

## Методика определения энергии ядер сверхтяжелых элементов ( $Z>30$ ) галактических космических лучей по трекам в кристаллах оливина из палласита Марьялахти

Л. Л. Кашкаров,<sup>1</sup> А. В. Багуля,<sup>2</sup> М. С. Владимиров,<sup>2</sup> Л. А. Гончарова,<sup>2</sup> А. И. Ивлиев,<sup>1</sup>  
Г. В. Калинина,<sup>1</sup> Н. С. Коновалова,<sup>2</sup> Н. М. Окатьева,<sup>2</sup> Н. Г. Полухина,<sup>2</sup> А. С. Русецкий,<sup>2</sup>  
Н. И. Старков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, Москва,

<sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Получено 31 марта 2010; опубликовано 5 июня 2010.

В статье приводятся основные положения разрабатываемой новой методики определения заряда ядер сверхтяжелых ( $Z>30$ ) элементов галактических космических лучей (ГКЛ), основанной на измерении углового распределения треков, образованных этими ядрами в кристаллах оливина из палласита Марьялахти. Исходя из определенной по трекам торможения пространственной ориентации ядер в теле метеорита до атмосферных размеров, рассчитывается длина пробега каждого из зарегистрированных ядер перед их остановкой в отдельных кристаллах оливина. Вычисленные соотношения пробег-энергия дают возможность определять энергию ядер, которую они имели до попадания в метеорит. Для определения ориентации каждого из исследуемых кристаллов оливина относительно ближайшего участка до атмосферной поверхности метеорита проводится измерение углового распределения треков ядер VH-группы ( $23<Z<28$ ). Величины энергии, оцененные для около 1000 ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ, зарегистрированных в 22-х изученных кристаллах оливина из палласита Марьялахти, находятся в интервале  $\sim (1.5 - 5)$  ГэВ/нуклон.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Треки в оливине; энергия ядер; ядра сверхтяжелых элементов; галактические космические лучи; метеорит-палласит Марьялахти

**Ссылка** Кашкаров Л. Л., А. В. Багуля, М. С. Владимиров, Л. А. Гончарова, А. И. Ивлиев, Г. В. Калинина, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева, Н. Г. Полухина, А. С. Русецкий, Н. И. Старков (2010), Методика определения энергии ядер сверхтяжелых элементов ( $Z>30$ ) галактических космических лучей по трекам в кристаллах оливина из палласита Марьялахти, *Вестник ОНЗ РАН*, 2, NZ6015, doi:10.2205/2010NZ000033, 2010

### Введение

В работе, проводимой в рамках проекта ОЛИМПИА [Ginzburg *et al*, 2005], приводятся основные положения новой методики определения заряда ядер тяжелых и сверхтяжелых элементов ГКЛ по трекам – химически травимым участкам следов торможения этих ядер в кристаллах оливина, выделяемых из метеоритов типа палласиты. В качестве конкретного примера проведены теоретические расчеты параметров треков, используемых для определения заряда ядер, основанные на экспериментальных данных, полученных для палласита Марьялахти.

### Методика определения энергии ядер

Метод определения энергии тяжелых (ядра группы железа,  $24<Z<28$ ) и сверхтяжелых ( $Z>30$ ) ядер ГКЛ основан на измерении пространственного углового распределения треков, образованных этими ядрами в отдельных кристаллах оливина миллиметровых размеров, находящихся на определенной глубине от до атмосферной поверхности метеоритов типа палласиты. В зависимости от глубины залегания и ориентации каждого из исследуемых кристаллов оливина относительно до атмосферной поверхности метеороида в кристаллах формируется определенное угловое распределение химически травимых треков [Kashkarov *et al.*, 2006]. Измерение углового распределения треков позволяет: 1) Выявить ориентацию поверхности травления кристалла по отношению к наиболее близко расположенному участку

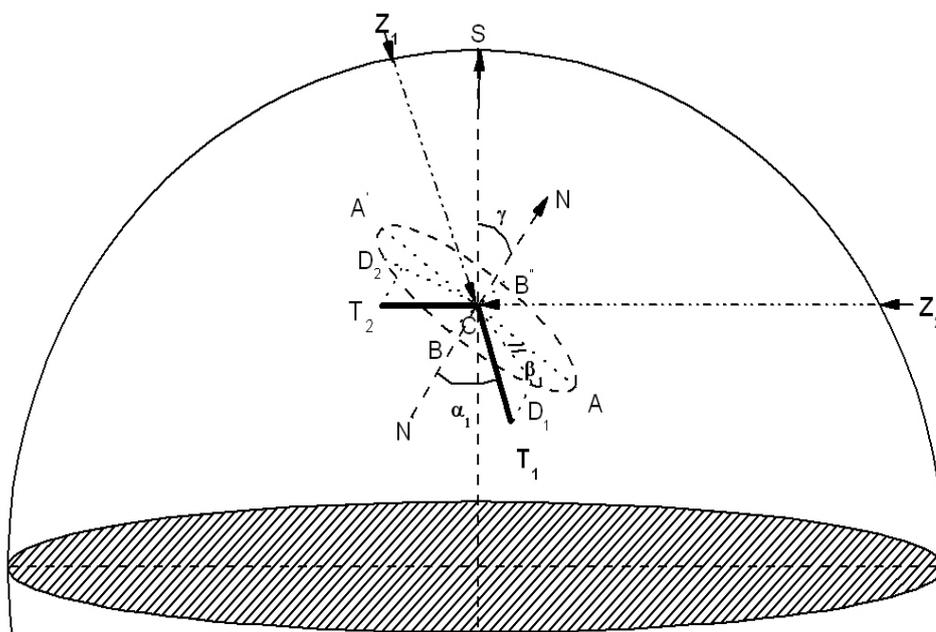
на до атмосферной поверхности метеороида; 2) Рассчитать длину пробега в теле метеороида каждого из зарегистрированных ядер перед их остановкой и формированием химически травимого участка в данном кристалле оливина; 3) Исходя из соотношения пробег-энергия, оценить энергию ядер, которую они имели перед попаданием в тело метеороида.

**Параметры, определяющие пространственную ориентацию треков в отдельных кристаллах оливина, находящихся на определенной глубине и хаотически ориентированных в теле метеороида**

На рис.1 приведена схема расположения двух треков ( $T_1$  и  $T_2$ ), образованных ядрами  $Z_1$  и  $Z_2$ , соответственно, и протравленных из точки  $C$ , лежащей на плоскости поверхности травления кристалла, представленной в виде эллипса  $ABA'B'$ . Угол наклона трека по глубине кристалла ( $\alpha$ ) между треком и нормалью ( $CN'$ ) к плоскости травления кристалла, причем  $CN'$  направлена вглубь кристалла. На графике показан угол  $\alpha_1 = \angle T_1CN'$  для первого трека. Для этого же трека на графике указан угол  $\beta_1 = \angle ACD_1$  – азимутальный угол, характеризующий направление трека относительно полуоси эллипса  $AC$ , направление которой должно совпадать с направлением максимума пика на кривой гауссова распределения всех треков, наблюдаемых в данном кристалле. Т.о., полуось  $AC$  и полуплоскость эллипса  $BAV'$  должны быть ориентированы вглубь тела метеороида, т.е. в направлении, противоположном точке  $S$ , находящейся на наиболее близко расположенном участке до атмосферной поверхности метеорита.

Ориентация плоскости травления кристалла в теле метеороида характеризуется углом склонения  $\gamma$  нормали  $CN$  относительно прямой  $CS$ , соединяющей данный кристалл с ближайшим участком поверхности метеороида. Т.о. отрезок прямой  $CS = H$  равен глубине в теле метеороида, на которой находился данный кристалл во время облучения ГКЛ.

В случае, когда плоскость травления кристалла оказывается ориентированной в положении, близком к нормальному относительно направления к ближайшей точке на поверхности метеороида, т.е. при  $\gamma \sim 0$ , для расчетов длины пробега ядер в теле метеороида удобнее пользоваться углом наклона треков ( $\Theta$ ) относительно прямой  $CS$ .



**Рис.1. Углы, определяющие пространственную ориентацию треков от ядер сверхтяжелых элементов галактических космических лучей в отдельных кристаллах оливина из палласита Марьялахти.**

**Треки ядер VH-группы ( $23 < Z < 28$ ) ГКЛ.**

Для получения предварительных данных об ориентации плоскости поверхности травления каждого кристалла оливина относительно направления к ближайшему участку поверхности метеороида измерялось угловое распределение короткопробежных (длина основной зоны травления  $L_{\text{осн}} = 15$  мкм) треков ядер VH-группы ( $23 < Z < 28$ ), плотность треков которых для изученных к настоящему времени кристаллов оливина из палласита Марьялахти варьирует в пределах  $(0.2-2) \times 10^7$  трек/см<sup>2</sup> (см. Табл.1). Однако, измеряемые параметры углового распределения этих треков, как указано выше, являются предварительными, так как, во-первых, из-за их малой средней длины (около 8 мкм) точность определения угла наклона каждого из

этих треков составляет 15-20 град, и во-вторых, для ядер группы железа по сравнению с более тяжелыми ядрами наблюдается более слабая зависимость между длиной пробега и энергией.

Треки ядер VH-группы ГКЛ используются также для определения глубины залегания исследуемых кристаллов оливина в теле метеороида во время облучения в космическом пространстве. Для этого в каждом кристалле измеряется плотность треков ядер VH-группы и, исходя из теоретически рассчитанной для данного метеороида (определенного типа, размера и возраста космического облучения) кривой соотношения между плотностью треков ядер VH-группы и глубиной в теле метеороида, проводится определение глубины залегания кристаллов. В таблице 1 приведены результаты определения глубины залегания 22-х кристаллов оливина, выделенных из палласита Марьялахти. Рассчитанная для метеороида Марьялахти кривая зависимости плотности треков ядер VH-группы от глубины в теле метеороида Марьялахти, проведена на рисунке 2.

**Табл. 1. Плотность треков ядер группы железа (VH-группа) ГКЛ в кристаллах оливина (таблетки 005, 006 и 007) из палласита Марьялахти**

№ пп	Таблетка	Кристалл	Число треков	Число (*) клеток	Плотность треков, см <sup>-2</sup> ( $\times 10^7$ ) (**)	Глубина залегания, см
1	005	1	163	10	1.05	5.30
2		2	247	10	1.54	4.95
3		3	97	10	0.61	6.10
4		4	281	10	1.76	4.85
5	006	1	85	10	0.53	6.35
6		2	128	20	0.40	7.00
7		3	138	10	0.86	5.50
8		4	130	20	0.41	6.90
9		5	88	10	0.55	6.30
10		6	200	10	1.25	5.15
11		7	86	20	0.27	8.20
12		8	84	20	0.21	9.70
13		9	69	10	0.43	6.80
14	007	1	161	20	0.50	6.50
15		2	448	10	2.80	4.60
16		3	130	10	0.81	5.60
17		4	96	20	0.30	7.90
18		5	194	20	0.61	6.10
19		6	207	10	1.30	5.10
20		7	162	28	0.51	6.45
21		8	212	10	1.33	5.05
22		9	113	20	0.35	7.30

(\*) Площадь одной клетки  $1.6 \times 10^{-6}$  см<sup>2</sup>

(\*\*) Плотность треков в кристаллах оливина, накопленная за время космического возраста палласита Марьялахти, равного по результатам разных работ 175-200 млн. лет

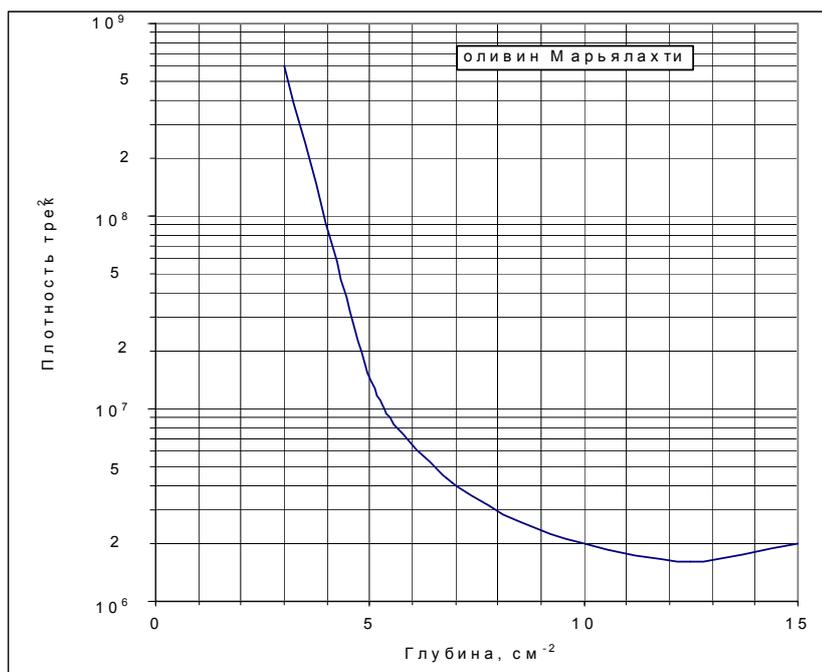


Рис. 2 Зависимость плотности треков ядер VH-группы ГКЛ от глубины нахождения кристалла оливина в теле метеороида Марьялахти, диаметр которого в предположении сферической формы равен 25 см.

Результаты теоретических расчетов

Результаты расчетов для случая нормально ориентированной плоскости поверхности травления кристаллов относительно направления к ближайшему участку поверхности метеороида ( $\gamma \sim 0$  град.)

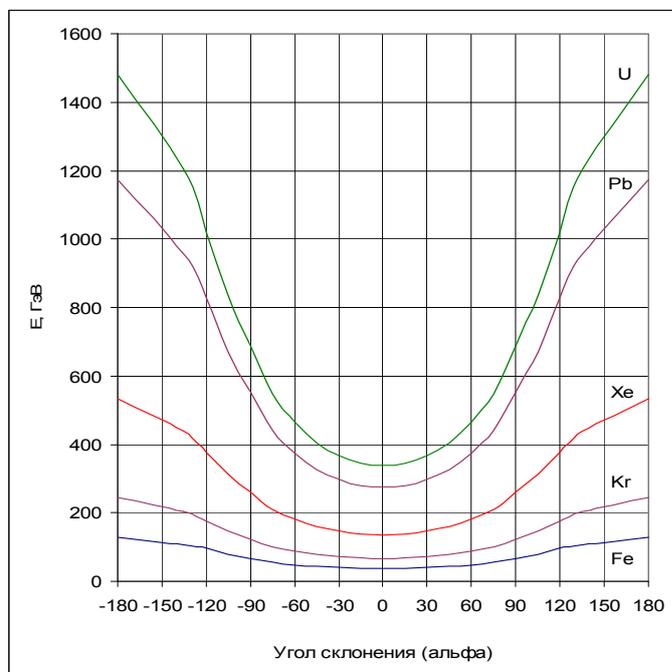


Рис.3. Энергия ядер различных элементов при разных углах наклона треков  $\alpha = \Theta$  относительно направления к ближайшей точке на поверхности метеороида Марьялахти при  $\gamma \sim 0$ .

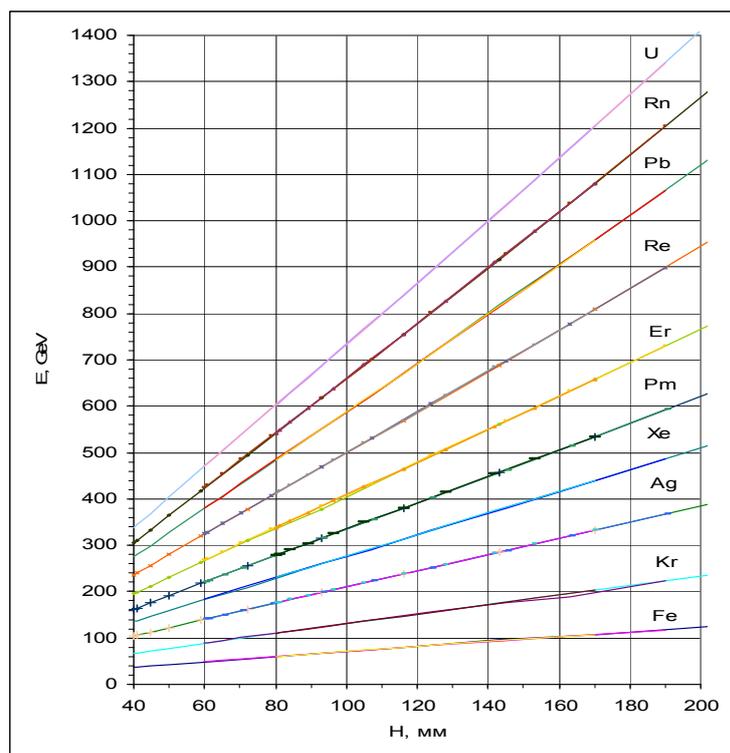


Рис.4. Энергия ядер различных элементов в составе ГКЛ, образующих треки в кристаллах оливина на глубине  $H$  в теле метеороида Марьялахти.

Табл. 2. Энергия ядер железа и урана в составе ГКЛ, треки от которых образованы в кристаллах оливина, находящихся на глубине  $H_{\theta=0} = 40$  мм от до атмосферной поверхности метеороида Марьялахти

Ядро	Угол наклона $\theta$ (*)		E, ГэВ	
	$\Delta\theta^\circ$	$\theta^\circ \pm \delta\theta^\circ$	$H_{\theta=0} = 40$ мм	
			$\sim \Delta E$	$E \pm \delta E$
Fe	0-30	$15 \pm 15$	37-40	$38 \pm {}^{2.4}_{0.6}$
	30-60	$45 \pm 15$	40-48	$43 \pm {}^{5.3}_{3.0}$
	60-90	$75 \pm 15$	48-67	$56 \pm {}^{11.5}_{7.4}$
	90-120	$105 \pm 15$	67-96	$80 \pm {}^{15.7}_{12.8}$
	120-150	$135 \pm 15$	96 - ~	108
	150-180	$165 \pm 15$	~ - 128	~
U	0-30	$15 \pm 15$	338-368	$345 \pm {}^{23}_7$
	30-60	$45 \pm 15$	368-464	$405 \pm {}^{59}_{37}$
	60-90	$75 \pm 15$	464-687	$550 \pm {}^{137}_{86}$
	90-120	$105 \pm 15$	687-1020	$839 \pm {}^{181}_{152}$
	120-150	$135 \pm 15$	1020 - ~	1203 - ~
	150-180	$165 \pm 15$	~ - 1480	~

(\*) Угол наклона трека  $\theta^\circ = \alpha$  (угол  $\gamma \sim 0$ ) относительно прямой, соединяющей точку расположения кристалла и ближайшей точки на поверхности до атмосферного тела метеороида Марьялахти, на расстоянии  $H_{\theta=0} = 40$  мм .

## КАШКАРОВ И ДР.: МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЯДЕР

Теоретически рассчитанные по программе SRIM-2006 [Ziegler, 2006] значения энергии ядер ГКЛ, треки от которых образованы в кристаллах оливина, находящихся на глубине  $H_{\theta=0} = 40$  мм от доатмосферной поверхности метеороида Марьялахти, направлены под углом  $\alpha = \theta$  в интервале  $(0 - 180)^\circ$  при нормально ориентированной плоскости поверхности травления кристалла ( $\gamma$  около 0) приведены в Таблице 2 и на графиках рисунка 3.

Зависимость длины пробега ядер разных элементов от их энергии определялась для среднего вещества палласита Марьялахти, минералогический и химический состав которого: ~65 об.% оливина  $(Mg_{0.88}Fe_{0.12})_2SiO_4$  и ~33 об.% железо-никелевого сплава  $Fe_{0.70}Ni_{0.30}$ .

На рисунке 4 приведены рассчитанные для ядер разных элементов величины энергии, необходимой для проникновения ядер на глубину (H) нахождения кристаллов оливина в теле метеороида Марьялахти

### Результаты расчетов для случаев наклонного положения плоскости поверхности травления кристаллов ( $\gamma \sim 45$ и $90$ град.)

Наклонное положение плоскости случайного среза кристалла, когда угол  $\gamma \gg 0$ , приводит к большему разбросу величин длины пробега ядер и, соответственно, к большему интервалу значений их энергии, определяемой с помощью измерения углов  $\alpha$  и  $\beta$ . В Таблице 3 и на рисунках 5 и 6 представлены результаты расчетов энергии ядер разных элементов, треки от которых регистрировались в кристаллах под разными углами наклона  $\alpha$ , когда плоскость поверхности травления треков ориентирована под углами  $\gamma \sim 45$  и  $90$  град.

Из приведенных результатов теоретических расчетов следует, что полный интервал энергии, который может быть измерен с помощью трекового анализа кристаллов оливина, входящих в состав палласита Марьялахти, составляет, например, для ядер железа и урана  $\sim (0.7 - 2.2)$  ГэВ/нуклон и  $\sim (1.6 - 6.1)$  ГэВ/нуклон, соответственно.

**Табл. 3. Энергия ядер некоторых элементов ГКЛ, определяемая по углу наклона  $\alpha$  при  $\gamma = 45$  и  $90$  град. Глубина  $H = 40$  мм**

Углы, град		Энергия ядер, ГэВ/нукл				
$\gamma$	$\alpha$	Fe <sub>26</sub>	Sn <sub>50</sub>	Er <sub>68</sub>	Pb <sub>82</sub>	U <sub>92</sub>
45	10±10	0.73 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.04</sub>	1.09 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.07</sub>	1.32 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.09</sub>	1.48 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.10</sub>	1.61 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.12</sub>
	30±10	0.67 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.02</sub>	0.99 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.03</sub>	1.20 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.03</sub>	1.35 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.06</sub>	1.47 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.07</sub>
	50±10	0.66 <sup>+0.01</sup> <sub>-0.01</sub>	0.96 <sup>+0.01</sup> <sub>-0.01</sub>	1.17 <sup>+0.01</sup> <sub>-0.02</sub>	1.29 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.01</sub>	1.40 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.02</sub>
	75±15	0.70 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.03</sub>	1.04 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.06</sub>	1.25 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.06</sub>	1.40 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.06</sub>	1.51 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.07</sub>
	105±15	0.84 <sup>+0.14</sup> <sub>-0.10</sub>	1.27 <sup>+0.22</sup> <sub>-0.17</sub>	1.55 <sup>+0.27</sup> <sub>-0.23</sub>	1.75 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.04</sub>	1.90 <sup>+0.35</sup> <sub>-0.27</sub>
	130±10	1.10 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.13</sub>	1.69 <sup>+0.24</sup> <sub>-0.22</sub>	2.08 <sup>+0.32</sup> <sub>-0.28</sub>	2.38 <sup>+0.39</sup> <sub>-0.33</sub>	2.58 <sup>+0.42</sup> <sub>-0.56</sub>
	150±10	1.39 <sup>+0.31</sup> <sub>-0.16</sub>	2.19 <sup>+0.34</sup> <sub>-0.26</sub>	2.68 <sup>+0.48</sup> <sub>-0.28</sub>	3.15 <sup>+0.51</sup> <sub>-0.38</sub>	3.47 <sup>+0.53</sup> <sub>-0.47</sub>
170±10	1.74 <sup>+0.16</sup> <sub>-0.17</sub>	2.79 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.49</sub>	3.52 <sup>+0.35</sup> <sub>-0.36</sub>	4.09 <sup>+0.45</sup> <sub>-0.43</sub>	4.48 <sup>+0.52</sup> <sub>-0.48</sub>	
90	10±10	0.67 <sup>+0</sup> <sub>-0.1</sub>	0.98 <sup>+0.01</sup> <sub>-0.01</sub>	1.19 <sup>+0.01</sup> <sub>-0.01</sub>	1.34 <sup>+0.01</sup> <sub>-0.02</sub>	1.44 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.01</sub>
	30±10	0.70 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.03</sub>	1.04 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.05</sub>	1.25 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.05</sub>	1.40 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.04</sub>	1.51 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.04</sub>
	50±10	0.79 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.06</sub>	1.17 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.09</sub>	1.42 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.11</sub>	1.60 <sup>+0.18</sup> <sub>-0.13</sub>	1.74 <sup>+0.18</sup> <sub>-0.15</sub>
	70±10	0.94 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.08</sub>	1.42 <sup>+0.20</sup> <sub>-0.13</sub>	1.74 <sup>+0.26</sup> <sub>-0.17</sub>	1.98 <sup>+0.30</sup> <sub>-0.20</sub>	2.15 <sup>+0.31</sup> <sub>-0.23</sub>
	90±10	1.18 <sup>+0.14</sup> <sub>-0.12</sub>	1.83 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.21</sub>	2.27 <sup>+0.63</sup> <sub>-0.27</sub>	2.62 <sup>+0.36</sup> <sub>-0.34</sub>	2.82 <sup>+0.44</sup> <sub>-0.36</sub>
	110±10	1.49 <sup>+0.18</sup> <sub>-0.17</sub>	2.36 <sup>+0.30</sup> <sub>-0.28</sub>	2.95 <sup>+0.40</sup> <sub>-0.36</sub>	3.40 <sup>+0.48</sup> <sub>-0.42</sub>	3.72 <sup>+0.54</sup> <sub>-0.46</sub>
	135±15	1,91 <sup>+0.20</sup> <sub>-0.17</sub>	3,07 <sup>+0.39</sup> <sub>-0.25</sub>	3.90 <sup>+0.50</sup> <sub>-0.33</sub>	4,53 <sup>+0.60</sup> <sub>-0.38</sub>	5,02 <sup>+0.62</sup> <sub>-0.48</sub>
	150±15	2,11 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.20</sub>	3,45 <sup>+0.24</sup> <sub>-0.38</sub>	4.40 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.50</sub>	5,13 <sup>+0.40</sup> <sub>-0.60</sub>	5,64 <sup>+0.41</sup> <sub>-0.62</sub>
	165±15	2,24 <sup>+0.14</sup> <sub>-0.13</sub>	3,69 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.24</sub>	4.65 <sup>+0.41</sup> <sub>-0.25</sub>	5,53 <sup>+0.37</sup> <sub>-0.40</sub>	6,05 <sup>+0.46</sup> <sub>-0.41</sub>

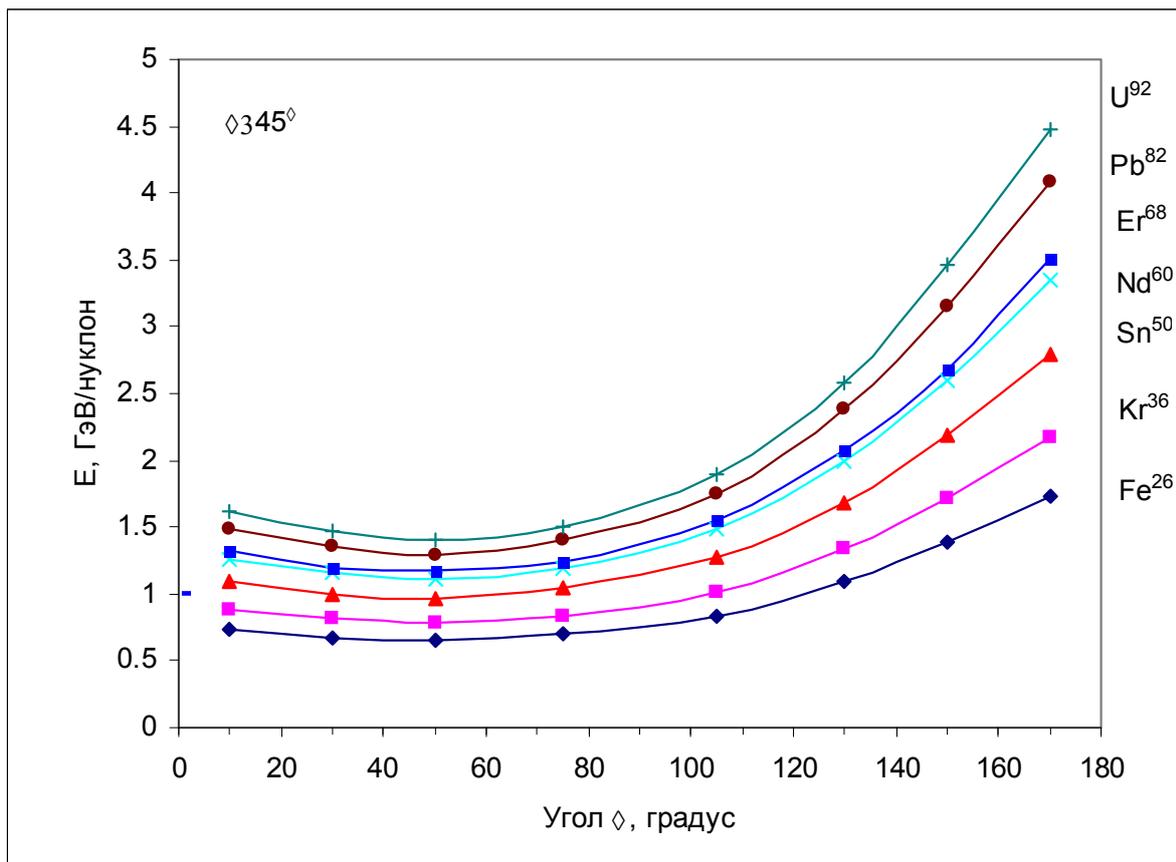


Рис. 5. Энергия ядер ГКЛ в зависимости от угла наклона  $\alpha$  при угле склонения плоскости поверхности травления кристалла  $\gamma = 45$  град.

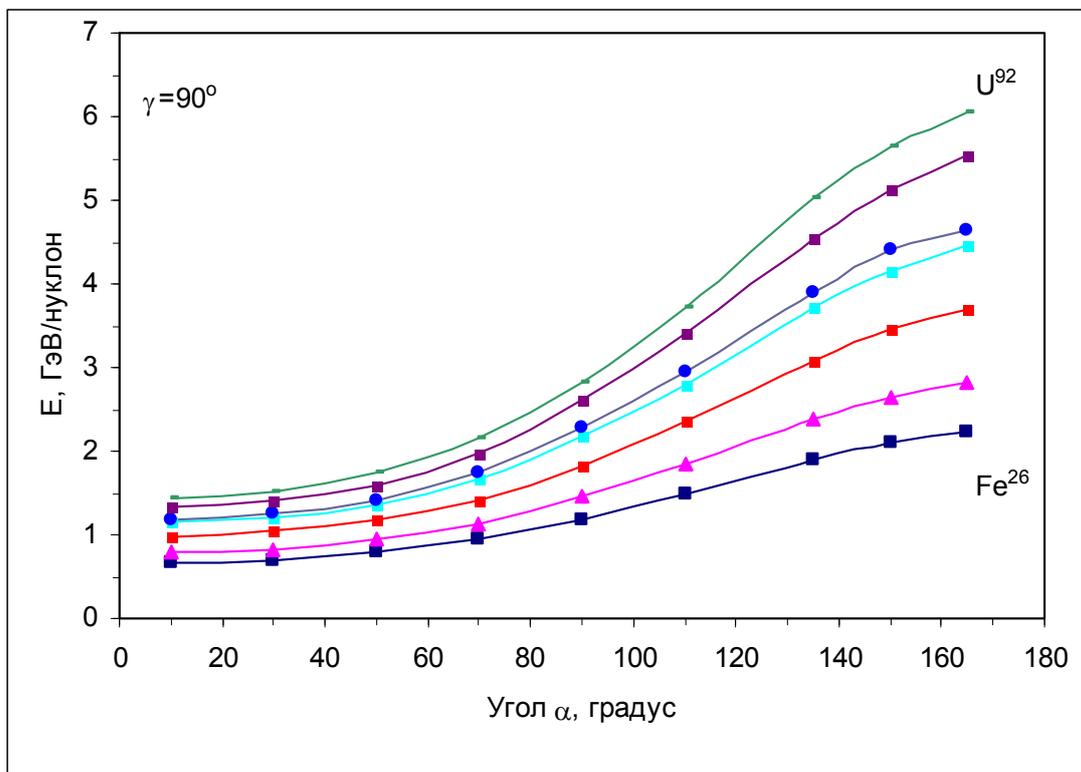


Рис. 6. Энергия ядер ГКЛ в зависимости от угла наклона  $\alpha$  при угле склонения плоскости поверхности травления кристалла  $\gamma = 90$  град. Графически рассчитанные величины погрешности измерения энергии для интервала углов  $\delta\alpha = (10-15)$  град., указывают, что точность определения энергии ядер может быть доведена до нескольких процентов при регистрации углов с точностью до нескольких градусов. Это достигается с помощью высоко точного измерения координат треков на полностью автоматизированном измерительном комплексе ПАВИКОМ [Feinberg et al., 2004], а также использования результатов калибровочных экспериментов [Александров и др., 2008].

#### Измерение углового распределения треков VVH-ядер ГКЛ в отдельных кристаллах оливина из палласита Марьялахти.

Результаты измерения углового распределения треков VVH-ядер ГКЛ в 22-х отдельных кристаллах оливина миллиметровых размеров из палласита Марьялахти приведены в таблице 4. Гистограммы угловых распределений треков для некоторых кристаллов приведены на рисунке 7.

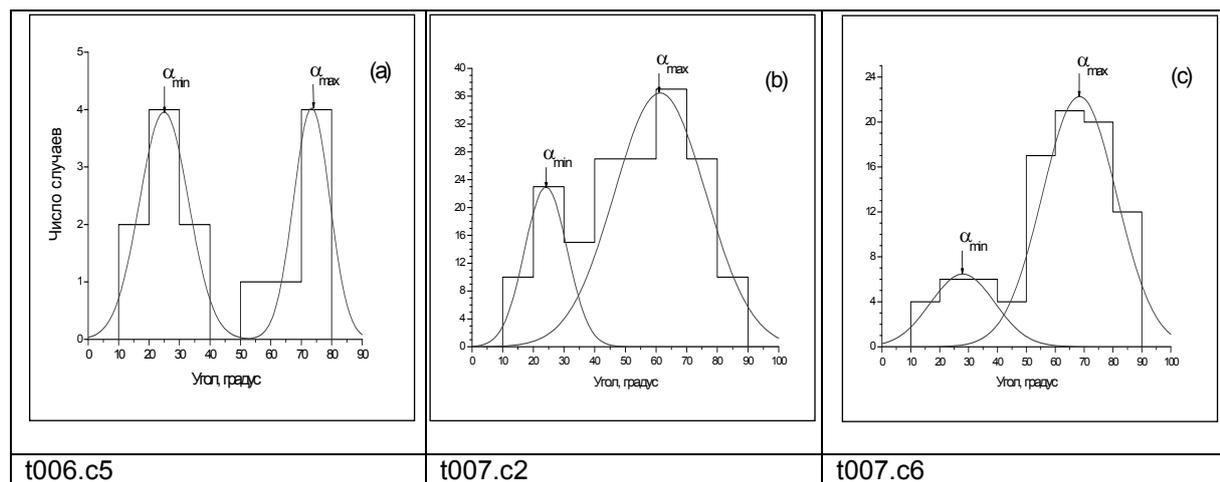
Табл. 4. Угловое распределение треков VVH-ядер ГКЛ в кристаллах оливина из палласита Марьялахти

Таблетка	Кристалл	Число треков	$\alpha_{AV},^{(*)}$ градус	$\sigma_{AV},^{(**)}$ градус
t005	c1	77	55.69	2.46
	c2	69	54.85	2.10
	c3	63	63.52	2.88
	c4	88	62.94	1.82
t006	c1	22	54.10	3.82
	c2	22	50.73	2.88
	c3	88	49.52	1.64
	c4	32	69.83	2.26
	c5 <sup>(***)</sup>	13	24.94; 73.43	2.85; 2.24
	c6	64	59.83	1.94
	c7	39	62.38	3.33
	c8	11	57.89	5.42
	c9	12	61.59	5.54
t007	c1	73	55.13	2.19
	c2 <sup>(***)</sup>	176	24.11; 61.33	1.10; 1.33
	c3	38	74.10	2.54
	c4	22	42.58	4.10
	c5	33	54.86	4.71
	c6 <sup>(***)</sup>	90	27.97; 68.39	2.62; 1.52
	c7	66	63.21	2.18
	c8	138	47.68	1.38
	c9	12	59.58	6.02

(\*) Угол  $\alpha$  между направлением трека и нормалью к поверхности травления данного кристалла;  $\alpha_{AV}$  – средняя квадратичная величина угла  $\alpha$  для Гауссова распределения треков данного кристалла;

(\*\*)  $\sigma_{AV}$  – средне-квадратичная ошибка для  $\alpha_{AV}$ ;

(\*\*\*) Указаны  $\alpha_{AV,min}$  и  $\sigma_{AV,min}$ ,  $\alpha_{AV,max}$  и  $\sigma_{AV,max}$  для случая двугорбого распределения



**Рис. 7. Примеры трех характерных случаев углового распределения треков ядер VVH-группы ГКЛ, наблюдаемых в отдельных кристаллах оливина палласита Марьялахти.**

### Заключение

Разрабатываемая новая методика и первые экспериментальные результаты по определению энергии отдельных ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ, основанные на измерении углового распределения треков, образуемых этими ядрами в кристаллах оливина миллиметровых размеров из палласита Марьялахти, показали:

(а) Детальные измерения углов наклона длиннопробежных (регистрируемая длина основной части трека для ядер с  $Z > 50$  превышает 200 мкм) треков позволяет определять энергию ядер ГКЛ, которую они имели в момент внедрения в тело метеороида;

(б) Точность определения энергетического спектра сверхтяжелых ядер ГКЛ зависит от точности, с которой для данного кристалла оливина определены три основных параметра:

- 1) глубина нахождения данного кристалла от до атмосферной поверхности метеороида;
- 2) ориентация плоскости поверхности травления данного кристалла относительно направления к ближайшему участку на поверхности метеороида;
- 3) пространственная ориентация треков относительно нормали к поверхности травления данного кристалла (угол наклона) и относительно направления к ближайшему участку на поверхности метеороида (азимутальный угол).

Количественная оценка энергии зарегистрированных в 22-х изученных кристаллах оливина из палласита Марьялахти ядер сверхтяжелых элементов ГКЛ находится в интервале ~ (1.5 – 5) ГэВ/нуклон.

*Исследования проводятся при поддержке РФФИ, грант № 10-02-00375-а*

### Литература

- Александров А. Б., А. В. Багуля, М. С. Владимиров, Л. А. Гончарова, А. И. Ивлиев, Г. В. Калинина, Л. Л. Кашкаров, Н. С. Коновалова, Н. М. Окатьева, Н. Г. Полухина, А. С. Русецкий, Н. И. Старков, В. А. Царев (2008), Методика определения заряда ядер космических лучей по трекам в кристаллах оливина из метеоритов, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, No. 7, 19-27.
- Feinberg E. L., K. A. Kotelnikov, N. G. Polukhina (2004), Completely Automated Measuring Complex (PAVICOM) for Track-Detector Data Processing. *Physics of Particles and Nuclei*, 35, No. 3, 409-423.
- Ginzburg V. L., N. G. Polukhina, E. L. Feinberg, N. I. Starkov, V. A. Tsarev (2005), Problems and Horizons of the Search for Tracks of Heavy and Superheavy Nuclei in Olivine Crystals from Meteorites (OLIMPIYA project), *Doklady Physics*, 50, No. 6, 283-285.

## КАШКАРОВ И ДР.: МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЯДЕР

Kashkarov L. L., N. G. Polukhina, N. I. Starkov, G. V. Kalinina, A. I. Ivliev, A. B. Alexandrov, L. A. Goncharova, I. Yu. Apacheva (2006), New method of the superheavy cosmic ray nuclei track parameters determination in the pallasite olivines. *Electronic Scientific information Journal "Herald of the Department of Earth Sciences RAS"*. N1(24) 2006 ISSN 1819-6586. URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dggms/1-2006/informbul-1\\_2006/planet-6e.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dggms/1-2006/informbul-1_2006/planet-6e.pdf).  
Ziegler J.F. (2006), The Stopping and Range of Ions in Matter, SRIM-2006.

Л. Л. КАШКАРОВ Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, Москва, Россия, e-mail: [leokash@mail.ru](mailto:leokash@mail.ru).  
Н. Г. ПОЛУХИНА Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия  
e-mail: [poluhina@sci.lebedev.ru](mailto:poluhina@sci.lebedev.ru)