

## ЭЛЕМЕНТНЫЙ И ТЕКСТУРНЫЙ АНАЛИЗ ФРАГМЕНТА ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА С ПОМОЩЬЮ НЕРАЗРУШАЮЩИХ НЕЙТРОННЫХ МЕТОДОВ

*С. Б. Борзаков<sup>а,б</sup>, А. Ж. Жомартова<sup>а,в,е</sup>, Т. И. Иванкина<sup>а</sup>,  
А. Ю. Дмитриев<sup>а,1</sup>, В. В. Лобачёв<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

<sup>в</sup> Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилёва, Нур-Султан

<sup>е</sup> Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

При исследовании фрагмента Челябинского метеорита были использованы различные неразрушающие нейтронные методы, такие как активационный анализ на мгновенных гамма-квантах и нейтронографический текстурный анализ. Эти методы реализованы с помощью специальных спектрометров, функционирующих на нейтронных пучках импульсного реактора ИБР-2 (Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований (Дубна)). С помощью активационного анализа на мгновенных гамма-квантах были определены массовые доли 15 элементов: Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Co и Ni. Поверхность фрагмента была исследована с помощью рентгенофлуоресцентного метода. Полученные данные согласуются с ранее опубликованными, а также с результатами текстурного анализа. Впервые проведенный детальный количественный текстурный анализ фрагмента Челябинского метеорита позволил определить преимущественную ориентировку его основных минеральных фаз. Высказано предположение о происхождении текстуры в результате термобарического удара метеорита при вхождении в земную атмосферу.

In the study of the Chelyabinsk meteorite fragment, various non-destructive neutron methods, such as prompt gamma-ray activation analysis and neutron diffraction texture analysis, were used. These methods are realized by the special spectrometers which are operating at the neutron beams of the IBR-2 pulsed reactor (Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna). Applying prompt gamma-ray activation analysis, mass fractions of 15 elements: Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, and Ni, were determined. The fragment surface was analyzed by the X-ray fluorescence. The data obtained are in agreement with previously published ones, as well as with the results of texture analysis. For the first time the detailed quantitative texture analysis of the Chelyabinsk meteorite fragment was performed. The method provides an opportunity to obtain preferred orientations of main minerals of the meteorite fragment. A suggestion was made regarding the origin of texture as a result of thermobaric impact of the meteorite when it enters the Earth's atmosphere.

PACS: 82.80.–d; 82.80.Ej; 29.30.–h; 96.30.Ys; 61.12.Ld; 83.80.Nb; 96.30.ZA

---

<sup>1</sup>E-mail: andmitriev@jinr.ru

## ВВЕДЕНИЕ

15 февраля 2013 г. недалеко от российского города Челябинск в атмосферу вошел астероид со скоростью примерно 19 км/с, массой около 13 тыс. т, диаметр которого оценивается примерно в 20 м [1]. Вследствие торможения в земной атмосфере на высоте около 30 км произошло несколько взрывов, и тело астероида распалось на тысячи мелких осколков. По расчетам, местными жителями могли быть собраны от 100 до более 500 кг метеоритных осколков. В экспедиции Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского (ГЕОХИ РАН) было собрано 3,66 кг фрагментов. Размеры собранных осколков находятся в диапазоне 5 мм–10 см, хотя основная масса имеет размеры, близкие к 1–4 см [2]. Исследование метеоритов вызывает значительный интерес, поскольку их изучение на междисциплинарной основе имеет ключевое значение для ответа на фундаментальные вопросы о происхождении и эволюции Солнечной системы [3]. Фрагменты метеорита были тщательно исследованы различными научными методами [4–8].

Для анализа в Лабораторию нейтронной физики им. И. М. Франка (ЛНФ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) из Челябинска был предоставлен фрагмент метеорита массой 133,13 г (рис. 1). Цель этой работы — определение элементного состава и текстурных особенностей уникального образца подходящими неразрушающими нейтронными методами и сравнение расчетных данных с результатами других исследователей.

### 1. ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Полученный авторами фрагмент метеорита (рис. 1) представляет собой оплавленный образец удлиненно-округлой формы. Он покрыт черной корой плавления толщиной до 1 мм. Кора плавления на поверхности обломка полуматовая (из-за многочисленных мельчайших пор диаметром в доли миллиметра). Во фрагменте присутствует скол без коры плавления площадью примерно 4 см<sup>2</sup>. На сколе наблюдаются следы сдува расплава в виде валика и капель.

Исследования содержания элементов в Челябинском метеорите проводились двумя комплементарными методами: с помощью активационного анализа на мгновенных гамма-квантах (ААМГК) и рентгенофлуоресцентного анализа (РФА).



Рис. 1. Внешняя и внутренняя стороны фрагмента метеорита

**1.1. Метод ААМГК.** Впервые в России для определения элементного состава метеорита использовался ААМГК. ААМГК — это уникальный неразрушающий аналитический метод, обеспечивающий определение основных и некоторых микроэлементов. В течение десятилетий он успешно используется для анализа содержания легких элементов, прекрасно подходит для определения водорода и бора и применяется в тех областях, где важен неразрушающий анализ и быстрые (по сравнению с традиционным нейтронным активационным анализом (НАА)) аналитические результаты [9, 10]. К сожалению, метод не нашел широкого распространения в отличие от инструментального НАА из-за меньшей чувствительности и производительности, необходимости использовать более дорогостоящие радиационно стойкие детекторы для регистрации более сложных спектров гамма-излучения.

Метод ААМГК основан на регистрации мгновенных (первичных) гамма-квантов, которые испускаются в результате радиационного захвата тепловых нейтронов. Исследуемый образец помещается в нейтронный пучок, и с помощью радиационно стойкого гамма-спектрометра с высоким разрешением непосредственно во время облучения определяется энергия испускаемых гамма-квантов, что дает возможность найти элементный состав образца. Определяя число зарегистрированных гамма-квантов с определенной энергией, можно количественно рассчитать содержание элементов в образце. В настоящее время авторы готовят публикацию с подробным описанием методики ААМГК, применяемой в ЛНФ ОИЯИ.

Поскольку нейтроны электрически нейтральны, они легко проникают вглубь образца и взаимодействуют с ядром или с отдельными нуклонами за счет ядерных сил, быстро спадающих с увеличением расстояния. Это позволяет получить усредненный элементный состав образца по объему в несколько кубических сантиметров. Возможность исследования целого объекта или фрагментов без разрушения [11] — одно из основных преимуществ ААМГК. С этой точки зрения ААМГК значительно отличается от РФА: неразрушающий РФА может предоставить аналитическую информацию только из тонкого поверхностного слоя образца. Методом ААМГК могут быть определены элементы, обладающие большими сечениями радиационного захвата, содержание которых в образце составляет мг/кг и более.

Источником нейтронов служил импульсный реактор ИБР-2 [12]. Измерения спектров методом ААМГК были проведены на канале 116, оборудованном зеркальным изогнутым нейтронотодом длиной 15 м. Зеркальный нейтронотод необходим для того, чтобы подавить нейтроны с высокой энергией: в данном нейтронотоде быстрые и резонансные нейтроны практически полностью рассеиваются и к образцу транспортируется только пучок тепловых нейтронов.

Спектры гамма-квантов измерялись радиационно стойким детектором из сверхчистого германия (HPGe) фирмы Canberra с разрешением 2,3 кэВ для гамма-линии  $^{60}\text{Co}$  (1332,5 кэВ) и высокой относительной эффективностью 70%. Детектор располагался на расстоянии 14,5 см от оси нейтронного пучка. Он был окружен свинцовой защитой, покрытой фольгированным кадмием, от гамма-квантов, которые рождаются в результате захвата рассеянных нейтронов. Чтобы рассеянные образцом нейтроны не попадали в детектор, перед ним был поставлен брусок из LiF. Регистрация и обработка гамма-спектров проводилась с помощью программы Genie-2000. Спектр мгновенных гамма-квантов измеряли около суток (более 21 ч). Затем с помощью про-

граммного обеспечения, созданного в Mathcad, вычисляли массовые доли каждого найденного элемента в исследуемом образце.

Специальной подготовки образца к эксперименту не требовалось, в отличие от многих других методов. Исследуемый фрагмент метеорита был помещен в пучок тепловых нейтронов, сколмированный на площадь  $2 \times 5 \text{ см}^2$ .

Плотность потока тепловых нейтронов определили методом ААМГК с помощью монитора потока — образца меди. Медная пластина массой 5,6 г облучалась в пучке тепловых нейтронов в течение 2 ч 20 мин. Во время облучения и измерения спектра монитор был расположен в том же месте, что и исследуемые образцы. Расчетное значение плотности потока тепловых нейтронов составило около  $\Phi_{\text{th}} = 10^5 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Средняя мощность реактора ИБР-2 во время измерения — 1,6 МВт.

**1.2. Рентгенофлуоресцентный анализ.** РФА является одним из широко доступных и популярных методов, используемых для определения элементного состава. В случае метеорита Челябинск РФА проводился с использованием современного портативного прибора Bruker Tracer 5<sup>1</sup>. Были измерены спектры обеих сторон (стороны 1 и 2) фрагмента метеорита с использованием встроенного полуколичественного метода. Время измерения составило 90 с для каждой стороны. Отметим, что РФА является поверхностным методом, поэтому полученные данные могут не совсем корректно отражать объемный элементный состав.

**1.3. Нейтронографический текстурный анализ.** В отличие от методов ААМГК и РФА, определяющих элементный состав образцов, метод нейтронной дифракции позволяет получить представление о химическом составе и структурных особенностях различных типов метеоритов, содержащих вещество, образованное на самых ранних этапах эволюции Солнечной системы.

В ЛНФ им. И. М. Франка накоплен большой опыт измерения кристаллографических текстур металлов, сплавов, горных пород, а также метеоритов. Под кристаллографической текстурой здесь понимают наличие преимущественно ориентированных (упорядоченных) кристаллических решеток зерен (монокристаллов), образующих поликристаллический материал.

Для текстурных измерений в ЛНФ используется метод времяпролетной дифракции нейтронов от импульсного источника ИБР-2. Теоретические основы этого метода изложены в [13].

Систематические текстурные измерения образцов проводятся с 1999 г. [14, 15] с помощью дифрактометра СКАТ (спектрометр для количественного анализа текстур). Благодаря высокой проникающей способности нейтронов в вещество нейтронографический метод позволяет исследовать текстуру больших крупнозернистых образцов (например,  $50 \times 50 \times 50 \text{ мм}$ ) по всему объему. Этот факт имеет решающее значение (в отличие, например, от рентгеновского метода) в экспериментах с образцами, у которых размер отдельных кристаллитов может достигать нескольких миллиметров.

Количественную информацию о текстуре можно получить на основе экспериментально измеренных полюсных фигур. Полюсной фигурой называют графическое изображение на стереографической проекции функции распределения  $P_{\text{hkl}}$  нормалей (полюсов) к определенной кристаллографической плоскости (hkl).

Экспериментальные полюсные фигуры строятся по дифракционным спектрам, полученным методом времяпролетной дифракции на поликристаллических образцах.

При измерении полюсных фигур с помощью дифракции нейтронов чаще всего используют образцы в виде шара или куба, хотя в общем случае форма образца может быть произвольной. Для текстурного эксперимента специальной подготовки поверхности образца также не требуется. В текстурированном образце практически при любом положении его относительно падающего нейтронного пучка имеются группы кристаллитов, расположенных так, что выполняется условие Брэгга. Для определения зависимости интенсивности данного рефлекса ( $hkl$ ) от ориентации образец вращают с постоянным угловым шагом (например,  $5^\circ$  в СКАТе) относительно падающего пучка. При вращении образца осуществляется регистрация дифракционных спектров. Построение одной полюсной фигуры при использовании спектрометра СКАТ требует измерения 1368 дифракционных спектров, принадлежащих различным точкам стереографической проекции. Подробно методика построения полюсных фигур по нейтронным дифракционным спектрам, зарегистрированным на спектрометре СКАТ, описана в работе [16].

Важная особенность времяпролетного метода состоит в том, что на спектре одновременно фиксируются рефлексы, соответствующие разным полюсным фигурам. Это позволяет извлекать из одних и тех же дифракционных спектров полюсные фигуры для разных кристаллографических плоскостей ( $hkl$ ) и разных минералов. Нейтронография высокого разрешения и использование дифрактометра СКАТ дают оценку преимущественной ориентировки поликристаллической структуры метеоритов.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**2.1. Измерения с помощью ААМГК и РФА.** С помощью методов ААМГК и РФА были определены массовые доли 15 элементов фрагмента метеорита: все макроэлементы (Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe) и некоторые микроэлементы (Cr, S, Sc, Co, Ni, Cl). Основными компонентами метеорита являются Si, Fe и Mg. Содержание железа в образце составляет около 17%, что характерно для LL-хондритов. Из результатов РФА можно заметить отличие содержания элементов на внутренних и внешних сторонах. Это объясняется неравномерностью распространения в осколке метеорита основного сульфида — троилита. С помощью РФА фиксируется, что на внешней стороне 1 метеорита содержание нескольких элементов, таких как калий, титан, хром, марганец, железо, никель, больше, чем на внутренней стороне 2, а содержание серы (на коре плавления) меньше.

Из таблицы видно, что полученные данные ААМГК согласуются с результатами РФА. Для некоторых элементов содержания отличаются, так как РФА представляет собой поверхностный анализ, но во многих случаях различие не превышает  $2-3\sigma$ .

**2.2. Результаты нейтронографического анализа Челябинского метеорита.** На рис. 2 представлен суммированный дифракционный спектр образца фрагмента метеорита. Поскольку этот образец состоит из низкосимметричных минералов (оливин, энстатин, плагиоклаз), на спектре наблюдается большое количество брэгговских рефлексов от различных кристаллографических плоскостей, причем некоторые из них перекрываются. Следует заметить, что фрагмент метеорита имел неправильную форму, однако это не повлияло на статистику нейтронно-дифракционного эксперимента.

Время экспозиции для одного положения образца составило 60 мин. Вращение образца относительно оси гониометра происходило через  $10^\circ$ . В итоге измерение метеоро-

Массовые доли найденных элементов, мг/кг

Элемент	ААМГК	РФА, сторона 1	РФА, сторона 2
Na	5940 ± 360	—	—
Mg	91800 ± 11000	85600 ± 12000	60900 ± 9100
Al	10600 ± 1300	10200 ± 1500	9760 ± 1400
Si	127000 ± 7400	113000 ± 2100	101000 ± 1900
S	12300 ± 1500	1130 ± 160	8960 ± 280
Cl	50 ± 5	—	—
K	458 ± 82	2130 ± 130	578 ± 87
Ca	12000 ± 700	13800 ± 210	10700 ± 170
Sc	1710 ± 170	—	—
Ti	415 ± 21	702 ± 130	339 ± 92
Cr	2120 ± 320	2770 ± 150	1980 ± 120
Mn	2190 ± 100	2390 ± 110	1460 ± 80
Fe	172000 ± 9500	169000 ± 610	96700 ± 450
Co	269 ± 21	242 ± 100	164 ± 77
Ni	8690 ± 670	8630 ± 160	2600 ± 99

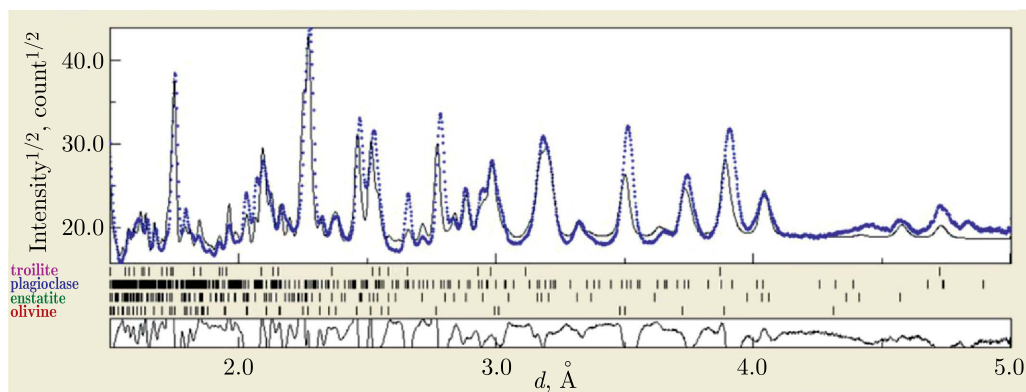


Рис. 2. Участок суммированного дифракционного спектра образца фрагмента Челябинского метеорита. Показаны экспериментальные точки, рассчитанные по методу Ритвельда [17], и разностная кривая. Штрихами указаны положения дифракционных пиков четырех минеральных фаз

рита потребовало 36 ч, было измерено 684 дифракционных спектра. Метод Ритвельда, который был использован при обработке дифракционных спектров, дает информацию о минеральном составе и преимущественной ориентировке каждой минеральной фазы в образце. В настоящее время имеется большое количество компьютерных программ, которые позволяют детально анализировать дифракционные данные в применении к кристаллографическим текстурам. Самым богатым по своим возможностям и часто используемым пакетом программ является MAUD [18].

С помощью MAUD был уточнен минеральный состав фрагмента метеорита: оливин — 52,1 %, энстатит — 24,4 %, плагиоклаз (An28) — 17,8 % и троилит — 6,7 %.

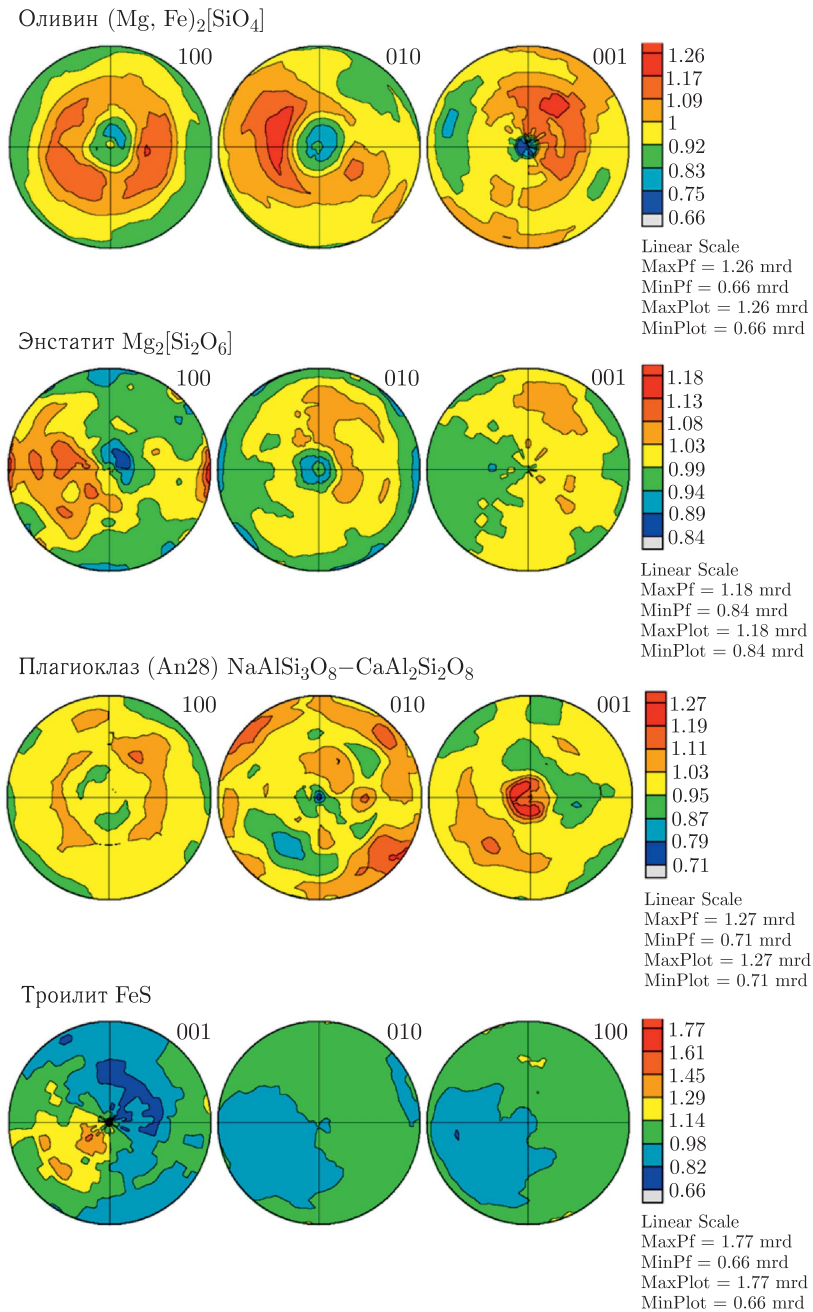


Рис. 3. Построенные по нейтронно-дифракционным данным полюсные фигуры базовых кристаллографических плоскостей оливина, энстатита, плагиоклаза и троилита. Представлены стереографические проекции. Справа — шкала интенсивности значений полюсной плотности, выраженных в  $\text{m. r. d.}$  (величинах, кратных хаотическому распределению)

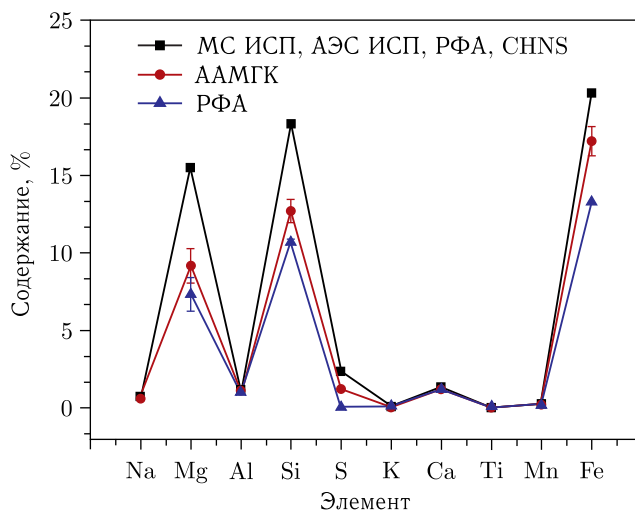


Рис. 4. Сравнение результатов ААМГК с данными других методов

Очевидно, что макроэлементы, полученные методом ААМГК (см. таблицу), являются основными составляющими в формулах минералов оливина, энстатита, плагиоклаза и троилита.

Текстуры минеральных фаз в фрагменте Челябинского метеорита (рис. 3) ярко выражены и обладают волокнистой ориентировкой. Характер преимущественной ориентировки позволяет утверждать, что текстурообразование произошло в момент падения метеорита в условиях повышенного давления и сильного разогрева космического тела вследствие высокотемпературной пластической деформации. Причем при падении происходило вращение метеорита, о чем свидетельствуют его обтекаемая форма и волокнистый тип текстуры.

Полученные данные ААМГК сравнили с более ранними результатами исследования Челябинского метеорита [2] (рис. 4). Отметим, что авторами названной выше работы представлены средние значения из результатов, полученных разными методами (масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС ИСП), атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП), РФА, а также сжигания пробы при наличии окислителя в токе инертного газа (CHNS)). Несмотря на тот факт, что ранее полученные данные являются средними значениями по нескольким фрагментам метеорита, содержание основных элементов метеорита схоже с полученными нами данными. Поскольку образцы были собраны на разных участках, данное наблюдение подтверждает химическую однородность вещества метеорита [19].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью неразрушающего нейтронного метода ААМГК изучен элементный состав уникального объекта — фрагмента Челябинского метеорита. В качестве дополнительного метода для определения набора элементов использовался РФА. Содержание



найденных элементов согласуется с данными иных методов, полученными при анализе метеорита другими исследователями. Методом нейтронной дифракции впервые была измерена кристаллографическая текстура основных минеральных фаз фрагмента метеорита. Анализ текстурных особенностей позволяет с уверенностью говорить о том, что развитие преимущественных ориентировок минералов не могло возникнуть при движении астероида в Солнечной системе, а произошло после взрыва в атмосфере Земли и последующего сильного разогрева при падении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Popova O.P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.Z., Gural P.S., Albers J., Granvik M., Evers L.G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y.S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A.V., Larionov M.Y., Glazachev D., Mayer A.E., Gisler G., Gladkovsky S.V., Wimpenny J., Sanborn M.E., Yamakawa A., Verosub K.L., Rowland D.J., Roeske S., Botto N.W., Friedrich J.M., Zoensky M.E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J.I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I.A., Vokhmintsev A.S., Ishchenko A.V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M.K., Komatsu M., Mikouchi T.* Chelyabinsk Airburst Consortium, Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science*. 2013. V.80(342). P.1069–1073; <https://doi.org/10.1126/science.12426>.
2. *Галимов Э.М., Колотов В.П., Назаров М.А., Костицын Ю.А., Кубракова И.В., Кононкова Н.Н., Рощина И.А., Алексеев В.А., Кашкаров Л.Л., Бадюков Д.Д., Севастьянов В.С.* Результаты вещественного анализа метеорита Челябинск // *Геохимия*. 2013. №7. С. 580–598.
3. *Маров М.Я., Шустов Б.М.* Челябинское событие как астрономическое явление // *Геохимия*. 2013. №7. С. 580–598.
4. *Kichanov S.E., Kozlenko D.P., Kirillov A.K., Lukin E.V., Abdurakhimov B., Belozeroва N.M., Rutkauskas A.V., Ivankina T.I., Savenko B.N.* A Structural Insight into the Chelyabinsk Meteorite: Neutron Diffraction, Tomography and Raman Spectroscopy Study // *SN Appl. Sci*. 2019. V.1. P.1563; <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1614-x>.
5. *Kaeter D., Ziemann M.A., Böttger U., Weber I., Hecht L., Voropaev S.A., Korochantsev A.V., Kocherov A.V.* The Chelyabinsk Meteorite: New Insights from a Comprehensive Electron Microscopy and Raman Spectroscopy Study with Evidence for Graphite in Olivine of Ordinary Chondrites // *Meteor Planet Sci*. 2018. V.53. P.416–432; <https://doi.org/10.1111/maps.13027>.
6. *Righter K., Abell P., Agresti D., Berger E.L., Burton A.S., Delaney J.S., Fries M.D., Gibson E.K., Haba M.K., Harrington R., Herzog G.F., Keller L.P., Locke D., Lindsay F.N., McCoy T.J., Morris R.V., Nagao K., Nakamura-Messenger K., Niles P.B., Nyquist L.E., Park J., Peng Z.X., Shih C.-Y., Simon J.I., Swisher C.C., Tappa M.J., Turrin B.D., Zeigler R.A.* Mineralogy, Petrology, Chronology, and Exposure History of the Chelyabinsk Meteorite and Parent Body // *Meteor. Planet. Sci*. 2015. V.50. P.1790–1819; <https://doi.org/10.1111/maps.12511>.
7. *Pavlov D.A., Bobrov A.I., Malekhonova N.V., Pirogov A.V., Nezhdanov A.V.* Self-Assembled Nanocrystals Discovered in Chelyabinsk Meteorite // *Sci. Rep*. 2015. V.4. P.4280; <https://doi.org/10.1038/srep04280>.

8. *Moroz T. N., Goryainov S. V., Pokhilenko N. P., Podgornykh N. M.* Crystalline and Amorphous Matter in the Chelyabinsk Meteorite: Evidence from Raman Spectroscopy // *Dokl. Earth Sci.* 2014. V. 457. P. 831–834; <https://doi.org/10.1134/S1028334X14070071>.
9. *Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams* / Ed. G. L. Molnár Budapest; Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publ., 2004.
10. *Belgya T., Révay Z.* Prompt Gamma Activation Analysis (PGAA) // *Neutron Scattering Applications and Techniques*. 2016. P. 221–234; doi:10.1007/978-3-319-33163-8\_11.
11. *Belgya T.* Prompt Gamma Activation Analysis at the Budapest Research Reactor // *Phys. Procedia*. 2012. V. 31. P. 99–109.
12. The IBR-2 Reactor, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research. <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2>.
13. *Аксенов В. Л., Балагуров А. М.* Времяпролетная нейтронная дифрактометрия // *УФН*. 1996. № 9. С. 955–985.
14. *Иванкина Т. И., Клима К., Локаичек Т., Никитин А. Н., Прос З.* Исследование анизотропии оливинового ксенолита с помощью акустических волн и дифракции нейтронов // *Физика Земли*. 1999. № 5. С. 29–39.
15. *Иванкина Т. И., Маттис З.* О развитии количественного текстурного анализа и применении его в решении задач наук о Земле // *ЭЧАЯ*. 2015. Т. 46, вып. 3. С. 366–423; doi:10.1134/S1063779615030077.
16. *Kepler R., Ullemeyer K., Behrmann J. H., Stipp M.* Potential of Full Pattern Fit Methods for the Texture Analysis of Geological Materials: Implications from Texture Measurements at the Recently Upgraded Neutron Time-of-Flight Diffractometer SKAT // *J. Appl. Crystallogr.* 2014. V. 47. P. 1520–1534.
17. *Wenk H.-R., Lutterotti L., Vogel S. C.* Rietveld Texture Analysis from TOF Neutron Diffraction Data // *Powder Diffr.* 2010. V. 25. P. 283–296.
18. *Lutterotti L., Matthies S., Wenk H.-R., Schultz A. S., Richardson J. W.* Combined Texture and Structure Analysis of Deformed Limestone from Time-of-Flight Neutron Diffraction Spectra // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 81. P. 594–600.
19. *Силаев В. И., Голубева И. И., Филиппов В. Н. и др.* Метеорит Челябинск: минералогическая петрографическая характеристика // *Вестн. Пермск. ун-та*. 2013. Вып. 2(19). С. 8–27.

Получено 14 июля 2021 г.