

**КЛАСТЕРНАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ:  
НОВЫЙ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫЙ КЛАСТЕР-ПРЕКУРСОР  $K244 = 0@12@20@80@132$   
И НОВЫЙ ТРЕХСЛОЙНЫЙ КЛАСТЕР-ПРЕКУРСОР  $K245 = 1@14@48@206$   
В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ  $Rh_{140}Al_{403}$ - $cP549$  И  $Mn_{18}Pd_{138}Al_{387}$ - $cP549$**

© 2021 г. В. Я. Шевченко<sup>1, \*</sup>, В. А. Блатов<sup>2,</sup>, Г. Д. Илюшин<sup>2, 3, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,  
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

<sup>2</sup>Международный научно-исследовательский центр по теоретическому материаловедению,  
Самарский государственный технический университет,  
ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара, 443100 Россия

<sup>3</sup>Федеральный научно-исследовательский центр “Кристаллография и фотоника”,  
Ленинский пр., 59, Москва, 119333 Россия

\*e-mail: shevchenko@isc.nw.ru

\*\*e-mail: gdilyushin@gmail.com

Поступила в редакцию 10.08.2020 г.

После доработки 01.10.2020 г.

Принята к публикации 08.10.2020 г.

С помощью пакета программ ToposPro осуществлен геометрический и топологический анализ кристаллической структуры интерметаллида  $Rh_{140}Al_{403}$ - $cP549$  с параметрами кубической ячейки:  $a = 19.9350 \text{ \AA}$ ,  $V = 7922.25 \text{ \AA}^3$ , и пр. группой  $Pm\bar{3}$  и  $Mn_{18}Pd_{138}Al_{387}$ - $cP549$  с параметрами кубической ячейки:  $a = 20.211 \text{ \AA}$  и пр. группой  $Pm\bar{3}$ . Установлены два новых кластерных прекурсора с симметрией  $-43m$ : четырехслойный кластер  $K244 = 0@12@20@80@132$  с внутренним икосаэдром  $Pd_{12}$  или  $Rh_{12}$  и трехслойный кластер  $K245 = 1@14@48@206$  с внутренним 15-атомным полиэдром  $Al@Pd_8Al_6$  или  $Al@Rh_8Al_6$ . Реконструирован симметричный и топологический код процессов самосборки 3D структур из нанокластеров-прекурсоров  $K244$  и  $K245$  в виде: первичная цепь  $\rightarrow$  микрослой  $\rightarrow$  микрокаркас. В качестве спейсеров, занимающих пустоты в 3D каркасе из нанокластеров  $K242$  и  $K245$  установлены кластеры  $MAI_3$  и  $M_2Al_2$  ( $M = Rh$  или  $Pd$ ), связанные атомами Al.

**Ключевые слова:** интерметаллиды  $Rh_{140}Al_{403}$  и  $Mn_{18}Pd_{138}Al_{387}$ , самосборка кристаллической структуры, новые нанокластеры-прекурсоры  $K244 = 0@12@20@80@132$  и  $K245 = 1@14@48@206$

DOI: 10.31857/S0132665121010108

## ВВЕДЕНИЕ

При быстром охлаждении сплава алюминия и марганца  $MnAl_6$  в [1] впервые были получены квазикристаллы, обладающие точечной икосаэдрической симметрией. В настоящее время в двойной системе  $Mn-Al$  установлено образование 16 кристаллохимически различных интерметаллидов [2, 3]. Близким по химическому составу к сплаву  $MnAl_6$  является интерметаллид  $Mn_{12}Al_{57}$ , содержащий 54-атомный двухслойный кластер Маккея  $0@Al_{12}@42(Mn_{12}Al_{30})$  [4].

В настоящее время синтезированы многие интерметаллиды, кристаллические структуры которых рассматриваются как икосаэдрические аппроксиманты квазикри-

Таблица 1. Кристаллохимические данные интерметаллидов

Интерметаллид	Группа симметрии	Параметр кубической ячейки, Å	Объем Å <sup>3</sup>	Индекс Пирсона
Mn <sub>12</sub> Al <sub>57</sub> [4]	<i>Pm</i> -3	12.680	2038.7	<i>cP</i> 138
Fe <sub>14</sub> Cu <sub>48</sub> Al <sub>78</sub> [5]	<i>Pm</i> -3	12.312	1866.3	<i>cP</i> 140
Ir <sub>13</sub> Sc <sub>57</sub> [6]	<i>Pm</i> -3	14.364	2963.6	<i>cP</i> 140
Ru <sub>13</sub> Sc <sub>57</sub> [6]	<i>Pm</i> -3	14.394	2982.3	<i>cP</i> 140
Rh <sub>13</sub> Sc <sub>57</sub> [6]	<i>Pm</i> -3	14.405	2989.1	<i>cP</i> 140
Pt <sub>13</sub> Sc <sub>57</sub> [6]	<i>Pm</i> -3	14.415	2995.3	<i>cP</i> 140
Ru <sub>14</sub> Cu <sub>39</sub> Al <sub>70</sub> [7]	<i>Pm</i> -3	12.377	1896.2	<i>cP</i> 142
Mg <sub>30</sub> Ag <sub>19</sub> Al <sub>24</sub> [8]	<i>Pm</i> -3	14.500	3048.6	<i>cP</i> 146
K <sub>49</sub> Tl <sub>108</sub> [9]	<i>Pm</i> -3	17.287	5166.1	<i>cP</i> 157
Ti <sub>6</sub> Mg <sub>20</sub> Zn <sub>128</sub> [10]	<i>Pm</i> -3	13.554	2490.1	<i>cP</i> 168
Hf <sub>6</sub> Mg <sub>20</sub> Zn <sub>128</sub> [10]	<i>Pm</i> -3	13.674	2556.7	<i>cP</i> 168
Zr <sub>6</sub> Mg <sub>20</sub> Zn <sub>128</sub> [10]	<i>Pm</i> -3	13.709	2576.4	<i>cP</i> 168
Rh <sub>140</sub> Al <sub>403</sub> [11]	<i>Pm</i> -3	19.935	7922.3	<i>cP</i> 549
Mn <sub>18</sub> Pd <sub>138</sub> Al <sub>387</sub> [12]	<i>Pm</i> -3	20.211	8255.9	<i>cP</i> 549

сталлов (табл. 1). Такие интерметаллиды обладают сложным стехиометрическим составом и получены в двойных и тройных системах с участием атомов Al и Zn [4–11]. Наиболее кристаллохимически сложными структурами являются Rh<sub>140</sub>Al<sub>403</sub>-*cP*549 [10] и Mn<sub>18</sub>Pd<sub>138</sub>Al<sub>387</sub>-*cP*549 [12], рассматриваемые как 2/1 кубические аппроксиманты икосаэдрической фазы.

Интерметаллид Rh<sub>140</sub>Al<sub>403</sub>-*cP*549 характеризуется параметрами кубической ячейки:  $a = 19.9350 \text{ \AA}$ ,  $V = 7922.25 \text{ \AA}^3$ , и пр. гр. *Pm*-3 [10]. Уникальная последовательность Вайкоффа для 39 кристаллографически независимых атомов имеет вид  $l^{12}k^7j^9i^4h^2g^2f^2b$ . Синтез интерметаллида осуществлен из смеси состава Al<sub>85</sub>Rh<sub>17</sub>Si<sub>8</sub> и по данным химического анализа монокристалл имел химический состав Al<sub>66.6</sub>Rh<sub>26.1</sub>Si<sub>7.3</sub> [10]. Положение атомов Si в кристаллической структуре Rh<sub>140</sub>Al<sub>403</sub>-*cP*549 не определено.

Интерметаллид Mn<sub>18</sub>Pd<sub>138</sub>Al<sub>387</sub>-*cP*549 характеризуется параметрами кубической ячейки:  $a = 20.211 \text{ \AA}$ ,  $V = 8255.88 \text{ \AA}^3$ , и пр. группой *Pm*-3 [11]. Уникальная последовательность Вайкоффа для 39 кристаллографически независимых атомов имеет вид  $l^{12}k^7j^9i^4h^2g^2f^2b$ . По данным химического анализа полученных монокристаллов, в состав интерметаллидов входят атомы Si. Особенность строения Mn<sub>18</sub>Pd<sub>138</sub>Al<sub>387</sub>-*cP*549 – наличие 6 и 12 атомов Mn, упорядочено занимающих позиции 6h и 12j, которые в Rh<sub>140</sub>Al<sub>403</sub>-*cP*549 занимали атомы Rh.

В работе [11] в кристаллической структуре Mn<sub>18</sub>Pd<sub>138</sub>Al<sub>387</sub> были выделены многослойные кластеры состава Mn<sub>12</sub>Pd<sub>124</sub>Al<sub>302</sub> и Pd<sub>40</sub>Al<sub>67</sub>. При этом атомы Mn1 (в позиции 6h) не входят в состав этих кластеров. В кластере Mn<sub>12</sub>Pd<sub>124</sub>Al<sub>302</sub> геометрически выделены 13 квазисферических оболочек: 5 – из атомов Pd, 7 – из атомов Al и 1 – из атомов Mn. В выделенных оболочках атомы не обязательно связаны друг с другом: в первой икосаэдрической оболочке Pd<sub>12</sub> связанные атомы Pd–Pd находятся на расстоянии 3.058 Å, во второй икосаэдрической оболочке не связанные атомы Pd находятся на расстоянии 4.778 Å. В последних оболочках атомы Pd и Al являются общими с соседними кластерами Mn<sub>12</sub>Pd<sub>124</sub>Al<sub>302</sub>. В кристаллической структуре Rh<sub>140</sub>Al<sub>403</sub> выделены два таких же многослойных кластера [10].

В настоящей работе проведен геометрический и топологический анализ кристаллической структуры интерметаллидов Rh<sub>140</sub>Al<sub>403</sub>-*cP*549 и Mn<sub>18</sub>Pd<sub>138</sub>Al<sub>387</sub>-*cP*549 (пакет программ TorosPro [12]). Установлен симметричный и топологический код процессов кла-

**Таблица 2.** Rh<sub>140</sub>Al<sub>403</sub>-сP549. Координационные последовательности атомов

Атом	Локальное окружение	Координационные последовательности				
		<i>N</i> <sub>1</sub>	<i>N</i> <sub>1</sub>	<i>N</i> <sub>1</sub>	<i>N</i> <sub>1</sub>	<i>N</i> <sub>1</sub>
Al1	12Al	12	50	116	208	312
Al2	10Al + 3Rh	13	47	105	191	307
Al4	9Al + 2Rh	11	45	115	200	313
Al5	7Al + 3Rh	10	41	95	176	284
Al6	7Al + 4Rh	11	43	95	175	287
Al7	14Al	14	48	110	192	350
Al8	11Al + 2Rh	13	50	104	206	315
Al9	9Al + 4Rh	13	45	106	196	323
Al10	9Al + 3Rh	12	45	105	192	304
Al11	10Al + 4Rh	14	49	97	179	289
Al12	9Al + 4Rh	13	43	105	201	307
Al13	10Al + 4Rh	14	46	101	186	290
Al14	9Al + 4Rh	13	48	106	195	319
Al15	8Al + 5Rh	13	48	103	188	310
Al16	8Al + 4Rh	12	47	107	198	314
Al17	10Al + 4Rh	14	51	112	207	316
Al18	10Al + 3Rh	13	47	109	191	310
Al19	9Al + 4Rh	13	47	102	185	308
Al20	10Al + 3Rh	13	48	109	199	316
Al21	9Al + 3Rh	12	48	113	204	324
Al22	10Al + 3Rh	13	46	107	195	308
Al23	10Al + 4Rh	14	45	105	184	305
Al24	9Al + 3Rh	12	43	101	179	290
Al25	9Al + 3Rh	12	44	104	179	305
Al27	8Al + 4Rh	12	46	106	199	312
Al28	9Al + 3Rh	12	46	105	191	316
Al29	8Al + 3Rh	11	44	102	185	303
Rh1	12Al	12	53	112	212	320
Rh2	12Al + 1Rh	13	45	93	168	286
Rh4	8Al + 3Rh	11	44	98	180	297
Rh5	12Al + 1Rh	13	47	109	196	311
Rh6	9Al + 3Rh	12	42	98	182	295
Rh7	10Al + 1Rh	11	43	96	187	295
Rh8	10Al	10	43	99	178	308
Rh10	12Al	12	43	100	178	296
Rh11	5Al + 5Rh	10	40	95	190	315
Rh12	12Al	12	45	109	201	331
Rh13	10Al	10	42	103	196	307
Rh14	11Al	11	41	94	178	279

стерной самосборки кристаллических структур из кластеров K244 = 0@12@20@80@132 и K245 = 1@14@48@206 в виде: первичная цепь S<sub>3</sub><sup>1</sup> → микрослой S<sub>3</sub><sup>2</sup> → микрокаркас S<sub>3</sub><sup>3</sup>.

Работа продолжает исследования [13–20]. Методики, использованные при компьютерном анализе приведены в [13–20].

Полученные значения координационных последовательностей атомов в 3D-сетках, приведены в табл. 2, в которой жирным шрифтом выделено число соседних атомов в ближайшем окружении, т.е. в первой координационной сфере атома.

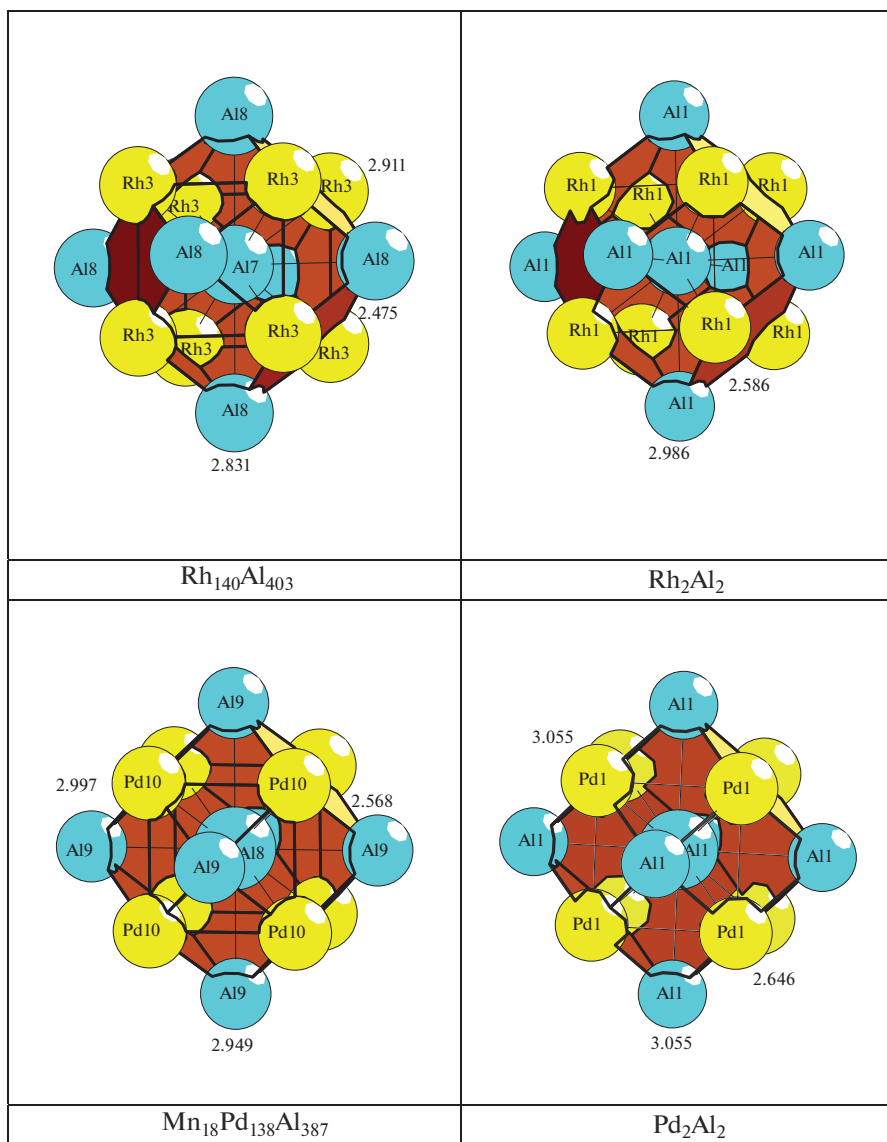


Рис. 1. Кластеры 1@14. Здесь и далее числа указывают длины связей в Å.

## САМОСБОРКА КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР $Rh_{140}Al_{403}$ И $Mn_{18}Pd_{138}Al_{387}$

Метод моделирования кристаллической структуры представлен в [14, 15].

### Кристаллографические данные

Пространственная группа  $Pm-3$  (200) характеризуется позициями с точечной симметрией:  $m-3$  ( $1a$ ,  $1b$ ),  $mmm$  ( $3c$ ,  $3d$ ) и др.

Метод полного разложения 3D фактор-графа структуры на кластерные подструктуры был использован для определения каркас-образующих нанокластеров кристалли-

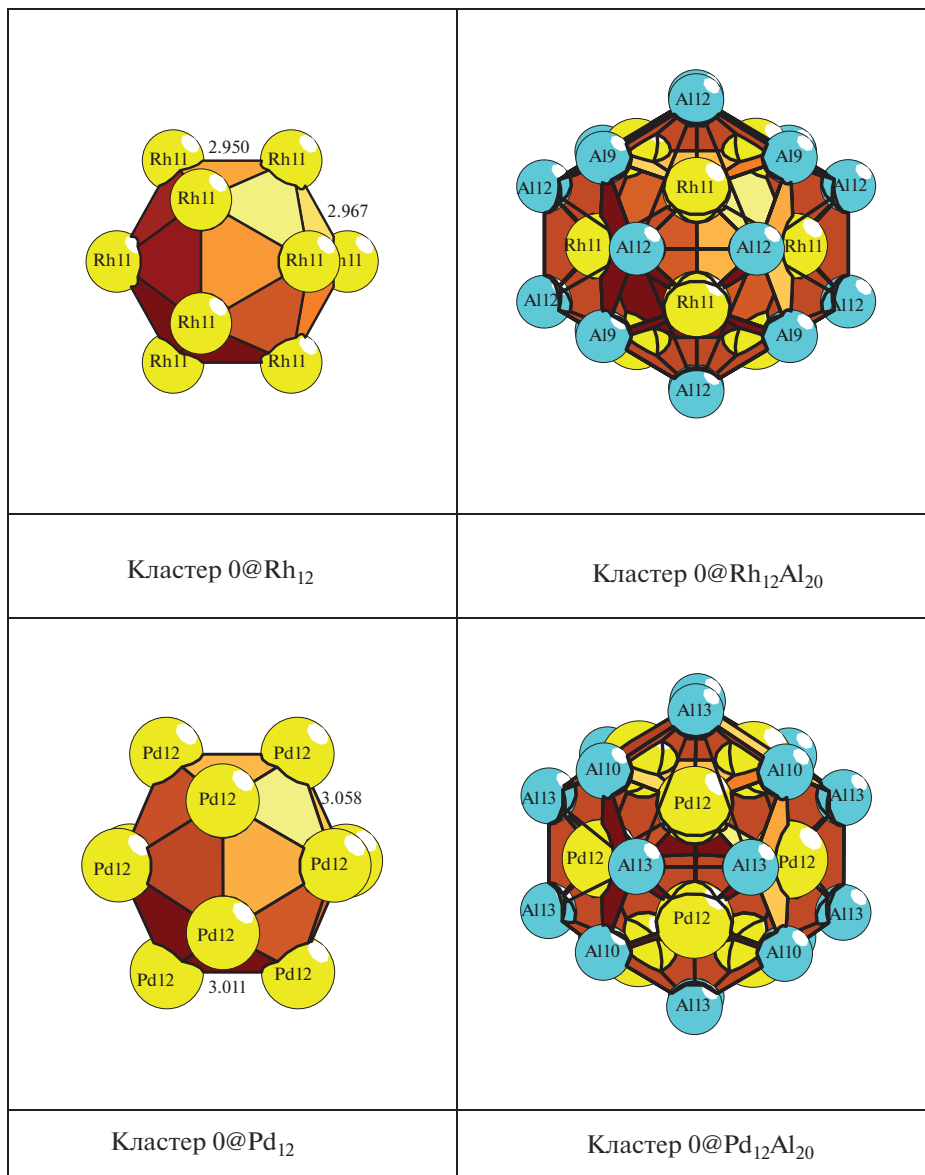
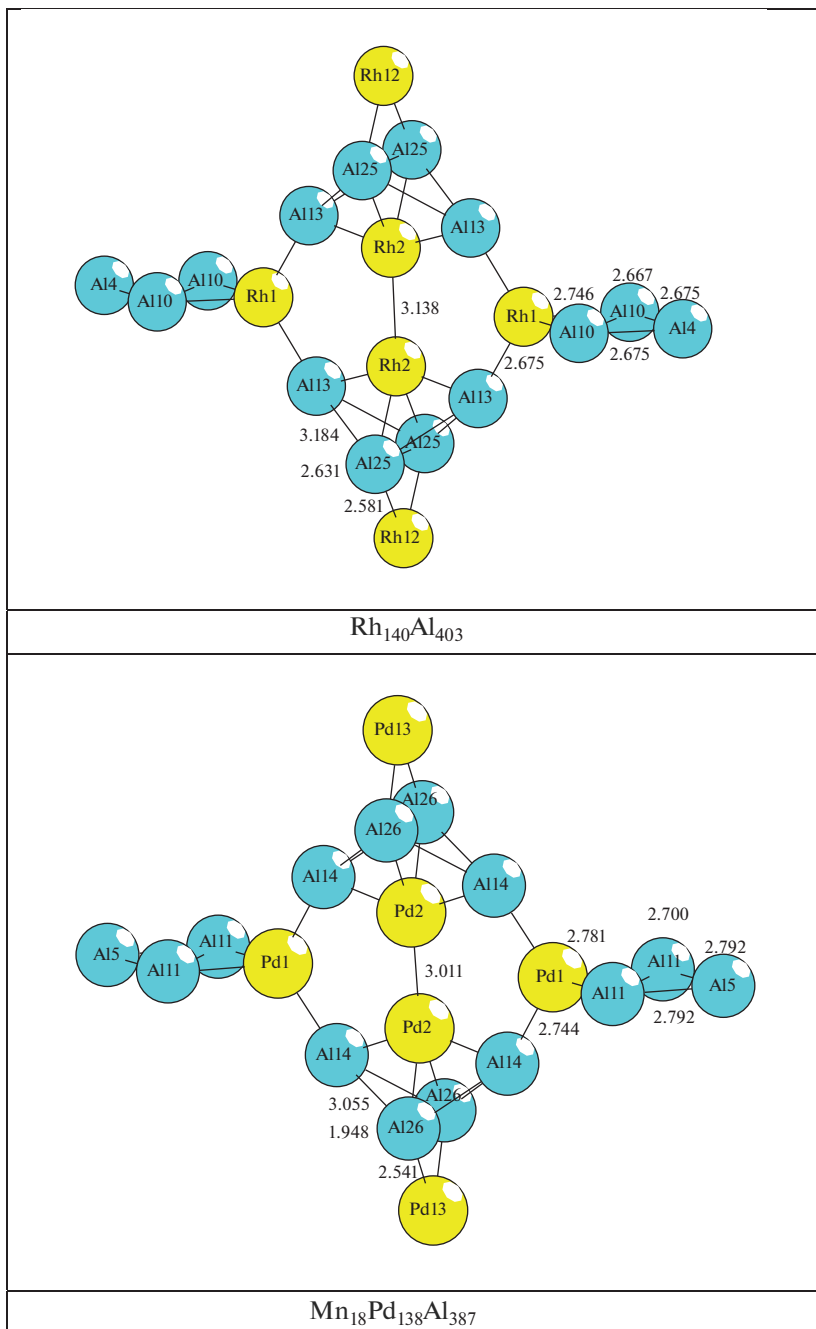


Рис. 2. Кластеры 0@12 и 0@32.

ческой структуры. Число вариантов разложения на кластерные подструктуры с числом выделенных кластеров от 3 до 12 составляет до 9000.

В результате установлены два новых кластерных прекурсора с симметрией  $-43m$ : четырехслойный кластер  $K244 = 0@12@20@80@132$  с внутренним икосаэдром  $Pd_{12}$  или  $Rh_{12}$  и трехслойный кластер  $K245 = 1@14@48@206$  с внутренним 15-атомным полиэдром  $Al@Pd_8Al_6$  или  $Al@Rh_8Al_6$  (рис. 1, 2). Такие же локальные области в виде 15-атомных полиэдров могут быть выделены в простых кристаллических структурах интерметаллидов  $Rh_2Al_2-cP2$  и  $Pd_2Al_2-cP2$  с пр. группой  $Pm-3m$  [3] (рис. 1).



**Рис. 3.** Кластерные структуры, расположенные между кластерами K244 и K245 в пустотах с центром в позиции  $3d$  с симметрией  $mmm$ .

В качестве спейсеров, занимающих пустоты в 3D каркасе из нанокластеров K244 и K245, установлены кластеры  $MAl_3$  и  $M_2Al_2$  ( $M = Rh$  или  $Pd$ ), связанные атомами Al (рис. 3).

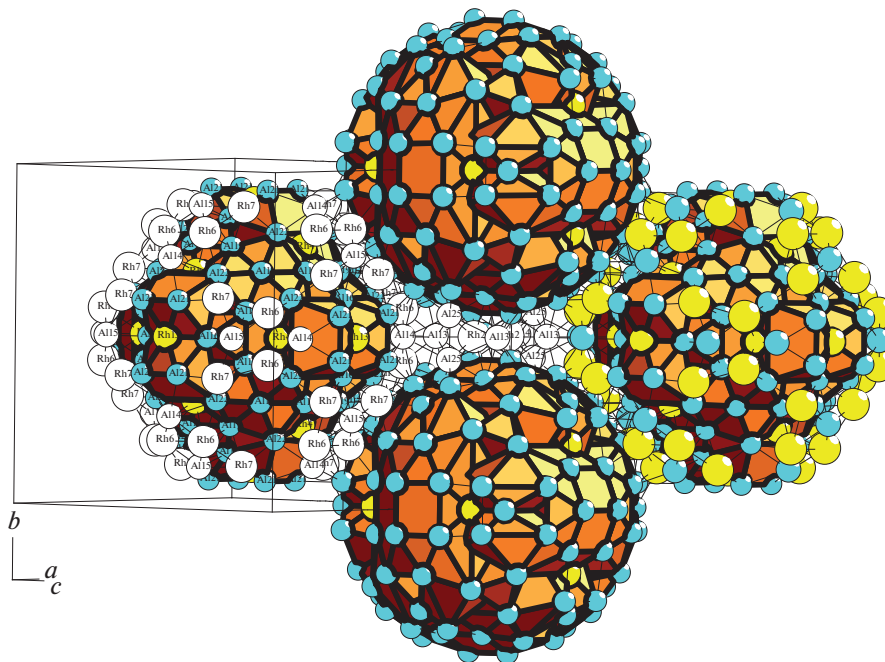


Рис. 4.  $Rh_{140}Al_{403}\text{-}cP549$ . Микрослой, образованный из нанокластеров K244 и K245.

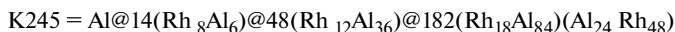
Самосборка первичных цепей  $S_3^1$  происходит при связывании нанокластеров K244 и K245 в направлении диагонали в плоскости (110) (рис. 4–8).

Образование микрослоя  $S_3^2$  происходит при связывании параллельно расположенных первичных цепей  $S_3^1$  в плоскости (110) (рис. 4). В элементарной ячейке расстояние

Таблица 3.  $Pd_{138}Al_{387}$ . Нанокластер K244. Атомы, формирующие внутренний икосаэдрический кластер K12 = 0@12 и 20-, 80- и 132-атомную оболочку

$K244 = 0@Rh_{12}@Al_{20}@80(Al_{60}Rh_{20})@132(Rh_{12}Al_{120})$			
Кластер K12	Оболочка	Оболочка	Оболочка
12 Rh11	12 Al12	12 Al24	12 Al5
	8 Al9	24 Al28	24 Al6
		24 Al29	12 Al11
		12 Rh10	24 Al20
		8 Rh8	24 Al23
			24 Al27
			12 Rh14
Всего 244 атома			

**Таблица 4.** Pd<sub>138</sub>Al<sub>387</sub>. Нанокластер K245. Атомы, формирующие внутренний икосаэдрический кластер K15 = 1@14, 48- и 182-атомную оболочку



Кластер K12	Оболочка	Оболочка	
1 Al 7	12 Al 17	8 Al 1	12 Al 14
8 Rh 8	24 Al 18	12 Al 16	12 Al 15
6 Al 8	12 Rh 5	24 Al 19	24 Rh 6
		24 Al 21	24 Rh 7
		24 Al 22	
		6 Rh 13	
		12 Rh 4	
Всего 245 атомов			

между центрами супракластеров K244 (табл. 3) и K245 (табл. 4) соответствует длинам векторов 19.935 Å или 20.211 Å для Rh<sub>140</sub>Al<sub>403</sub> и Mn<sub>18</sub>Pd<sub>138</sub>Al<sub>387</sub> соответственно. На этой стадии в пустоте микрослоя между кластерами K244 и K245 происходит локализация кластеров MAl<sub>3</sub> и M<sub>2</sub>Al<sub>2</sub> (M = Rh или Pd), связанных атомами Al.

Микрокаркас структуры S<sub>3</sub><sup>3</sup> формируется при связывании двух микрослоев в направлении [001]. Расстояние между микрослоями определяет длину вектора трансляции 19.935 Å или 20.211 Å (рис. 4).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью компьютерных методов (пакета программ ToposPro) осуществлен геометрический и топологический анализ кристаллической структуры интерметаллида Rh<sub>140</sub>Al<sub>403</sub>-cP549 и Mn<sub>18</sub>Pd<sub>138</sub>Al<sub>387</sub>-cP549. Установлен симметричный и топологический код процессов кластерной самосборки кристаллических структур из кластеров K244 = 0@12@20 @80@132 и K245 = 1@14@48@206 в виде: первичная цепь S<sub>3</sub><sup>1</sup> → микрослой S<sub>3</sub><sup>2</sup> → микрокаркас S<sub>3</sub><sup>3</sup>. В качестве спейсеров, занимающих пустоты в 3D каркасе из нанокластеров K242 и K245, установлены кластеры MAl<sub>3</sub> и M<sub>2</sub>Al<sub>2</sub> (M = Rh или Pd), связанные атомами Al.

Нанокластерный анализ выполнен при поддержке Российского научного фонда (РНФ № 20-13-00054), анализ самосборки кристаллической структуры выполнен при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, топологический анализ выполнен при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 0778-2020-0005.



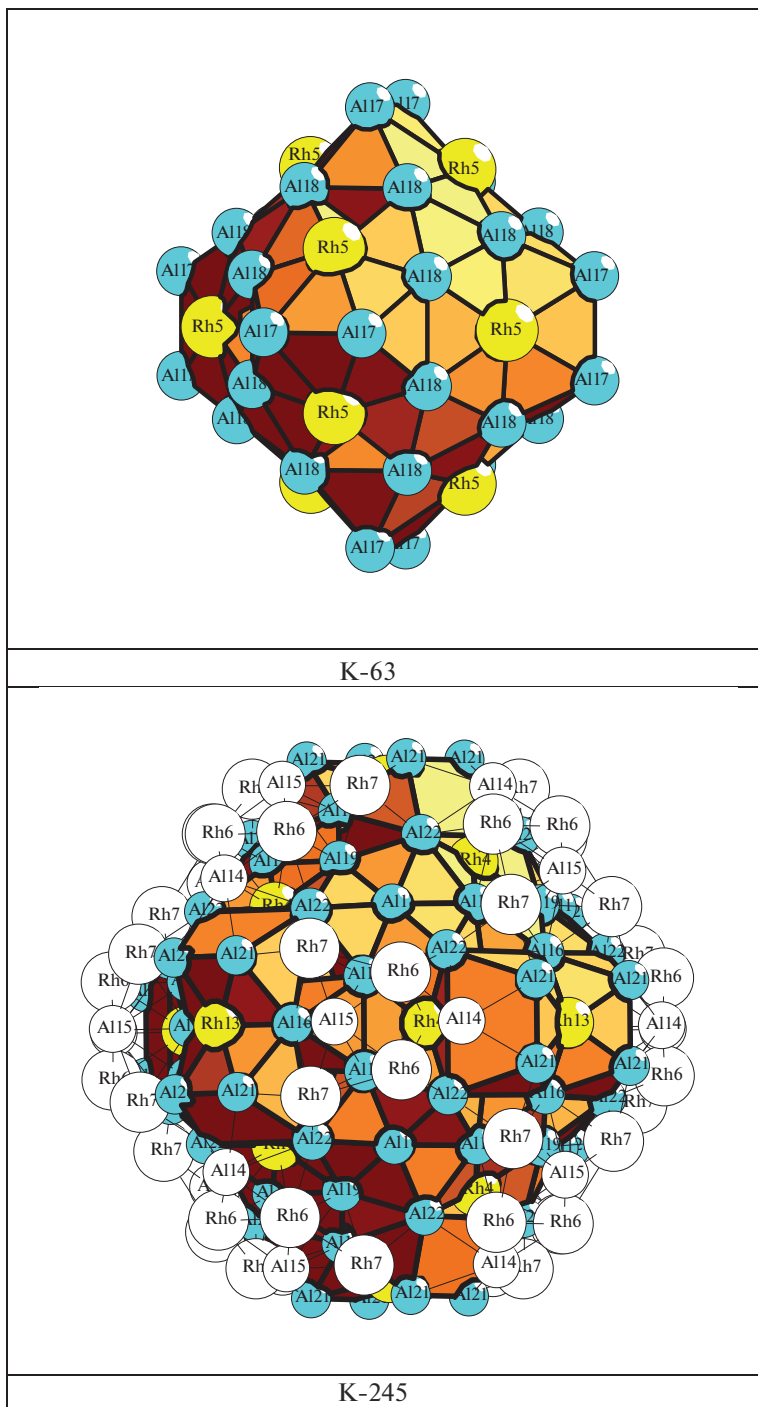


Рис. 5.  $Rh_{140}Al_{403}$ -*cP549*. Кластеры K63 (сверху) и K245 (снизу).

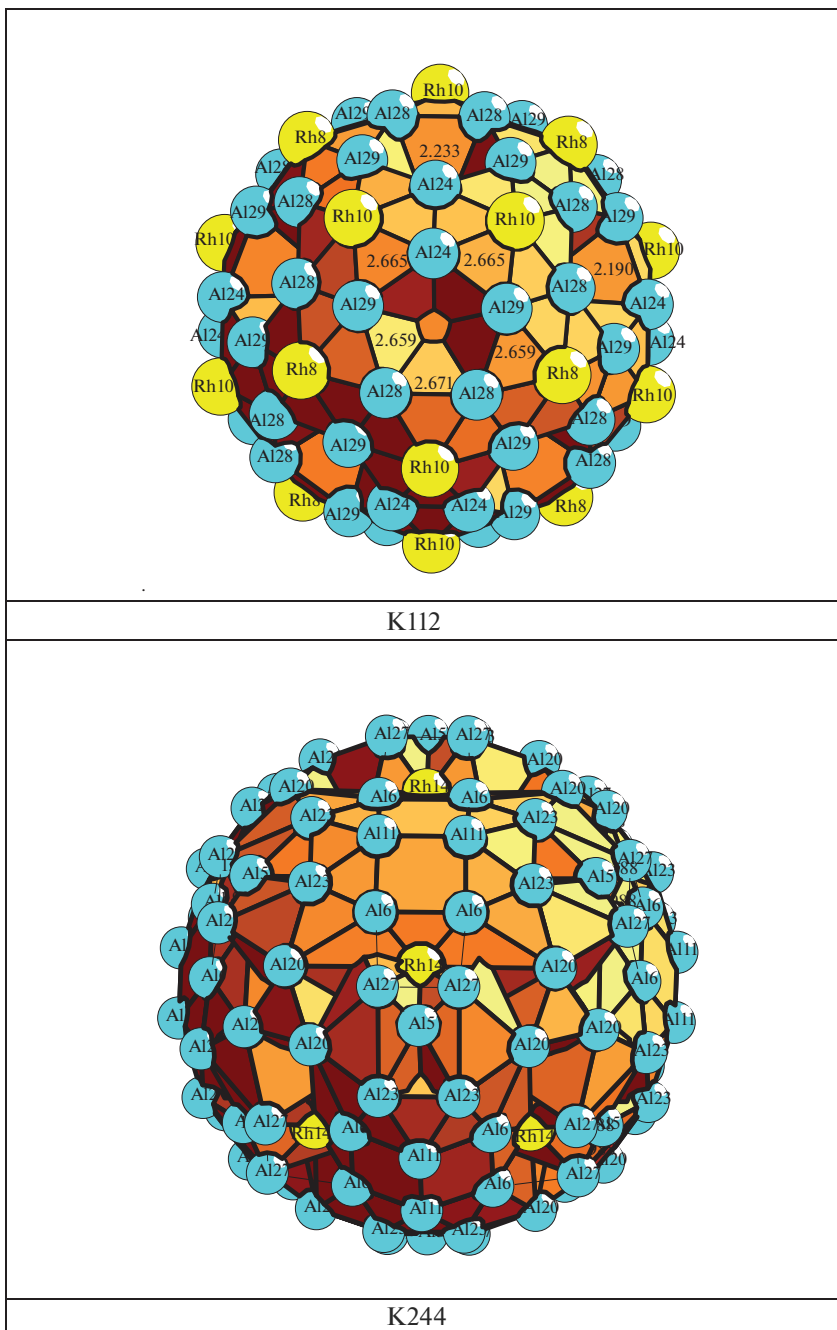


Рис. 6.  $Rh_{140}Al_{403}$ -*cP549*. Кластеры K112 (сверху) и K244 (снизу).

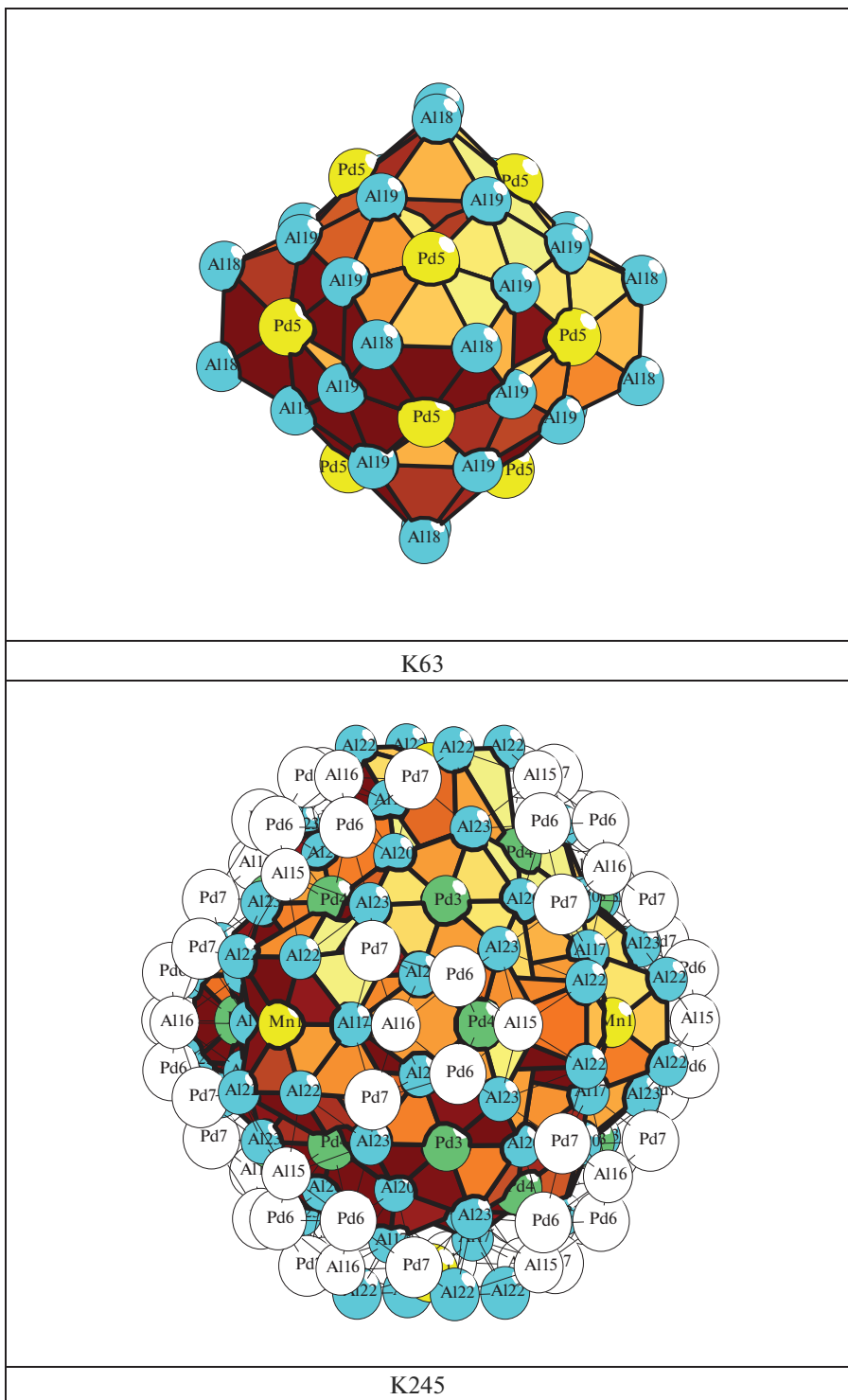


Рис. 7.  $Mn_{18}Pd_{138}Al_{387}$ -сP549. Кластеры K63 (сверху) и K245 (снизу).

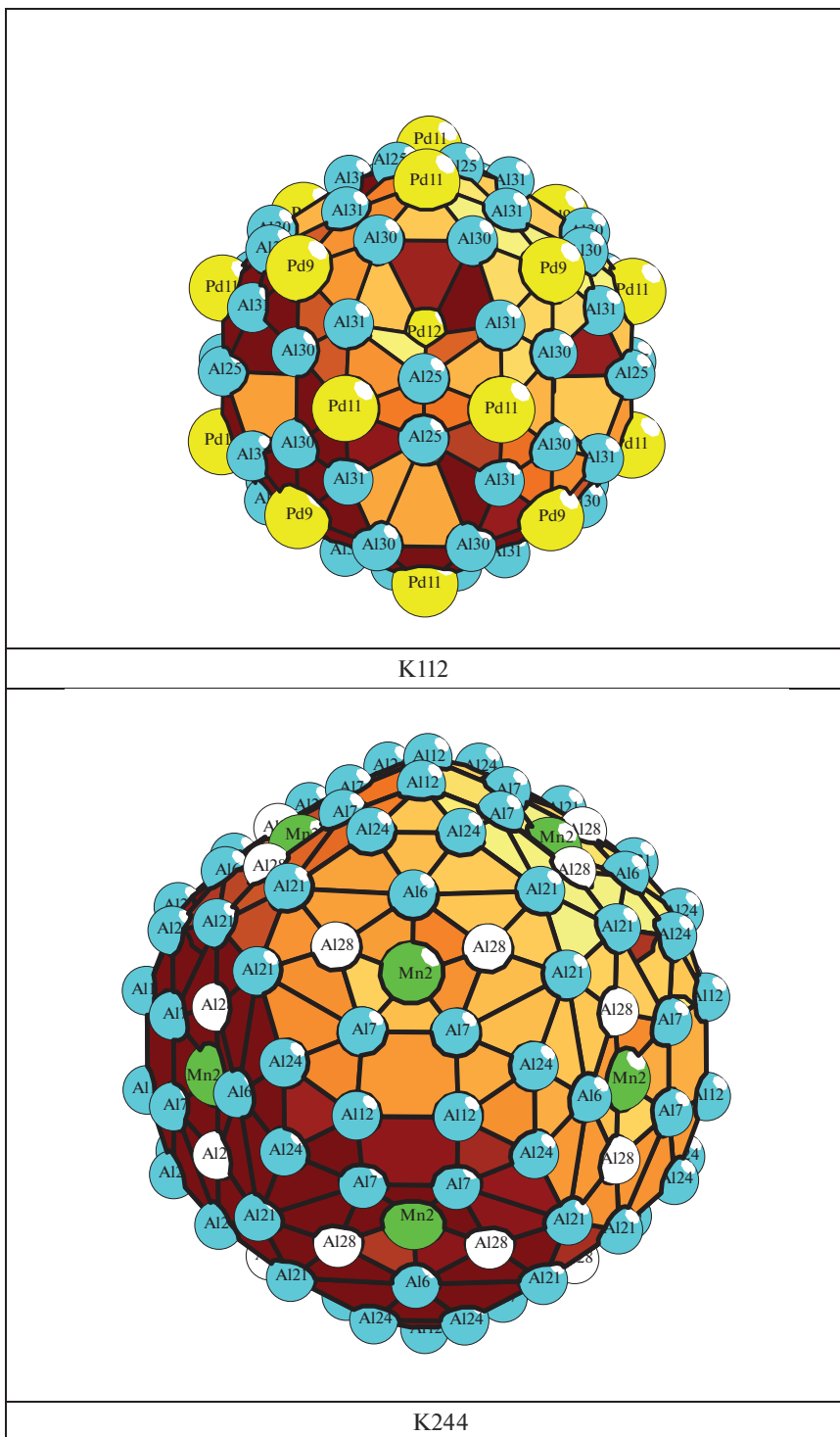


Рис. 8.  $Mn_{18}Pd_{138}Al_{387}$ -*cP549*. Кластеры K112 (сверху) и K244 (снизу).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J.W.* Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry. *Phys. Rev. Lett.* 1984. V. 53. P. 1951–1953.
2. Inorganic crystal structure database (ICSD). Fachinformationszentrum Karlsruhe (FIZ), Germany and US National Institute of Standard and Technology (NIST), USA.
3. *Villars P., Cenzual K.* Pearson's Crystal Data–Crystal Structure Database for Inorganic Compounds (PCDIC) ASM International: Materials Park, OH.
4. *Cooper M., Robinson K.* The crystal structure of the ternary alloy alpha (Al Mn Si). *Acta Crystallogr.* 1966. V. 20. P. 614–617.
5. *Puyraimond F., Quiquandon M., Gratias D. et al.* Atomic structure of the (Al, Si) Cu Fe cubic approximant phase. *Acta Crystallogr., Sect. A: Found. Crystallogr.* 2002. V. 58. P. 391–403.
6. *Cenzual K., Chabot B., Parthe E.* Cubic Sc<sub>57</sub> Rh<sub>13</sub> and orthorhombic Hf<sub>54</sub> Os<sub>17</sub>, two geometrically related crystal structures with rhodium- and osmium-centered icosahedra. *Acta Crystallogr.* 1985. V. 41. C. P. 313–319.
7. *Sugiyama K., Kato T., Ogawa T., Hiraga K., Saito K.* Crystal structure of a new 1/1-rational approximant for the Al–Cu–Ru icosahedral phase. *J. Alloys Compd.* 2000. V. 299. P. 169–174.
8. *Kreiner G., Spiekermann S.* Investigations in the Ag–Mg and Ag–Al–Mg systems. I. Models for cubic approximants of icosahedral quasicrystals in the Ag–Al–Mg system. *J. Alloys Compd.* 1997. V. 261. P. 62–82.
9. *Cordier G., Mueller V., Froehlich R.* Crystal structure of potassium thallide (49/108), K<sub>49</sub>Tl<sub>108</sub>. *Z. Kristallogr.* 1993. V. 203. P. 148–149.
10. *Gomez C.P., Ohhashi S., Yamamoto A., Tsai A.P.* Disordered structures of the TM–Mg–Zn 1/1 quasicrystal approximants (TM = Hf, Zr, or Ti) and chemical intergrowth. *Inorg. Chem.* 2008. V. 47. P. 8258–8266.
11. *Sugiyama K., Sun W., Hiraga K.* Crystal structure of a 2/1 cubic approximant in an Al–Rh–Si alloy. *J. Non-Crystalline Solids.* 2004. V. 334. P. 156–160.
12. *Sugiyama K., Kaji N., Hiraga K.* Crystal structure of a cubic Al<sub>70</sub>Pd<sub>23</sub>Mn<sub>6</sub>Si; a 2/1 rational approximant of an icosahedral phase. *Z. Kristallogr.* 1998. V. 213. P. 90–95.
13. *Blatov V.A., Shevchenko A.P., Proserpio D.M.* Applied Topological Analysis of Crystal Structures with the Program Package ToposPro // *Cryst. Growth Des.* 2014. V. 14. № 7. P. 3576–3585.
14. *Илюшин Г.Д.* Моделирование процессов самоорганизации в кристаллообразующих системах. М.: Едиториал УРСС. 2003. 376 с.
15. *Ilyushin G.D.* Theory of cluster self-organization of crystal-forming systems. Geometrical-topological modeling of nanocluster precursors with a hierarchical structure. // *Struct. Chem.* 2012. V. 20. № 6. P. 975–1043.
16. *Pankova A.A., Blatov V.A., Ilyushin G.D., Proserpio D.M.*  $\gamma$ -Brass Polyhedral Core in Intermetallics: The Nanocluster Model. // *Inorg. Chem.* 2013. V. 52. № 22. P. 13094–13107.
17. *Шевченко В.Я., Блатов В.А., Илюшин Г.Д.* Кластерная самоорганизация интерметаллических систем: 108-атомный трехслойный икосаэдрический кластер  $0@12(\text{Ga}_{12})@24(\text{Na}_{12}\text{Ga}_{12})@72(\text{Rb}_4\text{Na}_8\text{Ga}_{60})$  и 44-атомный двухслойный икосаэдрический кластер  $@12(\text{Ga}_{12})@32(\text{Na}_{20}\text{Ga}_{12})$  для самосборки кристаллической структуры  $\text{Rb}_{24}\text{Na}_{200}\text{Ga}_{696}\text{-oF920}$  // *Физика и химия стекла.* 2019. Т. 45. № 3. С. 203–214.
18. *Шевченко В.Я., Блатов В.А., Илюшин Г.Д.* Кластерная самоорганизация интерметаллических систем. Новый кластер-прекурсор  $(\text{InNa}_5)(\text{AuAu}_5)$  и первичная цепь с симметрией 5m для самосборки кристаллической структуры  $\text{Na}_{32}\text{Au}_{44}\text{In}_{24}\text{-oP100}$  // *Физика и химия стекла.* 2019. Т. 45. № 4. С. 303–310.
19. *Шевченко В.Я., Блатов В.А., Илюшин Г.Д.* Моделирование процессов самоорганизации в кристаллообразующих системах. Новые двухслойные кластеры-прекурсоры  $0@(\text{Na}_2\text{Cd}_6)@(\text{Na}_{12}\text{Cd}_{26})$  и  $0@(\text{Na}_3\text{Cd}_6)@(\text{Na}_6\text{Cd}_{35})$  для самосборки кристаллической структуры  $\text{Na}_{26}\text{Cd}_{141}\text{-hP168}$ . // *Физика и химия стекла.* 2019. Т. 45. № 5. С. 403–411.
20. *Shevchenko V.Ya., Medrish I.V., Ilyushin G.D., Blatov V.A.* From clusters to crystals: scale chemistry of intermetallics. // *Struct. Chem.* 2019. V. 30. № 6. P. 2015–2027.