
УДК 539.25:620.187

**ЗЕРКАЛЬНАЯ И ИНВЕРСИОННАЯ СИММЕТРИИ
НАНОТОНКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР,
ИЗОМОРФИЗМ ПРЯМОГО И ОБРАТНОГО ПРОСТРАНСТВА
И ПРИНЦИП СИММЕТРИИ КЮРИ**

© 2020 г. В. Б. Малков^{a, *}, И. В. Николаенко^b, Г. П. Швейкин^b, В. Г. Пушин^{c, d},
А. В. Малков^e, Б. В. Шульгин^e, О. В. Малков^e, П. Н. Черненький^e

^aИнститут высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^bИнститут химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^cУральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

^dИнститут физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^eЗАО НПЦ «РОСНА», Екатеринбург, Россия

*e-mail: mvb@ihte.uran.ru

Поступила в редакцию 05.07.2019 г.

После доработки 25.07.2019 г.

Принята к публикации 06.08.2019 г.

При электронно-микроскопическом исследовании нанотонких пространственных диссипативных структур (ПДС) гексагонального селена, формирующихся в аморфных пленках, решетка которых испытывает упругое ротационное искривление, обнаружены зеркальная и инверсионная симметрии систем изгибных экстинкционных контуров, присутствующих на электронно-микроскопических изображениях нанотонких ПДС. Установлено, что зеркальная и инверсионная симметрии систем изгибных экстинкционных контуров, присутствующих на электронно-микроскопических изображениях нанотонких ПДС обусловлены зеркальной и инверсионной симметрией прямой решетки нанотонких пространственных диссипативных структур гексагонального селена, испытывающей упругое ротационное искривление.

Ключевые слова: симметрия, селен, пространственная, диссипативная, структура, кристалл

DOI: 10.31857/S0235010620040076

ВВЕДЕНИЕ

Характерной деталью электронно-микроскопических изображений нанотонких пространственных диссипативных структур (ПДС) – кристаллов с упругим ротационным искривлением решетки после стадии закалки, являются системы изгибных экстинкционных контуров [1–7]. Появление системы изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопическом изображении нанотонкой ПДС обусловлено изгибом нанотонкой ПДС как целого, или изгибом ее решетки [1–7]. Системы изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопическом изображении нанотонких ПДС в целом ряде случаев обладают вполне определенной симметрией. Однако, при достаточно обширном количестве работ, посвященных использованию изгибных контуров для исследования нанотонких ПДС, работы по анализу симметрии картин изгибных экстинкционных контуров, присутствующих на их электронно-микроскопических изображениях, практически отсутствуют.

Таблица 1. Межплоскостные расстояния и индексы Миллера для микроэлектроннограммы от “левой” части нанотонкой ромбовидной ПДС с зеркальной симметрией изгибных экстинкционных контуров

Номера рефлексов	Межплоскостные расстояния (Å), эксперимент	Межплоскостные расстояния (Å), теория	Индексы Миллера
1	2.976	2.975	$\bar{1}01\bar{1}$
2	2.062	2.060	$0\bar{1}12$
3	2.977	2.975	$10\bar{1}1$

Симметрию систем изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопических изображениях нанотонких ПДС гексагонального селена рассмотрим в рамках общезначимого принципа симметрии Кюри, который формулируется следующим образом: “Когда определенные причины порождают известные следствия, элементы симметрии причин должны содержаться в порожденных следствиях. Когда известные следствия обнаруживают известную диссимметрию, эта последняя должна содержаться и в причинах, породивших эти следствия. Положения, обратные двум предыдущим, неправильны, по крайней мере, на практике, то есть следствия могут быть симметричнее вызывающих их причин” [8, 9].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования нанотонких пространственных диссипативных структур гексагонального селена, формирующихся в аморфных пленках, проводились в просвечивающем электронном микроскопе JEM-200 CX JEOL Ltd, Japan. В процессе исследований обнаружены нанотонкие ромбовидные ПДС, на электронно-микроскопических изображениях которых присутствуют системы изгибных экстинкционных контуров обладающие зеркальной симметрией, относительно плоскости симметрии, проходящей через короткую диагональ ромбовидной нанотонкой ПДС (рис. 1а). Любой изгибной экстинкционный контур является геометрическим местом точек на электронно-микроскопическом изображении нанотонкой ПДС, где соответствующая изгибному контуру плоскость пространственной (прямой) решетки нанотонкой ПДС [1–7] находится в отражающем положении. В связи с этим, симметрия системы изгибных контуров является следствием симметрии плоскостей пространственной решетки нанотонкой ПДС находящейся в отражающем положении.

Микродифракционные исследования нанотонких ПДС гексагонального селена выполнялись с учетом рекомендаций, приведенных в работе [10]. При микродифракционных исследованиях нанотонких ромбовидных ПДС гексагонального селена с системой изгибных экстинкционных контуров, обладающих зеркальной симметрией (рис. 1а), от симметрично равных частей нанотонкой ПДС получены микроэлектроннограммы, которые приведены на рис. 1б, 1в. От “левой” части нанотонкой ПДС, получена микроэлектроннограмма, представленная на рис. 1б. От “правой” части нанотонкой ПДС получена микроэлектроннограмма, представленная на рис. 1в. Результаты расчета микроэлектроннограмм приведены в табл. 1 и 2. Результаты, приведенные в табл. 1, соответствуют микроэлектроннограмме от “левой”, относительно плоскости симметрии, части нанотонкой ПДС гексагонального селена. В табл. 2 приведены результаты, соответствующие микроэлектроннограмме от “правой” части нанотонкой ПДС.

Расчет микроэлектроннограмм позволяет определить их положение в обратной решетке нанотонкой ромбовидной ПДС гексагонального селена (рис. 2). Положение микроэлектроннограмм от симметрично равных частей нанотонкой ромбовидной ПДС

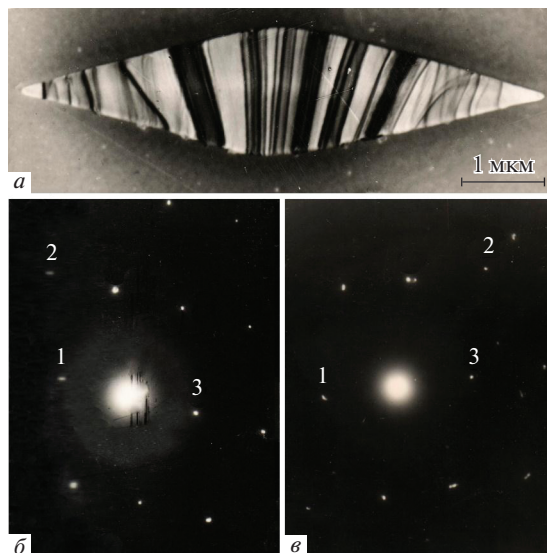


Рис. 1. Микрофотография нанотонкой ромбовидной ПДС гексагонального селена с системой изгибных экстинкционных контуров, обладающей зеркальной симметрией (*a*). Микроэлектронogramмы от симметрично равных, относительно плоскости симметрии, частей нанотонкой ПДС: от “левой” части (*б*) и от “правой” части (*в*).

гексагонального селена в ее обратной решетке характеризуется зеркальной симметрией (рис. 2). Расчеты, выполненные по стандартным кристаллографическим формулам, позволяют установить, что решетка исследуемых нанотонких ромбовидных ПДС гексагонального селена (рис. 1*a*) испытывает упругое ротационное искривление вокруг двух взаимно перпендикулярных направлений – вокруг $[001]$, совпадающего по направлению с короткой диагональю ромбовидной ПДС и вокруг направления, совпадающего с длинной диагональю ромбовидной ПДС. Ротация решетки вокруг $[001]$ достигает 18° ; ротация решетки вокруг направления, совпадающего с длинной диагональю ромбовидной ПДС – 22° . Микродифракционные исследования нанотонких ромбовидных ПДС гексагонального селена позволяют выявить не только упругое ротационное искривление их решетки вокруг двух взаимно перпендикулярных направлений, но и выявить зеркальную симметрию положения микроэлектронogramм от симметрично равных частей нанотонких ромбовидных ПДС в их обратной решетке.

Таблица 2. Межплоскостные расстояния и индексы Миллера для микроэлектронogramмы от “правой” части нанотонкой ромбовидной ПДС с зеркальной симметрией изгибных экстинкционных контуров

Номера рефлексов	Межплоскостные расстояния (Å), эксперимент	Межплоскостные расстояния (Å), теория	Индексы Миллера
1	2.976	2.975	$\bar{1}011$
2	2.062	2.060	$1\bar{1}02$
3	2.976	2.975	$10\bar{1}\bar{1}$

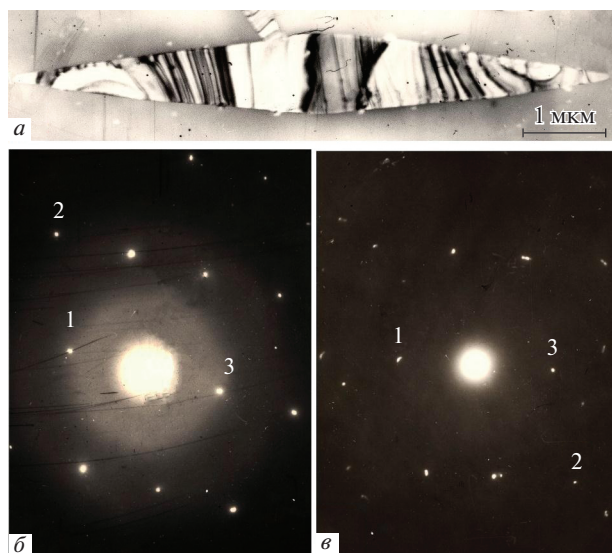


Рис. 3. Микрофотография нанотонкой ромбовидной ПДС гексагонального селена с системой изгибных экстинкционных контуров, обладающей инверсионной симметрией (*a*). Микроэлектронogramмы от симметрично равных, относительно центра симметрии, частей нанотонкой ПДС: от “левой” части (*б*) и от “правой” части (*в*).

диагоналей нанотонкой ромбовидной ПДС. Как и для нанотонких ПДС с зеркальной симметрией системы изгибных экстинкционных контуров, так и для нанотонких ПДС с инверсионной симметрией системы изгибных экстинкционных контуров, симметрия систем изгибных контуров является следствием симметрии плоскостей пространственной решетки нанотонких ПДС, находящихся в отражающем положении.

При микродифракционных исследованиях нанотонких ПДС гексагонального селена, на электронно-микроскопических изображениях которых присутствуют системы изгибных экстинкционных контуров, обладающие инверсионной симметрией (рис. 3*a*), от симметрично равных частей нанотонкой ПДС получены микроэлектронogramмы, представленные на (рис. 3*б*, 3*в*). От “левой” части нанотонкой ПДС получена микроэлектронogramма, представленная на рис. 3*б*. Расчеты микроэлектронogramмы, представленной на рис. 3*б* показывают, что данная микроэлектронogramма идентична микроэлектронogramме от “левой” части нанотонкой ромбовидной ПДС, характеризующейся зеркальной симметрией системы изгибных контуров. От “правой” части нанотонкой ПДС получена микроэлектронogramма, представленная на рис. 3*в*. Идентичность микроэлектронogramм представленных на рис. 1*б* и 3*б* иллюстрируется значениями межплоскостных расстояний, приведенных в табл. 1 и 3. Табл. 1 соответствует микроэлектронogramме от “левой” части, относительно плоскости симметрии, нанотонкой ПДС гексагонального селена с зеркальной симметрией изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопическом изображении (рис. 1*a*). Табл. 3 соответствует микроэлектронogramме от “левой” части относительно центра симметрии, нанотонкой ромбовидной ПДС с инверсионной симметрией изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопическом изображении (рис. 3*a*); табл. 4 соответствует микроэлектронogramме от “правой” части относительно центра симметрии, нанотонкой ромбовидной ПДС с инверсионной симметрией изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопическом изображении (рис. 3*a*).

Таблица 3. Межплоскостные расстояния и индексы Миллера для микроэлектроннограммы от “левой” части нанотонкой ПДС с инверсионной симметрией изгибных экстинкционных контуров

Номера рефлексов	Межплоскостные расстояния (Å), эксперимент	Межплоскостные расстояния (Å), теория	Индексы Миллера
1	2.976	2.975	$\bar{1}01\bar{1}$
2	2.062	2.060	$0\bar{1}12$
3	2.977	2.975	$10\bar{1}1$

Таблица 4. Межплоскостные расстояния и индексы Миллера для микроэлектроннограммы от “правой” части нанотонкой ПДС с инверсионной симметрией изгибных экстинкционных контуров

Номера рефлексов	Межплоскостные расстояния (Å), эксперимент	Межплоскостные расстояния (Å), теория	Индексы Миллера
1	2.977	2.975	$10\bar{1}1$
2	2.062	2.060	$1\bar{1}0\bar{2}$
3	2.976	2.975	$\bar{1}01\bar{1}$

Результаты расчета микроэлектроннограмм, полученных от нанотонкой ПДС гексагонального селена с инверсионной симметрией изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопическом изображении (рис. 3а), позволяют определить их положение в обратной решетке (рис. 4). Положение микроэлектроннограмм от симметрично равных частей ромбовидной нанотонкой ПДС гексагонального селена с инверсионной симметрией изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопическом изображении (рис. 3а) в ее обратной решетке характеризуется инверсионной симметрией (рис. 4). Расчеты, выполненные с применением стандартных кристаллографических формул, позволяют установить, что решетка исследуемых нанотонких ромбовидных ПДС гексагонального селена с инверсионной симметрией изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопическом изображении (рис. 3а) испытывает упругое ротационное искривление вокруг двух взаимно перпендикулярных направлений – вокруг [001] совпадающим по направлению с короткой диагональю нанотонкой ромбовидной ПДС и вокруг направления, совпадающего с длинной диагональю ромбовидной ПДС; углы ротации решетки нанотонких ПДС достигают, соответственно 18° и 22°. Проведенные микродифракционные исследования нанотонких ромбовидных ПДС гексагонального селена (рис. 3) с инверсионной симметрией изгибных экстинкционных контуров на электронно-микроскопическом изображении (рис. 3а) позволяют, с одной стороны, выявить упругое ротационное искривление их решетки вокруг двух взаимно перпендикулярных направлений, и, с другой стороны, выявить инверсионную симметрию положения микроэлектроннограмм от симметрично равных частей нанотонких ромбовидных ПДС в их обратной решетке.

Инверсионная симметрия микроэлектроннограмм в обратной решетке нанотонких ПДС гексагонального селена (рис. 3б, 3в и 4) и инверсионная симметрия систем изгибных контуров на их электронно-микроскопическом изображении (рис. 3а) – следствие инверсионной симметрии прямой решетки ромбовидных нанотонких ПДС.

Принимая во внимание формулировку общезначимого принципа симметрии Кюри приведенную выше и результаты анализа симметрии систем изгибных экстинкционных контуров, присутствующих на электронно-микроскопических изображениях нанотонких ромбовидных ПДС гексагонального селена и симметрии микроэлектроннограмм в обратной решетке нанотонких ромбовидных ПДС, можно сделать вывод: симметрия прямой решетки нанотонких ромбовидных ПДС, симметрия изгибных экстинкционных контуров, присутствующих на электронно-микроскопических изображениях нанотонких ПДС и симметрия микроэлектроннограмм в обратной решетке нанотонких ромбовидных ПДС гексагонального селена, полученных от симметрично равных частей нанотонких ПДС находятся в полном согласии с общезначимым принципом Кюри [8, 9]. Вместе с тем, результаты, полученные в процессе исследования нанотонких ромбовидных ПДС с зеркальной и инверсионной симметрией, вполне соответствуют выводам работы [11].

Изоморфизм прямого и обратного пространств [12] нанотонких ромбовидных ПДС гексагонального селена, решетка которых испытывает упругое ротационное искривление вокруг двух взаимно перпендикулярных направлений, объясняет соответствие зеркальной и инверсионной симметрии кристаллографических плоскостей в прямой решетке нанотонких ромбовидных ПДС и зеркальной и инверсионной симметрии микроэлектроннограмм в обратной решетке нанотонких ПДС гексагонального селена.

Изоморфизм прямого и обратного пространств нанотонких ПДС, соответственно, изоморфизм прямой и обратной решетки нанотонких ПДС с зеркальной и инверсионной симметрией, является основой способа диагностики нанотонких ПДС – нанотонких кристаллов с упругим ротационным искривлением решетки после стадии закалки нанотонких ПДС [5, 7].

ВЫВОДЫ

Выполненные электронно-микроскопические и микродифракционные исследования нанотонких пространственных диссипативных структур, формирующихся в аморфных пленках селена, имеющих аналоги [13, 14] и, в тоже время, специфических, позволяют сделать следующие выводы:

1. Обнаружены зеркальная и инверсионная симметрии прямой решетки нанотонких ромбовидных ПДС, испытывающей упругое ротационное искривление вокруг двух взаимно перпендикулярных направлений.

2. Установлено, что симметрия прямой решетки нанотонких ромбовидных ПДС, симметрия изгибных экстинкционных контуров, присутствующих на электронно-микроскопических изображениях нанотонких ПДС и симметрия микроэлектроннограмм в обратной решетке нанотонких ромбовидных ПДС гексагонального селена, полученных от симметрично равных частей нанотонких ПДС находятся в полном согласии с общезначимым принципом Кюри.

3. Изоморфизм прямого и обратного пространств позволяет во первых, объяснить совпадение симметрии прямой решетки и симметрии микроэлектроннограмм в обратной решетке нанотонких ромбовидных ПДС с зеркальной и инверсионной симметрией и, во вторых, изоморфизм прямого и обратного пространств является основой способа диагностики нанотонких ПДС – нанотонких кристаллов с упругим ротационным искривлением решетки после стадии закалки нанотонких ПДС.

4. Анализ симметрии систем изгибных экстинкционных контуров, присутствующих на электронно-микроскопических изображениях нанотонких ПДС, симметрии отражающих плоскостей прямой решетки нанотонких ПДС и симметрии микроэлектроннограмм в обратной решетке нанотонких ПДС, должен быть на первом или, по крайней мере, на одном из первых мест, в процессе электронно-микроскопических и

микродифракционных исследований нанотонких пространственных диссипативных структур формирующихся в аморфных пленках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hirsch P.B., Howie A., Nicholson R.B., Pashley D.W. Electron microscopy of thin crystals. London Butterworths. 1965. P. 418–420.
2. Tomas G., Michael J. Goringe. Transmission electron microscopy of materials. New York–Chichester–Brisbane–Toronto. 1979. P. 198–203.
3. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1973.
4. Болотов И.Е., Колосов В.Ю. Изгиб тонкопленочных кристаллов селена, обнаруживаемый по экстинкционным контурам // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1980. **44**. № 6. С. 1194–1197.
5. Malkov V.B., Nikolaenko I.V., Shveikin G.P., Pushin V.G., Malkov A.V., Shulgin B.V., Malkov O.V. // Doklady Physical Chemistry. 2018. **478**. № 2. P. 39–41. <https://doi.org/10.1134/S0012501618020033>
6. Малков В.Б., Николаенко И.В., Швейкин Г.П., Пушин В.Г., Малков А.В., Шульгин Б.В., Малков О.В., Плаксин С.В. Способ получения диссипативных структур. Патент РФ 2637396 от 04.12.2017.
7. Малков В.Б., Николаенко И.В., Швейкин Г.П., Малков А.В., Пушин В.Г., Малков О.В., Шульгин Б.В. Способ диагностики реальной структуры кристаллов. Заявл. 11.06.2013. Оpubл. 10.12.2014. Патент РФ 2534719. Бюл. № 34.
8. Curie P. Euvres de Pierre Curie. Société Française de Physique. Paris. 1908. P. 118–141.
9. Chiba T., Nagahama H. Curie Symmetry Principle in Nonlinear Functional Systems // Research Gate Forma. 2001. **16**. P. 225–231.
10. Andrews K.V., Dyson D.J., Keown S.R. Interpretation of Electron Diffraction Patterns. London, 1968. P. 39–56.
11. Вайнштейн Б.К., Звягин Б.Б. Об отображении в обратном пространстве симметрии кристаллической решетки // Кристаллография. 1963. **8**. № 2. С. 147–157.
12. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. М.: Наука, 1974.
13. Charles A. Kight. Curved Growth of Ice on Surfaces // J. Applied Physics. 1962. **33**. № 5. P. 1808–1815.
14. Lindenmeyer C.S., Chalmers B. Morphology of Ice Dendrites // J. Chemical. 1966. **45**. № 15. P. 110–120.

MIRROR AND INVERSION SYMMETRIES OF NANOTONE SPATIAL DISSIPATIVE STRUCTURES, ISOMORPHISM OF DIRECT AND REVERSE SPACE AND KYURY SYMMETRY PRINCIPLE

**V. B. Malkov¹, I. V. Nikolaenko², G. P. Shveykin², V. G. Pushin^{3,4}, A. V. Malkov⁵,
B. V. Shulgin³, O. V. Malkov⁵, P. N. Chernenkiy³**

¹*Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia*

²*Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia*

³*Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*

⁴*Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia*

⁵*ZAO NPTs ROSNA, Yekaterinburg, Russia*

Electron-microscopic study of the nanothin spatial dissipative structures of hexagonal selenium formed in amorphous films, whose lattice undergoes elastic rotational curvature, mirror and inversion symmetries of systems of bending extinction contours present on electron-microscopic images of nanothin spatial dissipative structures are found. It has been established that the mirror and inversion symmetries of the systems of bending extinction contours present on the electron microscopic images of nanothin spatial dissipative structures are due to the mirror and inversion symmetry of the straight lattice of nanothin spatial dissipative structures of hexagonal selenium, which is experiencing an elastic rotational curvature.

Keywords: symmetry, selenium, spatial, dissipative, structure, crystal

REFERENCES

1. Hirsch P.B., Howie A., Nicholson R.B., Pashley D.W. *Electron microscopy of thin crystals*. London Butterworths. 1965. P. 418–420.
2. Tomas G., Michael J. Goringe. *Transmission electron microscopy of materials*. New York—Chichester—Brisbane—Toronto. 1979. P.198–203.
3. Utevsky L. Difraktsionnaya elektronnaya mikroskopiya v metallovedenii [Diffraction electron microscopy in metallurgy]. M.: Metallurgy, 1973. (In Russian).
4. Bolotov I.Ye., Kolosov V.Yu. Izgib tonkoplennoknykh kristallov seleno, obnaruzhivayemyy po ekstinktsionnym konturam [Bending of thin-film selenium crystals, detected by extinction contours] // *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Ser. Physical*. 1980. **44**. № 6. P. 1194–1197. (In Russian).
5. Malkov V.B., Nikolaenko I.V., Shveikin G.P., Pushin V.G., Malkov A.V., Shulgin B.V., Malkov O.V. // *Doklady Physical Chemistry*. 2018. **478**. № 2. P. 39–41. <https://doi.org/10.1134/S0012501618020033>.
6. Malkov V.B., Nikolaenko I.V., Shveikin G.P., Pushin V.G., Malkov A.V., Shulgin B.V., Malkov O.V., Plaksin S.V. Sposob polucheniya dissipativnykh struktur [The method of obtaining dissipative structures]. The patent of the Russian Federation 2637396 from 12/04/2017. (In Russian).
7. Malkov V.B., Nikolaenko I.V., Shveikin G.P., Malkov A.V., Pushin V.G., Malkov O.V., Shulgin B.V. Sposob diagnostiki real'noy struktury kristallov [Method for diagnosing the real structure of crystals]. Claims 06/11/2013. Publ. 12/10/2014. RF Patent 2 534 719. Bul. № 34. (In Russian).
8. Curie P. *Euvres de Pierre Curie*. Société Française de Physique. Paris. 1908. P. 118–141.
9. Chiba T., Nagahama H. Curie Symmetry Principle in Nonlinear Functional Systems // *Research Gate Forma*. 2001. **16**. P. 225–231.
10. Andrews K.V., Dyson D.J., Keown S.R. *Interpretation of Electron Diffraction Patterns*. London, 1968. P. 39–56.
11. Weinstein B.K., Zvyagin B.B. Ob otobrazhenii v obratnom prostranstve simmetrii kristallicheskoj reshetki [On the reflection of the lattice symmetry in the reciprocal space] // *Crystallography*. 1963. **8**. № 2. P. 147–157. (In Russian).
12. Il'in V.A., Poznyak E.G. *Lineynaya algebra* [Linear algebra]. M.: Science, 1974. (In Russian).
13. Charles A. Kight. Curved Growth of Ice on Surfaces // *J. Applied Physics*. 1962. **33**. № 5. P. 1808–1815.
14. Lindenmeyer C.S., Chalmers B. Morphology of Ice Dendrites // *J. Chemical*. 1966. **45**. № 15. P. 110–120.