# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ И ЖЕЛЕЗНО-КАМЕННЫХ МЕТЕОРИТОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ЛАЭМС

А.П. Зажогин $^{1)}$ , Н.А. Орехова $^{2)}$ , А.О. Пухтеев $^{2)}$ , Р.А. Харитончик $^{2)}$   $^{1)}$ Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, zajogin\_an@mail.ru  $^{2)}$ Средня школа  $N_{2}$  54, Минск, Беларусь, sotis-nil@yandex.ru

Методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии изучено распределение железа и никеля в образцах метеоритов: железном и железно-каменном Брагин. Анализ результатов позволяет сделать предположение о наличии в метеорите трех типов октаэдритов: средне-, грубо- и весьма грубоструктурных. В качестве образца сравнения использована пластинка нержавеющей стали марки А2 (прокат). Содержание железа 65-70 %, никеля 10-12 %. Проведены исследования влияния химических и физических характеристик железного и железной части железно-каменного метеорита Брагин на температуру приповерхностной лазерной плазмы методом ЛАЭМС. Определение температуры плазмы проведено методом Орнштейна по линиям железа. Показано, что наибольшее различие температуры приповерхностной плазмы в верхних слоях наблюдается для образца железного метеорита. Для образцов метеорита Брагин и эталонного температуры плазмы существенно различаются, но распределение более равномерное. Химический состав железной части метеоритов такой, который не встречается в самородном железе, а от сплавов железа метеориты отличаются необычайно крупными кристаллами. Все это отражается и на температуре приповерхностной лазерной плазмы.

**Ключевые слова**: железные метеориты; метеорит Брагин; минералогический состав; температура лазерной плазмы; лазерная искровая спектрометрия.

## INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF IRON AND IRON-STONE METEOORITES ON THE TEMPERATURE OF NEAR-SURFACE LASER PLASMA BY THE LAEMS METHOD

A.P. Zajogin<sup>1)</sup>, N.A. Arekhava<sup>2)</sup>, A.O. Pukhteev<sup>2)</sup>, R.A. Charitonchik<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State University,

4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, zajogin\_an@mail.ru

<sup>2)</sup>Secondary School No. 64, Minsk, Belarus, sotis-nil@yandex.ru

The distribution of iron and nickel in meteorite samples: iron and stony-iron Bragin was studied by laser atomic emission multichannel spectrometry. An analysis of the results allows us to make an assumption about the presence of three types of octahedrites in the meteorite: medium-, coarse-, and very coarse-structured. Meteorites with a total content of Ni 6-16 wt. % and to which the investigated meteorites belong have a Widmanstätten structure and are called octahedrites. They are formed by intersecting plates of kamacite oriented along the planes of the octahedron (111) in taenite. The thickness of kamacite beams is inversely related to the total content of Ni and is the basis for a more detailed subdivision of octahedrites into fine-, medium-, coarse- and very coarse-grained octahedrites, with approximate beam sizes of 0.6, 0.6-1.3, 1, 3-3.3 and more than 3.3 mm. A plate of stainless steel grade A2 (rolled) was used as a comparison sample. Iron content 65-70%, nickel 10-12%. In the reference sample obtained by rolling, no significant differences are observed, which indicates a more or less uniform distribution of iron and nickel atoms. The influence of the chemical and physical characteristics of the iron and iron parts of the iron-stony meteorite Bragin on the temperature of the near-surface laser plasma was studied by the LAEMS method. The plasma temperature was determined by the Ornstein method using iron lines. It is shown that the greatest difference in the surface plasma temperature in the upper layers is observed for the iron meteorite sample. For samples of the Bragin meteorite and the reference plasma temperatures differ significantly, but the distribution is more uniform. The chemical composition of the iron part of meteorites is such that it is not found in native iron, and meteorites differ from iron alloys in unusually large crystals. All this is also reflected in the temperature of the near-surface laser plasma.

*Keywords:* iron meteorites; Bragin meteorite; mineralogical composition; laser plasma temperature; laser spark spectrometry.

#### Введение

Метеориты были и, несмотря на интенсивное развитие космических исследований, остаются ключевым, а часто и единственным источником информации о протопланетной и ранней планетной истории Солнечной системы. Метеориты являются обломками распавшихся планет и астероидов, большая часть которых движется в обширном поясе между орбитами Марса и Юпитера. Возраст метеоритов составляет 4.5-4.6 млрд. лет и совпадает с возрастом Земли 4.56 млрд. лет.

Согласно современной статистике, среди упавших на Землю за последние 100— 200 лет метеоритов [1] резко преобладают (92.5-93.3% встречаемости) каменные хондриты и ахондриты. На железные метеориты (сидериты) приходится 5.3-5.7%, а на железокаменные всего 0.8-1.3 %. Очевидно, что относительная редкость железных метеоритов не может не сказываться на степени их изученности, хотя именно они и представляют собой наиболее ценный в научном отношении объект исследований. Последнее обусловлено, по крайней мере, двумя причинами. Вопервых, есть основания полагать, что железные метеориты, как минимум, не моложе Солнца, поскольку образовались за счет газопылевого облака, оставшегося после взрыва первоначальной сверхновой горячей массивной звезды [1], и поэтому являются непосредственным продуктом звездного нуклеосинтеза. Во-вторых, железные метеориты могут представлять собой обломки металлических ядер планет земного типа, в которых происходили недостаточно пока понятные нам обменные процессы, сильно повлиявшие на формирование каменной мантии [1]. Изучение любого метеорита расширяет наши знания в этом направлении. В литературе отмечается, что железокаменный метеорит Брагин, несмотря на то, что он изучается более 200 лет, до сих пор остается плохо изученным [2]. Самыми распространенными минералами каменной части метеорита Брагин являются оливины. Вторым

по распространенности является никелистое железо, которое слагает примерно 45% площади пластинки, причем по данным микрозондового анализа на камасит приходится около 35%, а на тэнит — 10% [2].

Целью настоящей работы являлась оценка влияния распределения железа и никеля по поверхности и глубине железоникелевых включений железного и железно-каменного метеорита Брагин на температуру приповерхностной лазерной плазмы методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии.

## Методика эксперимента

Для проведения исследований использовался лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Лазерное излучение фокусируется на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Энергия импульсов 35 мДж. Интервал между импульсами 10 мкс. Количество сдвоенных импульсов на точку 20.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости отношения интенсивностей линий Fe и Ni в спектрах для железного, железнокаменного метеорита Брагин и образца сравнения. Расстояние между точками ≈0.5 мм. В качестве образца сравнения использована пластинка нержавеющей стали марки A2 (прокат). Содержание железа 65-70 %, никеля 10-12 %.

Анализ приведенных на рис. 1а, 1б результатов позволяет сделать предположение о наличии в метеоритах трех типов октаэдритов: средне-, грубо- и весьма грубоструктурных. В образце сравнения, полученном путем проката, существенных отличий не наблюдается, что свидетельствует о более-менее однородном распределении атомов железа и никеля.

Полученные результаты рассмотрим в

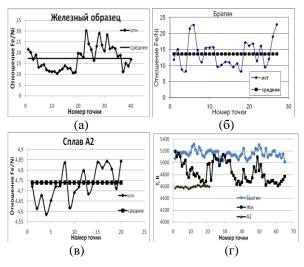


Рис. 1. а, б и в – отношение интенсивностей линий Fe/Ni в образцах; г- температура

рамках модели поверхностного испарения металла, полагая, что практически вся энергия расходуется на абляцию вещества. В таком приближении толщина испаренного слоя h (количество вещества) при импульсном воздействии с заданной плотностью мощности q зависит от длительности воздействия  $\tau$ . Ее легко оценить, считая, что вся подведенная к материалу мощность идет на испарение вещества:

$$h = V_{\text{\tiny M}} \cdot \tau = q \tau / L_{\text{\tiny M}}$$

где  $V_{\text{и}}$  — скорость испарения вещества (скорость движения границы раздела твердое тело — газ),  $L_{\text{и}}$  — удельная теплота испарения вещества (Дж/см³), q - плотность мощности. Расчеты q для железа и никеля дают значения порядка  $8\cdot10^8$  Вт·см-². Для сплавов она будет близкой. В режиме интенсивного испарения почти вся энергия лазерного импульса расходуется на удаление металла из облучаемой зоны. Температура поверхности в этом случае достигает (2-3) $T_{\text{кип}}$ .

Валовый химический состав железокаменных метеоритов может быть представлен следующим образом (мас. %): Fe 85.64-89.08, Ni 8.79-9.26. В чисто железных метеоритах количество никеля может быть значительно больше. Эти различия проявляются и в поведении расплавов. Так, в работе [3] с использованием физических свойств четырех образцов «железных» метеоритов и одного железно-каменного изучены температурные зависимости кинематической вязкости, поверхностного натяжения и плотности. Установлена разница между поведением указанных характеристик для железных, железокаменного и чисто железного образцов при плавлении и кипении.

Температура приповерхностной лазерной плазмы при двухимпульсном воздействии зависит от большего количества факторов. Для оценки температуры использовался метод Орнштейна и линии железа. Полученные результаты приведены на рис. 1(г).

При сравнении графиков, приведенных на рисунках, хорошо видна разница между исследуемыми образцами.

#### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что в связи с тем, что химический состав железной части метеоритов такой, который не встречается в самородном железе, а от сплавов железа метеориты отличаются значительно более крупными кристаллами, то это все ярко отражается и на температуре приповерхностной лазерной плазмы.

### Библиографические ссылки

- 1. Силаев В.И., Кокин А.В., Филиппов В.Н., Киселёва Д.В., Нефедьева Н.С. Железный метеорит Большой Долгучан: результаты минералого-геохимических исследований. Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН 2016; (7): 10-18.
- 2. Бахтин А.И., Ескин А.А., Сунгатуллин Р.Х. и др. Особенности состава и генезиса метеорита Брагин. *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки* 2018; 160(2): 324-338.
- 3. Цепелев В.С., Поводатор А.М., Гроховский В.И., Вьюхин В.В., Конашков В.В. Исследование физических свойств расплавов «железных» метеоритов. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия 2016; 59(6): 392-396.