

УДК 501:548.1

РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРНОЙ РАЗУПОРЯДОЧЕННОСТИ И МОДУЛЯРНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ В ОДНОФАЗНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛАХ

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*

Показана возможность реализации стратегии прогнозирования веществ с необходимыми структурно-чувствительными свойствами. Представлен краткий обзор работ по реализации состояния динамической и статической структурной разупорядоченности в однофазных материалах на примерах ионных и супер-ионных проводников, электродных материалов и некоторых твердых растворов замещения и внедрения. Для аперiodических модульных структур кристаллов и структур квазикристаллов проанализирована возможность реализации позиционной и ориентационной структурной разупорядоченности и соответствующее симметричное описание. Рассмотрены варианты описания возможных модулярных структурных состояний кристаллических и наноразмерных объектов в однофазных кристаллических или поликристаллических (ультрадисперсных) материалах. Обсуждаются особенности организации и возможные состояния многокомпонентных структур, включающих кристаллическую r и наноразмерную n компоненты. Перечислены возможные варианты реализации состояний (rrr , nnn) модулярных структур для некоторых антифрикционных и износостойких композиционных материалов и покрытий.

Ключевые слова: структурная разупорядоченность, неорганические вещества, ионные проводники, электродные материалы, композиционные материалы, структурное состояние, кристаллическая компонента, наноразмерная компонента, модуль, модулярные структурные состояния, симметрия

REALIZATION OF THE STRUCTURAL DISORDERING AND MODULAR STRUCTURAL STATES IN MONOPHASE CRYSTAL AND ULTRADISPERSION MATERIALS

Ivanov V.V.*South-Russian state polytechnic university n.a. Platov MI (NPI), Novocherkassk; J-SC SDTU «ORION», Novocherkassk, e-mail: valivanov11@mail.ru*

The possibility of realization of the forecasting strategy of inorganic materials with the structure-sensitive properties was showed. A brief overview of the works about realization dynamic and static structural disordering for mono-phase materials on the examples of all ionic conductors, electrode materials and some solid solutions of the both substitution and insertion was presented. The possibilities of the both a positional and orientation structural disordering realization for aperiodic modular crystal structures and quasi-crystal structures and corresponding symmetric descriptions were analyzed. The description variants of the possible modular structural states of the crystal and nano-dimensional objects into mono-phase crystal and polycrystalline materials were showed, too. The peculiarities organization and the possible states of the poly-components structures from crystal r and nano-dimensional n components are discussed. The possible variants of the (rrr , nnn) modular structural states realization for some anti-friction and wear-resistant composite materials and coatings were numerated.

Keywords: structural disordering, inorganic substances, ionic conductors, electrode materials, composite materials, structural state, crystal component, nano-dimensional component, module, modular structural states, symmetry

Методология прогнозирования новых материалов основана на использовании одной из трех стратегий прогнозирования веществ [4, 5]:

- 1) с композиционно-чувствительными свойствами;
- 2) со структурно-чувствительными свойствами;
- 3) с кондиционно-чувствительными свойствами.

В работах [5, 6] показано, что все эти стратегии могут быть реализованы при условии обязательного учета дополнительно-го элемента «Состояние» в общеизвестной концептуальной системе структурных тео-

рий химии Состав – Структура – Свойство. Под Состоянием в новой системе

Состав – Структура – Состояние – Свойство необходимо понимать с одной стороны – следствие влияния конкретного химического состава и структурных особенностей кристаллического материала, с другой стороны – непосредственную причину проявления данным материалом определенных диагностических свойств [5]. при использовании стратегии прогнозирования материалов с заданными структурно-чувствительными свойствами под Состоянием можно понимать состояние упорядочен-

ности / разупорядоченности определенных структурных элементов, количественные характеристики которого непосредственно определяют соответствующие параметры свойства [6, 7]. Рассмотрим некоторые варианты реализации состояния структурной упорядоченности / разупорядоченности в однофазных объектах.

Состояние структурной разупорядоченности в однофазных объектах

Атомные структуры. Для однофазных кристаллических объектов состояние структурной разупорядоченности в R^3 -структурах может быть реализовано по-разному.

Для многоподрешеточных кристаллов в состоянии структурной разупорядоченности могут находиться структурные элементы одной или нескольких подрешеток при наличии трехмерного трижды периодического жесткого каркаса из остальных атомных подрешеток [6]. Известны многочисленные примеры реализации динамической структурной разупорядоченности:

– в подрешетках катионов Ag^+ и Cu^+ в структурах суперионных проводников $AgMCl_{1-x}I_{2-x}$ и $CuMBr_{3+x}I_{2-x}$ (где $M - K^+, Rb^+, Cs^+, NH_4^+$) [6],

– в подрешетках катионов Li^+ и Na^+ в структурах ионных проводников составов Li_3MeS_4 , Na_3MeS_4 (где $Me - V^{5+}, Nb^{5+}, Ta^{5+}$) и проводников типа $AB_{8-a}X_4$ (где $a=2, 5, 6$, $A - Li^+, Na^+$, $X - S^{2-}, Se^{2-}$) [6].

Структурная разупорядоченность в Li -подрешетке наблюдается для некоторых электродных материалов в системах твердых растворов внедрения $Li - Me$ ($Me - Sn, Pb$), $Li - C$, $Li - MnO_2$, $Li - TiS_2$ [6, 47].

Статическая разупорядоченность атомов наблюдается в некоторых катионных подрешетках твердых растворов замещения $(NH_4)_{1-x}MNO_3$ ($M - K, Rb, Cs$) [6], $Ni_xCu_xFe_{2y}Cr_{2(1-y)}O_4$ и $Cu_xNi_yFe_{1-x-y}Cr_2O_4$ [38, 40] и подрешетках многих других твердых растворов внедрения и замещения [1, 22, 23].

Модульные структуры. Состояние структурной разупорядоченности в более широком смысле реализуется в структурах, в которых по крайней мере в одном кристаллографическом направлении наблюдается разупорядоченное расположение определенных структурных элементов – атомов или их симметричных группировок – модулей [6]. Такое состояние характерно для атомных трехмерных m -упорядоченных структур R^3_m (где $m < 3$ и означает число кристаллографических направлений, в которых атомы упорядочены). Примеры видов структур: R^3_2 , R^3_1 – полностью разупорядоченная аморфная структура R^3_0 .

Факт существования аperiодических (несоразмерных) кристаллов и квазикристаллов [48] требует использовать более точное понимание периодичности n в R^n_m -структурах. Нарушение закона упаковки асимметричных модулей в модулярной структуре или их разупорядоченность могут быть связаны в общем случае с возникновением как позиционной так и ориентационной разупорядоченности. Формально позиционную упорядоченность n_p и ориентационную упорядоченность n_{or} можно рассматривать как две независимые компоненты периодичности n . в связи с этим вместо R^n_m -структур можно рассматривать $R^{n_{(p,or)}}_m$ -структуры (табл. 1).

Таблица 1

Возможная симметрия $R^{n_{(p,or)}}_m$ -структур с ориентационно и позиционно упорядоченными структурными фрагментами (атомными модулями, наночастицами) [3]

Параметры упорядоченности		Позиционная упорядоченность, p			
		3	2	1	0
Ориентационная упорядоченность, or	3	$R^3_{(3,3)}$ (пр. гр. G^3_3)	$R^3_{(2,3)}$ (слоевые гр. $G^3_{2^2}$, ленточные гр. $G^3_{2,1^2}$, точечные слоевые гр. $G^3_{2,0}$, точечные ленточные гр. $G^3_{2,1,0}$)	$R^3_{(1,3)}$ (стержневые гр. G^3_1 , точечные стержневые гр. $G^3_{1,0}$)	$R^3_{(0,3)}$ (точечные 3D гр. G^3_0)
	2	$R^3_{(3,2)}$ (пр. гр. G^3_3)	$R^2_{(2,2)}$ (плоские гр. G^2_2)	$R^2_{(1,2)}$ (гр. бордюров $G^2_{1^2}$, точечные гр. бордюров $G^2_{1,0}$)	$R^2_{(0,2)}$ (точечные 2D гр. или розеточные гр. G^2_0)
	1	$R^3_{(3,1)}$ (пр. гр. G^3_3)	$R^2_{(2,1)}$ (плоские гр. G^2_2)	$R^1_{(1,1)}$ (линейные гр. G^1_1)	$R^1_{(0,1)}$ (точечные 1D гр. G^1_0)
	0	$R^3_{(3,0)}$ (пр. гр. G^3_3)	$R^2_{(2,0)}$ (плоские гр. G^2_2)	$R^1_{(1,0)}$ (линейные гр. G^1_1)	$R^0_{(0,0)}$ (точечные 0D гр. G^0_0)

Структуры вида $R^3_{(3,3)}$ эквивалентны $R^3_{(3,3)}$ -структурам. Структуры $R^3_{(3,n_0)}$ (где $n_0 = 2, 1, 0$) и $R^3_{(n_s,3)}$ (где $n_s = 2, 1, 0$) можно объединить в группу аperiодических структур (1D, 2D и 3D, соответственно). Однако $R^3_{(3,n_0)}$ -структуры, которые характеризуются позиционной упорядоченностью модулей, должны обладать кристаллографической симметрией – симметрией Федоровских групп G^3_{32} , даже если локальная симметрия модуля не является кристаллографической. Структуры вида $R^3_{(n_s,3)}$ (при значениях $n_s < 3$) формально могут считаться несоизмеримыми. Известные 1D, 2D и 3D квазикристаллы [48–51] могут быть отнесены к модульным структурам вида $R^3_{(2,1)}$, $R^3_{(1,2)}$ и $R^3_{(0,3)}$ соответственно.

Модулярные структуры. В работах [6, 29–31] сформулированы принципы модулярного строения кристаллических фаз и наноструктур. на их базе разработаны методы комбинаторного и итерационного моделирования вероятных структур неорганических веществ и наноразмерных фаз [32, 33, 37]. Для получения модулярных структур предложены варианты разбиения и структурирования пространства [34], способы формирования модулярных ячеек [35] и структурных модулей [36]. Предложены варианты описания фазово-разупорядоченного состояния поверхности многофазных материалов как совокупности фазовой и структурно-фазовой разупорядоченностей, а также структурной разупорядоченности в отдельных кристаллических фазах [6, 8, 26–28, 39, 41] или как комплексного структурного состояния поверхности материала, включающего в себя кроме кристаллической r компоненты также наноразмерную n компоненты [2, 9–14, 19–21].

Примеры видов 3D структур: частично разупорядоченные модулярные структуры $R^3_{(2,1)}$, $R^3_{(2,0)}$, $R^3_{(1,2)}$, $R^3_{(1,1)}$, $R^3_{(3,0)}$, $R^3_{(2,3)}$, $R^3_{(2,2)}$, $R^3_{(2,1)}$, $R^3_{(2,0)}$, $R^3_{(1,3)}$, $R^3_{(1,2)}$, $R^3_{(1,1)}$, $R^3_{(1,0)}$, $R^3_{(0,3)}$, $R^3_{(0,2)}$, $R^3_{(0,1)}$ и полностью разупорядоченная квазиаморфная модулярная структура $R^3_{(0,0)}$.

Примеры видов 2D структур: частично разупорядоченные модулярные структуры $R^2_{(2,1)}$, $R^2_{(2,0)}$, $R^2_{(1,2)}$, $R^2_{(1,1)}$, $R^2_{(1,0)}$, $R^2_{(0,2)}$, $R^2_{(0,1)}$ и полностью разупорядоченная аморфная модулярная структура $R^2_{(0,0)}$.

Модулярные структурные состояния однофазных материалов

Рассмотрим варианты описания возможных модулярных структурных состояний кристаллических и наноразмерных объектов в однофазных кристаллических или поликристаллических (ультрадисперсных) материалах.

Для описания конкретного структурного состояния объема можно использовать 3D состояния: rrr – для кристаллических фаз и nnn – для наноразмерных структур. Формальное описание конкретного структурного состояния объема материала будет выглядеть следующим образом: (rrr, nnn) . Возможные варианты их реализации для кристаллов и наноструктур определяются аналогично вариантам реализации на поверхности. Всего с учетом случайного варианта распределения фаз в одном, двух или трех независимых направлениях можно представить $10 \times 10 = 100$ комбинаторно различных вариантов описаний структурных состояний в объеме композиционного материала.

Рассмотрим варианты описания возможных модулярных структурных состояний кристаллических (rrr) и наноразмерных объектов (nnn) в однофазных кристаллических или поликристаллических (ультрадисперсных) материалах.

Перечислим возможные варианты реализации модулярных структур, охарактеризуем виды состояний модулярных структур, сопряженные (*) и соподчиненные им ($\hat{I}$) состояния.

Класс кристаллический ($r r r$), модулярные структуры R^3_{rrr} и их описание. Данный класс модулярных структур содержит 10 комбинаторно различных вариантов структурных состояний, реализующихся в 3D пространстве.

1) ($r r r$) – 3D-кристалл из упорядоченных атомных цепочек, слоев, ($r r r$)* = ($r r r$), ($r r r$) $\in$ ($n n n$),

2) ($r r r_n$) – 3D-кристалл из упорядоченных 1D-нанотрагментов, ($r r r_n$)* = ($r r r_n$), ($r r r_n$) $\in$ ($n n n$),

3) ($r r_n r_n$) – 3D-кристалл из упорядоченных 2D наноразмерных частиц, ($r r_n r_n$)* = ($r r_n r_n$), ($r r_n r_n$) $\in$ ($n n n$),

4) ($r_n r_n r_n$) – 3D-кристалл из упорядоченных наноразмерных частиц, ($r_n r_n r_n$)* = ($r_n r_n r_n$), ($r_n r_n r_n$) $\in$ ($n n n$),

5) ($r_0 r_0 r_0$) – 3D-кристалл из разупорядоченных атомных слоев, ($r_0 r_0 r_0$)* = ($r_0 r_0 r_0$), ($r_0 r_0 r_0$) $\in$ ($n_0 n_0 n_0$),

6) ($r_0 r_n r_n$) – 3D-кристалл из разупорядоченных слоев 1D-нанотрагментов, ($r_0 r_n r_n$)* = ($r_0 r_n r_n$), ($r_0 r_n r_n$) $\in$ ($n_0 n_n n$),

7) ($r_0 r_n r_n$) – 3D-кристалл из разупорядоченных слоев 2D наноразмерных частиц, ($r_0 r_n r_n$)* = ($r_0 r_n r_n$), ($r_0 r_n r_n$) $\in$ ($n_0 n_n n$),

8) ($r_0 r_0 r_0$) – 3D-кристалл из разупорядоченных цепочек атомов, ($r_0 r_0 r_0$)* = ($r_0 r_0 r_0$), ($r_0 r_0 r_0$) $\in$ ($n_0 n_0 n_0$),

9) ($r_0 r_0 r_n$) – 3D-кристалл из разупорядоченных цепочек наноразмерных частиц, ($r_0 r_0 r_n$)* = ($r_0 r_0 r_n$), ($r_0 r_0 r_n$) $\in$ ($n_0 n_0 n$).

10) $(r_o r_o r_o)$ – аperiodический (аморфный) 3D-кристалл, $(r_o r_o r_o)^* = (r_o r_o r_o)$, $(r_o r_o r_o) \in (n_o n_o n_o)$.

Здесь и далее индексы r , n , и o характеризуют кристаллический (периодический), наноразмерный и случайный (хаотический) законы распределения, соответственно.

Симметрия кристаллических структур может описываться не только пространственными группами класса G^3_3 (R^3_3 –структуры), но и группами симметрии, которые учитывают отсутствие периодичности в расположении модулей в одном (3D дважды периодические группы G^3_2 для R^3_2 –структур, слоевые группы) или в двух независимых направлениях (3D одноперидические группы G^3_1 для R^3_1 –структур, группы стержней) [3]. Для описания симметрии локальных R^3_0 –структур используются 3D аperiodические группы G^3_0 , точечные группы.

В локальной области структурированного 3D пространства в случае реализации частичной упорядоченности в $R^{(p,or)}_3$, $R^{(p,or)}_2$ и $R^{(p,or)}_1$ –структурах, т.е. при значениях параметров p и $or \leq 2$, для описания используются соответствующие группы классов симметрии, указанные в табл. 1.

С учетом характера элементов группы трансляций структурно совместимыми сочетаниями компонент могут быть получены основные классы вероятных структурных состояний локальной области структурированного 3D пространства [17–20, 43, 46] (табл. 2).

3) $(n r n_r)$ – 3D-нанообъект из упорядоченных 2D нанофрагментов структуры, $(n r n_r)^* = (n r n_r)$,

4) $(n_r n_r n_r)$ – 3D-нанообъект из упорядоченных 3D-нанофрагментов структур, $(n_r n_r n_r)^* = (n_r n_r n_r)$,

5) $(n_o n_o n_o)$ – 3D-наночастица из разупорядоченных слоев 2D-наночастиц, $(n_o n_o n_o)^* = (n_o n_o n_o)$,

6) $(n_o n_o n_r)$ – 3D-нанообъект из разупорядоченных слоев 1D-фрагмента структуры и 1D-наночастиц, $(n_o n_o n_r)^* = (n_o n_o n_r)$,

7) $(n_o n_r n_r)$ – 3D- нанообъект из разупорядоченных слоев 2D нанофрагментов структуры, $(n_o n_r n_r)^* = (n_o n_r n_r)$,

8) $(n_o n_o n_r)$ – 3D-нанообъект из разупорядоченных цепочек 1D-нанофрагментов структуры, $(n_o n_o n_r)^* = (n_o n_o n_r)$,

9) $(n_o n_o n_o)$ – 3D-нанообъект из разупорядоченных цепочек 1D-наночастиц, $(n_o n_o n_o)^* = (n_o n_o n_o)$,

10) $(n_o n_o n_o)$ – аperiodическая (аморфная) 3D-наночастица, $(n_o n_o n_o)^* = (n_o n_o n_o)$.

Отметим, что в 3D-пространстве множество вероятных структурных состояний детерминистических модулярных структур композитов состоит из двух основных автосопряженных 1D состояний (кристалл с атомной структурой $r_r^o r$ и нанообъект $n_o^o n$) и пары сопряженных между собой состояний (кристалл из нанообъектов r_n и нанообъект с кристаллической структурой n_r). Другими словами, состояния кристаллического класса имеют в качестве сопряженных

Таблица 2

Основные разновидности структурных состояний кристаллического класса $(r_1 r_2 r_3)$ локальной области структурированного 3D-пространства

Разновидности класса	Уточненное наименование класса	Условное обозначение
$(t_1 t_2 t_3)$	Кристаллический точечный	P
$(\tau_1 t_2 t_3)$	Кристаллический точечно-линейчатый	PL
$(\tau_1 \tau_2 t_3)$	Кристаллический плоскостной	Pl
$(\tau_1 \tau_2 \tau_3)$	Кристаллический объемный	V

Примечание. t и τ – дискретная и непрерывная трансляции как виды реализации генераторов кристаллической компоненты.

Класс наноразмерный $(n n n)$, модулярные структуры $R^{(p,or)}_{nnn}$ и их описание. Данный класс модулярных структур тоже содержит 10 комбинаторно различных вариантов наноструктурированных состояний, реализующихся в 3D пространстве.

1) $(n n n)$ – 3D-наночастица, $(n n n)^* = (n n n)$,

2) $(n n n_r)$ – 3D-нанообъект из упорядоченных 1D-фрагментов структуры, $(n n n_r)^* = (n n r_n)$,

состояний 1D и 2D нанофрагменты, а состояния наноразмерного класса – 1D и 2D состояния из наноразмерных частиц.

Отметим также, что при трении и износе поверхности композиционного материала некоторые фазы в его поверхностных слоях могут перейти в ультрадисперсное состояние или в состояние с другой структурной модификацией за счет фазовых превращений, в том числе и фазовых переходов второго рода [6, 39, 41].

В первом случае наноразмерные частицы некоторых фаз в продуктах износа могут существенно повлиять на его характеристики. Образующиеся при трении наночастицы твердых фаз, которые по форме близки к сферической или цилиндрической, могут выполнять функцию твердосмазочных материалов и способствовать снижению коэффициента трения [22, 23, 25, 39, 41, 42]. на поверхности наноразмерными частицами могут быть 2D-наноструктуры N^2_m ($N^2_{2,2}$, N^2_1 и аморфная N^2_0), 1D-наноструктуры N^1_m (N^1_1 и разупорядоченная наноструктура N^2_0) (символ m означает число кристаллографических направлений, в которых упорядочены сферически симметричные элементы структур). Если структурные элементы наноразмерных частиц не обладают сферической симметрией, то возможно образование модульных и даже модулярных наноструктур вида $N^2_{p,or}$, где параметры упорядоченности $p < 3$ и $or < 3$ (структуры 2D кристаллов, квазикристаллов, аперриодических кристаллов). Примеры видов 2D структур: частично разупорядоченные модулярные наноструктуры $N^2_{2,1}$, $N^2_{2,0}$, $N^2_{1,2}$, $N^2_{1,1}$, $N^2_{1,0}$, $N^2_{0,2}$, $N^2_{0,1}$ и полностью разупорядоченная аморфная модулярная наноструктура $N^2_{0,0}$. Частично разупорядоченные модулярные наноструктуры $R^2_{2,1}$, $R^2_{2,0}$, $R^2_{1,2}$, $R^2_{1,1}$, $R^2_{1,0}$, $R^2_{0,2}$ и $R^2_{0,1}$ с кристаллическим законом упорядочения модулей являются частным случаем соответствующих модульных наноструктур вида $N^2_{p,or}$, в которых формально возможны и другие законы упорядочения, например, фрактальный закон.

Во втором случае – при вероятных обратимых фазовых превращениях поверхностных фаз – вновь образующиеся за счет состояния структурно-фазовой разупорядоченности фазы даже после перехода в исходное структурное состояние существенно изменяют конфигурацию межфазных границ, что усиливает общее состояние фазовой разупорядоченности на поверхности композиционного материала [39, 41–45].

Выводы

Таким образом, показана возможность реализации стратегии прогнозирования веществ с необходимыми структурно-чувствительными свойствами. Представлен краткий обзор работ по реализации состояния динамической и статической структурной разупорядоченности в однофазных материалах на примерах ионных и суперионных проводников, электродных материалов и некоторых твердых растворов замещения и внедрения. Для аперриодических модульных структур кристаллов и структур квазикристаллов проанализирована воз-

можность реализации позиционной и ориентационной структурной разупорядоченности и соответствующее симметричное описание. Рассмотрены варианты описания возможных модулярных структурных состояний кристаллических и наноразмерных объектов в однофазных кристаллических или поликристаллических (ультрадисперсных) материалах. Обсуждаются особенности организации и возможные состояния многокомпонентных структур, включающих кристаллическую и наноразмерную компоненты. Перечислены возможные варианты реализации состояний модулярных структур для некоторых антифрикционных и износостойких композиционных материалов и покрытий.

Список литературы

1. Беспалова Ж.И., Иванов В.В., Смирницкая И.В. и др. // Журн. прикладной химии. – 2010. – Т.83. Вып.2. – С.242–246.
2. Дерлугян П.Д., Иванов В.В., Иванова И.В., Шиш-ка В.Г. // Успехи соврем. естествознания, – 2015. – №1. – С.13–15.
3. Заморзаев А.М. Теория простой и кратной антисимметрии. Кишинев: Штиинца. 1976. – 283 с.
4. Иванов В.В. // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды. (Междунар. выпуск) – Ростов/Д: РГАСХМ, 2001. – Вып.1. – С.90–92.
5. Иванов В.В. // Междунар. науч.-иссл. Журнал. – 2013. – №8–1. – С.67–70.
6. Иванов В.В. Комбинаторное моделирование вероятных структур неорганических веществ. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2003. – 204 с.
7. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2015. – №11. – С.35–43.
8. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2014. – №5. – С.146–149.
9. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2014. – №4. – С.102–104.
10. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2014. – №7. – С.126–128.
11. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2014. – №9. – С.92–97.
12. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2014. – №12. – С.79–84.
13. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2014. – №12(2). – С. 90–93.
14. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2014. – №7. – С.96–99.
15. Иванов В.В. // Успехи соврем. Естествознания. – 2013. – №11. – С.61–65.
16. Иванов В.В. // Соврем. наукоемкие технологии. – 2013. – №9. – С.89–93.
17. Иванов В.В. // Междунар. науч.-иссл. Журнал. – 2013. – №7–1. – С.26–28.
18. Иванов В.В. // Успехи соврем. естествознания, 2014. – №4. – С.105–108.
19. Иванов В.В. // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 5 (4). – С. 551–559.
20. Иванов В.В. // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6 (1). – С.32–39.

21. Иванов В.В. // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6 (2). – С.235–242.
22. Иванов В.В., Беспалова Ж.И., Смирницкая И.В. и др. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. – 2008. – Спецвып.: Проблемы электрохимии и экологии. – С. 52–56.
23. Иванов В.В., Беспалова Ж.И., Смирницкая И.В. и др. // Журн. прикладной химии, 2010. Т.83. Вып.5. – С.779–782.
24. Иванов В.В., Иванов А.В., Щербаков И.Н., Башкиров О.М. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2005. – №3. – С.46–49.
25. Кукоз Ф.И., Иванов В.В., Балакай В.И., и др. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2007. – № 5. – С. 56–58.
26. Иванов В.В., Марченко С.И. // Научная мысль Кавказа. – Спецвыпуск, 2006. – С.87–89.
27. Иванов В.В., Попов С.В. // Междунар. науч.-иссл. журнал, 2014. №1(20). – Часть1. – С.8–10.
28. Иванов В.В., Попов С.В., Щербаков И.Н. // Соврем. наукоемкие технологии, 2014. – №.11. – С.16–17.
29. Иванов В.В., Таланов В.М. // Физика и химия стекла, 2008. – Т.34, №4. – С.528–567.
30. Иванов В.В., Таланов В.М. // Кристаллография, 2010. – Т.55. – № 3. – С.385–398.
31. Иванов В.В., Таланов В.М. // Журн. неорганической химии, 2010. – Т.55 – № 6. – С.980–990.
32. Иванов В.В., Таланов В.М. // Наносистемы: Физика, Химия, Математика, 2010. Т.1. №1. С.72–107.
33. Иванов В.В., Таланов В.М. // Журн. структурн. химии, 2013. Т.54. №2. С.354–376.
34. Иванов В.В., Таланов В.М. // Успехи соврем. Естествознания. – 2012. – №8. – С.75–77.
35. Иванов В.В., Таланов В.М. // Успехи соврем. Естествознания. – 2012. – №10. – С.78–80.
36. Иванов В.В., Таланов В.М. // Успехи соврем. Естествознания. – 2012. – №9. – С.74–77.
37. Иванов В.В., Таланов В.М., Гусаров В.В. // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. – 2011. – Т.2. № 3. – С.121–134.
38. Иванов В.В., Ульянов А.К., Шабельская Н.П. Ферриты-хромиты переходных элементов: синтез, структура, свойства: монография. – М.: Издательский дом Академия Естествознания, 2013 – 94 с.
39. 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.
40. Шабельская Н.П., Иванов В.В. и др. // Стекло и керамика, 2014. – Т.71. – №1. – С.20–24.
41. Щербаков И.Н., Иванов В.В., Логинов В.Т. и др. Химическое наноконструирование композиционных материалов и покрытий с антифрикционными свойствами. – Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки», 2011. – 132 с.
42. Balakai V.I., Ivanov V.V., Shcherbakov I. N. // Am. Sci. J., 2016. – V.6. – N.6. – pp.27–29.
43. Ivanov V.V. // Eastern European Scientific Journal, 2016, 1. – pp. 192–195.
44. Ivanov V.V., Derlugian P.D., Ivanova I.V., et. al. // Eastern European Scientific Journal, – 2016, 2. – pp. 203–206.
45. Ivanov V.V., Derlugian P.D., Ivanova I.V., et. al. // Eastern European Scientific Journal, 2016, 2 – pp. 207–210.
46. Ivanov V.V., Ivanova I.V. // Eastern European Scientific Journal, 2016, 1 – pp. 195–198.
47. Ivanov V.V., Shcherbakov I. N. // Eastern European Scientific Journal, 2016, 2 – pp. 196–198.
48. Janot Ch., Dubois J.-M., De Boissien M. // Am. J. Phys., 1989. V.57, N.11. P.972–987.
49. Levine D., Steinhardt P.J. // Phys. Rev. B., 1986. V.34, N.2. – P.596–616.
50. Mackay A.L. // J. Non-Crystalline Solids, 1987. V.97/98. – P.55–62.
51. Socolar J.E.S., Steinhardt P.J. // Phys. Rev. B., 1986. V.34, N.2. P.617–647.