



Общая геохимия

Лекция 3

Геохимические классификации.

Классификация по
распространенности: главные
(петрогенные) и редкие элементы

Половина земной коры состоит из **O**.

Таким образом, земная кора – это "кислородная сфера".

На втором месте стоит **Si** (кларк 29.5), на третьем **Al** (8.05). Если к ним добавить **Fe** (4.65), **Ca** (2.96), **K** (2.50), **Na** (2.50), **Mg** (1.87), **Ti** (0.45), то получится 99.48.

На остальные ~75 элементов приходится менее 1%.

O, Si, Al, Fe, Ca, K, Na, Mg (Ti, P, Mn)

- **Главные, петрогенные** элементы (>1 - 0.1%).
- Элементы, содержание которых не превышает 0.1-0.0001%, называют **редкими** (*уст.* – малые). Если редкие элементы не образуют собственных минералов, то их называют "редкими **рассеянными**" (Br, In, Ra, Re, Hf, Se и др.). Содержание в ppm, г/т.

Так, у U и Br кларки почти одинаковы ($2.5 \cdot 10^{-4}$ и $2.1 \cdot 10^{-4}$), но U – редкий элемент, т. к. известно 104 урановых минерала и урановые месторождения, Br – рассеянный (имеет лишь один минерал).

Принципиальная разница между **петрогенными** и **редкими** элементами заключается в том, что петрогенные элементы определяют фазовый (минеральный) состав системы, в то время как редкие элементы входят в эти фазы в виде примесей и пассивно распределяются между существующими фазами, но не влияют на их содержание и устойчивость.

У этого правила есть исключения. Так, Sr даже в небольших количествах сильно влияет на устойчивость кальцита.

- В геохимии есть еще понятие **микроэлементы**, которое означает элементы, содержащиеся в малых количествах ($<0.01\%$) в данной системе. Так, Al – микроэлемент в живом организме и макроэлемент в силикатных породах.

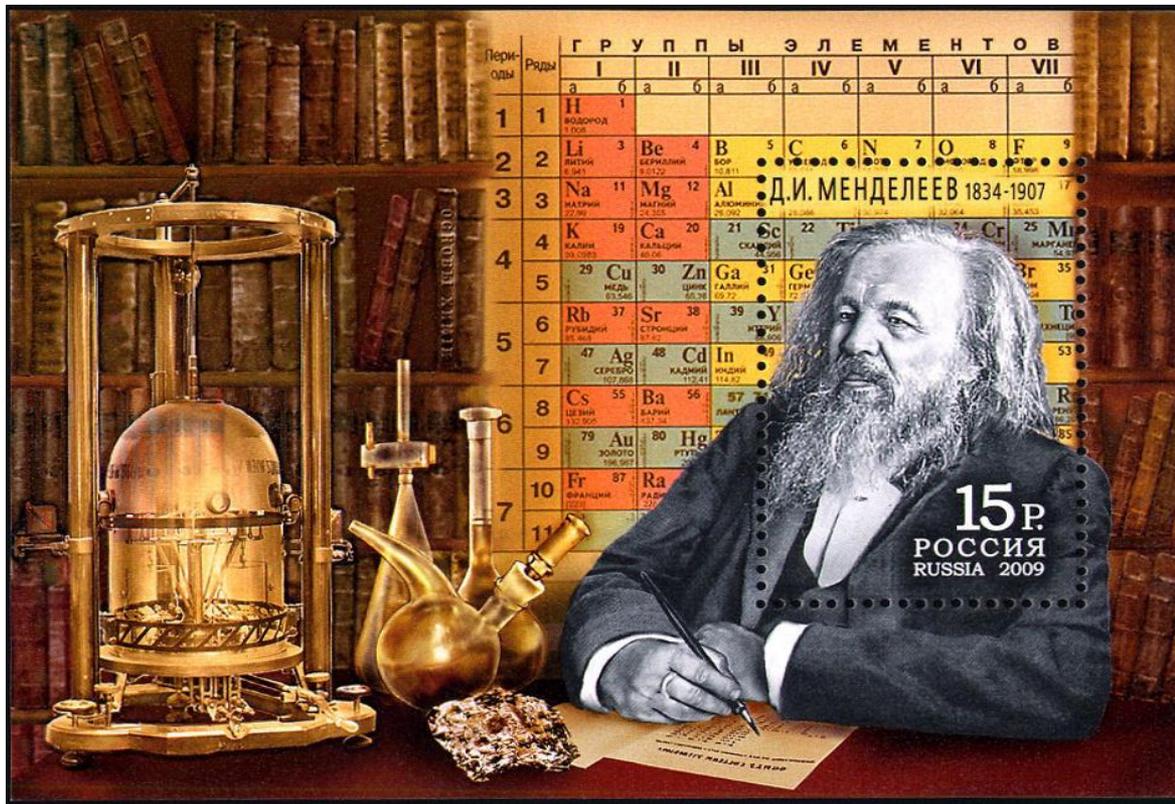
Геохимические классификации элементов

Геохимическая классификация элементов –
ряд принципов группировки химических
элементов в зависимости от подходов и цели
исследователя.

Геохимические классификации элементов –
способы систематизации химических
элементов в зависимости от их встречаемости
в природе.

Д.И. Менделеев (1869 г.) так сформулировал периодический закон:

"Свойства простых тел, а также формы и свойства (сложных) соединений находятся в периодической зависимости от величины атомных весов элементов".



- Согласно периодическому закону, свойства химических элементов изменяются периодически, в зависимости от атомного порядкового номера элемента.
- В первую очередь, это касается химических свойств элементов, их валентности, способности вступать в химические соединения с другими элементами, состава и свойств этих соединений.
- Периодичность обнаруживают многие физические свойства (оптические спектры, потенциалы ионизации, радиусы атомов и ионов, атомные объемы и др). Они связаны со строением электронных оболочек атомов

Периодическая система элементов

Значения радиусов атомов и ионов

ПЕРИОДЫ / PERIODS

ГРУППЫ / GROUPS	
1	2
Ia	IIa
Li ³ № 3 ЛИТИЙ Lithium Li ⁺ =0.76 Li ⁻ =1.59	Be ⁴ № 4 БЕРИЛЛИЙ Beryllium Be ⁺ =0.45 Be ⁻ =1.04
Na ¹¹ № 11 НАТРИЙ Sodium Na ⁺ =1.02 Na ⁻ =1.71	Mg ¹² № 12 МАГНИЙ Magnesium Mg ⁺ =0.72 Mg ⁻ =1.28
K ¹⁹ № 19 КАЛИЙ Potassium K ⁺ =1.38 K ⁻ =2.16	Ca ²⁰ № 20 КАЛЬЦИЙ Calcium Ca ⁺ =1.09 Ca ⁻ =1.67
Rb ³⁷ № 37 РУБИДИЙ Rubidium Rb ⁺ =1.52 Rb ⁻ =2.29	Sr ³⁸ № 38 СТРОНЦИЙ Strontium Sr ⁺ =1.18 Sr ⁻ =1.84
Cs ⁵⁵ № 55 ЦЕЗИЙ Cesium Cs ⁺ =1.67 Cs ⁻ =2.42	Ba ⁵⁶ № 56 БАРИЙ Barium Ba ⁺ =1.35 Ba ⁻ =2.06
Fr ⁸⁷ № 87 Франций Francium Fr ⁺ =1.80 Fr ⁻ =2.48	Ra ⁸⁸ № 88 РАДИЙ Radium Ra ⁺ =1.68 Ra ⁻ =2.04

Cl¹⁷₂ № 17
ХЛОР
Chlorine
Ne 3s²3p⁵
-1,1,3,5,7,5

Cl⁷⁺=0.08
Cl⁵⁺=0.12
Cl⁰=0.73
Cl¹⁻=1.81
Cl⁻=1.90/6

- ОБОЗНАЧЕНИЯ**
- 1 - атомный номер
 - 2 - символ элемента
 - 3 - название элемента
 - 4 - электронная конфигурация
 - 5 - степени окисления
 - 6 - значение радиусов атома и ионов
 - 7 - радиусы атома и ионов
- а) - атомный радиус
 б) - ионный радиус (КЧ = 6)
 в) - ионный радиус (КЧ = 4;3)
 г) - ван-дер-ваальсов радиус

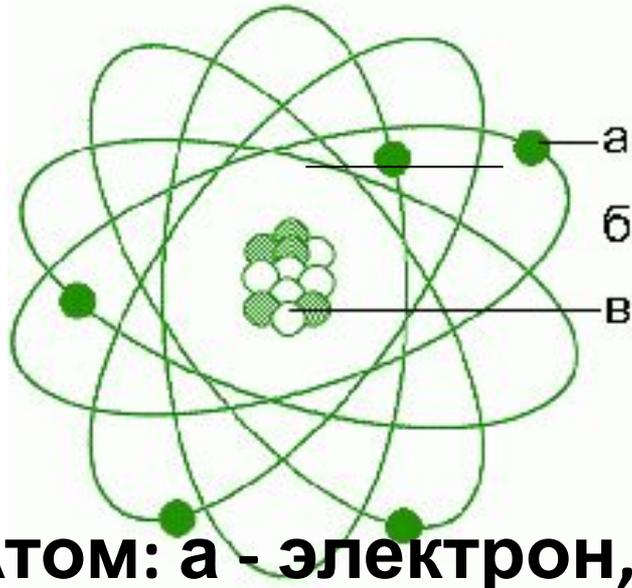
				17	18
				VIIa	0
				H ¹ № 1 ВОДОРОД Hydrogen H ⁺ =0.10 H ⁻ =0.51 H ⁻ =1.15	He ² № 2 ГЕЛИЙ Helium He ⁺ =0.29 He ⁻ =1.22
13	14	15	16		
IIIa	IVa	Va	VIa		
B ⁵ № 5 БОР Boron B ⁺ =0.11 B ⁻ =0.78	C ⁶ № 6 УГЛЕРОД Carbon C ⁺ =0.15 C ⁻ =0.63 C ⁻ =1.71	N ⁷ № 7 АЗОТ Nitrogen N ⁺ =0.17 N ⁻ =0.53 N ⁻ =1.48 N ⁻ =1.50	O ⁸ № 8 КИСЛОРОД Oxygen O ⁺ =0.45 O ⁻ =1.29 O ⁻ =1.38	F ⁹ № 9 ФТОР Fluorine F ⁺ =0.48 F ⁻ =0.44 F ⁻ =1.33 F ⁻ =1.40	Ne ¹⁰ № 10 НЕОН Neon Ne ⁺ =0.35 Ne ⁻ =1.57
Al ¹³ № 13 АЛЮМИНИЙ Aluminum Al ⁺ =0.53 Al ⁻ =1.31	Si ¹⁴ № 14 КРЕМНИЙ Silicon Si ⁺ =0.26 Si ⁻ =1.07	P ¹⁵ № 15 ФОСФОР Phosphorus P ⁺ =0.48 P ⁻ =0.57 P ⁻ =1.80 P ⁻ =1.99	S ¹⁶ № 16 СЕЛЕН Selenium S ⁺ =0.42 S ⁻ =0.81 S ⁻ =1.84 S ⁻ =1.84	Cl ¹⁷ № 17 ХЛОР Chlorine Cl ⁺ =0.68 Cl ⁻ =0.12 Cl ⁻ =0.73 Cl ⁻ =1.84 Cl ⁻ =1.90	Ar ¹⁸ № 18 АРГОН Argon Ar ⁺ =0.66 Ar ⁻ =1.88
Ga ³¹ № 31 ГАЛЛИЙ Gallium Ga ⁺ =0.62 Ga ⁻ =1.25	Ge ³² № 32 ГЕРМАНИЙ Germanium Ge ⁺ =0.59 Ge ⁻ =0.73 Ge ⁻ =1.09	As ³³ № 33 АРСЕНИК Arsenic As ⁺ =0.56 As ⁻ =0.98 As ⁻ =1.84 As ⁻ =2.00	Se ³⁴ № 34 СЕЛЕН Selenium Se ⁺ =0.42 Se ⁻ =0.92 Se ⁻ =1.02 Se ⁻ =1.88 Se ⁻ =2.00	Br ³⁵ № 35 БРОМ Bromine Br ⁺ =0.21 Br ⁻ =0.24 Br ⁻ =0.85 Br ⁻ =1.96	Kr ³⁶ № 36 КРИПТОН Krypton Kr ⁺ =0.88 Kr ⁻ =2.02
In ⁴⁹ № 49 ИНДИЙ Indium In ⁺ =0.80 In ⁻ =1.38	Sn ⁵⁰ № 50 ОЦИНК Tin Sn ⁺ =0.69 Sn ⁻ =1.24	Sb ⁵¹ № 51 АНТИМОН Antimony Sb ⁺ =0.60 Sb ⁻ =0.76 Sb ⁻ =1.44 Sb ⁻ =2.20	Te ⁵² № 52 ТЕЛЛУРИЙ Tellurium Te ⁺ =0.58 Te ⁻ =0.95 Te ⁻ =1.11 Te ⁻ =2.26 Te ⁻ =2.21	I ⁵³ № 53 ИОДИЙ Iodine I ⁺ =0.42 I ⁻ =0.44 I ⁻ =1.94 I ⁻ =2.18	Xe ⁵⁴ № 54 КСЕНОН Xenon Xe ⁺ =0.98 Xe ⁻ =2.19
Tl ⁸¹ № 81 ТАЛЛИЙ Thallium Tl ⁺ =0.85 Tl ⁻ =1.32	Pb ⁸² № 82 СВИНЦ Lead Pb ⁺ =0.76 Pb ⁻ =0.98 Pb ⁻ =1.22	Bi ⁸³ № 83 БИСМУТ Bismuth Bi ⁺ =0.76 Bi ⁻ =1.03 Bi ⁻ =1.13	Po ⁸⁴ № 84 ПОЛОНИЙ Polonium Po ⁺ =0.66 Po ⁻ =0.94 Po ⁻ =1.21	At ⁸⁵ № 85 АСТАТ Astatine At ⁺ =0.62 At ⁻ =1.15	Rn ⁸⁶ № 86 РАДОН Radon Rn ⁺ =1.09

1 ЛАНТАНИДЫ
LANTANIDES

2 АКТИНИДЫ
ACTINIDES

La ⁵⁷ № 57 ЛАНТАНИЙ Lanthanum La ⁺ =1.03 La ⁻ =1.91	Ce ⁵⁸ № 58 ЦЕРИЙ Cerium Ce ⁺ =1.41 Ce ⁻ =0.87 Ce ⁻ =1.90	Pr ⁵⁹ № 59 ПРАСЕОДИМ Praseodymium Pr ⁺ =0.99 Pr ⁻ =0.85 Pr ⁻ =1.90	Nd ⁶⁰ № 60 НЕОДИМ Neodymium Nd ⁺ =0.98 Nd ⁻ =1.89	Pm ⁶¹ № 61 ПРОМЕТИЙ Promethium Pm ⁺ =0.97 Pm ⁻ =1.88	Sm ⁶² № 62 САМАРИЙ Samarium Sm ⁺ =0.96 Sm ⁻ =1.85	Eu ⁶³ № 63 ЕВРОПИЙ Europium Eu ⁺ =1.17 Eu ⁻ =0.95 Eu ⁻ =1.82	Gd ⁶⁴ № 64 ГАДОЛИНИЙ Gadolinium Gd ⁺ =0.94 Gd ⁻ =1.71	Tb ⁶⁵ № 65 ТЕРБИЙ Terbium Tb ⁺ =0.92 Tb ⁻ =0.76 Tb ⁻ =1.77	Dy ⁶⁶ № 66 ДИСПРОСИЙ Dysprosium Dy ⁺ =0.91 Dy ⁻ =1.75	Ho ⁶⁷ № 67 ГОЛМУМ Holmium Ho ⁺ =0.90 Ho ⁻ =1.72	Er ⁶⁸ № 68 ЕРБИЙ Erbium Er ⁺ =0.89 Er ⁻ =1.70	Tm ⁶⁹ № 69 ТЕЛМУР Thulium Tm ⁺ =1.06 Tm ⁻ =1.69	Yb ⁷⁰ № 70 ИТТЕРБИЙ Ytterbium Yb ⁺ =1.04 Yb ⁻ =0.87 Yb ⁻ =1.66
Ac ⁸⁹ № 89 АКТИНИЙ Actinium Ac ⁺ =1.89	Th ⁹⁰ № 90 ТОРИЙ Thorium Th ⁺ =0.94 Th ⁻ =1.79	Pa ⁹¹ № 91 ПРОТАКТИНИЙ Protactinium Pa ⁺ =0.90 Pa ⁻ =0.78 Pa ⁻ =1.80	U ⁹² № 92 УРАНИЙ Uranium U ⁺ =0.73 U ⁻ =1.03 U ⁻ =1.77	Np ⁹³ № 93 НЕПУТЧИЙ Neptunium Np ⁺ =1.00 Np ⁻ =0.75 Np ⁻ =1.74	Pu ⁹⁴ № 94 ПЛУТОНИЙ Plutonium Pu ⁺ =0.86 Pu ⁻ =1.78	Am ⁹⁵ № 95 АМЕРИЦИЙ Americium Am ⁺ =0.98 Am ⁻ =0.86 Am ⁻ =1.76	Cm ⁹⁶ № 96 КУРИЙ Curium Cm ⁺ =0.97 Cm ⁻ =1.66	Bk ⁹⁷ № 97 БЕРКИЛИЙ Berkelium Bk ⁺ =0.94 Bk ⁻ =0.83 Bk ⁻ =1.62	Cf ⁹⁸ № 98 КАЛИФОРНИЙ Californium Cf ⁺ =0.94 Cf ⁻ =0.85 Cf ⁻ =1.60	Es ⁹⁹ № 99 ЭЙНШТЕЙН Einsteinium Es ⁺ =1.58	Fm ¹⁰⁰ № 100 ФЕРМИЙ Fermium Fm ⁺ =1.56	Md ¹⁰¹ № 101 МЕНДЕЛЕВИЙ Mendelevium Md ⁺ =1.53	No ¹⁰² № 102 НОБЕЛИЙ Nobelium No ⁺ =1.10 No ⁻ =1.58

Атом (от греч. atomos — неделимый), частица вещества микроскопических размеров и очень малой массы (микрочастица), **наименьшая часть химического элемента, являющаяся носителем его свойств.** Каждому элементу соответствует определённый род атома, обозначаемых символом элемента: H, Fe, Hg, U.



Атом: а - электрон, б - протон, в - нейтрон.

Масса ядра атома приблизительно равна массовому числу **A** - общему числу протонов и нейтронов в ядре.

Между величинами атомных весов и атомным номером (или зарядом ядра атома) имеется определенная связь:

Атомный вес (**A**) примерно в 2–2.5 раза больше величины атомного номера **Z**.

Число нуклонов $A = Z + N$, где **N** – число нейтронов, относится к числу протонов **Z** как $A/Z \approx 2$.

Разность **N-Z** - избыток нейтронов.

Для многих элементов начала периодической системы (от He до O) это отношение довольно точно равно 2, начиная с железа оно

увеличивается от 2.1 у Fe до 2.5 у Hg и 2.6 у U

Агрегатное состояние элементов в обычн. условиях

Los Alamos National Laboratory Chemistry Division

Periodic Table of the Elements

1A H hydrogen 1.008	2A He helium 4.003																	3A B boron 10.81	4A C carbon 12.01	5A N nitrogen 14.01	6A O oxygen 16.00	7A F fluorine 19.00	8A Ne neon 20.18
Li lithium 6.941	Be beryllium 9.012																	Al aluminum 26.98	Si silicon 28.09	P phosphorus 30.97	S sulfur 32.07	Cl chlorine 35.45	Ar argon 39.95
Na sodium 22.99	Mg magnesium 24.31	3B Sc scandium 44.96	4B Ti titanium 47.88	5B V vanadium 50.94	6B Cr chromium 52.00	7B Mn manganese 54.94	8B Fe iron 55.85	Co cobalt 58.93	Ni nickel 58.69	11B Cu copper 63.55	12B Zn zinc 65.39	Ga gallium 69.72	Ge germanium 72.58	As arsenic 74.92	Se selenium 78.96	Br bromine 79.90	Kr krypton 83.80						
K potassium 39.10	Ca calcium 40.08	Y yttrium 88.91	Zr zirconium 91.22	Nb niobium 92.91	Mo molybdenum 95.94	Tc technetium (98)	Ru ruthenium 101.1	Rh rhodium 102.9	Pd palladium 106.4	Ag silver 107.9	Cd cadmium 112.4	In indium 114.8	Sn tin 118.7	Sb antimony 121.8	Te tellurium 127.6	I iodine 126.9	Xe xenon 131.3						
Rb rubidium 85.47	Sr strontium 87.62	La* lanthanum 138.9	Hf hafnium 178.5	Ta tantalum 180.9	W tungsten 183.9	Re rhenium 186.2	Os osmium 190.2	Ir iridium 192.2	Pt platinum 195.1	Au gold 197.0	Hg mercury 200.5	Tl thallium 204.4	Pb lead 207.2	Bi bismuth 208.9	Po polonium (209)	At astatine (210)	Rn radon (222)						
Cs cesium 132.9	Ba barium 137.3	Ac~ actinium (227)	Rf rutherfordium (261)	Db dubnium (262)	Sg seaborgium (263)	Bh bohrium (264)	Hs hassium (265)	Mt meitnerium (266)	Ds darmstadtium (271)	Uuu ununium (272)	Uub ununium (277)		Uuq ununium (296)		Uuh ununium (298)		Uuo ununium (?)						
Lanthanide Series*		Ce cerium 140.1	Pr praseodymium 140.9	Nd neodymium 144.2	Pm promethium (147)	Sm samarium (150.4)	Eu europium 152.0	Gd gadolinium 157.3	Tb terbium 158.9	Dy dysprosium 162.5	Ho holmium 164.9	Er erbium 167.3	Tm thulium 168.9	Yb ytterbium 173.0	Lu lutetium 175.0								
Actinide Series~		Th thorium 232.0	Pa protactinium (231)	U uranium (238)	Np neptunium (237)	Pu plutonium (242)	Am americium (243)	Cm curium (247)	Bk berkelium (247)	Cf californium (249)	Es einsteinium (254)	Fm fermium (253)	Md mendelevium (256)	No nobelium (254)	Lr lawrencium (257)								



element names in **blue** are liquids at room temperature
 element names in **red** are gases at room temperature
 element names in **black** are solids at room temperature

Химическая классификация элементов

ГРУППЫ (Groups): I, II, III, IV, V, VI, VII

Переходные металлы (Transition Metals): Elements from Scandium (Sc) to Cadmium (Cd) and from Rutherfordium (Rf) to Oganesson (Og).

1	2	ГРУППЫ																18
1	2																	2
1	2	II ← → III IV V VI VII																18
1	2																	2
2	2																	10
2	2																	10
3	2	Переходные металлы																18
3	2																	18
4	2																	18
4	2																	18
5	2																	18
5	2																	18
6	2																	18
6	2																	18
7	2																	18
7	2																	18

Лантаниды	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Актиниды	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Legend:

- Alkali Metal (Red)
- Alkali Earth (Blue)
- Metal (Yellow)
- Trans. Met. (Green)
- Noble Gas (Grey)
- Actinides (Dark Green)
- Lanthanides (Light Green)
- Non-metal (Pink)
- Halogen (Cyan)

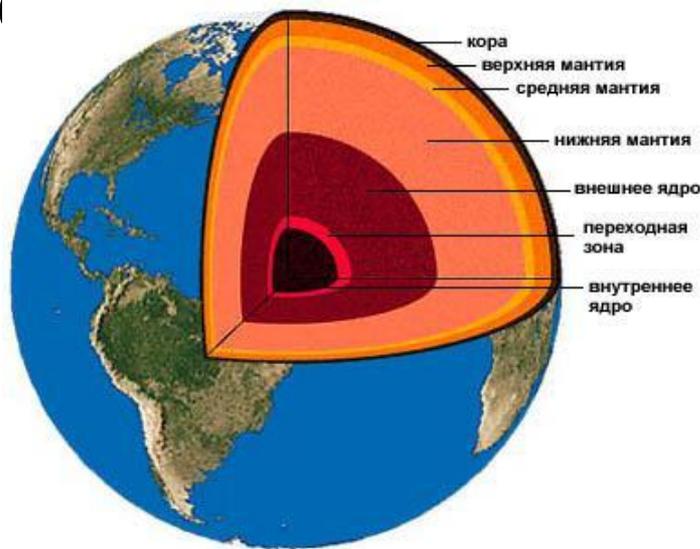
- Как писал В.И. Вернадский, “геохимические факты не были приняты во внимание при построении периодической системы химических элементов. Поэтому геохимическая классификация элементов не может быть заменена их химической классификацией”.
- Это, вероятно, связано с тем, что общие химические свойства элементов в значительной степени отличаются от их особенностей в природных физико-химических и, в частности рудообразующих системах.
- Близкие по химическим свойствам элементы нередко образуют обособленные концентрации (Na и K, I и Cl) и, наоборот, элементы, не имеющие черт сходства, в природных условиях, образуют совместные концентрации (Cu и Mo, Au и W)

В 1923 г. В.М. Гольдшмидт сформулировал основной закон геохимии:



Общая распространенность элемента зависит от свойств его атомного ядра, а характер распространения – от свойств наружной электронной оболочки его атома. Классификация элементов была предложена В. Гольдшмидтом исходя из предположения, что Земля образовалась в результате разделения первично однородного вещества, аналогичного метеоритам, на четыре части: **металл, серный расплав, силикатная часть и атмосфера с океаном.**

В.М. Гольдшмидт сравнил дифференциацию элементов в расплавленной планете с выплавкой металла из руд, когда на дно металлургической печи опускается **тяжелый металл** с плотностью около 7 (**аналог ядра**), а на поверхность всплывает легкий **силикатный шлак** (**аналог земной коры**). Между ними располагается слой «штейна» - сульфида Fe с примесью сульфидов других металлов (**аналог мантии**).



Геохимическая классификация В.М. Гольдшмидта

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			I	II	III	IV	V	VI	VII	()
1	H ¹																	He ²
2	Li ³	Be ⁴	B ⁵										C ⁶	N ⁷	O ⁸	F ⁹		Ne ¹⁰
3	Na ¹¹	Mg ¹²	Al ¹³										Si ¹⁴	P ¹⁵	S ¹⁶	Cl ¹⁷		Ar ¹⁸
4	K ¹⁹	Ca ²⁰	Sc ²¹	Ti ²²	V ²³	Cr ²⁴	Mn ²⁵	Fe ²⁶	Co ²⁷	Ni ²⁸	Cu ²⁹	Zn ³⁰	Ga ³¹	Ge ³²	As ³³	Se ³⁴	Br ³⁵	Kr ³⁶
5	Rb ³⁷	Sr ³⁸	Y ³⁹	Zr ⁴⁰	Nb ⁴¹	Mo ⁴²	Tc ⁴³	Ru ⁴⁴	Rh ⁴⁵	Pd ⁴⁶	Ag ⁴⁷	Cd ⁴⁸	In ⁴⁹	Sn ⁵⁰	Sb ⁵¹	Te ⁵²	I ⁵³	Xe ⁵⁴
6	Cs ⁵⁵	Ba ⁵⁶	TR ⁵⁷⁻⁷¹	Hf ⁷²	Ta ⁷³	W ⁷⁴	Re ⁷⁵	Os ⁷⁶	Ir ⁷⁷	Pt ⁷⁸	Au ⁷⁹	Hg ⁸⁰	Tl ⁸¹	Pb ⁸²	Bi ⁸³	Po ⁸⁴	At ⁸⁵	Rn ⁸⁶
7	Fr ⁸⁷	Ra ⁸⁸	Ac ⁸⁹	Th ⁹⁰	Pa ⁹¹	U ⁹²												



1 - атмофильные, 2 - литофильные,
3 - халькофильные, 4 - сидерофильные.

CHAPTER 7: TRACE ELEMENTS

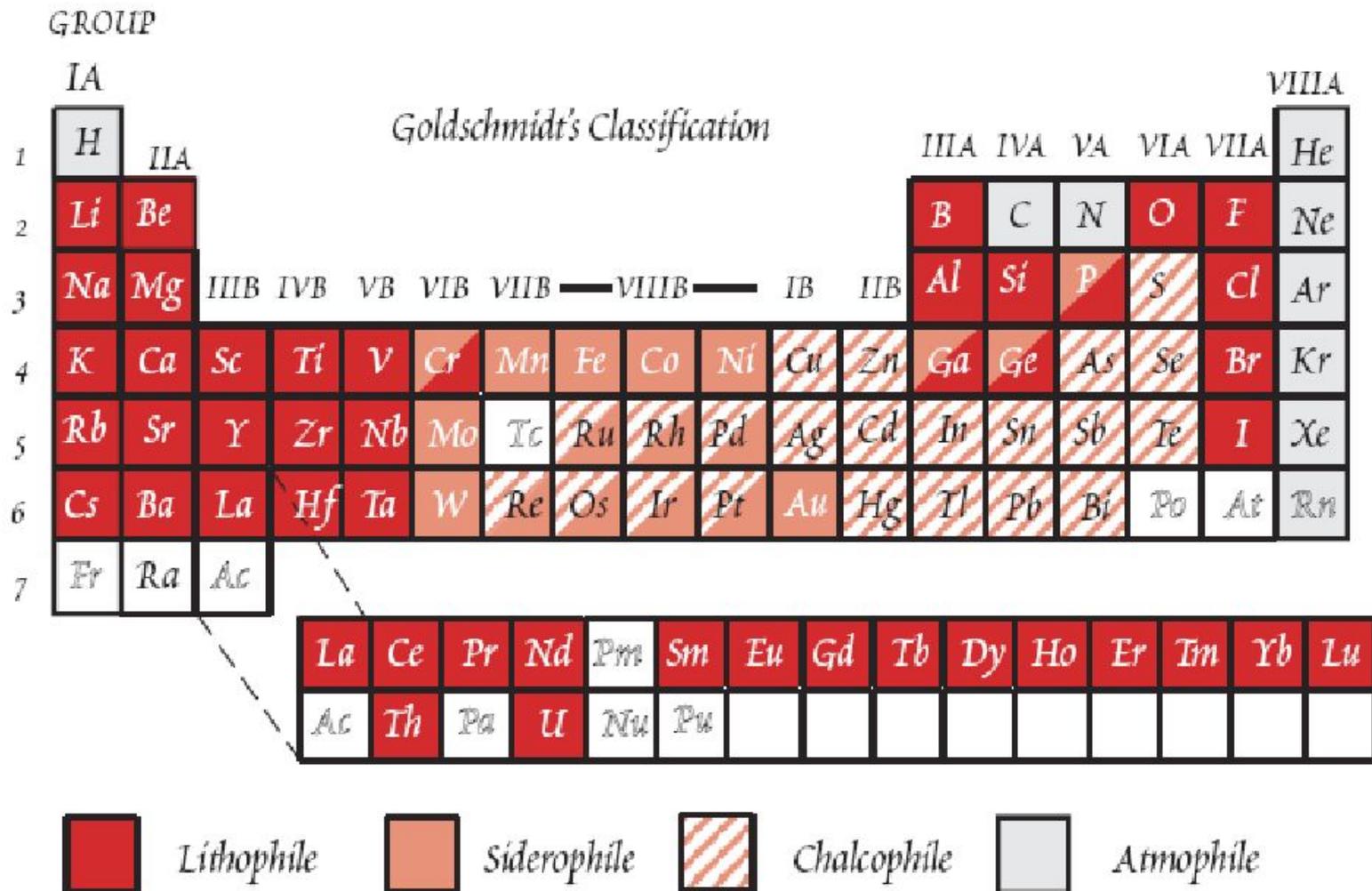
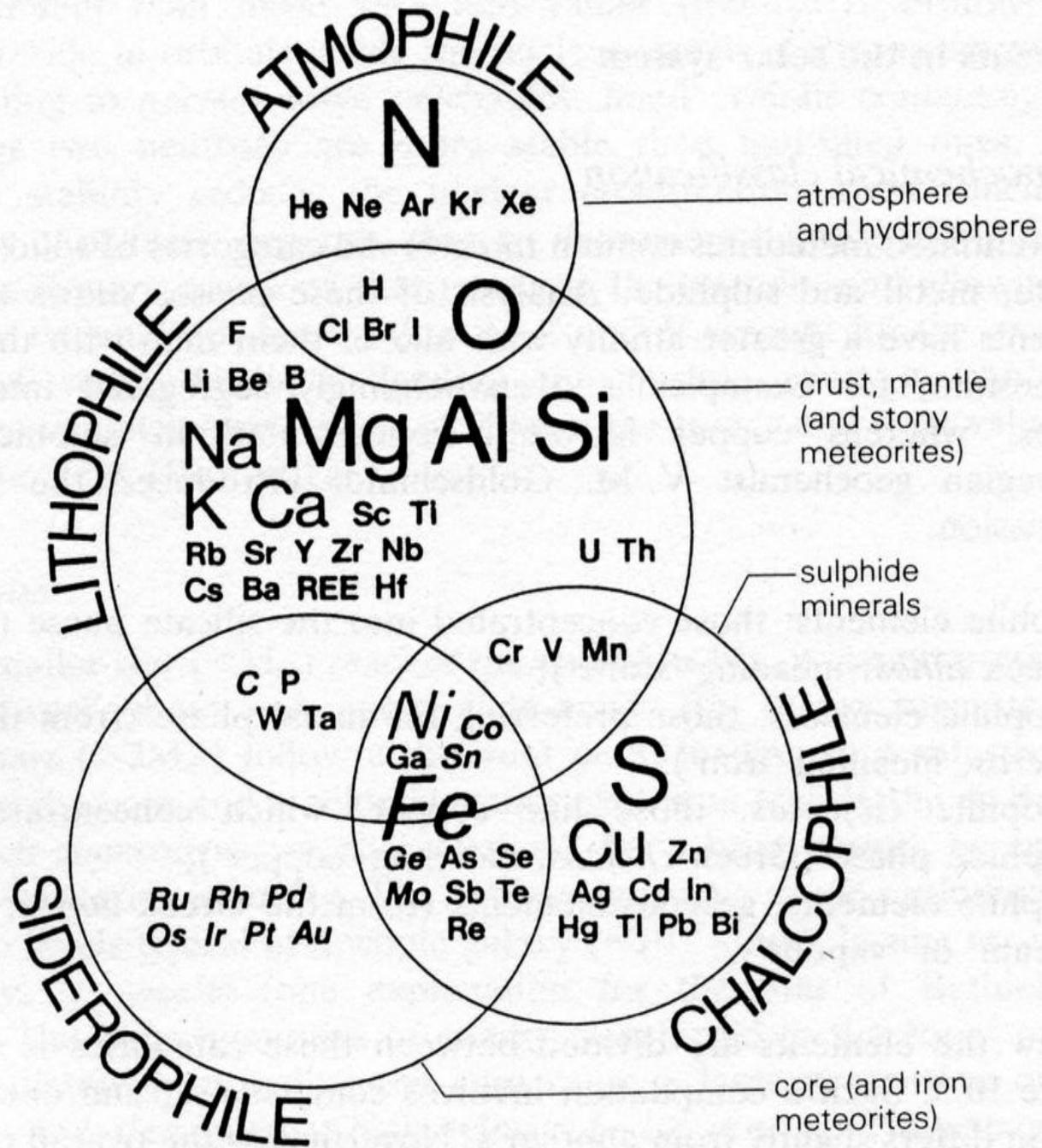


Figure 7.2. Goldschmidt's classification of the elements.

КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ГОЛЬДШМИДТУ

Сидерофильные	Халькофильные	Литофильные	Атмофильные
Co, Ni	Fe, (Co), (Ni)	Li, Na, K, Rb, Cs	H, N, O
Ru, Rh, Pd	(Ru), (Rh), (Pd)	Be, Mg, Ca, Sr, Ba	He, Ne, Ar,
Os, Ir, Pt	(Os), (Pt)	B, Al, Sc, Y, REE	Kr, Xe
Au, Re, Mo	Se, Te, (Mo)	Si, Ti, Zr, Hf,	
Ge, Sn, W	(Ge), (Sn), Pb	Th, U	
Cu, Ga	(Cu), Ag	P, V, Cr, Nb, Ta	
As, Sb	(As), (Sb), Bi	(H), (O), Cl, Br, I	
	Zn, Cd, Hg	(Fe), Mn, (Zn), (Ga)	
	(Ga), In, Tl		

Это классификация по наибольшему коэффициенту распределения элемента между четырьмя фазами.



Геохимическая классификация элементов.

По В. М. Гольдшмидту с дополнениями В. В. Щербины

Группы элементов	Строение иона	Расположение на кривой атомных объемов	Магнитные свойства	Специфическое химическое средство	Другие свойства
<i>Атмофильные</i> H, He, N, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn	В большинстве случаев находятся в виде неионизированных дискретных атомов и молекул	На участках максимальных значений	Большинство диамагнитны	Обычно встречаются в природе в виде простых тел (элементов)	Характерно газообразное состояние
<i>Литофильные</i> Li, Be, B, C, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, (S), Cl, K, Ca, Se, Ti, V, Cr, Mn, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, I, Cs, Ba, TR, Hf, Ta, W, Ra, U, Th	Построены по модели атома благородных газов, наружная оболочка из 8 электронов (2 и 6p)	На убывающих ветвях	Парамагнитны	Сродство к O, F, Cl	Плотность оксидов сравнительно невысокая
<i>Халькофильные</i> S, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Au, Hg, Ti, Pb, Bi, (PO?)	Построены по модели атома благородных газов, наружная оболочка из 18 электронов (2s, 6p и 10d) за исключением S, Se, Te, As, Sb	На возрастающих ветвях	Диамагнитны Диамагнетизм в пределах каждой группы периодической системы возрастает с порядковым номером	Сродство к S, Se, Te	Расплавленные сульфиды растворимы в расплаве FeS. Образуют комплексные сульфиды
<i>Сидерофильные</i> Fe, CO, Ni, MO, Tc, Ru, Rh, Os, Ir, Pt, P (?)	Ионы переходного типа с числом электронов в наружной оболочке от 8 до 18	На участках минимальных значений	Ферромагнитны и парамагнитны	Сродство к C, P, A, (Sb)	Большая плотность. Часто встречаются в самородном состоянии

Современная геохимическая классификация элементов

**Группы элементов, объединенные по
сходным свойствам или поведению в
геологических процессах.**

CHAPTER 7: TRACE ELEMENTS

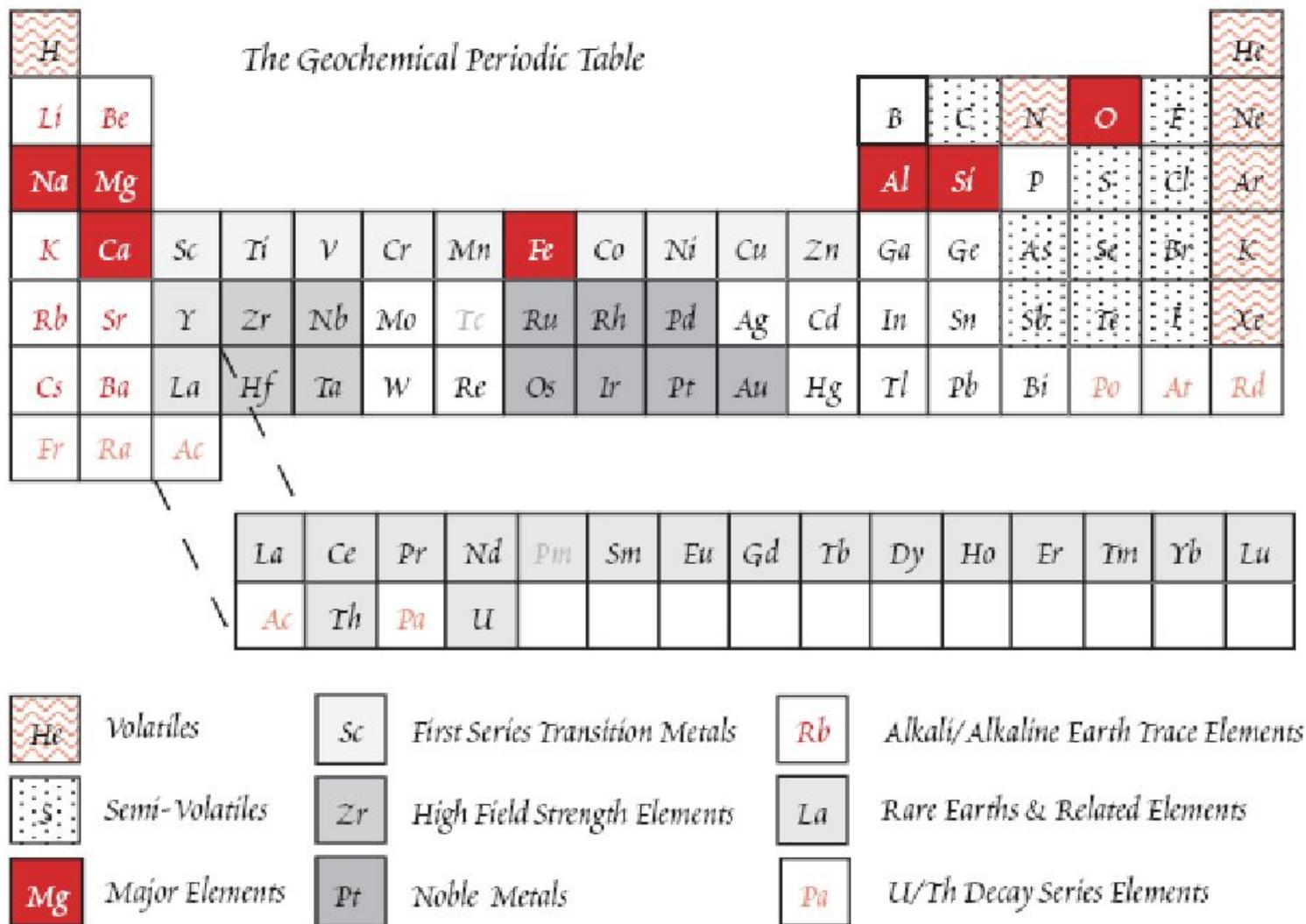


Figure 7.3. The Geochemical Periodic Table, in which elements are grouped according to their geochemical behavior.

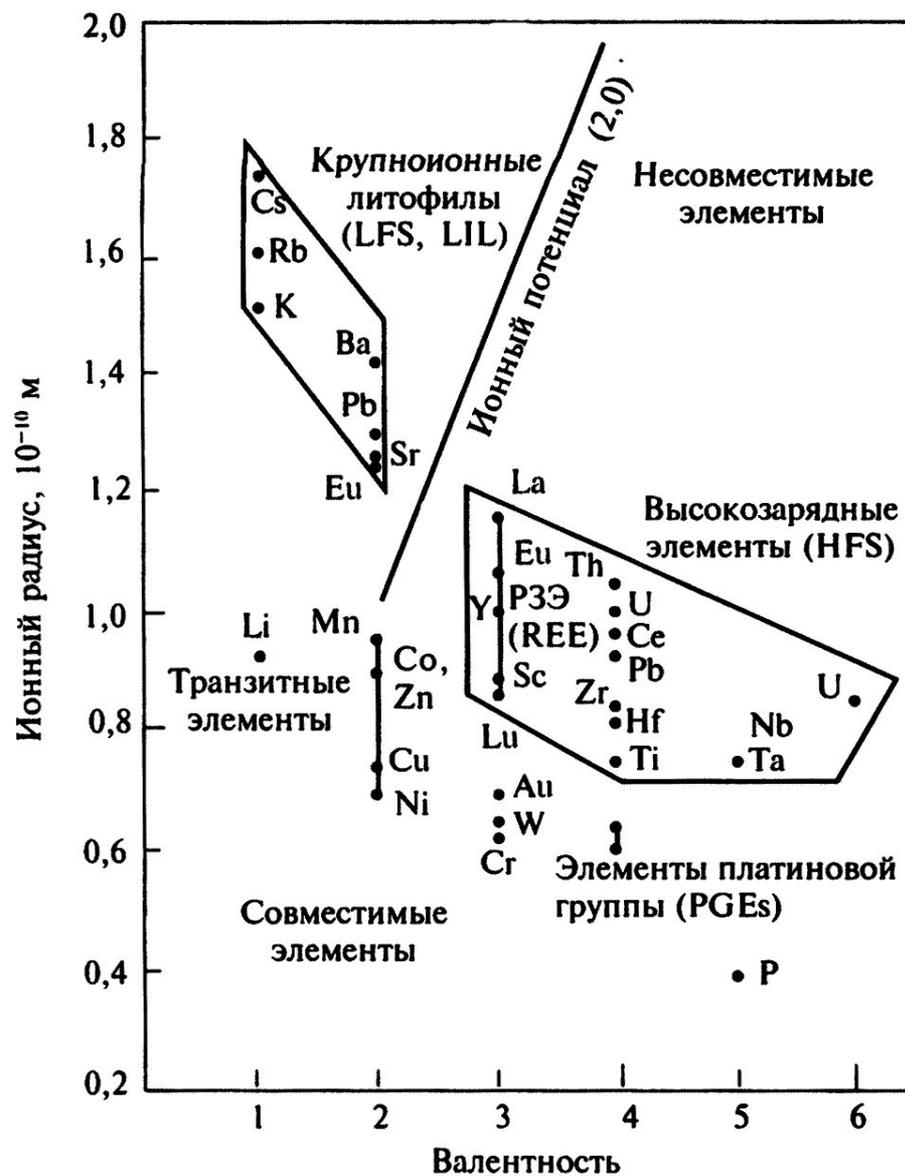
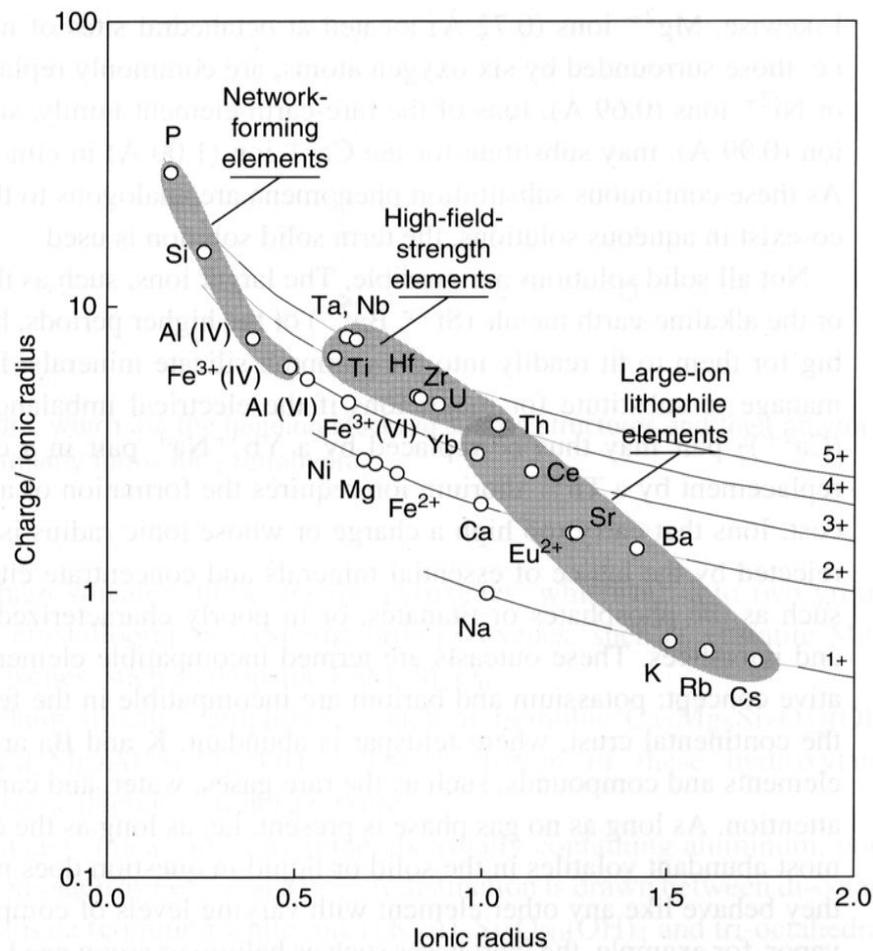


Рис. 1.2. Диаграмма ионный радиус — ионный заряд для элементов-примесей: ионный потенциал (отношение заряда к радиусу), равный 2, разделяет поля крупноионных литофилов и высокозарядных элементов



Несовместимые элементы – LILE и HFSE, с затруднением входят в состав минералов

$$K_D = a_{\min} / a_{\text{melt}} < 1$$

- Ионный потенциал – способность создавать электростатическое поле и притягивать общие электронные пары.
- Ионным радиусом называется миним. расстояние в ангстремах, на которое центр сферы данного иона (катиона) может приблизиться к поверхности сферы соседнего иона

LILE – крупноионные литофилы

- **Cs, Rb, K, Ba.** Также **Sr, Eu²⁺, (Pb²⁺)???**
- Ионный потенциал <2.0.
- Характеризуются большим ионным радиусом и низким зарядом (валентность 1, реже 2).
- Наибольшая подвижность в геологических процессах.

Щелочные и щелочноземельные элементы

- Li, Be, K, Rb, Sr, Cs, Ba.
- Низкая электроотрицательность (способность атома в молекуле притягивать к себе общие электронные пары) и валентность 1 или 2.
- Образуют ионные связи (кроме Be – ковалентные).
- Растворимы в водных растворах и подвижны в различных процессах.
- **Несовместимые** элементы.

HFSE – высокозарядные элементы

- Sc, Y, Th, U, Pb, Zr, Hf, Ti, Nb, Ta, REE.
- Ионный потенциал >2.0 .
- Ионный радиус не превышает ионный радиус Ca^{2+} .
- Наименее подвижные при наложенных геологических процессах.
- Распределение HFSE позволяет судить о природе различных магматических пород.

Переходные металлы (транзитные элементы)

- Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn.
- Формируют d-блок Периодической системы.
- Химически стабильны, характерна различная валентность.
- Более подвижны при различных процессах по сравнению с HFSE, т.к. образуют широкий спектр соединений.
- Ответственны за окраску и магнитные свойства минералов.

TRANSITION METALS

Group	Element	Symbol	Oxidation states															
Ia	potassium	K	0	1														
IIa	calcium	Ca	0		2													
TRANSITION METALS	IIIa	scandium	Sc	0			3											
	IVa	titanium	Ti	0		2	3	4										
	Va	vanadium	V	0		2	3	4	5*									
	Vla	chromium	Cr	0		2	3			6*								
	VIIa	manganese	Mn	0		2	3	4		6	7*							
	}	VII	iron	Fe	0		2	3	4		6							
			cobalt	Co	0		2	3	4									
			nickel	Ni	0		2	3	4									
	Ib	copper	Cu	0	1	2	3											
IIb	zinc	Zn	0		2													
IIIb	gallium	Ga	0			3												

Group
valence

oxidation state found in geological environments and meteorites

other oxidation states stable under laboratory conditions

*oxidising agents

Платиноиды (PGE, ЭПГ)

- Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt. Вместе с Au – группа благородных металлов.
- Халькофилы, стабильны в металлической форме.

Летучие элементы (volatile)

- H, N, инертные газы.
- Химически инертны, не входят в состав горных пород и минералов.
- Большой ионный радиус (кроме He). N в виде аммония NH_4^+ входит в минералы, замещая K.

Полулетучие элементы (semi-volatile)

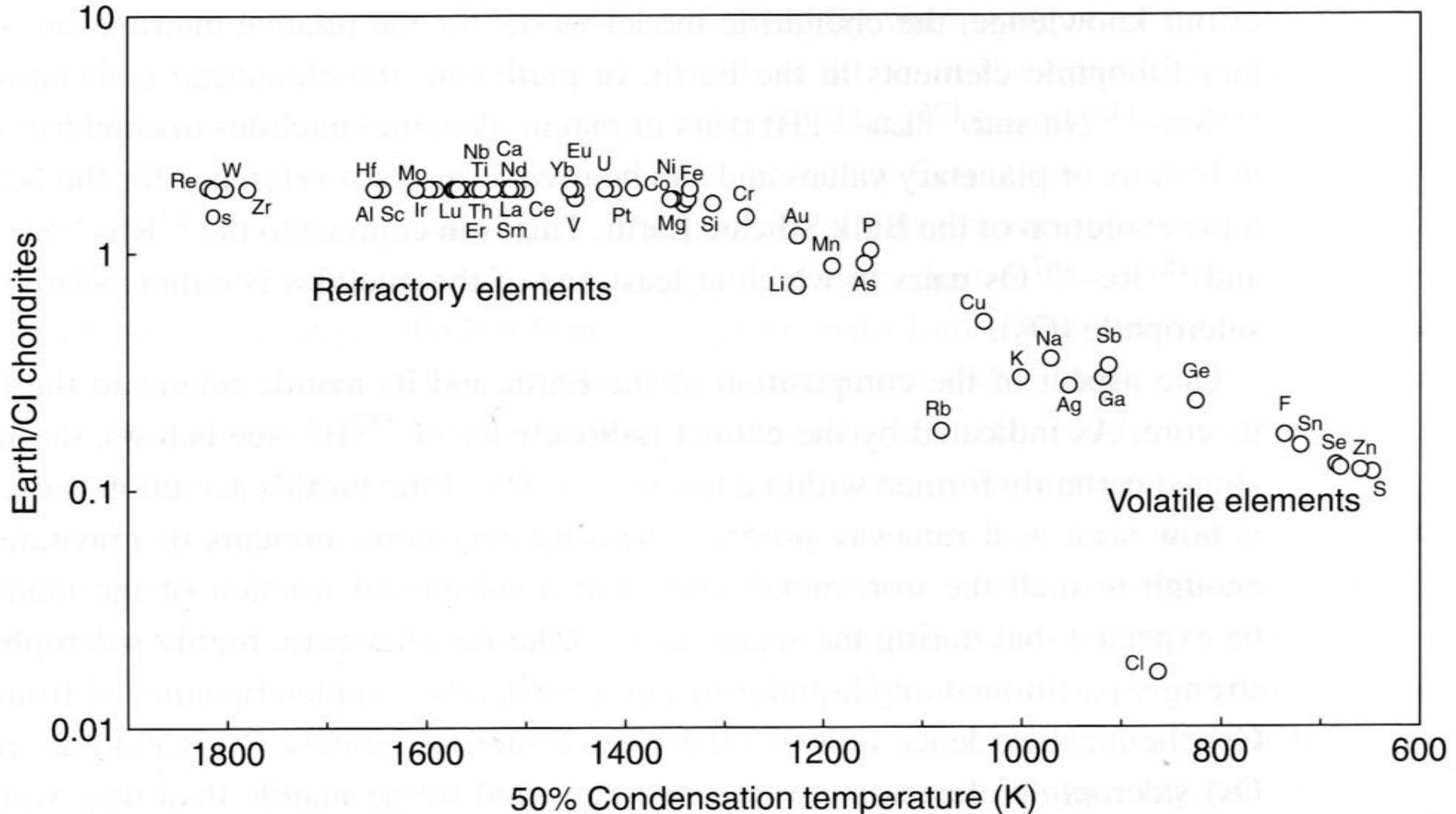
- Cl, Br, S, C и др. Сильно зависят от давления и фугитивности кислорода.

«Другие» элементы

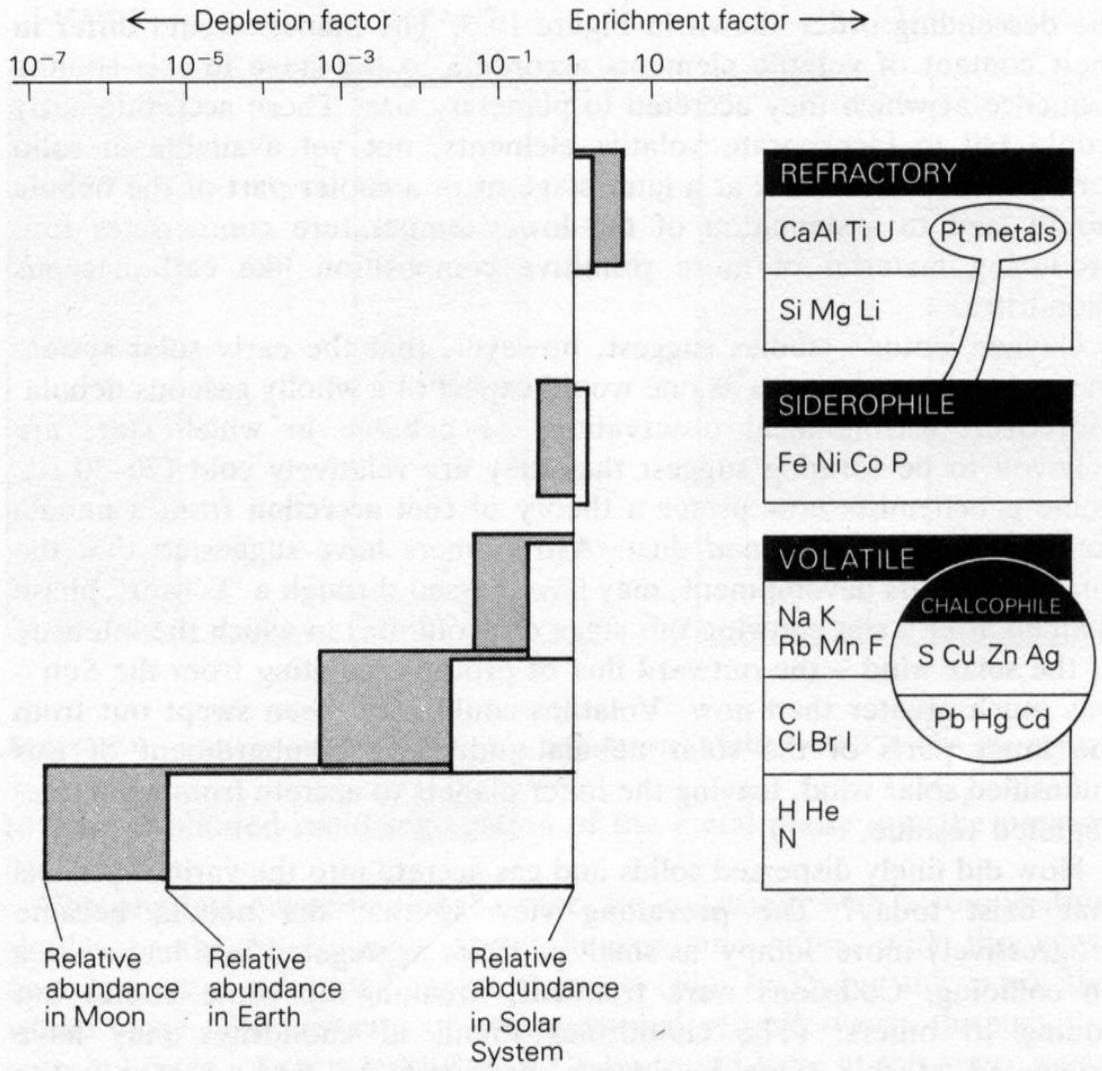
- В – главный элемент морской воды. Маркер зон субдукции.
- Re, Os. Близки по свойствам к платиноидам.
- Р часто выступает как главный элемент.
- Ga и Ge «подражают» Al и Si.

Космохимическая классификация

- Тугоплавкие (рефракторные) и летучие элементы – присутствуют в каждой группе.



- Рефракторные элементы – Re, W, Os, Zr
- Летучие – Sn, Zn, S, Se.
- Геохимически близкие элементы могут отличаться по степени летучести:
- Sb – As; Zr – Hf; Al – Ge.



- Земля обеднена летучими, по сравнению с Солнечной системой.

Классификация В.И. Вернадского

- Присутствие или отсутствие в истории элемента химических и радиохимических процессов
- Характер этих процессов – обратимость или необратимость
- Присутствие или отсутствие в истории элементов в земной коре их химических соединений или молекул, состоящих из нескольких атомов.

Геохимические группы элементов. По В. И. Вернадскому

Номер группы	Группа	Элементы	%	
I	Благородные газы	He, Ne, Ar, Rr, Xe	5	5,44
II	Благородные металлы	Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au	7	7,66
III	Циклические элементы	H, Be, B, C, N, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn(Ge), As, Se, Sr, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, Te, Ba, Hf, W, Re, Hg, Tl, Pb, Bi	44	47,82
IV	Рассеянные элементы	Li, Sc, Ga, Br, Rb, Y, Nb, In, I, Cs, Ta	11	11,95
V	Элементы сильно радиоактивные	Po, Rn, Ra, Ac, Th, Pa, U	7	7,61
VI	Элементы редких земель	La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	15	16,30

- Из анализа групп, в которых каждый элемент встречается всего один раз, видно, что они нередко выделены только по одному из признаков.
- В этой классификации особый интерес представляет группа циклических или органогенных элементов - наиболее распространенная как по количеству, так и по геохимической значимости.
- В понятие “циклические элементы” входило их активное участие в круговороте в связи с состоянием динамического равновесия элементов в биосфере.

Благородные газы		Металлоиды обычного поля																				
	He	H																				
	Ne	Li	Be	B	C	N	O	F														
	Ar	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl														
	Kr	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br				
	Xe	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I				
	Rn	Cs	Ba	TR	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At				
	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Нижнее кислое поле				Сульфидное поле											

Рис. 6. Классификация А. Е. Ферсмана

44

А.Е. Ферсман (1932 г.), используя развернутую форму системы Менделеева с нулевой группой посередине, выделяет 3 группы: элементы **верхнего обычного поля** до Ni - составляющих остов лито-, атмо- и гидросфер, элементы **нижнего левого поля** — сульфидов и **нижнего правого поля** кислотного, типа металлических кислот.

Геохимическая таблица элементов по Заварицкому

	H																				
He	Li	Be	B	C	N	O	F														
Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl														
Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br				
Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I				
Xe	Cs	Ba	TR	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At				
Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	TR	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

1. Инертные газы
2. Элементы горных пород
3. Элементы магматических эманаций
4. Элементы группы железа
5. Редкие элементы
6. Радиоактивные элементы
7. Элементы металлические рудные
8. Элементы метоллоидные, металлогенные
9. Элементы группы платины
10. Тяжелые галоиды

