

Обнаружена генетическая связь между разными типами первого твердого вещества Солнечной системы

Кальций-алюминиевые включения в метеоритах – это первое тугоплавкое твёрдое вещество Солнечной системы, которое позволило точно оценить её возраст (4567.30 ± 0.16 млн. лет). Учёные подведомственного Минобрнауки России Института геохимии и аналитической химии (ГЕОХИ) им. В.И. Вернадского Российской академии наук, совместно с зарубежными коллегами, изучили Ca,Al-включения (также известные как CAIs или «тугоплавкие включения») из углистых хондритов (каменные метеориты) и продемонстрировали генетическую связь между разными типами тугоплавких включений: CAIs типа А и типа В. Полученные данные могут быть использованы при планировании и проведении космических полётов с целью изучения межзвёздной пыли, досолнечных зёрен и примитивных астероидов Солнечной системы. Результаты опубликованы в *Geochimica et Cosmochimica Acta*¹

Первыми твёрдыми частицами, конденсирующимися из газа солнечного состава, являются минералы Al, Ca и Ti, а затем уже минералы Si, Mg, Fe и другие. В примитивном типе метеоритов - углистых хондритах - как раз и находятся компоненты, так называемые «белые» тугоплавкие Ca,Al-включения, CAIs (Ca,Al-inclusions), состоящие из минералов Al, Ca и Ti. Эти компоненты сохранили следы химического и изотопного изменения (фракционирования), происходившего в остывающем газопылевом диске на самой ранней стадии эволюции Солнечной системы. Вещество CAIs подвергалось плавлению и испарению и изменяло свой первичный химический и изотопный состав.

Коллективом исследователей были изучены тугоплавкие включения из трёх углистых хондритов типа CV3, а именно - Vigarano, North-West Africa 3118 и Allende. По результатам исследования представлена модель эволюции химического состава разных типов CAIs, которая указывает на генетическую связь между разными типами первого твердого вещества Солнечной системы вместо ранее признанного сценария, в котором разные его типы имели разные пути эволюции. Это крайне важно для понимания процессов, происходящих на самых ранних стадиях жизни протопланетного диска и образования Солнечной системы, а также для понимания эволюции изотопного состава кислорода. Кроме того, в связи с расширяющимися проектами доставки вещества с астероидов, необходимы знания обо всех компонентах вещества, которые могут быть представлены на поверхности астероидов разного типа, включая CAIs.

CAIs типа А (мелилитовые) продемонстрировали минералогические и текстурные свидетельства постепенного перехода в CAIs типа В (млеилит-пироксен-анортитовые), указывающие на то, что включения типа В образовались в результате эволюции CAI типа А (например, CAI 1N-b, Рис.1). Образование анортита и пироксена в типе В явно требовало добавления кремнезема в систему при реакции CAIs типа А с небулярным газом. Согласно новой гипотезе пироксен образуется почти изохимически в результате реакции перовскита с мелилитом в расплаве, в сильно восстановительных условиях. Тектурные различия показывают, что CAIs типа А были расплавлены лишь частично и формировали переходные типы, в то время как CAIs типа В были расплавлены полностью и испытали полную кристаллизацию из расплава. Изотопы кислорода четырех CAIs (переходных к типу В) подтверждают образование богатого Ti пироксена,

¹ G. J. MacPherson, A. N. Krot, N. T. Kita, E. S. Bullock, K. Nagashima, T. Ushikubo, M. A. Ivanova (2022) The Formation of Type B CAIs: Evolution from Type A CAIs. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **321**, 15, 343-374. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.12.033>

обедненного ^{16}O , из перовскита, обедненного ^{16}O . Однако изначально перовскит должен был быть обогащен ^{16}O , как и все конденсаты, унаследовавший изотопный состав кислорода Солнца, обогащенного ^{16}O , до смешения с кислородом, обедненным ^{16}O , что подтверждает тем самым существование двух изотопных резервуаров кислорода ранней Солнечной системы – богатого и бедного ^{16}O .

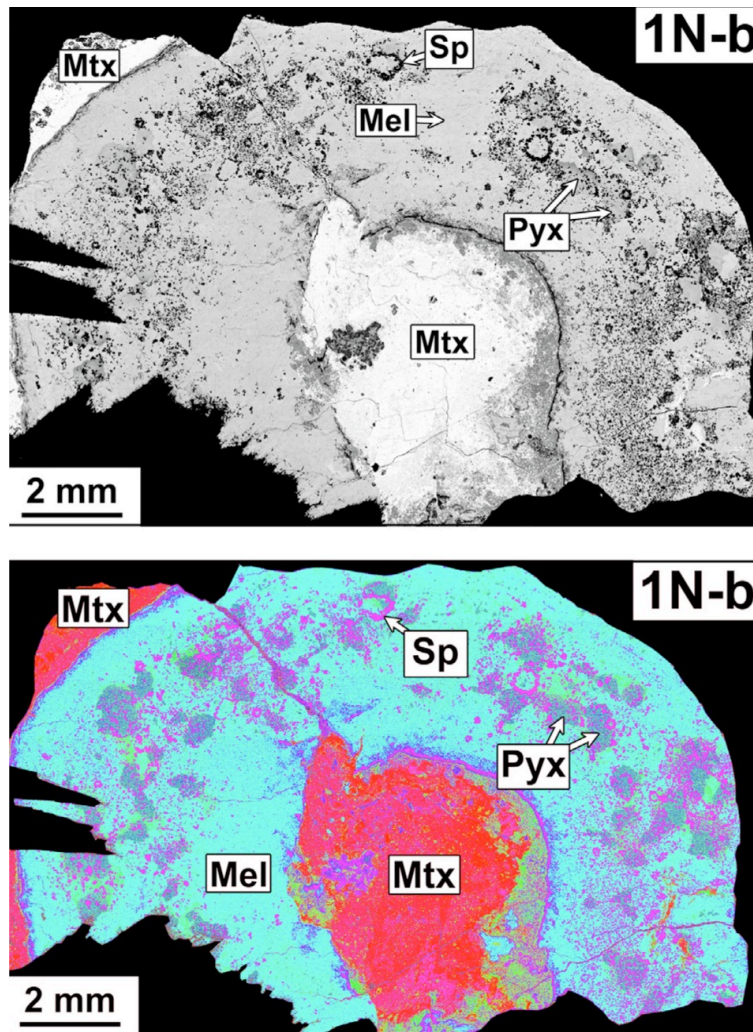


Рисунок 1. Пример CAI переходного типа между CAI типа А и CAI типа В. Верхний рисунок – изображение в обратно-рассеянных электронах CAI 1N-b из CV3 хондрита NWA 3118; нижний рисунок – карта элементов в рентгеновских лучах K α Mg (красный), Ca (зеленый) и Al (голубой). Обозначения: Mtx-матрица хондрита, Mel – мелилит, Pyx – пироксен, Sp – шпинель.