

## РЕДКОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ СИЛИКАТНЫХ МИНЕРАЛОВ В ХОНДРАХ И МАТРИЦЕ МЕТЕОРИТА БУШХОВ

© 2020 г. К. Г. Суханова<sup>а, \*</sup>, С. Г. Скублов<sup>а, б, \*\*</sup>, О. Л. Галанкина<sup>а</sup>,  
Э. В. Оболонская<sup>б</sup>, Е. Л. Котова<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский горный университет, 21 линия, 2, Санкт-Петербург, 199106 Россия

\*e-mail: [cris.suhanova92@yandex.ru](mailto:cris.suhanova92@yandex.ru)

\*\*e-mail: [skublov@yandex.ru](mailto:skublov@yandex.ru)

Поступила в редакцию 17.12.2019 г.

После доработки 25.02.2020 г.

Принята к публикации 03.03.2020 г.

В работе представлены результаты исследования (SIMS, SEM-EDS) силикатных минералов из радиально-лучистой и зернистой хондр обыкновенного равновесного хондрита Бушхов (L6). Рассматриваются геохимические особенности состава оливина, пироксена и плагиоклаза из хондр и матрицы метеорита. Установлено сохранение хондритовых отношений Ca/Al, Y/No и прямой корреляции La и Yb в пироксене и плагиоклазе из радиально-лучистой хондры, а также отсутствие следов космохимического фракционирования в оливине и плагиоклазе зернистой хондры. Сохранение хондритовых отношений в силикатах радиально-лучистой хондры может указывать на ее образование в результате прямой конденсации, тогда как отсутствие хондритовых отношений в минералах зернистой хондры отражает процесс ее образования при плавлении рефракторных минеральных предшественников. Обе хондры демонстрируют признаки взаимодействия с небулярным газом и проявления термального метаморфизма. Различия в содержании редких элементов в силикатных минералах хондр и матрицы метеорита отражают процесс быстрого остывания силикатных фаз от центра хондры к матрице метеорита.

**Ключевые слова:** метеорит Бушхов, хондры, оливин, пироксен, плагиоклаз, редкие элементы, редкоземельные элементы, ионный зонд

**DOI:** 10.31857/S0016752520120067

Хондры являются главной составной частью хондритов и представляют собой сферулы субмиллиметровых размеров. Округлая форма хондр и их оливин-пироксен-плагиоклазовый состав указывают на образование хондр в результате быстрого охлаждения капель расплава. По петрографическим характеристикам хондры подразделяются на порфиоровые (оливиновые, пироксеновые и оливин-пироксеновые) и непорфиоровые (колосниковые, радиально-лучистые, скрытокристаллические и зернистые).

Образование хондр, в основном, рассматривается как результат плавления минеральных предшественников хондр или прямой конденсации небулярного газа в расплав. По экспериментальным данным установлено, что порфиоровые хондры испытали нагрев ниже температуры ликвидуса расплава (1400–1700°C) и остывали довольно медленно (1–500°C/ч), колосниковые хондры были нагреты чуть выше температуры ликвидуса, но остывали быстрее (500–3000°C/ч), радиально-лучистые хондры были нагреты сильно выше тем-

пературы ликвидуса и остывали очень быстро (1000–3000°C/ч). Источник тепла для разогрева хондр до сих пор неизвестен, но рассматриваются такие механизмы нагревания как коллизии планетезималей, ударные волны, молнии (нагрев электрическим разрядом), образование в турбулентной или многослойной протосолнечной туманности или нагрев от трения скоплений пыли, падающих в срединную плоскость туманности (Chondrules, 2018).

Геохимия редких элементов является эффективным инструментом для изучения процессов образования хондр (Jasquet et al., 2012). Распределение редких элементов среди различных фаз, в частности силикатов хондр, очень чувствительно к условиям их образования. В то время как валовые составы хондр и состав минералов из них по главным элементам определяются уже несколько десятилетий, масс-спектрометрия вторичных ионов (SIMS) практически не использовалась для исследования содержания редких элементов в минералах. В порфиоровых хондрах типа I (магнезиаль-

ный) и II (ферромагнезиальный) углистых и неравновесных обыкновенных хондритов было обнаружено, что относительно высокое содержание несовместимых элементов в оливине отражает образование хондр путем фракционной кристаллизации и отвечает скорости охлаждения ниже  $10^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  (Jacquet et al., 2012, 2015). Тем не менее, содержание LREE в низко-Са пироксене, превышающее содержание характерное для равновесного распределения элементов, регистрирует скорость охлаждения порядка  $1000^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ . Большая разница в скоростях остывания оливина и пироксена может объясняться ускоряющейся скоростью охлаждения после нагревания хондры или другим термическим событием, отличным от образования оливина. Содержание редкоземельных элементов в оливине и низко-Са пироксене из равновесных хондритов сопоставимо и отражает кристаллизацию в условиях равновесного распределения (Dutta et al., 2017).

Непорфиновые хондры микрозернистой, колосниковой и радиально-лучистой структур равновесного обыкновенного хондрита L/LL5 Княгиня характеризуются сильно фракционированным содержанием главных и редких элементов, которое объясняется диффузией на поздней стадии метаморфизма (Varela et al., 2012). Хондры обогащены Са по отношению к хондритовому отношению Са/Al, которое сохраняется в большинстве хондр из неравновесных хондритов. Отклонение отношения Са/Al от хондритовых значений, вероятно, зависит от соотношения стекла и плагиоклаза, который был образован до вторичных изменений хондр (термальный метаморфизм, взаимодействие с небулярным газом и т.д.). Содержание рефракторных элементов в хондрах в значительной степени варьирует от 0.1 до 14 хондритовых отношений. Для всех хондр характерна положительная Eu-аномалия и плавное обогащение HREE. По сравнению с валовым содержанием редких элементов в хондрах неравновесных хондритов, хондры равновесных хондритов демонстрируют более сложный характер распределения редких элементов. Хондры обеднены LREE по сравнению с HREE и HFSE, что отражает мобильность LREE. Отношение Y/No соответствует хондритовому. В целом хондры обеднены летучими элементами (Varela et al., 2012).

Таким образом, редкоэлементный состав минералов порфириновых, непорфириновых хондр и матрицы хондритов позволяет раскрыть историю образования хондр и пролить свет на механизмы их образования.

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Химический состав минералов на уровне главных элементов определен методом SEM-EDS в ИГД РАН на сканирующем электронном мик-

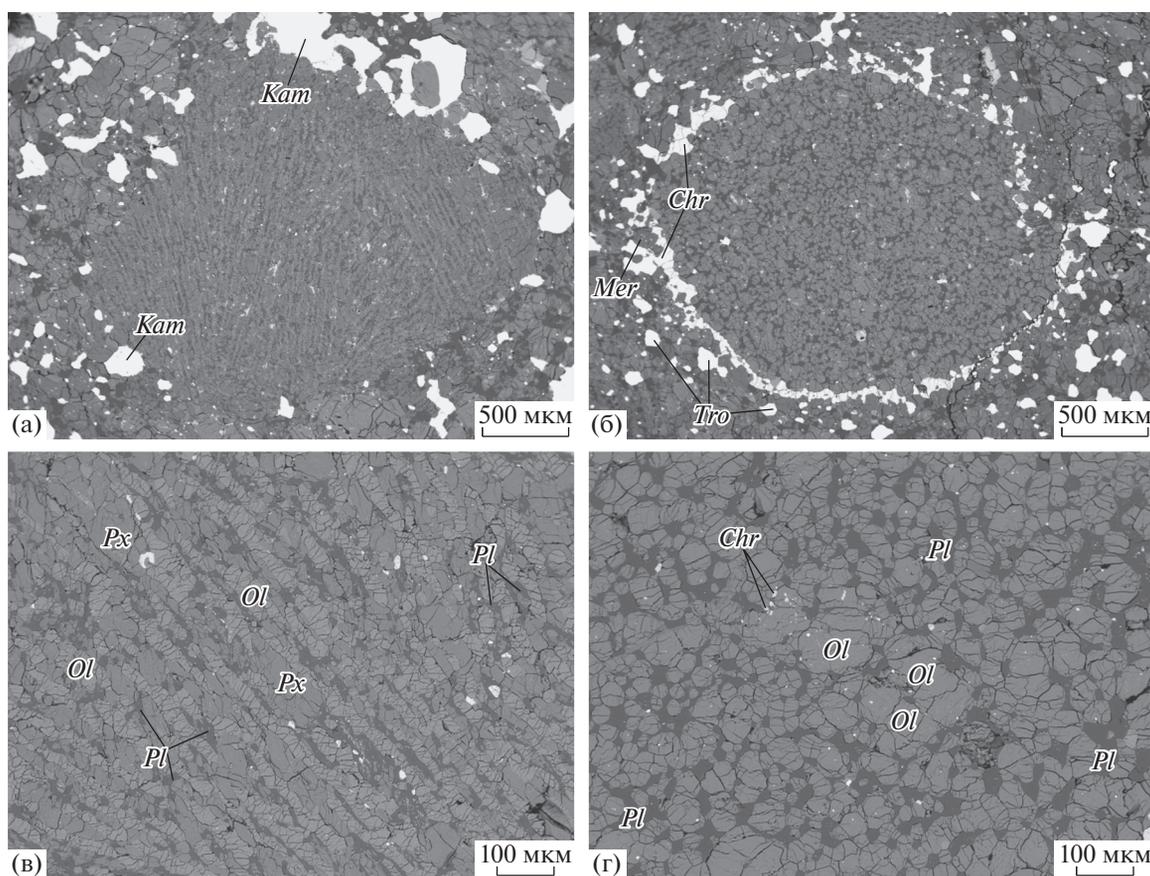
роскопе JEOL JSM-6510LA с энергодисперсионной приставкой JED-2200. Вещество метеорита было помещено в стандартную шайбу из эпоксидной смолы, которая после полировки напылялась углеродом. Точечные определения состава минералов выполнялись с использованием электронного луча с ускоряющим напряжением в 20 кВ и током 1 нА, размер пятна пучка составлял 1–2 мкм. Время накопления каждого спектра составляло 35 с, в качестве стандартов использовались природные минералы, чистые оксиды и металлы. Для коррекции матричного эффекта использовался алгоритм ZAF.

Содержание редких и редкоземельных элементов (REE) в минералах определено методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на ионном микрозонде Cameca IMS-4f в ЯФ ФТИ-АН по методике, изложенной в работе (Соболев, Батанова, 1995). Перед измерениями препарат напылялся золотом. Условия съемки на ионном микрозонде Cameca IMS-4f: первичный пучок ионов  $16\text{O}_2^-$ , диаметр пучка ~20 мкм; ток ионов 5–7 нА; ускоряющее напряжение первичного пучка 15 кэВ. Погрешность измерений не превышала 10% для примесей с концентрациями  $>1$  ppm и 20% для концентраций  $<1$  ppm. Редкоэлементный состав породообразующих минералов определялся максимально близко к точкам анализа главных элементов методом SEM-EDS. Спектры распределения REE минералов нормировались к Si хондриту (Palme et al., 2014).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Метеорит Бушхов (Buschhof) относится к типу L6 обыкновенных оливин-гиперстеновых хондритов. Первые минералогические и химические исследования метеорита были проведены в 1864 г. (Grewingk, Schmidt, 1864), но результаты химических анализов позже были признаны несостоятельными (Urey, Craig, 1953). В 1961 г. Л.Г. Кваша описала минералы никелистого железа – тэнит и плессит (Кваша, 1961), позднее И.А. Юдиным (1970) был описан минеральный состав метеорита и проведен его спектральный анализ. Химический анализ метеорита методами мокрой химии был выполнен в 1974 г. (Дьяконова, Харитоновна, 1974), далее была изучена средняя плотность хондр метеорита (Wilkison, Robinson, 2000). Однако до настоящего времени изучение состава минералов метеорита Бушхов современными методами не проводилось.

Сохранились описания свидетелей падения метеорита Бушхов. Известно, что 2 июня 1863 г. в 7:30 утра по местному времени на территорию современной Латвии (Салский край) в лесную область Курляндии с сильным нарастающим гулом и серией «пушечных» взрывов упал метеорит весом 5 кг. Опасаясь начала военных действий, оче-



**Рис. 1.** Фотография в обратно-отраженных электронах радиально-лучистой (а, в – увеличенный фрагмент центральной части) и зернистой (б, г – увеличенный фрагмент центральной части) хондр метеорита Бушхов. *Ol* – оливин, *Px* – пироксен, *Pl* – плагиоклаз, *Tro* – троилит, *Chr* – хромит, *Kam* – камасит.

видцы обнаружили тяжелый черный камень, который выкопали из-под земли. Несколько экземпляров были разбиты и разобраны нашедшими; дошедшая до нашего времени основная часть метеорита сохранила коническую форму и большую часть коры плавления (Grewingk, Schmidt, 1864). Материал для настоящего исследования был предоставлен Горным музеем Санкт-Петербургского горного университета, куда экземпляр метеорита поступил в 20-х годах прошлого века в составе коллекции метеоритов Э.А. Купффера.

Минералого-петрографическое исследование метеорита Бушхов показывает отсутствие трещин и карманов плавления в метеорите и малое количество нерегулярных трещин в оливине. Вышеперечисленное позволяет примерно оценить степень ударного метаморфизма как S1–S2. Отсутствие следов химического выветривания в нем и принадлежность метеорита к группе падений указывает на малую степень выветривания W0 (Dodd, Hutcheon, 2004).

В метеорите встречаются зернистые, колосниковые и радиально-лучистые хондры, различные по минеральному составу, морфологии и разме-

рам. Наиболее крупная хондра метеорита имеет размер около 2 мм в диаметре, по структуре она относится к зернистому типу (GOP) и отличается наличием хромитовой и троилитовой каймы. Хромитовая кайма практически полностью опоясывает зернистую хондру, тогда как троилитовая кайма представлена отдельными зернами, практически равномерно распределенными вокруг хромитовой каймы. Размер хондр колосниковой и радиально-лучистой структуры не превышает 0.5 мм в диаметре, их границы с матрицей нечеткие, каймы отсутствуют. В радиально-лучистой и зернистой хондрах (рис. 1) метеорита Бушхов были изучены оливин, низко-кальциевый пироксен и плагиоклаз.

Ортопироксен (En 76–78, Wo 1–2), по составу близкий к бронзиту, присутствует в виде ксеноморфных мелкозернистых сростаний в хондрах и матрице метеорита. Иногда встречаются изометричные зерна небольшого размера (до 100 мкм) в центральной части хондр.

Низко-Са пироксен радиально-лучистой хондры по составу близок к валовому составу непорфировых хондр равновесных хондритов (Varela et al.,

2012), но отличается повышенным содержанием Са и отклоняющимся от хондритового Са/Al отношением, а также обедненностью LREE по сравнению с HREE ( $0.2 < (La/Sm)_N < 1.0$ ;  $0.03 < (Ce/Yb)_N < 0.3$ ). По сравнению с низко-Са пироксеном углистых и неравновесных обыкновенных хондритов (Jacquet et al., 2012, 2015) пироксен метеорита Бушхов обогащен REE (LREE  $0.3-0.9 \times CI$ , HREE  $1.8-3.0 \times CI$ ), но демонстрирует более выраженное преобладание HREE над LREE (табл. 2). Нормированное содержание редких элементов в пироксене хондры и матрицы метеорита не дифференцировано (рис. 2а), состав пироксена близок к хондритовому (здесь и далее имеется в виду нормировка к CI хондритам). Отмечается прямая корреляция La и Yb. Также для пироксена из центра хондры и матрицы сохраняется хондритовое отношение Y/No, но пироксен из каймы хондры ему не соответствует, поскольку сильно обогащен Y. Содержание рефракторных элементов (Zr, Hf, Y) в низко-Са пироксене метеорита близко к хондритовому, а умеренно летучие элементы не демонстрируют геохимического фракционирования. Установлено, что содержание Ti и Nb превышено относительно хондритовых значений, содержание несовместимых летучих элементов Sr и Ba обеднено. Содержание совместимых летучих V и Cr близко к хондритовому, количество Ni очень мало (рис. 2а).

Содержание Nb, Sr, Ba, Ni и Hf в низко-Са пироксене дифференцировано (рис. 2а). Пироксен центральной части хондры обогащен Nb, Sr, Ba и обеднен Ni относительно пироксена матрицы метеорита. Содержание Hf в пироксене каймы хондр близко к хондритовому, тогда как пироксен из центра хондры и матрицы обеднен им. Прямая корреляция Ti и Ba в низкокальциевом пироксене отражает различную скорость остывания пироксена в центре, кайме хондры и матрице метеорита (рис. 3а). Обогащенность пироксена хондры несовместимыми элементами отражает быструю скорость остывания и отсутствие равновесных условий кристаллизации (Ruzicka et al., 2008).

Оливин (Fo 74-76) встречается в хондрах разных структур и в матрице метеорита. Изометричные округлые зерна оливина зернистой хондры значительно варьируют в размерах от 20 до 200 мкм. Оливин матрицы метеорита имеет крупнозернистый короткопризматический габитус (до 300-700 мкм по удлинению). Содержание главных компонентов в оливине в целом выдержано вне зависимости от его расположения в структуре хондры (табл. 1).

Оливин зернистой хондры метеорита Бушхов отличается отсутствием дифференцирования LREE и HREE ( $0.3 < (Ce/Yb)_N < 1.0$ ). В целом состав редких элементов в оливине соответствует оливину из неравновесных хондритов (Jacquet et al., 2015). Относительно хондритовых содержаний

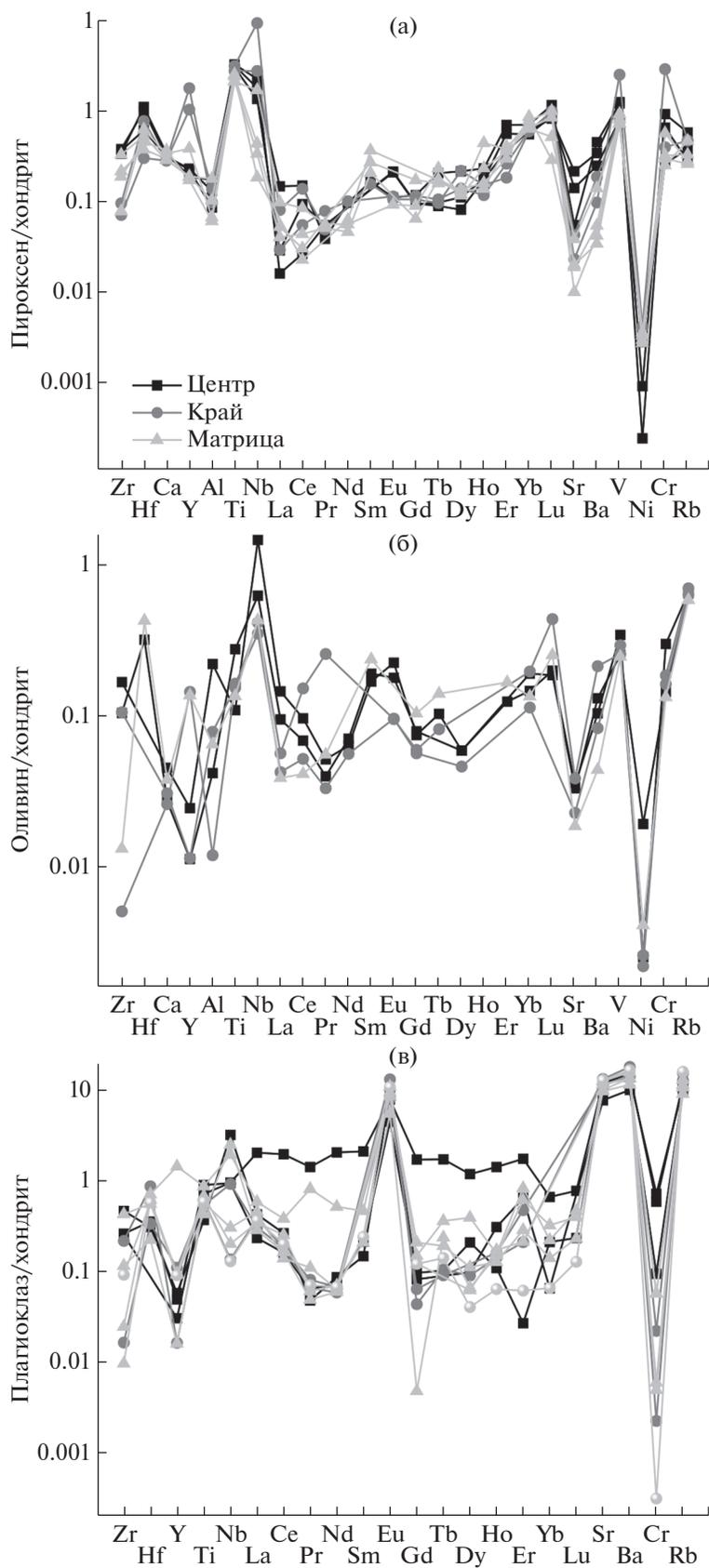
оливин обеднен редкими и редкоземельными элементами. В оливине сохранено субхондритовое Са/Al отношение, но прямой корреляции La и Yb и хондритового отношения Y/No не наблюдается. Содержание рефракторных элементов (Zr, Hf, Y) сильно дифференцировано в отличие от умеренно летучих (Ti, Nb) и летучих элементов (Sr, Ba) (рис. 2б). В оливине содержание несовместимого Nb и совместимых V и Cr близко к хондритовому значению, но содержание несовместимых Sr и Ba и совместимого Ni крайне незначительно. Схожее поведение умеренно летучих и летучих элементов наблюдается и в пироксене радиальной-лучистой хондры (табл. 2).

Оливин центральной части зернистой хондры отличается повышенным содержанием Nb и Ni относительно оливина каймы и матрицы метеорита. Оливин центра хондры обогащен несовместимыми элементами. При этом оливин матрицы метеорита отличается от оливина центра хондры по Ce/Yb отношению (0.3 и 0.9, соответственно).

В оливине из центра хондры наблюдается отрицательная корреляция Nb и V и обогащенность этими элементами относительно оливина каймы и матрицы (рис. 3б). Обратная корреляция между рефракторными и умеренно летучими элементами может отражать либо фракционирование газовой фазы, либо смешение между различными минеральными предшественниками (Ruzicka et al., 2008; Jacquet et al., 2012, 2015). Содержание V в оливине рассматривается как индикатор окислительно-восстановительных условий, поскольку в восстановительной среде он становится более совместимым (Ruzicka et al., 2008). Возможно, обратная корреляция Nb/V отражает формирование оливина матрицы и каймы хондры в более окислительных условиях по сравнению с оливином центра хондры. Однако отсутствие следов геохимического фракционирования Y/No и La и Yb, наряду с отрицательной корреляцией Nb и V, также может свидетельствовать об образовании хондры путем плавления минеральных предшественников.

Плагиоклаз, представленный олигоклазом (An 11-14, Or 6-7), заполняет интерстиции между оливином и пироксеном и образует плохо раскристаллизованные ксеноморфные зерна. Состав плагиоклаза слабо изменчив, но в хондрах заметно увеличивается примесь FeO (1.14-0.7 мас. %) по сравнению с плагиоклазом матрицы метеорита (до 0.4 мас. % FeO, табл. 1).

Состав плагиоклаза радиально-лучистой и зернистой хондр метеорита Бушхов в целом сходен и характеризуется преобладанием LREE над HREE ( $0.7 < (Ce/Yb)_N < 3.9$ ), La =  $0.2-2.0 \times CI$ ), сильно проявленной положительной Eu-аномалией и незначительной отрицательной аномалией по Yb. Содержание редких и редкоземельных элементов и особенности их фракционирования



**Рис. 2.** Спайдердиаграмма для редких элементов в пироксене (а), оливине (б) и плагиоклазе (в), нормированных к CI хондритам. Здесь и на рис. 3 показаны составы центральной (центр) и краевой (край) частей хондр и матрицы метеорита Бушхов.

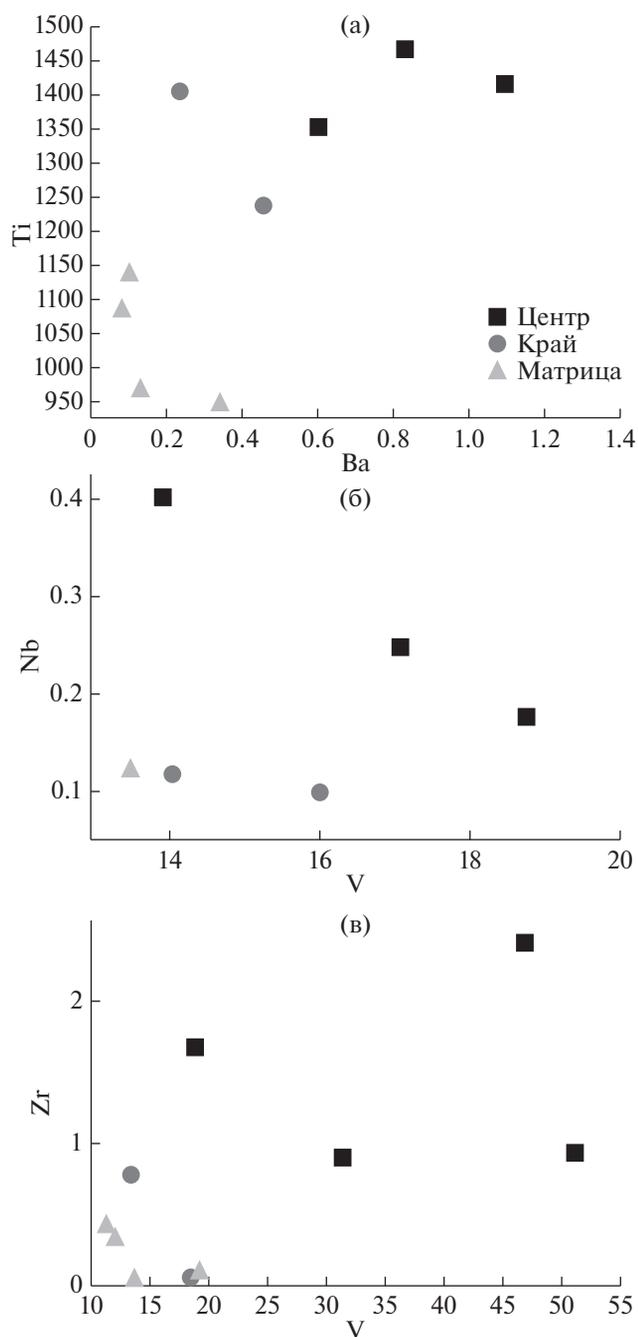


Рис. 3. Соотношение редких элементов (ppm) в пироксене (а), оливине (б) и плагиоклазе (в).

в плагиоклазе близки к стеклу углистых хондритов (Jacquet et al., 2012). Нормализованное содержание редких элементов в этом минерале близко к хондритовому. Плагиоклаз в целом обеднен рефракторными элементами и обогащен летучими, что является характерной особенностью этой минеральной фазы (Jacquet et al., 2012). Содержание Nb, V и Sr в плагиоклазе хондр лежит в диапазоне хондритовых значений, однако значительно уменьшается в матрице (рис. 2в).

Прямая корреляция Zr и V (рис. 3в) может отражать неравновесную кристаллизацию плагиоклаза в условиях быстрого охлаждения. Поведение LREE и Zr является наиболее чувствительным к отклонению от равновесия, вызванному быстрым охлаждением хондры (Ruzicka et al., 2008).

Плагиоклаз радиально-лучистой хондры в отличие от плагиоклаза зернистой хондры характеризуется прямой корреляцией La и Yb, хондритовым отношением Y/No и меньшим количеством рефракторных элементов. Вышеперечисленные особенности, а также отсутствие следов космохимического фракционирования редких элементов в оливине из зернистой хондры, указывают на различные процессы образования радиально-лучистой и зернистой хондр.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В настоящее время широко обсуждаются два различных механизма образования хондр и кристаллизации составляющих их силикатных фаз: прямая конденсация небулярного газа в расплав и плавление рефракторных минералов-предшественников (Engler et al., 2007; Ruzicka et al., 2008; Jacquet et al., 2012, 2015; Varela et al., 2012, 2015, 2018, 2019).

При образовании хондры путем конденсации в последней должно наблюдаться нефракционированное отношение Ca/Al, положительная корреляция La и Yb, нефракционированное содержание рефракторных редких литофильных элементов (RLTE, Engler et al., 2007).

После кристаллизации хондра остается открытой геохимической системой, и содержание редких элементов может изменяться вследствие метасоматических реакций обмена с небулярным газом, диффузии при термальном метаморфизме на родительском теле, взаимодействия с водной фазой (Varela et al., 2019). Содержание RLTE (Zr, Ti, Nb) может нарушаться из-за выноса высокотемпературных Ca- и Al-богатых фаз. При метасоматических реакциях с небулярным газом совместимые умеренно летучие элементы (Sr, V и Mn) могут достигать в оливине и пироксене содержания, близкого к хондритовому. При этом содержание умеренно летучих несовместимых элементов (Sr и Ba) может оставаться незначительным.

Мобилизация несовместимых элементов происходит в результате диффузии при термальном метаморфизме. При этом происходит обогащение оливина и пироксена Sr и Ba за счет обменных реакций (в основном с участием Ca) с мезостазином и плагиоклазом. Содержание HREE и HFSE (Zr, Hf, Th, U, Ti, Ta и Nb) в целом остается неизменным, а несовместимые рефракторные элементы (LREE) выносятся за пределы хондры. Высокое содержание несовместимых рефракторных элементов в оливине, пироксене и мезоста-

**Таблица 1.** Состав силикатных минералов метеорита Бушхов по главным элементам (мас. %)  
Радиально-лучистая хондра

Компоненты	Пироксен										Плагиоклаз					
	30	31	32	8	9	5	22	23	24	1	3	28	6	7	12	
	центр	центр	центр	край	край	матрица	матрица	матрица	матрица	центр	край	край	матрица	матрица	матрица	
SiO <sub>2</sub>	56.52	54.78	55.30	55.93	56.53	56.86	55.48	55.61	56.54	66.52	65.64	65.64	66.24	66.85	66.99	
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.43	0.39	0.33	0.18	—	0.24	0.22	0.15	—	—	—	—	—	—	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0.35	0.25	0.38	—	—	—	—	—	21.66	21.82	21.82	22.01	21.46	21.77	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.17	0.64	—	0.20	0.32	0.15	0.25	0.47	—	—	—	—	—	—	
FeO	13.75	14.79	14.74	14.48	14.33	14.82	14.93	14.75	14.18	0.72	0.67	0.67	0.57	0.27	0.44	
MnO	0.46	0.36	0.27	0.60	0.47	0.28	0.43	0.30	0.45	—	—	—	—	—	—	
MgO	28.20	27.63	27.64	27.58	27.66	28.47	27.71	27.95	27.12	—	—	—	—	—	—	
CaO	0.63	0.78	0.76	0.67	0.63	0.81	0.95	0.87	0.97	2.44	2.10	2.10	2.28	2.30	2.06	
Na <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.43	8.30	8.65	8.80	7.83	8.38	
K <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.23	1.21	1.12	1.27	1.29	1.25	
Сумма	99.86	99.29	99.99	99.97	100.00	101.56	99.89	99.95	99.88	100.00	99.24	100.00	101.17	100.00	100.89	

## Зернистая хондра

Компоненты	Оливин						Плагиоклаз					
	2	18	19	4	26	10	15	16	17	21	25	
	центр	центр	центр	край	край	матрица	центр	центр	центр	матрица	матрица	
SiO <sub>2</sub>	38.63	39.59	38.93	38.62	38.34	38.56	66.65	66.45	66.78	65.45	66.35	
TiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	21.96	21.84	21.44	21.91	21.42	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
FeO	24.24	23.93	23.66	23.49	23.60	24.32	0.85	1.10	0.68	0.54	0.78	
MnO	0.37	0.18	—	0.33	0.26	0.50	—	—	—	—	—	
MgO	36.57	37.29	37.26	37.53	37.69	37.47	—	—	—	—	—	
CaO	—	—	—	—	—	—	2.12	2.12	2.35	2.23	2.24	
Na <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	—	7.89	7.04	7.57	8.50	8.07	
K <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	—	1.19	1.06	1.18	1.37	1.15	
Сумма	99.81	100.99	99.85	99.97	99.89	100.85	100.66	99.61	100.00	100.00	100.01	

Примечания. Прочерк — содержание элемента ниже порога обнаружения. Содержание элементов <0.25 мас. % имеют значительную погрешность.

Таблица 2. Редкоэлементный состав (ppm) силикатных минералов метеорита Бушхов  
Радиально-лучистая хондра

Ком- понен- ты	Пироксен												Плагиоклаз																				
	30		31		32		8		9		5		22		23		24		1		3		28		6		7		12				
	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	центр	край	
Ca	2852	3118	2846	2582	2653	3086	2637	2697	3361	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
Al	724	1458	1093	1174	822	562	864	1501	513	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
V	66.2	43.9	68.7	44.0	137.6	44.5	40.2	39.7	50.7	46.9	18.4	13.4	18.4	13.4	18.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	
Cr	1718	693	2426	1049	7625	852	663	781	1499	1534	5.81	57.0	5.81	57.0	5.81	57.0	5.81	57.0	5.81	57.0	5.81	57.0	5.81	57.0	5.81	57.0	5.81	57.0	5.81	57.0	5.81	57.0	
Rb	0.66	0.88	1.35	1.10	1.09	0.77	1.09	0.61	0.65	29.9	35.2	29.3	35.2	29.3	35.2	29.3	35.2	29.3	35.2	29.3	35.2	29.3	35.2	29.3	35.2	29.3	35.2	29.3	35.2	29.3	35.2	29.3	
Sr	0.43	1.10	1.69	0.33	0.18	0.08	0.30	0.16	0.15	83.7	101.8	88.4	101.8	88.4	101.8	88.4	101.8	88.4	101.8	88.4	101.8	88.4	101.8	88.4	101.8	88.4	101.8	88.4	101.8	88.4	101.8	88.4	
Y	0.33	0.28	0.34	1.51	2.62	0.56	0.28	0.28	0.25	1.06	0.16	0.02	0.16	0.02	0.16	0.02	0.16	0.02	0.16	0.02	0.16	0.02	0.16	0.02	0.16	0.02	0.16	0.02	0.16	0.02	0.16	0.02	
Zr	1.38	1.22	1.33	0.26	0.35	0.28	1.20	0.78	0.69	2.41	0.06	0.78	0.06	0.78	0.06	0.78	0.06	0.78	0.06	0.78	0.06	0.78	0.06	0.78	0.06	0.78	0.06	0.78	0.06	0.78	0.06	0.78	
Nb	0.51	0.38	0.64	0.78	2.64	0.05	0.48	0.12	0.10	0.29	0.04	0.26	0.04	0.26	0.04	0.26	0.04	0.26	0.04	0.26	0.04	0.26	0.04	0.26	0.04	0.26	0.04	0.26	0.04	0.26	0.04	0.26	
Ba	1.09	0.60	0.83	0.46	0.24	0.10	0.34	0.08	0.13	32.6	43.0	33.7	43.0	33.7	43.0	33.7	43.0	33.7	43.0	33.7	43.0	33.7	43.0	33.7	43.0	33.7	43.0	33.7	43.0	33.7	43.0	33.7	
Hf	0.11	0.12	0.07	0.03	0.08	0.07	0.06	0.04	0.05	0.18	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	0.04	0.09	
Ti	1414	1352	1467	1237	1405	1136	946	1083	966	299	265	238	265	238	265	238	265	238	265	238	265	238	265	238	265	238	265	238	265	238	265	238	
Ni	2.66	30.7	10.0	44.1	46.2	30.0	36.4	39.5	32.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
La	0.04	0.01	0.00	0.02	0.01	b.d.l.	0.02	0.01	0.01	0.49	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.07	
Ce	0.09	0.06	0.02	0.09	0.03	0.01	0.05	0.02	0.03	1.20	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Pr	b.d.l.	0.01	0.01	b.d.l.	0.01	b.d.l.	0.01	b.d.l.	b.d.l.	0.13	0.01	0.01	0.01	0.01	0.13	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.13	0.01	0.01	0.01	0.01	0.13	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Nd	0.05	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.05	0.03	0.03	b.d.l.	0.02	0.96	0.03	0.03	0.03	0.03	0.96	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.96	0.03	0.03	0.03	0.03	0.96	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
Sm	0.03	b.d.l.	b.d.l.	0.02	b.d.l.	0.06	b.d.l.	0.04	0.03	0.32	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.32	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.32	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.32	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	
Eu	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	b.d.l.	0.01	b.d.l.	b.d.l.	0.46	0.77	0.47	0.77	0.47	0.46	0.77	0.47	0.47	0.47	0.46	0.77	0.47	0.47	0.47	0.46	0.77	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	
Gd	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	b.d.l.	0.02	0.04	0.01	0.35	0.01	0.01	0.01	0.01	0.35	0.01	0.01	0.01	0.01	0.35	0.01	0.01	0.01	0.01	0.35	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Tb	0.01	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.06	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.06	0.06	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.06	0.06	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	
Dy	0.06	0.02	0.03	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.30	0.02	0.02	0.02	0.02	0.30	0.02	0.02	0.02	0.02	0.30	0.02	0.02	0.02	0.02	0.30	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
Ho	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Er	0.12	0.09	0.06	0.03	0.04	0.06	0.06	0.05	0.07	0.29	0.03	0.08	0.03	0.08	0.29	0.03	0.08	0.08	0.08	0.29	0.03	0.08	0.08	0.08	0.29	0.03	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	
Yb	0.12	0.09	0.10	0.10	0.10	0.13	0.11	0.15	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Lu	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
REE	0.57	0.35	0.28	0.39	0.34	0.38	0.36	0.36	0.36	4.76	1.09	0.79	1.09	0.79	4.76	1.09	0.79	0.79	0.79	4.76	1.09	0.79	0.79	0.79	4.76	1.09	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	
LREE	0.21	0.08	0.04	0.14	0.10	0.10	0.11	0.07	0.10	3.55	1.01	0.68	1.01	0.68	3.55	1.01	0.68	0.68	0.68	3.55	1.01	0.68	0.68	0.68	3.55	1.01	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	
HREE	0.36	0.26	0.24	0.25	0.24	0.28	0.25	0.29	0.26	1.21	0.08	0.10	0.08	0.10	1.21	0.08	0.10	0.10	0.10	1.21	0.08	0.10	0.10	0.10	1.21	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	



зисе отражает медленную скорость охлаждения после нагревания в результате метаморфизма. Отношение Y/No остается неизменным при метаморфизме и соответствует хондритовому при образовании хондр в результате прямой конденсации в расплав.

Состав редких элементов в пироксене из радиально-лучистой хондры, вероятно, был изменен в результате метасоматических реакций обмена с небулярным газом, что проявилось в обогащенности совместимыми умеренно летучими элементами, и разогрева при термальном метаморфизме (обеднение LREE и обогащение Ca). Тем не менее, близкое к хондритовым содержание рефракторных элементов, хондритовое отношение Y/No и прямая корреляция La и Yb отражают кристаллизацию пироксена в результате прямой конденсации из небулярного газа в расплав.

Состав редких элементов в оливине зернистой хондры отражает те же вторичные процессы метасоматизма и термального метаморфизма, что и наблюдаемые в пироксене радиально-лучистой хондры. Однако отсутствие корреляции La и Yb, сильное отклонение отношения Y/No от хондритовых значений, сильное фракционирование рефракторных элементов и высокое содержание несовместимых элементов в оливине, по-видимому, отражают его происхождение в результате перекристаллизации рефракторных минеральных предшественников. Различия в составе редких элементов в плагиоклазе из радиально-лучистой и зернистой хондры также подтверждают отличающиеся механизмы образования этих хондр.

Высокое содержание несовместимых элементов в пироксене, оливине и плагиоклазе изученных хондр указывает на их более быструю кристаллизацию по сравнению с минералами матрицы метеорита.

Таким образом, радиально-лучистая и зернистая хондры метеорита Бушхов демонстрируют признаки образования в результате различных космохимических процессов. Различия в составе редких элементов силикатных минералов хондры и матрицы метеорита Бушхов объясняются различными физико-химическими условиями кристаллизации, такими как скорость остывания, окислительно-восстановительные условия и др., вызванными нагреванием в результате термального метаморфизма.

Авторы благодарят С.Г. Симакина и Е.В. Потанова (ЯФ ФТИАН) за аналитические работы.

Исследование выполнено в рамках темы НИР ИГГД РАН № 0153-2019-0002.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дьяконова М.И., Харитоновна В.Я. (1974) Новые данные химического анализа каменных метеоритов-хондритов Бушхов, Каракол, Ausson. *Метеоритика* (33), 90-93.

Кваша Л.Г. (1961) Некоторые новые данные о строении хондритов. *Метеоритика* (20), 124-136.

Соболев А.В., Батанова В.Г. (1995) Мантийные лерцолиты офиолитового комплекса Троодос, о-в Кипр: геохимия клинопироксена. *Петрология* (3), 487-495.

Юдин И.А. (1970) Микроскопическое исследование каменного метеорита Бушхов. *Метеоритика* (30), 88-92.

*Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes* (Eds. S.S. Russell, H.C. Connolly Jr., A.N. Krot). (2018) *Cambridge University Press*. 450 p.

Dodd R.T., Hutchison R. (2004) *Meteorites: A petrologic, chemical and isotopic synthesis*. *Cambridge University Press*. 506 p.

Dutta A., Bhattacharya A., Mishra M., Sadiq M., Roy S. (2017) Trace elements and REE geochemistry of olivine and enstatite chondrules in ordinary chondrites: Insights into their cosmochemical genesis. *80th Ann. Meet. Meteor. Soc.* 6088.

Engler A., Varela M.E., Kurat G., Ebel D., Sylvester P. (2007) The origin of non-porphyritic pyroxene chondrules in UOCs: Liquid solar nebula condensates? *Icarus* **192**, 248-286.

Grewingk C., Schmidt C. (1864) Über die Meteoritenfälle von Pillistfer, Buschhof und Igast. *Arch. Naturk. Liv.-Ehst. u. Kurlands* **3**, 421-553.

Jacquet E., Alard O., Gounelle M. (2012) Chondrule trace element geochemistry at the mineral scale. *Meteor. Planet. Sci.* **47**, 1695-1714.

Jacquet E., Alard O., Gounelle M. (2015) Trace element geochemistry of ordinary chondrite chondrules: The type I/type II chondrule dichotomy. *Geochim. Cosmochim. Acta* **155**, 47-67.

Palme H., Lodders K., Jones A. (2014) Solar system abundances of the elements. In: *Planets, Asteroids, Comets and The Solar System*, Vol. 2 of *Treatise on Geochemistry* (Second Ed.). Ed. A.M. Davis. Elsevier, 2014. **2**, 15-36.

Ruzicka A., Floss C., Hutson M. (2008) Relict olivine grains, chondrule recycling, and implications for the chemical, thermal, and mechanical processing of nebular materials. *Geochim. Cosmochim. Acta* **72**, 5530-5557.

Urey H.C., Craig H. (1953) The composition of the stone meteorites and the origin of the meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **4**, 36-82.

Varela M.E. (2019) Bulk trace elements of Mg-rich cryptocrystalline and ferrous radiating pyroxene chondrules from Acfer 182: Their evolution paths. *Geochim. Cosmochim. Acta* **257**, 1-15.

Varela M.E., Sylvester P., Brandstätter F., Engler A. (2015) Nonporphyritic chondrules and chondrule fragments in enstatite chondrites: Insights into their origin and secondary processing. *Meteor. Planet. Sci.* **50**, 1338-1361.

Varela M.E., Sylvester P., Engler A., Kurat G. (2012) Nonporphyritic chondrules from equilibrated Rumuruti and ordinary chondrites: Chemical evidence of secondary processing. *Meteor. Planet. Sci.* **47**, 1537-1557.

Varela M.E., Zinner E. (2018) Unraveling the role of liquids during chondrule formation processes. *Geochim. Cosmochim. Acta* **221**, 358-378.

Wilkison S.L., Robinson M.S. (2000) Bulk density of ordinary chondrite meteorites and implications for asteroidal internal structure. *Meteor. Planet. Sci.* **35**, 1203-1213.