——— ГЕОХИМИЯ =

УДК 523.681.5

## МИНЕРАЛОГИЯ, МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ И КЛАССИФИКАЦИЯ ВЫСОКОНИКЕЛИСТОГО АТАКСИТА ОНЕЛЛО К. Д. Литасов<sup>1,2,\*</sup>, А. Исикава (А. Ishikawa)<sup>3</sup>, А. Г. Копылова<sup>4</sup>, Н. М. Подгорных<sup>1</sup>, академик РАН Н. П. Похиленко<sup>1</sup>

Поступило 29.05.2018 г.

Приведён детальный анализ микроэлементного состава метеорита Онелло. Исследования проводили методами сканирующей электронной микроскопии и масс-спектрометрии индуктивно-связанной плазмы с лазерной абляцией. Установлены следующие содержания Ni в минералах, мас.%: тэнит 23,0–25,4; камасит 5,8–8,8; шрейберзит 22–26; никельфосфид 44–52; аллабогданит 20,6–21,8; аваруит 75–81. По содержанию микроэлементов Онелло попадает в группу железных метеоритов IAB. Внутри этой группы он наиболее близко соответствует подгруппе sHH (с высокими содержаниями Au, Ni). Присутствие аллабогданита в составе Онелло свидетельствует о высоких *PT*-параметрах образования >8 ГПа, 1000–1400 °C. Соответственно образование Онелло связано с ударным метаморфизмом родительского тела железных метеоритов группы IAB и винонаитов, при котором плавлению и последующей кристаллизации подвергся участок, обогащённый Р и Ni.

Ключевые слова: железистые метеориты, атакситы, ударный метаморфизм, фосфиды.

DOI: https://doi.org/10.31857/S0869-56524854484-487

Вероятно, что практически все железные метеориты образовались в результате быстрой дифференциации примитивных планетозималей на ранней стадии развития Солнечной системы ещё до формирования основной массы хондритовых тел [1]. Процессы фракционирования были осложнены ударными событиями, смешением с силикатными телами и переплавлением. Для реконструкции этих процессов железные метеориты были разделены по микроэлементному составу на группы, которые отвечают одному или сходному родительскому телу. Однако большая группа метеоритов остаётся неклассифицированной вследствие недостаточной характеристики или отсутствия аналогов. Для выделения железных метеоритов в отдельную группу необходимо как минимум 5 сходных членов согласно принятой классификации в [2, 3].

Один из уникальных железных метеоритов высоконикелевый атаксит Онелло, описанный ранее в [4, 5], где была дана первая характеристика микроэлементного состава и минералогии метеорита. Среди первичных минералов были обнаружены тэ-

Сибирского отделения Российской Академии наук, Якутск

нит, камасит, шрейберзит, баррингерит (FeNi)<sub>2</sub>P, никельфосфид, троилит, никелистый сульфид. Позднее в [6] расшифрована структура фосфида (FeNi)<sub>2</sub>P, который оказался высокобарической модификацией баррингерита, и дано название новому минералу — аллабогданит. В нашей работе приведён детальный анализ микроэлементного состава метеорита Онелло и сделан вывод о его принадлежности к аномальным членам группы IAB.

Для изучения было использовано несколько полированных пластин метеорита Онелло размером 0,5-2,0 см. Исследования микроструктуры и состава минералов проводились методом сканирующей электронной микроскопии на приборе Tescan MYRA 3 LMU с энергодисперсионной приставкой X-Max-80 "Oxford Instruments" в ИГМ СО РАН, Новосибирск. Условия съёмки 20 кВ, 1,5 нА. Микроэлементный анализ проводили методом массспектрометрии индуктивно-связанной плазмы с лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС) на приборе Thermo Scientific Element XR в Токийском университете (Япония). В качестве стандарта для большинства сидерофильных элементов использовали сплав Ni-5 и металл однородного образца метеорита Campo del Cielo [7]. При измерениях использовали интенсивность излучения Nd-ИАГ-лазера 80 мкДж/см<sup>2</sup>. Диаметр пучка 100 мкм. Время анализа составляло 3 мин, включая 60 с определения фоновых значений, 60 с на набор сигнала от образца, 60 с на снижение сигнала до фоновых значений. Стандарты снимали

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов

<sup>\*</sup>E-mail: klitasov@igm.nsc.ru

до и после измерения образцов метеорита. Кроме того, использованы данные нейтронно-активационного анализа (ИНАА), сделанные при первичной классификации метеорита Онелло в ГЕОХИ РАН (анализы выполнил Г.М. Колесов).

Детальный минералогический анализ показал наличие тех же основных минералов, что и в [4–6], кроме фосфористого сульфида. Кроме того, охарактеризованы аваруит (рис. 1а) и пентландит. В изученных фрагментах метеорита Онелло встречены зоны неизменённого тэнита с вкраплениями таблитчатых кристаллов шрейберзита, никельфосфида и изредка аллабогданита (рис. 1б, д), а также участки облаковидных выделений аваруита и связанных с ним зон вторичного изменения (рис. 1а). В тэнитовой матрице встречены зёрна шрейберзита, никельфосфида с камаситовой оторочкой (рис. 1с, г). К крупным выделениям шрейберзита (до 3 мм) приурочены редкие зёрна троилита и пентландита.

Составы минералов (рис. 2), мас.% Ni: тэнит 23,0-25,4; камасит 5,8-8,8; шрейберзит 22-26; единичные анализы 28-36; никельфосфид 44-52; аллабогданит 20,6-21,8; аваруит не отвечает стехиометрическому составу и содержит 75-81 мас.% Ni,



Рис. 1. Изображения метеорита Онелло в отражённых электронах: а) выделения аваруита (Ав) и продуктов его окисления (Ок); б) аллабогданит (Аб), шрейберзит (Шр) в тэнитовой (Тн) матрице; в) оторочки камасита (Кам) вокруг трещиноватого зерна шрейберзита в тэнитовой матрице (светлые и тёмные участки тэнита не отличаются по составу); г) то же вокруг мелкого зерна никельфосфида (Нф) по соседству с выделением аллабогданита (Аб).

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК том 485 № 4 2019



**Рис. 2.** Диаграмма Fe–Ni–O для минералов метеорита Онелло. Треугольником показано поле составов аваруит (Ав)—магнетит (Мт)—треворит (Тр), которому близко соответствуют аномальные составы, названные аваруит-оксид.

что отвечает формуле Ni<sub>3,0-4,1</sub>Fe. Кроме того, аваруит содержит 1,0-2,5 мас. % О. Продукты изменения аваруита имеют необычный состав с дефицитом кислорода и образуют вариационные тренды в сторону треворита (рис. 2). Неоднородной структуры отдельных участков зон изменения аваруита не выявлено даже при максимальных увеличениях под электронным микроскопом. Однако, скорее всего, эти зоны содержат наноразмерные включения оксидных фаз, так как при изучении фазовых соотношений в системе Fe-Ni-O (например, [8]) не выявлено промежуточных соединений между металлическими и оксидными компонентами. Тем не менее точный ответ на вопрос о природе соединений с промежуточными составами между аваруитом и треворитом/магнетитом остаётся открытым.

Средний микроэлементный состав тэнита (по 14 анализам) приведён в табл. 1. Сравнение данных ЛА–ИСП–МС с измерениями методом ИНАА показывает хорошее соответствие для большинства элементов за исключением Ga (7,2 и 1,3 ppm соответственно). Существенные различия установлены также для As, Ru, Au. Состав аваруита в целом повторяет состав тэнита, а концентрации большинства микроэлементов в шрейберзите существенно ниже (табл. 1).

Новые данные позволяют провести более детальную классификацию Онелло. По содержанию большинства элементов он попадает в ряд аномальных членов группы IAB (рис. 3). Внутри этой группы Онелло наиболее близко соответствует подгруппе sHH (с высокими содержаниями Au, Ni) (рис. 4). Однако содержания Ni существенно выше, чем

Минерал <i>N</i>	Тэнит 14	σ	ИНАА 1	Аваруит 2	Шрей- берзит 2
Р	1573	330		1123	153504
Cr	0,32	0,12		4,01	0,35
Mn	0,22	0,05		0,09	7,25
Co	6780	85	6550	4273	1550
Ni	24,12	0,09	21,70	76,05	23,22
Cu	1075	99		1487	1285
Ga	7,21	1,00	1,30	12,87	1,95
Ge	22,19	2,19		39,59	5,53
As	30,42	2,17	66,40	25,90	4,21
Mo	10,50	1,15		15,30	19,46
Ru	2,71	0,21	0,92	3,97	2,62
Rh	0,90	0,06		1,12	0,59
Pd	17,25	0,91		18,03	10,71
Sn	0,75	0,11		1,10	0,12
Sb	1,36	0,18	1,64	0,95	0,12
W	0,24	0,03	0,03	0,52	0,25
Re	0,05	0,01		0,12	0,03
Os	0,46	0,05	1,10	1,30	0,45
Ir	0,58	0,07	0,60	1,06	0,95
Pt	3,07	0,31	3,78	3,86	1,14
Au	3.03	0.14	4.45	2.78	0.93

Таблица 1. Микроэлементный состав минералов метеорита Онелло

Примечание. Ni — мас.%, остальные элементы — ppm (мг/кг), N — количество анализов,  $\sigma$  — стандартное отклонение (для тэнита), ИНАА — данные инструментальноактивационного анализа (остальные — ЛА-ИСП-МС).

у представителей этой подгруппы [3], в которых также не установлено и близких минералогических признаков, таких как присутствие (Fe, Ni)<sub>2</sub>P.

Присутствие аллабогданита в составе метеорита Онелло свидетельствует о высоких *PT*-параметрах образования. Согласно данным статических экспериментов в алмазной ячейке,  $Fe_2P$  со структурой аллабогданита кристаллизуется при >8 ГПа, 1000– 1400 °C [9]. Кроме того, кристаллизация аллабогданита возможна при высоком содержании P в системе, которое должно превышать 13–15 мас.%, что приблизительно соответствует составу перитектики  $Fe_3P = Fe_2P$  + расплав при 0,1 МПа и 23 ГПа [10, 11]. Такой процесс возможен, например, при ударном преобразовании участков родительского тела, обогащённых шрейберзитом или состоящих из шрейберзита.

Соответственно, образование Онелло связано, скорее всего, с вторичным ударным метаморфизмом родительского тела железных метеоритов группы IAB и винонаитов (или тела близкого состава), при котором ударному плавлению и последующей кристаллизации подвергся участок, обогащённый Р и Ni. Это привело к образованию уникальной ассоциации метеорита Онелло с присутствием высокобарических (аллабогданит) и высоконикелевых (аваруит) фаз.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17–17–01177).



**Рис. 3.** Классификационные диаграммы, показывающие соотношение Ni, Ga, Ge в различных группах железных метеоритов (источники в [2] и в базе данных Meteoritical bulletin database (https://www.lpi.usra.edu/meteor/)). Отдельно выделена подгрупа IAB-sHH. Аном. — аномальные метеориты.



Рис. 4. Соотношение концентраций Аи и Ni в подгруппах железных метеоритов ІАВ. Обозначения подгрупп по [3]. USP — подгруппы Udei Station и Pitts, Нгр — несгруппированные метеориты IAB.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kleine T., Touboul M., Bourdon B., Nimmo F., Mezger K., Palme H., Jacobsen S.B., Yin O.Z., Halliday A.N. // Geochim. Cosmochim. Acta. 2009. V. 73. P. 5150-5188.

- 2. Goldstein J.I., Scott E.R.D., Chabot N.L. // Chemie Der Erde-Geochem. 2009. V. 69. P. 293-325.
- 3. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. V. 66. P. 2445–2473.
- 4. Копылова А.Г., Олейников Б.В., Соболев Н.В., Сушко О.А. // ДАН. 1999. Т. 368. № 2. С. 236–238.
- 5. Копылова А.Г., Олейников Б.В. // Зап. ВМО. 2000. № 5. C. 37-43.
- 6. Britvin S.N., Rudashevsky N.S., Krivovichev S.V., Burns P.C., Polekhovsky Y.S. // Amer. Mineral. 2002. V. 87. P. 1245-1249.
- 7. Литасов К.Д., Исикава А., Бажан И.С., Пономарев Д.С., Хирата Т., Подгорных Н.М., Похиленко Н.П. // ДАН. 2018. Т. 478. № 1. С. 81-85.
- 8. Raghavan V. // J. Phase Equilibria and Diffusion. 2010. V. 31. P. 369–371.
- 9. Dera P., Lavina B., Borkowski L.A., Prakapenka V.B., Sutton S.R., Rivers M.L., Downs R.T., Boctor N.Z., Prewitt C.T. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L10301. DOI: 10310.11029/12008GL033867.
- 10. Stewart A.J., Schmidt M.W. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L13201. DOI: 13210.11029/12007GL030138.
- 11. Zaitsev A.I., Dobrokhotova Z.V., Litvina A.D., Mogutnov B.M. // J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1995. V. 91. P. 703-712.

## MINERALOGY, TRACE ELEMENT COMPOSITION, AND CLASSIFICATION OF ONELLO HIGH-Ni ATAXITE K. D. Litasov, A. Ishikawa, A. G. Kopylova, N. M. Podgornykh, Academician of the RAS N. P. Pokhilenko

<sup>1</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation <sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation <sup>3</sup> Tokvo Institute of Technology, Tokvo, Japan <sup>4</sup> Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,

Yakutsk, Russian Federation

## Received May 29, 2018

The trace element composition of the Onello meteorite is analyzed in detail using SEM and LA-ICP-MS. The following Ni contents of minerals are determined (wt %): 23.0-25.4 in taenite, 5.8-8.8 in kamacite, 22-26 in schreibersite, 44–52 in nickelphosphide, 20.6–21.8 in allabogdanite, and 75–81 in awaruite. In the trace element content, the Onello meteorite corresponds to the IAB group of iron meteorites. Inside this group, it mostly matches the sHH subgroup (with high Au and Ni contents). The presence of allabogdanite in the meteorite indicates the high PT parameters of its formation: >8 GPa and 1000–1400 °C. Thus, the formation of the Onello meteorite is related to impact metamorphism of a parental body of iron meteorites of the IAB group and vinonaites, in which a P- and Ni-rich area underwent melting and further crystallization.

Keywords: iron meteorites, ataxite, shock metamorphism, phosphides.