
МИНЕРАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ЧИСЛЕ ВИДООБРАЗУЮЩИХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В МИНЕРАЛАХ: ИХ РАЗНООБРАЗИЕ, СЛОЖНОСТЬ, РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ В ПРИРОДЕ И ЭВОЛЮЦИЯ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ (ОБЗОР)

© 2020 г. Поч. член В. Г. Кривовичев^{1, *}, д. члены М. В. Чарыкова¹, С. В. Кривовичев^{1, 2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199164 Россия

²Кольский научный центр РАН, ул. Ферсмана, 14, Мурманская обл., Апатиты, 184209 Россия

*e-mail: v.krivovichev@spbu.ru

Поступила в редакцию 21.11.2019 г.

После доработки 21.11.2019 г.

Принята к публикации 06.12.2019 г.

Минеральная система определяется минимальным набором видообразующих химических элементов, необходимых для образования минерального вида. Установлено, что только 70 химических элементов выступают в качестве видообразующих, число которых в минералах варьирует от 1 до 10. Проведен сравнительный анализ распределения минеральных видов по минеральным системам для отдельных химических элементов (селен и теллур) и для геологических объектов различного генезиса (высокощелочных массивов, эвапоритов, продуктов современной фумарольной деятельности, гидротермальных месторождений). Установлены статистически значимые положительные связи ($R^2 > 0.95$) между химической и структурной сложностями и числом видообразующих элементов в минералах. Вслед за Р. Хейзенем были рассмотрены четыре группы минералов, представляющие четыре стадии минеральной эволюции: (I) “Uг-минералы”, (II) минералы из хондритовых метеоритов, (III) минералы катархея и (IV) современные минералы. Полученные данные показывают, что количество видообразующих элементов в минералах, их средние содержания, а также средние химические и структурные сложности четырех групп минералов закономерно и статистически значимо возрастают в ходе эволюции минерального разнообразия от стадии I к стадии IV. Наблюдаемые корреляции между химическими и структурными сложностями, понимаемыми в терминах информации Шеннона, позволяют предположить, что новые уровни сложности и диверсификации, наблюдаемые в эволюции минерального разнообразия в течение геологического времени, достигаются за счет химической дифференциации, которая благоприятствует локальным концентрациям отдельных редких элементов и созданию новых минералообразующих сред.

Ключевые слова: минеральные виды, видообразующие элементы, кристаллохимическая формула, минеральные системы, химическая сложность, структурная сложность, эволюция минералов, химическая дифференциация

DOI: 10.31857/S0869605520010062

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время новые подходы, основанные на анализе баз данных о минералах (IMA, mindat.org), включают: (1) эволюцию минералов; (2) экологию минералов;

(3) сетевые методы анализа и визуализации (Hazen et al., 2019). Эти направления исследований способствуют более глубокому пониманию коэволюции геосферы и биосферы и роли минералов в геологической истории Земли. Следует отметить, что вопросы, связанные с эволюцией минералов и процессов минералообразования, достаточно широко обсуждались отечественными минералогами в Ленинграде 26–29 января 1982 г. на VI съезде Всесоюзного минералогического общества, посвященном теме “Минералы, горные породы и месторождения полезных ископаемых в геологической истории” (Попкова, 1982). На съезде рассматривались эволюционные представления в минералогии и пути их развития (Н.П. Юшкин), эволюция минералообразования в истории геологического развития литосферы (А.Г. Жабин), общие закономерности развития геологических процессов (Д.В. Рундквист), эволюционный анализ гранитоидных формаций (Ю.Б. Марин), эволюция редкометаллической минерализации в ходе геологической истории Земли (А.И. Гинзбург) и мн. др. Из текстов некоторых опубликованных докладов (Григорьев, 1982; Рундквист, 1982; Юшкин, 1982), а также смежных публикаций (Жабин, 1979, 1983; Марин, 1973; Юшкин, 2008; и др.) следует, что проблема эволюции минералов и минерального разнообразия была проработана глубоко и оригинально. Так, было проведено четкое различие филогенеза и онтогенеза минеральных видов (Д.П. Григорьев, Д.В. Рундквист); выделены четыре глобальных периода эволюции неорганической природы (Д.В. Рундквист); установлена ритмичность (пульсационность) и направленность эволюции (Д.В. Рундквист, Н.П. Юшкин); выявлено усложнение во времени структурно-вещественной организации аксессуарных минералов в гранитоидах (Ю.Б. Марин), обоснована минералогическая наследственность (Н.П. Юшкин, А.П. Хомяков, А.Г. Жабин); и др.

В последние годы эти идеи отечественных минералогов об эволюции минерального мира получили развитие в работах, посвященных изучению минерального разнообразия и эволюции минерального состава Земли во времени (Кривовичев, 2013а; Hazen et al., 2008; Hazen, Ferry, 2010; Hazen, 2013; Hazen et al., 2011, 2013, 2014, 2015, 2019; Krivovichev, 2013b; Krivovichev et al., 2018a, 2018b, и др.). В рамках этой парадигмы особый интерес представляют исследования эволюции минералов отдельных химических элементов: урана и тория (Hazen et al., 2009), ртути (Hazen et al., 2012), бериллия (Grew, Hazen, 2014), углерода (Hazen et al., 2016), бора (Grew et al., 2016, 2017), кобальта (Hazen et al., 2017), хрома (Liu et al., 2017), ванадия (Liu et al., 2018) и лития (Grew et al., 2019). Результаты этих исследований привели к формулировке нового научного направления в минералогии, названного Р. Хейзенем с соавторами (Hazen et al., 2015) “минеральной экологией” (mineral ecology). В задачи минеральной экологии входит анализ процессов, влияющих на распределение, разнообразие, сложность и распространенность минералов, включая взаимодействие минералов с окружающей средой в абиотических и биотических системах. В качестве основного метода для обработки минералогических баз данных минеральная экология использует математическую статистику (Hystad et al., 2015a, 2015b, Hazen et al., 2015) в сочетании с различными методами для анализа и визуализации сложных многомерных систем, отражающих разнообразие и особенности распределения минералов в природных геологических объектах (Hazen et al., 2019).

Альтернативный подход к сравнительной оценке минерального разнообразия геологических объектов и их эволюции основан на концепции минеральных систем (Кривовичев, Чарыкова, 2013а, 2013б; Krivovichev et al., 2018b), согласно которой любой минерал может быть отнесен к определенной минеральной системе, состоящей из набора минимального количества видообразующих химических элементов, необходимых для его образования. Минеральные системы можно отнести к концентрационным показателям (по Н.П. Юшкину, 1982), которые используются для количественного сравнительно-исторического анализа эволюции минерального вещества в геологической истории.

В данной работе приведено краткое изложение концепции минеральных систем с анализом области использования и определения основных направлений дальнейшего развития.

2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И МЕТОДЫ

2.1. Минеральный вид

В рамках предложенной концепции мы рассматриваем только минеральные виды *sensu stricto*, т.е. “элементарные вещества или химические соединения, кристаллизованные в результате гео- или космохимического процесса в естественных физико-химических системах” (Бокий, 1997). Поскольку кристаллохимические формулы минеральных видов состоят только из видообразующих элементов, особое внимание было уделено их унификации. Неточности, ошибки и противоречия, которые распространены при написании формул минералов, достаточно детально разобраны в работах А.Г. Булаха и соавторов (Булах, 2009а, 2009б; Булах и др., 2014). Вместе с тем, отнесение химического элемента к разряду видообразующих определяется правилами выделения новых минеральных видов (Mandarino et al., 1984; Mandarino, 1984; Nickel, Mandarino, 1987; Nickel, 1992, 1995; Mills et al., 1995; Nickel, Grice, 1998). Так, в отношении минералов переменного состава границы между минеральными видами задаются согласно “правилу 50%” для бинарных изоморфных рядов, а в многокомпонентных твердых растворах — по преобладанию того или иного элемента в данной структурной позиции. В более сложных случаях авторы следовали рекомендациям, утвержденным ММА (Nickel, 1992; Hawthorne, 2002; Natert, Burke, 2008; Bosi et al., 2019) с учетом обсуждения этих вопросов в отечественной литературе (Булах, 2009а, 2009б; Доливо-Добровольский, 2009; Булах и др., 2014).

В изоморфных рядах, как с изовалентными, так и с гетеровалентными замещениями, в качестве самостоятельных минеральных видов рассматриваются только конечные члены. Например, в изоморфном ряду форстерит-фаялит существуют только два минеральных вида: форстерит с идеализированной формулой $Mg_2(SiO_4)$ и фаялит — $Fe_2(SiO_4)$, а в изоморфном ряду альбит–анортит: альбит с формулой $Na(AlSi_3O_8)$ и анортит — $Ca(Al_2Si_2O_8)$.

Таким образом, были составлены формулы минеральных видов, т.е. гипотетических твердых фаз, сложенных только видообразующими химическими элементами. Именно это позволяет однозначно выделить минеральные системы и систематизировать минеральные виды, а также сопоставлять различные геологические объекты по их минеральному составу и оценивать эволюцию минерального разнообразия земной коры в геологической истории. Кроме того, выверенные формулы минеральных видов необходимы для расчета химической сложности минералов.

2.2. Минеральная система

Минеральная система представляет собой минимальный набор видообразующих элементов, необходимых для образования кристаллической структуры минерала. В этом смысле понятие “видообразующие элементы” соответствует понятию компонентов термодинамической системы, под которыми понимаются “вещества, которые, будучи взятыми в наименьшем числе, позволяют образовывать каждую фазу системы”. Похожий подход используется, например, в химической литературе для систематизации, хранения и поиска термодинамической информации о различных соединениях. Принятая нами (Кривовичев, Чарыкова, 2013а, 2013б) последовательность записи символов элементов в минеральных системах базируется на так называемой “термохимической” последовательности расположения химических элементов и соответствующих им однокомпонентных систем (рис. 1). Так, например, кристаллохимиче-

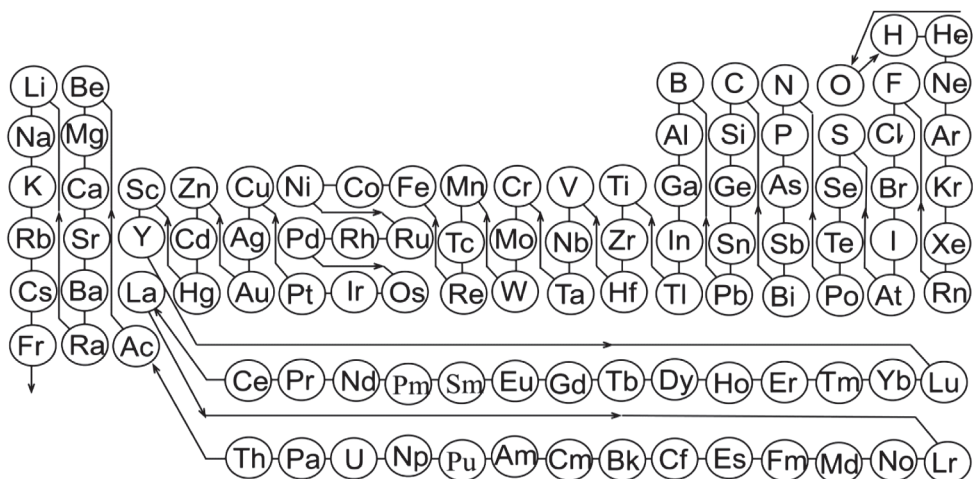


Рис. 1. “Термохимическая” последовательность расположения химических элементов (и соответствующих им однокомпонентных систем).

Fig. 1. Thermochemical sequence of chemical elements and corresponding single-component systems.

ская формула микроклина, $K(AlSi_3O_8)$, отвечает системе $OSiAlK$, а формула мусковита, $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$, – системе $OHSiAlK$.

2.3. Минеральный кларк

Было установлено, что видообразующими являются 70 химических элементов (табл. 1). Число минеральных видов, в которые данный химический элемент входит как видообразующий, деленное на общее число минеральных видов, мы назвали *минеральным кларком* этого элемента (Кривовичев, Чарыкова, 2015). Так, например, минеральный кларк кислорода в земной коре составляет 81.60% (табл. 1), т.к. число минералов, в которых кислород является видообразующим элементом, составляет 81.60% от общего числа минеральных видов и т.д. По сути, эти величины аналогичны атомным кларкам, однако между ними имеется существенное различие. Так, атомные кларки показывают распространенность элементов в земной коре в относительных или абсолютных единицах (в % или ppm) и рассчитываются исходя из средних содержаний элементов. Следовательно, в случае атомных кларков не важно в какой форме элемент находится в минерале, является ли он видообразующим или присутствует в виде изоморфной примеси.

В целом, минеральные кларки пропорциональны атомным. Вместе с тем, для ряда элементов наблюдается резкое несоответствие между минеральными и атомными кларками. Например, атомные кларки серы и алюминия резко различны (227 и 63400 ppm соответственно), а минеральные кларки примерно равны (20.70 и 19.39% соответственно). Причин таких несоответствий довольно много и, по-видимому, при общем положительном тренде повышения числа минеральных видов того или иного элемента с увеличением его атомного кларка, существует довольно много факторов, усложняющих эту зависимость для ряда элементов (см., напр., Урусов, 2010; Christy, 2015).

Таблица 1. Минеральные (МК) и атомные (АК) кларки 70 видообразующих химических элементов
Table 1. Mineral (МК) and atomic (АК – crustal abundance) clarks of 70 essential species-defining chemical elements

№ п/п	Элемент	МК, в %	АК, ppm**	№ п/п	Элемент	МК, в %	АК, ppm**
1	O	81.60	599000	36	Nb	2.2	4.5
2	H	55.63	28900	37	Sr	2.2	88
3	Si	29.24	209000	38	N	1.86	28
4	Ca	23.00	21500	39	Hg	1.86	0.0088
5	S	20.70	227	40	Sn	1.84	0.40
6	Al	19.39	63400	41	Cr	1.63	41
7	Fe	18.52	21000	42	Pd	1.29	0.0029
8	Na	18.46	21300	43	Tl	1.15	0.086
9	Cu	12.44	20	44	Mo	1.15	0.26
10	P	11.71	705	45	Co	1.15	8.8
11	As	11.61	0.50	46	Ta	0.95	0.23
12	Mg	11.11	19900	47	W	0.85	0.14
13	Mn	10.72	359	48	La	0.77	5.8
14	Pb	9.51	1.4	49	Pt	0.59	0.00053
15	K	8.28	11100	50	Ge	0.54	0.43
16	C	7.83	346	51	Au	0.52	0.00042
17	F	6.93	585	52	Cd	0.5	0.028
18	Cl	6.91	145	53	I	0.46	0.074
19	Ti	6.18	2450	54	Nd	0.46	6.0
20	B	5.35	19	55	Th	0.46	0.86
21	U	4.79	0.24	56	Cs	0.4	0.47
22	Sb	4.6	0.034	57	Sc	0.23	10.2
23	Zn	4.24	22	58	Rh	0.26	0.0002
24	Ba	4.24	64	59	Ir	0.26	0.00011
25	V	4.2	49	60	In	0.24	0.045
26	Bi	4.1	0.00085	61	Br	0.14	0.62
27	Te	3.19	0.00016	62	Ga	0.1	5.7
28	Ag	3.15	0.014	63	Ru	0.1	0.0002
29	Ce	2.69	9.9	64	Yb	0.1	0.38
30	Ni	2.56	30	65	Os	0.08	0.00016
31	Be	2.34	6.5	66	Rb	0.06	22
32	Se	2.26	0.013	67	Sm	0.04	0.97
33	Y	2.26	7.7	68	Re	0.04	0.000078
34	Zr	2.24	38	69	Hf	0.02	0.35
35	Li	2.24	60	70	Gd	0.02	0.82

* Минеральный кларк – число минеральных видов, в которые данный химический элемент входит как видообразующий, деленное на общее число минеральных видов (в %); ** Атомный кларк – количество атомов элемента в земной коре на миллион атомов (ppm) (Christy, 2015).

2.3. Структурная и химическая сложность минералов

Структурная сложность: количество структурной информации Шеннона на атом ($^{str}I_G$) и на элементарную ячейку ($^{str}I_{G,total}$) рассчитывалось с использованием подхода, разработанного С.В. Кривовичевым (Krivovichev, 2012, 2013, 2014, 2016a, 2016b, 2018, Krivovichev et al, 2018a, 2018cb) согласно следующим уравнениям:

$$^{str}I_G = -\sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i \quad (\text{бит/атом}), \quad (1)$$

$$^{str}I_{G,total} = -\gamma \sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i, \quad (\text{бит/ячейка}), \quad (2)$$

где k – число различных кристаллографических орбит [независимых кристаллографических позиций Уайкоффа (Wyckoff)] в структуре, p_i – вероятность случайного выбора атома с i -ой кристаллографической орбиты

$$p_i = m_i / \gamma, \quad (3)$$

где m_i – кратность кристаллографической орбиты (т.е. число атомов конкретной позиции Уайкоффа в приведенной элементарной ячейке), γ – общее число атомов в приведенной элементарной ячейке.

Для кристаллических структур гидратированных минералов, в которых не определены позиции водорода, было предложено (Pankova et al., 2018) использовать процедуру H-коррекции путем введения “фиктивных” атомов H в структурные наборы данных.

По аналогии со структурной сложностью, химическая сложность оценивалась по количеству химической информации на атом ($^{chem}I_G$) и на формульную единицу, ф.е. ($^{chem}I_{G,total}$). Следуя этому подходу, для идеализированной химической формулы минерального или неорганического соединения, $E_{c1}^{(1)} E_{c2}^{(2)} \dots E_{ck}^{(k)}$, где $E^{(i)}$ – i -ый химический элемент в формуле, а c_i – его целочисленный коэффициент, химическая информация может быть рассчитана следующим образом (Krivovichev et al., 2018a):

$$^{chem}I_G = -\sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i \quad (\text{бит/атом}), \quad (4)$$

$$^{chem}I_{G,total} = -e \sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i \quad (\text{бит/ф.е.}), \quad (5)$$

где k – число различных элементов в формуле, p_i – вероятность случайного выбора для атома i -го элемента

$$p_i = c_i / e, \quad (6)$$

где e – число атомов в химической формуле

$$e = \sum_{i=1}^k c_i. \quad (7)$$

Для расчета химической сложности использовались кристаллохимические формулы минеральных видов (Krivovichev et al., 2018b).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Классификация минеральных систем

Для каждого минерального вида определены видообразующие элементы, по набору которых выделены n -компонентные природные химические системы (где $n = 1, 2, 3, 4$,

Таблица 2. Характеристика минеральных систем, основанных на числе видообразующих химических элементов в минералах (статистика 2019 г.)

Table 2. Characteristics of mineral systems based on the number of essential species-defining chemical elements in minerals (statistics of 2019)

Минеральная система*	Число минералов в системе	Минеральная система*	Число минералов в системе
1	45	7	344
2	423	8	122
3	768	9	30
4	1428	10	10
5	1545	Всего	5420
6	705		

* Число видообразующих элементов в формуле минерала.

5, 6, 7, 8, 9, 10). В табл. 2 приведены уточненные (статистика 2019 г.) данные по числу минералов в различных системах. Распределение числа минералов по системам разной компонентности подчиняется нормальному, Гауссовому закону (рис. 2) с весьма значимым коэффициентом детерминации ($R^2 = 0.983$).

Была проведена систематизация минеральных систем, основанная на изложенном выше подходе. Мы в данном случае поставили перед собой задачу построения естественной (по Г.Б. Бокию, 1997) классификации минеральных видов, в которой в качестве основной структурной единицы выбрана минеральная система (Кривовичев, Чарыкова, 2013а, 2013б). Одна и та же минеральная система может включать несколько минералов с одинаковым набором видообразующих химических элементов.

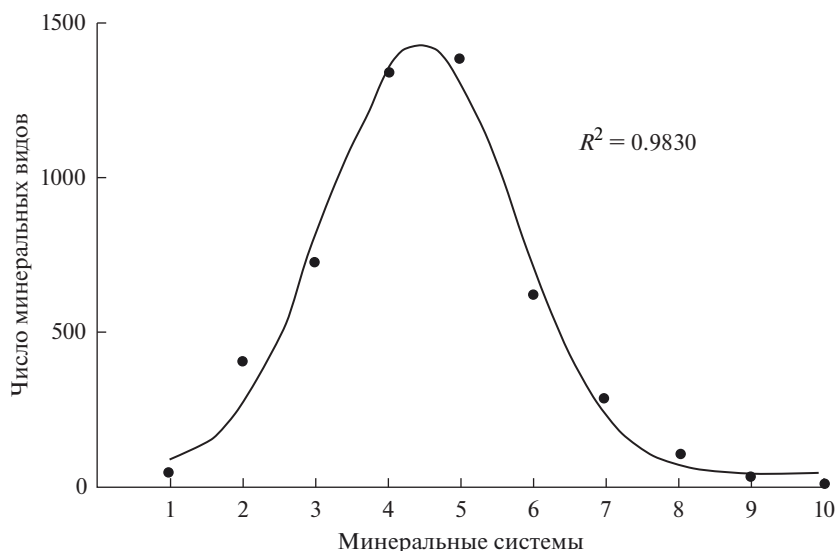


Рис. 2. Распределение минеральных видов по минеральным системам, основанное на числе видообразующих элементов.

Fig. 2. Distribution of mineral species on mineral systems based on the number of essential, species-defining chemical elements in minerals.

Важным преимуществом применяемой классификации является возможность установить строгий порядок для минеральных видов, когда каждый из них имеет однозначное положение. В пределах каждой минеральной системы минералы располагаются в порядке увеличения числа атомов первого элемента, в группе минералов с одинаковым числом атомов первого элемента – в порядке возрастания общего числа атомов второго элемента и т.д.

3.2. Минеральные системы селена и теллура

Рассмотрим возможности применения концепции минеральных систем для анализа особенностей минерального разнообразия отдельных элементов на примере теллура и его геохимического аналога селена. Ранее подобный подход был использован нами для построения классификации минералов селена и систематики их термодинамических характеристик (Charykova, Krivovichev, 2017; Krivovichev et al., 2017, 2019).

В настоящее время (до октября 2019 года включительно) известно 123 минеральных вида, в состав которых в качестве видообразующего элемента входит селен и 166 минералов, для которых видообразующим элементом является теллур (Krivovichev et al., 2019; mindat.org; Pasero, 2019).

По аналогии с классификацией минералов селена (Charykova, Krivovichev, 2006, 2017; Krivovichev et al., 2017, 2019), мы разделили минералы теллура по химическому составу на две группы: бескислородные (самородный теллур, интерметаллиды с теллуrom и теллуриды; всего 81 минерал) и кислородсодержащие (оксиды теллура, теллуриды и теллулаты; всего 85 минералов). Теллуриды, в которых теллур имеет степень окисления -2 , достаточно хорошо изучены, они широко распространены в эндогенных месторождениях различного генетического типа (Иванов, Юшко-Захарова, 1989). В редких сульфосолях теллур является кристаллохимическим аналогом As (например, в минерале группы тетраэдрита голдфилдите, $\text{Cu}_{10}(\text{TeS}_3)_4\text{S}$: см. Kalbskopf, 1974; Makovicku, Karup-Møller, 2017). В приповерхностных обстановках теллур, подобно другим халькофильным элементам, легко окисляется с образованием оксидов и окисолой, в которых он находится в степенях окисления $+4$ и/или $+6$.

Для каждого минерала теллура по набору видообразующих элементов нами выделена минеральная система. В табл. 3 приведены данные по минеральным системам бескислородных и кислородсодержащих минералов теллура, а также аналогичные данные по минералам селена. Статистическая обработка этих данных показывает, что средние арифметические значения числа видообразующих элементов в не содержащих кислород минералах теллура и селена существенно ниже, чем в кислородсодержащих минералах. Сравнение этих значений с помощью критерия Стьюдента показывает, что различия статистически значимы с уровнем достоверности более 99.99%.

Для минералов теллура видообразующими являются 27 химических элементов (Кривовичев, Чарыкова, 2018). Определенный интерес представляет сопоставление минеральных и атомных кларков теллура и селена. По данным А. Кристи (Christy, 2015) атомный кларк теллура меньше атомного кларка селена примерно в 80 раз (0.00016 и 0.013 ppm соответственно). В тоже время минеральный кларк теллура превышает минеральный кларк селена почти в 1.5 раза (3.2 и 2.3% соответственно; табл. 1). Такое расхождение атомных и минеральных кларков Te и Se обусловлено несколькими причинами. Так, в эндогенных условиях теллур, в отличие от селена, практически не рассеивается в кристаллических решетках сульфидов и селенидов, а стремится образовывать собственные минеральные виды (Иванов, Юшко-Захарова, 1989). Кроме того, определенный вклад в увеличение числа минералов теллура вносит также его способность образовывать в восстановительных условиях интерметаллические соединения (например, билибинскит, безсмертовит, богдановит и др.; см. Иванов, Юшко-Захарова, 1989).

Таблица 3. Распределение минеральных видов теллура и селена по минеральным системам, основанным на числе видообразующих элементов**Table 3.** Distribution of tellurium and selenium minerals according to the number of the species-defining elements

N	Минералы теллура						Минералы селена					
	теллуриды, интерметаллиды, теллур		оксиды, теллуриды, теллулаты		все минералы теллура		селениды и селен		оксид, селениты и селенаты		все минералы селена	
	m_i	p_i	m_i	p_i	m_i	p_i	m_i	p_i	m_i	p_i	m_i	p_i
1	1	1.2	0	0	1	0.6	1	1.2	0	0	1	0.8
2	30	37.0	2	2.3	32	19.3	38	44.2	1	2.7	39	31.7
3	38	47.0	21	24.7	59	35.5	35	40.7	3	8.1	38	30.9
4	7	8.6	24	28.2	31	18.7	7	8.1	14	37.9	21	17.1
5	5	6.2	26	30.7	31	18.7	5	5.8	12	32.4	17	13.8
6	0	0	11	12.9	11	6.6	0	0	5	13.5	5	4.1
7	0	0	1	1.2	1	0.6	0	0	2	5.4	2	1.6
Всего	81	100.0	85	100.0	166	100.0	86	100.0	37	100.0	123	100.0

Примечание: N – число видообразующих элементов; m – число минералов; p – частота встречаемости, %.

Еще более контрастно различия в поведении теллура и селена проявляются при сравнении количеств кислородсодержащих минералов (Se – 34, Te – 85), устойчивых в окислительных условиях. Последнее обусловлено необычайным разнообразием кристаллических структур кислородсодержащих соединений теллура (Christy et al., 2016a, b), а именно способностью полиэдров TeO_n к полимеризации с образованием анионных группировок в виде олигомеров, цепочек, слоев и сложных трехмерных каркасов. При этом Te^{6+} образует октаэдрические полиэдры $[Te^{6+}O_6]^{6-}$, а Te^{4+} имеет неподеленную электронную пару и может образовывать несколько типов асимметричных полиэдров $[Te^{4+}O_3]^{2-}$ (Christy et al., 2016a).

3.3. Сравнительный анализ геологических объектов

Особый интерес представляет сравнение различных геологических объектов по минеральному составу на основе концепции минеральных систем. Ниже мы приводим примеры такого анализа и демонстрируем продуктивность предлагаемого подхода для оценки минерального разнообразия конкретных геохимических сред. В качестве примеров были выбраны геологические объекты, которые можно отнести к “объектам-рекордсменам” (по И.В. Пекову, 2001). Эти объекты характеризуются обширным списком минералов, включая впервые открытые в них минеральные виды.

3.3.1. Высокощелочные массивы: Хибины, Ловозеро (Россия) и Сен-Илер (Канада). Массивы Кольского полуострова (Хибины и Ловозеро) и Квебека (Сент-Илер) сложены высокощелочными магматическими породами и их производными — пегматитами и гидротермалитами, аномально обогащенными редкими литофильными (Nb, Zr, REE, Sr, Ba и др.) и летучими компонентами. Количественная характеристика распределения элементов в этих комплексах определяется в первую очередь химическим составом магматических тел, их дифференциацией в процессах формирования интрузивов, а также постмагматическими процессами, протекавшими в совершенно иной физико-химической обстановке и обусловившими перераспределение химических элементов в соответствии с новыми условиями.

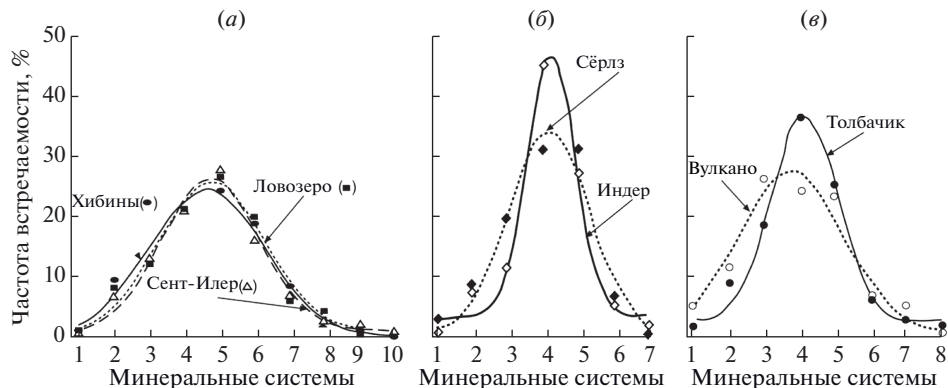


Рис. 3. Распределение минеральных видов по минеральным системам, основанных на числе видообразующих элементов в высокощелочных массивах (а), эвапоритах (б) и продуктах вулканической деятельности (в).
Fig. 3. Distribution of mineral species by mineral systems based on number of species-defining elements in peralkaline plutons (a), in evaporite deposits (b) and in the products (minerals) of fumarole activity (c).

По характеру распределения минералов по различным системам сравниваемые массивы практически не отличаются друг от друга (рис. 3, а), что подтверждается и статистическими оценками соответствия этих распределений (Кривовичев, Чарыкова, 2015).

Сопоставление числа минералов видообразующих элементов для трех сравниваемых массивов показывает, что к “избыточным” видообразующим элементам (т.е. элементам, минеральные кларки которых в данных объектах выше их минеральных кларков в земной коре), относятся Si, Na, K, C, F, Ti, Ce, Zr, Nb, Sr, Th, а к дефицитным – S, Cu, Pb, Cl, B, Te, Ag, Ni, Be. Сравнение полученных данных с “кларками концентрации” петрогенных элементов комплекса щелочно-ультраосновных пород Кольского полуострова (Кухаренко и др., 1965) показывает, что характеристики ряда химических элементов с помощью атомных и минеральных кларков существенно различаются. Так, например, кларки концентрации Si, Al и Na существенно меньше единицы, а Mg, Mn и Ca в соответствии с их минеральными кларками отнесены нами к “избыточным” элементам. Для других петрогенных элементов эти различия менее очевидны.

3.3.2. Эвапориты: Индер, Казахстан, и озеро Сёрлз, США. Для сравнительной характеристики минеральных систем, формирующихся в ходе процессов современной эвапоритовой седиментации, были выбраны два месторождения: соляные озера Индер (Казахстан) и Сёрлз (США) (Кривовичев, Чарыкова, 2016). Характер распределения числа минералов в зависимости от числа видообразующих элементов для обоих месторождений близок к нормальному (рис. 3, б), что подтверждается статистическими оценками.

Для количественной характеристики минерального разнообразия рассматриваемых объектов для них были рассчитаны минеральные кларки видообразующих элементов. Установлено (Кривовичев, Чарыкова, 2016), что к “избыточным” видообразующим элементам, для которых минеральные кларки в обоих объектах повышены, относятся Ca, S, Cl, B, а к “дефицитным” – Al и Si, что представляется совершенно естественным для эвапоритов. Минеральные кларки таких элементов, как Mg, K, Sr существенно выше для озера Индер, а для озера Сёрлз они находятся на уровне средних значений для Земли в целом. Обратная картина наблюдается для Na и C. Эти различия в минеральном составе вполне объяснимы, т.к. рассолы озера Индер, из которых про-

исходит осаждение эвапоритов, относятся к сульфатному типу (по гидрохимической классификации Курнакова-Валяшко), а рассолы озера Сёрлз – к карбонатному (содовому) типу (Валяшко, 1962).

3.3.3. Фумаролы действующих вулканов: Толбачик, Россия и Вулкано, Италия. Проведена сравнительная оценка минерального состава продуктов современной фумарольной деятельности на активных вулканах: Толбачик (Камчатка, Россия) и Вулкано (Сицилия, Италия), которые характеризуются обширным списком минералов, включая открытые в них новые минеральные виды (Кривовичев, Чарыкова, 2017). Для обоих вулканов характер распределения числа минералов в продуктах фумарол в зависимости от числа видообразующих элементов близок к нормальному (рис. 3, в).

Минеральные кларки видообразующих элементов показывают, что рассматриваемые объекты проявляют как сходные черты, так и заметные различия. Так, к “избыточным” видообразующим элементам, для которых число минеральных видов в обоих объектах повышено по сравнению с минеральными кларками земной коры, относятся Ti , S , Cl , F , Na , а к “дефицитным” – H , Ca , Fe , Mn . Минеральные кларки таких элементов, как Cu , Se , V , Mg , Zn , As , F , существенно выше для Толбачика, а для Вулкано находятся ниже средних значений для земной коры в целом. Обратная картина наблюдается для I , Br , K , Pb , Al , Fe , Bi , Sn (Кривовичев, Чарыкова, 2017).

Более наглядно различия между продуктами фумарол Толбачика и Вулкано иллюстрирует рис. 4, на котором по оси абсцисс графика нанесены химические элементы в порядке уменьшения числа минералов в продуктах фумарол Толбачика, а по оси ординат – отношения минеральных кларков Толбачика и Вулкано ($K_i = \text{МК}_i^{\text{Тол}} / \text{МК}_i^{\text{Вул}}$), т.е. величины, показывающей во сколько раз Толбачик обогащен ($K_i > 1$) или обеднен ($1/K_i > 1$) тем или иным видообразующим элементом (i) в сравнении с Вулкано. Значения K_i , выше линии 1–1 отвечают видообразующим элементам, минеральные кларки которых выше в отложениях фумарол Толбачика, по сравнению с Вулкано. К таким элементам относятся серебро, главным образом, Cu , Se , As , Zn и V . Соответственно, величины ниже линии 1–1 отвечают видообразующим элементам, минеральные кларки которых выше в отложениях фумарол Вулкано, по сравнению с Толбачиком: Bi , Pb , V , Ti и др. Как видно из рис. 4, в отложениях фумарол Толбачика по сравнению с Вулкано выше минеральные кларки хлора и фтора и ниже минеральный кларк серы. Это хорошо согласуется с составами высокотемпературных газовых выбросов этих вулканов, приведенными в работе (Oppenheimer et al., 2014), а также с данными о концентрациях редких элементов в газообразных пробах, отобранных из фумарол Вулкано (Cheynet et al., 2000). Авторы последней статьи выделяют для Вулкано в качестве наиболее характерных компонентов Pb , Bi и As , а также Zn , Ti , Cd . При этом проведенное ими термодимическое моделирование (экспериментальное и расчетное) показало, что при охлаждении газовых выбросов образуются твердые сульфиды и сульфосоли преимущественно висмута и свинца, а мышьяк остается в составе газообразных соединений. Действительно, по сравнению с продуктами фумарол Толбачика, характерной особенностью минерального состава фумарол Вулкано является обилие сульфидов и сульфосолей висмута (Garavelli et al., 1997; Campostrini et al., 2010; и др.), а также присутствие открытых недавно сульфогалогенидов висмута (Garavelli et al., 2005; Gramaccioli et al., 2008; Demartin et al., 2009, 2010).

Как уже было сказано, для Толбачика установлено резкое преобладание минеральных кларков Cu , Se , Zn , K , As и V (рис. 4). Так, на Вулкано обнаружено только два минерала меди: малахит и азурит, образование которых связано с процессами окисления первичных сульфидов меди. В то же время на Толбачике установлено более 80 минералов меди в продуктах фумарол (mindat.org). Аналогичная картина наблюдается и для селена: на Вулкано он установлен только в самородном состоянии и в виде изоморфной примеси в сульфидах (Garavelli et al., 1997), а в продуктах фумарол Толбачика обна-

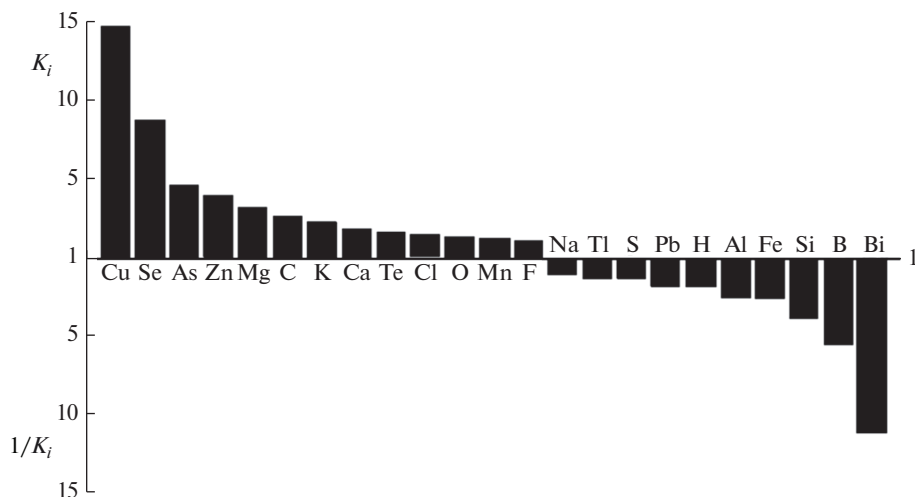


Рис. 4. Отношения минеральных кларков видообразующих элементов (K_i) в продуктах современной фумарольной деятельности на вулканах Толбачик и Вулкано (табл. 4).

Fig. 4. Ratio of mineral clark for essential, species-defining chemical elements (K_i) in the products (minerals) of the Tolbachik and Vulcano (see table 4).

ружено более 10 селенитов (mindat.org). Отметим также, что минералы ванадия на Вулкано не установлены, а на Толбачике найдено 19 минеральных видов.

3.3.4. Гидротермальные месторождения: Отто Маунтин (США) и Эль Драгон (Боливия). Для сравнительного анализа были выбраны два месторождения, отличающиеся уникальной минералого-геохимической специализацией в отношении теллура и селена: Отто Маунтин (Калифорния, США) и Эль Драгон (Потоси, Боливия) (Кривовичев, Чарыкова, 2017).

Так, в первичных рудах месторождении Отто Маунтин в настоящее время установлены теллурид (гессит) и два сульфотеллурида (кервеллеит и тетрадимит) серебра и висмута. Главной особенностью зоны окисления Отто Маунтин является наличие оксисолей теллура, которые в настоящее время включают 25 минеральных видов (2 теллурита, один теллурид-теллурат и 22 теллурата). Примечательно, что в зоне окисления этого месторождения были впервые найдены и описаны 14 оксисолей теллура (Housley et al., 2011; Christy et al., 2016b).

В месторождении Эль Драгон (Боливия) установлено 26 минералов селена (17 селенидов, самородный селен, 6 селенитов и 2 селенит-селената), из которых 4 селенида и два селенита впервые найдены в этом месторождении (Grundmann, Förster, 2017). Отметим также, что минералов теллура в месторождении Эль Драгон не установлено.

Характер распределения числа минералов в зависимости от числа видообразующих элементов для обоих месторождений близок к нормальному (рис. 5, а, в). Для каждого месторождения минералы были разделены на две группы: (1) минералы, образующиеся в эндогенных условиях (сульфиды, теллуриды, селениды и жильные минералы) и (2) минералы, образующиеся в экзогенных условиях в результате процессов выветривания (соли кислородных кислот и другие продукты выветривания). Эти данные сведены в табл. 4 и графически представлены на рис. 5, б, г. Они показывают, что “экзогенные минералы” состоят из большего числа видообразующих элементов, чем “эндогенные минералы”. Сравнение этих значений с помощью критерия Стьюдента

Таблица 4. Распределение минеральных видов в месторождениях Отто Маунтин (США) и Эль Драгон (Боливия) по минеральным системам
Table 4. Distribution of minerals in the Otto Mountain (USA) and El Dragon (Bolivia) deposits according to the number of the species-defining elements

N	Отто Маунтин						Эль Драгон					
	эндогенные		экзогенные		общее число минералов		эндогенные		экзогенные		общее число минералов	
	m	p _i	m	p _i	m	p _i	m	p _i	m	p _i	m	p _i
1	2	12.5	0	0	2	2.1	2	9.1	0	0	2	3.9
2	8	50.0	4	5.2	12	12.9	12	54.5	4	13.8	16	31.4
3	6	31.3	7	9.0	13	14.0	5	23.8	9	31.0	14	27.4
4	1	6.2	26	33.8	26	28.0	1	4.5	10	34.6	11	21.6
5	0	0	27	35.1	27	29.0	2	9.1	5	17.2	7	13.7
6	0	0	12	15.6	12	12.9	0	0	1	3.4	1	2.0
7	0	0	1	1.3	1	1.1	0	0	0	0	0	0
Всего	16	100.0	77	100.0	93	100.0	22	100.0	29	100.0	51(6)	100.0

показывает, что для обоих месторождений различия статистически значимы с уровнем достоверности более 99.99%.

Различия между месторождениями Отто Маунтин и Эль Драгон иллюстрирует рис. 6, на котором по оси ординат нанесены отношения минеральных кларков Отто Маунтин и Эль Драгон ($K_i = \text{МК}_i^{\text{От}} / \text{МК}_i^{\text{ДР}}$), показывающие во сколько раз месторождение Отто Маунтин обогащено ($K_i > 1$) или обеднено ($1/K_i > 1$) тем или иным видообразующим элементом в сравнении с месторождением Эль Драгон. По оси абсцисс графика нанесены химические элементы в порядке уменьшения значений их коэффициентов концентрации в рассматриваемых месторождениях. Видно, что рассматриваемые объекты проявляют заметные различия. Значения выше линии 1–1 (рис. 6) относятся к видообразующим элементам, минеральные кларки которых выше в месторождении Отто Маунтин по сравнению с месторождением Эль Драгон. К таким элементам относятся, главным образом, Zn, Pb, S, а также Te, Ag, Cl, As, P, Cr. Соответственно, величины ниже линии 1-1 отвечают видообразующим элементам, минеральные кларки которых выше в месторождении Эль Драгон, по сравнению с Отто Маунтин: Cu, Fe, Au, Bi и др. Последнее относится и к Se.

Как отмечалось выше, приведенные в табл. 4 средние содержания видообразующих элементов в минералах месторождений Отто Маунтин и Эль Драгон показывают, что при химическом выветривании первичных руд количество видообразующих элементов в минералах закономерно и статистически значимо возрастает от “эндогенных” к “экзогенным” минералам. Этот показатель (среднее содержание видообразующих элементов) отражает характер и направленность изменения минерального вещества в процессе эволюции минеральных систем и может использоваться при анализе закономерностей их развития. Полученные нами результаты на конкретных примерах количественно подтверждают установленные А.Г. Жабиным (1979, 1983) общие закономерности эволюции видообразования на Земле: направленность развития минерального мира, усложнение его структуры и разнообразия с течением геологического

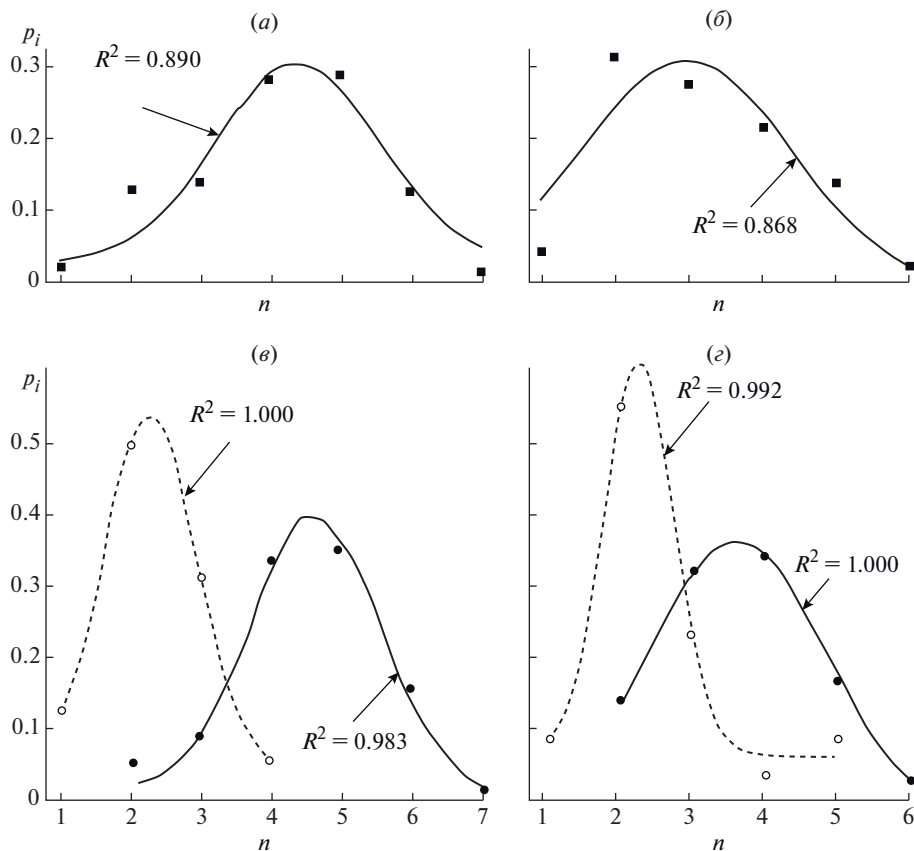


Рис. 5. Распределение минеральных видов по минеральным системам (числу видообразующих элементов) в месторождениях Отто Маунтин (*a, в*) и Эль Драгон (*б, г*): *a, б* – все минералы; *в, г* – эндогенные (пунктирная линия) и экзогенные (сплошная линия) минералы; n – компонентность минеральной системы (число видообразующих элементов в формуле минерала); p_i – частота встречаемости.

Fig. 5. Distribution of mineral species in Otto Mountain (*a, в*) and El Dragon (*б, г*) deposits on mineral systems based on mineral systems; *a, б* – all minerals; *в, г* – endogenous (dotted line) and exogenous (solid line) minerals; n – mineral systems (the number of essential, species-defining chemical elements); p_i – probability.

времени. В нашем случае, эта тенденция проявляется в усложнении более поздних минеральных ассоциаций по сравнению с ранними.

3.4. Химическая и структурная сложности минералов

Анализ зависимости химической и структурной сложности (информационные энтропии Шеннона) минеральных видов от числа видообразующих элементов в их кристаллохимических формулах (Krivovichev et al., 2018b) позволил выявить следующие тенденции: (1) структурная (в расчете и на атом, и на элементарную ячейку) и химическая (в расчете и на атом, и на формульную единицу) сложности зависят от числа видообразующих химических элементов; (2) структурная сложность минералов возрастает с увеличением их химической сложности (табл. 5; рис. 7).

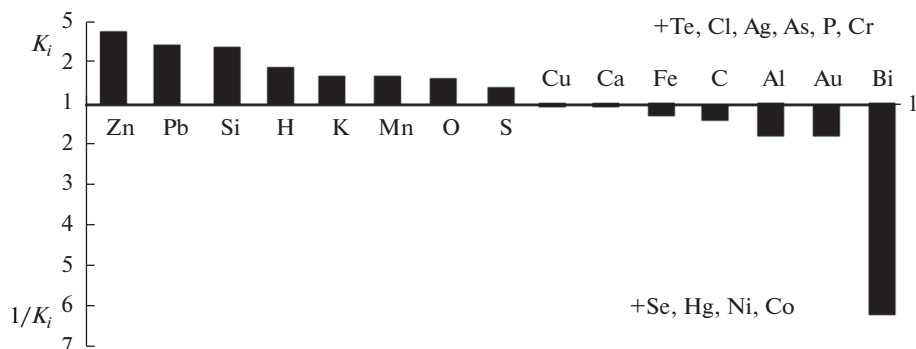


Рис 6. Коэффициенты концентрации (отношения минеральных кларков) видообразующих элементов в месторождениях Отто Маунтин и Эль Драгон ($K_i = \text{МК}^{\text{От}}/\text{МК}^{\text{Др}}$).

Fig. 6. Concentration of essential, species-defining chemical elements in Otto Mountain deposit relative to El Dragon deposit ($K_i = \text{МК}^{\text{От}}/\text{МК}^{\text{Др}}$).

3.5. Минеральная эволюция

Эволюцию минерального разнообразия можно оценить количественно с помощью концепции минеральных систем и анализа изменения химической и структурной сложности минералов. Полученные данные показывают, что четыре выделенные группы минералов (I–IV) (Haizen et al., 2008; Haizen, 2013) отчетливо отличаются друг от друга по (1) числу минералов, (2) количеству видообразующих элементов, среднему содержанию видообразующих элементов в минералах (Krivovichev et al., 2018b), а также по средним значениям химической и структурной сложности (Krivovichev et al., 2018b). Все эти показатели закономерно возрастают от “Уг-минералов” (I) к минералам хондритовых метеоритов (II), затем к минералам катархея (III) и достигают наибольшего значения для современного минерального разнообразия (табл.6; рис. 8). Общая тенденция эволюции химического состава минералов соответствует накоплению видообразующих элементов в условиях развития разнообразия минерального мира.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приложение концепции минеральных систем к анализу минерального состава геологических объектов различного генезиса позволяет перевести изучение их геохимических особенностей с элементного на минеральный уровень, когда количественными характеристиками объекта наряду с содержаниями химических элементов в горных породах и рудах являются численные значения минеральных кларков. Таким образом, минеральное разнообразие геологических объектов может быть оценено не только по общему количеству минеральных видов, но и по набору и числу видообразующих элементов, образующих минеральные системы, а величины минеральных кларков делают возможной количественную сравнительную оценку сходства и различия минерального состава различных объектов.

Особый интерес представляет сравнительный анализ минерального разнообразия отдельных элементов по характеру распределения видообразующих элементов в минеральных системах.

Наконец, концепция минеральных систем позволяет рассматривать эволюцию минерального разнообразия земной коры во времени с точки зрения закономерностей изменения химического состава минеральных видов. В частности, минерально-си-

Таблица 5. Средние химические и структурные сложности минералов различных минеральных систем, выделенных по числу видообразующих элементов (N)

Table 5. Information-based mean chemical and structural complexities of minerals separated into mineral-system types according to the number N of different chemical elements in the chemical formula

N	m	$chem I_G$ (бит/атом)		$chem I_{G,total}$ (бит/ф.е.)		m	$str I_G$ (бит/атом)		$str I_{G,total}$ (бит/ячейка)	
		\bar{X}	$\sigma_{\bar{X}}$	\bar{X}	$\sigma_{\bar{X}}$		\bar{X}	$\sigma_{\bar{X}}$	\bar{X}	$\sigma_{\bar{X}}$
1	53	0	0	0	0	53	0.58	0.14	13.15	4.89
2	405	0.94	0.004	5.45	0.38	405	1.88	0.07	75.76	11.93
3	723	1.37	0.004	14.34	0.54	593	2.44	0.04	103.82	7.98
4	1347	1.61	0.004	41.38	1.14	1347	3.43	0.03	229.06	8.93
5	1400	1.77	0.004	71.50	1.95	951	3.66	0.03	275.62	13.72
6	613	1.88	0.007	102.30	3.94	386	4.02	0.05	356.32	20.61
7	287	1.96	0.009	130.91	7.13	180	4.25	0.06	390.56	26.93
8	101	2.04	0.015	159.38	10.50	59	4.74	0.11	582.86	62.34
9	26	2.06	0.030	218.06	23.49	11	4.84	0.11	582.72	64.24
10	7	2.06	0.027	408.66	106.88	4	4.87	0.20	760.79	49.75

Примечание: N – число видообразующих элементов; m – число минералов; \bar{X} – среднее арифметическое; $\sigma_{\bar{X}}$ – средняя ошибка среднее арифметического.

стемный анализ списков минералов для различных геологических эпох дает убедительные количественные доказательства возрастающего химического разнообразия минеральных видов и увеличения химической и структурной сложностей со временем, от ранних этапов формирования Земли к поздним. Наблюдаемые корреляции позволяют предположить, что химическая дифференциация вещества является основ-

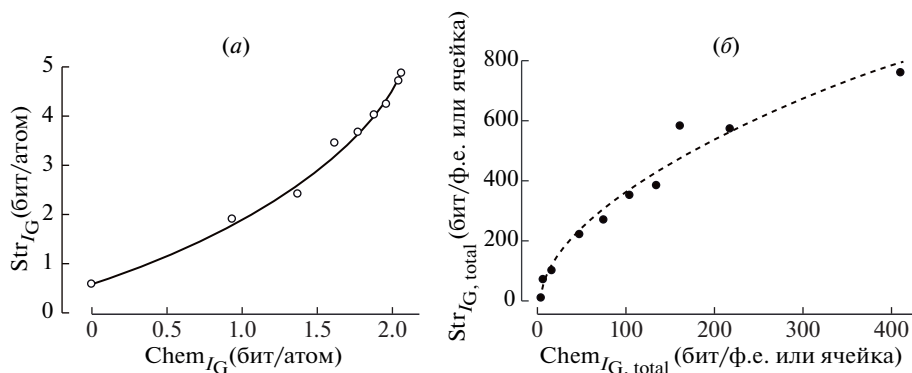


Рис. 7. Зависимости между структурными и химическими сложностями для различных видов минеральных систем: информация Шеннона на атом (a) и на элементарную ячейку или формульную единицу (b). Каждая точка соответствует определенному типу минеральной системы (или числу N различных элементов в химической формуле).

Fig. 7. Dependencies between structural and chemical complexities for different kinds of mineral systems: Shannon information per atom (a) and per unit cell or formula unit (b). Each point corresponds to a particular mineral-system type (or the number N of different elements in a chemical formula).

Таблица 6. Количество минералов (m) и элементов (n), средние значения (и 95% доверительные интервалы) видообразующих химических элементов (\bar{n}), химической ($^{\text{chem}}\bar{I}_G$) и структурной ($^{\text{str}}\bar{I}_G$) сложности минералов для четырех стадий их эволюции

Table 6. Number of minerals (m) and elements (n), mean (and the 95% confidence intervals) of essential mineral-forming chemical elements (\bar{n}), chemical ($^{\text{chem}}\bar{I}_G$) and structural ($^{\text{str}}\bar{I}_G$) complexities of minerals for the four stages of mineral evolution.

Показатели	Стадия			
	I	II	III	IV
m	12	62	422	5215*
n	7	24	38	70
\bar{n}	2.08 ± 0.45	2.68 ± 0.39	3.85 ± 0.21	4.50 ± 0.07
$^{\text{chem}}\bar{I}_G$, (бит/атом)	0.92 ± 0.29	1.11 ± 0.10	1.45 ± 0.04	1.58 ± 0.01
$^{\text{str}}\bar{I}_G$ (бит/атом)	1.57 ± 0.81	1.71 ± 0.25	2.73 ± 0.15	3.25 ± 0.04
$^{\text{chem}}\bar{I}_{G,\text{total}}$ (бит/ф.е.)	7.36 ± 6.15	12.74 ± 4.91	38.55 ± 5.00	50.04 ± 2.32
$^{\text{str}}\bar{I}_{G,\text{total}}$ (бит/ячейка)	50.06 ± 5.67	57.12 ± 34.07	157.63 ± 30.43	230.02 ± 11.55

* Структурная сложность рассчитана для 3989 минералов.

ным механизмом, приводящим к увеличению сложности минералов на протяжении всей истории Земли.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-15-50054.

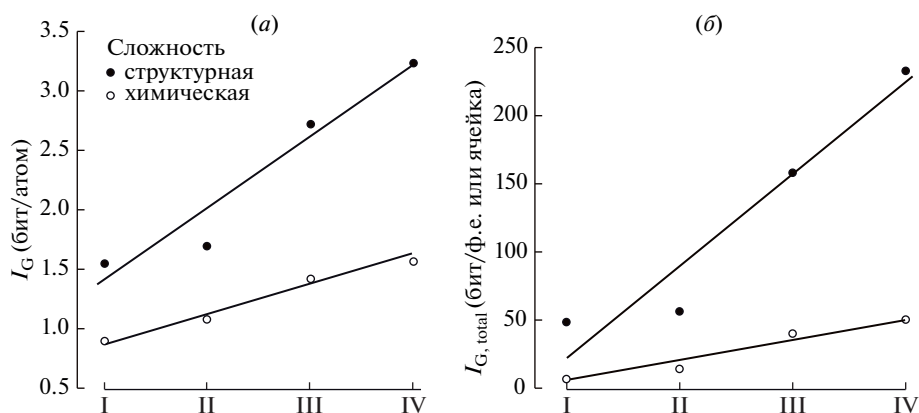


Рис. 8. Средние химические и структурные сложности для минералов, встречающихся в разные стадии эволюции минералов (I = "Ur-минералы"; II = минералы хондритовых метеоритов; III = минералы Катархея; IV = минералы современной эпохи): информация Шеннона: бит/атом (а) и бит/ячейка или формульную единицу (б).

Fig. 8. Mean chemical and structural complexities for minerals occurring in different eras of mineral evolution (I = "Ur-minerals"; II = minerals of chondritic meteorites; III = minerals of the Hadean epoch; IV = minerals of the modern era): Shannon information per atom (a) and per unit cell or formula unit (b).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бокий Г.Б.* Систематика природных силикатов. М.: ВИНТИ, **1997**. 192 с.
- Булах А.Г.* Изоморфизм и выбор названия минерала // ЗРМО. **2009а**. № 3. С. 108–111.
- Булах А.Г.* Миналы, доминирующая валентность и название минерала // ЗРМО. **2009б**. № 4. С. 39–44.
- Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г.* Структуры, изоморфизм, формулы, классификация минералов. СПб: Изд-во СПбГУ, **2014**. 133 с.
- Валяшко М.Г.* Закономерности формирования месторождений солей. М.: Изд-во МГУ, **1962**. 398 с.
- Григорьев Д.П.* **1982**. Сравнительно-исторический анализ при изучении генезиса минералов и минеральных месторождений // ЗВМО. **1982**. № 4. С. 422–431.
- Доливо-Добровольский В.В.* Доминирующая валентность, миналы и взаимные системы // ЗРМО. **2009**. № 4. С. 44–52.
- Жабин А.Г.* Проблемы филогении минералов / Новые идеи в генетической минералогии. Л.: Наука, **1983**. С. 7–12.
- Жабин А.Г.* Существует ли эволюция видообразования минералов на Земле? // Докл. АН СССР. **1979**. Т. 247. № 1. С. 142–144.
- Иванов В.В., Юшко-Захарова О.Е.* Теллур. В кн.: “Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным элементам”. М.: Недра, **1989**. С. 353–424.
- Кривовичев В.Г., Чарыкова М.В.* Термодинамика минеральных равновесий в системах с токсичными компонентами. I. Селен. СПб: Изд-во СОЛО, **2006**. 122 с.
- Кривовичев В.Г., Чарыкова М.В.* Число минералов различных химических элементов: Статистика 2012 года (новый подход к старой проблеме) // ЗРМО. **2013а**. № 4. С. 36–42.
- Кривовичев В.Г., Чарыкова М.В.* Классификация минеральных систем. СПб: Изд-во СПбГУ, **2013б**. 196 с.
- Кривовичев В.Г., Чарыкова М.В.* Минеральные системы, их типы и распространенность в природе. 1. Хибинны, Ловозеро и Сент-Илер // ЗРМО. **2015**. № 4. С. 1–12.
- Кривовичев В.Г., Чарыкова М.В.* Минеральные и физико-химические системы эвапоритов: геохимический и термодинамический аспекты // ЗРМО. **2016**. № 2. С. 30–43.
- Кривовичев В.Г., Чарыкова М.В.* Минеральные системы, их типы и распространенность в природе. 2. Продукты современной fumarольной деятельности на активных вулканах Толбачик (Россия) и Вулкано (Италия) // ЗРМО. **2017**. № 1. С. 15–28.
- Кривовичев В.Г., Чарыкова М.В.* Минеральные системы, их типы и распространенность в природе. 3. Месторождения Отто Маунтин (США) и Эль Драгон (Боливия) // ЗРМО. **2018**. № 4. С. 14–27.
- Кривовичев С.В.* Сложность, разнообразие и эволюция минерального мира: от Вернадского до наших дней / Вернадский и XXI век: геосфера, биосфера, ноосфера и симметрия. София, ИК “Св. Иван Рилски”, **2013**. С. 26–32.
- Кухаренко А.А., Орлова М.П., Булах А.Г., Багдасаров Э.А., Римская-Корсакова О.М., Нефедов Е.И., Ильинский Г.А., Сергеев А.С., Абакумова Н.Б.* Каледонский комплекс ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Северной Карелии (геология, петрология, минералогия и геохимия). М.: Недра, **1965**. 772 с.
- Марин Ю.Б.* Ассоциации акцессорных минералов и особенности их эволюции на разных уровнях образования гранитоидных серий // ЗВМО. **1973**. № 5. С. 572–590.
- Пеков И.В.* Новые минералы: где их открывают // Соросовский образовательный журнал. **2001**. Т. 7. № 5. С. 65–74.
- Попкова Т.Н.* VI съезд Всесоюзного минералогического общества // ЗВМО. **1982**. № 4. С. 392–395.
- Рундквист Д.В.* Использование закономерностей развития минеральных образований во времени при прогнозно-металлогенетических исследованиях // ЗВМО. **1982**. № 111. № 4. С. 407–421.
- Урусов В.С.* “Естественный отбор” минеральных видов // ЗРМО. **2010**. № 1. С. 1–12.
- Юшкин Н.П.* Эволюционные представления в современной минералогии // ЗВМО. **1982**. № 4. С. 432–442.
- Юшкин Н.П.* Эволюция минерального мира, зарождение биосферы и биоминеральная коэволюция / Минералы, минералообразование, структура, разнообразие и эволюция минерального мира, роль минералов в происхождении и развитии жизни, биоминеральные взаимодействия. Сыктывкар, **2008**. С. 455–459.

MINERAL SYSTEMS BASED ON THE NUMBER OF SPECIES-DEFINING CHEMICAL ELEMENTS IN MINERALS: THEIR DIVERSITY, COMPLEXITY, DISTRIBUTION, AND MINERAL EVOLUTION OF EARTH'S CRUST**V. G. Krivovichev^a, M. V. Charykova^a, and S. V. Krivovichev^{a, b}**^a*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*^b*Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia***e-mail: v.krivovichev@spbu.ru*

The chemical diversity of minerals can be analyzed in terms of the concept of mineral systems, defined by the set of chemical elements essential for defining a mineral species. Only species-defining elements are considered to be essential. According to this approach, all minerals are classified into ten types of mineral systems with the number of essential components ranging from 1 to 10. For all known minerals, only 70 chemical elements act as essential species-defining constituents. Using this concept of mineral systems, various geological objects may be compared from the viewpoint of their mineral diversity: for example, alkaline massifs (Khibiny, Lovozero, in Russia, and Mont Saint-Hilaire, in Canada), evaporate deposits (Inder, in Kazakhstan, and Searles Lake, in the USA), fumaroles of active volcanoes (Tolbachik, in Kamchatka, and Volcano, in Sicily, Italy) and hydrothermal deposits (Otto Mountain, in the USA, and El Dragon, in Bolivia). Correlations between chemical and structural complexities of minerals were analysed using a total of 5240 datasets on their chemical compositions and 3989 datasets on crystal structures of minerals. Statistical analysis shows that there are strong and positive correlations ($R^2 > 0.95$) between chemical and structural complexities and the number of different chemical elements in a mineral. Analysis of relations between chemical and structural complexities provides strong evidence that there is an overall trend of increasing structural complexity together with increase of the chemical complexity. Following R.Hazen, there were considered four groups of minerals representing four stages of the mineral evolution: (I) “Ur-minerals”, (II) minerals from chondrite meteorites, (III) Hadean minerals, and (IV) contemporary minerals. Obtained data have showed that the number of species-defining elements in minerals and their mean contents are increasing regularly and significantly from the stage I to stage IV. Analyses of mean chemical and structural complexities in these four groups demonstrate that both are gradually increasing in the course of mineral evolution. The increasing complexity follows an overall trend: the more complex minerals were formed with passage of the geological time, without replacing the simpler ones. Observed correlations between chemical and structural complexities understood in terms of the Shannon information suggest that the chemical differentiation is the major force driving the increase of complexity of minerals in the course of geological time.

Keywords: mineral species, species-defining elements, crystal-chemical formula, mineral systems, structural and chemical complexity, mineral evolution, chemical differentiation

REFERENCES

- Bokii G.B.* Systematics of natural silicates. Moscow: VINITI, **1997**. 192 p. (*in Russian*).
- Bosi F., Hatert F., Hålenius U., Pasero M., Miyawaki R., Mills S.J.* Application of the IMA-CNMNC dominant-valency rule to complex mineral compositions. *Miner. Mag.* **2019**. Vol. 83. P. 627–632.
- Bulakh A.G.* End members, dominant valency, and identifying minerals of mixed composition. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2009a**. N 4. P. 39-44 (*in Russian*, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2010**. Vol. 52. P. 614–617).
- Bulakh A.G.* Isomorphism and choosing the mineral name. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2009a**. Vol. 138. N 3. P. 108–111 (*in Russian*, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2010**. Vol. 52. P. 612-613).
- Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G.* Structures, isomorphism, formulas, classification of minerals. Saint Petersburg: Saint Petersburg University Press, **2014**. 133 p. (*in Russian*).
- Campostrini I., Demartin F., Gramaccioli C.M.* Vulcano: einaußergewöhnlicher Fundpunkt von neuen und seltenen Mineralien. *Miner.-Welt*. **2010**. Bd. 21(3). S. 40–57 (*in German*).

- Charykova M.V., Krivovichev V.G.* Mineral systems and the thermodynamics of selenites and selenates in the oxidation zone of sulfide ores – a review. *Miner. Petrol.* **2017**. Vol. 111(1). P. 121–134.
- Cheyne B., Dall'Aglio M., Garavelli A., Grasso M.F., Vurro F.* Trace elements from fumaroles at Vulcano Island (Italy): rates of transport and a thermochemical model. *J. Volcan. Geotherm. Res.* **2000**. Vol. 95. P. 273–283.
- Christy A.G.* Anomalous mineralogical diversity in the Periodic Table, and its causes. *Miner. Mag.* **2015**. Vol. 79. P. 33–49.
- Christy A.G., Mills S.J., Kampf A.R.* A review of the structural architecture of tellurium oxy-compounds. *Miner. Mag.* **2016a**. Vol. 80 (3). P. 415–545.
- Christy A.G., Mills S.J., Kampf A.R., Housley R.M., Thorne B., Marty J.* The relationship between mineral composition, crystal structure and paragenetic sequence: the case of secondary Te mineralization at the Bird Nest drift, Otto Mountain, California, USA. *Miner. Mag.* **2016b**. Vol. 80. P. 291–310.
- Demartin F., Gramaccioli C.M., Campostrini I.* Demicheleite-(Cl), a new mineral from La Fossa crater, Vulcano, Aeolian Islands, Italy. *Amer. Miner.* **2009**. Vol. 94. P. 1045–1048.
- Demartin F., Gramaccioli C.M., Campostrini I.* Demicheleite-(I), BiSI, a new mineral from La Fossa Crater, Vulcano, Aeolian Islands, Italy. *Miner. Mag.* **2010**. Vol. 74. P. 141–145.
- Dolivo-Dobrovolsky V.V.* Dominant valency, end members, and reciprocal systems. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2009**. Vol. 142. N 4. P. 44–52 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2010**. Vol. 52. P. 618–623).
- Garavelli A., Laviano R., Vurro F.* Sublimite deposition from hydrothermal fluids at the Fossa crater – Vulcano, Italy. *Eur. J. Miner.* **1997**. Vol. 9. P. 423–432.
- Garavelli A., Mozgova N.N., Orlandi P., Bonacorsi E., Pinto D., Moelo Y., Borodaev Y.* Rare sulfosalts from Vulcano, Aeolian Islands, Italy. VI. Vurroite, $Pb_{20}Sn_2(Bi,As)_{22}S_{54}Cl_6$, a new mineral species. *Canad. Miner.* **2005**. Vol. 43. P. 703–711.
- Gramaccioli C. M., Demartin F., Campostrini I., Orlandi P.* Demicheleite, BiSBr, a new mineral from La Fossa crater, Vulcano, Aeolian Islands, Italy. *Amer. Miner.* **2008**. Vol. 93. P. 1603–1607.
- Grew E.S., Hazen R.M.* Beryllium mineral evolution. *Amer. Miner.* **2014**. Vol. 99. P. 999–1021.
- Grew E.S., Krivovichev S.V., Hazen M.R., Hystad G.* Evolution of structural complexity in boron minerals. *Canad. Miner.* **2016**. Vol. 54. P. 125–143.
- Grew E.S., Hystad G., Hazen R.M., Krivovichev S.V., Gorelova L.A.* How many boron minerals occur in Earth's upper crust? *Amer. Miner.* **2017**. Vol. 102. P. 1573–1587.
- Grew E.S., Hystad G., Toapanta M.P., Eleish A., Ostroverkhova A., Golden J., Hazen R.M.* Lithium mineral evolution and ecology: comparison with boron and beryllium. *Eur. J. Miner.* **2019**. Vol. 31. P. 755–774.
- Grigoriev D.P.* Comparative-historical analysis in the study of the genesis of minerals and mineral deposits. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1982**. Vol. 111. N 4. P. 422–431 (in Russian).
- Grundmann G., Förster H.-J.* Origin of the El Dragón Selenium Mineralization, Quijarro Province, Potosí, Bolivia. *Minerals*. **2017**. Vol. 7. P. 68.
- Hatert F., Burke E.A.J.* The IMA-CNMNC dominant-constituent rule revised and extended. *Canad. Miner.* **2008**. Vol. 46. P. 717–728.
- Hawthorne F.C.* The use of end-member charge-arrangements in defining new mineral species and heterovalent substitutions in complex minerals. *Canad. Miner.* **2002**. Vol. 40. P. 699–710.
- Hazen R.M.* Paleomineralogy of the Hadean Eon: a preliminary species list. *Amer. J. Sci.* **2013**. Vol. 313. P. 807–843.
- Hazen R.M., Bekker A., Bish D.L., Bleeker W., Downs R.T., Farquhar J., Ferry J.M., Grew E.S., Knoll A.H., Papineau D.F., Ralph J.P., Sverjensky D.A., Valley J.W.* Needs and opportunities in mineral evolution research. *Amer. Miner.* **2011**. Vol. 96. P. 953–963.
- Hazen R.M., Downs R.T., Eleish A., Fox P., Gagné O.C., Golden J.J., Grew E.S., Hummer D.R., Hystad G., Krivovichev S.V., Li C., Liu C., Ma X., Morrison S.M., Pan F., Pires A.J., Prabhu A., Ralph J., Runyon S.E., Zhong H.* Data-Driven Discovery in Mineralogy: Recent Advances in Data Resources, Analysis, and Visualization. *Engineering*. **2019**. Vol. 5(3). P. 397–405.
- Hazen R.M., Ewing R.C., Sverjensky D.A.* Evolution of uranium and thorium minerals. *Amer. Miner.* **2009**. Vol. 94. P. 1293–1311.
- Hazen R.M., Ferry J. M.* Mineral evolution: mineralogy in the fourth dimension. *Elements*. **2010**. Vol. 10. P. 9–12.
- Hazen R.M., Golden J., Downs R.T., Hystad G., Grew E.S., Azzolini D., Sverjensky D.A.* Mercury (Hg) mineral evolution: a mineralogical record of supercontinental assembly, changing ocean geochemistry, and the emerging terrestrial biosphere. *Amer. Miner.* **2012**. Vol. 97. P. 1013–1042.
- Hazen R.M., Grew E.S., Downs R.T., Golden J., Hystad G.* Mineral ecology: Chance and necessity in the mineral diversity of terrestrial planets. *Canad. Miner.* **2015**. Vol. 53. P. 295–324.
- Hazen R.M., Hummer D.R., Hystad G., Downs R.T., Golden J.J.* Carbon mineral ecology: Predicting the undiscovered minerals of carbon. *Amer. Miner.* **2016**. Vol. 101. P. 889–906.
- Hazen R.M., Hystad G., Golden J.J., Hummer D.R., Liu C., Downs R.T., Morrison S.M., Grew E.S.* Cobalt mineral ecology. *Amer. Miner.* **2017**. Vol. 102. P. 108–116.

Hazen R.M., Liu X.-M., Downs R.T., Golden J., Pires A.J., Grew E.S., Hystad G., Estrada C., Sverjensky D.A. Mineral evolution: episodic metallogenesis, the supercontinent cycle, and the co-evolving geosphere and biosphere. *Econ. Geol. Spec. Publ.* **2014**. Vol. 18. P. 1–15.

Hazen R.M., Papineau D., Bleeker W., Downs R.T., Ferry J.M., McCoy T.J., Sverjensky D.A., Yang H. Mineral evolution. *Amer. Miner.* **2008**. Vol. 93. P. 1693–1720.

Hazen R.M., Sverjensky D.A., Azzolini D., Bish D.L., Elmore S., Hinnov L., Milliken R.E. Clay mineral evolution. *Amer. Miner.* **2013**. Vol. 98. P. 2007–2029.

Housley R.M., Kampf A.R., Mills S.J., Marty J., Thorne B. The remarkable occurrence of rare secondary minerals at Otto Mountain near Baker, California – including seven new species. *Rocks. Miner.* **2011**. Vol. 86(2). P. 132–142.

Hystad G., Downs R.T., Hazen R.M. Mineral frequency distribution data conform to a large number of rare events model: Prediction of Earth's "missing minerals". *Math. Geosci.* **2015a**. Vol. 47. P. 647–661.

Hystad G., Downs R.T., Grew E.S., Hazen R.M. Statistical analysis of mineral diversity and distribution: Earth's mineralogy is unique. *Earth Planet. Sci. Lett.* **2015b**. Vol. 426. P. 154–157.

Ivanov V.V., Yushko-Zakharova O.E. Tellurium. In: *Geological reference book of chalcophile and siderophile elements*. Moscow: Nedra, **1989**. P. 353–424 (in Russian).

Kalbskopf R. Synthese und kristallstruktur von $\text{Cu}_{12-x}\text{Te}_4\text{S}_{13}$, dem tellur-endglied der fahlerze. *Tscherm. Miner. Petrogr. Mitt.* **1974**. Bd. 21. S. 1–10.

Krivovichev S.V. Topological complexity of crystal structures: Quantitative approach. *Acta Crystallogr.* **2012**. Vol. A68. P. 393–398.

Krivovichev S.V. Complexity, diversity and evolution of the mineral world: from Vernadsky to the present day. In: *Vernadsky and XXI century: geosphere, biosphere, noosphere and symmetry*. Sofia: St. Ivan Rilski, **2013a**. P. 26–32 (in Russian).

Krivovichev S.V. Structural complexity of minerals: information storage and processing in the mineral world. *Miner. Mag.* **2013b**. Vol. 77. N 3. P. 275–326.

Krivovichev S.V. Which inorganic structures are the most complex? *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**. Bd. 53. S. 654–661.

Krivovichev S.V. Structural complexity of minerals and mineral parageneses: Information and its evolution in the mineral world. In: *Highlights in Mineralogical Crystallography*; Danisi, R., Armbruster, T., Eds.; Walter de Gruyter GmbH: Berlin, Germany; Boston, MA, USA, **2016a**. P. 31–73.

Krivovichev S.V. Structural complexity and configurational entropy of crystalline solids. *Acta Crystallogr.* **2016b**. Vol. B72. P. 274–276.

Krivovichev S.V. Ladders of information: What contributes to the structural complexity in inorganic crystals. *Z. Kristallogr.* **2018**. Vol. 233. P. 155–161.

Krivovichev S.V., Krivovichev V.G., Hazen R.M. Structural and chemical complexity of minerals: correlations and time evolution. *Eur. J. Miner.* **2018a**. Vol. 30. P. 231–236.

Krivovichev V.G., Charykova M.V. Thermodynamics of mineral equilibria in systems with toxic components. I. Selenium. Saint Petersburg: Saint Petersburg University Press, **2006**. 122 p. (in Russian).

Krivovichev V.G., Charykova M.V. Number of minerals of various chemical elements: Statistics 2012 (a new approach to an old problem). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2013a**. Vol. 142. N 4. P. 36–42 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2014**. Vol. 56. P. 553–559).

Krivovichev V.G., Charykova M.V. Classification of mineral systems. St. Petersburg: St.-Petersburg University Press, **2013b**. 196 p. (in Russian).

Krivovichev V.G., Charykova M.V. Mineral and physical-chemical systems of evaporites: geochemical and thermodynamical aspects. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2016**. Vol. 145. N 2. P. 30–43 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2017**. Vol. 59. P. 677–686).

Krivovichev V.G., Charykova M.V. Mineral systems, their types and distribution in nature. 1. Khibiny, Lovozero and the Mont Saint-Hilaire. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2015**. Vol. 144. N 4. P. 1–12 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2016**. Vol. 58. P. 551–558).

Krivovichev V.G., Charykova M.V. Mineral system based on the number of essential, species-defining chemical elements in minerals, their types and distribution in nature. 2. The products of fumarole activity at the active volcanoes (Tolbachik, Vulcano). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2017**. Vol. 146. N 1. P. 15–28 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2017**. Vol. 59. P. 575–583).

Mineral Systems, Their Types, and Distribution in Nature: 3. Otto Mountain (USA) and Dragon (Bolivia) Deposits. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2018**. Vol. 147. N 4. P. 14–27 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2019**. Vol. 61. N 7. P. 589–597).

Krivovichev V.G., Charykova M.V., Vishnevsky A.V. The Thermodynamics of selenium minerals in near-surface environments. *Minerals*. **2017**. Vol. 7(10). N 188.

Krivovichev V.G., Charykova M.V., Krivovichev S.V. The concept of mineral systems and its application to the study of mineral diversity and evolution. *Eur. J. Miner.* **2018b**. Vol. P. 219–230.

Krivovichev V.G., Krivovichev S.V., Charykova M.V. Selenium minerals: structural and chemical diversity and complexity. *Minerals*. **2019**. Vol. 9. N 455.

Kukharev A.A., Orlova M.P., Bulakh A.G., Bagdasarov E.A., Rimskay-Korsakova O.M., Nefedov E.I., Ilyinsky G.A., Sergeev A.S., Abakumova N.B. Caledonian complex of ultramafic, alkaline rocks

and carbonatites of the Kola Peninsula and North Karelia (geology, petrology, mineralogy and geochemistry). Moscow: Nedra, **1965**. 772 p. (in Russian).

Liu C., Hystad G., Golden J. J., Hummer D. R., Downs R. T., Morrison S. M., Ralph J. P., Hazen R. M. Chromium mineral ecology. *Amer. Miner.* **2017**. Vol. 102. P. 612–619.

Liu C., Eleish A., Hystad G., Golden J. J., Downs R. T., Morrison S. M., Hummer D. R., Ralph J. P., Fox P., Hazen R. M. Analysis and visualization of vanadium mineral diversity and distribution. *Amer. Miner.* **2018**. Vol. 103. P. 1080–1086.

Makovicky E., Karup-Møller S. Exploratory studies of substitutions in the tetrahedrite/tennantite-goldfieldite solid solution. *Canad. Miner.* **2017**. Vol. 55. P. 233–244.

Mandarino J. A., Nickel E. H., Cesbron F. Rules of procedure of the Commission on New Minerals and Mineral Names, International Mineralogical Association. *Canad. Miner.* **1984**. Vol. 22. P. 367–368.

Mandarino J. A. The check-list for submission of proposals for new minerals to the Commission on New Minerals and Mineral Names, International Mineralogical Association. *Canad. Miner.* **1987**. Vol. 25. P. 775–783.

Mandarino J. A., Nickel E. H., Cesbron F. Rules of procedure of the Commission on New Minerals and Mineral Names, International Mineralogical Association. *Canad. Miner.* **1984**. Vol. 22. P. 367–368.

Marin Yu. B. Associations of accessory minerals and peculiarities of their evolution at different levels of granitoid series formation. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1973**. Vol. 102. N 4. P. 572–590 (in Russian).

Mills S. J., Hatert F., Nickel E. H., Ferraris G. The definition of a mineral. *Canad. Miner.* **1995**. Vol. 33. P. 689–690.

Nickel E. H., Grice J. D. The IMA Commission on New Minerals and Mineral Names: Procedures and Guidelines on Mineral Nomenclature. *Canad. Miner.* **1998**, Vol. 36. P. 91–926.

Nickel E. H., Grice J. D. The IMA Commission on New Minerals and Mineral Names: procedures and guidelines on mineral nomenclature. *Canad. Miner.* **1998**. Vol. 36. P. 913–926. Русский перевод: *ЗВМО*. **1999**. № 2. С. 51–58.

Nickel E. H., Mandarino J. A. Procedures involving the IMA Commission on New Minerals and Mineral Names and guidelines on mineral nomenclature. *Amer. Miner.* **1987**. Vol. 72. P. 1031–1042. Русский перевод: *Минерал. журнал*. **1999**. № 1. С. 51–86.

Nickel E. H. Solid solutions in mineral nomenclature. *Canad. Miner.* **1992**. Vol. 30. P. 231–234. Русский перевод: *ЗВМО*. **1992**. № 4. С. 89–92.

Nickel E. H. The definition of a mineral. *Canad. Miner.* **1995**. Vol. 33. P. 689–690. Русский перевод: *ЗВМО*. **1995**. № 4. С. 98–100.

Oppenheimer C., Fischer T. P., Scaillet B. Volcanic degassing: Process and impact. In: *Treatise on Geochemistry*. Vol. 4. Amsterdam, **2014**. P. 111–179.

Pankova Y. A., Gorelova L. A., Krivovichev S. V., Pekov I. V. The crystal structure of ginorite, $\text{Ca}_2[\text{B}_{14}\text{O}_{20}(\text{OH})_6](\text{H}_2\text{O})_5$, and the analysis of dimensional reduction and structural complexity in the $\text{CaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ system. *Eur. J. Miner.* **2018**. Vol. 30. P. 277–287.

Pasero M. The New IMA List of Minerals. Updated: July: **2019**. <http://pubsites.uws.edu.au/ima-cnmnc/>

Pekov I. V. New minerals: where are they discovered. *Sorosovskiy Obrazovatelny Journal*. **2001**. Vol. 7. N 5. P. 65–74 (in Russian).

Popkova T. N. The VIth Meeting of the All Union Mineralogical Society. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1982**. Vol. 111. N 4. P. 392–395 (in Russian).

Rundquist D. V. The use of regularities of mineral formations development in time at prognostic-metallogenic researches. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1982**. Vol. 111. N 4. P. 407–421 (in Russian).

Urusov V. S. Natural selection of mineral species. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2010**. Vol. 139. N 4. P. 89–100 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2010**. Vol. 52. P. 852–871).

Valyashko M. G. Formation of salts deposits. Moscow: Moscow University Press, **1962**. 398 p. (in Russian).

Yushkin N. P. Evolutionary ideas in modern mineralogy. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1982**. Vol. 111. N 4. P. 432–442 (in Russian).

Yushkin N. P. Evolution of the mineral world, origin of the biosphere and biomineral co-evolution. In: *Minerals, Mineral Formation, Structure, Diversity and Evolution of the Mineral World, the Role of Minerals in the Origin of Life, BioMineral Interactions*. Syktyvkar, **2008**. P. 455–459 (in Russian).

Zhabin A. G. Is there evolution of mineral species on Earth? *Dokl. Acad. Sci. SSSR*. **1979**. Vol. 247. N 1. P. 199–202 (in Russian).

Zhabin A. G. Problems of the mineral phylogeny. In: *New Ideas in Genetic Mineralogy*. Leningrad: Nauka, **1983**. P. 7–12 (in Russian).

<http://www.mindat.org/>, “<http://truff/>”truff.info/ima/.