



Научная статья
УДК 552.63

Особенности кристаллизации оливина в обычных хондритах (метеорит Саратов): геохимия редких и редкоземельных элементов

К.Г.СУХАНОВА✉, А.Б.КУЗНЕЦОВ, О.Л.ГАЛАНКИНА

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Суханова К.Г., Кузнецов А.Б., Галанкина О.Л. Особенности кристаллизации оливина в обычных хондритах (метеорит Саратов): геохимия редких и редкоземельных элементов // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 149-157. DOI: 10.31897/PMI.2022.39

Аннотация. Обсуждается геохимия главных (EMPA) и редких (SIMS) элементов в оливине порфировых, не-порфировых хондр и матрице равновесного обычного хондрита Саратова (L4). Оливин соответствует форстериту и довольно неоднороден (Fo 73-77). Различий содержания главных элементов в оливине хондр и матрицы метеорита не обнаружено. Однако содержание главных и редких элементов в оливине внутри хондр значительно различается, высокие значения установлены в оливине колосниковой хондры. Оливин порфировых хондр и матрицы метеорита Саратова обладает схожими концентрациями редких элементов. Высокие содержания тугоплавких (Zr, Y, Al) и умеренно-летучих (Sr и Ba) редких элементов в оливине колосниковой хондры указывают на образование расплава хондры в результате плавления минералов-предшественников и его быстрое остывание в протопланетном диске, что согласуется с экспериментальными данными. Оливин центральной части хондр метеорита Саратова отличается от оливина каймы хондр и матрицы метеорита повышенными значениями Yb/La отношения. Реликтовых зерен и магнезиальных ядер оливина в хондрах метеорита не обнаружено. Отдельные зерна в хондрах выделяются обогащенностью редкими элементами относительно остальных зерен оливина в хондре.

Ключевые слова: обычные хондриты; редкие элементы; оливин; пироксен; плагиоклаз; ионный зонд

Благодарность. Исследование выполнено в рамках темы НИР ИГД РАН FMUW-2022-0005.

Поступила: 02.05.2022

Принята: 25.05.2022

Онлайн: 13.07.2022

Опубликована: 13.07.2022

Введение. Обыкновенные хондриты являются наиболее распространенным типом метеоритов и представляют собой агломерат хондр и единичных зерен силикатных минералов. Хондры – субмиллиметровые силикатные сферулы, сложенные оливином, пироксеном и мезостазисом (стеклом), относятся к наиболее древним образованиям Солнечной системы [1]. Вещество обыкновенных хондритов не испытывало дифференциации и сегрегации ядро-мантия, что позволило сохранить первичные свойства, отражающие физико-химические условия протопланетного диска на ранней стадии развития Солнечной системы. Тем не менее, большинство обыкновенных хондритов демонстрирует признаки влияния термального метаморфизма различных степеней интенсивности. В результате аккреции планетезималей происходило формирование родительских тел хондритов и накопление на них короткоживущих изотопов ^{26}Al и ^{50}Fe , что влекло за собой образование внутреннего источника нагрева и действию вторичных процессов (термальный метаморфизм, активность флюидов) [2].

Термальный метаморфизм приводил к гомогенизации составов главных силикатных минералов (оливин, пироксен), перекристаллизации стекла хондр в плагиоклаз, укрупнению зерен камасита-тэнита, троилита и хромита и появлению новых минеральных фаз (апатит, мерилит, Са-пироксен) [3]. В зависимости от удаленности от источника нагрева, хондриты подразделяются на



неравновесные (петрологический тип 3) и равновесные (4, 5 и 6), где с увеличением номера петрологического типа (п.т.) увеличивается степень минерального равновесия и ярче проявляются признаки метаморфизма.

Изучение химического и изотопного состава хондр позволяет реконструировать условия формирования и особенности эволюции первичного вещества на допланетной стадии. Основным источником информации о первичном внеземном веществе являются метеориты. Один из крупных метеоритов массой около 200 кг – Саратов – упал каменным дождем на территории сел Михайловского, Шаховского, Донгуза и Белой Горы в Саратовской области 6 октября 1918 г. [4]. Метеорит относится к маложелезистой группе L равновесных обыкновенных хондритов (POX) 4 п.т., отличается высокой пористостью материала [5] и присутствием большого количества Q фазы – фазы концентратора благородных газов [6, 7]. Характеризуется малой степенью ударного метаморфизма S2/S3 [8] и низкой степенью выветривания W0.

До сих пор исследования силикатных минералов POX ограничивались изучением состава главных или второстепенных элементов, что привело к затруднениям при оценке петрологического типа зерен, доставленных с астероида Итокава [9]. Редкие и редкоземельные элементы широко используются при оценке геохимических обстановок, что позволяет с их помощью исследовать условия образования минералов различного генезиса, таких как циркон [10], турмалин [11], берилл [12], пироксен [13], а также стеклышко [14]. Редкие элементы в оливине и пироксене мало подвержены диффузии в условиях термального метаморфизма [15, 16], наблюдающегося на родительских телах хондритов, что позволяет использовать их при изучении минералов POX. Изучение состава редких тугоплавких элементов в оливине, пироксене и стекле хондр неравновесных обыкновенных хондритов (HOX) выявило различные виды кристаллизации порфирированных хондр и позволило определить их относительные скорости остывания [17-19]. Состав умеренно летучих редких элементов обычно отражает взаимодействие хондры с окружающим газом в протопланетном облаке [20, 21]. Первые результаты изучения составов силикатных минералов POX установили неоднородность содержания редких элементов [22, 23] и соотношения изотопов кислорода [24] в оливине и пироксене POX.

В порфирированных хондрах HOX иногда наблюдаются изолированные зерна тугоплавкого оливина, значительно обогащенного MgO и отличающегося по изотопному составу кислорода от оливина хондры [25, 26], а также более магнезиальные ядра оливиновых зерен, обрастающие каемками менее магнезиального форстерита [27]. Присутствие реликтовых зерен оливина в порфирированных хондрах может указывать на их образование в результате плавления минералов-предшественников (прекурсоров). В качестве прекурсорного материала рассматриваются рефракторные включения (CAI и AOA) [28], мелкозернистый материал матрицы хондритов, хондры и фрагменты хондр предыдущих генераций. Также сюда относят осколки планетезималей [29], лед H₂O [30], реликтовый оливин и скопления пыли [31].

Проведенное недавно изучение оливина порфирированных хондр метеорита Орловка показало, что они не испытали уравнивания в отношении редких элементов при термальном метаморфизме, а обнаруженное геохимическое различие хондр подтвердило гипотезу о плавлении минеральных предшественников хондр в протопланетном диске [32].

Исследование редкоэлементного состава оливина хондр POX метеорита Саратов позволило установить влияние термального метаморфизма на содержание редких элементов и выявить различия в условиях образования хондр различного строения.

Аналитические методы. Образец хондрита Саратов (L4) был предоставлен заведующим лабораторией ИГГД РАН проф. Л.К. Левским.

Химический состав минералов на уровне главных элементов был определен методом ЕРМА в ИГГД РАН на микрозондовом анализаторе Jeol JXA-8230 с четырьмя волновыми спектрометрами. Вещество метеорита было помещено 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. Диаметр сфокусированного пучка составил 3 мкм. В качестве стандартов использовались природные минералы, чистые оксиды



и металлы. Для коррекции матричного эффекта использовался алгоритм ZAF. Линии $K\alpha_1$ 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 работе [33]. 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 кВ. 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 EPMA. Спектры распределения REE в минералах нормировались к хондриту CI [34].

Результаты и обсуждение. Петрографическое исследование метеорита Саратов позволило установить троилитовые, хромитовые и силикатные хондры порфировой, колосниковой, радиальной и скрытокристаллической структур. Основная часть метеорита сложена силикатными хондрами различных размеров и их обломками. Силикатные хондры визуально можно разделить на три фракции по размерам: наиболее крупные – 1-2 мм в диаметре – представлены порфировой, редко колосниковой структурами; средние – 0,5-0,3 мм; мелкие – менее 0,2 мм. Хондры средних и мелких размеров представлены всеми вышеперечисленными структурами. Силикатные хондры метеорита Саратов практически не имеют металлических и силикатных кайм.

Разнообразие структур хондр, подразделяющихся на порфировые и непорфировые (колосниковые, радиально-лучистые, скрытокристаллические и т.д.), отражает различия в условиях остывания расплава. Экспериментально установлено, что образование порфировых хондр происходит из медленно остывающего расплава (1-500 °C/ч), нагретого ниже температуры ликвидуса (1400-1700 °C) и сохранившего большое количество реликтовых зерен. Кристаллизация колосниковых хондр требует нагрева расплава незначительно выше температуры ликвидуса и быстрого остывания (500-3000 °C/ч). Для радиально-лучистых хондр характерна высокая температура расплава и практически мгновенное его остывание (1000-3000 °C/ч) [35].

Матрица метеорита в основном сложена мелкими хондрами, обломками хондр или отдельными крупными зернами оливина, также иногда встречаются небольшие металлические образования. Матрица сильно раздроблена и характеризуется высокой пористостью. Наличие межхондровой (матричной) части хондритов, существенные отличия ее изотопного и химического состава [36], а также присутствие досолнечных зерен и первичных конденсатов (корунд, хибонит, шпинель, перовскит) указывает на существование областей протопланетного диска, не участвовавших в хондрообразовании.

Оливин в метеорите Саратов чаще всего наблюдается в идиоморфных или гипидиоморфных зернах, слагающих порфировые хондры метеорита. В зависимости от хондры размеры зерен могут варьировать от 500 до 100 мкм. В колосниковых хондрах оливин наблюдается в виде вытянутых скелетных кристаллов, иногда срастающихся между собой, и образует балки, ориентированные чаще всего параллельно, но иногда пересекающиеся между собой. В матрице метеорита наблюдаются отдельные гипидиоморфные зерна оливина, размер которых в среднем составляет 200-300 мкм по удлинению. Состав оливина соответствует форстериту и довольно неоднороден (Fo 73-77), но различий между оливином хондр и матрицы по составу главных элементов не установлено. В порфировых хондрах на границе с анортоклазом зерна оливина обрастают мелкими (20-30 мкм) зернами пизонита и авгита.

Распределение редких элементов в силикатных минералах метеорита Саратов было исследовано в двух оливин-пироксеновых порфировых (ЗРОР-2, ЗРОР-4) и одной оливин-пироксеновой колосниковой (ЗВОР-1) хондрах (рис.1).

Хондра ЗРОР-2 имеет овальную форму, не превышает 2 мм по удлинению и сложена крупными (500-300 мкм) идиоморфными зернами оливина и небольшими гипидиоморфными зернами энстатита, интерстиции между которыми заполнены плохо раскристаллизованным мезостазисом олигоклаз-лабрадорного состава.

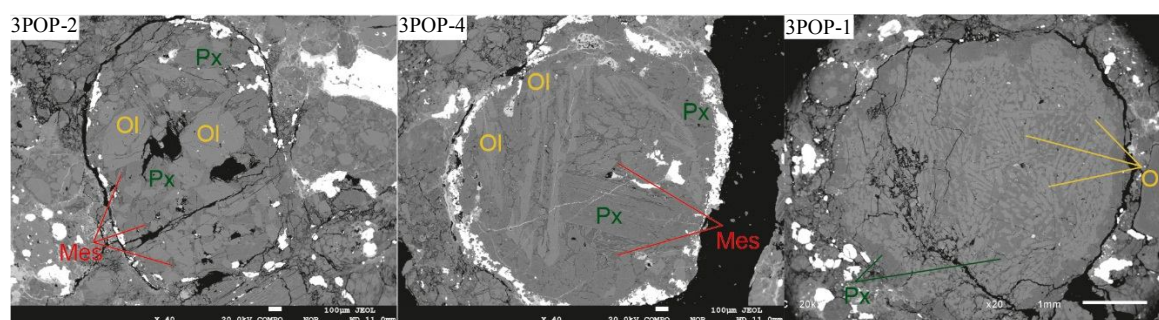


Рис.1. Оливин-пироксеновые порфировые хондры 3POP-2 и 3POP-4 и оливин-пироксеновая колосниковая хондра 3POP-1 метеорита Саратов в обратно-отраженных электронах

Ol – оливин, Px – пироксен, Mes – мезостазис

Оливин хондры по содержанию главных и редких элементов довольно неоднороден, однако геохимических закономерностей между содержаниями элементов в оливине центральной и краевой части хондры не наблюдается. Тем не менее, ксеноморфное зерно оливина небольшого размера (100 мкм), находящееся в краевой части хондры, отличается значительной обогащенностью редкими элементами от крупных, хорошо ограненных, зерен по содержанию редких элементов (табл.1). Спектры распределения редких элементов в оливине хондры практически не дифференцированы (рис.2, а). Содержание редких элементов на порядок ниже хондритовых значений. В целом в оливине хондры 3POP-2 наблюдается обогащенность LREE по отношению к HREE.

Таблица 1

Состав оливина хондры 3POP-2 метеорита Саратов

Компонент	3POP-2					
	Центр	Центр	Край	Край	Матрица	Матрица
SiO ₂	38,77	38,84	38,77	37,92	38,78	38,74
Al ₂ O ₃	0,01	0,01	bdl		bdl	0,01
MgO	39,11	38,91	39,05	37,54	39,11	39,11
TiO ₂	bdl	0,01	bdl	bdl	bdl	bdl
CaO	0,01	0,02	0,01		0,02	0,05
FeO	21,71	22,02	21,85	23,95	21,66	21,97
MnO	0,50	0,47	0,48	0,59	0,45	0,48
Cr ₂ O ₃	bdl	0,01	0,02	bdl	0,01	bdl
NiO	0,01	bdl	bdl	bdl	0,02	0,01
Сумма	100,12	100,30	100,18	100,00	100,05	100,36
Zr	0,08	0,07	0,07	0,73	0,06	0,13
Hf	0,05			0,07		0,03
Y	4409	4352	4128	4153	4142	4755
Al	0,01	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01
Ti	90,0	75,5	72,2	1146	55,8	850
Nb	98,5	106	77,2	108	106	121
Ca	0,02	0,01	0,01	0,08	0,01	0,02
La	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Ce	0,02	0,01	0,03	0,04	0,02	0,02
Pr	0,01		0,01	0,01		bdl
Nd	0,04		0,06	0,06		0,03
Sm						0,03
Eu	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Gd			0,02	0,04	0,01	0,03
Dy				0,02		
Er			0,02	0,02		
Yb	0,04		0,01		0,02	0,02
Lu	0,01	0,01		0,01		bdl
Sr	0,14	0,11	0,14	3,02	0,12	0,73



Окончание табл. 1

Компонент	ЗРОР-2					
	Центр	Центр	Край	Край	Матрица	Матрица
Ba	0,23	0,08	0,16	1,30	0,07	1,17
V	14,4	13,1	22,0	27,8	12,4	14,7
Ni	24,8	22,8	34,4	33,2	26,4	35,4
Cr	358	371	847	1464	362	404
Rb	1,16	1,16	1,24	1,77	0,95	2,15

Примечание. Пустая ячейка – элемент не определялся; bdl – содержание элемента ниже порога обнаружения.

Хондра ЗРОР-4 характеризуется округлой формой, полным отсутствием пор и трещин, размер хондры не превышает 2 мм (рис.1). Хондра сложена крупными (1-1,5 мм по удлинению) гипидиоморфными вытянутыми вкрапленниками оливина и меньшими по размеру (200-300 мкм) зернами низко-Са пироксена, интерстиции между которыми заполнены мезостазисом, по составу близким к анортклазу. По границе хондры проходит тонкая прерывистая металлическая кайма.

Оливин в хондре ЗРОР-4 представлен крупными сильно вытянутыми зернами, по составу относится к форстериту (Fo 75). По составу главных и редких элементов различий между оливином хондры и матрицы не наблюдается (табл.2) кроме небольшой обогащенности оливина центральной части хондры Се и Ст, а также оливина матрицы Ti и Ni (рис.2, б).

Спектры распределения редких элементов субгоризонтальны и практически не дифференцированы. Оливин хондры и матрицы обеднен редкими элементами по сравнению с хондритовыми значениями, но отличается высоким содержанием редкоземельных элементов по сравнению с оливином порфировых хондр НОХ. В оливине краевой части хондры и матрицы метеорита Саратов наблюдается преобладание HREE над LREE, однако оливин центральной части хондры обогащен LREE по сравнению с остальными оливинами хондры, что отражается в обратном распределении REE и преобладании LREE над HREE.

Для оливина краевой части хондры и матрицы метеорита отношение Ca/Al близко к хондритовому значению (и сохраняется прямая корреляция La и Yb), однако для оливина центра хондры оно сильно отличается.

Колосниковая хондра ЗВОР-1 имеет крупный размер (4 мм в диаметре), округлую форму, высокую пористость и трещиноватость (см. рис.1). Хондра отличается наличием силикатной пироксеновой каймы и сложена несколькими группами ламелей. Промежутки между ламелями заполнены ксеноморфными выделениями низко-Са пироксена и мезостазиса. На границе пироксена с мезостазисом часто присутствуют фазы высоко-Са пироксена.

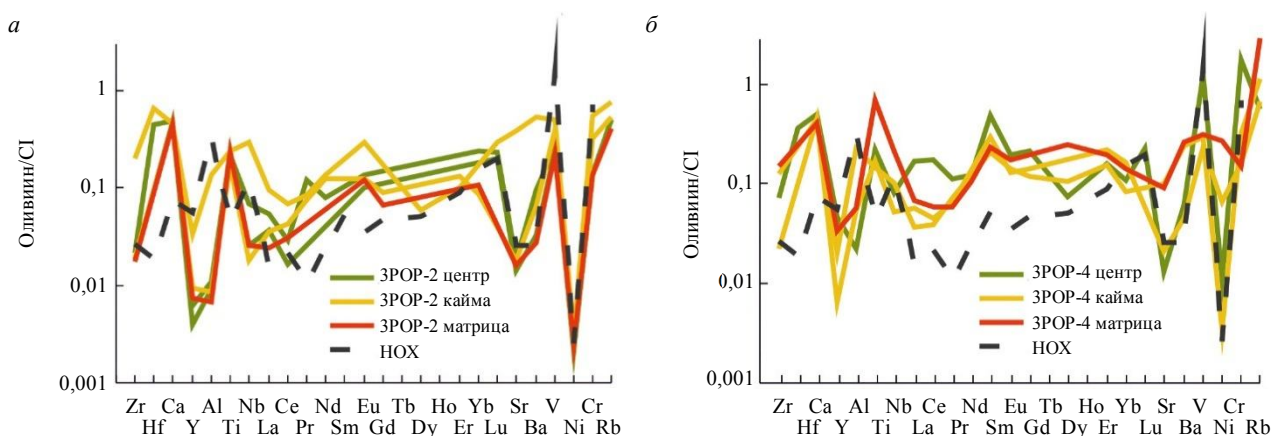


Рис.2. Спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту, в оливине хондры ЗРОР-2 (а) и ЗРОР-4 (б)



Таблица 2

Состав оливина хондр ЗРОР-4 и ЗВОР-1 метеорита Саратов

Компонент	ЗРОР-4				ЗВОР-1			
	Центр	Край	Край	Матрица	Центр	Центр	Край	Матрица
SiO ₂	38,55	38,57	38,75	38,69	38,92	38,76	38,80	38,96
Al ₂ O ₃	bdl	0,03	0,01	0,03	bdl	0,03	bdl	bdl
MgO	38,89	38,87	39,06	38,69	39,45	39,05	39,29	39,19
TiO ₂	0,01	bdl	bdl	0,11	0,04	0,03	bdl	0,03
CaO	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,03	0,02
FeO	21,10	21,41	21,57	21,87	21,85	21,96	22,03	21,76
MnO	0,51	0,42	0,47	0,45	0,48	0,49	0,47	0,46
Cr ₂ O ₃	0,01	0,03	0,02	0,05	0,02	0,02	0,04	0,01
NiO	0,01	bdl	0,01	0,03	bdl	bdl	bdl	bdl
Сумма	99,09	99,35	99,91	99,94	100,77	100,38	100,64	100,43
Zr	0,26	0,47	0,08	0,56	0,39	1,24	0,93	0,15
Hf	0,04				0,04	0,04	0,03	0,03
Y	4695	4242	4178	3815	4285	4142	4641	4088
Al	0,07	0,03	0,01	0,05	0,11	0,14	0,31	0,01
Ti	187	1960	453	478	595	375	179	74,0
Nb	101	66,1	78,2	322	281	273	200	166
Ca	0,02	0,03	0,01	0,06	0,02	0,07	0,05	bdl
La	0,04	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01
Ce	0,11	0,02	0,03	0,04	0,14	0,02	0,09	0,03
Pr	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
Nd	0,06			0,05	0,05	0,03	0,11	0,03
Sm	0,08	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	
Eu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	bdl	0,01	
Gd	0,05	0,03	0,03		bdl	0,03	0,06	0,02
Dy	0,02	0,03		0,07	0,04	0,02	0,07	0,01
Er	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,05	0,03	
Yb	0,02	0,01	0,03	0,02	0,08	0,06	0,05	0,01
Lu	0,01				0,01	0,01	0,01	bdl
Sr	0,10	0,78	0,16	0,73	0,24	0,75	0,15	0,10
Ba	0,15	0,60	0,11	0,66	0,89	0,18	0,78	0,13
V	71,2	16,8	13,3	17,9	27,3	21,3	44,0	14,1
Ni	119	36,1	739	3063	29,8	26,4	29,3	29,4
Cr	4872	871	432	398	554	786	1838	383
Rb	1,36	2,74	1,65	7,26	1,46	0,94	1,04	1,82

Примечание. См. примечания к табл. 1.

Оливин в центре хондры ЗВОР-1 представлен вытянутыми тонкими зернами, которые ближе к краю хондры становятся меньше и изометричнее. Ламели оливина могут достигать 1 мм по удлинению, при этом ксеноморфные зерна обычно характеризуются небольшим размером (200 мкм). По составу главных и редких элементов оливин хондры однороден и соответствует форстериту (Fo 75) (табл.2). При этом оливин матрицы значительно обеднен тугоплавкими несовместимыми элементами (Zr, Y, LREE) по сравнению с оливином хондры. Оливин центра хондры обогащен Al, Ce и Sr.

Спектр распределения редких элементов в оливине дифференцирован незначительно (рис.3, а). Содержание редких элементов немного обеднено относительно хондритовых значений и в целом соответствует уровню содержания редких элементов в оливине НОХ. Также наблюдается небольшое преобладание HREE над LREE, при этом хондритовое Ca/Al отношение в оливине хондры ЗВОР-1 нарушено. Оливин матрицы метеорита в целом обеднен тугоплавкими элементами (Zr, Y, Al) относительно оливина хондры.

Выводы. Хондры ЗРОР-2, ЗРОР-4 и ЗВОР-1 метеорита Саратов отличаются по составу редких элементов в оливине. Несмотря на сильную неоднородность содержаний редких элементов в оливине хондр, значимых различий между оливином порфировых хондр ЗРОР-2 и ЗРОР-4 не наблюдается. Оливин колосниковой хондры ЗВОР-1 характеризуется высоким значением отношения Yb/Ti и обогащенностью HREE и Y по сравнению с оливином порфировых хондр (рис.3, б).

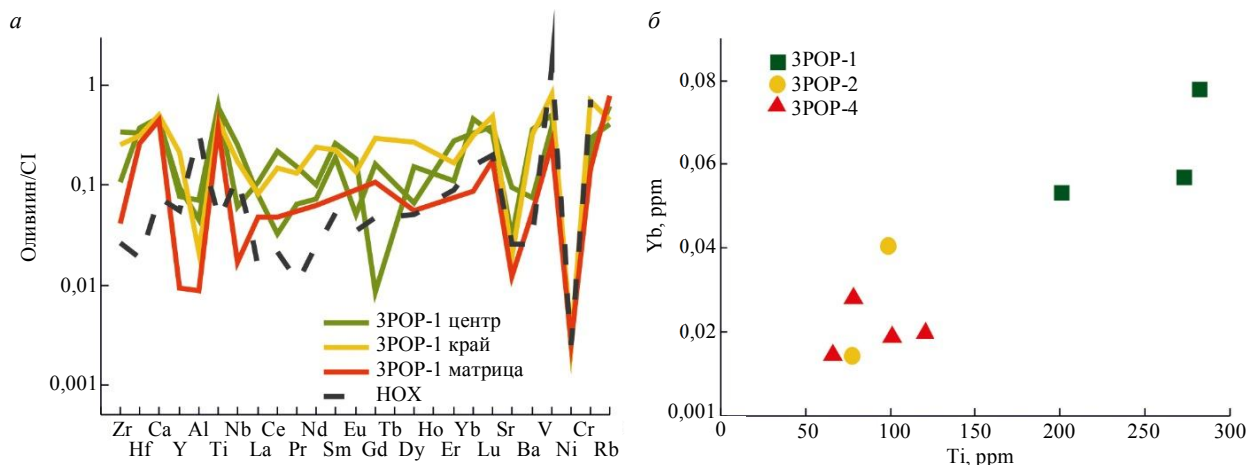


Рис.3. Спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту (а) и соотношение Ti и Yb в оливине хондры 3POP-1 (б)

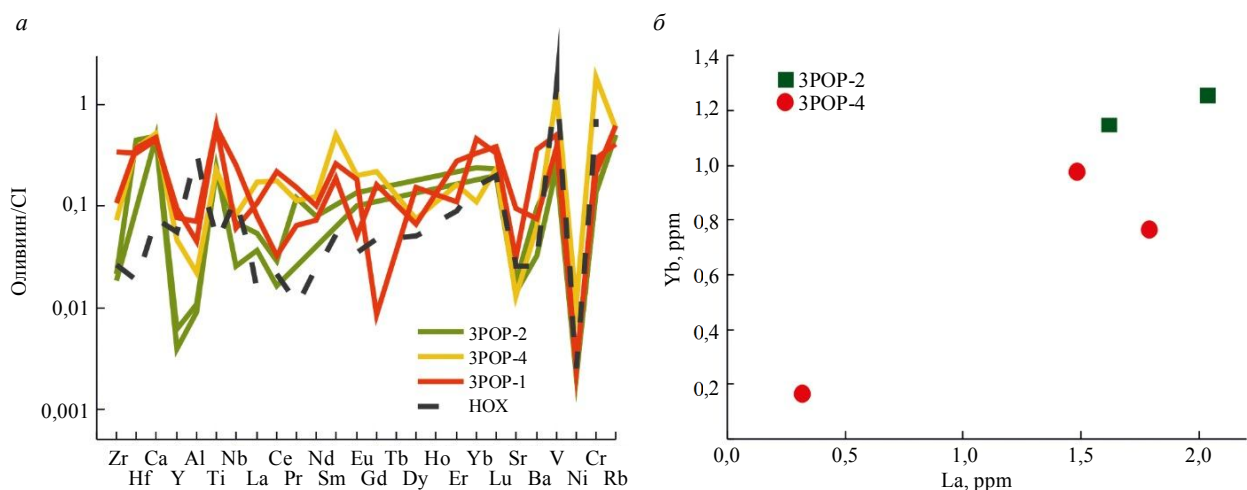


Рис.4. Спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту (а) и соотношение La и Yb (б) в оливине хондр метеорита Саратов

Спектры распределения редких элементов в оливине колосниковой хондры отличаются сильным обогащением тугоплавких элементов (Zr, Y, Al), а также повышенными концентрациями умеренно летучих несовместимых элементов (Sr и Ba) (рис.4, а). В целом оливин всех трех хондр обеднен редкими элементами относительно хондритовых значений, при этом концентрации редких элементов значительно варьируют внутри хондры.

Высокие содержания редких элементов в оливине характерны для хондр, образованных при очень быстрых скоростях остывания (более 1000 °C/ч) [37]. При образовании хондры путем конденсации в ней должно наблюдаться нефракционированное отношение Ca/Al, положительная корреляция La и Yb, нефракционированное содержание тугоплавких редких литофильных элементов [38].

Высокая концентрация одновременно несовместимых тугоплавких и умеренно летучих элементов в оливине колосниковой хондры не может являться признаком прямой конденсации в протопланетном диске и скорее согласуется с гипотезой о плавлении минералов-предшественников хондр. При этом прямая корреляция Yb и La характерна для оливина только порфировых хондр (рис.4, б).

Оливин центральной части хондр метеорита Саратов отличается от оливина каймы хондр и матрицы метеорита повышенными значениями Yb/La отношения (рис.5, а). Однако на спектре распределения редких элементов различий между оливином центра, каймы хондр и матрицы метеорита не наблюдается (рис.5, б).

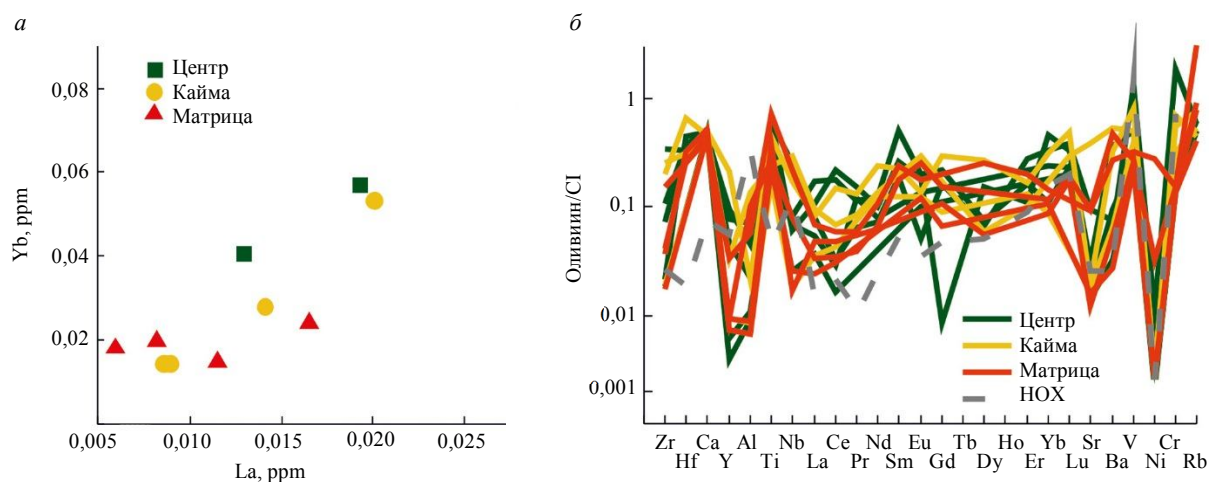


Рис.5. Соотношение La и Yb (а) и спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту (б) в оливине метеорита Саратов

Таким образом, в оливине хондр и матрицы метеорита Саратов гомогенизации редких элементов под влиянием термального метаморфизма не наблюдается. Различия в уровне содержания редких элементов в оливине порфировых и колосниковых хондр отражают высокую скорость остывания расплава колосниковых хондр и подтверждают гипотезу о появлении расплава хондр в результате плавления минералов-предшественников.

Авторы благодарят канд. физ.-мат. наук С.Г.Симакина и канд. физ.-мат. наук Е.В.Потапова (ЯФ ФТИАН) за аналитические работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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
2. Tomkins A.G., Weinberg R.F., Schaefer B.F., Langendam A. Disequilibrium melting and melt migration driven by impacts: Implications for rapid planetesimal core formation // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013. Vol. 100. P. 41-59. DOI: 10.1016/j.gca.2012.09.044
3. Jones R.H., McCubbin F.M., Dreeland L. et al. Phosphate minerals in LL chondrites: A record of the action of fluids during metamorphism on ordinary chondrite parent bodies // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014. Vol. 132. P. 120-140. DOI: 10.1016/j.gca.2014.01.027
4. Оболенская Э.В., Попова Е.Е. Собрание метеоритов горного музея Санкт-Петербургского горного университета // Метеорит Челябинск – год на Земле: Материалы Всероссийской научной конференции, 14-15 февраля 2014, Челябинск. Челябинск: Челябинский государственный краеведческий музей, 2014. С. 355-363.
5. 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
6. Fisenko A.V., Verchovsky A.B., Shiryayev A.A. et al. On the carrier phase of the «planetary» noble gases: TEM, Raman, and stepped combustion data for acid-resistant residues from the Saratov (L4) meteorite // *Meteoritics & Planetary Science*. 2018. Vol. 53. № 11. P. 2343-2356. DOI: 10.1111/maps.13130
7. Matsuda J.-i., Morishita K., Nara M., Amari S. Noble gases in oxidized residue prepared from the Saratov L4 chondrite and Raman spectroscopic study of residues to characterize phase Q // *Meteoritics & Planetary Science*. 2016. Vol. 51. P. 70-79. DOI: 10.1111/maps.12587
8. Pesonen L.J., Terho M., Kukkonen I.T. Physical properties of 368 meteorites: Implications for meteorite magnetism and planetary geophysics // *Proceedings of the NIPR Symposium on Antarctic Meteorites*. 1993. № 6. P. 401-416.
9. Nakamura T., Noguchi T., Tanaka M. et al. Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites // *Science*. 2011. Vol. 333. P. 1113-1116. DOI: 10.1126/science.1207758
10. Skublov S.G., Rumyantseva N.A., Li, Q. 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(1). P. 5-16. DOI: 10.1007/s12583-021-1422-2
11. Алексеев В.И., Марин Ю.Б. Турмалин как индикатор оловорудных проявлений касситерит-кварцевой и касситерит-силикатной формаций (на примере Верхнеурмийского рудного узла, Дальний Восток) // *Записки Горного института*. 2019. Т. 235. С. 3-9. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.3
12. 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



13. Березин А.В., Салимгареева Л.И., Скублов С.Г. Эволюция состава минералов при эклогитовом метаморфизме в Беломорском подвижном поясе (на примере о-ва Виченная Лудя) // Петрология. 2020. Т. 28. С. 85-107. DOI: 10.31857/S086959032001001X
14. Ашихмин Д.С., Скублов С.Г. Неоднородность состава ксенолитов мантийных перидотитов из щелочных базальтов вулкана Сверре, архипелаг Шпицберген // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 483-491. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.483
15. 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
16. Cherniak D.J. REE diffusion in olivine // American Mineralogist. 2010. Vol. 95. P. 362-368. DOI: 10.2138/am.2010.3345
17. 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
18. Jacquet E., Alard O., Gounelle M. Chondrule trace element geochemistry at the mineral scale // Meteoritics & Planetary Science. 2012. Vol. 47. № 11. P. 1695-1714. DOI: 10.1111/maps.12005
19. Jacquet E., Alard O., Gounelle M. The formation conditions of enstatite chondrites: Insights from trace element geochemistry of olivine-bearing chondrules in Sahara 97096 (EH3) // Meteoritics & Planetary Science. 2015. Vol. 50. № 9. P. 1624-1642. DOI: 10.1111/maps.12481
20. Varela M.E., Sylvester P., Engler A., Kurat G. Nonporphyritic chondrules from equilibrated Rumuruti and ordinary chondrites: Chemical evidence of secondary processing // Meteoritics & Planetary Science. 2012. Vol. 47. № 10. P. 1537-1557. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2012.01417.x
21. Varela M.E., Sylvester P., Brandstätter F., Engler A. Nonporphyritic chondrules and chondrule fragments in enstatite chondrites: Insights into their origin and secondary processing // Meteoritics & Planetary Science. 2015. Vol. 50. № 8. P. 1338-1361. DOI: 10.1111/maps.12468
22. Sukhanova K.G., Skublov S.G., Galankina O.L. et al. Trace Element Composition of Silicate Minerals in the Chondrules and Matrix of the Buschhof Meteorite // Geochemistry International. 2020. Vol. 58. P. 1321-1330. DOI: 10.1134/S001670292012006X
23. Dutta A., Bhattacharya A., Mishra M. et al. Trace elements and REE geochemistry of olivine and enstatite chondrules in ordinary chondrites: Insights into their cosmochemical genesis // 80th Annual Meeting of the Meteoritical Society, May 2017, Santa Fe, New Mexico, USA. 2017. № 6088.
24. McDougal D., Nakashima D., Tenner T.J. et al. Intermineral oxygen three-isotope systematics of silicate minerals in equilibrated ordinary chondrites // Meteoritics & Planetary Science. 2017. Vol. 52. P. 2322-2342. DOI: 10.1111/maps.12932
25. Jacquet E., Piralla M., Kersaho P., Marrocchi Y. Origin of isolated olivine grains in carbonaceous chondrites // Meteoritics & Planetary Science. 2020. Vol. 56. P. 13-33. DOI: 10.1111/maps.13583
26. Marrocchi Y., Euvette 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
27. Ruzicka A., Floss C., Hutson M. Relict olivine grains, chondrule recycling, and implications for the chemical, thermal, and mechanical processing of nebular materials // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2008. Vol. 72. P. 5530-5557. DOI: 10.1016/j.gca.2008.08.017
28. 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. № 12. P. 2672-2694. DOI: 10.1111/maps.129852672
29. 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. P. 1-8. DOI: 10.1016/j.epsl.2006.11.013
30. Tenner T.J., Nakashima D., Ushikubo T. et al. Oxygen isotope ratios of FeO-poor chondrules in CR3 chondrites: Influence of dust enrichment and H₂O during chondrule formation // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2015. Vol. 148. P. 228-250. DOI: 10.1016/j.gca.2014.09.025
31. 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
32. Суханова К.Г., Кузнецов А.Б., Скублов С.Г. Геохимические особенности хондр метеорита Орловка (H5) как свидетельство плавления минералов-прекурсоров // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 504. № 1. С. 28-33.
33. 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. P. 541-552. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.05.020
34. Palme H., Lodders K., Jones A. Solar system abundances of the elements // Treatise on Geochemistry (Second Edition). 2014. Vol. 2. P. 15-36. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00118-2
35. Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes / Eds. S.S. Russell, H.C. Connolly Jr, A.N. Krot. Cambridge University Press, 2018. 450 p.
36. Hezel D.C., Palme H. The chemical relationship between chondrules and matrix and the chondrule matrix complementarity // Earth and Planetary Science Letters. 2010. Vol. 294. P. 85-93. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.03.008
37. 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 (1-4). P. 177-195. DOI: 10.1016/0012-821X(93)90221-T
38. Engler A., Varela M.E., Kurat G. et al. The origin of non-porphyritic pyroxene chondrules in UOCs: Liquid solar nebula condensates? // Icarus. 2007. Vol. 192. P. 248-286. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.06.016

Авторы: К.Г. Суханова, младший научный сотрудник, cris.suhanova92@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5695-0767> (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия), А.Б. Кузнецов, д-р. геол.-минерал. наук, директор, <https://orcid.org/0000-0002-2959-2922> (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.