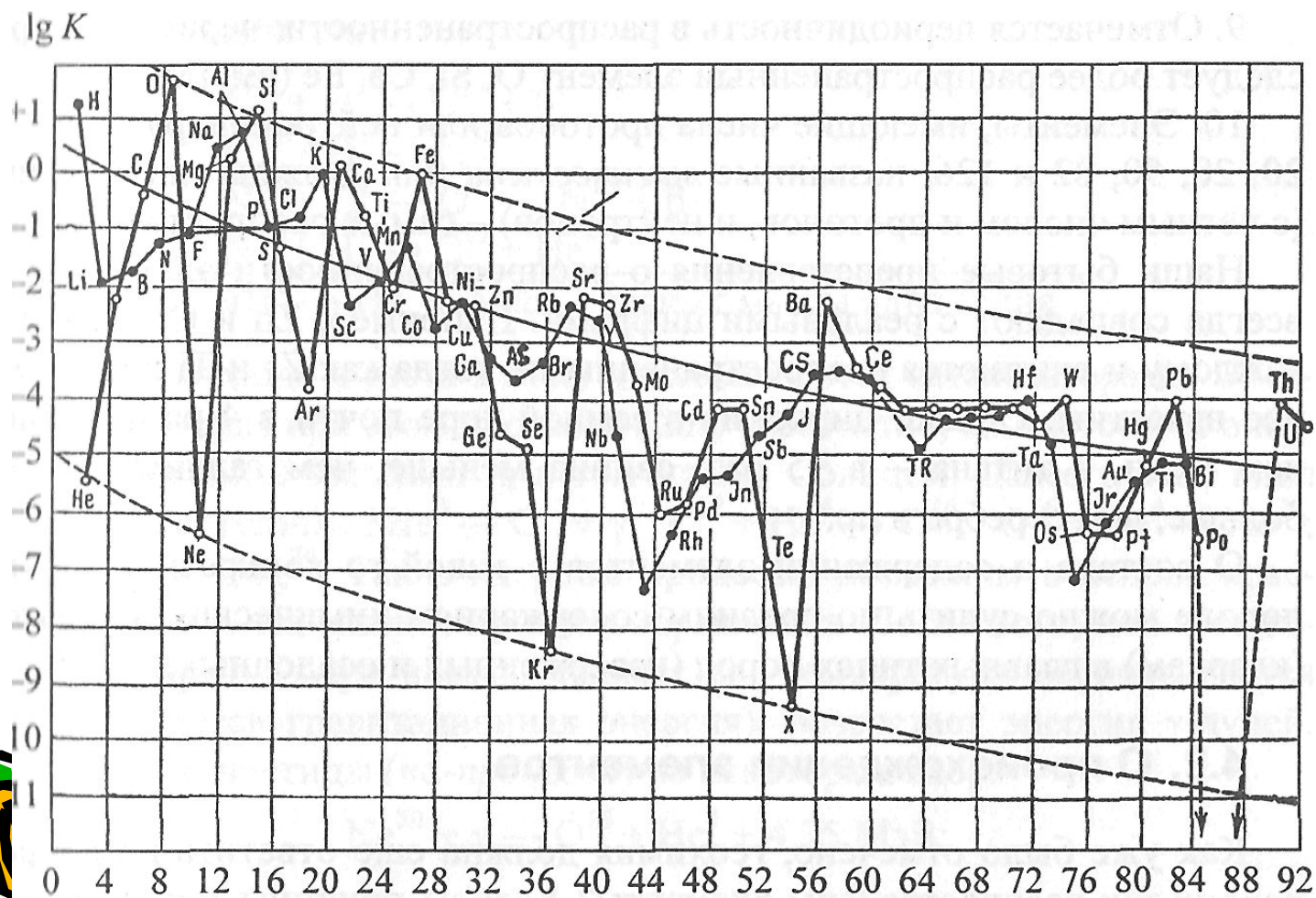
o - четные элементы; · - нечетные элементы;

— средняя линия Ферсмана



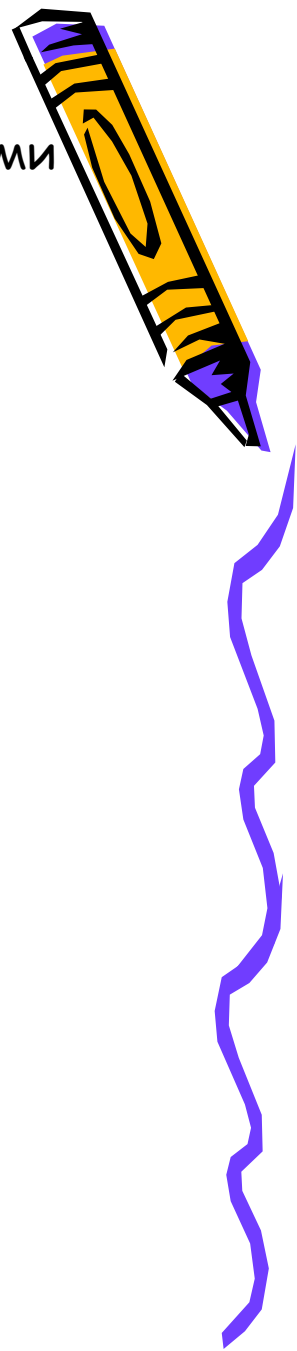


2. Преобладают легкие атомы; средний атомный вес земной коры 17,25.



3. По весовым кларкам наиболее распространенными элементами земной коры являются следующие (по А.Е. Ферсману):

*O - 49,13, Si - 26,00, Al - 7,45, Fe - 4,2, Ca - 3,25, Na - 2,4,  
K - 2,35, Mg - 2,35, H - 1,00,  
Ti - 0,61, C - 0,35, Cl - 0,20, P - 0,12, S - 0,10, Mn - 0,10,  
F - 0,08, Ba - 0,05, N - 0,04, Sr - 0,035, Cr - 0,030,  
Zr - 0,025, V - 0,020, Ni - 0,020, Zn - 0,020, Cu - 0,010*

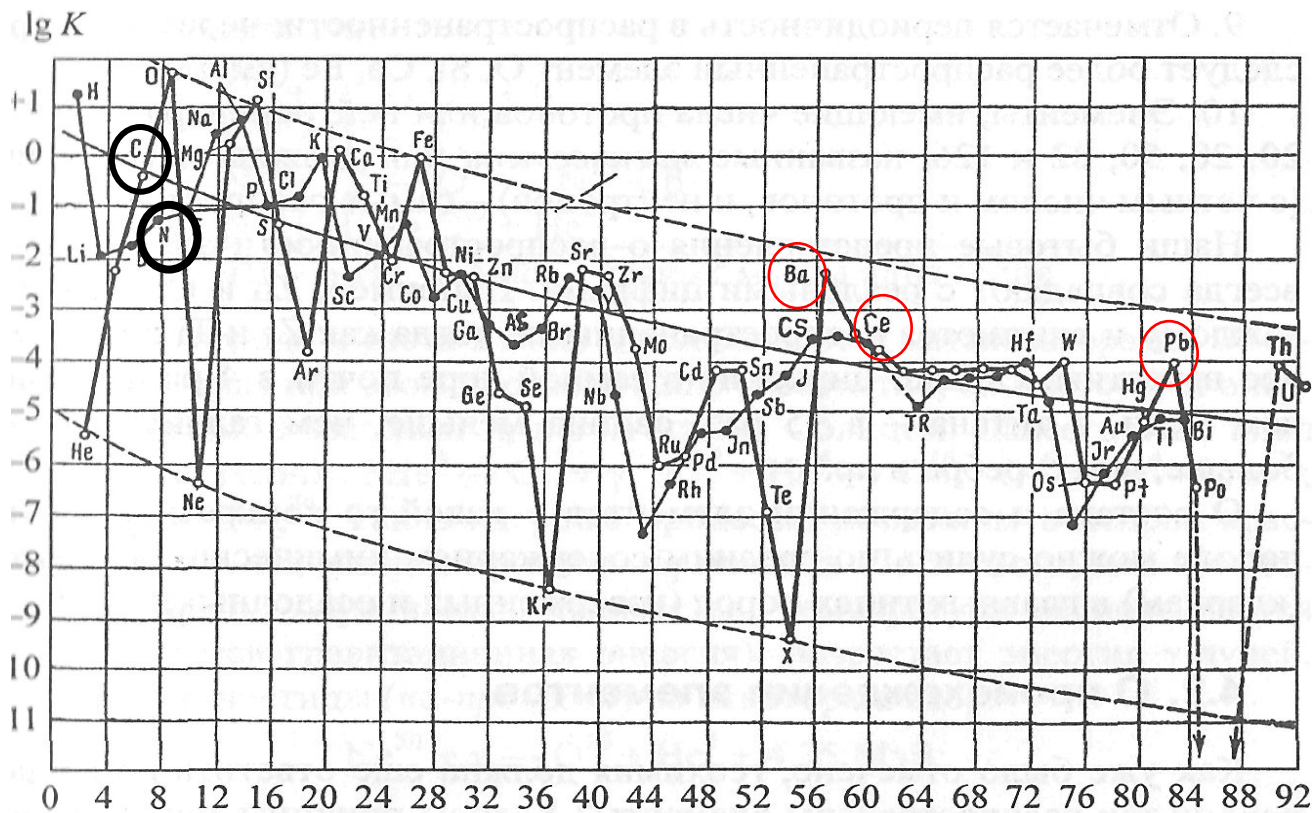


4. Кислород - абсолютно преобладающий элемент.

5. После Fe (№ 26) нет ни одного широко распространенного элемента; с Si (№ 29) начинается «область малых величин».



6. Очень легкие элементы (Be, C, N) характеризуются низкой распространенностью. Из тяжелых элементов (ат. вес > 119) повышенной распространенностью обладают Ba, La, Ce, Nd, Gd, Pb

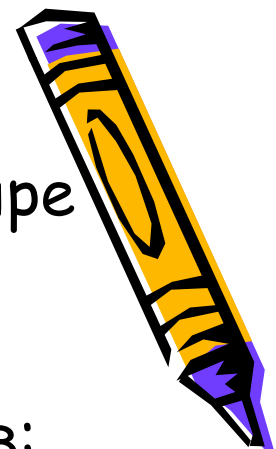


7. Четные элементы распространены шире нечетных в 5 - 10 раз (*закон Оддо-Гаркинса*).

Для первых по распространенности 9 элементов:

весовые кларки четных элементов (O, Si, Fe, Ca, Mg) - 85,54 %;

весовые кларки нечетных элементов (Al, K, Na, H) - 13,02 %.





8. Широко распространены элементы, атомный вес которых делится на 4 без остатка (гелио группы) – *закон Ферсмана кратности четырем*.

Такие элементы (O, Si, Ca, Mg, Ti и др.) названы им элементами  $4q$ , где  $q$  – целое число

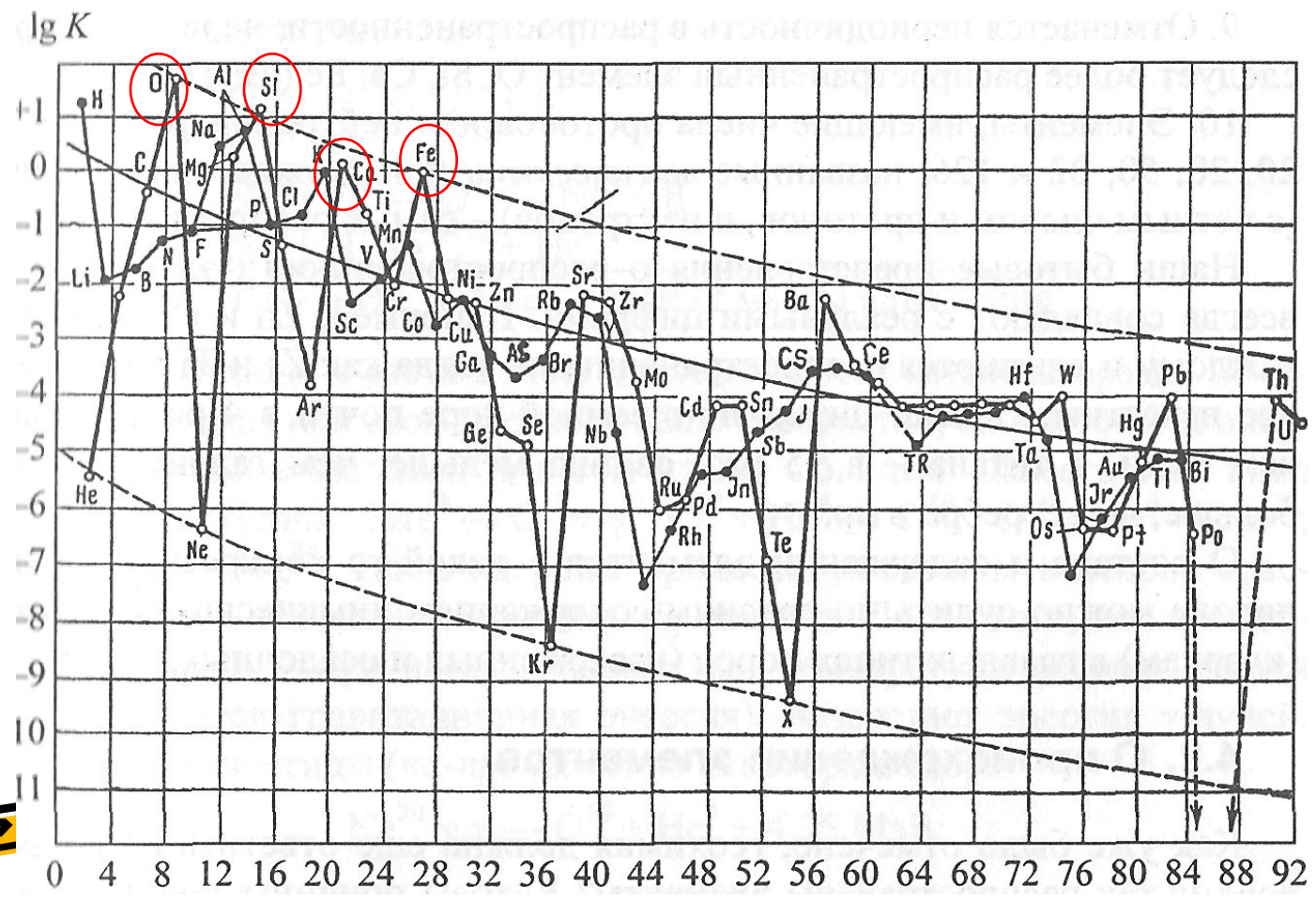
Ядра типа $4q$	По весу, %	По числу атомов, %
$4q$	86,19	74,7
$4q+3$	12,74	7,95
$4q+2$	0,05	0,05
$4q+1$	0,02	0,02
H	1,00	17,25





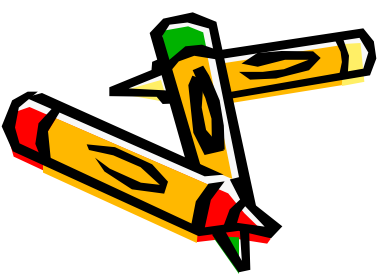


9. Отмечается периодичность в распространенности:  
через 6 номеров следует более распространенный элемент O,  
Si, Ca, Fe



10. Элементы, имеющие числа протонов или нейтронов, равные 2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126, названные *магическими* или *дважды магическими* (с четным числом и протонов, и нейтронов) – самые распространенные.

Наиболее устойчивы дважды магические ядра, содержащие магическое число и протонов и нейтронов –  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ . В земной коре элементы с магическими ядрами обладают достаточно высокой распространенностью (за исключением гелия).





## Основной закон геохимии

(В.М. Гольдшмидт) :

Содержания химических элементов зависят от строения их атомного ядра, а их миграция – от строения электронных оболочек, определяющих химические свойства элементов.



## Закон Ферсмана-Гольдшмидта

*Геохимия элемента в земной коре определяется как химическими свойствами, так и величиной кларка*

