

# Экстремальные значения коэффициента Пуассона триклинных и моноклинных кристаллов

Волков М.А.

volkovmikh1@gmail.com

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, просп. Вернадского 101-1, 119526, Москва

Для триклинных и моноклинных кристаллов найдены глобальные экстремальные значения коэффициента Пуассона, значения при некоторых частных ориентациях кристаллов и средние по всем направлениям значения.

**Ключевые слова:** коэффициент Пуассона, ауксетики, триклинные кристаллы, моноклинные кристаллы.

## Extreme values of Poisson's ratio for triclinic and monoclinic crystals

M.A. Volkov

A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, prospect Vernadskogo 101-1, 119526 Moscow

Global extrema for Poisson's ratio, extrema at particular orientations of crystals and average Poisson's ratios over all orientations were found for triclinic and monoclinic crystals.

**Keywords:** Poisson's ratio, auxetics, triclinic crystals, monoclinic crystals.

### Введение

Коэффициент Пуассона определяется как отношение поперечной деформации к продольной при одноосном растяжении. Материалы, у которых коэффициент Пуассона является отрицательным, называются ауксетиками. В статье выявлены ауксетики среди триклинных и моноклинных кристаллов. Такой анализ проводился ранее в отношении кристаллов кубической и гексагональной систем [1,2]. Анализ минимальных значений коэффициента Пуассона для некоторых частных ориентаций некоторой выборки моноклинных кристаллов был представлен в статье [3]. Ниже для всех триклинных и моноклинных кристаллов, представленных в справочнике [4], получены глобальные минимальные и максимальные, а так же средние значения коэффициентов Пуассона. Дано сравнение их с экстремальными значениями для частных ориентаций.

### 1. Коэффициент Пуассона кристаллов

Коэффициент Пуассона кристаллов определяется по формуле [5]

$$\nu = - \frac{s_{ijkl} n_i n_j m_k m_l}{s_{qrst} n_q n_r n_t n_h}, \quad (1)$$

где  $n_i$  - компоненты единичного вектора  $\mathbf{n}$ , вдоль которого происходит растяжение,  $m_i$  - компоненты единичного вектора  $\mathbf{m}$ , перпендикулярного к век-

тору  $\mathbf{n}$ ,  $s_{ijkl}$  - тензор модулей податливости. В кристаллографической системе координат векторы представляются через углы Эйлера  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  следующим образом

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} \sin \varphi \sin \theta \\ -\cos \varphi \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix}, \quad \mathbf{m} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \cos \theta \sin \psi \\ \sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \cos \theta \sin \psi \\ \sin \theta \sin \psi \end{pmatrix}.$$

Часто вместо тензорных модулей податливости удобно использовать матричные модули  $s_{mn}$  [6].

### 2. Экстремумы коэффициента Пуассона при частных ориентациях кристаллов

На примере триклинных кристаллов рассмотрим изменения коэффициента Пуассона для таких ориентаций, где лишь одна компонента вектора  $\mathbf{n}$  отлична от нуля.

1) Ориентация  $\mathbf{n}^T = (1, 0, 0)$ . Такая ориентация соответствует углам Эйлера  $\varphi = \theta = \pi/2$ , при которых для коэффициента Пуассона имеем

$$\nu = - \frac{s_{12} \cos^2 \psi + s_{13} \sin^2 \psi + s_{14} \sin \psi \cos \psi}{s_{11}} \quad (2)$$

Экстремумы достигаются при:

$$\psi = \arctg \left( \frac{1 \pm \sqrt{1 + \rho_1^2}}{\rho_1} \right), \quad \rho_1 = \frac{s_{14}}{s_{13} - s_{12}}.$$

Таблица 1

Экстремальные и средние значения коэффициентов Пуассона для триклинных кристаллов

Кристалл	$\nu_{\min}$	$\nu_{\max}$	$\langle \nu \rangle$	$\nu$ при $n_1 = 1$		$\nu$ при $n_2 = 1$		$\nu$ при $n_3 = 1$	
				min	max	min	max	min	max
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.11	0.60	0.32	0.24	0.47	0.18	0.30	0.40	0.44
	0.11	<b>0.66</b>	0.37	0.30	0.38	0.19	0.51	0.25	<b>0.65</b>
KH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.01	1.03	0.33	0.14	0.20	0.20	0.33	0.12	0.49
LiHC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	0.01	0.91	0.30	0.16	0.38	0.11	0.41	0.07	0.29
NaHC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	-0.01	<b>0.75</b>	0.32	0.06	0.25	0.03	<b>0.75</b>	0.12	0.43
NH <sub>4</sub> H <sub>3</sub> (C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )·H <sub>2</sub> O	0.01	0.97	0.33	0.11	0.23	0.21	0.39	0.23	0.41

В частных случаях кристаллов моноклинной, орторомбической, тетрагональной, гексагональной и кубической систем  $s_{14}=0$ . Для таких кристаллов экстремумы достигаются при  $\psi=0, \pi/2$ .

2) Ориентация  $\mathbf{n}^T=(0,1,0)$ . Тогда  $\varphi=\pi$ ,  $\theta=\pi/2$ , и для коэффициента Пуассона имеем

$$\nu = -\frac{s_{12} \cos^2 \psi + s_{23} \sin^2 \psi - s_{25} \sin \psi \cos \psi}{s_{22}}. \quad (3)$$

Экстремумы достигаются при

$$\psi = \arctg \left( \frac{-1 \pm \sqrt{1 + \rho_2^2}}{\rho_2} \right), \quad \rho_2 = \frac{s_{25}}{s_{23} - s_{12}}.$$

В частных случаях кристаллов орторомбической, тетрагональной, шестиконстантной ромбоэдрической, гексагональной и кубической систем  $s_{25}=0$ . Для этих кристаллов экстремумы достигаются при  $\psi=0, \pi/2$ .

3) Ориентация  $\mathbf{n}^T=(0,0,1)$ . Такая ориентация соответствует  $\theta=0$  и двум последовательным поворотам относительно оси 3 на углы  $\varphi$  и  $\psi$ . Тогда коэффициент Пуассона зависит от  $\psi' = \varphi + \psi$

Таблица 2

Экстремальные и средние значения коэффициентов Пуассона для моноклинных кристаллов

Кристалл	$\nu_{\min}$	$\nu_{\max}$	$\langle \nu \rangle$	$\nu$ при $n_1 = 1$		$\nu$ при $n_2 = 1$		$\nu$ при $n_3 = 1$		
				min	max	min	max	min	max	
NaFeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	<b>0.11</b>	0.48	0.28	0.23	0.33	<b>0.11</b>	0.36	0.16	0.31	
Aegirite-augite	<b>-0.01</b>	0.64	0.29	0.15	0.42	<b>-0.01</b>	0.53	0.26	0.29	
NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	<b>0.01</b>	0.67	0.29	0.22	0.26	<b>0.01</b>	0.49	0.06	0.46	
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	0.16	0.67	0.33	0.23	0.5	0.21	0.32	0.23	0.62	
CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	0.05	0.57	0.29	0.21	0.27	0.11	0.51	0.09	0.31	
Anthracene-tetracyanobenzene	-1.02	1.86	0.39	0.36	0.61	-0.26	0.38	-0.16	0.41	
Augite	<b>-0.10</b>	0.53	0.23	0.26	0.33	<b>-0.10</b>	0.41	0.04	0.36	
(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> NCH <sub>2</sub> COO·H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	-0.04	0.61	0.31	0.21	0.51	0.17	0.44	0.20	0.39	
(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> NCH <sub>2</sub> COO(COOH) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	<b>0.03</b>	<b>0.80</b>	0.34	0.09	0.49	<b>0.04</b>	<b>0.80</b>	0.25	0.27	
(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> NCH <sub>2</sub> COO·H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	<b>-0.04</b>	0.80	0.34	0.08	0.62	<b>-0.03</b>	0.59	0.30	0.31	
C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	-0.25	1.07	0.33	-0.07	0.65	0.31	0.53	-0.16	0.91	
	<b>-1.30</b>	<b>1.65</b>	-0.05	-0.39	0.39	<b>-1.30</b>	0.41	0.45	<b>1.64</b>	
BiVO <sub>4</sub>	<b>-0.03</b>	0.68	0.25	-0.01	0.42	<b>-0.03</b>	0.36	0.37	0.62	
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.02	0.69	0.35	0.09	0.63	0.13	0.60	0.09	0.36	
	-0.12	0.70	0.35	0.14	0.56	0.17	0.67	0.07	0.48	
CsD(SeO <sub>3</sub> )	-0.30	<b>1.03</b>	0.39	-0.14	0.82	-0.02	<b>1.02</b>	-0.18	0.90	
CsH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	-1.91	2.70	0.42	0.12	0.64	-1.49	2.27	-0.18	1.52	
Cr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	0.17	0.66	0.33	0.23	0.51	0.22	0.32	0.23	0.62	
CoSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.04	0.67	0.36	0.33	0.44	0.08	0.62	0.14	0.43	
SiO <sub>2</sub>	<b>-0.11</b>	0.73	0.29	0.31	0.35	<b>-0.11</b>	0.69	-0.06	0.63	
Cu(COOH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0	0.89	0.35	0.18	0.66	0.17	0.83	0.13	0.23	
Diallage	<b>0.06</b>	0.41	0.21	0.12	0.34	<b>0.06</b>	0.36	0.13	0.18	
C <sub>14</sub> H <sub>14</sub>	-0.10	0.61	0.30	0.32	0.35	0.27	0.33	0.31	0.35	
	-0.55	0.58	0.01	0.27	0.33	-0.46	0.25	-0.50	0.33	
p-Dichlorobenzophenone	<b>0.04</b>	<b>0.65</b>	0.33	0.10	0.31	<b>0.05</b>	<b>0.65</b>	0.14	0.37	
CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	<b>0.09</b>	0.50	0.27	0.29	0.39	<b>0.09</b>	0.37	0.12	0.35	
	0.10	0.49	0.25	0.25	0.37	0.15	0.30	0.20	0.25	
Durene	-0.12	<b>0.88</b>	0.34	-0.01	0.81	0.05	<b>0.88</b>	-0.02	0.36	
Epitode	0.06	0.55	0.26	0.16	0.24	0.12	0.30	0.12	0.15	
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	0	1.25	0.35	0.09	0.99	0	0.58	0.18	0.33	
Feldspars	Labradorite	<b>-0.08</b>	<b>0.68</b>	0.31	0.28	0.36	<b>-0.08</b>	<b>0.68</b>	-0.06	0.53
	Microcline	<b>-0.14</b>	<b>0.78</b>	0.29	0.21	0.26	<b>-0.14</b>	<b>0.78</b>	-0.04	0.42
	Oligoclase	<b>-0.17</b>	0.76	0.30	0.10	0.38	<b>-0.17</b>	0.53	0.08	0.66
Feldspars, Plagioclase	9 (Albite)	<b>-0.40</b>	0.71	0.26	0.18	0.27	<b>-0.40</b>	0.64	-0.07	0.47
	24 (Oligoclase)	<b>0.09</b>	0.63	0.29	0.21	0.24	0.12	0.42	<b>0.10</b>	0.4

Таблица 2 (продолжение)

Экстремальные и средние значения коэффициентов Пуассона для моноклинных кристаллов

Кристалл		$\nu_{\min}$	$\nu_{\max}$	$\langle \nu \rangle$	$\nu$ при $n_1 = 1$		$\nu$ при $n_2 = 1$		$\nu$ при $n_3 = 1$	
					min	max	min	max	min	max
Feldspars, Plagioclase	29 (Oligoclase)	<b>0.07</b>	0.61	0.29	0.22	0.24	0.10	0.45	<b>0.08</b>	0.40
	53 (Labradorite)	<b>0.07</b>	0.61	0.30	0.24	0.26	0.08	0.49	<b>0.08</b>	0.38
	56 (Labradorite)	<b>0.09</b>	0.61	0.30	0.23	0.25	0.11	0.49	<b>0.09</b>	0.35
Feldspars, Soda-potash	2 (Microcline)	<b>-0.07</b>	0.82	0.29	0.18	0.21	<b>-0.07</b>	0.65	-0.03	0.54
	42 (Amazonite)	<b>-0.06</b>	0.74	0.29	0.18	0.26	<b>-0.06</b>	0.61	-0.03	0.56
	43 (Orthoclase)	<b>-0.04</b>	0.73	0.30	0.19	0.27	<b>-0.04</b>	0.61	-0.02	0.52
	60 (Anorthoclase)	-0.12	0.87	0.33	0.17	0.32	0.08	0.61	0.07	0.63
	61 (Microcline)	0	0.74	0.30	0.18	0.25	0.06	0.60	0.04	0.51
	209 (Microcline)	<b>-0.07</b>	<b>0.83</b>	0.32	0.24	0.27	<b>-0.07</b>	<b>0.83</b>	-0.02	0.55
	215 (Orthoclase)	-0.13	0.78	0.27	0.14	0.17	-0.11	0.55	-0.02	0.43
	$\beta\text{-F}_2\text{H}_4\text{F}_6$	-0.86	1.23	0.35	-0.13	1.01	-0.34	0.84	0.23	0.68
	$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$	0.11	0.47	0.28	0.22	0.28	0.20	0.28	0.23	0.38
	Hornblende	<b>0.01</b>	<b>0.49</b>	0.29	0.21	0.26	<b>0.01</b>	<b>0.49</b>	0.27	0.43
		0.09	0.49	0.28	0.22	0.26	0.14	0.41	0.17	0.36
	$(\text{Ba,K})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	<b>-0.03</b>	0.74	0.31	0.21	0.29	<b>-0.03</b>	0.66	<b>-0.02</b>	0.63
	$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	0.17	0.65	0.33	0.23	0.51	0.22	0.31	0.23	0.62
	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.17	0.55	0.36	0.28	0.43	0.24	0.48	0.28	0.33
	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	0.13	0.44	0.26	0.16	0.35	0.18	0.32	0.17	0.24
	$\text{LaNbO}_4$	<b>-3.01</b>	<b>3.95</b>	0.46	-0.25	1.42	<b>-3.01</b>	<b>3.95</b>	0.21	0.65
	$\text{LiC}_4\text{H}_5 \cdot \text{C}_4\text{H}_5\text{O}_5$	-0.56	0.91	0.31	0.29	0.39	-0.13	0.76	0.26	0.52
	$\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-0.09	<b>0.62</b>	0.24	0.10	0.33	-0.01	<b>0.62</b>	0.12	0.30
		-0.03	0.47	0.25	0.24	0.33	0.04	0.41	0.20	0.33
	$(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-0.18	0.88	0.33	0.20	0.71	0.04	0.43	0.24	0.44
	$\text{K}_2\text{Co}(\text{CN})_6$	-0.35	0.62	0.19	-0.10	0.39	-0.31	0.40	-0.10	0.62
	$\text{KHCO}_3$	-0.42	1.29	0.37	0.10	0.60	0.25	0.29	0.12	0.64
	$\text{KHC}_2\text{O}_4$	0	<b>1.00</b>	0.35	0.05	0.33	0.07	<b>1.00</b>	0.25	0.37
	$\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-0.01	0.95	0.34	0.07	0.62	0.02	0.69	0.10	0.82
	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$	<b>0.09</b>	0.70	0.31	0.48	0.62	<b>0.09</b>	0.43	0.15	0.37
	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-1.12	1.26	0.37	0.05	0.78	-0.31	0.92	0.05	1.13
	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	0.09	0.51	0.26	0.12	0.34	0.11	0.34	0.16	0.28
	Stilbene	-0.22	0.78	0.33	0.35	0.51	0.30	0.43	0.24	0.47
	$\text{C}_4\text{H}_5\text{O}_5$	-0.21	0.89	0.32	0.28	0.69	-0.04	0.35	0.39	0.47
	$\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_3\text{NS}$	-0.01	<b>0.94</b>	0.33	0.09	0.89	0.11	<b>0.94</b>	0.20	0.32
	$\text{Te}(\text{OH})_6 \cdot 2\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	-0.06	<b>0.59</b>	0.31	0.06	<b>0.58</b>	0.27	0.53	0.07	0.42
$\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_6\text{H}_4\text{C}_6\text{H}_5$	Hydrogenated	-0.15	0.92	-0.33	0	0.57	0.22	0.56	0	0.79
	Deuterated	-0.12	0.91	0.34	0.02	0.56	0.21	0.56	0.05	0.75
	$\text{SnF}_2$	-0.20	0.82	0.23	0.04	0.51	0.15	0.41	0.02	0.66
	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}$	-0.26	<b>0.60</b>	0.23	0.00	0.35	0.21	<b>0.59</b>	0.01	0.32
$\text{ZrO}_2$		<b>-0.63</b>	0.58	0.05	0.03	0.37	<b>-0.63</b>	0.50	-0.32	0.02
		-0.10	<b>0.81</b>	0.27	0.03	0.37	0.05	<b>0.81</b>	0.02	0.33

$$\nu = -\frac{s_{13} \cos^2 \psi' + s_{23} \sin^2 \psi' + s_{36} \sin \psi' \cos \psi'}{s_{33}}. \quad (4)$$

Экстремумы достигаются при

$$\psi' = \arctg \left( \frac{1 \pm \sqrt{1 + \rho_3^2}}{\rho_3} \right), \quad \rho_3 = \frac{s_{36}}{s_{23} - s_{13}}.$$

В частных случаях кристаллов моноклинной, тетрагональной, ромбоэдрической, орторомбической, гексагональной и кубической систем  $s_{36}=0$ . Экстремумы для кристаллов этих систем достигаются при  $\psi'=0, \pi/2$ . Кристаллы тетрагональной и гексагональной систем имеют  $s_{13}=s_{23}$ , и коэффициент Пуассона для них равен  $-s_{13}/s_{33}$ .

Для кубических кристаллов  $s_{11}=s_{22}=s_{33}$  и  $s_{12}=s_{13}=s_{23}$ , и при всех рассмотренных частных ориентациях  $\nu=-s_{12}/s_{11}$ .

### 3. Глобальные экстремумы коэффициента Пуассона и средние по всем направлениям значения этого коэффициента

Среднее значение коэффициента Пуассона определялось при помощи следующей формулы

$$\langle \nu \rangle = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \sin \theta \cdot \nu(\varphi, \theta, \psi) d\theta. \quad (5)$$

Глобальные экстремальные значения определялись при помощи программного пакета Maple и метода уровней.

Численные значения коэффициента Пуассона для кристаллов, относящихся к триклинной и моноклинной системам, были получены при помощи экспериментальных данных из справочника [4]. В справочнике может приводиться несколько наборов упругих констант. В этой работе номер набора, если их больше одного, будет указываться в круглых скобках, находящихся после наименования кристалла.

Найдено, что среди кристаллов, принадлежащих к триклинной системе, лишь один имеет отрицательный коэффициент Пуассона очень незначительной величины (-0.01) (таб.1). У одного кристалла  $\text{NaHC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  глобальный максимум совпадает с максимумом при частной ориентации. Ещё в одном случае ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (второй набор)) глобальный максимум почти не отличается от максимума при частной ориентации.

В таб.2 представлены кристаллы моноклинной системы. Среди всех рассмотренных кристаллов ауксетические свойства проявляют около 60%. У десяти из них величина минимального коэффициента Пуассона менее -0.5. Найдено пять кристаллов, у которых как минимальный, так и максимальный коэффициент Пуассона по модулю превосходит единицу: Anthracene-tetracyanobenzene,  $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$  (второй набор),  $\text{CsH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{LaNbO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . У двух моноклинных кристаллов средний коэффициент Пуассона имеет отрицательную величину ( $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$  (второй набор) и  $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_6\text{H}_4\text{C}_6\text{H}_5$  hydrogenated).

У некоторых кристаллов один или оба глобальных экстремума могут совпадать или быть очень близки (различие не более одной сотой) к экстремумам при частной ориентации. Так, только минимумы совпадают у двадцати четырех кристаллов, а только максимумы у одиннадцати. Оба глобальных экстремума совпадают (или близки) с экстремумами при определенной частной ориентации у шести кристаллов. Случаи полного совпадения и близких значений (при различии в одну сотую) отмечены в таб.1,2 жирным шрифтом.

Около 75% рассмотренных кристаллов триклинной и моноклинной систем имеют средний коэффициент Пуассона, находящийся в интервале от 0.25 до 0.35.

В [3] для некоторой выборки кристаллов приведены значения минимумов коэффициента Пуассона при некоторых частных ориентациях. Данные для выборки из [3] при ориентации  $\mathbf{n}^T = (0,1,0)$  совпадают с данными, которые представлены в этой статье для такой же частной ориентации, за исключением кристалла  $\text{K}_2\text{Co(CN)}_6$  (Potassium cobalt cyanide):  $\nu_{\min} = -3.0$  в работе [3], и

$\nu_{\min} = -0.31$  в этой статье.

По данным из [3] ауксетическое поведение демонстрируют 25% моноклинных кристаллов для частных ориентаций. Это существенно меньше 60%, характерных для глобальных экстремумов, изученных в этой статье для большего количества кристаллов.

## Заключение

Рассмотрены кристаллы триклинной и моноклинной систем. Аналитически найдены экстремумы в случаях, когда вектор  $\mathbf{n}$  параллелен кристаллографическим осям. На основании экспериментальных данных из справочника [4], с использованием численного анализа, для различных кристаллов получены глобальные максимумы и минимумы коэффициента Пуассона, а так же его среднее значение по всем направлениям. Обнаружены материалы, проявляющие ауксетические свойства, и те, у которых глобальные экстремумы совпадают с экстремумами при частной ориентации. Установлено, что лишь один кристалл триклинной системы имеет отрицательный коэффициент Пуассона незначительной величины. Около 60% моноклинных кристаллов проявляют ауксетические свойства.

*Работа выполнена в рамках программы Президиума РАН №24 и гранта РФФИ 14-01-32145 мол\_а.*

## Литература

1. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. Classification of cubic auxetics. PSS (b). **250** (10), 2038 (2013).
2. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. Average Poisson's ratio for crystals. Hexagonal auxetics. Letters on Materials. **3**, 7 (2013).
3. M. Rovati. Direction of auxeticity for monoclinic crystals. Scripta Materialia. **51** (11), 1087 (2004).
4. Landolt-Börnstein. Group III Condensed Matter. Berlin, Springer. 29a, 210 (1992).
5. Yu.I. Sirotnin, M.P. Shaskolskaya. Fundamentals of crystal physics. Chicago:Imported Publications. (1983) 654 p. [Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. Основы кристаллофизики. М.:Мир. (1982) 680 с.]
6. J. Nye. Physical properties of crystals. Oxford:Clarendon Press. (1957) 333 p. [Дж. Най. Физические свойства кристаллов. Москва, Мир (1967) 385 с.]