

**Элементный состав гранулометрических фракций металла энстатитовых хондритов АДНІ КОТ ЕН4 и ПИЛИСТВЕРЕ ЕL6: поиск признаков ударно - индуцированного фракционирования элементов**

А. Ю. Люль, З. А. Лаврентьева, Г. М. Колесов

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН*

Получено 31 марта 2010; опубликовано 5 июня 2010.

Для оценки влияния метаморфических и ударных процессов на химический состав Fe,Ni-фазы энстатитовых хондритов методом ИНАА определено содержание Ni, Co, Cu, Ga, Au, As и Ir в фракциях металла размером 260-160, 160-100, 100-71, 71-45 и <45 мкм энстатитовых хондритов с различными ударно-термическими историями: неравновесной ударно - расплавленной брекчии Adhi Kot EN4 и равновесном хондрите Пилиствере EL6, претерпевшем слабое постметаморфическое ударное воздействие. Анализ данных по содержанию сидерофильных элементов в гранулометрических фракциях металла показал, что наблюдаемое обогащение тугоплавким Ir относительно более летучих элементов фракции металла размером <45 мкм Adhi Kot EN4 является следствием ударной переработки вещества хондрита. Отсутствие признаков ударного перераспределения элементов в металле хондрита Пилиствере EL6 свидетельствует, что тренды распределения элементов между гранулометрическими фракциями металла в этом хондрите определялись действием метаморфических, а не ударных процессов.

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: энстатитовые хондриты; Fe-Ni-фаза; гранулометрические фракции; элементный состав; ударные и метаморфические процессы; фракционирование элементов*

**Ссылка:** Люль А. Ю., З. А. Лаврентьева, Г. М. Колесов (2010), Элементный состав гранулометрических фракций металла энстатитовых хондритов АДНІ КОТ ЕН4 и ПИЛИСТВЕРЕ ЕL6: поиск признаков ударно - индуцированного фракционирования элементов, *Вестник ОНЗ РАН*, 2, NZ6023, doi:10.2205/2010NZ000041, 2010

**Введение**

Образованные в сильно восстановительных условиях энстатитовые хондриты и ахондриты (обриты), содержащие ряд уникальных для земных пород сульфидов и имеющие идентичный изотопный состав O2, сильно различаются по степени ударной переработки родительского вещества метеоритов, содержанию в них металлического и общего железа, а также по наблюдаемым трендам фракционирования сидерофильных элементов в металле метеоритов [Watters and Prinz, 1979; Rubin et al., 1997; Kong et al., 1997, Casanova et al., 1993; Lyul et al., 2007; Wänke et al., 1970]. Установлено, что металл EN и EL хондритов имеет практически одинаковые тренды распределения нормированных к С1-хондритам распространенностей сидерофильных элементов, различающиеся только по степени обогащения металла летучими элементами [Kong et al., 1997]. Данные по химическому составу металла обритов свидетельствуют о более сложной картине фракционирования элементов по сравнению с металлом E-хондритов. Так, распределение сидерофильных элементов в крупных нодулях металла обритов соответствует таковому для металла E- хондритов [Casanova et al., 1993]. Однако тонкозернистый металл, выделенный из силикатных фракций обритов Norton County и Песьяное, сильно (~30x) обеднен тугоплавким иридием относительно более летучих элементов [Lyul et al., 2007; Wänke et al., 1970]. Такой тип фракционирования элементов по летучести характерен для магматических групп железных метеоритов, образованных в процессе фракционной кристаллизации металла в родительских телах [Scott, 1978]. Более слабое (~2x) обеднение иридия также отмечено в металлической частице, выделенной из ударно-расплавленного класта хондрита Abee EN4 [Sears,

## ЛЮЛЬ И ДР.: ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ ФРАКЦИЙ МЕТАЛЛА

1983]. Следовательно, ударные процессы, протекавшие на ранней стадии эволюции вещества метеоритов, могли привести и к существенному изменению первичного состава металла хондритов.

С целью поиска следов фракционирования сидерофильных элементов в энстатитовых хондритах, обусловленного действием ударных процессов, получены данные по содержанию Ni, Co, Cu, Ga, Au, As и Ir в гранулометрических фракциях металла хондритов Adhi Kot EH4 и Пилиствере EL6, имеющих различные ударно-метаморфические истории: слабо метаморфизованный хондрит Adhi Kot EH4 является ударно - расплавленной брекчией, тогда как вещество хондрита Пилиствере EL6 претерпело сильное до-метаморфическое и слабое постметаморфическое ударное воздействие [Rubin *et al.*, 1997].

### Методика анализа

Металл был выделен путем мягкого дробления исходного вещества хондритов в яшмовой ступке под слоем этилового спирта с последовательным просеиванием на ситах размером 260-160, 160-100, 100-71, 71-45 и <45 мкм. Ручным магнитом и магнитной иглой полученные фракции сепарировали на магнитные и немагнитные фазы, начиная с наименьшего по размерам сита. Выделенный металл многократно вручную очищался иглой от примесей посторонних фаз с постоянным контролем его чистоты под микроскопом МБС-2. Содержание элементов в фракциях металла определялось методом ИНАА. Обработку полученных гамма-спектров и расчет концентраций элементов в исследуемых образцах проводили по комплексной программе «Образ». В качестве стандартов использовались образцы железных метеоритов Сихотэ-Алинский, Чинге и Бодайбо с известным содержанием микроэлементов в их металлической фазе [Лаврухина и др., 1974]. Погрешность определения элементов составляла 4-5% для Ni, Co, Cu и Au и 7-10% для As, Ga и Ir.

### Результаты и их обсуждение

Данные по содержанию элементов в отдельных фракциях металла хондритов Adhi Kot EH4 и Пилиствере EL6 приведены таблице, а нормированные к CI-хондритам распространенности элементов - на рис. 1.

**Таблица 1. Содержание элементов в гранулометрических фракциях металла хондритов Adhi Kot EH4 и Пилиствере EL6 ( Fe, Ni в %, другие элементы - мкг/г)**

| Размер | Adhi Kot EH4        |         |        |       |      | Пилиствере EL6      |         |        |       |      |
|--------|---------------------|---------|--------|-------|------|---------------------|---------|--------|-------|------|
|        | Размер фракций, мкм |         |        |       |      | Размер фракций, мкм |         |        |       |      |
|        | 260-160             | 160-100 | 100-71 | 71-45 | <45  | 260-160             | 160-100 | 100-71 | 71-45 | <45  |
| Fe     | 91                  | 90      | 87     | 88    | 90   | 91                  | 91      | 92     | 88    | 89   |
| Ni     | 7.4                 | 8.3     | 8.2    | 7.6   | 8.9  | 6.7                 | 6.6     | 6.2    | 7.3   | 7.8  |
| Co     | 3490                | 3360    | 3530   | 3390  | 3240 | 3640                | 3950    | 3640   | 3630  | 3570 |
| Au     | 1.51                | 1.27    | 1.56   | 1.84  | 1.48 | 1.14                | 1.26    | 1.19   | 1.26  | 1.25 |
| As     | 27                  | 22.3    | 24.2   | 26.5  | 20.0 | 12.5                | 13.7    | 15.4   | 13.1  | 15.7 |
| Cu     | 1196                | 910     | 960    | 990   | 710  | 85                  | 90      | 95     | 130   | 205  |
| Ga     | 72.4                | 74.2    | 86.7   | 88.8  | 57.2 | 54                  | 53      | 52     | 55    | 51   |
| Ir     | 1.76                | 1.84    | 2.32   | 2.66  | 3.52 | 2.7                 | 2.1     | 2.3    | 2.4   | 2.6  |

ОТНОСИТЕЛЬНО СИ ХОНДРИТОВ

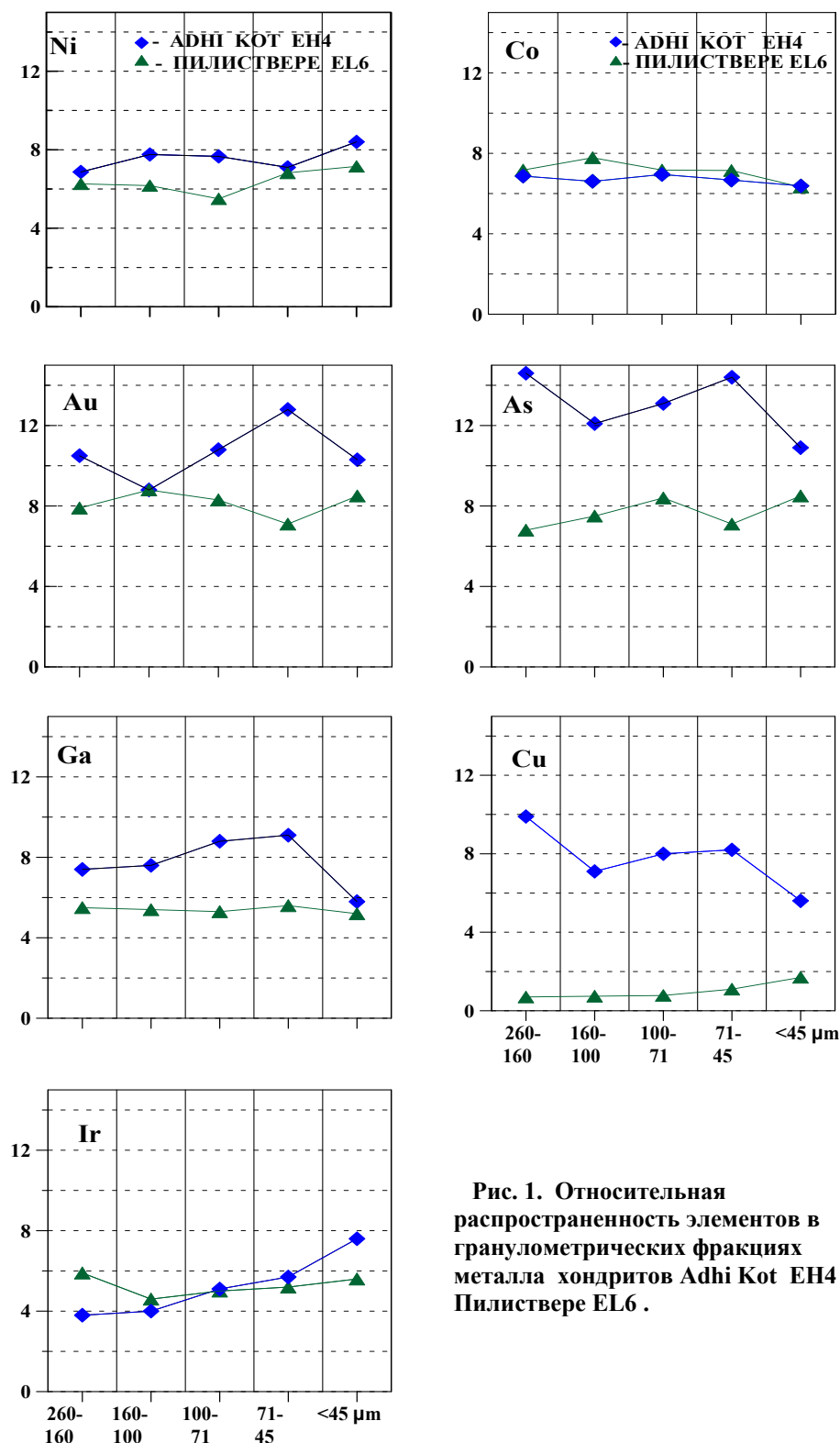


Рис. 1. Относительная распространённость элементов в гранулометрических фракциях металла хондритов Adhi Kot EN4 и Пилиštвере EL6 .

Из данных по содержанию элементов (табл.) и трендам фракционирования элементов (рис.1) в гранулометрических фракциях металла хондритов следует:

а) распределение элементов в грубозернистых (260-160 и 160-100 мкм) фракциях металла хондритов Adhi Kot EH4 и Пилиствере EL6 соответствует таковому для валовых проб металла хондритов EH и EL групп [Kong et al., 1997]: содержание умеренно летучих Ni, Cu, Ga, Au и As выше, а Ir ниже (за исключением более мелкозернистых фракций) в металле EH хондрита Adhi Kot, чем в металле EL-хондрита Пилиствере, а содержание Co слабо зависит от петрологического типа хондрита;

б) повышенное содержание Ni и пониженное Co в фракциях металла хондритов размером <45 мкм обусловлено присутствием в тонкозернистом металле высоко- Ni камасита [Rambaldi and Cendales, 1980];

в) при переходе к более мелким фракциям содержание Ir в металле Adhi Kot увеличивается, тогда как в металле Пилиствере вариации его содержания не связаны с размером фракций.

Четкая взаимосвязь между содержанием и размером частиц металла наблюдается для меди. Причем, с уменьшением размера фракции содержание Cu в металле хондрита Adhi Kot EH4 уменьшается, а в металле Пилиствере EL6 - увеличивается. Такое распределение меди в металле хондритов возможно обусловлено двойственностью ее геохимических свойств. В зависимости от условий, она ведет себя как сидерофильный или халькофильный элемент. Менее четко взаимосвязь содержания с размером частиц металла проявляется для Au и As. Зависимость содержания элементов в металле хондритов от размера частиц обусловлена, в основном, их перераспределением между отдельными компонентами хондритов в процессе термального метаморфизма.

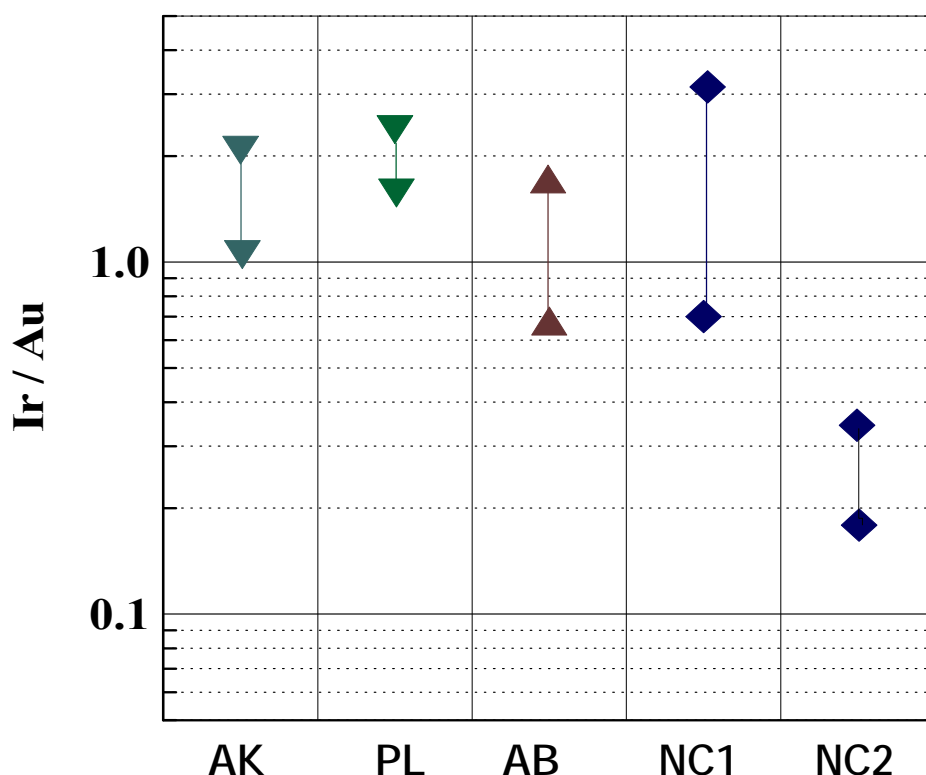


Рис. 2. Вариации отношения Ir/Au в металле энстатитовых метеоритов.

Условные обозначения: АК и PL - гранулометрические фракции хондритов Adhi Kot EH4 и Пилиствере EL6 (таб. 1,2); АВ - гранулометрические фракции и металлическая частица из ударно-расплавленной брекчии хондрита Abee EH4 (данные Sears, 1983; Rambaldi and Cendales., 1980); NC1 и NC2 - нодулы (n=9) и тонкозернистый металл (n=3) обрита Norton County (данные Casanova et al., 1993; Lyul et al., 2007; Wänke et al., 1970).

Только наблюдаемое фракционирование элементов по летучести в мелкозернистом (<45 мкм) металле ударно-расплавленной брекчии Adhi Kot может быть обусловлено действием ударных

процессов. Относительно более крупнозернистых фракций этот металл обогащен тугоплавким Ir и обеднен более летучими Ni, Au, As и Ga, что свидетельствует о частичном испарении последних в процессе ударного нагрева. Такой тренд фракционирования элементов по летучести в металле хондрита противоположен тренду, наблюдаемому в тонкозернистом металле обритов, который обеднен Ir и обогащен Ni, Au, As по сравнению с крупными металлическими нодулями, соотношения элементов в которых близки к хондритовым [Casanova *et al.*, 1993]. Различия в степени фракционирования элементов по летучести в энстатитовых хондритах и ахондритах (на примере фракционирования между тугоплавким Ir и умеренно летучим Au) хорошо видны на Рис. 2.

Как следует из рис. 2, вариации отношения Ir/Au в металле равновесного Пилиствере EL6 меньше, чем в металле неравновесного хондрита Adhi Kot EH4, что может быть обусловлено сложной ударной историей хондрита равновесных энстатитовых хондритов. Установлено [Rubin *et al.*, 1997], что протовещество EL6 хондритов претерпело сильную ударную переработку на аккреционной (или на начальной стадии метаморфизма) стадии эволюции, следы которой были практически полностью уничтожены последующим метаморфическим нагревом в родительском теле хондритов. Последующее слабое (S2) постметаморфическое ударное воздействие на хондрит Пилиствере не привело к заметному фракционированию элементов по летучести. Более заметные различия в величине отношения Ir/Au наблюдаются в металле двух EH4 хондритов Adhi Kot и Abee, где для хондрита Abee включены данные по содержанию Ir и Au в частице металла из ударно-расплавленного класта [Sears *et al.*, 1983; Rambaldi and Cendales, 1980]. Однако наиболее сильно элементы фракционированы по летучести в тонкозернистой фракции металла обритов [Casanova *et al.*, 1993; Lyul *et al.*, 2007], которая значительно обеднена тугоплавким иридием относительно более летучих сидерофильных элементов. Такой тренд фракционирования элементов предполагает кристаллизацию металла из расплава или из пара, обедненного тугоплавкими элементами.

Различия в степени фракционирования элементов в энстатитовых хондритах и ахондритах обусловлены разной интенсивностью ударных процессов, протекавших на родительских телах метеоритов. Менее интенсивные ударные процессы на родительских телах хондритов привели только к частичному испарению более летучих сидерофильных элементов, тогда как в интенсивных ударных процессах на родительском теле обритов тонкозернистый металл образовался в процессе фракционной кристаллизации из расплава, обедненного тугоплавкими элементами, или же в результате вторичной конденсации элементов из ударно-фракционированного пара.

## Заключение

Наблюдаемое обеднение летучими элементами тонкозернистого металла неравновесных энстатитовых хондритов свидетельствует о существенном влиянии ударных процессов на химический состав отдельных компонентов хондритов. Однако тренды перераспределения элементов в ударных процессах могут быть сглажены последующим термальным метаморфизмом вещества хондритов.

## Литература

- Лаврухина, А.К., А. Ю. Люль, Л. Л. Пелекис (1974), О распределении некоторых сидерофильных элементов в железных метеоритах, *Известия Академии Наук Латв. ССР*, № 3, 3-11.
- Casanova, I., K. Keil, H. E. Newsom (1993), Composition of metal in aubrites: Constraints on core formation, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 675-682.
- Kong, P., T. Mori, M. Ebihara (1997), Compositional continuity of enstatite chondrites and implications for heterogeneous accretion of the enstatite chondrites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 4895-4914.
- Lyul, A. Yu., Z. A. Lavrentjeva, G. M. Kolesov (2007), Trace element fractionations in metal of aubrites, *Lunar and Planet. Sci.*, XXXVIII, #1059.pdf.
- Rambaldi, E.R., M. Cendales (1980), Siderophile element fractionation in enstatite chondrites, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 48, 325-334.

- Rubin, A. E., E. R. D. Scott, K. Keil (1997), Shock metamorphism of enstatite chondrites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 847-858.
- Scott, E. R. (1978), Primary fractionation of elements among iron meteorites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, 1447-1458.
- Sears, D. W., G. W. Kallemeyn, J. T. Wasson (1983), Composition and origin of clasts and inclusions in and inclusions in the Abee enstatite chondrite, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62, 180-192.
- Wänke, H., F. Wlotzka, E. Jagoutz, F. Begemann (1970), Composition and structure of metallic particles in lunar "fines", *Proc. Apollo II Lunar Sci. Conf.*, V. 1, 931-935
- Watters, T. R., M. Prinz (1979), Aubrites: Their origin and relationship to enstatite chondrites, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10<sup>th</sup>*, 1073-1093.

А. Ю. ЛЮЛЬ, З. А. ЛАВРЕНТЬЕВА, Г. М. КОЛЕСОВ Учреждение Российской академии наук  
Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, ул. Косыгина 19, 119991  
Москва, Россия, факс: +7 495 938 20 54 тел: +7 495 939-18-38, e-mail: [ajull@mail.ru](mailto:ajull@mail.ru)