

Р.Г. Ибламин

Пермский государственный национальный
исследовательский университет, г. Пермь

ПЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

На основе анализа распределения химических элементов по магматическим горным породам предложена их петрологическая классификация. Выделены четыре геохимических класса: гипербазитофильный, базитофильный, андезитофильный и гранитофильный. В гранитофильном классе обособлены бимодальный и щелочной подклассы. Классификация позволяет прогнозировать образование месторождений полезных ископаемых в связи с определённым геохимическим классом.

Ключевые слова: геохимия, петрологическая классификация, химические элементы.

DOI: 10.17072/chirvinsky.2021.79

1. Геохимические классификации элементов

Геохимические классификации заключаются в выделении группировок атомов, имеющих близкие химические свойства и отличающихся по этой причине одинаковым поведением в природе. Универсальной классификацией химических элементов является Периодическая система Д.И. Менделеева, обычно она и кладётся в основу геохимических классификаций.

Планетарная геохимическая классификация была разработана В.М. Гольдшмидтом в 1922 – 1924 гг. [3, 12]. Она основана на идее формирования планет по принципу фракционной кристаллизации и базируется на химическом составе метеоритов. Им были выделены 4 группы элементов: сидерофильные, халькофильные, литофильные, атмосферные.

Геохимические классификации элементов земной коры характеризуют их распределение в пределах верхних оболочек Земли. Первая классификация была представлена В.И. Вернадским в 1909 г. в докладе: «Парагенезис химических элементов в земной коре» [1]. В основу выделения парагенезисов им положены: 1) явление изоморфизма атомов в минералах, 2) термодинамические условия формирования минералов в земных оболочках.

А.Е. Ферсманом (1933) в развёрнутой форме Периодической системы были выделены три поля: поле обычное, в которое входят наиболее распространённые элементы, составляющие основу литосферы, гидросферы и атмосферы; поле сульфидное халькофильных элементов; поле кислое литофильных элементов. Внутри названных трёх полей дополнительными знаками им были выделены элементы кислых магм и пневматолитов, средних магм, ультраосновных магм и сульфидных месторождений [8].

В 1979 – 1989 гг. А.И. Перельман, продолжая традиции А.Е. Ферсмана, на основе Периодической системы предложил свою более подробную классификацию [7].

Автором настоящей статьи были проанализированы описанные классификации и предложена геохимическая классификация элементов месторождений полезных ископаемых [4].

2. Магматические процессы

При характеристике магматических месторождений нами было показано, что магматические процессы, происходящие в земной коре, закладываются в мантии Земли [5]. В мантии ниже астеносферы действует конвективный теплоперенос вещества при средней температуре 1500–2000° и давлении порядка 12 тыс. атм (1200 МПа). В областях восходящих струй астеносферная мантия проникает в литосферную плиту и даёт начало магматическим процессам. Из мантийного материала (пиролита) в условиях понижения давления начинает выделяться, как более легкоплавкая, базальтовая компонента. Происходит деплетирование пиролита. В остатке накапливается тугоплавкий рстит в виде гипербазитовой составляющей.

Дальнейшее фракционирование базальтовой магмы приводит к выплавлению из неё андезитовой компоненты, а затем и риолитовой гранитоидной. Образуются i-граниты. Процессы метаморфической мигматизации первично экзогенных образований вещества земной коры приводят к образованию коровых s-гранитов. С перечисленными магматическими процессами связана геохимическая дифференциация вещества вплоть до образования месторождений полезных ископаемых. Нами проанализировано распределение средних содержаний химических элементов в главных типах магматических пород по данным, обобщённым А.А. Ярошевским [10]. Результаты анализа подтвердили тезис о геохимической дифференциации магматического вещества и позволили выделить четыре класса элементов: базальтофильные, гипербазитофильные, андезитофильные и гранитофильные.

3. Базальтофильные элементы

Типичным представителем элементов базальтофильного класса является железо. В Периодической системе оно находится в побочной подгруппе VIII группы вместе с девятью элементами. В 4-м периоде это элементы семейства железа. Распространенность железа в верхней части континентальной коры оценивается в 4,37 и 3,089 мас.% [9, 11]. Это четвертый по распространенности элемент коры.

В распределении железа по магматическим породам существует характерная особенность: обогащать породы основного отряда. Содержание железа увеличивается от ультраосновных пород к основным в 1,3 раза, далее в средних оно уменьшается в 1,7 раза, а в

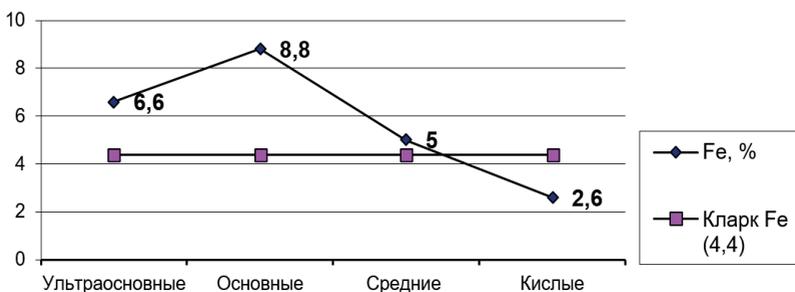


Рис. 1. Распределение средних содержаний железа по магматическим горным породам кислых достигает минимума (рис. 1). В породах основного и ультраосновного отрядов содержания железа выше кларка.

Такое распределение по магматическим породам характерно для элементов базальтофильного класса, т.е. элементов, накапливающихся в магмах основного отряда и уменьшающихся как в ультраосновных, так и в кислых. По уменьшению средних содержаний в базальтах элементы класса (спереди указан порядковый номер элемента) образуют следующий ряд (мас.%): ${}_{26}\text{Fe}$ (8,77), ${}_{20}\text{Ca}$ (7,1), ${}_{22}\text{Ti}$ (1,09), ${}_{25}\text{Mn}$ ($1,44 \cdot 10^{-1}$), ${}_{15}\text{P}$ ($1,27 \cdot 10^{-1}$), ${}_{23}\text{V}$ ($2,75 \cdot 10^{-2}$), ${}_{30}\text{Zn}$ ($1,1 \cdot 10^{-2}$), ${}_{29}\text{Cu}$ ($1 \cdot 10^{-2}$), ${}_{21}\text{Sc}$ ($3,5 \cdot 10^{-3}$), ${}_{47}\text{Ag}$ ($1 \cdot 10^{-5}$). Начинает ряд сидерофильное железо, далее следуют литофильные элементы, а в конце находятся халькофилы: Zn, Cu, Ag. В состав ряда входят: из 3-го периода один р-элемент – фосфор; из 4-го периода один s-элемент – кальций и семь d-элементов, в их числе 5 элементов семейства железа (Sc, Ti, V, Mn, Fe), а также Cu и Zn; из 5-го периода один d-элемент – серебро. Таким образом, основу класса составляют d-элементы-литофилы 4-го периода, к которым слева примыкают фосфор и кальций, а справа медь, цинк и серебро. Породообразующую роль в этом классе играют кальций и железо.

Принадлежностью к базальтофильному классу объясняется парагенезис в месторождениях элементов семейства железа и фосфора, с одной стороны, и халькофильных элементов – с другой, а также их тесная связь с базитами и умеренно кислыми породами, производными базальтовой магмы [6].

4. Гипербазитофильные элементы

Характерным гипербазитофильным элементом является хром, который в Периодической системе находится в побочной подгруппе VI-й группы. В горизонтальной строке 4-го периода по строению электронной оболочки он входит в состав семейства железа.

Кларк хрома оценивается цифрами $9,9 \cdot 10^{-3}$ и $3,5 \cdot 10^{-3}$ мас. % [9, 11]. В его распределении по магматическим породам существует особенность обогащать породы ультраосновного отряда (рис. 2).

Аналогичными петрохимическими свойствами обладают (в скобках мас. % для ультраосновных пород) ^{12}Mg (27,3), ^{24}Cr (0,3), ^{28}Ni (0,2), ^{27}Co (0,01), ^{44}Ru ($1,5 \cdot 10^{-5}$), ^{46}Pd ($0,9 \cdot 10^{-5}$), ^{45}Rh ($0,3 \cdot 10^{-5}$), ^{78}Pt ($0,2 \cdot 10^{-5}$), ^{77}Ir ($0,1 \cdot 10^{-5}$), ^{79}Au ($0,07 \cdot 10^{-5}$), ^{76}Os (?). Содержания всех перечисленных элементов закономерно уменьшаются от ультраосновных пород к кислым. Мы их относим к классу гипербазитофильных элементов. В состав класса входят: один s-элемент 3-го периода – магний, три d-элемента 4-го периода семейства железа (Cr, Co, Ni), три d-элемента 5-го периода – платиноиды (Ru, Rh, Pd), четыре d-элемента 6-го периода – платиноиды (Os, Ir, Pt) и золото. Начинают ряд литофильные магний и хром, далее следуют сидерофильные элементы, а в конце находится халькофильное золото. Таким образом, основу рассматриваемого класса составляют элементы побочной подгруппы VIII группы Периодической системы, относящиеся к сидерофилам. Слева к ним примыкает магний и хром, а справа – золото. Ведущую порообразующую роль в классе играет магний.

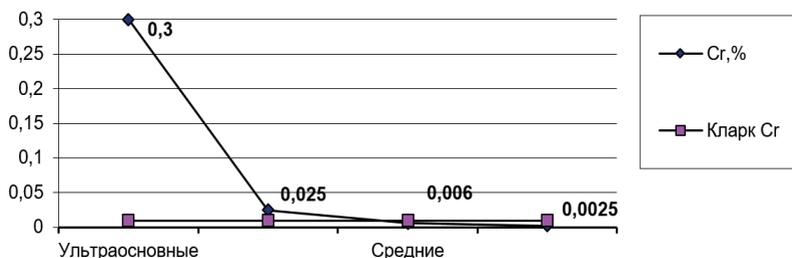


Рис. 2. Распределение средних содержаний хрома по отрядам магматических горных пород, мас. %

Нахождением в составе класса объясняется парагенезис в месторождениях магния и хрома с одной стороны, и сидерофильных элементов – с другой, а также тесная связь их месторождений с гипербазитами.

5. Андезитофильные элементы

Распределение по магматическим породам андезитофильных элементов рассмотрим на примере молибдена. Молибден находится в одной VI b подгруппе с хромом, вольфрамом и ураном таблицы Д.И. Менделеева. Кларк Мо для верхней части континентальной коры $1,0 \cdot 10^{-4}$ и $1,1 \cdot 10^{-4}$ мас. % [9, 11]. Его содержания минимальны в ультраосновных породах, затем они повышаются в основных, достигают максимума в средних, а в кислых снова уменьшаются (рис. 3).

Химические элементы, которые распределяются по магматическим породам подобно молибдену, обогащая породы среднего отряда, отнесём к андезитофильному классу. Если их расположить в порядке уменьшения содержаний в средних породах, то образуется следующий ряд: ${}_{13}\text{Al}$ ($9,12$), ${}_{38}\text{Sr}$ ($4 \cdot 10^{-2}$), ${}_{59}\text{Pr}$ ($4 \cdot 10^{-3}$), ${}_5\text{B}$ ($2 \cdot 10^{-3}$), ${}_{35}\text{Br}$ ($4,5 \cdot 10^{-4}$), ${}_{48}\text{Cd}$ ($2 \cdot 10^{-4}$), ${}_{42}\text{Mo}$ ($1,1 \cdot 10^{-4}$), ${}_{49}\text{In}$ ($2 \cdot 10^{-5}$). В состав ряда входят: из 2-го периода один р-элемент – бор; из 3-го периода один р-элемент – алюминий; из 4-го периода один р-элемент – бром; из 5-го периода один s-элемент – стронций, два d-элемента – молибден и кадмий и один р-элемент – индий; из 6-го периода – один f-элемент – празеодим. Таким образом, явных закономерностей в распределении элементов по Периодической системе не наблюдается. Можно отметить принадлежность бора и алюминия к одной подгруппе.

Среди элементов класса только молибден считается сидерофилом, большинство же (B, Al, Br, Sr, Pr) относится к литофилам,

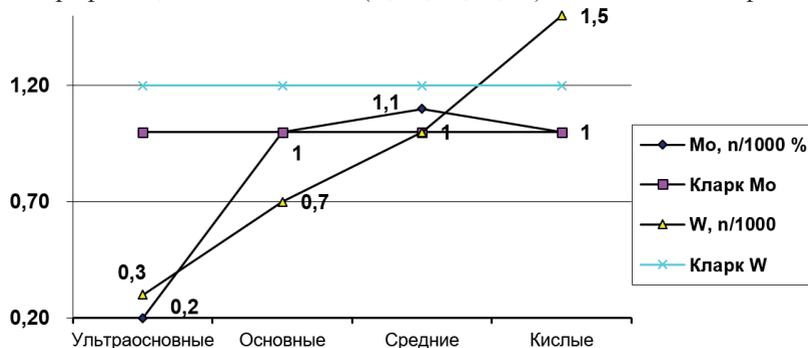


Рис. 3. Распределение средних содержаний молибдена и вольфрама по магматическим горным породам

а Cd и In – к халькофилам. Среди класса андезитофильных ведущую минералообразующую роль играет алюминий, который входит в состав плагиоклазов, содержание которых в диоритах достигает 80 об.%. Остальные элементы находятся в виде примесей.

6. Гранитофильные элементы

Распределение гранитофильных элементов по магматическим породам рассмотрим на примере вольфрама. Вольфрам находится в одной подгруппе с молибденом таблицы Д.И. Менделеева. Кларк W для верхней части континентальной коры $1,2 \cdot 10^{-4}$; $1,4 \cdot 10^{-4}$ мас% [9, 11]. В его распределении по магматическим породам выявляется четкая тенденция обогащать породы кислого петрохимического отряда. Содержания вольфрама постепенно увеличиваются от ультраосновных пород к основным, средним и достигают максимума в кислых (см. рис. 3). Элементы, которые распределяются по магматическим породам аналогичным образом отнесём к гранитофильному классу.

Если расположить их в порядке уменьшения содержаний в кислых породах, то образуется следующий ряд: ${}^8\text{O}$ (48,0), ${}^{14}\text{Si}$ (32,8), ${}^{19}\text{K}$ ($3,23$), ${}^{11}\text{Na}$ (2,75), ${}^9\text{F}$ ($8 \cdot 10^{-2}$), ${}^{56}\text{Ba}$ ($7,5 \cdot 10^{-2}$), ${}^6\text{C}$ ($3,0 \cdot 10^{-2}$), ${}^{16}\text{S}$ ($3,0 \cdot 10^{-2}$), ${}^{17}\text{Cl}$ ($2,0 \cdot 10^{-2}$), ${}^{40}\text{Zr}$ ($2,0 \cdot 10^{-2}$), ${}^{37}\text{Rb}$ ($1,5 \cdot 10^{-2}$), ${}^3\text{Li}$ ($3,5 \cdot 10^{-3}$), ${}^{39}\text{Y}$ ($3,1 \cdot 10^{-3}$), ${}^{31}\text{Ga}$ ($2,0 \cdot 10^{-3}$), ${}^{41}\text{Nb}$ ($2,0 \cdot 10^{-3}$), ${}^{82}\text{Pb}$ ($2,0 \cdot 10^{-3}$), ${}^{90}\text{Th}$ ($1,7 \cdot 10^{-3}$), ${}^4\text{Be}$ ($5,0 \cdot 10^{-4}$), ${}^{55}\text{Cs}$ ($5,0 \cdot 10^{-4}$), ${}^{72}\text{Hf}$ ($5,0 \cdot 10^{-4}$), ${}^{73}\text{Ta}$ ($3,5 \cdot 10^{-4}$), ${}^{92}\text{U}$ ($3,4 \cdot 10^{-4}$), ${}^{50}\text{Sn}$ ($3,0 \cdot 10^{-4}$), ${}^{74}\text{W}$ ($1,5 \cdot 10^{-4}$), ${}^{81}\text{Tl}$ ($1,0 \cdot 10^{-4}$), ${}^{57-77}\text{TR}$ ($n \cdot 10^{-4}$), ${}^{83}\text{Bi}$ ($4,0 \cdot 10^{-5}$).

В состав класса входят: из 2-го периода два s-элемента (Li и Be), три p-элемента (C, O, F); из 3-го периода – один s-элемент (Na) и три p-элемента (Si, S, Cl); из 4-го периода один s-элемент (K) и один p-элемент (Ga); из 5-го периода один s-элемент (Rb), три d-элемента (Y, Zr, Nb) и один p-элемент (Sn); из 6-го периода два s-элемента (Cs, Ba), 14 f-элементов (La и лантаноиды), три d-элемента (Hf, Ta, W) и три p-элемента (Tl, Pb, Bi); из 7-го периода – два f-элемента (Th и U). Таким образом, можно отметить, что среди гранитофильных преобладают элементы 2-го, 3-го, 5-го и 6-го периодов, т.е. элементы начала и конца Периодической системы. Среди них присутствуют все щелочные металлы, часть щелочноземельных (Be и Ba), редкоземельные элементы (Y, La и лантаноиды, актиноиды). Практически все они за исключением халькофилов (S, Ga, Sn, Tl, Pb и Bi), относятся к литофильным элементам. Другими словами это коровые элементы, слагающие земную кору.

В классе гранитофильных ведущую минералообразующую роль играют кислород и кремний. Они образуют кварц, содержание которого в гранитах составляет 15 – 45 об.%, и вместе с K и Na входят в состав полевых шпатов, кислых плагиоклазов, слюд. Содержание остальных

гранитофильных элементов на 2 – 3 порядка ниже породообразующих и изменяется от сотых до сотысячных долей процента. Они в силу своих кристаллохимических особенностей в большинстве своём входят в состав породообразующих минералов, рассеиваясь в массе пород.

Существует кристаллохимическая причина формирования ассоциации гранитофильных элементов. Они отличаются от элементов геохимического семейства железа, а также от минералообразующих магния и кальция величиной радиусов ионов в большую или меньшую сторону, что затрудняет их вхождение в состав породообразующих минералов ультраосновных, основных и средних пород.

Гранитофильные элементы в своём большинстве образуют месторождения в связи с кислыми лейкократовыми s-гранитами – продуктами плавления корового материала в условиях земной коры.

Среди класса гранитофильных по характеру распределения в магматических породах намечаются два подкласса. Один характеризуется одномодальным распределением содержаний, как, например, вольфрам, другой – бимодальным, как, например, сера.

Содержания элементов бимодального подкласса увеличиваются от ультраосновных пород к основным, затем в средних – уменьшаются и достигают максимальных значений в кислых породах. Среди редких элементов подклассу относятся Y, Zr, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. Десять из них лантаноиды (табл.).

Содержания некоторых гранитофильных элементов в щелочных породах – сиенитах – выше, чем в нормальных кислых (табл.). Эта совокупность элементов образует сиенитофильный подкласс. В их число входят Zr, Hf, Nb, La и лантаноиды.

Таким образом, концентрации рассматриваемых гранитофильных редких элементов сиенитофильного подкласса, а следовательно, и месторождения могут быть связаны с различными магматическими породами, но для большинства из них рудоносными могут быть и гранитоиды и щелочные породы, что и наблюдается в природе.

Анализ приведённых данных позволяет предположить, что на начальном этапе магматического процесса при плавлении мантии в базальтоидную выплавку уходят в первую очередь, те элементы, содержания которых в гипербазитах ниже, чем в мантии. Это гранитофильные бимодальные элементы. Вероятно, в некоторых случаях они могут концентрироваться в габброидах. Дифференциация базальтов с выплавлением средних пород приводит к уменьшению в них содержаний бимодальных элементов и дальнейшем накоплении их в остаточном кислом расплаве.

Таблица.

Средние содержания (г/т) редких элементов в примитивной мантии, главных типах магматических пород [10], содержания в сиенитах по Турекьяну и Ведыполю [2].

Атомный номер	Элемент	Мантия	Ультраосновные	Базальты континентов	Средние	Кислые	Сиениты
39	Y	4,37	2,9	23	21	31	20
40	Zr	10,81	5	120	110	200	500
62	Sm	0,437	0,4	3,8	3,7	7,6	18
63	Eu	0,162	0,16	1,15	1,1	1,3	2,8
64	Gd	0,571	0,74	4,5	3,6	6,2	18
65	Tb	0,105	0,12	0,71	0,64	1,1	2,8
66	Dy	0,711	0,57	4,2	3,7	5,9	13
67	Ho	0,159	0,16	0,93	0,82	1,3	3,5
68	Er	0,465	0,40	2,6	2,3	3,4	7
69	Tm	0,0717	0,067	0,41	0,32	0,52	0,6
70	Yb	0,462	0,38	2,3	2,2	3,3	7
71	Lu	0,0711	0,055	0,34	0,30	0,49	2,1

Примечание. Жирным шрифтом выделены повышенные содержания элементов в кислых и щелочных породах, курсивом – в бимодальных.

Концентрация бимодальных элементов в щелочной магме вероятно связана с формированием щелочной магмы в глубинных условиях деплетирования мантии.

Таким образом, в магматическом процессе происходит дифференциация мантийного материала с первоначальным выплавлением базальтофильных элементов, среди которых минералообразующими являются железо и кальций. В остаточном рестите накапливаются гипербазитофилы, ведущую роль в которых играют магний, хром и никель. Фракционирование базальтов приводит к отщеплению от них андезитофилов во главе с алюминием. Наконец, в кислых магамах накапливаются гранитофилы с главной минералообразующей ролью в них O, Si, K, Na.

Знание принадлежности химического элемента к определённому

петрологическому классу позволяет объяснить принадлежность его месторождений к тому или иному геолого-промышленному типу, а следовательно, прогнозировать месторождения и их свойства [6].

Библиографический список

1. Вернадский В.И. Парагенезис химических элементов в земной коре // Дневник XII съезда русских естествоиспытателей и врачей (1909 – 1910). М. 1910. С. 73 – 91.
2. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с.
3. Гольдшмидт В.М. Три доклада по геохимии / Перевод А.А. Саукова // Ученые записки Пермского университета, приложение к т. II, 1937. 42 с.
4. Ибламинов Р.Г. Геохимические ассоциации месторождений полезных ископаемых в менделеевской таблице // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2020. Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2020а. С. 27 – 34.
5. Ибламинов Р.Г. Процессы формирования и классификация магматических месторождений полезных ископаемых // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского: сб. науч. статей / отв. ред. И.И. Чайковский; Перм. гос. нац. исслед. ун-т; Горный ин-т УрО РАН. Пермь, 2020б. Вып. 23. С. 233 – 237. 5 с.
6. Ибламинов Р.Г. К вопросу о методологии изучения и классификации месторождений полезных ископаемых // Вестник Пермского университета. Геология. Т. 19, № 3. 2020в. С. 282 – 301. 16 с. DOI: 10.17072/psu.geol.19.3.282.
7. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
8. Ферсман А.Е. Геохимия. Т. 1., 1933. Переиздание: Избранные труды. Т. III. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 798 с.
9. Ярошевский А.А. Кларки химических элементов верхней части континентальной коры (гранитно-метаморфической оболочки) // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / А.П. Соловов, А.Я. Архипов, В.А. Бугров и др. М.: Недра, 1990. С. 12 – 13.
10. Ярошевский А.А. Средние содержания химических элементов в главных типах магматических пород // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / А.П. Соловов, А.Я. Архипов, В.А. Бугров и др. М.: Недра, 1990. С. 20 – 22.
11. Ярошевский А.А. Геохимия земной коры // Российская геологическая энциклопедия. В трёх томах. Т. I. М.-СПб: Издательство ВСЕГЕИ, 2010. С. 374 – 375.
12. Goldschmidt V.M. Geochemische Verteilungsgesetze. Vidensk. Skrift. 1922 – 1927. II. Beziehungen den geochemischen Verteilungsgesetzten und dem Bau der Atome. 1924, N 4/ I – 37.

PETROLOGICAL CLASSIFICATION OF CHEMICAL ELEMENTS

R.G. Iblaminov

riaminov@psu.ru

Based on the analysis of the distribution of chemical elements in igneous rocks, their petrological classification is proposed. Identified four geochemical classes: ultrabasicophile, basicophile, andesiteophile and granitophile. In granitophile grade separated bimodal and alkaline subclasses. Classification allows you to predict the formation of mineral deposits in connection with a certain geochemical class.

Keywords: Geochemistry, petrological classification, chemical elements.