

## Фазовый состав системы Fe-Ni-P при 6 ГПа и 1050-1100

Научный руководитель – Шацкий Антон Фарисович

Коваленко А.В.<sup>1</sup>, Геншпринг А.М.<sup>2</sup>, Степанов К.М.<sup>3</sup>, Сидько Д.Е.<sup>4</sup>

1 - Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Геологический факультет, Кафедра петрологии, Москва, Россия, *E-mail: Kovalenko@geokhi.ru*; 2 - Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Геологический факультет, Кафедра кристаллографии и кристаллохимии, Москва, Россия, *E-mail: ArseniyGenshpring@yandex.ru*; 3 - Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия, *E-mail: stepanov.km@geokhi.ru*; 4 - Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Геологический факультет, Кафедра петрологии, Москва, Россия, *E-mail: danilasidko@yandex.ru*

Содержание фосфора в ядрах планет оценивается на уровне 0,20–0,37 мас. % для Земли, 0,32 мас. % для Марса и 0,1–0,3 мас. % для Луны. Все больше исследователей сходятся во мнении, что железные метеориты могут являться фрагментами металлических ядер космических тел размером до 1000 км и более. Присутствие фосфидов, в частности аллабогданита – минерала высоких давлений в метеоритах, и возможное присутствие фосфора в качестве легкого элемента в металлических ядрах планет обосновывают важность изучения фазовых взаимоотношений в системе Fe-Ni-P под давлением.

Преыдушие исследования фазовых взаимоотношений в металл-фосфидных системах под давлением были ограничены изучением бинарных систем Fe-Fe<sub>2</sub>P и Ni-Ni<sub>2</sub>P. В результате был выявлен широкий спектр промежуточных соединений: никельфосфид Ni<sub>8</sub>P<sub>3</sub>, Ni<sub>5</sub>P<sub>2</sub>, Ni<sub>12</sub>P<sub>5</sub>, Ni<sub>2</sub>P и Fe<sub>2</sub>P-баррингерит, Ni<sub>3</sub>P и Fe<sub>3</sub>P-шрайберзит.

Настоящая работа посвящена изучению фазовых взаимоотношений в тройной взаимной системе Fe-Fe<sub>2</sub>P-Ni<sub>2</sub>P-Ni при 6 ГПа в интервале температур 1050–1100 °С. Эксперименты проведены на многопуансонном прессовом аппарате DIA конструкции в лаборатории геохимии мантии Земли ГЕОХИ РАН.

При этом некоторые из обнаруженных в метеоритах фосфидов, например, меллиниит (Ni, Fe)<sub>4</sub>P, не были обнаружены и остаются загадкой условия их стабильного существования.

Фазовый состав образцов исследовали с помощью электронных микроскопов методами энергодисперсионной спектроскопии (EDS) в ГЕОХИ РАН и дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) в Московском Государственном Университете.

Методом EDS в продуктах опытов были обнаружены: (Fe, Ni)<sub>3</sub>P, (Ni, Fe)<sub>2</sub>P, (Ni, Fe)<sub>4</sub>P, Ni<sub>8</sub>P<sub>3</sub> и Ni<sub>12</sub>P<sub>5</sub>. Следует отметить, что ранее при 6 ГПа в системе Ni-P, фаза Ni<sub>12</sub>P<sub>5</sub> была зафиксирована только при 900 °С, в то время как при больших температурах сообщалось об устойчивости ассоциации Ni<sub>5</sub>P<sub>2</sub> и Ni<sub>2</sub>P. В нашем исследовании Ni<sub>12</sub>P<sub>5</sub> был найден в ассоциации с Ni<sub>8</sub>P<sub>3</sub> при 1100 °С и 6 ГПа.

Методом EBSD в продуктах опытов были идентифицированы следующие фазы: α-железо, Ni-Fe тенит, Ni<sub>2-3</sub>Fe аваруит, (Fe, Ni)<sub>3</sub>P шрайберзит-никельфосфид, (Ni, Fe)<sub>2</sub>P трансжорданит-барранджерит, Ni<sub>8</sub>P<sub>3</sub> и Ni<sub>12</sub>P<sub>5</sub> назоровит. Меллиниит не был подтвержден данными EBSD. Детальное рассмотрение показало, что (Ni, Fe)<sub>4</sub>P представляет из себя тонкие срастания Ni<sub>12</sub>P<sub>5</sub> и Ni<sub>8</sub>P<sub>3</sub> в продуктах закалки металл-фосфидной жидкости. Присутствие α-Fe в продуктах экспериментов, отвечающих области термодинамической устойчивости γ-Fe, объясняется его трансформацией в низкотемпературный полиморф при закалке.

В заключении следует отметить, что многообразие фосфидных фаз, установленных нами в трехкомпонентной системе, совпадает с обнаруженными ранее в бинарных системах

и повторяет многообразие фосфидных минералов в метеоритах. Исключение составляет минерал меллиниит  $(\text{Ni, Fe})_4\text{P}$  область термодинамической устойчивости которого в наших экспериментах не была выявлена.

Авторы выражают искреннюю признательность В.О. Япаскурду за помощь в исследовании методом EBSD. Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 24-17-00253.