

**РЕДКИЕ ФЁДОРОВСКИЕ ГРУППЫ В СТРУКТУРНОЙ МИНЕРАЛОГИИ****Я.О. Шабловский***Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,  
пр. Октября 48, г. Гомель, 246746 Белоруссия; ya.shablowsky@yandex.ru***RARE FEDOROV GROUPS IN STRUCTURAL MINERALOGY****Ya.O. Shablowsky***Gomel State Technical University, pr. Oktyabrya 48, Gomel, 246746 Belorussia;  
ya.shablowsky@yandex.ru*

Поддержание кристаллического порядка в структуре твердой фазы обеспечивается симметрией межатомных взаимодействий, предопределяющей симметрию расположений атомных центров, т.е. пространственную симметрию структуры. С учетом этого сам феномен минералообразования можно формально рассматривать как результат упорядочения позиций атомов операциями пространственной симметрии. Такое упорядочение весьма избирательно. Большинство структур минералов описывается малой частью формально возможных групп пространственной симметрии. Нами исследованы закономерности, определяющие «структурные предпочтения» минеральных фаз при кристаллизационных и рекристаллизационных процессах. Даны количественные оценки частотности реализации различных фёдоровских групп в кристаллических структурах.

Илл. 2. Табл. 2. Библ. 23.

*Ключевые слова:* структура минерала, пространственная симметрия, фёдоровская группа.

The crystal order in structure of a solid phase is provided by the symmetry of interatomic interactions. In its turn, the latter causes the symmetry of atomic spatial positions, i.e. the spatial symmetry of the structure. From this viewpoint, the phenomenon of mineral formation can formally be considered as a result of ordering the atoms by the operations of spatial symmetry. This ordering is selective. Most mineral structures are described by minor formally possible spatial symmetry groups. The peculiarities of «structural preferences» of mineral phases during crystallization and recrystallization are studied. The quantitative estimations for frequencies of Fedorov groups in crystal structures are given.

Figures 2. Tables 2. References 23.

*Key words:* mineral structure, spatial symmetry, Fedorov group.**Введение**

Согласно современным представлениям (Попов, 2018) кристаллическое состояние возникает при выстраивании атомных группировок в структуры с дальним порядком. Результат такого выстраивания определяется сложной совокупностью факторов (Иванов, 2016), однако, в любом

кристалле поддержание дальнего порядка обеспечивается симметрией межатомных взаимодействий, предопределяющей симметрию пространственных расположений атомных центров.

Формально выделяют 230 групп пространственной симметрии (фёдоровских групп), но структуры минералов распределены по этим группам крайне неравномерно (Поваренных, 1966). Во всех син-

гониях, кроме триклинной, имеется значительное количество редких («малозаселенных») групп: минералы со структурами, соответствующими этим группам, встречаются лишь в единичных случаях.

В работах разных авторов (Урусов, Надежина, 2006; Чесноков, 2005) феномен редких фёдоровских групп исследовался путем анализа симметричной статистики минеральных видов. Значительное количество природных кристаллических веществ характеризуется косоугольными координатами, к которым слабо применимы ортогональные группы симметрии (Макагонов, 2002). По мере увеличения точности определения структур минералов все большая их часть переводится в низкосимметричные. Недавно даже была констатирована «кубо-триклинная инверсия системы минеральных видов» – изменение отношения числа триклинных минералов к числу кубических минералов с 0.97 в 1995 г. до 1.06 в 2008 г. (Войтеховский, 2010). Однако несмотря на это, феномен редких фёдоровских групп стабилен: накопление и уточнение структурных данных практически не влияет на «заселенность» редких групп (Шафрановский, Фекличев, 1982). Новые минералы, изначально заявленные как единственные известные представители редкой фёдоровской группы, при последующем изучении их структуры часто относят к какой-либо «заселенной» группе (Урусов, 1998). В связи с этим даже было предложено расценивать редкость фёдоровской группы малоизученной кристаллической структуры как весомое основание для более придирчивого анализа такой структуры (Урусов, Надежина, 2006).

Фундаментальные кристаллохимические факторы, определяющие формирование структур минералов, известны (Урусов, 1991). Вместе с тем, причины, по которым некоторые фёдоровские группы не находят своего воплощения в реальных кристаллических структурах, до настоящего времени не анализировались. Исключение составляет исследование (König, Mermin, 1999), посвященное особенностям группы  $I2_13$ , единственным представителем которой предполагается малоизученный минерал хсиангуалит  $\text{Ca}_3\text{Li}_2\text{Be}_3(\text{SiO}_4)_3\text{F}_2$ . В настоящей работе даны количественные оценки частотности реализации различных фёдоровских групп в кристаллических структурах.

### Теоретический анализ и его результаты

Отправной точкой нашего исследования является одна из наиболее общих закономерностей

минералообразования – стремление минеральной фазы к компактному заполнению пространства. На макроуровне эта тенденция проявляет себя известным законом агрегации минеральных индивидов (Войтеховский, 1992), а на микроуровне предопределяет решеточное строение кристаллов, эффективно описываемое методами теории регулярных разбиений (Войтеховский, 1995).

Формирующаяся при кристаллизации структура должна обладать трехмерной трансляционной инвариантностью. Наиболее наглядны полиэдрические модели такой структуры – регулярные заполнения трехмерного пространства правильными либо полуправильными полиэдрами (Войтеховский, Степенщиков, 2004). Такие модели воспроизводят симметрию фёдоровских групп  $Fm\bar{3}m$ ,  $Fd\bar{3}m$ ,  $Pm\bar{3}m$ ,  $Im\bar{3}m$ ,  $P6_3/mmc$ ,  $P6/mmm$ ,  $P4/mmm$ ,  $P4/mbm$ ,  $I4_1/amd$  и  $R\bar{3}m$ . Альтернативный класс моделей – сфероидальные структуры, обладающие симметрией шаровых упаковок, т.е. симметрией групп  $Fm\bar{3}m$ ,  $P6_3/mmc$ ,  $P\bar{6}m2$ ,  $P6_3mc$ ,  $R\bar{3}m$ ,  $P\bar{3}m1$  и  $P3m1^1$ . Перечисленные структуры соответствуют компактному (т.е. энергетически оптимальному) пространственному расположению структурных единиц. При этом особые преимущества создает наличие у кристаллической структуры центра симметрии, обеспечивающего четность координационного числа, т.е. стабильное равновесие атомов за счет антиравенств межатомных сил.

Полиэдрические и сфероидальные модели кристаллических структур подразумевают жесткость их решеток. Вместе с тем, стабильная кристаллическая решетка также может быть динамичной, т.е. допускающей взаимную подстройку атомных комплексов.

Из геометрических соображений ясно, что для такой подстройки решетка должна обладать плоскостями скользящего отражения и/или винтовыми осями симметрии. Высокая симметрия подавляет динамичность решетки, тогда как слишком низкая симметрия означает вырождение одного из ключевых факторов стабильности решетки. Моноклинно-симметричное сочетание  $P2_1/c$  оптимально в силу одновременного наличия низшей непримитивной винтовой оси и перпендикулярной ей плоскости скользящего отражения. Моноклинная решетка

<sup>1</sup>Мы не затрагиваем здесь шаровые упаковки с симметрией  $R\bar{3}m$ , т.к. у соответствующей кристаллической структуры период идентичности должен содержать, по крайней мере, 21 атомный слой. Это характерно для кристаллов, обладающих политипизмом.

окажется «достаточно динамичной» при наличии хотя бы одного из двух названных трансляционных элементов (группы  $P2_1/m$ ,  $P2/c$ ,  $C2/c$ ) либо при непримитивности ее ячейки (группа  $C2/m$ ). В то же время, лишенная трансляционной симметрии примитивная моноклинная структура  $P2/m$ , наоборот, должна быть отнесена к разряду особо редких.

У симморфных фёдоровских групп вероятность реализации их симметрии в кристаллической структуре резко снижается при невозможности регулярного замещения пространства многогранником простой формы группы Гесселя, соответствующей данной группе. Так, маловероятна кристаллизация структур  $P222$ ,  $F222$ ,  $P422$ ,  $Pmm2$ ,  $P4mm$ ,  $P6mm$ ,  $P23$ ,  $F23$ ,  $P432$ ,  $F432$ ,  $P\bar{4}3m$  и  $Pm\bar{3}$ . Наиболее редко реализуется пространственная симметрия примитивных симморфных фёдоровских групп, для которых  $g \neq g_0$ , где  $g$  – группа Гесселя, соответствующая данной фёдоровской группе,  $g_0$  – группа Гесселя простой формы группы  $g$ . А именно в кристаллических структурах крайне маловероятна реализация пространственной симметрии  $Pm$ ,  $P2$ ,  $P4$ ,  $P\bar{4}$ ,  $P2/m$  и  $P4/m$ .

Четыре симморфные фёдоровские группы средней категории вообще являются пустыми. Речь идет о гексагональных группах  $P6$ ,  $P622$ ,  $P6/m$  и  $P\bar{6}$ .

Поворотная гексагональная ось  $6$  может проходить только через узел кристаллической решетки, т.е. через вершину планигона гексагонально-симметричной плоской сетки, перпендикулярной оси  $6$ . Вследствие этого ограничения узлы решетки, занимающие в такой сетке трансляционно-инвариантные положения, в отсутствие сопутствующей планальной симметрии оказываются антипараллельны. В этом легко убедиться, например, построением соответствующей сетки Кеплера (рис. 1).

Инверсионная гексагональная ось  $\bar{6}$  тождественна зеркальной тригональной оси, поэтому при ее наличии в трансляционно инвариантной решетке в центрах обоих треугольников основного ромба решетки должны возникать равноправные, но трансляционно не идентичные добавочные оси  $\bar{6} \equiv 3/m$  (Белов, 1959). Между тем, узлы решетки с такой симметрией из-за наличия поперечной зеркальной плоскости располагаются в параллельных плоских сетках, в которых при отсутствии сопутствующей планальной симметрии, во-первых, каждый ряд может содержать трансляционно-инвариантные узлы только одной ориентации, а во-

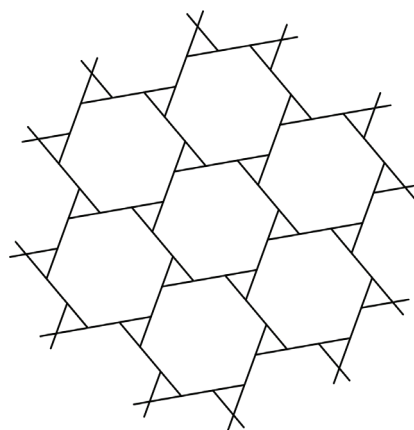


Рис. 1. Регулярное заполнение плоскости, обладающее поворотной гексагональной симметрией.

Fig. 1. Regular plane tiling with hexagonal symmetry.

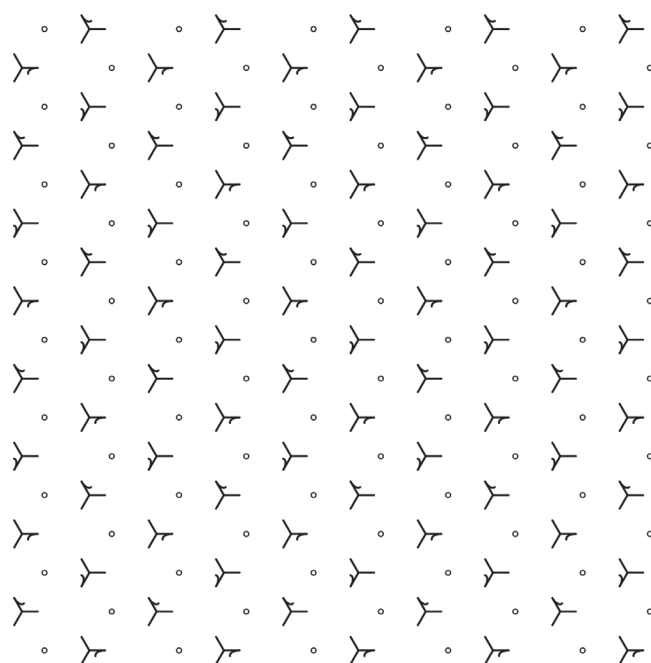


Рис. 2. Расположение узлов в тригонально-симметричной плоской сетке.

Fig. 2. Location of lattice points in a trigonal symmetrical plane net.

вторых, тригональная ось может находиться только в межузловых положениях (рис. 2).

По вышеуказанным причинам гексагональные оси (как поворотные, так и инверсионные) могут присутствовать в кристаллических структурах только в сочетании с продольными плоскостями симметрии; в противном случае разбиение кристаллического пространства не обладает ячейечной транзитивностью. Пространственная симметрия  $P6$ ,  $P622$ ,  $P6/m$  и  $P\bar{6}$  в кристаллических струк-

Таблица 1

## Соотношения вероятностей кристаллизации приоритетных структур

Table 1

## Ratios of crystallization probabilities of prior structures

Группа Гесселя	Вероятные пространственные структуры
$2/m$	$P2_1/c : C2/c = 5.9 : 1$
$\bar{3}m$	$R\bar{3}m : P\bar{3}m1 = 1.3 : 1$
$4/mmm$	$I4_1/amd : P4/mmm : P4/mbm = 2 : 1 : 1$
$6/mmm$	$P6_3/mmc : P6/mmm = 3.04 : 1$
$m\bar{3}m$	$Fm\bar{3}m : Pm\bar{3}m : Im\bar{3}m : Fd\bar{3}m = 8.44 : 6 : 2 : 1$

турах невозможна. Как и следовало ожидать, фёдоровские группы  $P6$ ,  $P622$ ,  $P6/m$  и  $P\bar{6}$  отсутствуют в списке «кристаллографических прототипов» (Mehl et al., 2017) – фёдоровских групп, у которых среди реальных кристаллических структур имеются достоверно установленные представители. В связи с этим нуждаются в уточнении данные (Рёков, 1998) о кристаллической структуре тяньшанита, которой приписывается фёдоровская группа  $P6/m$ .

Относительные вероятности реализации приоритетных (кристаллохимически предпочтительных) centrosимметричных структур, рассчитанные с учетом возможности реализации симметрии одной и той же фёдоровской группы несколькими способами, приведены в таблице 1. Среди ацентричных структур кристаллохимически предпочтительны тригонально-планальные решетки, для которых нами получена следующая оценка их относительной частотности:

$$P3m1 : P\bar{6}m2 : P6_3mc = 32.3 : 10.2 : 1.$$

Соотношения вероятностей реализации редких фёдоровских групп в кристаллических структурах приведены в таблице 2. При расчетах нами были использованы теоремы топологической кристаллографии (Sunada, 2013), а также алгоритм анализа независимой области фёдоровской группы (Банару, 2018).

Выполненная оценка неравномерности распределения кристаллических структур по фёдоровским группам позволяет прояснить «структурные предпочтения» кристаллических фаз при минеральных реакциях метаморфического и метасоматического типов.

Формирование твердого продукта в ходе таких реакций часто имеет оствальдовский характер (Урусов и др., 1997). Принято считать, что при оствальдовской кристаллизации переход метастабильной модификации в стабильную модифика-

цию определяется чисто кинетическими факторами. Между тем, структурные единицы кристаллической фазы подвижны лишь настолько, насколько позволяет ее решеточное строение, а точнее, кристаллохимические барьеры – ограничение или отсутствие возможностей свободного выбора кристаллохимических позиций для структурных единиц вещества. Причиной парадоксальной кинетической устойчивости формально нестабильных кристаллических фаз является принадлежность их структур к приоритетным кристаллохимическим типам. В то же время, кристаллизация структуры редкого типа возможна лишь при условии ее энергетической стабильности, т.к. редкость фёдоровской группы указывает на низкую «кристаллохимическую целесообразность» соответствующей структуры. Последнее особенно ярко проявляется при наличии барического воздействия, подавляющего вариативность позиций структурных единиц и потому создающего предпочтительные условия для кристаллической фазы с более вероятным типом структуры.

Иллюстрацией к сказанному может служить так называемый «стишовитовый парадокс» (Литвин и др., 2016): в герметических ростовых включениях в сверхглубинных алмазах стишовит  $SiO_2$  сосуществует, часто в виде сростков, с магниевюститом  $(Mg,Fe)O$ . С формальной химической точки зрения парагенезис вюститита  $FeO$ , периклаза  $MgO$  и модификаций кварца  $SiO_2$  невозможен, т.к. оксиды  $FeO$ ,  $MgO$  и  $SiO_2$  реагируют с образованием ферросилита  $FeSiO_3$  и метасиликатов магния  $MgSiO_3$ . Последние обладают множественным полиморфизмом, однако при термодинамических условиях генезиса алмаза (5–8.5 ГПа и 1300–1800 °С) метасиликаты магния могут находиться только в форме энстатита либо бриджмента (Kanzaki, 1991; Литвин, Спивак, 2019).

Таблица 2

## Соотношения вероятностей кристаллизации редких структур

Table 2

## Ratios of crystallization probabilities of rare structures

Группа Гесселя	Вероятные пространственные структуры
2	$P2_1 : C2 = 8.41 : 1$
<i>M</i>	$Cc : Pc : Cm = 20.88 : 7.82 : 1$
222	$P2_12_12_1 : P2_12_12 : C222_1 : P222_1 = 744.33 : 26.33 : 9.67 : 1$
<i>mm2</i>	$Pna2_1 : Pca2_1 : Fdd2 : Cmc2_1 : C2cb : Iba2 : Pmc2_1 : Pmn2_1 : Pba2 : Pnn2 =$ $= 60 : 27.5 : 13.5 : 6 : 3.5 : 3 : 1.2 : 1.2 : 1 : 1$
<i>Mmm</i>	$Pbca : Pnma : Pbcn : Pecn : Cmca : Cmcn : Pbcm : Pbam : Pnmm : Pcca =$ $= 137.08 : 41.67 : 27.17 : 12.67 : 4.5 : 3 : 1.5 : 1.5 : 1.5 : 1$
3	$R3 : P3_{1,2} : P3 = 28.5 : 26.5 : 1$
$\bar{3}$	$R\bar{3} : P\bar{3} = 5.07 : 1$
32	$P3_{1,2}21 : R32 : P3_{1,2}I2 = 19 : 1.5 : 1$
<i>3m</i>	$R3c : P3c1 : P3lc = 40 : 2 : 1$
$\bar{3}m$	$R\bar{3}c : P\bar{3}c1 : P\bar{3}lc = 5 : 1 : 1$
4	$P4_{1,3} : I4_1 : I4 : P4_2 = 16.8 : 3 : 2.2 : 1$
$\bar{4}2m$	$P\bar{4}2_1c : I\bar{4}2d : P\bar{4}2_1m : I\bar{4}2m : P\bar{4}b2 : P\bar{4}n2 = 18 : 4.67 : 3.33 : 3 : 1 : 1$
422	$P4_{1,3}2_12 : P4_22_12 : P4_{1,3}22 = 55.33 : 3 : 1$
<i>4/m</i>	$I4_1/a : P4_2/n : I4/m : P4/n = 25 : 15.25 : 3 : 1$
<i>4mm</i>	$I4_1cd : P4_2bc : I4_md : P4nc : P4cc : P4_2cm : P4_2mc : P4_2nm : I4cm =$ $= 12 : 5 : 4 : 4 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1$
<i>4/mmm</i>	$I4_1acd : P4_2/mnm : P4/nnc : P4/ncc : P4_2/nbc : P4/mcc : P4_2/mbc : P4_2/nmm :$ $: P4/mnc : P4_2/nmc : P4/nbm : P4/nmm : P4_2/mmc : P4_2/mcm : P4_2/ncm : I4/mmm =$ $= 16 : 5 : 3 : 3 : 3 : 2 : 2 : 2 : 2 : 2 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1$
6	$P6_3 : P6_2 = 14 : 3$
622	$P6_322 : P6_222 = 1.5 : 1$
$\bar{6}m2$	$P\bar{6}2c : P\bar{6}c2 : P\bar{6}2m = 2 : 1 : 1$
<i>6/mmm</i>	$P6/mcc : P6_3/mcm = 1 : 1$
<i>m3</i>	$Pa3 : Ia3 : Im3 : Pn3 : Fm3 : Fd3 = 19 : 3 : 2 : 1 : 1 : 1$
$\bar{4}3m$	$I\bar{4}3m : P\bar{4}3n : F\bar{4}3c : I\bar{4}3d = 2.33 : 1.33 : 1.33 : 1$
<i>m3m</i>	$Pn3n : Pm3n : Pn3m : Ia3d = 2 : 1 : 1 : 1$

Ферросилит, энстатит и бриджменит имеют ромбическую структуру редкого типа, тогда как вюстит и периклаз имеют структуру приоритетного типа – кубическую структуру галита *Fm3m*. Вследствие этого в обсуждаемой оксидной системе термодина-

мические условия генезиса алмаза подавляют реакции образования метасиликатов, превращая SiO<sub>2</sub> в химически пассивный компонент минеральной ассоциации. Помимо этого благодаря изоструктурности вюstitа и периклаза образуется сложный

оксид (Mg,Fe)O – магнезиовюстит. Однако из-за сильной нестехиометрии FeO и немонотонной зависимости его химической активности от температуры в реальных геохимических условиях высока вероятность неполного протекания этого процесса, в результате чего вместо магнезиовюстита образуется высокожелезистый периклаз.

### Выводы

Таким образом, на формирование кристаллической фазы влияют не только энергетические, но и кристаллохимические барьеры – ограничение или отсутствие возможностей свободного выбора кристаллохимических позиций для структурных единиц вещества. Кинетическая устойчивость формально нестабильных кристаллических фаз обеспечивается принадлежностью их структур к приоритетным кристаллохимическим типам. Кристаллизация структуры редкого типа возможна лишь при условии ее энергетической стабильности. Редкость фёдоровской группы указывает на низкую «кристаллохимическую целесообразность» соответствующей структуры.

### Литература

- Банару А.М.** (2018) Информационная энтропия фёдоровских групп. *Уральский геологический журнал*, (3), 84–88.
- Белов Н.В.** (1959) Гексагональные фёдоровские группы. *Кристаллография*, 4(2), 268–276.
- Войтеховский Ю.Л.** (1992) К анализу свойства агрегативности горных пород. *Записки Российского минералогического общества*, 121(2), 34–40.
- Войтеховский Ю.Л.** (1995) О согласовании понятий структуры и текстуры и принципах организации горных пород. *Записки Российского минералогического общества*, 124(2), 119–124.
- Войтеховский Ю.Л.** (2010) О кубо-триклинной инверсии системы минеральных видов и тотальной асимметрии минеральных индивидов. *Современная минералогия: от теории к практике. Материалы II съезда РМО*. С.-Петербург: РМО, СПГИ (ТУ), 24–26.
- Войтеховский Ю.Л., Степенщиков Д.Г.** (2004) Комбинаторная кристалломорфология. Реальные кристаллографические простые формы. Апатиты, К & М, 275 с.
- Иванов О.К.** (2016) Факторы, определяющие кристаллизацию минералов. *Уральский геологический журнал*, (4), 39–45.
- Литвин Ю.А., Спивак А.В.** (2019) Генезис алмазов и парагенных включений в условиях нижней мантии: строение ликвидуса материнской системы при 26 Гпа. *Геохимия*, 64(2), 128–144.
- Литвин Ю.А., Спивак А.В., Дубровинский Л.С.** (2016) Магматическая эволюция вещества нижней мантии земли: стишовитовый парадокс и происхождение сверхглубинных алмазов. *Геохимия*, (11), 970–983.
- Макагонов Е.П.** (2002) Аффинная гомология кристаллов. Миасс, ИМин УрО РАН, 139 с.
- Поваренных А.С.** (1966) О закономерностях в распределении минеральных видов по сингониям, классам симметрии и пространственным группам. *Минералогический сборник Львовского государственного университета*, 20(4), 341–351.
- Попов В.А.** (2018) О современной парадигме минералогии как отражении законов анатомии кристаллов. *Минералогия*, 4(2), 62–69.
- Урусов В.С.** (1991) Кристаллохимические условия заселения правильных систем точек. *Вестник МГУ. Серия 4, Геология*, (4), 3–19.
- Урусов В.С.** (1998) Естественный отбор минеральных видов. *Соросовский образовательный журнал*, (4), 50–56.
- Урусов В.С., Таусон В.Л., Акимов В.В.** (1997) Геохимия твердого тела. М., ГЕОС, 500 с.
- Урусов В.С., Надежина Т.Н.** (2006) «Пустые» и редкие пространственные группы в структурной минералогии. *Вестник МГУ. Серия 4, Геология*, (5), 52–60.
- Чесноков Б.В.** (2005) Новые законы симметрии в царстве реальных кристаллов. *Уральский геологический журнал*, 1(43), 1–40.
- Шафрановский И.И., Фекличев В.Г.** (1982) Симметричная статистика минералов. *Минералогический журнал*, 4(6), 31–36.
- Kanzaki M.** (1991) Ortho/clinoenstatite transition. *Physics and Chemistry of Minerals*, 17(8), 726–730.
- König A., Mermin N.D.** (1999) Screw rotations and glide mirrors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 96(7), 3502–3506.
- Mehl M.J., Hicks D., Toher C., Levy O., Hanson R.M., Hart G., Curtarolo S.** (2017) The AFLOW Library of Crystallographic Prototypes: Part 1. *Computational Materials Science*, 136, Supplement.
- Pekov I.V.** (1998) Minerals first discovered on the territory of the former Soviet Union. Moscow, Ocean Pictures Ltd, 369 p.
- Sunada T.** (2013) Topological crystallography. Tokyo, Springer, 226 p.

### References

- Banaru A.M.** (2018) [Informational entropy of Fedorov groups]. *Ural'sky geologicheskij zhurnal [Uralian Geological Journal]*, (3), 84–88. (in Russian)
- Belov N.V.** (1959) [Hexagonal Fedorov groups]. *Kristallografiya [Crystallography]*, 4(2), 268–276. (in Russian)

- Chesnokov B.V.** (2005) [New symmetry laws in a kingdom of real crystals]. *Ural'sky geologicheskyy zhurnal [Uralian Geological Journal]*, 1(43), 1–40. (in Russian)
- Voytekhovskiy Yu.L.** (1992) [Toward the analysis of aggregativity of rocks]. *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, 121(2), 34–40. (in Russian)
- Voytekhovskiy Yu.L.** (1995) [Complying the concepts of structure and texture]. *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, 124(2), 119–124. (in Russian)
- Voytekhovskiy Yu.L.** (2010) [Cubic-triclinic inversion in the system of mineral species and total asymmetry of mineral individuals]. In: *Sovremennaya mineralogia: ot teorii k praktike. Materialy 11 s'ezda RMO [Modern mineralogy: from theory to practice]*, Proceedings of 11 th RMO Meeting. 24–26. Sankt-Peterburg. RMO SPGGI (TU) (in Russian)
- Voytekhovskiy Yu.L., Stepanshchikov D.G.** (2004) [Combinatorial crystallography. Real crystallographical simple forms]. *Apatity, K & M*, 275 p. (in Russian)
- Ivanov O.K.** (2016) [Factors of mineral crystallization] *Ural'sky geologicheskyy zhurnal [Uralian Geological Journal]*, (4), 39–45. (in Russian)
- Kanzaki M.** (1991) Ortho/clinoenstatite transition. *Physics and Chemistry of Minerals*, 17(8), 726–730.
- König A., Mermin N.D.** (1999) Screw rotations and glide mirrors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 96(7), 3502–3506.
- Litvin Yu.A., Spivak A.V.** (2019) Genesis of diamonds and paragenetic inclusions under lower mantle conditions: the liquidus structure of the parental system at 26 GPa. *Geochemistry International*, 64(2), 128–144.
- Litvin Yu.A., Spivak A.V., Dubrovinsky L.S.** (2016) Magmatic evolution of the material of the Earth's lower mantle: Stishovite paradox and origin of superdeep diamonds (Experiments at 24–26 GPa). *Geochemistry International* 54(11), 936–947.
- Mehl M.J., Hicks D., Toher C., Levy O., Hanson R.M., Hart G., Curtarolo S.** (2017) The AFLOW Library of Crystallographic Prototypes: Part 1. *Computational Materials Science*, 136, Supplement.
- Makagonov E.P.** (2002) [Affine homology of crystals]. Miass, IMin UrO RAN, 139 p. (in Russian)
- Pekov I.V.** (1998) Minerals first discovered on the territory of the former Soviet Union. Moscow, Ocean Pictures Ltd, 369 p.
- Povarennykh A.S.** (1966) [Laws of distribution of mineral species in syngonies, symmetry classes and space groups] *Mineralogicheskii sbornik L'vovskogo gosudarstvennogo universiteta [Mineralogical collection of Lvov State University]*, 20(4), 341–351. (in Russian)
- Popov V.A.** (2018) [About current paradigm of mineralogy as a reflection of crystal anatomy laws]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, 4(2), 62–69. (in Russian)
- Shafranovskiy I.I., Feklichev V.G.** (1982) [Symmetry statistics of minerals]. *Mineralogicheskii zhurnal [Mineralogical Journal]*, 4(6), 31–36. (in Russian)
- Sunada T.** (2013) Topological crystallography. Tokyo, Springer, 226 p.
- Urusov V.S.** (1991) [Crystal chemical conditions for occupying regular point systems]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya [Moscow University Geology Bulletin]*, (4), 3–19. (in Russian)
- Urusov V.S., Tauson V.L., Akimov V.V.** (1997) [Solid state geochemistry]. Moscow, GEOS, 500 p. (in Russian).
- Urusov V.S.** (1998) [Natural selection of mineral species]. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal [Soros Educational Journal]*, (4), 50–56. (in Russian)
- Urusov V.S., Nadezhina T.N.** (2006) [«Empty» and rare spatial groups in structural mineralogy] *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya [Moscow University Geology Bulletin]*, (5), 52–60. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 18 апреля 2019 г.