

# Изучение распределения основных элементов в зоне железо-оливин-железо в метеорите Брагин методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии

А. П. Зажогин<sup>1)</sup>, Н. А. Орехова<sup>2)</sup>, А. О. Пухтеев<sup>2)</sup>, Р. А. Харитончик<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,  
e-mail: [zajogin\\_an@mail.ru](mailto:zajogin_an@mail.ru)

<sup>2)</sup>Средняя школа № 64, Минск, Беларусь, [sotis-nil@yandex.ru](mailto:sotis-nil@yandex.ru)

Методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии изучено распределение основных элементов в переходной зоне железо-оливин-железо в железно-каменном метеорите Брагин. Проведены исследования влияния химических и физических характеристик железной и каменной частей на температуру приповерхностной лазерной плазмы методом ЛАЭМС. Определение температуры плазмы проведено методом Орнштейна по линиям железа. Показано, что наибольшие различия температуры приповерхностной плазмы в верхних слоях наблюдается для оливин содержащей области.

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

## Study of the distribution of major elements in the iron-olivine-iron zone in the Bragin meteorite using laser atomic emission multichannel spectrometry

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, Minsk, Belarus, e-mail: [zajogin\\_an@mail.ru](mailto:zajogin_an@mail.ru)

<sup>2)</sup>Secondary School No. 64, Minsk, Belarus, e-mail: [sotis-nil@yandex.ru](mailto:sotis-nil@yandex.ru)

Using laser atomic emission multichannel spectrometry, the distribution of major elements in the iron-olivine-iron transition zone in the Bragin stony-iron meteorite was studied. Studies have been carried out of the influence of the chemical and physical characteristics of iron and stone parts on the temperature of near-surface laser plasma using the LAEMS method. The plasma temperature was determined using the Ornstein method using iron lines. It is shown that the greatest difference in the temperature of the near-surface plasma in the upper layers is observed for the olivine-containing region.

**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. Значи-

тельный интерес ученых к дифференцированным метеоритам обусловлен историей их происхождения. В то время, как структура и состав хондритов отражают историю аккреции вещества в протопланетном облаке и при образовании планетезималей, дифференцированные метеориты несут информацию о процессах, протекавших в родительских телах (астероидах или протопланетах) метеоритов и повлиявших на структуру метеоритного вещества [1, 2].

Вещество дифференцированных метеоритов подверглось термическому метаморфизму в родительских телах, в результате которого происходило плавление вещества метеоритов с последующей дифференциацией: расплав Fe-Ni-Co концентрировался в центре астероида или протопланеты, формируя металлическое ядро. Окружающая это ядро мантия из силикатных фаз могла быть свободной от сплава Fe-Ni-Co или содержать его остаточное количество. После медленного охлаждения в родительском теле происходила кристаллизация дифференцированного вещества. Железокаменные метеориты включают в себя две группы: мезосидериты и палласиты. Эти две группы метеоритов отличаются происхождением и историей формирования.

Мезосидериты представляют собой смесь различного количества зерен сплава Fe-Ni-Co с силикатными фазами. Палласиты содержат ~65 вес. % силикатных фаз (преимущественно, оливина  $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$ ), ~30 вес. % сплава Fe-Ni-Co и ~5 вес. % троилита FeS, хромита  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ , низкокальциевого пироксена и шрейберзита  $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$  [3, 4]. Современная модель формирования палласитов описывает их образование как результат столкновения дифференцированного тела, состоящего из затвердевшего металлического ядра с расплавленным металлом на его поверхности и мантии из оливина, с другим космическим объектом. В результате такого столкновения может произойти разрушение этого тела. В этом случае наружный расплавленный слой металлического ядра смешивается с обломками мантии из оливина. После медленного остывания этой смеси образуются палласиты: сплав Fe-Ni-Co образует матрицу, которая связывает фрагменты каменной части [3, 4].

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов данных по химическому составу переходной части от каменной к металлической частей метеорита Брагин.

### Основная часть

Оценку локального пространственного и объемного распределения элементов проводили методом лазерной многоканальной спектроскопии, используя лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1. Плавление вещества и возбуждение плазмы в спектрометре осуществляется излучением двух-импульсного лазера на АИГ+Nd<sup>3+</sup> (модель LS2131 DM). 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.

На рис. 1, а приведена фотография исследованного участка железокаменной части метеорита. На рис. 1, б и в приведено распределение основных элементов (Mg, Ca, Ni, Mn, Si и Fe в указанных точках).

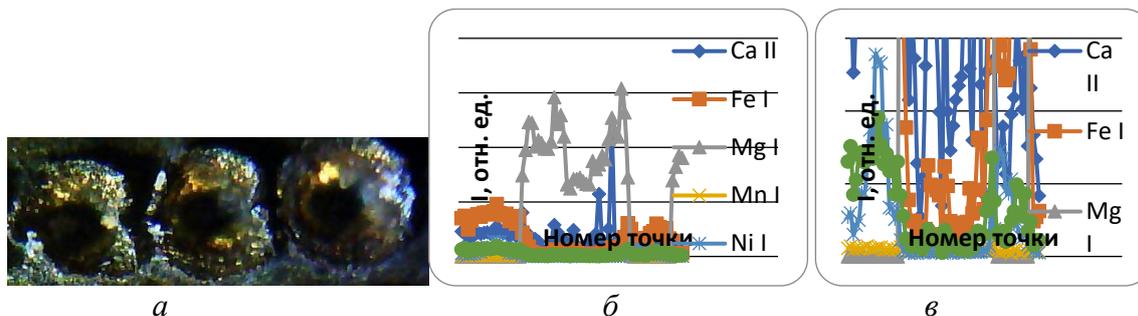


Рис. 1. а – фотография фрагмента исследованного участка железной части; б и в – зависимости интенсивности линий атомов в спектрах

Каменная часть включает в себя точки от 19 до 54. В этой области сильно проявляется магний. Самым распространенным минералом в метеорите Брагин является оливин ( $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$ ). Визуально он слагает примерно 50 % площади пластинки метеорита Брагин.

Как видно из полученных данных содержание Fe, Ni в исследованных частях образца довольно сильно различается. Валовый химический состав железной части железо-каменных 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. Сплав Fe-Ni-Co в метеоритах представлен такими фазами, как  $\alpha$ -Fe(Ni, Co),  $\alpha_2$ -Fe(Ni, Co),  $\gamma$ -Fe(Ni, Co) и  $\gamma$ -FeNi. В переходных частях метеорита зерна сплава Fe-Ni-Co могут состоять как из одной фазы, так и из смеси разных фаз. Основные металлические фазы – это  $\alpha$ -Fe(Ni, Co) (камасит) и  $\gamma$ -Fe(Ni, Co) (тэнит).

Содержание Fe в каменной части в 5–6 раз меньше, что четко видно из спектральных и литературных данных [2].

Относительно происхождения палласитов среди исследователей нет единого мнения [1]. Оливин в метеорите Брагин подвергся метасоматическому преобразованию. Для палласитов вообще, а для метеорита Брагин, в частности весьма характерна петельчато-порфировидная структура, образованная крупными (до 10 мм) кристаллами оливина (см. рис. 2, а), окруженными металлической фазой, сложенной в основном никелистым железом (камаситом, тэнитом). Эта металлическая фаза образует петельчатый рисунок структуры метеорита и знаменует собой сильновосстановительную среду, отвечающую геохимическому буферу – самородное железо – вюстит. По-видимому, эта среда создается более активной миграцией глубинных восстановительных флюидов  $\text{H}_2$ , CO,  $\text{H}_2\text{S}$  вследствие более высокой флюидной проницаемости участков петельчатой структуры метеорита. Участки метеорита, сложенные порфировидными кристаллами оливина, знаменуют собой слабоокислительную среду, отвечающую устойчивости фаялита геохимического буфера кварц – фаялит – магнетит, активность кислорода в котором в тысячи раз выше, чем у буфера самородное железо – вюстит. Поэтому в палласитах должна проявляться локальная окислительно-восстановительная зональность. В направлении от порфировидных кристаллов оливина к участкам петельчатой структуры происходит уменьшение окислительного потенциала и увеличение восстановительного

потенциала среды, что является следствием разной проницаемости этих участков для глубинных восстановительных флюидов.

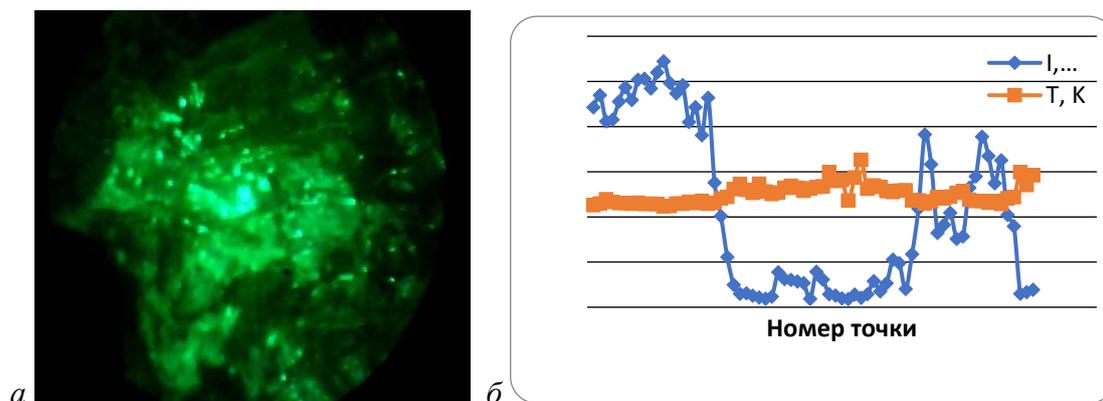


Рис. 2. а – снимок кристалла оливина в одной из полостей метеорита Брагин; б – распределение железа и температура приповерхностной плазмы в зоне железо-оливин-железо

Температура приповерхностной лазерной плазмы при двухимпульсном воздействии зависит от большего количества факторов. Для оценки температуры использовался метод Орнштейна и линии железа – 404,581 нм и 374,556 нм. Полученные результаты приведены на рис. 2, б.

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

### Заключение

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на поверхность образца в области железо-оливин-железо, позволили определить распределения основных элементов в переходной зоне от чисто каменной к железоникелевой частей метеорита Брагин методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии (ЛАЭМС). Пока-зано, что наибольшее отличие в верхних слоях наблюдается для никеля, железо распределено более равномерно. 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. Железный метеорит Большой Долгучан: результаты минералого-геохимических исследований. / В. И. Силаев [и др.] // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 7. С. 10–18.
2. Особенности состава и генезиса метеорита Брагин. / А. И. Бахтин [и др.]. // Учен. зап. Казан. унта. Сер. Естеств. науки. 2018. Т. 160, №2. С. 324–338.
3. Исследование физических свойств расплавов «железных» метеоритов. / В. С. Цепелев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59, № 6. С. 392–396.