

УДК 548.1

ЭВОЛЮЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ МОДУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Иванов В.В.*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)**им. М.И. Платова, Новочеркасск;**АО «Особое конструкторско-технологическое бюро «ОРИОН», Новочеркасск,**e-mail: valivanov11@mail.ru*

Предложена эволюционная модель формирования кристаллов из нульмерных структурных модулей и соответствующая ей система генетических структурных кодов. в генетических кодах представлены все основные классификационные признаки 3D структур. Символика генетического структурного кода включает описание геометрии и топологии структурного модуля как генератора структуры, а также описания стадий формирования структуры – транскрипции и трансляции – в соответствии с определенным эволюционным законом развития. Система кодов предназначена для выявления особенностей формирования структурного типа и соответствующего ему многообразия модулярных структур с помощью описания геометрии и топологии нульмерного модуля-«зародыша», для идентификации структурных модулей – генераторов вероятных модулярных структур, для выявления взаимосвязей геометрических и топологических свойств генератора и аналогичных свойств соответствующих ему модулярных структур.

Ключевые слова: структурный модуль, структурный тип, модулярные структуры, структурный код, генетический код кристалла

EVOLUTIONARY MODEL OF THE MODULAR CRYSTAL STRUCTURES FORMING

Ivanov V.V.*Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk;**J-SC SDTU «ORION», Novocherkassk, e-mail: valivanov11@mail.ru*

The evolutionary model of the forming of modular crystal from 0D structural modules and the corresponding system of the genetic structural codes has been moved. All major classification signs of the 3D structures are presented in these genetic codes. The descriptions of geometry and topology of the structural module as a generator of all structure and the forming stages of transcription and translating both with the corresponding to evolutionary law of the development, too, are the main part of the genetic structural code. Codes system is intended for peculiarities identification of the structural type forming and corresponding to it multitude of modular structures with the help of describing of 0D module-«embryo» geometry and topology, and for identification of structural modules as a generators of the possible modular structures, and for revealing of geometric and topologic properties of all generators and analogical properties of the all corresponding modular structures.

Keywords: the structural module, the structural type, modular structures, structural code, genetic code of crystal

Для формирования модулярных структур кристаллов в структурированном пространстве необходимо знать геометрико-топологические характеристики структурных модулей и закон заполнения этими модулями пространственных ячеек [1, 35, 36]. Разные варианты упаковок одного и того же набора модулей, которые отличаются между собой их ориентационным и позиционным упорядочением в ячеистом пространстве, определяют множество возможных модулярных структур [23–25].

В данной статье предлагается эволюционная модель формирования модулярных структур кристаллов и система соответствующих им генетических кодов. Описание разбиения 3D пространства на пространственные ячейки определенной формы (модулярные ячейки), а также структурирования 3D-пространства путем заполнения его структурными модулями и упаковки в соответствии с определен-

ными упаковочными кодами представлено в работах [22–25]. Закономерности заполнения пространственных ячеек в процессе структурирования пространства или после его разбиения определяются в процессе использования конкретного метода моделирования [1, 26, 27, 29, 33, 34]. Данная работа является логическим продолжением ранее опубликованных статей [2–4, 20, 21, 28, 30–32], посвященных символическому описанию упаковок модулей и кодам модулярных структур кристаллов, наноструктур и фрактальных структур [5–9, 13–19], а также анализу возможных модулярных структурных состояний на поверхности и в объеме композиционных материалов [10–12, 37, 38].

Генетические коды 3D-структур кристаллов

Для задания генетического кода необходима информация о происхождении данной структуры. Эта информация может быть

представлена как описание происхождения (процесса «синтеза») от порождающего ее генератора («зародыша») G . при этом необходимо, чтобы символьное описание генетического кода отражало информацию об эволюции модулярной структуры в процессе ее формирования. Эта информация может быть сведена к описанию строения структурного генератора G и особенностей его функционирования.

В общем случае генетический код структуры должен быть реализован в два этапа. на первом этапе, этапе транскрипции, происходит синтез локальной структуры в соответствии с определенными правилами. на втором этапе, этапе трансляции – перенос синтезированной локальной структуры в трех кристаллографических независимых направлениях в соответствии с заданным в генераторе эволюционным законом развития. Если разные транскрипции приводят к формированию одной и той же локальной структуры, то генетический код называется вырожденным. в противном случае, когда каждой локальной

структуре соответствует одна и только одна транскрипция, генетический структурный код является идентификационным кодом данной локальной структуры.

Генетический код структуры может быть представлен в виде структурного кода

$$R_3^3 \{M(G_0^3)(\|CP\|)\}[(LC)_3^3 (G_3^3(z))],$$

символьное описание которого дополнено информацией о происхождении и процессе формирования данной структуры из определенного модуля – генератора структуры G – и его локальной геометрии и топологии (табл. 1). Подробное пояснение приведенного выражения дано в работе [30]: $M(G_0^3)$ – состав модуля с указанием его локальной симметрии G_0^3 , $\|CP\|$ – матрица кодов пространственной упаковки модулей, заданная одним из возможных способов, LC – решеточный комплекс, в соответствии с образом которого данные модули упакованы в ячейке структурного типа с симметрией G_3^3 .

Таблица 1

Характеристические базовые модули и модули для модулярного дизайна некоторых структурных типов, основанных на кубической плотнейшей упаковке атомов X [1]

Структурный тип кристалла	Базовый модуль, ВМ	Модуль для модулярного дизайна, MMD	Занятые атомами решеточные комплексы, $(LC)_3^3$	Симметрия структуры, $G_3^3(z)$
Структуры состава $A_n X_m$				
HgI ₂	Hg ₁₍₁₎ I _{2(1/2)} I' _{2(1/2)}	Hg ₁₍₁₎ I _{4(1/8)} I' _{4(1/4)} I' _{1(1/2)}	I + 2CI1z	P4 ₂ /nmc (2)
PbO	Pb ₁₍₁₎ O _{4(1/4)}	Pb ₁₍₁₎ O _{4(1/8)} O _{2(1/4)}	C + CI1z	P4/mmm (2)
PtS	Pt ₁₍₁₎ S _{4(1/4)}	Pt ₁₍₁₎ S _{4(1/8)} S _{2(1/4)}	I + P _c	P4 ₂ /mmc (2)
ZnS	Zn ₁₍₁₎ S _{4(1/4)}	Zn ₁₍₁₎ S _{4(1/4)}	F + F	F'43m (4)
Zn ₃ P ₂	Zn ₁₍₁₎ P _{4(1/6)}	Zn ₃₍₁₎ P _{4(1/8)} P _{4(1/4)} P _{1(1/2)}	J* + F	Pn3m (2)
Li ₂ O	Li ₁₍₁₎ O _{4(1/8)}	Li ₂₍₁₎ O _{4(1/8)} O _{2(1/4)}	P ₂ + F	Fm3m (4)
Структуры состава $B_n X_m$				
CrCl ₃	Cr ₁₍₁₎ Cl _{6(1/2)}	Cr _{4(1/4)} Cl _{6(1/2)}	F + I6z	Pn3m (4)
TiO ₂	Ti ₁₍₁₎ O _{6(1/3)}	Ti _{4(1/4)} O _{2(1/2)} O _{4(1/4)}	^v D + ^v D2z	I4 ₁ /amd (4)
CdCl ₂	Cd ₁₍₁₎ Cl _{6(1/3)}	Cd ₁₍₁₎ Cl _{2(1/2)} Cl _{6(1/6)}	R + R2z	R $\bar{3}$ m (3)
NaCl	Na ₁₍₁₎ Cl _{6(1/6)}	Na _{4(1/8)} Na _{2(1/4)} Cl _{4(1/8)} Cl _{2(1/4)}	F + F	Fm3m (4)
Структуры состава $A_a B_b X_d$				
MgAl ₂ O ₄	Mg ₁₍₁₎ Al _{12(1/6)} O ₄₍₁₎	Mg ₁₍₁₎ Al _{4(1/2)} O _{8(1/2)}	D + T + D4xxx	Fd3m (8)
CuCu'Sb	Cu ₁₍₁₎ Cu' _{6(1/6)} Sb _{4(1/4)}	Cu ₁₍₁₎ Cu' _{2(1/4)} Sb _{4(1/8)} Sb' _{2(1/4)}	C + C + CI1x	P4/nmm (2)
Li' ₂ LiBi	Li' _{8(1/4)} Li ₁₍₁₎ Bi _{6(1/6)}	Li _{2(1/4)} Li _{4(1/8)} Bi _{4(1/8)} Li' ₂₍₁₎	P ₂ + F + F	Fm3m (4)

Символьное описание генетического кода структуры в общем случае можно представить следующим образом:

$$R_3^3 \{G(M^{(k,b)})\} [T(S(LC)_i)],$$

где $G(M^{(k,b)})$ – описание генератора с помощью геометрических и топологических характеристик модуля M с указанием его компактности k и степени неизолированности нецентральных атомов b [26, 27, 30]; $T(S(LC)_i)$ – топология взаимного позиционирования однотипных модулей, представленная как совокупность занятых ими решеточных комплексов $S(LC)_i$.

В качестве основы для формирования локальной структуры для соответствующей группы модулярных структур может быть выбран структурный модуль M с определенной конфигурацией, симметрией G_0^3 и топологией граничных элементов. Процедура первой стадии формирования локальной структуры определяется соответствующим законом транскрипции

$$T_{||i||,m} : R_{loc} = R_0^3(T_{im}),$$

а процедура размножения данной локальной структуры в трехмерном пространстве с образованием определенной модульной структуры R_3^3 (стадия трансляции) – эволюционным законом

$$E_{||k||} : R_3^3 = R_{loc}(E_k) = R_3^3(T_{im}, E_k).$$

Символьное описание действия указанного выше закона транскрипции может быть представлено в виде кода локальной структуры:

$$R_{loc} = R_0^3(T_{im}) = R_0^3\{M(G_0^3)(||i||,m)\},$$

а совместное действие законов транскрипции и эволюции – в виде кода трехмерной трижды периодической модулярной структуры:

$$R_3^3 = R_{loc}(E_k) = R_3^3(T_{im}, E_k) = R_3^3\{M(G_0^3)(||i||,m, ||k||)\} [S(LC)_i (G_3^3(z))].$$

В данном описании структуры использованы несколько новых символов.

Символ $||i||$ – матрица индексов ветвления модуля M , которая определяется его конфигурацией и топологией, согласованной с формой ячеек структурированного пространства. в случае полиэдрических ячеек возможные ветвления определяются количеством его вершин (i_v), ребер (i_r) и граней (i_g), т.е. $||i|| = (i_v, i_r, i_g)$. в частности, для кубических ячеек и ячеек в виде параллелепипедов матрица имеет вид $||i|| = (8, 12, 6)$.

Символ m $[0, 1, 2, \dots]$ – целочисленный индекс, характеризующий размерный па-

раметр локальной структуры и численно равный количеству модулей-звеньев между ядрами в ветвях структуры. в связи с этим относительное расстояние между ближайшими ядрами (период идентичности) в единицах размерного параметра модуля M в направлениях ветвлений равно $(m+1)$. Отметим, что при равномерном росте локальной структуры во всех направлениях данный параметр является постоянным и характеристическим параметром для определенной группы модулярных структур.

Символ $||k||$ – матрица индексов ветвления вторичных ядер, изоморфная матрице индексов ветвления $||i||$. Условие равенства элементов матрицы $||k||$ элементам матриц $||i-1||$, $||i-2||$ или $||i-3||$ соответствует выполнению трансляционной процедуры в выбранном направлении.

Эволюционная модель формирования 3D-структур кристаллов

Отметим, что в данной эволюционной модели формирования модулярных 3D структур сама локальная структура $R_0^3(T_{im})$ выступает в роли генератора только при условии действия эволюционного закона E_k . в противном случае локальная структура $R_0^3(T_{im})$ является структурой кластера или изолированной структурной единицей, полученной для структурно-топологического анализа с целью ее идентификации и последующей классификации.

Примеры возможной кодировки некоторых структур представлены в табл. 2.

Для фиксированного варианта разбиения E^3 -пространства использование матриц индексов ветвления и индексов роста при значениях $m = 0$ и 1 приводит к заполнению соседних пространственных ячеек и образованию плотных локальных структур, трансляция которых в определенных пространственных направлениях приводит к образованию модулярных структур (табл. 3).

Установлено, что для каждого варианта разбиения пространства симметрия $G_3^3(z)$ образующихся по законам транскрипции и эволюции полиэдрических модулярных структур $R_3^3(T_{im}, E_k)$ и характеристики занятых полиэдрами решеточных комплексов находятся во взаимнооднозначном соответствии (см. табл.3).

Перечислим основные классификационные признаки 3D структур, представленных в виде кода $R_3^3\{M(G_0^3)(||CP||)\}[(LC)_3^3(G_3^3(z))]$.

1. m -Мерность R_m^n -структуры, определяется числом задействованных в E -пространстве независимых направлений упаковки 0-мерных модулей.

Таблица 2

Генетические коды структур, основанных на кубической плотнейшей упаковке атомов X, и коды соответствующих модулярных структур [1]

Структурный тип	Код структурного типа Код j-й модулярной структуры
Структуры состава A_nX_m	
HgI ₂	$R^3_3\{(Hg_{1(1)}I_{2(1/2)}I'_{2(1/2)})\}(\overline{4m2})\{ i ,m, k \}_{BM}\{[(I)(P4_2/nmc(2))]\}$ $R^3_3\{(Hg_{1(1)}I_{4(1/8)}I_{4(1/4)}I_{1(1/2)})\}(m)\{ i ,m, k \}_{MMD,j}\{[(\Sigma(LC))_j(G^m_n(z))]\}$
PbO	$R^3_3\{(Pb_{1(1)}O_{4(1/4)})\}(mmm)\{ i ,m, k \}_{BM}\{[(C)(P4/mmm(2))]\}$ $R^3_3\{(Pb_{1(1)}O_{4(1/8)}O_{2(1/4)})\}(m)\{ i ,m, k \}_{MMD,j}\{[(\Sigma(LC))_j(G^m_n(z))]\}$
PtS	$R^3_3\{(Pt_{1(1)}S_{4(1/4)})\}(mmm)\{ i ,m, k \}_{BM}\{[(I)(P4_2/nmc(2))]\}$ $R^3_3\{(Pt_{1(1)}S_{4(1/8)}S_{2(1/4)})\}(m)\{ i ,m, k \}_{MMD,j}\{[(\Sigma(LC))_j(G^m_n(z))]\}$
ZnS	$R^3_3\{(Zn_{1(1)}S_{4(1/4)})\}(\overline{43m})\{ i ,m, k \}_{BM}\{[(F)(F\overline{43m}(4))]\}$ $R^3_3\{(Zn_{1(1)}S_{4(1/8)}S_{2(1/4)})\}(mm2)\{ i ,m, k \}_{MMD,j}\{[(\Sigma(LC))_j(G^m_n(z))]\}$
Zn ₃ P ₂	$R^3_3\{(Zn_{1(1)}P_{4(1/6)})\}(\overline{42m})\{ i ,m, k \}_{BM}\{[(J^*)(Pn3m(2))]\}$ $R^3_3\{(Zn_{3(1)}P_{4(1/8)}P_{4(1/4)}P_{1(1/2)})\}(m)\{ i ,m, k \}_{MMD,j}\{[(\Sigma(LC))_j(G^m_n(z))]\}$
Li ₂ O	$R^3_3\{(Li_{1(1)}O_{4(1/8)})\}(\overline{43m})\{ i ,m, k \}_{BM}\{[(P_2)(F\overline{43m}(4))]\}$ $R^3_3\{(Li_{2(1)}O_{4(1/8)}O_{2(1/4)})\}(mm2)\{ i ,m, k \}_{MMD,j}\{[(\Sigma(LC))_j(G^m_n(z))]\}$
Структуры состава B_nX_m	
CrCl ₃	$R^3_3\{(Cr_{1(1)}Cl_{6(1/2)})\}(\overline{3m})\{ i ,m, k \}_{BM}\{[(F)(Pn3m(4))]\}$ $R^3_3\{(Cr_{4(1/4)}Cl_{6(1/2)})\}(3m)\{ i ,m, k \}_{MMD,j}\{[(\Sigma(LC))_j(G^m_n(z))]\}$
TiO ₂	$R^3_3\{(Ti_{1(1)}O_{6(1/3)})\}(\overline{4m2})\{ i ,m, k \}_{BM}\{[(^cD)(I4_1/amd(4))]\}$ $R^3_3\{(Ti_{4(1/4)}O_{2(1/2)}O_{4(1/4)})\}(m)\{ i ,m, k \}_{MMD,j}\{[(\Sigma(LC))_j(G^m_n(z))]\}$
CdCl ₂	$R^3_3\{(Cd_{1(1)}Cl_{6(1/3)})\}(\overline{3m})\{ i ,m, k \}_{BM}\{[(R)(R\overline{3m}(3))]\}$ $R^3_3\{(Cd_{1(1)}Cl_{2(1/2)}Cl_{6(1/6)})\}(3m)\{ i ,m, k \}_{MMD,j}\{[(\Sigma(LC))_j(G^m_n(z))]\}$
NaCl	$R^3_3\{(Na_{1(1)}Cl_{6(1/6)})\}(m3m)\{ i ,m, k \}_{BM}\{[(F)(Fm3m(4))]\}$ $R^3_3\{(Na_{4(1/8)}Na_{2(1/4)}Cl_{4(1/8)}Cl_{2(1/4)})\}(mm2)\{ i ,m, k \}_{MMD,j}\{[(\Sigma(LC))_j(G^m_n(z))]\}$

Примечание. $(||i||,m,||k||)_{BM}$ – матрицы индексов ветвления, индексов роста и кода упаковки в структуре кристалла характеристического базового модуля, $(||i||,m,||k||)_{MMD,j}$ – матрицы кодов упаковки асимметричного модуля в вероятной j-й модулярной структуре.

Таблица 3

Возможные характеристики модулярных структур из изогональных пространственных ячеек

Изогон, его вершинная топология и симметрия	Комбинация изогонов (вариант разбиения пространства)	Занятый изогоном решеточный комплекс и его симметрия	Матрица значений $ i $ и m , представленных в виде $((i_v i_r i_e) m)$	Симметрия модулярной структуры (z)
Тригональная призма {344} ($\overline{43m}$)	12{344}	G (6m2) $^vD_{2z}$ (2mm)	((005)0); ((605)1); ((095)1)	P6/mmm (2) I4 ₁ /amd (8)
Куб {444} (m3m)	8{444}	P (m3m)	((006)0); ((806)1); ((012.5)1)	Pm3m (1)
Гексагональная призма {644} (6/mmm)	6{644}	P (6/mmm)	((008)0); ((012.8)0); ((012.8)1)	P6/mmm (1)
Усеченный октаэдр {466} (m3m)	4{466}	I (m3m)	((008)0)	Im3m (2)

2. Размерность модулярной R^3 -структуры, определяется числом задействованных в структуре независимых направлений упаковки 0-мерных модулей, отличной от кода упаковки в исходном структурном типе.

3. n-Периодичность модулярной структуры кристалла, определяется видом матрицы кодов упаковки 0-мерных модулей.

4. Генетическая принадлежность модульной структуры, определяется составом модуля, его геометрией и топологическими характеристиками.

5. Модулярная сложность структуры, определяется количеством типов структур, модули которых образуют гибридную структуру.

Указанные свойства информационных кодов могут быть использованы для компактной символьной записи модульных структур, их идентификации, систематизации и классификации, выявления новых генетических связей другими модульными структурами, вывода новых модулярных R^m -структур.

Отметим, что при кодировании структур кристаллов с помощью генетических кодов учитывается принципиальная возможность описания процесса формирования R^m -структур при $n \leq m \leq 3$. Эта возможность может быть реализована в следующих случаях.

1. Для R^3_n -структур ($n < m = 3$) аперидических кристаллов учитывается отсутствие периодичности в расположении структурных модулей в одном (для $R^3_2\{M_{2,0}(G^3_2)(G^3_2(z))\}$ -структур) или двух независимых направлениях (для $R^3_1\{M_{1,0}(G^3_1)(G^3_1(z))\}$ -структур).

2. Для R^m_n -структур (при $n = m < 3$) получено представление их генетических кодов с помощью описания подструктур с меньшей размерностью вида $R^3_3(R^2_2(R^1_1(R^0_0)))$. в данных описаниях кодов подструктуры R^2_2 и R^1_1 могут рассматриваться не только как возможные структурные фрагменты R^3_3 -структур. Описание процессов формирования модульных двумерных структур $R^2_2(R^1_1(R^0_0))$ с помощью генетических кодов могут характеризовать, в частности, вероятные процессы кристаллизации слоев на металлических поверхностях при химическом или электрохимическом осаждении из соответствующих растворов, при послойном росте поверхностных фаз в кристаллообразующих средах и т.д.

Выводы

Предложена система символьного описания структур кристаллов на основе информации о составе и строении модуля «зародыша», эволюции его развития и о формировании кристаллических структур

с помощью генетических кодов. Система генетических структурных кодов предназначена для выявления особенностей формирования структурного типа и соответствующего ему многообразия модулярных структур с помощью описания геометрии и топологии нульмерного модуля-«зародыша», для идентификации структурных модулей – генераторов вероятных модулярных структур, для выявления взаимосвязей геометрических и топологических свойств генератора и аналогичных свойств соответствующих ему модулярных структур.

Список литературы

1. Иванов В.В. Комбинаторное моделирование вероятных структур неорганических веществ. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2003. – 204 с
2. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2013. – №11. – С.61–65.
3. Иванов В.В. // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – №9 – С.89–93.
4. Иванов В.В. // Междунар. науч.-иссл. Журнал. – 2013. – №7–1. – С.35–37.
5. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2014. – №7. – С.100–104.
6. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2014. – №7. – С.96–99.
7. Иванов В.В. // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – №8 (Часть 5). – С.896–899.
8. Иванов В.В. // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – №8 (Часть 5). – С.884–888.
9. Иванов В.В. // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – №8 (Часть 5). – С.896–899.
10. Иванов В.В. // Соврем. наукоемкие технологии. – 2015. – № 7. – С.30–33.
11. Иванов В.В. // Соврем. наукоемкие технологии. – 2015. – № 8. – С.24–27.
12. Иванов В.В. // Соврем. наукоемкие технологии. – 2015. – № 5. – С.16–19.
13. Иванов В.В. // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 5 (часть 4). – С. 551–559.
14. Иванов В.В. // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6 (часть 1). – С.32–39.
15. Иванов В.В. // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6 (часть 2). – С.235–242.
16. Иванов В.В. // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 7 (2). – С.181–189.
17. Иванов В.В. // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 7 (6). – С.948–954.
18. Иванов В.В. // Междунар. журнал экспериментального образования. – 2016. – № 7 (1). – С.66–71.
19. Иванов В.В. // Междунар. журнал экспериментального образования. – 2016. – № 7 (1). – С.71–76.
20. Иванов В.В., Демьян В.В., Таланов В.М. // Междунар. журн. эксп. Образования. – 2010. – №11. – С.153–155.
21. Иванов В.В., Демьян В.В., Таланов В.М. // Успехи соврем. Естествознания. – 2012. – №4. – С.230–232.

22. Иванов В.В., Таланов В.М. // Соврем. наукоемкие технологии. – 2012. – №2. – С.76–78.
23. Иванов В.В., Таланов В.М. // Успехи соврем. Естествознания. – 2012. – №8. – С.75–77.
24. Иванов В.В., Таланов В.М. // Успехи соврем. Естествознания. – 2012. – №10. – С.78–80.
25. Иванов В.В., Таланов В.М. // Успехи соврем. Естествознания. – 2012. – №9. – С.74–77.
26. Иванов В.В., Таланов В.М. // Кристаллография. – 2010. – 55, № 3. – С.385–398.
27. Иванов В.В., Таланов В.М. // Журн. неорганической химии. – 2010. – 55, № 6. – С. 980–990.
28. Иванов В.В., Таланов В.М. // Успехи соврем. Естествознания. – 2012. – №3. – С.56–57.
29. Иванов В.В., Таланов В.М., Гусаров В.В. // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. – 2011. – 2, № 3. – С.121–134.
30. Иванов В.В., Таланов В.М., Гусаров В.В. // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. – 2012. – 3, № 4. – С.82–100.
31. Иванов В.В., Таланов В.М. // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. – 2010. – 1, №1. – С.72–107.
32. Иванов В.В., Шабельская Н.П., Таланов В.М. // Соврем. наукоемкие технологии, 2010. – №10. – С.176–179.
33. Иванов В.В., Шабельская Н.П., Таланов В.М., Попов В.П. // Успехи соврем. естествознания. – 2012. – №2. – С.60–63.
34. Иванов В.В., Щербаков И.Н. Моделирование композиционных никель-фосфорных покрытий с антифрикционными свойствами. – Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион», 2008. – 112 с.
35. Лорд Э.Э., Маккей А.Л., Ранганатан С. Новая геометрия для новых материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 264 с.
36. Ferraris G., Makovicky E., Merlino S. Crystallography of modular structures. – IUC Oxford Science Publications, 2008. 370 p.
37. Ivanov V.V. // Eastern European Scientific Journal, 2016, № 1 – pp. 192–195.
38. Ivanov V.V., Ivanova I.V. // Eastern European Scientific Journal, 2016, № 1 – pp. 195–198.