ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru




*Научная статья*

# Редкоэлементный состав силикатных минералов метеорита Кунашак (L6)

**К.Г.Суханова✉, О.Л.Галанкина**
*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия*

***Как цитировать эту статью:*** Суханова К.Г., Галанкина О.Л. Редкоэлементный состав силикатных минералов метеорита Кунашак (L6) // Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 877-892. EDN PYFBEB

***Аннотация***
Представлена геохимия главных (EPMA) и редких (SIMS) элементов в силикатных минералах (оливин, пироксен, плагиоклаз) равновесного обыкновенного хондрита Кунашак (L6). Вариаций содержания главных элементов в силикатных минералах не обнаружено, что характерно для равновесных хондритов шестого петрологического типа. Низко-Ca пироксен и плагиоклаз радиально-лучистой оливин-пироксеновой хондры метеорита Кунашак отличается высоким содержанием редких элементов (Yb, Cr, Nb и Ti – пироксен; Sr, Y, Ti и Zr – плагиоклаз), что не характерно для минералов порфировых оливиновых и оливин-пироксеновых хондр метеорита. Порфировая оливин-пироксеновая хондра метеорита Кунашак отличается повышенным содержанием редких элементов в оливине, в особенности наибольшим содержанием Yb (в среднем 0,12 ppm) относительно порфировой оливиновой и радиально-лучистой оливин-пироксеновой хондр (0,02 ppm). Высокие концентрации редких элементов отражают быструю кристаллизацию радиально-лучистой хондры в газово-пылевом облаке и демонстрируют отсутствие следов гомогенизации редких элементов при термальном метаморфизме. Редкоэлементный состав силикатных минералов метеорита Кунашак сохранил индивидуальные особенности расплава хондр и не был затронут термальным метаморфизмом на родительских телах хондритов. Подобные результаты были получены при исследованиях метеорита Бушхов (L6), что свидетельствует об устойчивости редких элементов в оливине и низко-Ca пироксене термальному метаморфизму. Сохранность индивидуальных особенностей хондр позволяет использовать равновесные обыкновенные хондриты для исследования процессов, происходивших на ранних этапах становления Солнечной системы, и изучать механизмы хондро- и планетообразования.

***Ключевые слова***
Обыкновенные хондриты; редкие элементы; оливин; пироксен; мезостазис; ионный зонд

***Финансирование***
Исследование выполнено в рамках темы НИР ИГГД РАН FMUW-2022-0005.

***Поступила: 08.11.2023*** ***Принята: 02.05.2024*** ***Онлайн: 26.07.2024*** ***Опубликована: 25.12.2024***

## Введение.

Каменный метеоритный дождь Кунашак выпал 11 июня 1949 г. в 8:14 по местному времени в Кунашакском районе (Челябинская обл.). Падение болида сопровождалось ярким свечением, наблюдавшимся на небе в радиусе 350 км от места падения. Сотрудникам Челябинского педагогического института, Горно-геологического института Уральского филиала АН СССР и представителям Комитета по метеоритам АН СССР при помощи местных жителей удалось собрать и описать 13 экземпляров метеорита общим весом приблизительно 200 кг, установить траекторию падения метеорита и эллипс рассеяния осколков [1].

В первых описаниях было установлено, что метеорит разделен резкой границей на черную и светло-серую части, кора плавления метеорита и регмаглипты отсутствуют, наблюдаются многочисленные застывшие струйки и капли никелистого железа и силикатов [1]. В 1951 г. местные жители нашли два осколка весом 250 и 700 г [2], еще один осколок весом 2,5 кг был обнаружен летом 2014 г. [3]. В 1960 г. во фронтальной части эллипса рассеяния метеоритного дождя Кунашак были найдены частицы метеорной пыли [4]. Обстоятельства падения [5] и параметры орбиты метеорита [6] были определены позже. Метеорит хорошо изучен отечественными и зарубежными исследователями и использовался для сравнения методов, позволяющих определять состав малых тел Солнечной системы [7].

Метеорит Кунашак относится к группе оливин-гиперстеновых низкожелезистых равновесных обыкновенных хондритов (L6). Равновесные обыкновенные хондриты (EOC) являются наиболее



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

распространенной группой метеоритов на Земле и составляют около 90 % всего метеоритного вещества. Хондриты состоят из субмиллиметровых силикатных сферул – хондр, сложенных оливином, низко-Ca пироксеном и мезостазисом. Хондры представляют собой застывшие в невесомости капли расплава в газово-пылевом облаке и принадлежат к древнейшим объектам Солнечной системы [8, 9]. Структуры хондр разнообразны и подразделяются на две группы – порфировые и непорфировые (радиально-лучистые, колосниковые, зернистые, скрытокристаллические и т.д.). Разнообразие структурных видов хондр отражает вариативность условий их образования в газово-пылевом облаке.

Эксперименты по воспроизведению структур хондр позволили определить температуру нагрева минерала-предшественника, количество центров кристаллизации и скорость остывания хондр. Так, для порфировых хондр характерно нагревание минералов-предшественников ниже температуры ликвидуса расплава (1400-1700 °C), сохранение значительного количества затравок и медленное остывание (1-500 °C/ч). Кристаллизация колосниковых хондр предполагает нагрев незначительно выше температуры ликвидуса, сохранение малого числа затравок и быстрое остывание (500-3000 °C/ч). Хондры непорфировых структур (радиально-лучистых и скрытокристаллических) требуют нагрева значительно выше температуры ликвидуса, уничтожения всех затравок и мгновенного остывания (1000-3000 °C/ч) [10, 11].

В порфировых хондрах неравновесных обыкновенных хондритов (UOC) иногда наблюдаются изолированные зерна тугоплавкого оливина, значительно обогащенного MgO и отличающегося по изотопному составу кислорода от оливина хондры [12, 13], а также более магнезиальные ядра оливиновых зерен, обрастающие каемками менее магнезиального форстерита [14]. Присутствие реликтовых зерен оливина в порфировых хондрах может указывать на их образование в результате плавления минералов-предшественников (прекурсоров). В качестве прекурсорного материала рассматриваются рефракторные включения (CAI и AOA) [15], мелкозернистый материал матрицы хондритов, хондры и фрагменты хондр предыдущих генераций. Также сюда относят осколки планетезималей [16], лед $H_2O$ [17, 18], «реликтовый» оливин [19] и скопления пыли [20].

Основная часть обыкновенных хондритов на Земле демонстрирует следы термального метаморфизма, в результате которого на родительских хондритовых телах происходила гомогенизация содержания FeO и MgO в оливине и низко-Ca пироксене, раскристаллизация мезостазиса в плагиоклаз, образование апатита и хромита. Редко в обыкновенных хондритах наблюдаются следы растворения и высокая пористость [21], что отражает участие растворов при термальном метаморфизме на родительских телах хондритов. В зависимости от проявленности следов термального метаморфизма и гомогенизации FeO и MgO обыкновенные хондриты подразделяют на петрологические типы, где к третьему типу относят неравновесные обыкновенные хондриты, без следов метаморфизма, а с четвертого по шестой петрологические типы присваиваются равновесным обыкновенным хондритам по мере увеличения степени проявления термального метаморфизма. Несмотря на свою распространенность, равновесные обыкновенные хондриты слабо изучены, поскольку считалось, что следы хондро- и планетообразования стерты в результате термального метаморфизма [22].

Редкие и редкоземельные элементы широко используются при оценке геохимических обстановок, что позволяет с их помощью исследовать условия образования минералов различного генезиса, таких как циркон [23-25], гранат [26, 27], берилл [28, 29] и др. Кроме того, редкие элементы в оливине и низко-Ca пироксене мало подвержены миграции в условиях термального и/или импактного [30] метаморфизма, наблюдающегося на родительских телах хондритов [31, 32], что позволяет использовать их для изучения ранних этапов становления Солнечной системы [33] при исследовании минералов равновесных обыкновенных хондритов (EOC).

Предыдущие исследования показали, что редкие элементы в минералах EOC остаются неуравновешенными в метеоритах пятого и частично шестого петрологических типов [34]. При этом зависимости распределения редких элементов в минералах хондр от химической группы и петрологического типа метеорита обнаружено не было [35].

В данной работе определено влияние термального метаморфизма на мобильность редких элементов в силикатных минералах порфировых и радиально-лучистых хондр равновесного обыкновенного хондрита Кунашак (L6).


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2024. Т. 270. С. 877-892
© К.Г.Суханова, О.Л.Галанкина, 2024

**Аналитические методы.**

Образец хондрита Кунашак (L6) был предоставлен Горным музеем Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Химический состав минералов на уровне главных элементов был определен методом ЕРМА в ИГГД РАН на микрозондовом анализаторе Jeol JXA-8230 с пятью волновыми спектрометрами. Вещество метеорита помещалось в стандартную шайбу из эпоксидной смолы, которая после полировки напылялась углеродом. Точечные измерения состава минералов выполнялись с ускоряющим напряжением 20 кВ и током 20 нА для оливина, пироксена и током 10 нА для мезостазиса. Диаметр сфокусированного пучка 3 мкм. В качестве стандартов использовались природные минералы, чистые оксиды и металлы. Для коррекции матричного эффекта применялся алгоритм ZAF. Линии Kα1 измерялись для всех элементов.

Содержание редких и редкоземельных элементов (REE) в минералах определено методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на ионном микрозонде Cameca IMS-4f в ЯФ ФТИАН по методике, изложенной в работах [36, 37]. Перед измерениями препарат напылялся золотом. Условия съемки на ионном микрозонде Cameca IMS-4f: первичный пучок ионов $16O_2$, 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 ЕРМА. Спектры распределения REE в минералах нормировались к CI хондриту [38].

**Результаты.**

В образце метеорита Кунашак наблюдаются хондры порфировой, колосниковой, радиально-лучистой и зернистой структур. Размер хондр варьирует в пределах 1-0,5 мм, границы хондр с матрицей практически всегда четкие, явно выраженные, металлические каймы не наблюдаются. Матрица сложена крупными зернами оливина и низко-Ca пироксена (клиноэнстатит), также встречается высоко-Ca пироксен (авгит-диопсид), плагиоклаз олигоклазового состава, апатит, хромит, камасит-тэнит и троилит. В матрице наблюдаются карманы плавления и трещины, заполненные рудными минералами. Матрица и хондры метеорита сильно пористые, минералов, появляющихся в результате земного выветривания, не обнаружено.

При исследовании редкоэлементного состава минералов хондр были изучены порфировые оливиновая 8PO-1 и оливин-пироксеновая 8POP-3 хондры, а также радиально-лучистая оливин-пироксеновая хондра 8ROP-2 (рис.1). Хондры 8PO-1

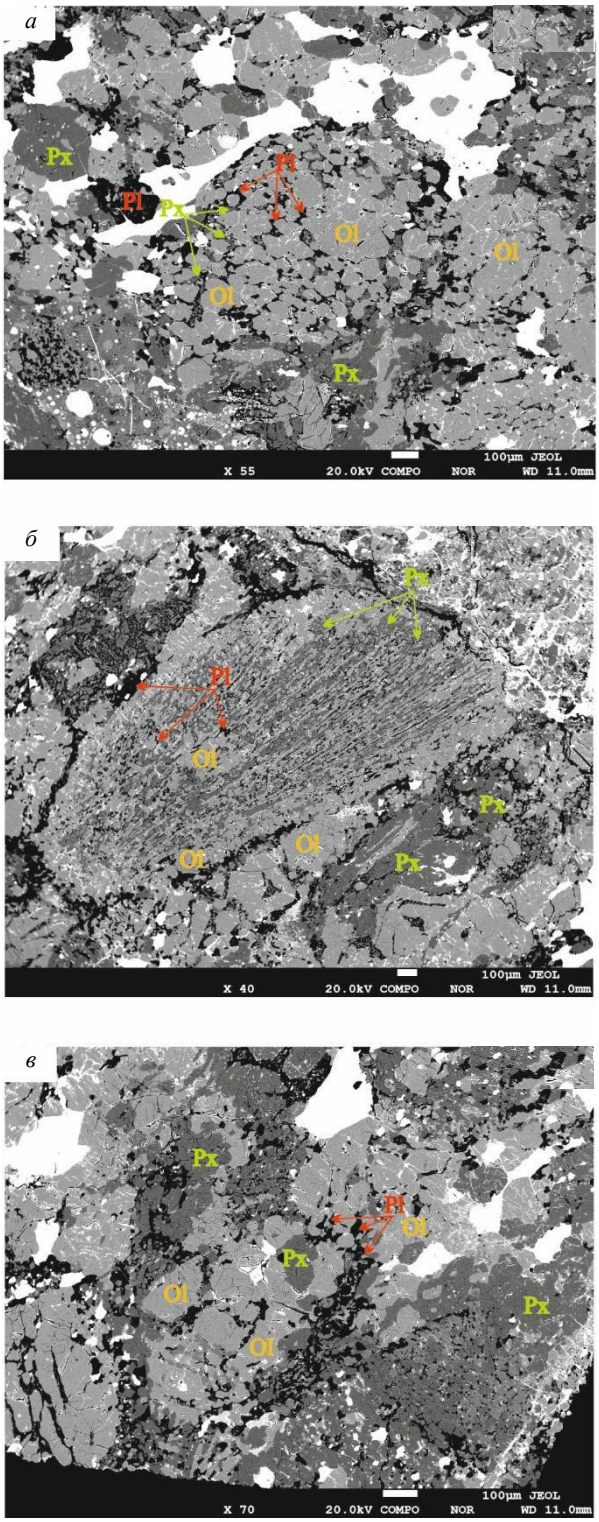



Рис.1. Хондры метеорита Кунашак в обратноотраженных электронах:
*а* – 8PO-1; *б* – 8ROP-2; *в* – 8POP-3
Ol – оливин, Px – низко-Ca пироксен, Pl – плагиоклаз



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

и 8ROP-2 имеют крупный размер (около 1 мм) и четкие границы хондра – матрица. Хондра 8POP-3 отличается меньшим размером (0,5 мм) и размытыми границами. Хондры не имеют металлических кайм, но 8ROP-2 отличается наличием оливиновой каймы по периметру.

Хондра 8PO-1 сложена небольшими (в среднем 100 мкм) изометричными зернами оливина, редкими мелкими (менее 50 мкм) ксеноморфными зернами низко-Ca пироксена и плагиоклаза (рис.1, *а*). В матрице рядом с хондрой наблюдаются крупные (300-500 мкм) зерна оливина, пироксенов и плагиоклаза, редко встречаются прожилки рудных минералов.

Оливин порфировой хондры 8PO-1 относится к форстериту (Fo 75) и представлен крупным зерном в центре хондры и небольшими зернами по площади хондры. Идиоморфные зерна оливина практически не соприкасаются внутри хондры, явных трещин и пор в зернах не обнаружено. Состав главных элементов в оливине однородный, и различий между оливином центра и края хондры, а также матрицы метеорита рядом с хондрой не наблюдается (табл.1).

*Таблица 1*

**Содержание главных (мас.%) и редких (ppm) элементов в минералах хондры 8PO-1 метеорита Кунашак**

| Элемент | Оливин | | | Пироксен | | | Плагиоклаз | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Центр | Край | Матрица | Центр | Край | Матрица | Центр | Край | Матрица |
| $SiO_2$ | 38,73 | 38,63 | 38,89 | 55,39 | 55,91 | 55,07 | 65,53 | 65,21 | 65,61 |
| $Al_2O_3$ | 0,01 | 0,01 | b.d.l. | 0,29 | 0,15 | 0,31 | 21,07 | 21,20 | 21,19 |
| MgO | 38,74 | 38,70 | 39,31 | 28,12 | 28,22 | 28,04 | 0,06 | 0,17 | 0,04 |
| $TiO_2$ | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,33 | 0,21 | 0,41 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| CaO | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,82 | 0,76 | 1,04 | 2,19 | 2,40 | 2,24 |
| FeO | 22,72 | 22,89 | 22,37 | 14,08 | 13,90 | 13,77 | 0,66 | 0,64 | 0,32 |
| MnO | 0,44 | 0,43 | 0,42 | 0,48 | 0,46 | 0,45 | – | – | – |
| $Cr_2O_3$ | b.d.l. | 0,08 | 0,01 | 0,16 | 0,09 | 0,26 | – | – | – |
| NiO | b.d.l. | 0,03 | 0,02 | 0,01 | b.d.l. | b.d.l. | – | – | – |
| $Na_2O$ | – | – | – | 0,04 | b.d.l. | b.d.l. | 10,36 | 9,95 | 10,02 |
| $K_2O$ | – | – | – | b.d.l. | b.d.l. | b.d.l. | 0,75 | 0,99 | 0,93 |
| Сумма | 100,69 | 100,80 | 101,07 | 99,72 | 99,71 | 99,34 | 100,63 | 100,59 | 100,35 |
| Zr | 1,29 | 2,39 | 0,75 | 61,2 | 4,29 | 1,91 | 2,32 | 1,15 | 7,00 |
| Hf | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 1,61 | 0,12 | 0,08 | 0,13 | 0,04 | 0,16 |
| Ca | 4531 | 4665 | 4715 | 7266 | 6018 | 6373 | – | – | – |
| Y | 0,06 | 0,12 | 0,07 | 0,48 | 0,41 | 0,32 | 0,11 | 0,15 | 1,11 |
| Al | 39,5 | 172 | 61,6 | 283 | 536 | 585 | – | – | – |
| Ti | 241 | 136 | 99,2 | 186 | 986 | 1306 | 226 | 250 | 1101 |
| Nb | 2,27 | 0,46 | 0,17 | 0,69 | 0,45 | 0,11 | 0,42 | 0,17 | 0,68 |
| La | 0,05 | 0,14 | 0,08 | 1,93 | 0,12 | 0,04 | 0,09 | 0,08 | 0,77 |
| Ce | 0,11 | 0,12 | 0,09 | 8,00 | 0,25 | 0,19 | 0,12 | 0,14 | 1,16 |
| Pr | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,40 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,23 |
| Nd | 0,07 | 0,11 | 0,06 | 2,16 | 0,05 | 0,08 | 0,13 | 0,04 | 0,64 |
| Sm | 0,02 | 0,02 | b.d.l. | 0,31 | 0,12 | b.d.l. | b.d.l. | b.d.l. | 0,12 |
| Eu | 0,01 | b.d.l. | 0,01 | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 0,27 | 0,38 | 0,23 |
| Gd | 0,02 | 0,05 | 0,03 | 1,31 | 0,10 | b.d.l. | 0,01 | 0,02 | 0,26 |
| Dy | b.d.l. | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | b.d.l. | 0,02 | 0,19 |
| Er | 0,02 | 0,03 | b.d.l. | 0,06 | 0,07 | 0,07 | b.d.l. | 0,14 | 0,14 |
| Yb | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,08 | 0,10 | 0,11 | 0,04 | 0,04 | 0,16 |
| Lu | b.d.l. | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,03 |
| Sr | 0,18 | 0,40 | 0,16 | 1,06 | 0,55 | 0,25 | 51,2 | 71,7 | 35,5 |
| Ba | 0,18 | 0,51 | 0,23 | 5,09 | 0,51 | 0,38 | 26,5 | 36,9 | 7,05 |


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2024. Т. 270. С. 877-892
© К.Г.Суханова, О.Л.Галанкина, 2024

Окончание табл.1

| Элемент | Оливин | | | Пироксен | | | Плагиоклаз | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Центр | Край | Матрица | Центр | Край | Матрица | Центр | Край | Матрица |
| V | 18,2 | 18,5 | 18,8 | 33,7 | 41,0 | 50,4 | 28,4 | 13,5 | 53,7 |
| Ni | 40,0 | 94,6 | 35,0 | 193 | 298 | 104 | – | – | – |
| Cr | 520 | 503 | 436 | 1180 | 809 | 991 | 792 | 35,2 | 1176 |
| Rb | 1,39 | 1,59 | 1,76 | 2,46 | 1,44 | 0,84 | 7,21 | 9,22 | 2,91 |
| REE | 0,36 | 0,57 | 0,35 | 14,4 | 0,93 | 0,60 | 0,69 | 0,88 | 3,92 |
| LREE | 0,29 | 0,44 | 0,26 | 12,9 | 0,60 | 0,35 | 0,63 | 0,65 | 3,15 |
| HREE | 0,07 | 0,13 | 0,09 | 1,53 | 0,33 | 0,26 | 0,06 | 0,22 | 0,77 |

*Примечание.* Прочерк – элемент не определялся; b.d.l. – содержание элемента ниже порога обнаружения.

Состав редких элементов в оливине хондры 8PO-1 также однороден. Наблюдается уменьшение концентрации Nb при движении от центра хондры (2,26 ppm) к краю (0,46 ppm) и матрице метеорита (0,17 ppm). Содержание редких элементов находится ниже хондритовых значений, спектр распределения редкоземельных элементов субгоризонтальный (рис.2, *а*).

Содержание тугоплавких редких элементов в оливине хондры 8 PO-1 превышает концентрации в оливине неравновесных хондритов [39], за исключением Al, и полностью совпадает со стороны умеренно летучих элементов (Sr, Ba, Ni).

Низко-Ca пироксен хондры 8PO-1 редко встречается в хондре, не образует собственных зерен, в большей степени обрастая зерна оливина. Пироксен представлен ксеноморфными выделениями небольшого размера (50 мкм), во многом сходен с плагиоклазом. Низко-Ca пироксен относится к клиноэнстатиту (En 76, Wo 1-2) и не демонстрирует значимых вариаций состава главных элементов. Тем не менее, низко-Ca пироксен матрицы отличается повышенным содержанием $TiO_2$, CaO и $Cr_2O_3$ по сравнению с пироксеном центра и края хондры (табл.1).

Содержание редких элементов в низко-Ca пироксене хондры 8PO-1 снижается при движении от центра к краю хондры и матрице метеорита. Так, пироксен центра хондры обогащен всеми рефракторными элементами (Zr, Hf, Nb, LREE), а также Sr и Ba по сравнению с пироксеном края хондры и матрицы метеорита. Пироксен края хондры демонстрирует промежуточные значения содержания этих элементов по сравнению с центром хондры и матрицей метеорита, пироксен матрицы – обеднен ими.

Редкоэлементный состав низко-Ca пироксена находится на уровне хондритовых значений, при этом превышается содержание редких элементов в неравновесных обыкновенных хондритах. Спектр распределения редкоземельных элементов слабо дифференцирован, но отражает преобладание LREE над HREE, особенно в пироксене центра хондры (рис.2, *б*).

Плагиоклаз в хондре 8PO-1 редко встречается, обычно представлен небольшими ксеноморфными выделениями, которые заполняют интерстиции между оливином и пироксеном. Плагиоклаз в хондре представлен олигоклазом (An 10-11, Or 5-4), состав главных элементов не изменяется (табл.1).

Содержание редких элементов в плагиоклазе очень неоднородно. Плагиоклаз матрицы обогащен рефракторными редкими элементами и REE относительно плагиоклаза хондры. Плагиоклаз края хондры отличается низкой концентрацией Zr, Hf и Nb, плагиоклаз центра хондры занимает промежуточное положение.

Спектр распределения редких элементов отражает содержание редких элементов на уровне хондритовых значений (рис.2, *в*). Плагиоклаз матрицы в большей части совпадает со спектром плагиоклаза метеорита Vigarano, хотя и несколько обеднен HREE. Спайдердиаграмма для плагиоклаза хондры схожа с графиком для плагиоклаза метеорита Renazzo.

Радиально-лучистая хондра 8ROP-2 сложена тонкими вытянутыми скелетными кристаллами оливина и низко-Ca пироксена, выходящими из единого центра. Хондра крупного размера (около 1 мм) имеет овальную форму, четкую границу с матрицей и оливиновую кайму по периметру.



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN PYFBEB

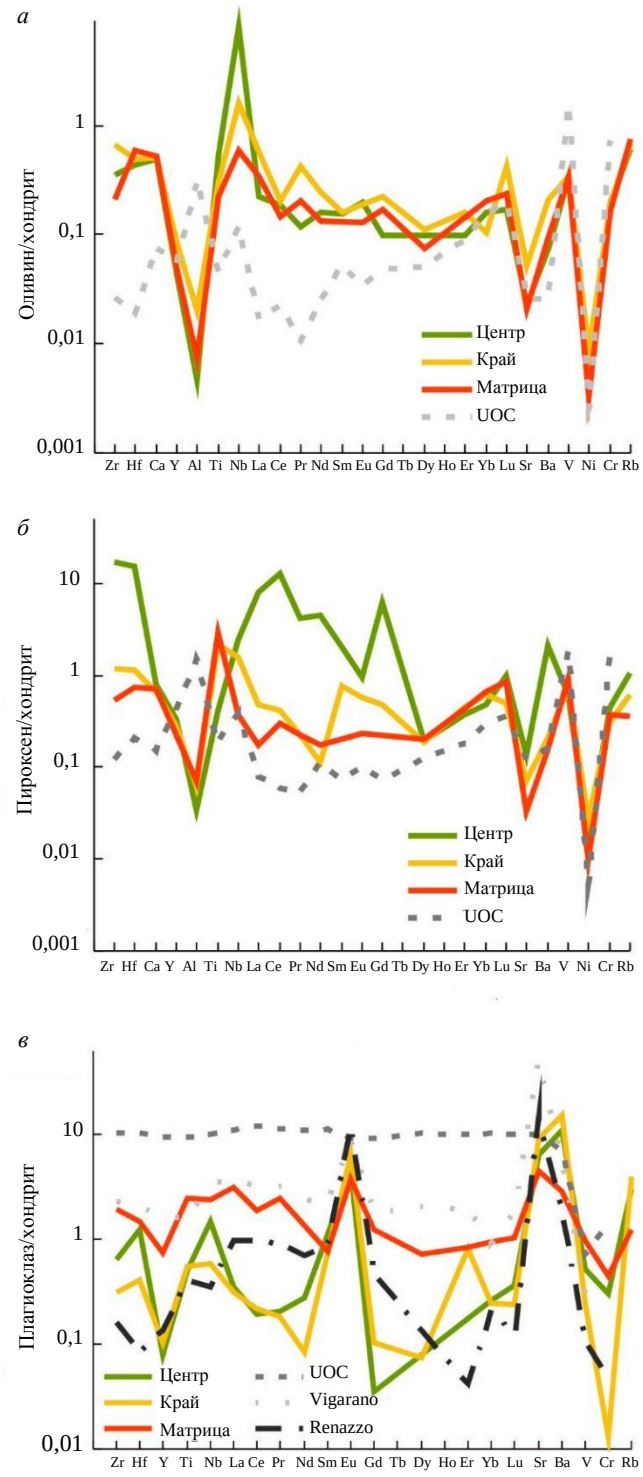



Рис.2. Спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту. Хондра 8PO-1 в оливине (*а*), низко-Ca пироксене (*б*) и мезостазисе (*в*). Данные о составе минералов UOC, Vigarano и Renazzo приведены по [38, 40]

С широкой стороны она ограничена трещиной и карманом плавления с широким развитием рудных прожилков (см. рис.1, *б*).

Оливин хондры 8ROP-2 образует тонкие (до 100 мкм по ширине) вытянутые балки, простирающиеся от одного края хондры до другого и выходящие из единого центра. Зерна оливина однородны, без трещин, часто обрастают рудными минералами. Оливин хондры относится к форстериту (Fo 75), состав главных элементов однороден (табл.2).

Содержание редких элементов в оливине хондры 8ROP-2 отличается в зависимости от расположения точки анализа. Оливин центра хондры обеднен HREE относительно оливина края хондры и матрицы метеорита. Оливин матрицы метеорита отличается минимальным содержанием Al (54,5 ppm).

Спектр распределения редких элементов в оливине хондры 8ROP-2 слабо дифференцирован, преобладания HREE над LREE не наблюдается (рис.3, *а*). Концентрация редких элементов в оливине хондры находится ниже хондритовых значений, но превышает содержание тугоплавких редких элементов в порфировых хондрах неравновесных обыкновенных хондритов.

Низко-Ca пироксен хондры 8ROP-2 относится к клиноэнстатиту (En 76, Wo 1) и демонстрирует постоянное содержание главных элементов, хотя пироксен матрицы обеднен примесными элементами ($Al_2O_3$, $TiO_2$, CaO, $Cr_2O_3$) (табл.2). Низко-Ca пироксен редко встречается в хондре, обычно обрастает скелетные кристаллы оливина, часто представлен мелкими (до 50 мкм) ксеноморфными выделениями.

Низко-Ca пироксен центра хондры 8ROP-2 характеризуется высокими концентрациями редких элементов относительно пироксена края хондры и матрицы метеорита. Пироксен края хондры и матрицы метеорита обладает близкими концентрациями редких элементов, но при этом пироксен края хондры отличается минимальным содержанием умеренно летучих Sr и Ba.

Спектр распределения редких элементов в низко-Ca пироксене хондры 8ROP-2 находится на уровне хондритовых значений и незначительно превышает содержание редких элементов в пироксене хондр неравновесных обыкновенных хондритов (рис.3, *в*). Низко-Ca пироксен хондры 8ROP-2 отличается высоким содержанием Ti по сравнению с UOC. Спектр распределения редкоземельных элементов демонстрирует явное преобладание HREE над LREE в низко-Ca пироксене хондры ROP-2.

Плагиоклаз в хондре 8ROP-2 представлен олигоклазом (An 10-12, Or 4), в матрице встречаются зерна альбита (An 9, Or 5) (табл.2). В хондре плагиоклаз заполняет мелкие (в среднем 10 мкм)


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2024. Т. 270. С. 877-892
© К.Г.Суханова, О.Л.Галанкина, 2024

интерстиции между оливином и пироксеном, что делает его недоступным для изучения. Состав главных элементов в плагиоклазе постоянен, хотя наблюдаются небольшие вариации содержания примесных элементов (Mg, Fe).

*Таблица 2*

**Содержание главных (мас.%) и редких (ppm) элементов в минералах хондры 8ROP-2 метеорита Кунашак**

| Элемент | Оливин | | | Пироксен | | | Плагиоклаз | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Центр | Край | Матрица | Центр | Край | Матрица | Центр | Матрица | Матрица |
| $SiO_2$ | 38,75 | 38,30 | 38,22 | 55,22 | 55,07 | 55,91 | 65,63 | 65,70 | 65,18 |
| $Al_2O_3$ | 0,01 | 0,02 | b.d.l. | 0,40 | 0,37 | 0,15 | 21,13 | 21,21 | 21,01 |
| MgO | 38,81 | 39,27 | 39,21 | 28,28 | 28,07 | 28,53 | 0,13 | 0,09 | 0,10 |
| $TiO_2$ | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,46 | 0,39 | 0,20 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| CaO | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,84 | 0,87 | 0,63 | 2,66 | 2,32 | 2,07 |
| FeO | 22,85 | 22,22 | 22,77 | 13,70 | 14,65 | 14,05 | 0,72 | 0,40 | 0,52 |
| MnO | 0,48 | 0,50 | 0,46 | 0,45 | 0,48 | 0,48 | – | – | – |
| $Cr_2O_3$ | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,22 | 0,24 | 0,09 | – | – | – |
| NiO | b.d.l. | 0,01 | b.d.l. | 0,02 | 0,09 | 0,02 | – | – | – |
| $Na_2O$ | – | – | – | 0,02 | b.d.l. | 0,01 | 9,47 | 10,28 | 10,20 |
| $K_2O$ | – | – | – | b.d.l. | 0,02 | b.d.l. | 0,71 | 0,88 | 0,99 |
| Сумма | 100,96 | 100,37 | 100,68 | 99,61 | 100,23 | 100,07 | 100,49 | 100,89 | 100,09 |
| Zr | 0,67 | 0,81 | 0,57 | 19,6 | 3,13 | 1,16 | 44,1 | 4,43 | 6,96 |
| Hf | b.d.l. | 0,06 | b.d.l. | 0,49 | 0,10 | 0,04 | 0,95 | 0,24 | 0,16 |
| Ca | 5658 | 5122 | 5208 | 27607 | 6545 | 6374 | – | – | – |
| Y | 0,03 | 0,09 | 0,08 | 2,21 | 0,50 | 0,29 | 0,30 | 0,34 | 1,10 |
| Al | 236 | 1055 | 54,6 | 8825 | 1395 | 613 | – | – | – |
| Ti | 88,6 | 113 | 55,1 | 1240 | 2555 | 1245 | 422 | 624 | 1094 |
| Nb | 0,37 | 0,36 | 0,06 | 1,47 | 0,32 | 0,13 | 0,59 | 0,77 | 0,68 |
| La | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,14 | 0,06 | 0,02 | 1,63 | 0,13 | 0,77 |
| Ce | 0,07 | 0,09 | 0,08 | 0,44 | 0,10 | 0,20 | 1,60 | 0,25 | 1,15 |
| Pr | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,38 | 0,04 | 0,23 |
| Nd | 0,06 | 0,05 | 0,06 | 0,32 | 0,05 | 0,05 | 1,23 | 0,11 | 0,64 |
| Sm | b.d.l. | 0,05 | b.d.l. | 0,10 | 0,03 | 0,03 | 0,13 | b.d.l. | 0,12 |
| Eu | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,63 | 0,05 | 0,22 |
| Gd | 0,03 | 0,09 | 0,06 | 0,15 | 0,06 | 0,05 | 0,19 | 0,05 | 0,26 |
| Dy | 0,01 | 0,04 | 0,04 | 0,32 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,05 | 0,19 |
| Er | b.d.l. | 0,03 | 0,04 | 0,33 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,09 | 0,14 |
| Yb | 0,01 | 0,04 | 0,09 | 0,34 | 0,22 | 0,13 | 0,07 | 0,07 | 0,16 |
| Lu | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,03 |
| Sr | 0,44 | 1,14 | 0,19 | 10,8 | 0,17 | 1,32 | 109 | 6,76 | 35,3 |
| Ba | 0,42 | 0,66 | 0,29 | 4,11 | 0,13 | 0,22 | 27,3 | 2,47 | 7,00 |
| V | 23,2 | 20,5 | 18,2 | 117 | 82,9 | 49,7 | 18,5 | 38,5 | 53,3 |
| Ni | 45,3 | 49,9 | 44,0 | 110 | 370 | 286 | – | – | – |
| Cr | 889 | 520 | 472 | 1672 | 1582 | 884 | 168 | 587 | 1168 |
| Rb | 2,06 | 2,58 | 1,46 | 3,18 | 1,01 | 0,59 | 13,1 | 8,81 | 2,89 |
| REE | 0,24 | 0,45 | 0,45 | 2,27 | 0,65 | 0,60 | 5,98 | 0,88 | 3,90 |
| LREE | 0,17 | 0,24 | 0,22 | 1,09 | 0,27 | 0,33 | 5,61 | 0,58 | 3,13 |
| HREE | 0,07 | 0,21 | 0,24 | 1,19 | 0,39 | 0,27 | 0,37 | 0,30 | 0,77 |



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

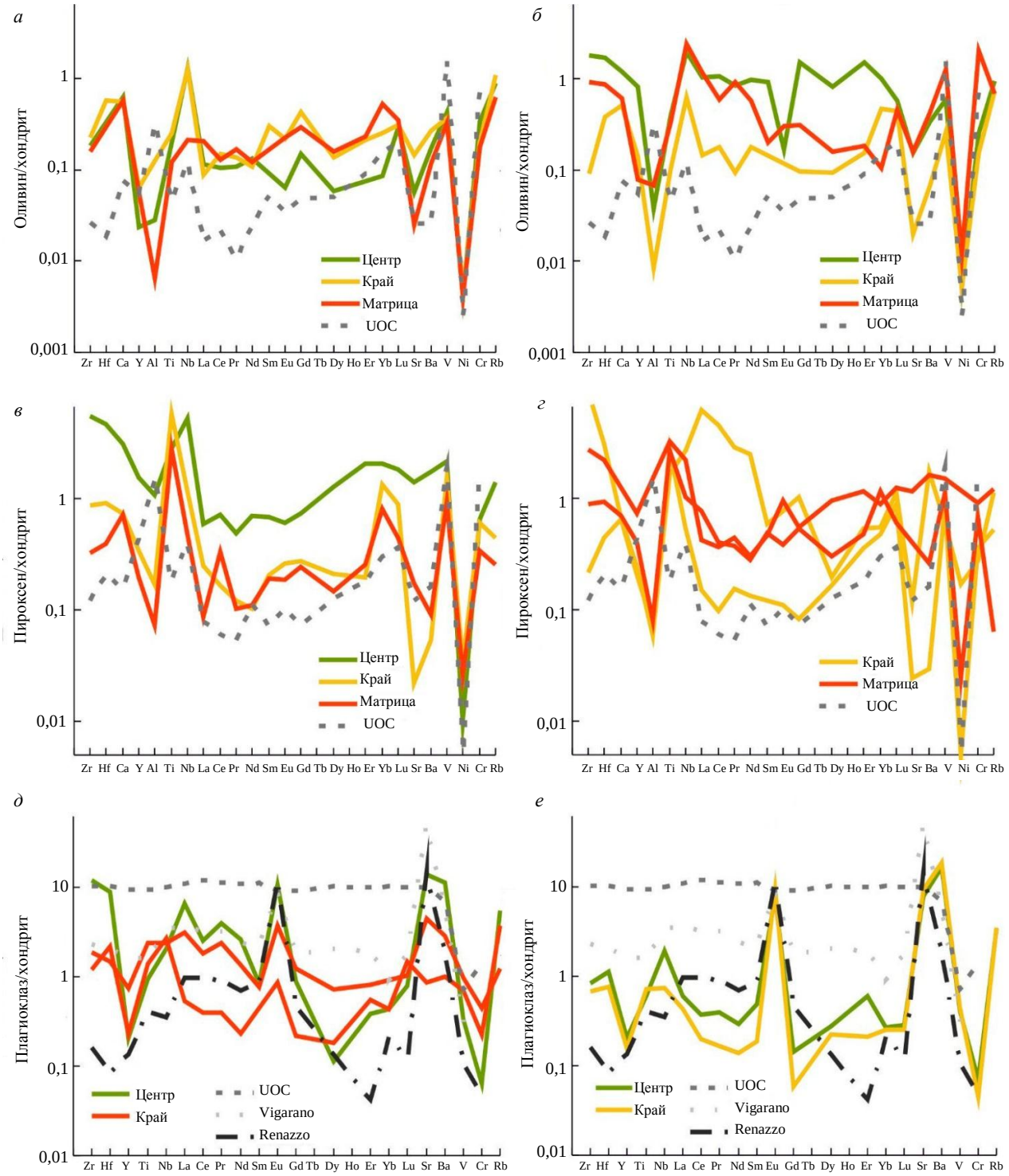



Рис.3. Спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту.
Хондра 8ROP-2 в оливине (*а*), низко-Ca пироксене (*в*) и мезостазисе (*д*);
хондра 8POP-3 в оливине (*б*), низко-Ca пироксене (*г*) и мезостазисе (*е*).
Данные о составе минералов UOC, Vigarano и Renazzo приведены по [38, 40]

Содержание редких элементов в плагиоклазе хондры 8ROP-2 неоднородно. В центре хондры плагиоклаз обогащен редкими элементами относительно плагиоклаза матрицы, за исключением HREE. В матрице зерна плагиоклаза демонстрируют различные уровни содержания редких элементов, хотя контуры спектров распределения редких элементов повторяют друг друга (рис.3, *д*). Содержание редких элементов в плагиоклазе хондры 8ROP-2 и матрицы находится выше хондритовых значений.


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2024. Т. 270. С. 877-892
© К.Г.Суханова, О.Л.Галанкина, 2024

Спектры распределения редких элементов в хондре 8ROP-2 в большей степени схожи с плагиоклазом углистого хондрита Renazzo [38, 40], но уровень концентрации рефракторных и редкоземельных элементов выше. Спектры распределения слабо дифференцированы, наблюдается ярко выраженная европиевая аномалия и в плагиоклазе центра хондры – преобладание LREE над HREE.

Порфировая оливин-пироксеновая хондра 8POP-3 (см. рис.1, *в*) отличается небольшим размером (0,5 мм), крупными зернами оливина и плагиоклаза и стертой границей с матрицей. Рядом с хондрой наблюдается плагиоклаз-оливиновый агрегат, сложенный единым ксеноморфным проявлением плагиоклаза, внутри которого имеются небольшие (до 50 мкм по удлинению) вытянутые зерна оливина.

Оливин хондры 8POP-3 представлен форстеритом (Fo 75), состав главных элементов постоянен (табл.3). Оливин слагает большую часть хондры POP-3 и наблюдается в виде довольно крупных (200-300 мкм) идиоморфных зерен, на BSE-изображениях выглядит однородным и слабо трещиноватым.

Редкоэлементный состав оливина неоднороден. Оливин центра хондры обогащен тугоплавкими элементами относительно оливина края и матрицы метеорита. Оливин края хондры отличается наименьшим содержанием редких элементов, оливин матрицы занимает промежуточное положение.

Содержание редких элементов находится на уровне хондритовых значений и превышает содержание тугоплавких и редкоземельных элементов в оливине порфировых хондр неравновесных обыкновенных хондритов (рис.3, *б*). Спектр распределения редких элементов в оливине хондры 8POP-3 слабо фракционирован, в оливине матрицы наблюдается преобладание LREE над HREE.

Низко-Ca пироксен хондры 8POP-3 характеризуется подчиненным распространением в хондре относительно оливина и занимает не более 10 % от площади хондры. Пироксен наблюдается в виде небольших (до 200 мкм) ксеноморфных зерен, иногда обрастающих маленькие зерна оливина. В обратно-отраженных электронах он выглядит однородно и не имеет трещин. Низко-Ca пироксен представлен клиноэнстатитом (En 76-77, Wo 1-2), состав главных элементов однороден, но наблюдаются небольшие колебания содержания примесных элементов (Ti, Cr) (табл.3).

*Таблица 3*

**Содержание главных (мас.%) и редких (ppm) элементов в минералах хондры 8POP-3 метеорита Кунашак**

| Элемент | Оливин | | | Пироксен | | | | Плагиоклаз | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Центр | Край | Матрица | Край | Край | Матрица | Матрица | Центр | Край |
| $SiO_2$ | 38,32 | 38,05 | 38,73 | 56,38 | 56,32 | 56,17 | 55,49 | 63,63 | 65,44 |
| $Al_2O_3$ | b.d.l. | 0,02 | b.d.l. | 0,16 | 0,12 | 0,16 | 0,17 | 20,25 | 20,96 |
| MgO | 38,75 | 38,60 | 38,64 | 28,56 | 28,68 | 28,44 | 28,27 | 0,99 | 0,18 |
| $TiO_2$ | b.d.l. | b.d.l. | 0,04 | 0,20 | 0,13 | 0,19 | 0,20 | b.d.l. | 0,04 |
| CaO | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,86 | 0,86 | 0,75 | 1,05 | 3,66 | 2,43 |
| FeO | 22,87 | 22,37 | 22,44 | 13,83 | 13,52 | 13,97 | 13,87 | 1,57 | 0,43 |
| MnO | 0,49 | 0,50 | 0,42 | 0,46 | 0,48 | 0,49 | 0,42 | – | – |
| $Cr_2O_3$ | b.d.l. | 0,02 | 0,03 | 0,12 | 0,11 | 0,14 | 0,15 | – | – |
| NiO | 0,01 | b.d.l. | b.d.l. | b.d.l. | b.d.l. | 0,01 | b.d.l. | – | – |
| $Na_2O$ | – | – | – | 0,03 | b.d.l. | 0,04 | 0,02 | 9,60 | 10,10 |
| $K_2O$ | – | – | – | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,87 | 0,78 |
| Сумма | 100,49 | 99,60 | 100,35 | 100,58 | 100,23 | 100,35 | 99,65 | 100,57 | 100,36 |
| Zr | 6,55 | 0,32 | 3,35 | 0,78 | 32,7 | 9,89 | 3,22 | 3,06 | 2,48 |
| Hf | 0,18 | 0,04 | 0,09 | 0,05 | 0,32 | 0,23 | 0,10 | 0,12 | 0,08 |
| Ca | 11012 | 4690 | 5527 | 5877 | 6012 | – | 6332 | – | – |
| Y | 1,20 | 0,21 | 0,12 | 0,30 | 0,35 | 1,06 | 0,57 | 0,31 | 0,23 |
| Al | 314 | 71,4 | 565 | 591 | 489 | – | 670 | – | – |
| Ti | 175 | 46,2 | 147 | 1214 | 730 | 1426 | 1177 | 276 | 327 |



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Окончание табл.3

| Элемент | Оливин | | | Пироксен | | | | Плагиоклаз | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Центр | Край | Матрица | Край | Край | Матрица | Матрица | Центр | Край |
| Nb | 0,56 | 0,18 | 0,68 | 0,15 | 0,76 | 0,61 | 0,29 | 0,56 | 0,21 |
| La | 0,25 | 0,04 | 0,28 | 0,04 | 1,46 | 0,10 | 0,18 | 0,15 | 0,11 |
| Ce | 0,66 | 0,11 | 0,36 | 0,06 | 2,79 | 0,23 | 0,25 | 0,23 | 0,12 |
| Pr | 0,08 | 0,01 | 0,09 | 0,01 | 0,26 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,02 |
| Nd | 0,46 | 0,08 | 0,27 | 0,06 | 1,18 | 0,14 | 0,13 | 0,14 | 0,07 |
| Sm | 0,14 | b.d.l. | 0,03 | b.d.l. | 0,09 | 0,07 | 0,07 | 0,08 | 0,03 |
| Eu | 0,01 | b.d.l. | 0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,06 | 0,02 | 0,47 | 0,56 |
| Gd | 0,31 | 0,02 | 0,06 | 0,02 | 0,21 | 0,11 | 0,11 | 0,03 | 0,01 |
| Dy | 0,21 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,24 | 0,08 | 0,07 | 0,06 |
| Er | 0,25 | 0,03 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,19 | 0,08 | 0,10 | 0,04 |
| Yb | 0,17 | 0,08 | 0,02 | 0,08 | 0,09 | 0,15 | 0,19 | 0,05 | 0,04 |
| Lu | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Sr | 1,20 | 0,15 | 1,23 | 0,19 | 0,92 | 8,84 | 3,13 | 63,0 | 73,7 |
| Ba | 0,82 | 0,16 | 1,05 | 0,07 | 4,17 | 3,87 | 0,62 | 40,7 | 46,6 |
| V | 32,4 | 14,2 | 68,8 | 45,8 | 33,0 | 81,0 | 60,4 | 22,6 | 24,6 |
| Ni | 56,1 | 55,7 | 127 | 53,6 | 1813 | – | 260 | – | – |
| Cr | 665 | 407 | 5290 | 922 | 717 | 2328 | 1786 | 185 | 117 |
| Rb | 2,21 | 1,67 | 1,59 | 1,20 | 2,59 | 2,79 | 0,15 | 7,92 | 8,21 |
| REE | 2,56 | 0,40 | 1,22 | 0,40 | 6,30 | 1,35 | 1,17 | 1,36 | 1,06 |
| LREE | 1,60 | 0,24 | 1,05 | 0,18 | 5,83 | 0,64 | 0,69 | 1,11 | 0,90 |
| HREE | 0,96 | 0,16 | 0,16 | 0,22 | 0,47 | 0,72 | 0,47 | 0,25 | 0,16 |

Содержание редких элементов весьма неоднородно в низко-Ca пироксене хондры 8POP-3. В пироксене края хондры встречаются зерна с очень высоким и очень низким содержанием LREE относительно пироксена матрицы. Пироксен матрицы обогащен Y, Sr и Ba относительно пироксена хондры и занимает промежуточную позицию по содержанию REE.

Спектр распределения редких элементов в низко-Ca пироксене хондры 8POP-3 сильно дифференцирован и находится на уровне хондритовых значений (рис.3, *г*). Содержания редких элементов в низко-Ca пироксене хондры 8POP-3 обогащены относительно пироксена порфировых хондр неравновесных обыкновенных хондритов.

Плагиоклаз хондры 8POP-3 представлен олигоклазом (An 10-16, Or 4) с сильно варьирующим составом примесных элементов (CaO, MgO, FeO) (табл.3). Плагиоклаз в хондре 8POP-3 наблюдается в интерстициях между оливином и пироксеном, слабо распространен в объеме хондры и образует выделения не более 50 мкм.

Содержание редких элементов в плагиоклазе хондры 8POP-3 однородное. Концентрация редких элементов в плагиоклазе находится на уровне хондритовых значений и совпадает с плагиоклазом углистого хондрита Renazzo (рис.3, *е*). Спектры распределения слабо дифференцированы, имеют ярко выраженную европиевую аномалию и не демонстрируют преобладания LREE над HREE.

**Обсуждение.**

Силикатные минералы порфировых (8PO-1, 8POP-3) и радиально-лучистой (8ROP-2) хондр не отличаются по содержанию главных элементов, различия наблюдаются в редкоэлементном составе этих минералов.

Спектр распределения редких элементов в оливине хондр слабо дифференцирован, однако выделяются отдельные зерна порфировой хондры 8POP-3, которые обогащены несовместимыми элементами LREE, Sr и Ba (рис.4, *а*). Оливин в этой хондре отличается крупным размером по сравнению с оливином остальных хондр, что может указывать на взаимосвязь размера зерен и концентраций редких элементов. При этом значительных отличий редкоэлементного состава зерен минералов от их расположения внутри хондры или в матрице метеорита не обнаружено (рис.4, *б*).



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2024. Т. 270. С. 877-892
© К.Г.Суханова, О.Л.Галанкина, 2024

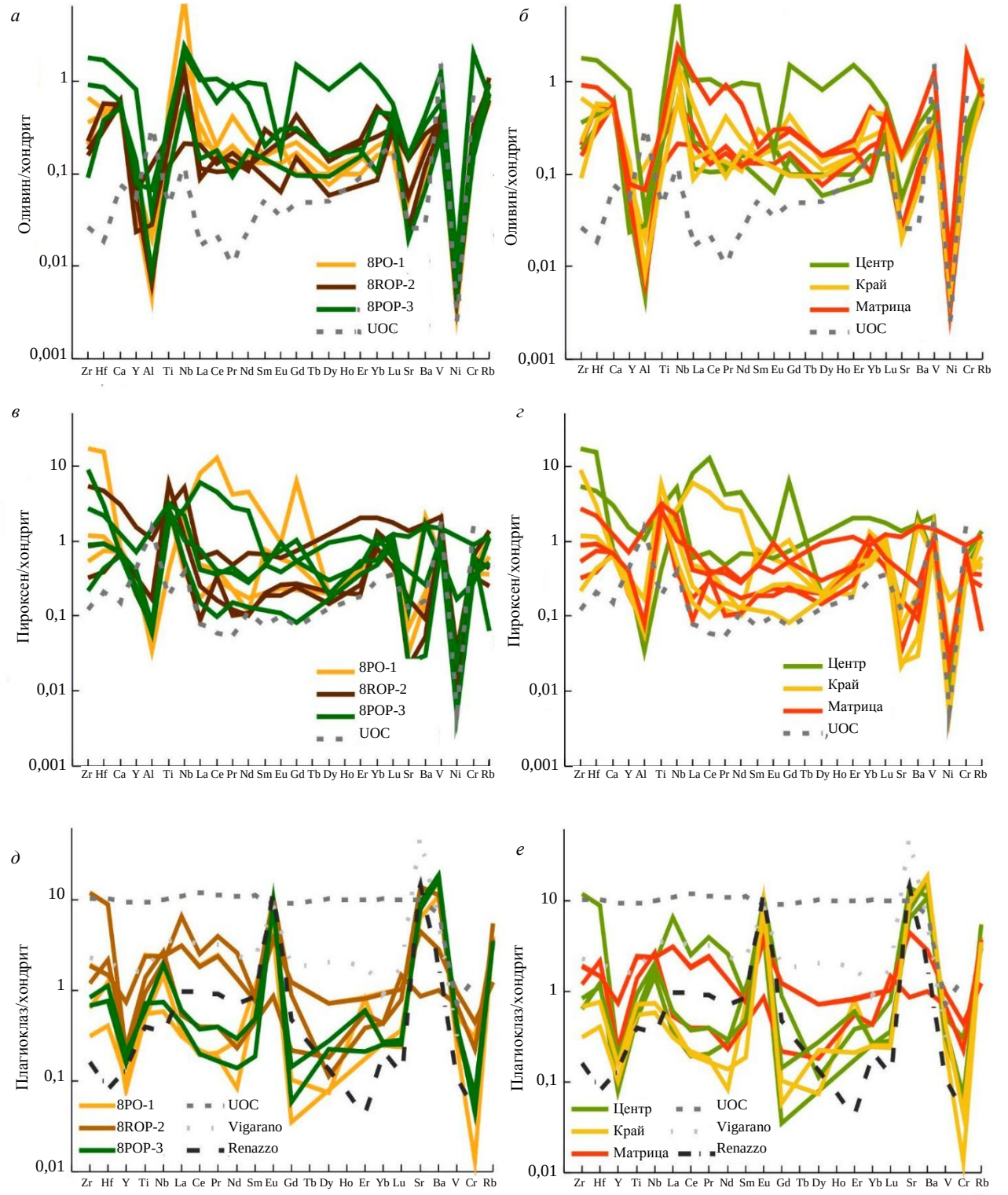



Рис.4. Спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту, в оливине, низко-Ca и плагиоклазе метеорита Кунашак:
*а*, *в*, *д* – относительно хондр; *б*, *г*, *е* – относительно местоположения в хондре.
Данные о составе минералов UOC, Vigarano и Renazzo приведены по [38, 40]

Различия между оливином хондр на графиках соотношения Rb и Yb (рис.5, *а*) и Zr и Ti (рис.5, *б*) проявляются в большей степени, чем на спектрах распределения редких элементов. Так, соотношение Rb и Yb демонстрирует обогащенность оливина хондры 8ROP-2 умеренно летучим и несовместимым Rb, тогда как оливин порфировой оливин-пироксеновой хондры 8POP-3 обогащен тугоплавким Yb. При этом оливин хондры 8PO-1 обеднен этими элементами.



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

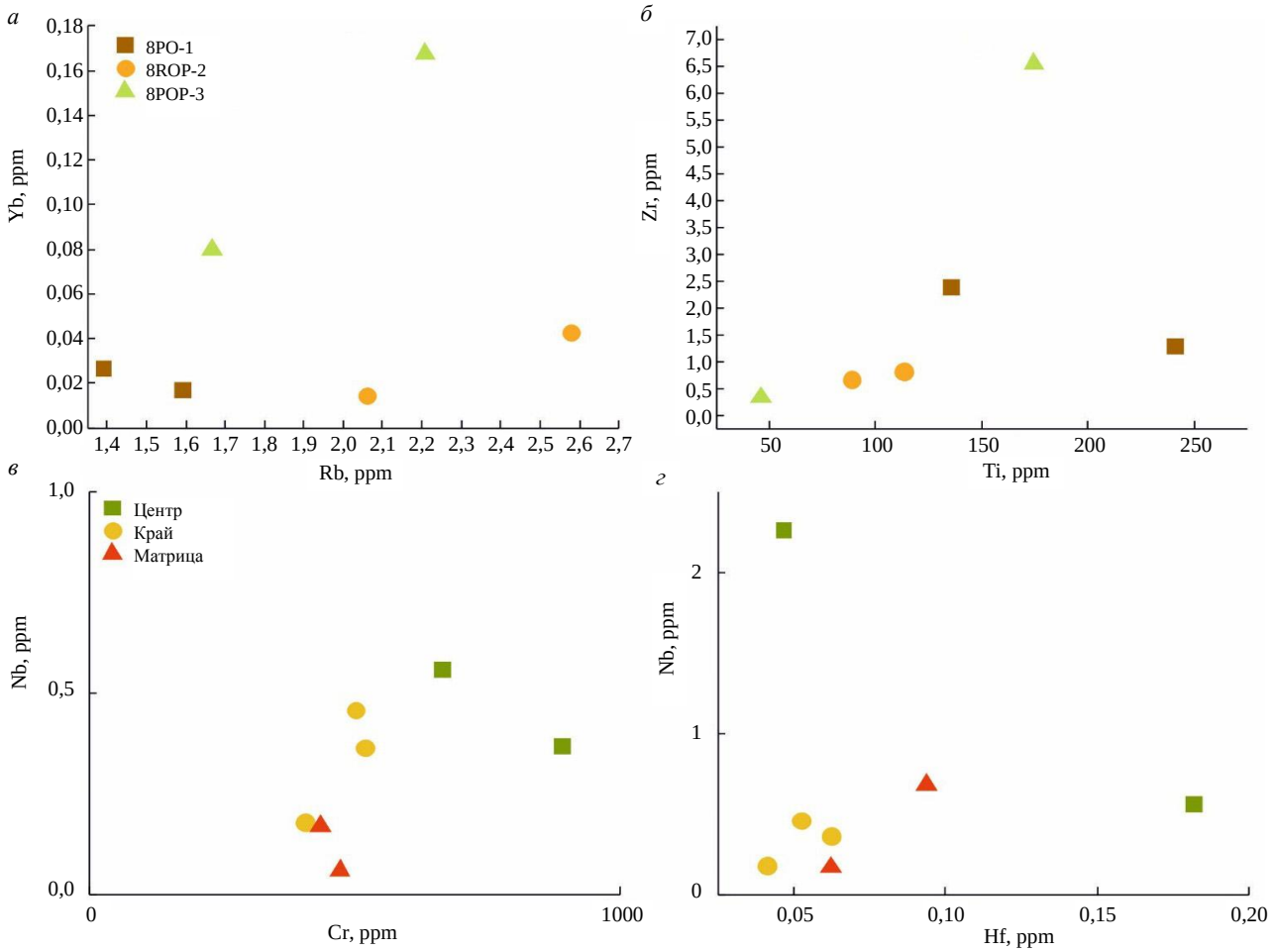



Рис.5. Соотношение Yb и Rb (*а*), Zr и Ti (*б*), Nb и Cr (*в*) и Nb и Hf (*г*) в оливине метеорита Кунашак

На графике соотношения Cr и Nb (рис.5, *в*) наблюдается отличие оливина центра хондр, обогащенного этими элементами, по сравнению с оливином края хондры и матрицы метеорита, который обычно обеднен ими.

Соотношение тугоплавких Hf и Nb (рис.5, *г*) также свидетельствует о повышенных концентрациях этих элементов в оливине центра хондр и минимальных концентрациях в оливине края хондры и матрицы метеорита.

Спектры распределения редких элементов в низко-Ca пироксене отличаются большей дифференциацией по сравнению со спектрами оливина и отражают повышенные содержания редких элементов в пироксене порфировых хондр (8PO-1, 8POP-3) (см. рис.4, *в*). Значимых различий между низко-Ca пироксеном центра и края хондры, а также матрицы метеорита не наблюдается, однако прослеживается тенденция к обогащенности редкими элементами зерен пироксена центральных частей хондры (см. рис.4, *г*).

Явные отличия низко-Ca пироксена радиально-лучистой хондры 8ROP-2 наблюдаются на графиках соотношения Zr/Cr, Hf/Yb и Nb/Ti (рис.6, *а*, *в*, *д*). Так, пироксен радиальной хондры отличается высоким содержанием Cr, Yb, Nb и Ti относительно пироксенов порфировых хондр, различий между которыми не наблюдается.

Графики соотношения Nb и Hf, HREE и Rb, Zr и Yb (рис.6, *б*, *г*, *е*) отражают обогащенность низко-Ca пироксена центральных зон хондры относительно края хондры и матрицы метеорита. При этом на графике Nb и Hf наблюдается прямая корреляция этих элементов в пироксене края хондры и матрицы метеорита, которая не прослеживается в пироксене центра хондры. Соотношение HREE и Rb демонстрирует тенденцию к увеличению значения при переходе от пироксена матрицы метеорита к пироксену края хондры. Низко-Ca пироксен центра хондры отличается наибольшим содержанием HREE и Rb.


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2024. Т. 270. С. 877-892
© К.Г.Суханова, О.Л.Галанкина, 2024

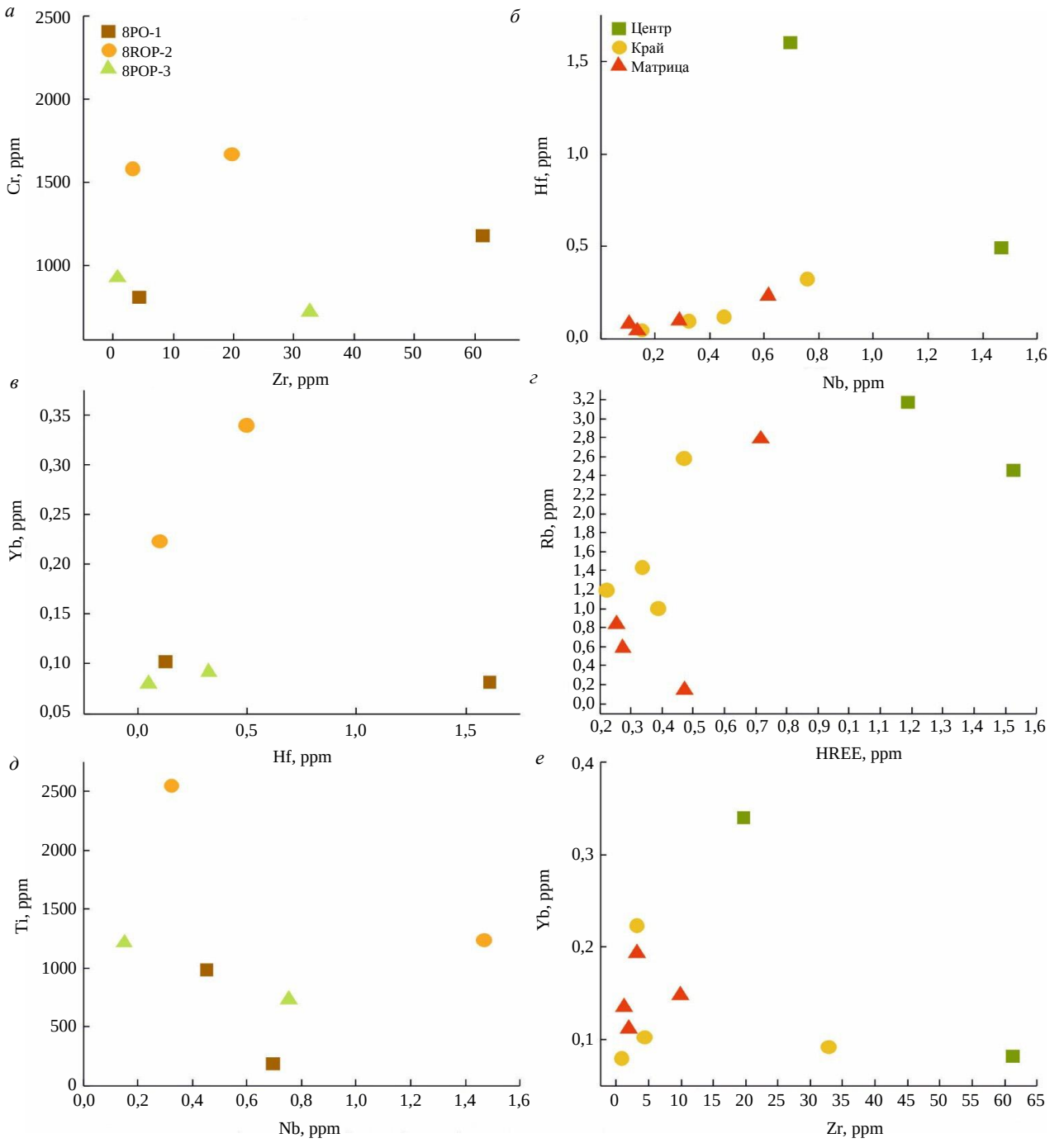



Рис.6. Соотношение Cr и Zr (*а*), Hf и Nb (*б*), Yb и Hf (*в*), Rb и HREE (*г*), Ti и Nb (*д*), Yb и Zr (*е*) в низко-Ca пироксене метеорита Кунашак

Плагиоклаз отличается наибольшей дифференциацией спектров распределения редких элементов по сравнению с оливином и низко-Ca пироксеном метеорита Кунашак (см. рис.4, *д*). Плагиоклаз изученных хондр по спектру распределения редких элементов близок к плагиоклазу углистого хондрита Renazzo. Подобный спектр встречается в плагиоклазе наиболее метаморфизованных обыкновенных хондритов, что в данном случае подтверждается шестым петрологическим типом метеорита Кунашак.

Пагиоклаз радиально-лучистой хондры 8ROP-2 выделяется своим спектром, в большей степени сходным с плагиоклазом углистого хондрита Vigarano, и отличается от остальных плагиоклазов метеорита Кунашак повышенной концентрацией рефракторных и REE элементов.

Значимых различий между спектрами распределения редких элементов в плагиоклазе центра, края или матрицы метеорита не наблюдается, хотя можно отметить тенденцию к обедненности



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

редкими элементами плагиоклаза края хондр по сравнению с центральной зоной хондры и матрицей метеорита (см. рис.4, *е*).

Отличия между плагиоклазом хондр 8PO-1, 8POP-3 и 8ROP-2 наблюдаются на графиках соотношения Sr и Ba, Ti и Y, Zr и Y (рис.7, *а*, *в*, *д*). Соотношение умеренно летучих совместимых Sr и Ba демонстрирует обогащенность Ba плагиоклаза порфировых хондр при низком содержании Sr, тогда как в плагиоклазе радиально-лучистой хондры наблюдается противоположное распределение с высоким содержанием Sr и низким – Ba.

На графике соотношения Y и Ti наблюдается прямая зависимость, при которой плагиоклаз порфировой оливиновой хондры обеднен этими элементами, плагиоклаз радиальной хондры обогащен ими, а плагиоклаз порфировой оливин-пироксеновой хондры занимает промежуточное положение.

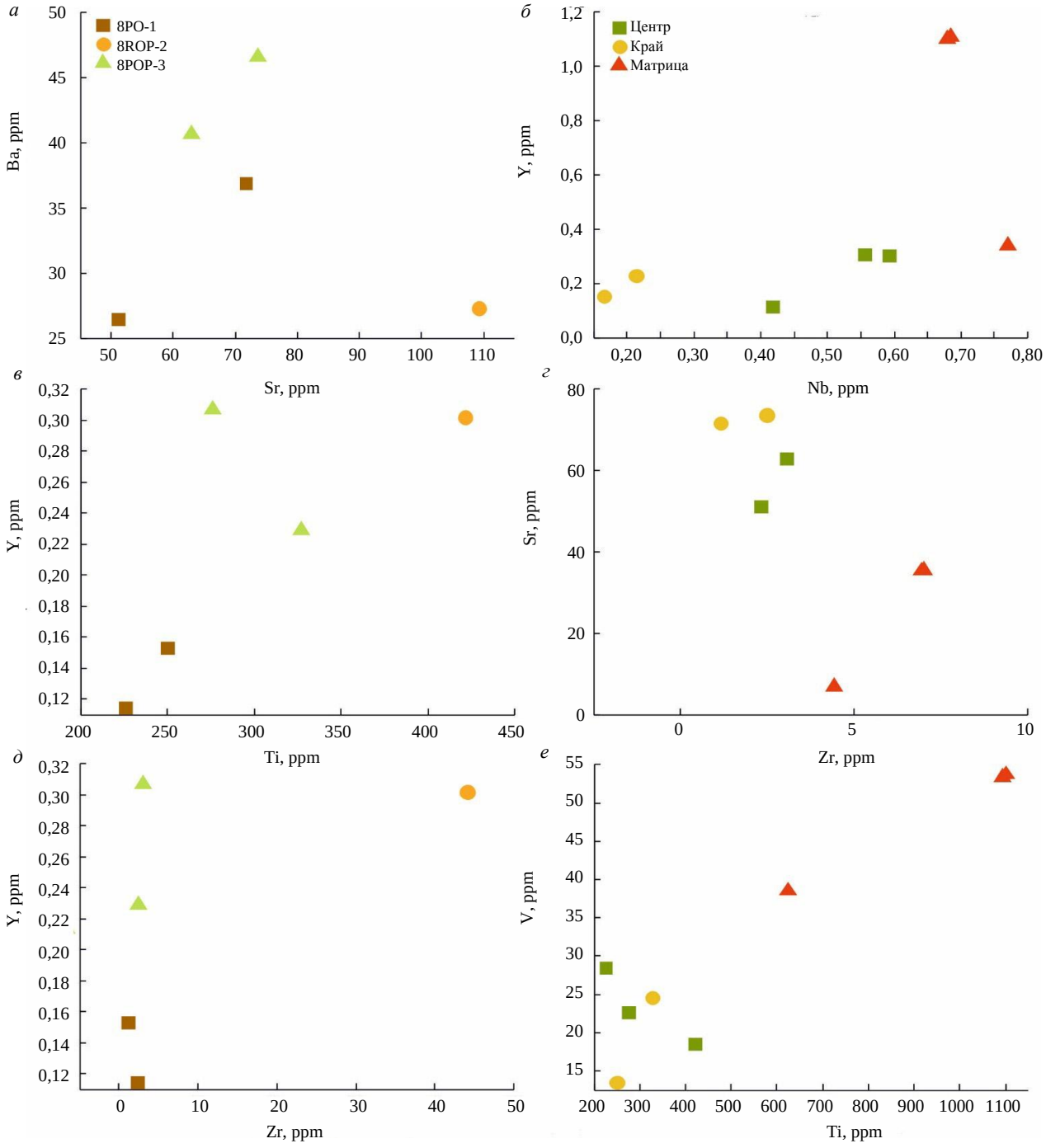



Рис.7. Соотношение Ba и Sr (*а*), Y и Nb (*б*), Y и Ti (*в*), Sr и Zr (*г*), Y и Zr (*д*), V и Ti (*е*) в плагиоклазе метеорита Кунашак



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Соотношение Zr и Y отражает обогащенность плагиоклаза порфировой оливин-пироксеновой хондры иттрием, высокие концентрации Zr в плагиоклазе радиальной хондры и низкое содержание обоих элементов в плагиоклазе порфировой оливиновой хондры. Соотношение Nb и Y, Zr и Sr и Ti и V позволяет выявить характерные особенности редкоэлементного состава плагиоклаза центра, края хондры и матрицы метеорита (рис.7, *б, г, е*). Плагиоклаз матрицы характеризуется высоким содержание Nb и Y, тогда как плагиоклазу края хондр свойственны низкие концентрации этих элементов, плагиоклаз центра хондр занимает промежуточное положение по содержанию Nb.

На графике соотношения Zr и Sr наблюдается постепенное снижение содержания умеренно летучего Sr и увеличение концентрации Zr в плагиоклазе при движении от края хондры к центру, а затем к матрице метеорита.

Также плагиоклаз матрицы метеорита характеризуется высоким содержанием тугоплавкого Ti и умеренно летучего V, хотя плагиоклазу хондр свойственны низкие концентрации этих элементов.

**Выводы.**

Порфировая оливин-пироксеновая хондра 8POP-3 отличается повышенным содержанием редких элементов в оливине, в особенности, наибольшим содержанием Yb (в среднем 0,12 ppm) относительно хондр 8PO-1 и 8ROP-2 (0,02 ppm).

Радиально-лучистая хондра 8ROP-2 характеризуется присутствием низко-Ca пироксена и плагиоклаза с высоким содержанием редких элементов. Низко-Ca пироксену свойственны повышенные концентрации Yb, Cr, Nb и Ti, пироксен порфировых хондр характеризуется минимальным содержанием этих элементов. Плагиоклаз радиально-лучистой хондры отличается высокими концентрациями Sr, Y, Ti и Zr. Повышенное содержание редких элементов в низко-Ca пироксене и плагиоклазе радиально-лучистой хондры отражает высокую скорость кристаллизации хондры (более 1000 °C/ч). Установлено, что коэффициент распределения несовместимых LREE и Ba в оливине и низко-Ca пироксене при увеличении скорости остывания увеличивается в 100 раз, тогда как для совместимых Yb и Lu повышается только в 2 раза [41].

Таким образом, редкоэлементный состав силикатных минералов метеорита Кунашак сохранил индивидуальные особенности расплава хондр и не был затронут термальным метаморфизмом на родительских телах хондритов. Подобные результаты были получены при исследовании метеорита Бушхов (L6) [34], что позволяет с уверенностью утверждать об устойчивости редких элементов в оливине и низко-Ca пироксене термальному метаморфизму.

Сохранность индивидуальных особенностей хондр позволяет использовать равновесные обыкновенные хондриты для исследования процессов, происходивших на ранних этапах становления Солнечной системы и изучать механизмы хондро- и планетообразования.

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

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Кринов Е.Л.* Каменный метеоритный дождь Кунашак // Метеоритика. 1950. № 8. С. 66-77.
2. *Юдин И.А.* Новые данные о каменном метеоритном дожде Кунашак // Метеоритика. 1951. № 9. С. 122-123.
3. *Ерохин Ю.В., Коротеев В.А., Хиллер В.В. и др.* Метеорит «Кунашак»: новые данные по минералогии // Доклады Академии наук. 2015. Т. 464. № 5. С. 599-602. DOI: 10.7868/s0869565215290198
4. *Юдин И.А.* О нахождении метеорной пыли в районе падения каменного метеоритного дождя Кунашак // Метеоритика. 1960. № 18. С. 113-118.
5. *Зоткин И.Т., Кринов Е.Л.* Исследование условий падения каменного метеоритного дождя Кунашак // Метеоритика. 1958. № 15. С. 51-81.
6. *Tsvetkov V.* On meteorite orbits // Earth, Moon, and Planets. 1987. Vol. 37. Iss. 2. P. 133-140. DOI: 10.1007/BF00130888
7. *Lindsay S.S., Dunn T.L., Emery J.P., Bowles N.E.* The Red Edge Problem in asteroid band parameter analysis // Meteoritics & Planetary Science. 2016. Vol. 51. Iss. 4. P. 806-817. DOI: 10.1111/maps.12611
8. *Pape J., Mezger K., Bouvier A.-S., Baumgartner L.P.* Time and duration of chondrule formation: Constraints from $^{26}$Al-$^{26}$Mg ages of individual chondrules // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2019. Vol. 244. P. 416-436. DOI: 10.1016/j.gca.2018.10.017
9. *Piralla M., Villeneuve J., Batanova V. et al.* Conditions of chondrule formation in ordinary chondrites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2021. Vol. 313. P. 295-312. DOI: 10.1016/j.gca.2021.08.007
10. *Hewins R.H., Connolly H.C., Lofgren Jr. G.E., Libourel G.* Experimental Constraints on Chondrule Formation / Chondrites and the protoplanetary disk: Proceedings of a workshop held at the Radisson Kaua'i Beach Resort, 8-11 November 2004, Kaua'i, Hawai'i. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2005. Vol. 341. P. 286-316.
11. *Russell S.S., Connolly Jr. H.C., Krot A.N.* Chondrules. Records of Protoplanetary Disk Processes. Cambridge University Press, 2018. 456 p. DOI: 10.1017/9781108284073
12. *Jacquet E., Piralla M., Kersaho P., Marrocchi Y.* Origin of isolated olivine grains in carbonaceous chondrites // Meteoritics & Planetary Science. 2021. Vol. 56. Iss. 1. P. 13-33. DOI: 10.1111/maps.13583



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

13. *Marrocchi Y., Euverte R., Villeneuve J. et al.* Formation of CV chondrules by recycling of amoeboid olivine aggregate-like precursors // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2019. Vol. 247. P. 121-141. DOI: 10.1016/j.gca.2018.12.038

14. *Nardi L., Palomba E., Longobardo A. et al.* Mapping olivine abundance on asteroid (25143) Itokawa from Hayabusa/NIRS data // Icarus. 2019. Vol. 321. P. 14-28. DOI: 10.1016/j.icarus.2018.10.035

15. *Jacquet E., Marrocchi Y.* Chondrule heritage and thermal histories from trace element and oxygen isotope analyses of chondrules and amoeboid olivine aggregates // Meteoritics & Planetary Science. 2017. Vol. 52. Iss. 12. P. 2672-2694. DOI: 10.1111/maps.12985

16. *Libourel G., Krot A.N.* Evidence for the presence of planetesimal material among the precursors of magnesian chondrules of nebular origin // Earth and Planetary Science Letters. 2007. Vol. 254. Iss. 1-2. P. 1-8. DOI: 10.1016/j.epsl.2006.11.013

17. *Tenner T.J., Nakashima D., Ushikubo T. et al.* Oxygen isotope ratios of FeO-poor chondrules in CR3 chondrites: Influence of dust enrichment and $H_2O$ during chondrule formation // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2015. Vol. 148. P. 228-250. DOI: 10.1016/j.gca.2014.09.025

18. *Varela M.E., Zinner E.* Unraveling the role of liquids during chondrule formation processes // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2018. Vol. 221. P. 358-378. DOI: 10.1016/j.gca.2017.03.038

19. *Ruzicka A.M., Greenwood R.C., Armstrong K. et al.* Petrology and oxygen isotopic composition of large igneous inclusions in ordinary chondrites: Early solar system igneous processes and oxygen reservoirs // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2019. Vol. 266. P. 497-528. DOI: 10.1016/j.gca.2019.01.017

20. *Bischoff A., Schleiting M., Wieler R., Patzek M.* Brecciation among 2280 ordinary chondrites – Constraints on the evolution of their parent bodies // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2018. Vol. 238. P. 516-541. DOI: 10.1016/j.gca.2018.07.020

21. *Lewis J.A., Jones R.H., Garcea S.C.* Chondrule porosity in the L4 chondrite Saratov: Dissolution, chemical transport, and fluid flow // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2018. Vol. 240. P. 293-313. DOI: 10.1016/j.gca.2018.08.002

22. *Varela M.E.* Bulk trace elements of Mg-rich cryptocrystalline and ferrous radiating pyroxene chondrules from Acfer 182: Their evolution paths // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2019. Vol. 257. P. 1-15. DOI: 10.1016/j.gca.2019.04.025

23. *Levashova E.V., Mamykina M.E., Skublov S.G. et al.* Geochemistry (TE, REE, Oxygen) of Zircon from Leucogranites of the Belokurikhinsky Massif, Gorny Altai, as Indicator of Formation Conditions // Geochemistry International. 2023. Vol. 61. Iss. 13. P. 1323-1339. DOI: 10.1134/S001670292311006X

24. *Skublov S.G., Rumyantseva N.A., Vanshtein B.G. et al.* Zircon Xenocrysts from the Shaka Ridge Record Ancient Continental Crust: New U-Pb Geochronological and Oxygen Isotopic Data // Journal of Earth Science. 2022. Vol. 33. Iss. 1. P. 5-16. DOI: 10.1007/s12583-021-1422-2

25. *Скублов С.Г., Левашова Е.В., Мамыкина М.Е. и др.* Полифазный Белокурихинский массив гранитов, Горный Алтай: изотопно-геохимическое исследование циркона // Записки Горного института. 2024. 24 с. (Online first)

26. *Салимгараева Л.И., Березин А.В.* Гранатиты из эклогитового комплекса Марун-Кеу (Полярный Урал): геохимия и проблемы образования // Записки Горного института. 2023. № 262. С. 509-525.

27. *Стативко В.С., Скублов С.Г., Смоленский В.В., Кузнецов А.Б.* Редкие и редкоземельные элементы в гранатах из силикатно-карбонатных образований Кусинско-Копанского комплекса (Южный Урал) // Литосфера. 2023. Т. 23. № 2. С. 225-246. DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-2-225-246

28. *Скублов С.Г., Гаврильчик А.К., Березин А.В.* Геохимия разновидностей берилла: сравнительный анализ и визуализация аналитических данных методами главных компонент (PCA) и стохастического вложения соседей с *t*-распределением (*t*-SNE) // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 455-469. DOI: 10.31897/PMI.2022.40

29. *Гаврильчик А.К., Скублов С.Г., Котова Е.Л.* Редкоэлементный состав берилла из месторождения Шерловая Гора, Юго-Восточное Забайкалье // Записки Российского минералогического общества. 2021. Т. 150. № 2. С. 69-82. DOI: 10.31857/S0869605521020052

30. *Lichtenberg T., Golabek G.J., Dullemond C.P. et al.* Impact splash chondrule formation during planetesimal recycling // Icarus. 2018. Vol. 302. P. 27-43. DOI: 10.1016/j.icarus.2017.11.004

31. *Chakraborty S.* Diffusion Coefficients in Olivine, Wadsleyite and Ringwoodite // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2010. Vol. 72. № 1. P. 603-639. DOI: 10.2138/rmg.2010.72.13

32. *Cherniak D.J.* REE diffusion in olivine // American Mineralogist. 2010. Vol. 95. Iss. 2-3. P. 362-368. DOI: 10.2138/am.2010.3345

33. *Marrocchi Y., Villeneuve J., Batanova V. et al.* Oxygen isotopic diversity of chondrule precursors and the nebular origin of chondrules // Earth and Planetary Science Letters. 2018. Vol. 496. P. 132-141. DOI: 10.1016/j.epsl.2018.05.042

34. *Суханова К.Г., Скублов С.Г., Галанкина О.Л. и др.* Редкоэлементный состав силикатных минералов в хондрах и матрице метеорита Бушхов // Геохимия. 2020. Т. 65. № 12. С. 1176-1185. DOI: 10.31857/S0016752520120067

35. *Суханова К.Г.* Состав силикатных минералов как отражение эволюции равновесных обыкновенных хондритов: Автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук. М.: Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, 2022. 21 с.

36. *Batanova V.G., Suhr G., Sobolev A.V.* Origin of Geochemical Heterogeneity in the Mantle Peridotites from the Bay of Islands Ophiolite, Newfoundland, Canada: Ion Probe Study of Clinopyroxenes // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1998. Vol. 62. Iss. 5. P. 853-866. DOI: 10.1016/S0016-7037(97)00384-0

37. *Portnyagin M., Almeev R., Matveev S., Holtz F.* Experimental evidence for rapid water exchange between melt inclusions in olivine and host magma // Earth and Planetary Science Letters. 2008. Vol. 272. Iss. 3-4. P. 541-552. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.05.020

38. *Palme H., Lodders K., Jones A.* 2.2 – Solar System Abundances of the Elements / Treatise on Geochemistry. Elsevier, 2014. Vol. 2: Planets, Asteriods, Comets and The Solar System. P. 15-36. DOI: 10.1016/b978-0-08-095975-7.00118-2

39. *Jacquet E., Alard O., Gounelle M.* Trace element geochemistry of ordinary chondrite chondrules: The type I/type II chondrule dichotomy // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2015. Vol. 155. P. 47-67. DOI: 10.1016/j.gca.2015.02.005

40. *Jacquet E., Alard O., Gounelle M.* Chondrule trace element geochemistry at the mineral scale // Meteoritics and Planetary Science. 2012. Vol. 47. Iss. 11. P. 1695-1714. DOI: 10.1111/maps.12005

41. Kennedy A.K., Lofgren G.E., Wasserburg G.J. An experimental study of trace element partitioning between olivine, orthopyroxene and melt in chondrules: equilibrium values and kinetic effects // Earth and Planetary Science Letters. 1993. Vol. 115. Iss. 1-4. P. 177-195. DOI: 10.1016/0012-821X(93)90221-T

***Авторы:*** **К.Г.Суханова,** *канд. геол.-минерал. наук, младший научный сотрудник, cris.suhanova92@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5695-0767 (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия),* **О.Л.Галанкина,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0003-2761-2835 (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия).*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*