Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVI, вып. 2, 1969 г.

ПРИНЦИПЫ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ

Е. М. Квятковский, Т. И. Нюппенен

По закону о всеобщем рассеянии химических элементов (закону Кларка-Вернадского) в каждой капле или пылинке вещества на нашей планете можно обнаружить все элементы таблицы Менделеева. Количественное же их соотношение в различных оболочках земного шара и более локальных геологических объектах обусловлено природой каждого элемента — его индивидуальными геохимическими чертами. Близостью геохимических (химических и физических) свойств обусловлено однотипное поведение элементов в геологических процессах и совместное накопление в определенных геологических образованиях или оболочках земного шара. Последнее обстоятельство позволяет подразделять химические элементы на ряд категорий по геохимическим признакам и в первую очередь — по их относительной распространенности в различных геологических объектах или оболочках земного шара.

Первую попытку подразделения химических элементов на характерные группы (классы) предпринял в 1920 г. Х. Вашингтон [Сауков, 1966], выделивший всего два класса: 1) элементы металлогенические, характерные для рудных месторождений; 2) элементы петрогенические, характерные для горных пород.

А. Е. Ферсман в тридцатых годах [Сауков, 1966] выделил четыре класса: 1) элементы сульфидных месторождений — Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Ag, Cd, In, Te, Hg, Tl, S, Sn, Re, Au, Pb, Bi; 2) элементы кислых магм — H, He, Li, Be, B, O, F, K, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Cs, TR, Hf, Ta, W, Po, Rn, Ra, Ac, Th, U, Al, Si, P, Ge, Sn, Re, Au, Pb, Bi; 3) элементы средних магм — C, Na, Cl, Ca, Br, Sr, J, Ba, Al, Si, P, S, Se; 4) элементы ультраосновных магм — Mg, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt. Эти классы представляют собой наиболее типичные элементы соответствующих геологических образований и занимают в периодической таблице Менделеева определенные локальные участки.

Относительная распространенность элементов в различных геологических образованиях определяется в первую очередь свойствами атомов этих элементов. Учитывая это, В. И. Вернадский [1960] положил в основу геохимической классификации различные свойства элементов и выделил шесть классов с однотипными свойствами: 1) инертные газы — 5 элементов; 2) благородные металлы — 7 элементов; 3) цикли-

ческие элементы (образующие соединения, которые состоят из нескольких атомов) — 44 элемента; 4) рассеянные элементы — 11 элементов; 5) сильно радиоактивные элементы — 7 элементов; 6) редкоземельные элементы — 15 элементов.

А. Н. Заварицкий [1944], основываясь на тех же принципах классификации, которыми руководствовались А. Е. Ферсман и В. И. Вернадский, разделил все поле периодической таблицы Менделеева на 10 блоков (классов), объединяющих геохимически близкие элементы: 1) инертные газы (от He до Rn); 2) элементы горных пород (Na, Mg, Al, Si, K и др.); 3) элементы магматических эманаций (B, F, P, Cl, S и др.); 4) элементы группы железа (Ti, V, Cr, Mn, Fe и др.); 5) редкие элементы (Sc, Y, Nb, Ta, редкие земли и др.); 6) радиоактивные элементы (Ra, Th, U и др.); 7) элементы металлические рудные (Cu, Zn, Sn, Hg, Ag и др.); 8) элементы металлоидные и металлогенные (As, Sb, Mo, W и др.); 9) элементы группы платины (Pt, Pd, Rh и др.); 10) тяжелые галоиды (Br, J).

В. М. Гольдшмидт [1923; 1954], основываясь на закономерностях количественного распределения элементов в метеоритах (состав которых отождествляется с составом внутренних оболочек Земли) и внешних оболочках земного шара, а также на характерных особенностях строения атомов и ионов, разделил элементы периодической таблицы на пять классов сразу по двум признакам: а) по относительной распространенности элементов в различных фазах метеоритов и геосферах земного шара; б) по строению электронных оболочек и величинам атомных объемов элементов.

В. М. Гольдшмидт выделил следующие классы элементов.

1. Сидерофильные элементы — наиболее характерные для железной фазы метеоритов (ядра Земли) и проявляющие химическое сродство с железом. Атомы обладают минимальными объемами, ионы — достраивающимися электронными оболочками.

2. Халькофильные элементы — наиболее характерные для сульфидной фазы метеоритов (промежуточной окисно-сульфидной оболочки Земли) и проявляющие химическое сродство с серой. Атомы обладают промежуточными объемами, ионы — 18-электронными оболочками.

3. Литофильные элементы — наиболее характерные для литосферы Земли. Атомы обладают также промежуточными объемами, ионы — 8-электронными оболочками.

4. Атмофильные элементы — наиболее характерные для атмосферы Земли. Атомы обладают максимальными объемами и, главным образом, 8-электронными оболочками.

5. Биофильные элементы — наиболее характерные для биосферы Земли.

Классификация Гольдшмидта оказалась наиболее популярной в прикладной геохимии. В последующие годы предлагались несколько видоизмененные варианты этой классификации [Rankama, Sahama, 1950; Szadeczky-Kardoss, 1952; Green, 1959; Shaw, 1960; Rosler, Lange, 1965]. Изменения внесены либо по линии более дробного подразделения классов, либо по уточнению роли элементов в каждом из классов. Так, например, Ссадецки-Кардош [Rösler, Lange, 1965] предложил подразделить класс халькофильных элементов Гольдшмидта на два подкласса — сульфохалькофильных и оксихалькофильных элементов, а класс литофильных элементов — на три подкласса собственно литофильных, пегматофильных и седиментофильных (табл. 1).

Таблица 1

Распределение элементов по классам и подклассам в классификации Ссадецки-Кардоша

Классы	Подклассы	Элементы
I. Сидерофильные	—	Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au
II. Халькофильные	1. Сульфохалькофильные	P (?), S, Cu, Zn (?), As, Se, Ag, Cd (?), Sb, Fe, Hg
	2. Оксихалькофильные	Ga, Ge, In, Sn, Tl, Pb, P (?), Zn (?), Cd (?)
III. Литофильные	1. Собственно литофильные	Li (?), Be (?), Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Rb, Sr, Cs, Ba
	2. Пегматофильные	Se, Ti, V, Mn, Y, Zr, Nb, Mo, TR, Hf (?), Ta, W, Th, U
	3. Седиментофильные	B, C, F, Cl, Br (?), J (?), N (?)
IV. Атмофильные	—	H (?), He, N (?), Ne, Ar, Kr, Xe, Rn

И. Грин [1959], В. Шоу [1960], Т. Реслер и Х. Ланге [1965] пользуются для выражения геохимического характера элемента буквенными символами (*S, s* — сидерофильные, *C, c* — халькофильные, *L, l* — литофильные, *A, a* — атмофильные, *B, b* — биофильные), а общий геохимический характер элементов, проявляющих принадлежность более, чем к одному классу, обозначают набором буквенных символов. Порядок расположения и величина буквенных символов в общей характеристике определяют предпочтительную распространенность элемента в первых классах и весьма подчиненную его роль в следующих. Например, для железа Т. Реслер и Х. Ланге условно дают шифр *SClb*, что свидетельствует о его ярко выраженной сидерофильности, менее характерной халькофильности, относительно слабо проявляющейся литофильности и слабой биофильности. Полученные таким образом различными авторами геохимические характеристики элементов приведены в табл. 2.

Из всех рассмотренных выше классификаций геохимическая характеристика элементов наилучшим образом отображается в классификациях В. Гольдшмидта и его последователей. Однако как классификация В. Гольдшмидта, так и видоизмененные ее варианты имеют существенные недостатки.

1. Не выдержан до конца основной принцип классификации — распространенность элементов в различных оболочках земного шара. Ни в одной из классификаций не выделен класс гидрофильных элементов, характерных для водной оболочки земного шара (гидросферы), покрывающей свыше 70% земной поверхности и занимающей второе место по массе среди четырех внешних оболочек — литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы.

2. Выделение классов сидерофильных и халькофильных элементов по признаку химического сродства, соответственно, с железом и серой несколько не вяжется с принципом выделения остальных классов

102592

ЛГИ Библиотека

Таблица 2

Сравнение геохимических характеристик элементов

Номер элемента	Символ	По Гольдшмидту* 1954	По Грину 1959	По Шоу 1960	По Реслеру, Ланге 1965	Номер элемента	Символ	По Гольдшмидту* 1954	По Грину 1959	По Шоу 1960	По Реслеру, Ланге 1965
1	H	*ABl*	*Bl*	*BAl*	*ABl*	47	Ag	*C*	*C*	*C (b)*	*C*
2	He	*A*	*A*	*A (b)*	*A*	48	Cd	*Cl*	*C*	*Cl (b)*	*Cl*
3	Li	*L*	*L*	*L (b)*	*L*	49	In	*Cl*	*C*	*Cl*	*Cl*
4	Be	*L*	*L*	*L (b)*	*L*	50	Sn	*Scl*	*S*	*Scl (b)*	*Scl*
5	B	*Lb*	*Bl*	*Lb*	*Lb*	51	Sb	*C*	*C*	*C (l)*	*C*
6	C	*SABl*	*Bl*	*BASl*	*SABl*	52	Te	*C*	*C*	*Cs*	*C (s)*
7	N	*AB*	*A*	*BA*	*AB*	53	J	*LAb*	*Bl*	*LAB*	*L (A)*
8	O	*LAB*	*Bl*	*BAL*	*LAB*	54	Xe	*A*	*A*	*A*	—
9	F	*Lb*	*Bl*	*Lb*	*L*	55	Cs	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
10	Ne	*A*	*A*	*A*	*A*	56	Ba	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
11	Na	*Lb*	*Bl*	*LB*	*Lb*	57	La	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
12	Mg	*Lb*	*Bl*	*LB*	*Lb*	58	Ce	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
13	Al	*L*	*L*	*Lb*	*L*	59	Pr	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
14	Si	*Lb*	*Bl*	*Lb*	*Lb*	60	Nd	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
15	P	*SBl*	*S*	*SBlc*	*SLB*	61	Pm	*L*	*L*	—	*L*
16	S	*CB*	*C*	*CBl*	*CBl*	62	Sm	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
17	Cl	*L*	*Bl*	*LAB*	*L (A)*	63	Eu	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
18	Ar	*A*	*A*	*A (b)*	*A*	64	Gd	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
19	K	*Lb*	*Bl*	*LB*	*Lb*	65	Tb	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
20	Ca	*Lb*	*Bl*	*LBc*	*Lb*	66	Dy	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
21	Sc	*L*	*L*	*L (b)*	*L*	67	Ho	*L*	*L*	*L*	*L*
22	Ti	*L*	*L*	*Lcb*	*L*	68	Er	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
23	V	*L*	*Bl*	*Lcb*	*Ls (cb)*	69	Tu	*L*	*L*	*L*	*L*
24	Cr	*L*	*S*	*Lcb*	*Lc*	70	Yb	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
25	Mn	*Lb*	*Bl*	*LBc*	*Lcb*	71	Lu	*L*	*L*	*L*	*L*
26	Fe	*SClb*	*S*	*SCbl*	*SClb*	72	Hf	*L*	*L*	*L*	*L*
27	Co	*Scl*	*S*	*SCbl*	*S (c) l*	73	Ta	*L*	*L*	*L (s)*	*L (s)*
28	Ni	*Scl*	*S*	*SClb*	*S (c) l*	74	W	*Ls*	*L*	*Ls (b)*	*Ls*
29	Cu	*Cb*	*C*	*Cb*	*Csb*	75	Re	*S*	*S*	*S*	*S*
30	Zn	*Cb*	*C*	*Cbl*	*Cl*	76	Os	*S*	*S*	*Sc*	*Sc*
31	Ga	*Lc*	*C*	*Clb*	*Cl*	77	Ir	*S*	*S*	*Sc*	*S*
32	Ge	*Scl*	*S*	*Scl (b)*	*Scl*	78	Pt	*Sc*	*S*	*Sc*	*Sc*
33	As	*Cls*	*C*	*Cslb*	*Csl*	79	Au	*S*	*S*	*Sc (b)*	*Sc*
34	Se	*C*	*C*	*Cs (b)*	*C (s)*	80	Hg	*Ca*	*C*	*C (b)*	*Ca*
35	Br	*L*	*L*	*LAl*	*LA*	81	Tl	*Cl*	*C*	*Cl (b)*	*Cl*
36	Kr	*A*	*A*	*A*	*A*	82	Pb	*Csl*	*C*	*Csl (b)*	*Csl*
37	Rb	*L*	*L*	*Lb*	*L*	83	Bi	*C*	*C*	*C (l)*	*C*
38	Sr	*L*	*L*	*Lb*	*L*	84	Po	—	*L*	—	—
39	Y	*L*	*L*	*L (b)*	*L*	85	At	—	*L*	—	—
40	Zr	*L*	*L*	*L*	*L*	86	Rn	*A*	*A*	*A*	—
41	Nb	*L*	*L*	*LS (b)*	*L (s)*	87	Fr	—	*L*	—	—
42	Mo	*Sc*	*S*	*Sbc*	*Sc*	88	Ra	*L*	*L*	*L (b)*	*L*
43	Tc	—	*S*	—	—	89	Ac	*L*	*L*	—	—
44	Ru	*Sc*	*S*	*Sc*	*S*	90	Th	*L*	*L*	*L*	*L*
45	Rh	*S*	*S*	*Sc*	*Sc*	91	Pa	*L*	*L*	—	—
46	Pd	*Sc*	*S*	*Sc*	*Sc*	92	U	*L*	*L*	*L (b)*	*L*

* По данным, заимствованным у Т. Реслера и Х. Ланге [1965].

(литофильных, атмофильных и биофильных) элементов по признаку относительной распространенности в оболочках Земли.

3. Нет четкого количественного критерия отнесения элементов к соответствующему классу по принципу относительной распространенности в этих классах.

С учетом изложенного, классифицировать химические элементы целесообразно по следующей схеме.

1. В основу классификации рационально положить принцип относительной распространенности элементов в метеоритах и четырех внешних оболочках Земли, т. е. все элементы периодической таблицы подразделить на 5 классов: метеофильные, литофильные, гидрофильные, атмофильные, биофильные.

Выделение самостоятельного класса метеофильных элементов основано на признании достаточно реальной гипотезы о том, что состав метеоритов отражает состав ядра (внутренних оболочек) Земли.

2. Для метеофильных элементов сохранить подразделение на два подкласса — сидерофильных и халькофильных. В основу подразделения на подклассы следует положить признак относительной распространенности элементов в железной и сульфидной фазах метеоритов.

3. Класс литофильных подразделить на подклассы сульфофильных и оксифильных элементов по их сродству, соответственно с серой или кислородом. В первом случае сродство проявляется в формировании соединений с ковалентной и металлической связью [Rankama, Sahama, 1950] и формировании главных минералов в форме сульфидов, сульфосолей и самородных элементов. Во втором — образуются соединения с ионной связью и формируются окислы и кислородные соли.

4. Геохимический характер элемента обозначать буквенными символами: 10 наиболее важных элементов каждого класса — заглавными (*M, L, H, A* или *B*), остальные — строчными (*m, l, h, a, b*). Принадлежность элементов к одному из выделенных подклассов указывать подиндексом: метеосидерофильные M_S или m_S; метеохалькофильные M_C или m_C; литосульфофильные L_C или l_C; литооксифильные L_O или l_O.

5. Относить элемент к выделенному классу следует на количественной основе. За основу целесообразно принять кларки элементов (в весовых процентах), расположенные в порядке их убывания (табл. 3). Относительная распространенность элемента в каждом из выделенных классов в этом случае определяется его порядковым номером в ряду убывания кларков.

Общая геохимическая характеристика каждого элемента по принятой схеме классификации будет выражаться шифром из пяти букв, последовательность расположения которых определяется относительной распространенностью элемента в каждом из выделенных классов, а подиндекс указывает на его геохимическую природу и место в ряду убывания кларков. Так, например, шифр углерода $B_3A_5H_{10}m_{S17}l_{017}$ определяется порядковыми номерами кларков углерода в таблицах относительной распространенности (биосфере — 3, атмосфере — 5, гидросфере — 10, метеоритах — 17, литосфере — 17), сидерофильной природой углерода в метеоритах (*s*) и оксифильной (*o*) — в литосфере.

Руководствуясь рассмотренными принципами классификации химических элементов, получим таблицу геохимических характеристик (табл. 4).

Таблица 3

Относительная распространенность элементов в метеоритах и внешних оболочках земного шара

№ п/п	Метеориты в целом [Heide, 1957]		№ п/п	Литосфера [Виноградов, 1962]		№ п/п	Гидросфера [Mason, 1956]		№ п/п	Биосфера [Вернадский, 1960]		№ п/п	Атмосфера [Urey, 1959]	
	символ	$\overline{C}$, %		символ	$\overline{C}$, %		символ	$\overline{C}$, %		символ	$\overline{C}$, %		символ	$\overline{C}$, %
1	O	31,55	1	O	47,0	1	O	85,89	1	O	$>10^1$	1	N	75,53
2	Fe	30,70	2	Si	29,5	2	H	10,80	2	H	$>10^1$	2	O	23,33
3	Si	15,82	3	Al	8,05	3	Cl	1,90	3	C	10^0	3	Ar	1,28
4	Mg	12,17	4	Fe	4,65	4	Na	1,06	4	P	10^{-1}	4	H	$2{,}0 \cdot 10^{-2}$
5	S	2,67	5	Ca	2,96	5	Mg	$1{,}3 \cdot 10^{-1}$	5	Si	10^{-1}	5	C	1,3
6	Ca	1,52	6	K	2,50	6	S	$8{,}8 \cdot 10^{-2}$	6	K	10^{-1}	6	Ne	$1{,}3 \cdot 10^{-3}$
7	Ni	1,44	7	Na	2,50	7	Ca	4,0	7	Ca	10^{-1}	7	Kr	$4{,}5 \cdot 10^{-4}$
8	Al	1,34	8	Mg	1,87	8	K	3,8	8	N	10^{-1}	8	He	$7{,}2 \cdot 10^{-5}$
9	Na	$5{,}99 \cdot 10^{-1}$	9	Ti	$4{,}5 \cdot 10^{-1}$	9	Br	6,5	9	S	10^{-2}	9	Xe	$4{,}0 \cdot 10^{-5}$
10	Cr	2,79	10	H	$1{,}5 \cdot 10^{-1}$	10	C	3,0	10	Mg	10^{-2}	10	Rn	10^{-17}
11	Mn	2,36	11	Mn	$1{,}0 \cdot 10^{-1}$	11	Sr	1,3	11	Fe	10^{-2}			
12	K	1,53	12	P	$9{,}3 \cdot 10^{-2}$	12	B	$4{,}6 \cdot 10^{-4}$	12	Na	10^{-2}			
13	Ti	1,4	13	F	6,6	13	Si	3,6	13	Cl	10^{-2}			
14	Co	1,13	14	Ba	6,5	14	F	1,4	14	Al	10^{-2}			
15	P	1,05	15	S	4,7	15	Al	1,0	15	Mn	10^{-3}			
16	Cl	$6{,}9 \cdot 10^{-2}$	16	Sr	3,4	16	N	$5{,}2 \cdot 10^{-5}$	16	B	10^{-3}			
17	C	4,9	17	C	2,3	17	Rb	2,0	17	Cr	10^{-3}			
18	H	4,8	18	Zr	1,7	18	Li	1,0	18	Cu	10^{-4}			
19	As	1,5	19	Cl	1,7	19	P	$6{,}0 \cdot 10^{-6}$	19	Ti	10^{-4}			
20	Zn	1,4	20	Rb	1,5	20	Ba	5,0	20	Zn	10^{-4}			
21	Cu	$8{,}7 \cdot 10^{-3}$	21	V	$9 \cdot 10^{-3}$	21	Y	5,0	21	Li	10^{-4}			
22	Ge	8,3	22	Cr	8,8	22	Cu	4,5	22	Ba	10^{-4}			
23	Zr	7,8	23	Zn	8,3	23	As	1,4	23	Br	10^{-4}			
24	V	3,9	24	Ce	7,1	24	Fe	1,1	24	Ag	10^{-5}			

25	F	3,1	25	Ni	5,8	25	Zn	1,0	25	F	10^{-5}
26	Sn	2,0	26	Cu	4,7	26	Mn	$5,5 \cdot 10^{-7}$	26	Rb	10^{-5}
27	Sr	2,0	27	Nd	3,7	27	Pb	4,5	27	Sn	10^{-5}
28	Br	1,9	28	Li	3,2	28	Se	4,0	28	Ni	10^{-5}
29	Se	1,8	29	Y	2,9	29	Sn	3,0	29	As	10^{-5}
30	W	1,5	30	La	2,9	30	Cs	2,0	30	Mo	10^{-5}
31	Pb	1,2	31	Nb	2,0	31	Mo	1,2	31	Co	10^{-5}
32	Ba	$6,2 \cdot 10^{-4}$	32	Ga	1,9	32	U	9,0	32	J	10^{-5}
33	Ga	6,0	33	N	1,9	33	Ga	5,0	33	Ge	10^{-5}
34	Y	5,4	34	Co	1,8	34	Th	5,0	34	Pb	10^{-6}
35	Mo	5,3	35	Pb	1,6	35	Ce	4,0	35	Hg	10^{-8}
36	Cd	4,8	36	Th	1,3	36	Ni	3,0	36	Au	10^{-10}
37	Sc	3,8	37	B	1,2	37	V	3,0	37	Ra	10^{-12}
38	Rb	3,5	38	Sc	1,0	38	La	3,0			
39	Pt	3,3	39	Pr	$9,0 \cdot 10^{-4}$	39	J	3,0			
40	Nd	2,9	40	Sm	8,0	40	Hg	3,0			
41	Li	2,3	41	Gd	8,0	41	Ag	2,5			
42	B	2,3	42	Dy	5,0	42	Bi	2,0			
43	Rn	2,2	43	Tb	4,3	43	Co	1,0			
44	Ag	2,0	44	Be	3,8	44	Sc	$4,0 \cdot 10^{-9}$			
45	Dy	1,9	45	Cs	3,7	45	Au	$6,0 \cdot 10^{-10}$			
46	Os	1,9	46	Er	3,3	46	Ra	$1,6 \cdot 10^{-15}$			
47	Ce	1,9	47	Sn	2,8	47	Ti	Присутств.			
48	La	1,7	48	Ta	2,8	48	Cd	То же			
49	Er	1,6	49	U	2,5						
50	Th	1,5	50	Br	2,1						
51	Yb	1,5	51	As	1,7						
52	Pd	1,5	52	Ho	1,7						
53	Gd	1,5	53	Ge	1,4						
54	J	1,1	54	W	1,3						
55	Sm	1,0	55	Eu	1,3						
56	Sb	$9,8 \cdot 10^{-5}$	56	Mo	1,1						
57	Be	8,0	57	Hf	1,0						

Продолжение табл. 3

№ п/п	Метеориты в целом [Heide, 1957]		№ п/п	Литосфера [Виноградов, 1962]		№ п/п	Гидросфера [Mason, 1956]		№ п/п	Биосфера [Вернадский, 1960]		№ п/п	Атмосфера [Urey, 1959]	
	символ	$\overline{C}$, %		символ	$\overline{C}$, %		символ	$\overline{C}$, %		символ	$\overline{C}$, %		символ	$\overline{C}$, %
58	Hf	8,0	58	Tl	1,0									
59	Pr	8,0	59	Lu	$8{,}0 \cdot 10^{-5}$									
60	Rh	8,0	60	Sb	5,0									
61	N	7,0	61	J	4,0									
62	Au	6,5	62	Yb	3,3									
63	Ir	6,5	63	Tu	2,7									
64	Ho	5,5	64	In	2,5									
65	Tb	5,0	65	Cd	1,3									
66	Ln	5,0	66	Hg	$8{,}3 \cdot 10^{-6}$									
67	Nb	4,0	67	Ag	7,0									
68	U	3,1	68	Se	5,0									
69	Tu	3,0	69	Os	5,0									
70	Ta	3,0	70	Pd	1,3									
71	Bi	2,5	71	Bi	$9{,}0 \cdot 10^{-7}$									
72	Eu	2,5	72	Ru	5,0									
73	Tl	1,5	73	Pt	5,0									
74	Te	1,0	74	Au	4,3									
75	In	1,0	75	Te	1,0									
76	Cs	$8{,}0 \cdot 10^{-6}$	76	Rh	1,0									
77	Hg	2,0	77	Ir	1,0									
78	Re	$7{,}5 \cdot 10^{-7}$	78	Re	$7{,}0 \cdot 10^{-8}$									
			79	Ac	$6{,}0 \cdot 10^{-10}$									
			80	Ra	1,0									
			81	Pa	1,0									
			82	Po	$1{,}0 \cdot 10^{-14}$									

Таблица 4

Геохимические характеристики элементов

Номер элемента	Символ	Общая геохимическая характеристика	Номер элемента	Символ	Общая геохимическая характеристика	Номер элемента	Символ	Общая геохимическая характеристика
1	H	$H_2B_2A_4L_{O\ 10}m_{18}$	32	Ge	$m_{S\ 22}b_{33}l_{C\ 53}$	63	Eu	$l_{O\ 55}m_{72}$
2	He	A_8	33	As	$m_{C\ 19}h_{23}l_{29}l_{C\ 51}$	64	Gd	$l_{O\ 41}m_{53}$
3	Li	$h_{18}b_{21}l_{O\ 28}m_{41}$	34	Se	$h_{28}m_{C\ 29}l_{C\ 68}$	65	Tb	$l_{O\ 43}m_{65}$
4	Be	$l_{O\ 41}m_{51}$	35	Br	$H_9b_{23}m_{C\ 28}l_{50}$	66	Dy	$l_{O\ 42}m_{45}$
5	B	$h_{12}b_{16}l_{O\ 37}m_{42}$	36	Kr	A_7	67	Ho	$l_{O\ 52}m_{64}$
6	C	$B_3A_5H_{10}m_{S\ 17}l_{O\ 17}$	37	Rb	$h_{17}l_{O\ 20}b_{26}m_{38}$	68	Er	$l_{O\ 46}m_{49}$
7	N	$A_7B_8h_{16}l_{O\ 33}m_{61}$	38	Sr	$h_{11}l_{O\ 16}b_{17}m_{27}$	69	Tu	$l_{O\ 63}m_{69}$
8	O	$H_1B_1L_1M_1A_2$	39	Y	$h_{21}l_{O\ 29}m_{34}$	70	Yb	$m_{51}l_{O\ 62}$
9	F	$l_{O\ 13}h_{14}m_{25}b_{25}$	40	Zr	$l_{O\ 18}m_{S\ 23}$	71	Lu	$l_{O\ 59}m_{66}$
10	Ne	A_6	41	Nb	$l_{O\ 31}m_{S\ 67}$	72	Hf	$l_{O\ 57}m_{58}$
11	Na	$H_4L_{07}M_9b_{12}$	42	Mo	$b_{30}h_{31}m_{C\ 35}l_{C\ 56}$	73	Ta	$l_{O\ 48}m_{70}$
12	Mg	$M_{S\ 4}H_5L_{O\ 8}B_{10}$	43	Tc	—	74	W	$m_{S\ 30}l_{S\ 54}$
13	Al	$L_{O\ 3}M_{S\ 8}b_{14}h_{15}$	44	Ru	$m_{C\ 43}l_{C\ 72}$	75	Re	$m_{C\ 78}l_{C\ 78}$
14	Si	$L_{O\ 2}M_{S\ 3}B_5h$	45	Rh	$m_{S\ 60}l_{C\ 76}$	76	Os	$m_{C\ 46}l_{C\ 69}$
15	P	$B_4l_{O\ 12}m_{S\ 15}h_{15}$	46	Pd	$m_{C\ 52}l_{C\ 70}$	77	Ir	$m_{C\ 63}l_{C\ 77}$
16	S	$M_{C\ 5}H_6B_9l_C\ 15$	47	Ag	$b_{24}h_{41}m_{C\ 44}l_{C\ 67}$	78	Pt	$m_{S\ 39}l_{S\ 73}$
17	Cl	$H_3B_{13}m_{16}l_{19}$	48	Cd	$m_{C\ 36}h_{48}l_{C\ 65}$	79	Au	$b_{36}h_{45}m_{C\ 62}l_{C\ 74}$
18	Ar	A_3	49	In	$l_{C\ 64}m_{C\ 75}$	80	Hg	$b_{35}h_{40}l_{C\ 66}m_{C\ 77}$
19	K	$L_{O\ 6}B_6H_8m_{12}$	50	Sn	$b_{27}h_{29}l_{O\ 47}m_{S\ 75}$	81	Tl	$l_{C\ 58}m_{C\ 73}$
20	Ca	$L_{O\ 5}M_{S\ 6}B_7H_7$	51	Sb	$m_{C\ 56}l_{C\ 60}$	82	Pb	$h_{27}m_{C\ 31}b_{34}h_{C\ 35}$
21	Sc	$m_{37}l_{O\ 38}h_{44}$	52	Te	$m_{C\ 74}l_{C\ 75}$	83	Bi	$h_{42}m_{C\ 71}l_{C\ 71}$
22	Ti	$L_{O\ 9}m_{S\ 13}b_{19}h_{47}$	53	J	$b_{32}h_{39}m_{S\ 54}l_{61}$	84	Po	l_{82}
23	V	$l_{O\ 21}m_{S\ 24}h_{37}$	54	Xe	A_9	85	At	—
24	Cr	$M_{C\ 10}l_{O\ 22}$	55	Cs	$h_{30}l_{O\ 45}m_{74}$	86	Rn	A_{10}
25	Mn	$m_{C\ 11}l_{O\ 11}b_{15}h_{26}$	56	Ba	$l_{O\ 14}h_{20}b_{22}m_{32}$	87	Fr	—
26	Fl	$M_{S\ 2}l_{O\ 4}b_{11}h_{24}$	57	La	$l_{O\ 30}h_{38}m_{48}$	88	Ra	$b_{37}h_{36}l_{80}$
27	Co	$m_{S\ 14}b_{31}l_{O\ 34}h_{43}$	58	Ce	$l_{O\ 24}h_{35}m_{47}$	89	Ac	l_{79}
28	Ni	$M_{S\ 7}l_{C\ 25}b_{28}h_{36}$	59	Pr	$l_{O\ 39}m_{59}$	90	Th	$h_{34}l_{O\ 36}m_{S\ 50}$
29	Cu	$b_{18}m_{C\ 21}h_{22}l_{26}$	60	Nd	$l_{O\ 27}m_{40}$	91	Pa	l_{81}
30	Zn	$m_{C\ 20}b_{20}l_{C\ 23}h_{25}$	61	Pm	—	92	U	$h_{32}l_{O\ 49}m_{S\ 68}$
31	Ga	$l_{O\ 32}m_{S\ 33}h_{33}$	62	Sm	$l_{O\ 40}m_{55}$			

Естественно, что достаточно полная и надежная общая геохимическая характеристика элементов по предлагаемой схеме классификации может быть получена лишь в том случае, когда известно содержание всех 92 рассматриваемых химических элементов во всех пяти выделенных классах. В противном случае отдельные элементы (особенно с низкими кларками) могут изменять свою геохимическую характеристику. Поэтому полученные нами общие геохимические характеристики отдельных элементов будут уточняться и видоизменяться параллельно с появлением новых данных об относительной распространенности этих элементов в природе.

Предлагаемая классификация химических элементов и приведенные в табл. 4 их общие геохимические характеристики базируются на величинах относительной распространенности элементов в различных оболочках земного шара, выраженных в весовых процентах. Представляется интересным рассмотреть геохимические классификации элементов по предлагаемой схеме, взяв в основу не весовые, а атомные и объемные количества химических элементов в тех же природных объектах.

ЛИТЕРАТУРА

Вернадский В. И. Избранные сочинения. Т. V. Изд. АН СССР, 1960.
Виноградов А. П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. Геохимия, № 7, 1962.
Заварицкий А. Н. Введение в петрохимию. Изд. АН СССР, 1944.
Сауков А. А. Геохимия. Наука, 1966.
Goldschmidt V. M. Videnskapsselskapets skrifter I, Math-naturwiss. Kl., № 3, 1923.
Goldschmidt V. M. Geochemistry. Oxford, 1954.
Green J. Bull. Geol. Soc. Amer., v. 70, № 9, 1959.
Heide F. Kleine Meteoritenkunde, 2. Aufl. Berlin-Gottingen-Heidelberg, 1957.
Mason B. Principles of geochemistry. New-York, London, 1956.
Rankama K., Sahama Th. Geochemistry. Chicago-London, 1950.
Rösler H. J., Lange H. Geochemische Tabellen. Leipzig, 1965.
Shaw W. H. R. Geochim. et cosmochim. acta, v. 19, № 3, 1960.
Urey H. C. The Atmosphere of the planets. In „Handbuch der Physik, Bd. 52. Berlin (Gottingen—Heidelberg), 1952.