

УДК 549.0

## СИСТЕМАТИКА МИНЕРАЛОВ ОТ В.И. ВЕРНАДСКОГО ДО XXI ВЕКА

С.Н. Ненашева

*Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана, РАН, Москва, nenashevsn@mail.ru*

В статье приводятся краткие сведения о наиболее распространенных систематиках минералов, разработанных в XX веке: В.И. Вернадского, Дж.Д. Дэна, А.Г. Бетехтина, И.Н. Костова, Г.П. Барсанова. Подробнее рассматривается систематика А.А. Годовикова, поскольку она отражает новейшие данные о связи химического состава минералов с их структурой и свойствами (Годовиков, 1997). Структуру минералов автор учитывает не на уровне высших, а средних или даже низших таксонов, так как она находится в прямой зависимости от химического состава и физико-химических параметров минералообразующих систем. Высшие таксоны — типы — выделяются по преимущественному типу химической связи. Основой для выделения таксонов более низкого порядка, чем тип, вплоть до классов, является классификация химических элементов. Поэтому в статье рассматриваются классификации элементов: В.И. Вернадского, В.М. Гольдшмидта, А.Е. Ферсмана, А.Н. Заварицкого, А.А. Годовикова. А.А. Годовиков разработал более глубокие представления о сходстве и различии в свойствах элементов, что позволило ему прийти к более детальной минерало-кристаллохимической систематике элементов, учитывающей различия свойства элементов, проявляющиеся ими в зависимости от элементов — партнёров по соединению, физико-химических параметров системы. Эту классификацию А.А. Годовиков использовал для выделения таксонов более низкого порядка, чем тип. В статье приводятся критерии выделения таксонов в структурно-химической систематике минералов А.А. Годовикова.

В статье 1 таблица, 11 рисунков, список литературы из 13 названий.

Ключевые слова: систематика минералов, классификация элементов, тип химической связи, химический состав, структура минералов, физико-химические параметры минералообразующей системы.

Существует мнение, что систематикой минералов заниматься бессмысленно. Чаще всего так думают молодые исследователи, считающие, что значительно важнее получать фактические данные по минералам. Однако, крупнейшие ученые, такие как М.В. Ломоносов, В.М. Севергин, Й.Я. Берцелиус, В.И. Вернадский, Дж.Д. Дэна, А.Г. Бетехтин, И.Н. Костов, А.С. Поваренных, Х. Штрунц, А.А. Годовиков, А.Р. Холцел, А.М. Кларк, создавали свои варианты систематики минералов. Такое внимание к систематике минералов объясняется многими причинами:

1 — необходимостью систематизировать многочисленные и разнообразные сведения по минералам, без чего невозможно стройное и научное их изложение;

2 — при описании минералов используются многочисленные свойства минералов, необходимые как для их диагностики, так и для выяснения поисковых признаков, условий образования, парагенетических ассоциаций, возможности их использования человеком;

3 — принадлежностью минералов к самым различным типам химических соединений, сложностью и разнообразием их состава;

4 — тем, что минералы образуются в разнообразных, иногда взаимоисключающих физико-химических условиях.

Поэтому систематика минералов должна быть многомерной, учитывающей множест-

во самых разнообразных признаков. Необходимо, чтобы признаки, положенные в основу систематики, давали возможность перемены места минерала в ней в связи с уточнением формулы или структуры, позволяли выделять новые таксоны для новых минералов, представляющих ранее не известные в природе химические соединения, то есть она должна быть не застывшим представлением, а развивающейся системой.

В связи с невозможностью в статье уделить внимание всем систематикам, будут рассмотрены только наиболее распространенные.

**Владимир Иванович Вернадский** — академик Императорской академии наук, заведующий Минералогическим отделением Геологического музея Академии наук (рис. 1), высоко ценил работы по систематике минералов, считал, что «установление естественной, правильной классификации связано с глубочайшим охватом химических и минералогических явлений» (Вернадский, 1927). Вот требования к систематике минералов, сформулированные В.И. Вернадским.

1. В основу систематики должны быть положены химические свойства веществ, элементов их образующих, сходство и различие в свойствах этих элементов и другие химические признаки.

2. Систематика должна учитывать генетические и парагенетические особенности ми-

нералов, что должно выражаться в объединении в отдельные, желательно, максимально более крупные по числу минеральных видов таксоны минералов, близких по генезису (парагенезису), отвечать пониманию физико-химических связей между таксонами, закономерностей перехода от одних из них к другим.

3. Структурные (геометрические), часто называемые кристаллохимическими, особенности минералов являются их вторичными (следующего уровня после химических) признаками, поскольку они определяются химическим составом минералов, физико-химическими параметрами их образования. Их, безусловно, необходимо учитывать в систематике, но лишь на более низком уровне её таксонов.

В.И. Вернадский все минералы разбил на **14 отделов** (Вернадский, 1927).

**I.** Свободные элементы и их смеси (самородные элементы).

**II.** Водородные минералы.

**III.** Серные и селеновые соединения.

**IV.** Производные арсинов и стибнинов.

**V.** Теллуристые соединения.

**VI.** Висмутовые соединения.

**VII.** Фосфорные, азотные и углеродные металлы.

**VIII.** Кислородные перекиси, основания и ангидриды.

**IX.** Гидраты и фторангидриды.

**X.** Кислородные соли и продукты присоединения к ним.

**XI.** Оксигалоидные соединения.

**XII.** Галоидные соединения.

**XIII.** Кремневые соединения без ясного солевого характера (стекла).

**XIV.** Углеродистые, содержащие кислород соединения, не имеющие солевого характера.

Отделы подразделяются на группы по характеру химических элементов, входящих в состав соединений. Количество групп на время разработки систематики превышало 200.

Одновременно с В.И. Вернадским **Джеймс Дуайт Дэна** — минералог и геолог Йельского университета (рис. 2) — создал удачную химическую систематику минералов, в основу которой положен **Периодический закон Д.И. Менделеева**. Дж.Д. Дэна объединил минералы в 8 крупных таксонов **по типу аниона**, учитывая сходство между элементами, вытекающее из их положения в Периодической системе (Dana, 1892).

**I Тип.** Самородные элементы.

**II Тип.** Сульфиды, селениды, теллуриды, арсениды, антимониды.

**III Тип.** Сульфосоли — сульфоарсениды, сульфоантимониды, сульфовисмутиды.

**IV Тип.** Галогениды — хлориды, бромиды, иодиды; фториды.

**V Тип.** Оксиды.

**VI Тип.** Оксосоли. Среди них выделил: 1 — карбонаты; 2 — силикаты; 3 — титанаты; 4 — фосфаты, арсенаты, ванадаты, антимонаты, нитраты; 5 — бораты, уранаты; 6 — сульфаты, хроматы, теллулаты; 7 — вольфраматы, молибдаты.

**VII Тип.** Соли органических кислот: оксалаты, меллаты и т.д.

**VIII Тип.** Углеводороды.

**Анатолий Георгиевич Бетехтин** (рис. 3) — автор «Минералогии», полнейшего издания-справочника по минералогии (Бетехтин, 1950). А.Г. Бетехтин выделял 6 разделов по аниону.

**Раздел I.** Самородные элементы и интерметаллические соединения.

**Раздел II.** Карбиды, нитриды и фосфиды.

**Раздел III.** Сульфиды, сульфосоли и подобные им соединения.

**Раздел IV.** Галоидные соединения (галогениды).

**Раздел V.** Окислы (оксиды).

**Раздел VI.** Кислородные соли (оксосоли), состоящий из 10 классов: 1 — иодаты; 2 — нитраты; 3 — карбонаты; 4 — сульфаты, селенаты, теллулаты; 5 — хроматы; 6 — молибдаты и вольфраматы; 7 — фосфаты, арсенаты и ванадаты; 8 — арсениды; 9 — бораты; 10 — силикаты.

**Иван Николов Костов** (рис. 4) — болгарский минералог и кристаллограф, разработал систематику минералов, опирающуюся на химический состав минералов и парагенетические ряды отдельных элементов (Костов, 1965), в которой выделил 12 классов.

**Класс I.** Самородные элементы.

**Класс II.** Сульфиды и сульфосоли.

**Класс III.** Галогениды.

**Класс IV.** Окислы и гидроокислы.

**Класс V.** Силикаты.

**Класс VI.** Бораты.

**Класс VII.** Фосфаты, арсенаты, ванадаты.

**Класс VIII.** Вольфраматы, молибдаты.

**Класс IX.** Сульфаты.

**Класс X.** Хроматы.

**Класс XI.** Карбонаты.

**Класс XII.** Нитраты и иодаты.

**Георгий Павлович Барсанов** (рис. 5) — замечательный минералог и педагог, директор Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана АН СССР (1952 — 1976), вице-президент Международной минералогической ассоциации (1960 — 1964), заведующий кафедрой минералогии МГУ (1953 — 1986). Г.П. Барсанов



Рис. 1. Владимир Иванович Вернадский (1863–1945). Архив ГГМ им. В.И. Вернадского РАН.  
Рис. 2. Джеймс Дуайт Дэна (1813–1895). Архив ГГМ им. В.И. Вернадского РАН.

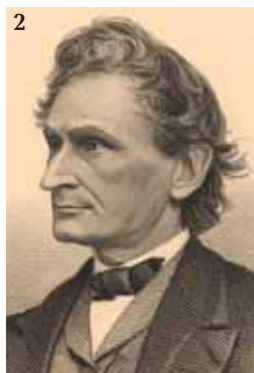


Рис. 3. Анатолий Георгиевич Бетехин (1897–1962). Архив ГГМ им. В.И. Вернадского РАН.  
Рис. 4. Иван Николов Костов (1913–2004). Архив ГГМ им. В.И. Вернадского РАН.



считал, что в основе классификации минеральных тел должны лежать:

1) тип химической связи в кристаллах;  
2) качественный состав атомов, входящих в кристалл и связанных друг с другом через тот или иной тип химической связи;

3) как и чем окружены атомы (ионы) в кристаллической пространственной структуре, то есть координация, тип упаковки, мотив структуры (Барсанов, 1959). Все минералы Г.П. Барсанов разделил по типу связи на 4 типа. Далее типы делятся на классы по качественному составу анионов, строящих ту или иную структуру. Внутри классов выделяются таксоны в зависимости от наличия или отсутствия в структуре добавочных анионов. Наконец, следующий по соподчинённости таксон выделяется по качественному составу катионов. В качестве высших таксонов Г.П. Барсанов выделил 4 типа (Барсанов, 1959).

**Тип I.** Атомные (частью ионные) решетки с металлическим или ковалентным типом связи, в нём выделено 2 класса: 1) свободные атомы элементов; 2) интерметаллические соединения.

**Тип II.** Ионные решетки с ковалентным (реже ионным) типом связи с 5 классами: 1) сернистые соединения; 2) селениды; 3) теллуриды; 4) арсениды; 5) антимиониды.

**Тип III.** Типичные ионные решетки без комплексных анионных групп в структурах. В нём 3 класса: 1) хлориды, бромиды, йодиды; 2) фториды; 3) окислы.

**Тип IV.** Ионные решетки с наличием в структуре комплексного аниона. В нём выделено 11 классов: 1) ниоботанталаты и ниоботанталотитанаты; 2) силикаты; 3) бораты; 4) хроматы; 5) молибдаты; 6) вольфраматы; 7) фосфаты; 8) ванадаты; 9) сульфаты; 10) карбонаты; 11) нитраты.

Это наиболее распространённые систематики минералов, созданные до 90-х годов XX века. К сожалению, большинство из них констатируют выделение разных таксонов, показывают их соподчинённость, но не дают принципов их выделения, не объясняют последовательность их выделения, что очень затрудняет, а порой делает невозможным использовать эти классификации для пополнения их вновь открываемыми минеральными видами. Поэтому в последнее время появилось несколько трудов по минералогии, в которых минералы описываются в алфавитном порядке (Clark, 1993; Robert *et al.*, 1990). Это плохо, так как, кроме характеристики минерала, читатель не может ничего сказать о нём, а именно, в каких условиях он образуется, в какой ассоциации, следовательно, нет возможности предсказать, где искать его, как использовать. Как известно, **всякая гипотеза становится теорией, если она позволяет что-то предсказывать, что со временем подтверждается.**

**Александр Александрович Годовиков** (рис. 6) — минералог широкого профиля, профессор, директор Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана (1984 — 1996), известный специалист по теоретической, описательной, экспериментальной и генетической минералогии. А.А. Годовиков стремился **приблизить минералогию к тому рубежу, когда она стала бы точной наукой, а не описательной.** В связи с этим он разрабатывал теоретические вопросы минералогии, стремясь создать основу для единой классификации минералов, которая базировалась бы на химических признаках, на генетических особенностях минералов, на учете их структуры. Эти исследования А.А. Годовикова (6 монографий) положены в основу «Струк-



Рис. 5. Георгий Павлович Барсанов (1907–1991). Архив ГГМ им. В.И. Вернадского РАН.

Рис. 6. Александр Александрович Годовиков (1927–1996).

Рис. 7. Виктор Морис Гольдшмидт (1888–1947).

турно-химической систематики минералов» (Годовиков, 1997), в которой автор использовал основные требования к систематике, сформулированные еще В.И. Вернадским. По мнению А.А. Годовикова, «наиболее полно минералога должна удовлетворить такая систематика, в которой за основу приняты химические признаки, позволяющие понять связь с ними структуры и свойств минералов. Структура минералов учитывается не на уровне высших, а средних и даже низших таксонов, так как она находится в прямой зависимости от химического состава и физико-химических параметров минералообразующих систем» (Годовиков, 1997).

Систематика должна быть естественной, поэтому, «наряду с формальными признаками, она должна учитывать реальные ассоциации минералов, их парагенезисы, различия в физико-химических параметрах, при которых образуются и находятся минералы, отдавая в ряде случаев предпочтение в расположении минералов в систематике последним признакам».

Критерием естественности минералогической систематики являются реальные ассоциации минералов. Необходимо, чтобы от одних таксонов к другим были постепенные переходы, показывающие их многочисленные взаимосвязи.

Стремясь приблизить минералогию к тому, чтобы она стала точной наукой, А.А. Годовиков вводит понятие силовой характеристики (СХ).

Силовые характеристики атомов и ионов — мера кулоновского взаимодействия отрываемого (чаще валентного) электрона с ядром ( $\gamma$ ). В качестве силовых характеристик для атомов и ионов в свободном состоянии и катионов в кристаллах с ионной связью используются:

а)  $\gamma_{\text{орб.}} = F/r_{\text{орб.}}$ , где  $F$  — сродство атома к электрону,  $r_{\text{орб.}}$  — орбитальный радиус атома;

б)  $\gamma_{\text{орб.}}^{n+} = I_n/r_{\text{орб.}}^{n+}$ , где  $I_n$  —  $n$ -й потенциал ионизации,  $r_{\text{орб.}}^{n+}$  — орбитальный радиус иона с валентностью  $n+$ ;

в)  $\gamma_i = I_n/r_i$ , где  $r_i$  — эффективный ионный радиус катиона с валентностью  $n+$  в ионном кристалле.

Силовые характеристики являются мерой донорно-акцепторных (кислотно-щелочных) свойств атомов и ионов.

Основой для классификации минералов в пределах халькогенных, кислородных и галогенных соединений, то есть в пределах выделения высших таксонов систематики — типов — является преимущественный тип химической связи.

Химическая связь в ряду металлиды → полуметаллиды → халькогенные соединения → кислородные соединения → галогенные соединения закономерно изменяется: металлическая → металлически-ковалентная → ионно-ковалентная → ковалентно-ионная → ионная связь. Тип химической связи изменяется и в зависимости от принадлежности вещества к простому, двойному соединению или к соли и определяется фундаментальными свойствами образующих минерал атомов, а именно: их силовыми характеристиками (СХ); порядковым номером  $Z$  в Периодической системе; их соотношением. Общая закономерность при этом проявляется в том, что переход простое соединение → двойное соединение → соль происходит по мере увеличения разности силовых характеристик  $\Delta\text{СХ}$  образующих их катионов, то есть по мере увеличения степени ионности связи.

А.А. Годовиков считал, что основой для выделения таксонов более низкого порядка, чем тип, вплоть до классов, должна являться классификация химических элементов. В XX веке появилось несколько геохимических классификаций элементов и катионов.

Остановимся только на самых известных классификациях элементов.



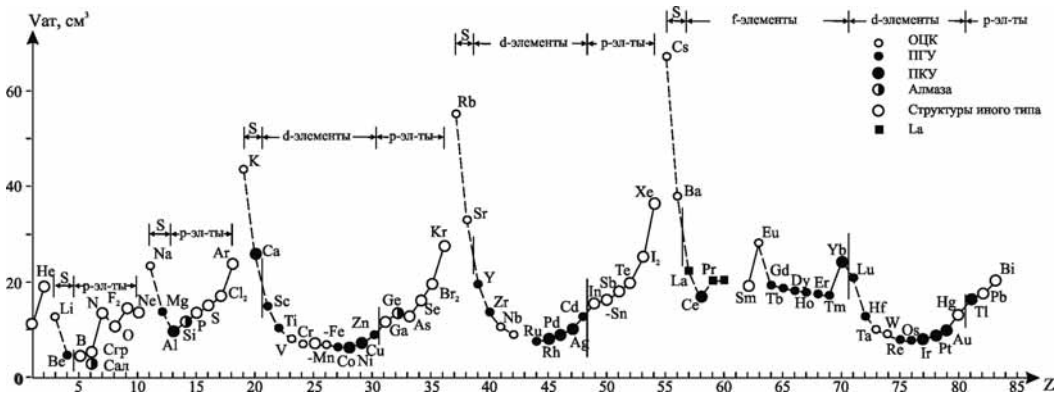


Рис. 8. Кривая изменения атомного объема ( $V$ ) элементарных веществ от атомного номера соответствующих элементов ( $Z$ ). Структуры: объемноцентрированная кубическая — ОЦК (СВС), плотнейшая гексагональная упаковка ПГУ (СРН), плотнейшая кубическая упаковка — ПКУ (СРС), of diamond — алмаза, structures of other types — структуры иного типа, La — структуры типа La. Годовиков, 1997.

**Виктор Мориц Гольдшмидт** (рис. 7) — кристаллограф, директор Геологического музея университета в Осло. На основе кристаллохимии он анализировал условия распределения элементов в различных минералах, условия их концентрации и миграции. Опираясь на кривую изменения атомного объема ( $V$ ) элементарных веществ от атомного номера соответствующих элементов ( $Z$ ), В.М. Гольдшмидт создал первую систематику элементов (рис. 8), разделил их на 4 группы (Гольдшмидт, 1937).

*Сидерофильные* элементы, находящиеся в минимальных участках кривых зависимости атомных объемов от атомного номера. К ним он отнёс С, Р, Fe, Co, Ni, Tc, Mo, Ru, Rh, Re, Os, Ir и Pt.

*Халькофильные* элементы, находящиеся на восходящих участках — S, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Pd (его правильнее было бы отнести к сидерофильным элементам), Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Au, Hg, Tl, Pb, Bi и Po.

*Литофильные* элементы, находящиеся на нисходящих участках — Li, Be, B, Na, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, Ln, Hf, Ta, W, Fr (его на графике В.М. Гольдшмидта ещё не было), Ra, Ac, Th, Pa, U. Учитывая обычность элементов O, F, Cl, Br, I в минералах горных пород и делая отступление от логически-формальной в пользу естественной классификации элементов, В.М. Гольдшмидт отнёс их в эту же группу, несмотря на то, что они находятся на восходящих участках рассматриваемых кривых.

*Атмофильные* элементы, находящиеся в верхних участках кривых — He, N, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn (Em); сюда же он отнёс H.

Неудовлетворённость систематикой В.М. Гольдшмидта привела к разработке гео-

химических систематик А.Е. Ферсманом и А.Н. Заварицким.

**Александр Евгеньевич Ферсман** (рис. 9) — академик, директор Минералогического музея Академии наук СССР с 1919 г. Область его интересов чрезвычайно широка. Минералогия, кристаллография, геохимия, учение о полезных ископаемых, технология минерального сырья. В систематике элементов А.Е. Ферсман выделил типические элементы (то есть элементы с кайносимметричными внешними и предвнешними электронами) путем отделения их от остальных (в периодической системе) двойной горизонтальной чертой (Ферсман, 1933). В верхнюю половину таблицы попали все типические элементы первых трех периодов, а также элементы от K до Ni включительно. Этим подчеркивались особые свойства большинства элементов, относящихся к первой серии  $d$ -элементов, также являющихся, как было установлено позже, кайносимметриками.

**Александр Николаевич Заварицкий** (рис. 10) — академик, крупный геолог, петрограф, специалист по рудным месторождениям и вулканологии, предложил свою геохимическую классификацию элементов (Заварицкий, 1950), которая базируется на свойствах элементов, отраженных в развернутом варианте Периодической системы. Он выделяет в рамках Периодической системы 11 полей элементов:

- 1 — водорода — H;
- 2 — благородных газов — He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn;
- 3 — элементов горных пород — Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Al, Si;
- 4 — элементов магматических эманаций — B, C, N, O, P, S, F, Cl;



Рис. 9. Александр Евгеньевич Ферсман (1883–1945). Архив ГТМ им. В.И. Вернадского РАН.



Рис. 10. Александр Николаевич Заварицкий (1884–1952). Архив ГТМ им. В.И. Вернадского РАН.

5 – элементов группы железа – Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni;

6 – редких элементов – Sc, Y, Ln, Zr, Hf, Nb, Ta;

7 – радиоактивных элементов – Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U;

8 – элементов группы платины – Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt;

9 – металлических (цветных) элементов – Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg, Ga, In, Tl, Ge, Sn, Pb;

10 – металлоидных металлогенных элементов (элементов сульфокислот) – As, Sb, Bi, Se, Te, Po;

11 – тяжелых галоидов – I, Br, At.

Элементы Mo, W, Tc, Re остались вне выделенных полей.

Как уже отмечалось выше, классификация элементов создавалась многими минералогами. Но они не удовлетворяли ни самих авторов, ни их коллег, поскольку систематики минералов, созданные на их основе, не были естественными. Они не учитывали реальные ассоциации минералов, их парагенезисы, различия в физико-химических параметрах, при которых образуются и находят минералы, не учитывали того, что природные ассоциации минералов не случайны, а являются результатом отбора отдельных элементов по всей совокупности их свойств в естественные ассоциации.

Наиболее приемлемой оказалась классификация Александра Николаевича Заварицкого. К сожалению, некоторые недостатки предыдущих классификаций были свойственны и ей.

Значительно более детальную систематику элементов предложил В.И. Вернадский, опираясь на особенности изоморфизма элементов, генезиса и парагенезиса минералов. Эта систематика, по существу, выразилась в широко известных изоморфных рядах (Вернадский, 1923; 1927). В них он не только объединил сходные по химическим свойствам

элементы, но и показал зависимость этих рядов от условий образования.

Изоморфные ряды элементов В.И. Вернадского:

1 – **Al, Fe, Cr, Mn** | Ti, B, [Y], [Ce], V, In?, где **Al, Fe, Cr, Al, Fe, Cr, Mn**, Al, Fe, Cr, Mn | Ti, B, [Y];

2 – **Ba, Ca, Sr, Pb**, где **Ba, Ca, Sr, Pb, Ba, Ca, Sr**, Ba, Ca, Sr;

3 – **Br, I, Cl, F**, где **Br, I, Cl, F, Cl, F**, Cl, F;

4 – **V, P, As, Sb?**;

5 – **Bi, Sb, As**, где **Bi, Sb, As**, Bi, Sb, As;

6 – **K, Na, Cs, Rb** | Ti, Li, H, где **K, Na, Cs, Rb, K, Na, Cs, Rb** | Ti, Li, H, K, Na, Cs, Rb | Ti, Li, H;

7 – **W, Mo**;

8 – **Ge, Sn**;

9 – **Mg, Mn, Fe, Zn, Cd, Cu, Ni, Co, In?**, где **Mn, Fe, Zn, Mg, Mn, Fe, Zn, Cd, Cu, Ni, Co**, Mg, Mn, Fe, Zn, Cd, Cu, Ni, Co;

10 – **Au, Ag, Hg, Cu, Pb, Tl**, где **Pb, Tl [?], Au, Ag, Hg, Cu, Pb, Tl**, Au, Ag, Hg, Cu, Pb, Tl;

11 – Pt, Fe, Pd, Ir, Rh, Cu;

12 – Os, Ru, Rd, Ir;

13 – **Ca, Mg, Mn, Fe**, где **Ca, Mg [?], Ca, Mg, Mn, Fe**, Ca, Mg, Mn, Fe;

14 – O, F [?];

15 – **Co, Fe, Ni**, где **Co, Fe, Co, Fe, Ni**;

16 – Si, Ti, Zr, Mn, где Si, Ti, Zr, Mn, Si, Ti, Zr, Mn;

17 – Th, U;

18 – Zr, Hf;

19 – Nb, Ta;

20 – **S, Se, Te?**, где **S, Se, Te?**, S, Se, Te?

**Жирным шрифтом** показан весь изоморфный ряд. Другими шрифтами выделены элементы разных «термодинамических оболочек» Земли. **Жирным курсивом** – коры выветривания, **подчеркнутым жирным курсивом** – метаморфической, обычным – магматической оболочки (Вернадский, 1927).

Приведенные изоморфные ряды показывают, что сходство между отдельными элементами проявляется по-разному и не только в зависимости от условий образования (термодинамических оболочек), но и в зависимо-

сти от других элементов, составляющих данный изоморфный ряд. В то же время один и тот же элемент оказывается сразу в нескольких таких рядах. Так, например, Fe попадает сразу в 5 рядов — 1, 9, 11, 13, 15; Mn — в 4 ряда — 1, 9, 13, 16; Ca — в 2 ряда — 2, 13, и т.д.

Таким образом, изоморфные ряды заставляют обратить внимание на разносторонность (множественность) химических свойств отдельных элементов, из-за чего такие элементы попадают сразу в несколько изоморфных рядов. В то же время они по той же причине не позволяют использовать их непосредственно для систематики минералов.

Это потребовало от А.А. Годовикова разработки более углубленных представлений о сходстве и различии в свойствах элементов, позволивших прийти к более детальной минералого-кристаллохимической систематике элементов, учитывающей различные свойства элементов, проявляющиеся ими в зависимости от элементов — партнёров по соединению, физико-химических параметров системы. А.А. Годовиков разделил все элементы на 8 групп.

**1. Водород** — Н. Выделение Н в отдельную группу соответствует систематике А.Н. Заварицкого.

**2. Литофильные элементы с низкими СХ:** 2.1. щелочные и щелочноземельные элементы — Li, Na, K, Rb, Cs, Fr; Mg, Ca, Sr, Ba; 2.2. редкоземельные и радиоактивные элементы — Sc, Y, Ln (La — Yb), Th, U; 2.3. амфотерные элементы — Be, Al, (Ga); 2.4. кайносимметричные  $d'$ -элементы — Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni. Эта группа элементов полностью аналогична группе железа А. Н. Заварицкого.

**3. Литофильные элементы со средними СХ:** 3.1. некайносимметричные  $d'$ -комплексобразователи — Zr, Hf, Nb, Ta; 3.2. Мо и W.

**4. Благороднометаллические (сидерофильные) элементы** — Ru, Rh, Pd, Ag, Os, Ir, Pt, Au. Из них Ag и Au часто оказываются в халькофильных минералах и ассоциациях.

**5. Халькофильные элементы:** 5.1. халькофильные элементы с низкими СХ — Cu, Zn, Cd, Hg, (Ga), In, Tl, Pb; 5.2. халькофильные элементы со средними СХ — Ge, Sn, As, Sb, Bi, Se, Te. Группы 5.1. и 5.2. очень близки группам 9 — метаталлических (цветных) элементов и 10 — металлоидных металлогенных элементов (элементов «сульфослот») А.Н. Заварицкого соответственно, за исключением Ge и Sn, которые А.Н. Заварицкий отнёс к группе 9.

**6. Легкие анионообразователи** — В, С, Si, N, P, O, S, F, Cl. Эта группа элементов полно-

стью аналогична группе элементов магматических эманаций А.Н. Заварицкого, входящих в виде анионообразователей (В, С, Si, N, P, S) или анионов (O, F, Cl) в литофильные минералы, лишь S играет наряду с этим анионную роль в халькофильных минералах.

**7. Тяжелые анионообразователи** — Вг и I.

**8. Благородногазовые элементы** — He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn.

Оказалось, что и эта классификация нуждается в уточнениях, поскольку большинство элементов оказываются амфотерными, и их кислотно-основные свойства определяются свойствами других элементов, находящихся в соединении, их соотношениями, физико-химическими параметрами систем, в которых образовался или находится минерал, то есть в зависимости от КЧ в соединении катионы типично сидерофильных и даже халькофильных элементов могут стать в кристаллохимическом отношении аналогами типичных литофильных элементов. Поэтому она не может быть основой для выделения таксонов более низкого порядка, чем **тип**, так как одни и те же катионы могут играть катионную роль в минералах разных типов, например, в литофильных и халькофильных, выступать в одних минералах как катионы, проявляя свои основные свойства, а в других — как анионообразователи, проявляя свои кислотные свойства. Выяснилось, что различия в кислотно-щелочных свойствах катионов с разными КЧ удобно выражать приведенными величинами СХ, то есть их отношением к КЧ — **СХ/КЧ**, которые наряду с электронным типом катиона ( $s$ -,  $f$ -,  $d$ -,  $p$ -), его порядковым номером позволили представить систематику важнейших, входящих в минералы ионов в табличном виде (рис. 11).

В то же время А.А. Годовиков показывает, что величина СХ/КЧ предопределяет роль катионов в соединениях, но она не может использоваться как строгий формальный критерий, так как свойства катионов зависят и от тонкости строения атомов, в частности, от величины их Z и принадлежности их к кайно- или некайносимметрикам, но во многих случаях она позволяет судить не только о роли катиона в соединении, а и о возможности изоморфизма между ним и другими катионами, особенно если они близки по другим признакам. На основе этой систематики катионов (Годовиков, 1997) автор выделил более детальную группировку структурно-химических групп элементов (катионов) в зависимости от их химических и кристаллохимических свойств (Годовиков, 2001) (см. стр. 99).

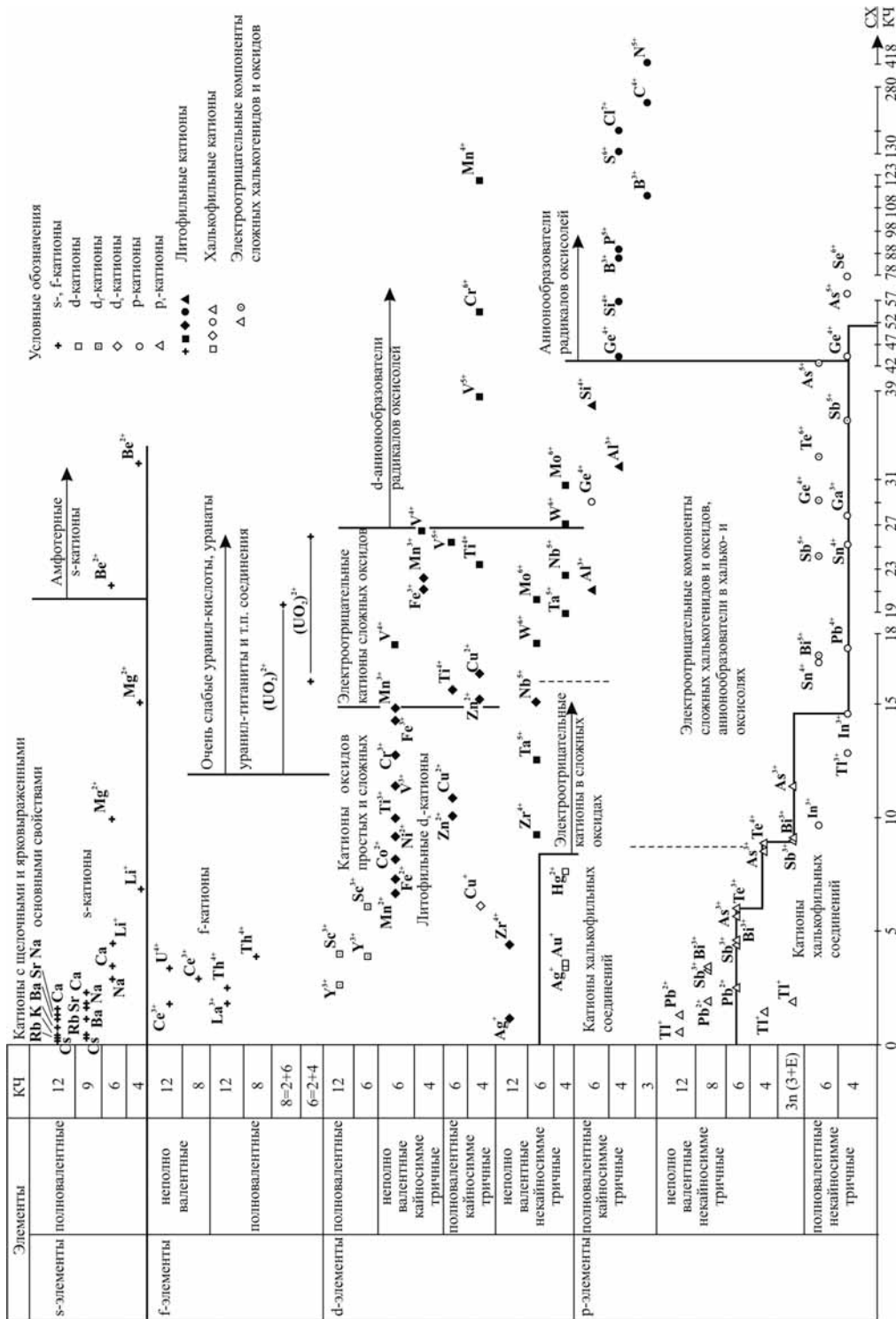


Рис. 11. Систематика важнейших, входящих в минералы ионов в табличном виде. Горовиков, 1997.



Таблица 1. Критерии выделения таксонов в структурно-химической систематике минералов А.А. Годовикова (Годовиков, 1997)

Таксон	Признак	Примеры
1	2	3
Тип	Преимущественный тип химической связи	<p>Пять типов, объединяющих все минеральные виды.</p> <p>1. Тип: Минералы преимущественно с металлическим и металлически-ковалентным типом связи — самородные металлы и полуметаллы, металлы и полуметаллы.</p> <p>2. Тип: Минералы преимущественно с металлически-ковалентным и ионно-ковалентным, редко с остаточным типом связи — халькогенные соединения и самородные VIa-неметаллы.</p> <p>3. Тип: Минералы преимущественно с ионно-ковалентным и ковалентно-ионным типом связи — неметаллы легкого (типического, кайносимметричного) VIa-элемента (O) — кислородные соединения.</p> <p>4. Тип: Минералы преимущественно с ковалентно-ионным и ионным типом связи — галогенные соединения.</p> <p>5. Тип: Углерод, его соединения (кроме карбонатов) и близкие к ним вещества.</p>
Квазитип*	Тип химической связи	<p>Два квазитипа* во втором типе минералов преимущественно с металлически-ковалентным и ионно-ковалентным, редко с остаточным типом связи — халькогенных соединений и самородных VIa-неметаллов:</p> <p>2а. элементарные (самородные) VIa-неметаллы (остаточная связь);</p> <p>2б. халькогенные соединения (металлчески-ковалентная и ионно-ковалентная, редко остаточная связь) — простые (изодесмические) → сложные → халькосоли (анизодесмические).</p>
Подтип	<p>1. Тип химической связи, тип катиона.</p> <p>2. Принадлежность минерала к изодесмическим и анизодесмическим соединениям</p>	<p>Два подтипа в 2б. Квазитипе* во втором типе:</p> <p>2б.1. халькогенные соединения сидеро- и халькофильных катионов (металлчески-ковалентная связь); 2б.2. халькофильные соединения литофильных катионов (ионно-ковалентная связь).</p> <p>Два подтипа в 3 типе минералов преимущественно с ионно-ковалентным и ковалентно-ионным типом связи — неметаллов легкого (типического, кайносимметричного) VIa-элемента (O) — кислородных соединений:</p> <p>3.1. оксиды и гидроксиды (изодесмические);</p> <p>3.2. оксосоли (анизодесмические).</p> <p>Два подтипа в 4 типе минералов преимущественно с ковалентно-ионным и ионным типом связи — галогенных соединений:</p> <p>4.1. галогениды (изодесмические);</p> <p>4.2. галогеносоли (анизодесмические) (с гексацианоферратами и гексатиоцианитами, родонидами).</p>
Квази-подтип*	<p>1. Тип аниона</p> <p>2. Тип катиона</p>	<p>Два квазиподтипа* в подтипе 2б.1 халькогенных соединений сидеро- и халькофильных катионов:</p> <p>2б.1а. сульфиды и сульфосоли сидеро- и халькофильных катионов;</p> <p>2б.1б. селениды и селеносоли сидеро- и халькофильных катионов.</p> <p>Шесть последовательно сменяющихся друг друга квазиподтипов* в подтипе 3.1 оксидов и гидроксидов (изодесмических), что отвечает переходу от катионов с низкими СХ к катионам с высокими СХ, от литофильных катионов через халькофильные к катионам неметаллических элементов с наиболее высокими СХ:</p> <p>3.1а. оксиды и гидроксиды литофильных катионов с низкими СХ;</p> <p>3.1б. оксиды и гидроксиды литофильных катионов со средними СХ;</p> <p>3.1в. оксиды и гидроксиды халькофильных катионов (кроме Va- и VIa-катионов);</p> <p>3.1г. оксиды и гидроксиды Va-катионов (As, Sb, Bi);</p> <p>3.1д. оксиды и гидроксиды VIa-катионов (Te);</p> <p>3.1е. оксиды и гидроксиды неметаллических (литофильных) катионов.</p>
Надкласс*	Катион	<p>Семь надклассов* выделяются в квазиподтипе* 3.1б оксиды и гидроксиды литофильных катионов с средними СХ:</p> <p>3.1б.1. оксиды Zr;</p> <p>3.1б.2. оксиды Sn<sup>4+</sup> и Ti<sup>4+</sup>;</p> <p>3.1б.3. оксиды и гидроксиды Nb<sup>5+</sup> и Ta<sup>5+</sup>;</p> <p>3.1б.4. оксиды и гидроксиды Mo и W;</p> <p>3.1б.5. оксиды и гидроксиды Mn<sup>4+</sup>;</p>

3.1б.6. оксиды и гидроксиды $V^{4+}$ ; 3.1б.7. оксиды и гидроксиды $V^{5+}$ .		
Надклассов* во 2 квазиподтипе нет, сразу же выделяются классы. Дальнейшую последовательность расположения классов целесообразно подчинить последовательности смены солей, отвечающей увеличению силы кислот, образующих эти соли. Такая последовательность в целом отвечает увеличению степени ионности связи между катионами и кислотными радикалами, уменьшению роли полимерных радикалов в солях, повышению их растворимости, изменению условий образования с гипогенных на все более и более низкотемпературные, вплоть до поверхностных, закономерному изменению многих физических свойств соответствующих минералов.		
Класс	Тип аниона (простой, комплексный) или соединения (простое, сложное)	Два класса в квазиподтипе* 2б.1а сульфиды и сульфосоли сидеро- и халькофильных катионов: 2б.1а.1. сульфиды сидеро- и халькофильных катионов; 2б.1а.2. сульфосоли сидеро- и халькофильных катионов. Два класса в надклассе* 3.1б.1 оксиды Zr: 3.1б.1а. простые оксиды Zr ; 3.1б.1б. сложные оксиды Zr → титанаты циркония → цирконотитанаты. Одиннадцать классов в 3.2 подтипе оксосоли (анизодесмические): 3.2.1. силикаты; 3.2.2. бораты; 3.2.3. карбонаты; 3.2.4. фосфаты; 3.2.4а. арсенаты; 3.2.5. сульфаты; 3.2.6. сульфиты; 3.2.6а. селениты; 3.2.7. нитраты; 3.2.7а. иодаты; 3.2.7б. роданаты (тиоцианаты).
2. Анион		
Квази-класс	Координационное число анионообразователя	Три квазикласса в классе 3.1б.7б сложные оксиды и гидроксиды $V^{5+}$ : (6)-ванадаты; (5)-ванадаты; (4)-ванадаты. Три квазикласса в классе 3.2.2. боратов: (4)-бораты; (3)-бораты; и (4)-(3)-бораты.
Подкласс	Величина СХ	Три подкласса в классе силикатов: 1) силикаты, содержащие катионы с низкими СХ; 2) силикаты, содержащие катионы со средними СХ; 3) силикаты халькофильных элементов.
Семейство	Близкий или идентичный (у полиморфов) состав, единый генезис или парагенезис	Семейство цеолитов, объединяющее подсемейства: томсонита, сколецита-натролита, гарронита, вайракита, гмелинита, стилбита, стеллерита, морденита. Семейство слюды, объединяющее ди- и триоктаэдрические слюды и все поли типы. Семейство халькопирита.
Подсемейство	Близкий состав, однотипные структуры	Пять подсемейств в семействе халькопирита: талнахита; собственно халькопирита; германита; бриаррита; морозевичита. Три подсемейства в семействе станнина: станноидита; собственно станнина; родостаннина.
Серия (род)	Непрерывные твердые растворы между двумя или большим числом крайних членов	Род форстерита и род граната среди средних тетра силикатов.
Группа	Однотипные состав и структура	Группа доломита, включающая доломит, анкерит, кутногорит, бенстонит, эйтелит, имеющих однотипную структуру, но не образующих друг с другом непрерывных твердых растворов.
Минеральный вид	Индивидуальное химическое соединение; конечный член твердых растворов; промежуточный член непрерывных рядов твердых растворов (родов) с условно принятыми границами по составу	Три минеральных вида в роде монтичеллита: монтичеллит, глаукохроит, кирштейнит. Пять минеральных видов в роде форстерита: форстерит, фаялит, тефроит, либенбергит, лайхунит.

1. H<sup>+</sup>
2. Li<sup>+</sup>
3. Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>, Fr<sup>+</sup>; Ba<sup>2+</sup> (КЧ = 12); Pb<sup>2+</sup> (КЧ = 12); Tl<sup>+</sup> (КЧ = 12)
4. Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>
5. Ca, Sr, Ba; Cu<sup>2+</sup> (КЧ = 12); Pb<sup>2+</sup> (КЧ = 12)
6. Sc, Y, Ln; Th, U
7. Be
8. Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>3+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, V<sup>3+</sup>, Ti<sup>3+</sup>
9. Ti<sup>4+</sup>
10. V<sup>4+</sup>, Mn<sup>4+</sup>
11. V<sup>5+</sup>
12. Cr<sup>6+</sup>
13. Zr<sup>4+</sup>, Hf<sup>4+</sup>
14. Nb<sup>5+</sup>, Ta<sup>5+</sup>
15. Mo<sup>4+</sup>, W<sup>4+</sup>
16. Mo<sup>6+</sup>, W<sup>6+</sup>
17. Ru, Rh, Pd; Os, Ir, Pt
18. Au
19. Cu<sup>+</sup>, Ag<sup>+</sup>, Tl<sup>+</sup> (КЧ = 2–4)
20. Zn, Cd
21. Hg
22. Ga, In, Tl<sup>3+</sup>
23. Pd<sup>2+</sup> (КЧ ≤ 12)
24. Ge, Sn
25. As<sup>3+</sup>, Sb<sup>3+</sup>, Bi<sup>3+</sup>, Te<sup>4+</sup>

Сопоставление приведенных рядов катионов (элементов) с изоморфными рядами В.И. Вернадского показывает, что во многом они близки, хотя и более полно учитывают минералого-кристаллохимическое сходство между катионами (элементами).

Эти ряды катионов (элементов) положены в основу дальнейшей систематики минералов, в пределах классов, выделяемых по характеру анионов.

Итак, по преимущественному типу химической связи выделяются высшие таксоны до классов включительно. Все минералы объединены в пять типов (таблица 1).

Хочется закончить словами А.А. Годовикова, который написал: «разработанные В.И. Вернадским основы систематики минералов, их дальнейшее развитие позволили разработать естественную систематику минералов, которой так не хватало во времена В.И. Вернадского и для создания которой он заложил прочный фундамент» (Годовиков, 2001).

Как показали годы, прошедшие с момента публикации структурно-химической систематики минералов, она позволяет расположить вновь открываемые минералы на определенные места. За это время было найдено место для 1457 минеральных видов, большая часть которых — это новые минеральные виды, меньшая — минералы, кото-

рые были известны ранее, но не попали в систематические таблицы, предложенные А.А. Годовиковым. Признаки, положенные в основу систематики, дают возможность перемены места минерала в ней в связи с уточнением формулы или структуры, позволяют выделять новые таксоны для новых минералов, представляющих не известные в природе в начале 90-х годов прошлого века химические соединения. Таким образом, **это не застывшее представление, а развивающаяся система.**

## Литература

- Барсанов Г.П. Принципы современной классификации минералов // Труды Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана. **1959.** Вып. 9. С. 3–8.
- Бетехтин А.Г. Минералогия. М.: Гостеолитиздат. **1950.** 956 с.
- Вернадский В.И. История минералов земной коры. Петроград: НХТИ. **1923.** Вып. 1. 208 с.
- Вернадский В.И. История минералов земной коры. Л.: НХТИ. **1927.** Т. 1. Вып. 2. С. 209–376.
- Годовиков А.А. Структурно-химическая систематика минералов. М.: Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН. **1997.** 247 с.
- Годовиков А.А. Классификация минералов от В.И. Вернадского до наших дней // Бюллетень комиссии по разработке наследия академика В.И. Вернадского. М.: Наука. **2001.** С. 48–64.
- Гольдшмидт В.М. Кристаллохимия. Л.: ОНТИ Химтеорет. **1937.** 61 с.
- Заварицкий А.Н. Введение в петрохимию изверженных горных пород / 2-е изд. М.-Л.: АН СССР. **1950.** 396 с.
- Костов И.Н. Геохимический принцип в классификации минералов // Проблемы геохимии. М.: АН СССР. **1965.** С. 457–462.
- Ферсман А.Е. Геохимия. Л.: Госхимтехиздат. **1933.** Т. 1. 328 с.
- Clark A.M. Hey's Mineral Index / 3<sup>rd</sup> Ed. London, Glasgow, New York, Tokyo, Melbourn, Madras. **1993.** 852 p.
- Dana E.S. The system of mineralogy of James Dwight Dana 1837–1868. N. Y: John Wiley and Sons, Inc. L., Chapman and Hall, Ltd. **1892.** 1134 p.
- Robert W.L., Campbell T.J., Rapp G.R.Jr. Encyclopedia of minerals / 2-nd. Ed. N.Y.: VNR. **1990.** 978 p.