ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Редкие элементы в силикатных минералах метеорита Бородино (H5)

К.Г.СУХАНОВА

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

***Как цитировать эту статью*:** Суханова К.Г. Редкие элементы в силикатных минералах метеорита Бородино (H5) // Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 16-33. EDN WHSYGT

Аннотация. Обсуждается геохимия главных (EPMA) и редких (SIMS) элементов в оливине, низко-Ca пироксене и мезостазисе порфировых и колосниковых хондр, а также пироксен-оливиновом агрегате и матрице равновесного обыкновенного хондрита Бородино (H5). Различий в содержании главных элементов в силикатных минералах хондр и матрицы метеорита не обнаружено. Минералы порфировой оливин-пироксеновой и колосниковой хондр отличаются повышенным содержанием редких элементов, что отражает быстрое остывание расплава хондры в газово-пылевом облаке и согласуется с экспериментальными данными. Редкоэлементный состав низко-Ca пироксена зависит от расположения зерна пироксена внутри хондры (центр, край, матрица), а состав мезостазиса – от самого вида объекта (порфировая, колосниковая хондры, пироксен-оливиновый агрегат). Выявлена обедненность редкими элементами низко-Ca пироксена из края хондр по сравнению с центром и матрицей метеорита. Край хондры подвержен взаимодействию с окружающим газом в газово-пылевом облаке, что могло приводить к обмену умеренно летучими редкими элементами в низко-Ca пироксене и к обедненности этими элементами относительно пироксена центра хондры или матрицы метеорита. Мезостазис колосниковой и порфировой оливин-пироксеновой хондр обогащен редкими элементами относительно мезостазиса порфировой оливиновой хондры и пироксен-оливинового агрегата, что может отражать быструю скорость остывания этих объектов или их большую подверженность термальному метаморфизму, приводящему к раскристаллизации стекла хондры в плагиоклаз. Однако следов повышенного воздействия термального метаморфизма на эти объекты не наблюдается. Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии следов уравновешивания редкоэлементного состава силикатных минералов равновесных хондритов.

Ключевые слова: обыкновенные хондриты; редкие элементы; оливин; пироксен; мезостазис; ионный зонд

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

Поступила: 04.04.2023 ***Принята: 20.06.2023*** ***Онлайн: 09.10.2023*** ***Опубликована: 29.02.2024***

Введение. Метеорит Бородино – один из немногих метеоритов, имеющих уникальную историческую ценность и необычную историю пребывания на Земле. Метеорит упал в ночь накануне Бородинского сражения 5 сентября 1812 г. у д. Горки [1]. Упавший камень был подобран русским солдатом, стоявшим на посту, и передан майору Христиану Ивановичу Дитерихсу. Майор Дитерихс был ранен во время сражения и, выйдя в отставку, жил в своем имении в Курляндии (современная Латвия) [2]. Метеорит оставался в семье майора на протяжении 80 лет, и в 1890 г. управляющий сына майора Дитерихса Герке передал основную массу метеорита (320 г) в музей Горного института, но небольшая часть оказалась в коллекции энтомолога, писателя и издателя Ю.И.Симашко, который описал историю метеорита в письме Британскому музею естественной истории [3].

Метеорит Бородино относится к наиболее распространенной группе метеоритов на Земле – равновесным обыкновенным хондритам [4]. Хондриты состоят из субмиллиметровых силикатных сферул – хондр, застывших в невесомости газово-пылевого облака капель расплава и выраженных оливином, низко-Ca пироксеном и мезостазисом. По структурным характеристикам хондры подразделяются на порфировые, сложенные вкрапленниками оливина и (или) пироксена, и непорфировые (колосниковые, радиально-лучистые, скрытокристаллические и т.д.).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т.265. С. 16-33
© К.Г.Суханова, 2024

Разнообразие структур хондр отражает различия в условиях остывания расплава. Экспериментально установлено, что образование порфировых хондр происходит из медленно остывающего расплава (1-500 °С/ч), нагретого ниже температуры ликвидуса (1400-1700 °С) и сохранившего большое количество реликтовых зерен. Кристаллизация колосниковых хондр требует нагрева расплава незначительно выше температуры ликвидуса и быстрого остывания (500-3000 °С/ч). Для радиально-лучистых хондр характерна высокая температура расплава и практически мгновенное его остывание (1000-3000 °С/ч) [5].

В исследованном образце метеорита Бородино большей частью наблюдаются оливиновые и оливин-пироксеновые порфировые, редко встречаются колосниковые и скрытокристаллические хондры.

В порфировых хондрах неизмененных обыкновенных хондритов (UOC) иногда наблюдаются изолированные зерна тугоплавкого оливина, значительно обогащенного MgO и отличающегося по изотопному составу кислорода от оливина хондры [6, 7], а также более магнезиальные ядра оливиновых зерен, обрастающие каемками менее магнезиального форстерита [8]. 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 (например, кальций-алюминиевые и амебовидные оливиновые включения) [9], мелкозернистый материал матрицы хондритов, хондры и фрагменты хондр предыдущих генераций. Также сюда относят осколки планетезималей [10], лед H_2O [11], «реликтовый» оливин и скопления пыли [12].

В массе обыкновенных хондритов хондры находятся среди единичных зерен силикатных минералов, троилита, камасита-тэнита, хромита и т.д., что составляет матрицу метеорита. В метеорите Бородино матрица сложена довольно крупными, хорошо очерченными зернами стандартных для матрицы хондритов минералами. Границы хондр и матрицы четкие, прожилков и карманов плавления не наблюдается.

Основная часть обыкновенных хондритов имеет следы термального метаморфизма, который происходил на достаточно крупных (более 50 км в диаметре) родительских телах. Термальный метаморфизм приводил к гомогенизации (уравновешиванию) Fe-Mg в оливине и низко-Ca пироксене, раскристаллизации мезостазиса в плагиоклаз, появлению высоко-Ca пироксена, апатита и хромита и стиранию границ хондр и матрицы [13]. Исходя из петрографических признаков и вариативности состава силикатных минералов определяется петрологический тип (п.т.) обыкновенного хондрита. UOC относятся к трем п.т. и отличаются максимальной вариативностью содержания Fe и Mg в оливине и низко-Ca пироксене, в четвертом-шестом п.т. (равновесные обыкновенные хондриты – EOC) вариативность Fe и Mg постепенно исчезает и проявляются другие признаки термального метаморфизма. Метеорит Бородино (H5) относится к пятому п.т. и высокожелезистой группе (H) EOC.

Несмотря на широкое распространение EOC, которые составляют более 90 % от всех найденных метеоритов, им посвящено довольно ограниченное число исследований. Поскольку термальный метаморфизм нарушал изначальное распределение химических элементов и их изотопов в минералах EOC, они не использовались для изучения процессов хондрообразования и аккреции. Однако редкие элементы в силикатных минералах практически немобильны в условиях термального метаморфизма на родительских телах хондритов [14, 15], что позволяет использовать их для изучения ранних этапов становления Солнечной системы [16-18]. Исследование состава редких тугоплавких элементов в оливине, пироксене и стекле хондр UOC выявило различные виды кристаллизации порфировых хондр [19] и позволило определить их относительные скорости остывания [20-22]. Состав умеренно летучих редких элементов обычно отражает взаимодействие хондры с окружающим газом в протопланетном облаке [23].

Редкие и редкоземельные элементы широко используются при оценке геохимических обстановок, что позволяет с их помощью исследовать условия образования минералов различного генезиса, таких как циркон [24, 25], берилл [26, 27], оливин [28] и ряд других.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Первые результаты изучения составов силикатных минералов ЕОС установили неоднородность содержания редких элементов [29, 30] и соотношения изотопов кислорода [31] в оливине и пироксене ЕОС. Исследование редкоэлементного состава силикатных минералов хондр метеорита Бородино позволит установить влияние термального метаморфизма на содержание редких элементов и выявить различия в условиях образования хондр различных структур.

Аналитические методы. Образец хондрита Бородино (H5) предоставлен Горным музеем Санкт-Петербургского горного университета. Химический состав минералов на уровне главных элементов определен методом ЕРМА в ИГГД РАН на микрозондовом анализаторе Jeol JXA-8230 с пятью 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, пироксена и 10 нА для мезостазиса [32]. Диаметр сфокусированного пучка составил 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 Ярославском филиале Физико-технологического института им. К.А.Валиева РАН 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 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 [34].

Результаты. В метеорите Бородино были исследованы две порфировые и одна колосниковая хондры, а также оливин-пироксеновый агрегат. Порфировые хондры имеют оливиновый 14PO-4 и оливин-пироксеновый состав 14POP-1, колосниковая хондра 14BOP-2 сложена тонкими параллельными балками оливина и низко-Ca пироксена. Размер порфировых хондр составляет около 0,5 мм, размер колосниковой хондры превышает 1 мм. Полнопроявленных металлических и силикатных кайм у хондр не наблюдается, хотя на границе хондры и матрицы иногда встречаются крупные зерна камасита-тэнита и троилита.

Пироксен-оливиновый агрегат 14APO-3 сложен крупными зернами низко-Ca пироксена, обрастающими небольшие зерна оливина в центре агрегата. По границам агрегата отмечаются крупные зерна камасита-тэнита и небольшие зерна троилита. Очертания агрегата напоминают округлую форму хондр, что может указывать на перекристаллизацию и укрупнение минералов хондры в результате термального метаморфизма на родительском теле. Однако практически полное отсутствие мезостазиса в наблюдаемом агрегате хондрам не свойственно.

Хондра 14POP-1 обладает округлой формой, порфировой структурой и небольшим размером (0,5 мм). Сложена крупным вкрапленником оливина, располагающимся в центре хондры, и зернами низко-Ca пироксена, равномерно распределенными по площади. Оливин также встречается в виде небольших зерен ближе к границе хондры. Мезостазис занимает интерстиции между оливином и пироксеном, и наибольшее его проявление характерно для центра хондры. Матрица вокруг хондры сложена равномернозернистым материалом, состоящим из оливина и низко-Ca пироксена, редко наблюдается мезостазис.

Оливин в порфировой хондре 14POP-1 относится к форстериту (Fo 81) и представлен крупным (200 мкм по удлинению) идиоморфным зерном в центре и мелкими (50-100 мкм) гипидиоморфными зернами у краев хондры (рис.1). Содержание главных элементов практически не варьируется, разницы в составе оливина хондры и матрицы не наблюдается (табл.1). Содержание редких элементов в оливине варьируется значительно: тугоплавких Zr и Ti, умеренно летучих Ba, V, Ni, Cr и REE изменяется в несколько раз. Наибольшими концентрациями редких элементов отличается оливин края хондры – содержание Zr, Hf, REE и Sr превышено более чем в два раза относительно оливина центра хондры и матрицы метеорита.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т.265. С. 16-33
© К.Г.Суханова, 2024

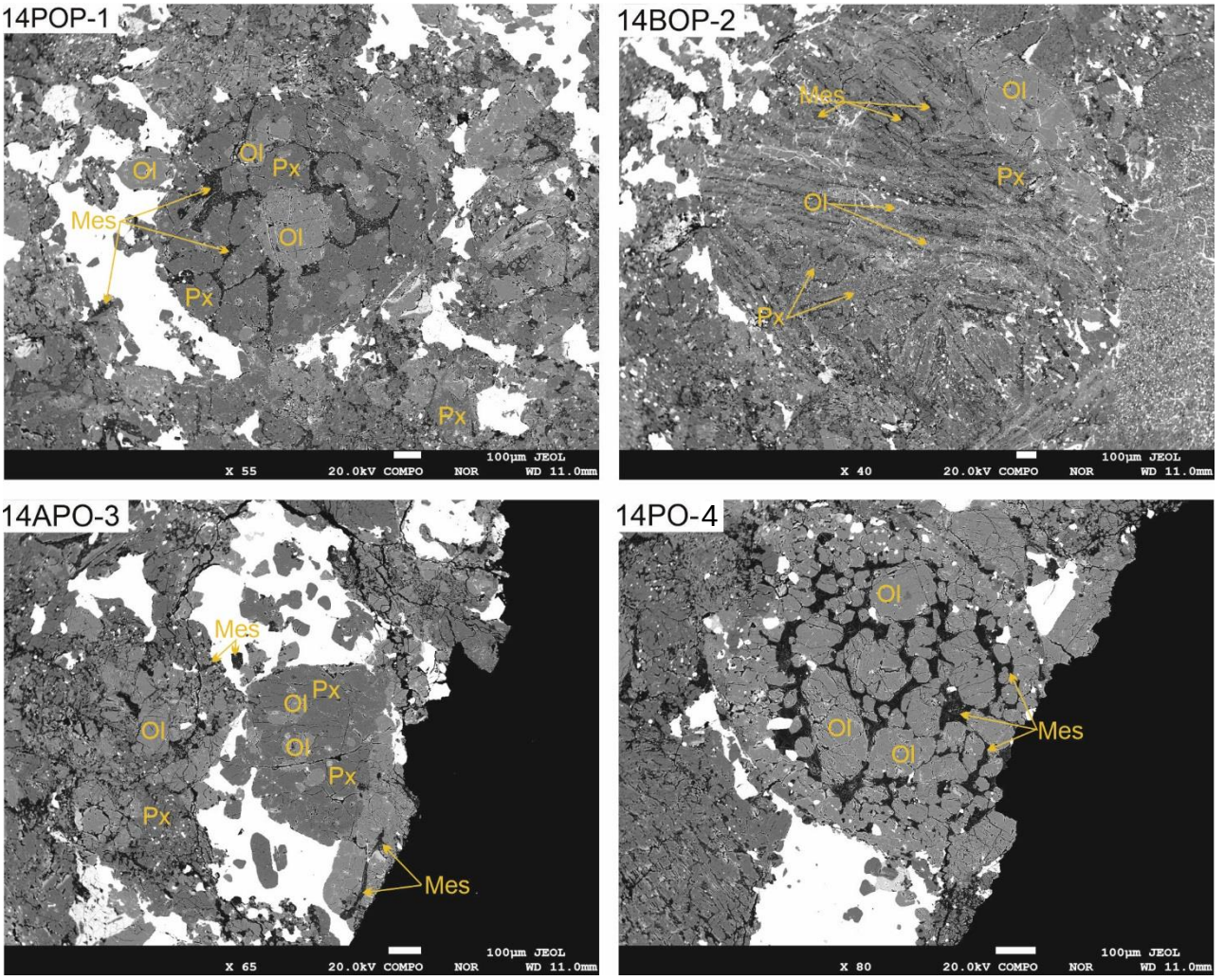


Рис.1. Фотография хондр метеорита Бородино в обратно-отраженных электронах:
Ol – оливин, Px – низко-Ca пироксен, Mes – мезостазис

Таблица 1

Состав силикатных минералов хондры 14POP-1 метеорита Бородино по главным (мас.%) и редким (ppm) элементам

Компонент	Ol			Px			Mes		
	Центр	Край	Матрица	Центр	Край	Матрица	Край	Край	Матрица
SiO_2	39,38	39,60	39,23	57,87	57,70	56,76	63,13	64,22	64,26
Al_2O_3	0,00	0,02	0,01	0,12	0,10	0,24	19,64	19,38	21,46
MgO	43,27	43,60	42,78	30,44	30,84	30,34	1,31	0,36	0,30
TiO_2	0,00	0,00	0,02	0,11	0,11	0,20	0,38	1,89	0,02
CaO	0,02	0,01	0,03	0,60	0,56	0,72	4,30	1,96	2,90
FeO	17,55	17,40	17,63	10,96	11,15	10,94	1,80	1,45	0,58
MnO	0,49	0,46	0,48	0,53	0,51	0,51	–	–	–
Cr_2O_3	0,02	0,02	0,02	0,11	0,08	0,31	–	–	–
NiO	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	–	–	–
Na_2O	–	–	–	–	–	–	9,75	10,07	9,78
K_2O	–	–	–	–	–	–	0,56	1,55	0,65
Сумма	100,74	101,11	100,19	100,73	101,04	100,05	100,86	100,87	99,95
Zr	1,06	5,28	2,05	21,4	2,05	8,01	61,7	61,8	112
Hf	b.d.l.	0,25	0,11	0,45	0,09	0,18	1,45	1,39	3,03
Ca	4299	3987	6230	5210	5524	5821	–	–	–
Y	0,03	0,08	0,08	0,36	0,18	0,31	1,61	2,09	1,30

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Окончание табл.1

Компонент	Ol			Px			Mes		
	Центр	Край	Матрица	Центр	Край	Матрица	Край	Край	Матрица
Al	165	155	110	612	696	1181	–	–	–
Ti	80,8	104	326	894	732	1077	2009	1776	1454
Nb	0,40	0,09	0,19	0,33	0,17	0,41	1,63	1,05	2,02
La	0,01	0,26	0,12	1,15	0,04	0,27	2,81	2,99	3,12
Ce	0,02	0,60	0,20	2,38	0,11	0,50	4,60	3,79	5,76
Pr	b.d.l.	0,04	0,03	0,22	0,01	0,06	0,59	0,52	0,62
Nd	b.d.l.	0,24	0,13	0,89	0,06	0,27	2,12	2,26	2,35
Sm	b.d.l.	0,06	0,04	0,14	0,07	0,04	0,32	0,14	0,25
Eu	0,01	0,03	0,01	0,04	0,01	0,01	0,27	0,15	0,76
Gd	0,03	0,27	0,02	0,13	0,04	0,07	0,36	0,16	0,45
Tb	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Dy	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0,07	b.d.l.	0,06	0,33	0,28	0,18
Ho	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Er	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0,04	0,06	0,07	0,26	0,17	0,09
Yb	0,03	0,05	0,02	0,14	0,06	0,09	0,17	0,26	0,16
Lu	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03
Sr	0,10	1,20	1,47	0,40	0,49	0,88	28,4	23,3	104
Ba	0,12	6,79	1,53	4,10	0,37	4,00	14,9	12,9	34,7
V	45,7	14,3	34,0	64,0	47,6	133	102	126	64,7
Ni	17,9	103	53,2	50,6	56,7	160	–	–	–
Cr	1939	316	1546	2733	1583	5921	3133	2881	1793
Rb	2,36	1,66	3,22	0,57	1,47	1,76	5,34	8,31	14,1
REE	0,12	1,56	0,57	5,21	0,48	1,49	11,8	10,8	13,8
LREE	0,05	1,23	0,53	4,82	0,30	1,16	10,7	9,86	12,9
HREE	0,07	0,33	0,04	0,39	0,18	0,33	1,14	0,91	0,90

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

Спектры распределения редких элементов в оливине дифференцированы незначительно (рис.2, *а*). Содержание редких элементов в оливине края хондры 14POP-1 метеорита Бородино практически достигает хондритовых значений, что несвойственно оливинам обыкновенных хондритов. Оливин хондры 14POP-1 практически по всем элементам характеризуется повышенным содержанием редких элементов относительно оливина UOC, за исключением содержания Al. При этом содержание Al в оливине хондры и матрицы практически на порядок меньше среднего содержания Al в оливине UOC.

Оливин хондры 14POP-1 также обогащен REE относительно оливина UOC, хотя характеризуется преобладанием тяжелых редкоземельных элементов (HREE) над легкими (LREE). Оливин матрицы демонстрирует противоположную тенденцию преобладания LREE.

Низко-Ca пироксен хондры 14POP-1 представлен энстатитом (En 81, Wo 1), практически равномерно распределен по площади хондры и наблюдается в виде идиоморфных и гипидиоморфных зерен небольшого размера (около 100 мкм по удлинению). Содержание главных элементов варьируется слабо, пироксен хондры практически не отличается по содержанию главных элементов, но пироксен матрицы обогащен Al и Ti практически в два раза относительно пироксенов хондры.

Содержание редких элементов в низко-Ca пироксене довольно постоянное. Значимые превышения концентрации Zr и Ce наблюдаются в пироксене центра хондры (21,4 и 2,38 ppm соответственно) и довольно малые содержания REE (0,48 ppm) в пироксене края хондры.

Спектры распределения редких элементов в низко-Ca пироксене хондры 14POP-1 слабо дифференцированы (рис.2, *в*). Наибольшие их расхождения наблюдаются по содержанию редкоземельных элементов. Так, для пироксена центра хондры и матрицы характерно преобладание LREE над HREE, но в пироксене края хондры наблюдаются повышенные концентрации HREE относительно LREE. В пироксене матрицы метеорита проявлена положительная европиевая аномалия.

Пироксен хондры 14POP-1 обогащен тугоплавкими редкими элементами и REE относительно низко-Ca пироксена UOC, за исключением Al. При этом содержание умеренно летучих элементов практически не различается в пироксене хондры 14POP-1 и UOC.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т.265. С. 16-33
© К.Г.Суханова, 2024

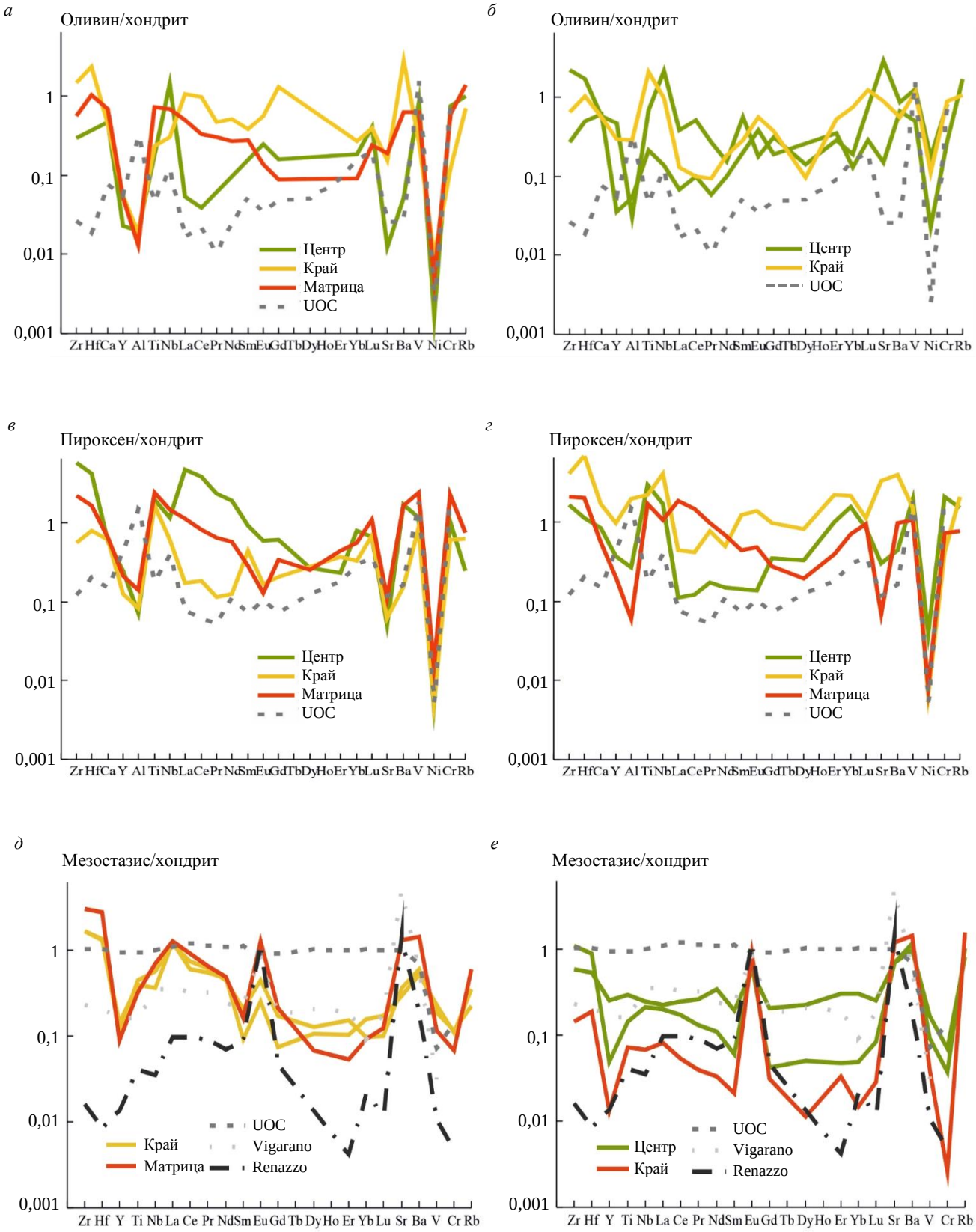


Рис.2. Спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту. Хондра 14POP-1: оливин (*а*); низко-Са пироксен (*в*) и мезостазис (*д*). Хондра 14BOP-2: оливин (*б*); низко-Са пироксен (*г*) и мезостазис (*е*). Данные о составе минералов UOC приведены по статьям [20, 21]

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Мезостазис хондры 14POP-1 представлен сильно раскристаллизованным стеклом альбитового (An 8 Or 8) и олигоклазового (An 19 Or 3) состава и заполняет довольно крупные интерстиции между оливином и пироксеном, в большей степени проявляясь у края хондры. В мезостазисе наблюдаются игольчатые выделения высоко-Ca пироксена и микронные зерна хромита и троилита. Отмечается небольшая вариативность состава главных элементов, что объясняется неоднородностью мезостазиса. Наиболее сильно изменяются содержания MgO 0,30-1,31 мас.% и TiO_2 0,02-1,89 мас.%.

Редкие элементы в мезостазисе хондры 14POP-1 варьируют слабо. Наблюдается несущественная обогащенность мезостазиса матрицы метеорита Zr и умеренно летучими элементами (Sr, Ba, V, Rb). Содержание редких элементов в мезостазисе хондры практически не изменяется, несмотря на неоднородность.

Спектры распределения редких элементов мезостазиса хондры 14POP-1 практически полностью совпадают со спектром плагиоклаза углистого хондрита Vigarano, хотя и превышают его по содержанию Zr, Hf и LREE (рис.2, *д*).

Колосниковая хондра 14BOP-2 сложена тонкими балками оливина и низко-Ca пироксена, небольшие промежутки между которыми заполняет мезостазис. Хондра отличается крупным размером (более 1 мм), не имеет металлической и силикатных кайм, характеризуется округлой формой и слабопроявленными границами с матрицей (см. рис.1).

Оливин колосниковой хондры 14BOP-2 относится к форстериту (Fo 81), представлен тонкими сильно вытянутыми (от края до края хондры) разнонаправленными скелетными кристаллами, по площади хондры распределен равномерно. Содержание главных элементов в оливине практически не варьируется, за исключением FeO и MgO, что характерно для метеорита пятого петрологического типа (табл.2).

Редкие элементы в оливине хондры варьируют также слабо. В центре хондры встречаются зерна оливина, обедненного тугоплавкими элементами (Y, Al, Ti, Nb). Оливин края хондры слабо отличается от оливина центра хондры по содержанию редких элементов.

Спектры распределения редких элементов в оливине хондры слабо дифференцированы (рис.2, *б*). Значимых отличий между оливином центра и края хондры не наблюдается. Оливин хондры 14BOP-2 имеет повышенные концентрации редких и редкоземельных элементов относительно оливина UOC. Оливин края хондры обладает близким содержанием Al к оливину UOC, что не характерно для оливина других хондр.

Низко-Ca пироксен хондры представлен энстатитом (En 81, Wo 1), как и оливин, образует скелетные кристаллы, вытянутые от края до края хондры. В основном он расположен в центральной части хондры. В пироксене иногда наблюдаются тонкие прожилки рудных минералов (камасит-тэнит, хромит, троилит). Содержание главных элементов в низко-Ca пироксене постоянно в хондре и матрице метеорита.

Редкие элементы в низко-Ca пироксене колосниковой хондры слабо варьируют в зависимости от расположения пироксена в хондре. В центре хондры пироксен обеднен LREE и характеризуется довольно низкими содержаниями тугоплавких редких элементов (Zr, Al, Ca). Пироксен края хондры обогащен рефракторными и редкоземельными элементами относительно пироксена центра хондры и матрицы метеорита. Низко-Ca пироксен матрицы отличается низкой концентрацией Al и HREE.

Спектры распределения редких элементов в низко-Ca пироксене хондры 14BOP-2 слабо дифференцированы, а содержание редких элементов близко к хондритовым значениям (рис.2, *г*). Для пироксена хондры характерно преобладание HREE над LREE, но для пироксена матрицы наблюдается обратное соотношение.

Низко-Ca пироксен колосниковой хондры обогащен рефракторными и редкоземельными элементами относительно низко-Ca пироксена UOC, хотя пироксен хондры обеднен Al по сравнению с пироксеном UOC.

Мезостазис заполняет микронные промежутки между балками оливина и пироксена, размер выделений не превышает 50 мкм. В целом мезостазис на BSE-изображениях выглядит однородным, хотя довольно часто встречается с мелкими зернами рудных минералов. В хондре 14BOP-2 мезостазис представлен слабо раскристаллизованным стеклом олигоклазового состава (An 11 Or 5), в матрице состав может меняться до анортоклазового (An 7 Or 13). Состав микроэлементов в мезостазисе практически не варьируется, за исключением FeO и MgO.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т.265. С. 16-33
© К.Г.Суханова, 2024

Таблица 2

Состав силикатных минералов хондры 14BOP-2 метеорита Бородино по главным (мас.%) и редким (ppm) элементам

Компонент	Ol			Px			Mes		
	Центр	Центр	Край	Центр	Край	Матрица	Центр	Центр	Матрица
SiO_2	39,82	39,16	39,59	57,65	57,23	57,45	64,79	63,68	63,37
Al_2O_3	0,01	0,01	0,00	0,16	0,16	0,12	20,97	19,84	20,22
MgO	42,71	42,18	43,57	30,42	30,77	30,78	0,07	0,32	1,08
TiO_2	0,00	0,00	0,01	0,14	0,16	0,10	0,00	0,06	0,04
CaO	0,02	0,05	0,02	0,68	0,70	0,72	2,46	2,42	2,50
FeO	17,93	18,37	17,21	11,04	11,26	11,06	0,89	2,26	1,32
MnO	0,47	0,47	0,50	0,51	0,48	0,47	–	–	–
Cr_2O_3	0,00	0,06	0,00	0,21	0,15	0,14	–	–	–
NiO	0,01	0,18	0,00	0,01	0,02	0,04	–	–	–
Na_2O	–	–	–	–	–	–	10,36	9,90	8,94
K_2O	–	–	–	–	–	–	0,81	1,04	1,10
Сумма	100,97	100,47	100,90	100,83	100,93	100,87	100,33	99,51	98,57
Zr	0,96	8,10	2,36	5,93	15,0	7,49	21,6	40,2	5,18
Hf	0,05	0,18	0,11	0,12	0,74	0,22	0,58	0,97	0,20
Ca	5626	5320	5035	7713	15349	5080	–	–	–
Y	0,05	0,68	0,43	0,54	1,44	0,29	3,69	0,72	0,19
Al	452	257	2417	2239	16514	509	–	–	–
Ti	94,7	308	939	1317	990	752	1326	642	328
Nb	0,04	0,60	0,27	0,49	1,18	0,30	0,71	0,60	0,20
La	0,02	0,09	0,03	0,03	0,11	0,45	0,55	0,48	0,20
Ce	0,06	0,32	0,06	0,08	0,26	0,90	1,56	1,09	0,33
Pr	0,01	0,03	0,01	0,02	0,07	0,09	0,25	0,12	0,04
Nd	0,05	0,07	0,09	0,07	0,24	0,33	1,62	0,52	0,16
Sm	b.d.l.	0,09	0,04	b.d.l.	0,19	0,07	0,30	0,09	0,03
Eu	0,02	0,01	0,03	0,01	0,08	0,03	0,32	0,40	0,52
Gd	0,04	0,06	0,08	0,07	0,20	0,06	0,43	0,09	0,06
Tb	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Dy	b.d.l.	0,04	0,02	0,08	0,21	0,05	0,57	0,13	0,03
Ho	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Er	0,06	0,05	0,09	0,17	0,37	0,07	0,51	0,08	0,06
Yb	0,02	0,03	0,13	0,26	0,36	0,12	0,52	0,08	0,02
Lu	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,06	0,02	0,01
Sr	1,18	22,2	6,90	2,35	26,4	0,55	55,5	56,0	93,7
Ba	1,59	2,09	1,35	1,07	9,62	2,39	24,1	28,2	35,4
V	27,5	70,2	63,9	109	81,9	57,5	91,7	50,5	21,8
Ni	248	1910	1200	424	73,3	90,2	–	–	–
Cr	727	2176	2326	5498	1097	1917	1851	991	68,5
Rb	3,98	b.d.l.	2,48	3,51	4,82	1,77	18,8	24,5	36,6
REE	0,28	0,80	0,61	0,81	2,11	2,18	6,70	3,12	1,46
LREE	0,15	0,60	0,27	0,20	0,95	1,86	4,60	2,71	1,28
HREE	0,13	0,20	0,35	0,61	1,16	0,32	2,10	0,40	0,18

Содержание редких элементов меняется значительно. Так, мезостазис центра хондры обогащен редкими рефракторными элементами относительно матрицы метеорита. При этом между зернами мезостазиса в центре хондры также наблюдаются различия. Мезостазис обедненный FeO характеризуется высоким содержанием рефракторных и редкоземельных элементов относительно другого центрального зерна мезостазиса.

Спектры распределения редких элементов сильно дифференцированы (рис.2, *е*). Мезостазис матрицы отличается низким содержанием редких элементов, преобладанием LREE над HREE и ярко выраженной европиевой аномалией. Мезостазис матрицы во многом совпадает со спектром распределения редких элементов в плагиоклазе углистого хондрита Renazzo, хотя и отличается высоким содержанием рефракторных элементов (Zr, Hf, Ti) и низкой концентрацией REE. Мезостазис хондры 14BOP-2 повторяет линию спектра распределения редких элементов в плагиоклазе метеорита Vigarano, хотя может и отклоняться в сторону спектра Renazzo и занимать промежуточную позицию.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Пироксен-оливиновый агрегат 14APO-3 представляет собой изометричный сросток кристаллов низко-Ca пироксена небольшого размера (250-300 мкм), в центре которого наблюдаются гипидиоморфные зерна оливина (50-100 мкм) (см. рис.1). Мезостазис слабо проявлен в агрегате и в основном наблюдается только на границе с матрицей. Хотя данный агрегат может являться сильно метаморфизованной хондрой, чьи границы были полностью стерты, отсутствие характерной округлости краев, а также своеобразие внутреннего строения не позволяют отнести его к хондрам.

Оливин в агрегате представлен форстеритом (Fo 81), насчитывает всего несколько зерен и расположен в основном в центре агрегата. Состав главных элементов в оливине практически полностью постоянен.

Редкие элементы в оливине агрегата также демонстрируют малую вариативность концентраций (табл.3). Наблюдается слабая тенденция к обогащенности редкими элементами оливина агрегата 14APO-3 по сравнению с оливином матрицы. Однако явных значимых различий концентраций не обнаружено.

Таблица 3

Состав силикатных минералов агрегата 14APO-3 метеорита Бородино по главным (мас.%) и редким (ppm) элементам

Компонент	Ol			Px			Mes		
	Центр	Центр	Матрица	Край	Край	Матрица	Центр	Край	Матрица
SiO_2	39,37	39,33	39,70	56,64	57,40	57,71	65,32	64,27	65,61
Al_2O_3	0,02	0,00	0,00	0,21	0,14	0,12	20,98	21,02	19,95
MgO	42,77	43,10	42,91	30,95	30,24	30,43	0,18	0,10	0,39
TiO_2	0,01	0,00	0,02	0,22	0,14	0,14	0,07	0,01	0,01
CaO	0,04	0,01	0,03	0,74	0,74	0,76	2,43	2,41	1,48
FeO	17,90	17,78	17,86	11,26	11,12	11,02	0,65	2,26	0,77
MnO	0,48	0,48	0,46	0,50	0,47	0,49	–	–	–
Cr_2O_3	0,03	0,02	0,01	0,22	0,17	0,13	–	–	–
NiO	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	–	–	–
Na_2O	–	–	–	–	–	–	10,15	10,15	9,25
K_2O	–	–	–	–	–	–	0,97	0,89	2,41
Сумма	100,61	100,72	100,98	100,75	100,42	100,80	100,74	101,11	99,86
Zr	0,33	1,25	0,48	0,88	0,41	2,13	2,30	7,43	9,20
Hf		0,09	0,06	0,05	0,14	0,10	b.d.l.	0,29	0,25
Ca	4538	4529	4189	5506	4657	5063	–	–	–
Y	0,02	0,10	0,06	0,29	0,23	0,31	0,15	0,30	0,59
Al	76,5	221	38,0	649	422	784	–	–	–
Ti	103	390	45,2	1028	701	1156	303	319	469
Nb	0,08	0,08	0,06	0,03	0,05	0,16	0,23	0,42	0,47
La	0,02	0,01	0,01	0,04	0,01	0,03	0,11	0,25	0,11
Ce	0,02	0,03	0,02	0,06	0,02	0,05	0,15	0,35	0,31
Pr	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,04	0,03
Nd	b.d.l.	0,05	b.d.l.	0,10	b.d.l.	0,06	0,06	0,21	0,09
Sm	0,05	b.d.l.	0,04	0,04	b.d.l.	0,05	b.d.l.	0,06	0,04
Eu	0,01	b.d.l.	b.d.l.	0,01	b.d.l.	0,02	0,49	0,59	0,41
Gd	0,02	0,02	b.d.l.	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Tb	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Dy	–	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,06	0,07
Ho	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Er	b.d.l.	0,01	0,04	0,11	0,03	0,07	0,08	0,03	0,04
Yb	0,06	0,04	0,03	0,07	0,07	0,11	0,03	0,03	0,06
Lu	b.d.l.	b.d.l.	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Sr	0,09	0,28	0,21	0,14	0,12	0,34	82,7	100	76,4
Ba	0,21	0,58	0,25	0,28	0,20	0,55	33,8	42,5	40,0
V	17,3	31,1	24,1	50,5	39,9	56,0	21,0	26,2	41,3
Ni	27,4	121	64,8	40,4	49,4	89,2	–	–	–
Cr	459	648	430	1080	962	1181	146	113	330
Rb	1,55	1,70	2,91	0,73	0,97	1,21	25,6	28,6	248
REE	0,20	0,21	0,20	0,53	0,20	0,47	0,98	1,67	1,23
LREE	0,11	0,10	0,09	0,26	0,03	0,22	0,82	1,50	0,99
HREE	0,09	0,10	0,11	0,27	0,17	0,25	0,16	0,17	0,24

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т.265. С. 16-33
© К.Г.Суханова, 2024

Спектр распределения редких элементов слабо фракционирован, содержание редких элементов в оливине ниже хондритовых значений (рис.3, *а*). Оливин агрегата 14APO-3 обогащен редкими тугоплавкими и редкоземельными элементами относительно оливина UOC, за исключением Al.

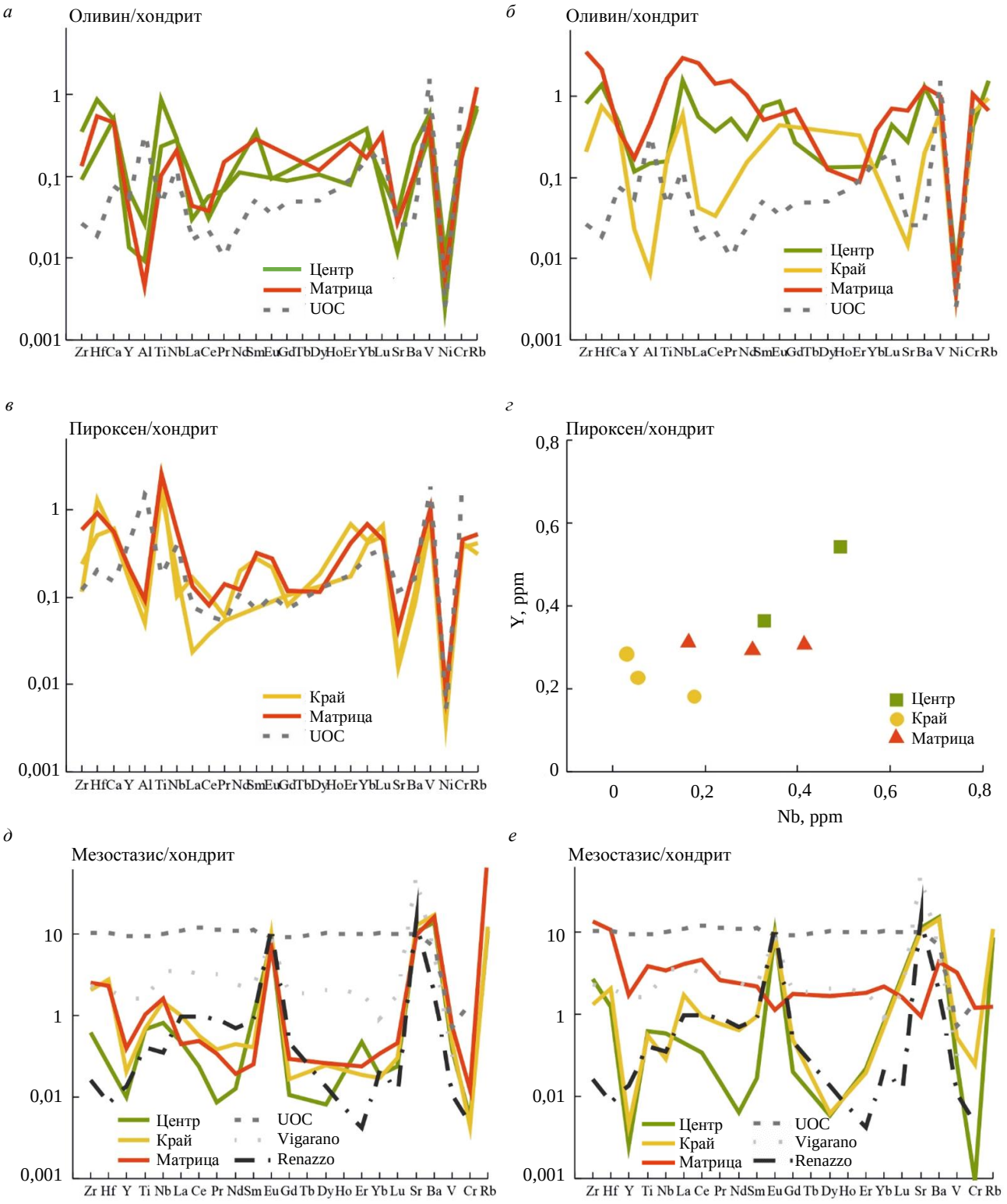


Рис.3. Спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту. Агрегат 14APO-3: оливин (*а*); низко-Ca пироксен (*в*) и мезостазис (*д*). Хондра 14PO-4: оливин (*б*) и мезостазис (*е*). Соотношение Y и Nb в низко-Ca пироксене метеорита Бородино (*г*). Данные о составе минералов UOC приведены по статьям [20, 21]

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Низко-Ca пироксен агрегата 14APO-3 относится к энстатиту (En 81, Wo 1), представлен крупными идиоморфными трещиноватыми кристаллами, которые обрастают зерна оливина. Содержание редких элементов не варьируется, за исключением небольших изменений – TiO_2 0,12-0,21 мас.% и Cr_2O_3 0,13-0,22 мас.%.

Редкие элементы в низко-Ca пироксене агрегата 14APO-3 варьируют в еще меньшей степени, чем в оливине. В пироксене каймы агрегата наблюдается минимальное содержание LREE 0,03 ppm, не характерное для пироксена агрегата, матрицы и других хондр.

Спектры распределения редких элементов в пироксене агрегата 14APO-3 практически полностью повторяют друг друга, что отражает их постоянный редкоэлементный состав (рис.3, *в*). Содержание редких элементов в пироксене агрегата ниже хондритовых значений. Фракционирование редких элементов в низко-Ca пироксене агрегата не проявлено.

Спектр распределения редких элементов в пироксене агрегата 14APO-3 во многом совпадает со спектром для пироксена UOC. Однако он отличается высоким содержанием тугоплавких элементов (Zr, Hf, Ti) и некоторых редкоземельных элементов (Sm, Eu).

Мезостазис в агрегате 14APO-3 встречается очень редко, на BSE-изображениях выглядит абсолютно однородно и представляет собой плагиоклаз олигоклазового состава (An 11 Or 4). Состав главных элементов в мезостазисе постоянен, хотя наблюдается довольно значительная вариация FeO 0,67-2,03 мас.% и незначительная Al_2O_3 20,86-21,33 мас.%.

Состав редких элементов в мезостазисе агрегата 14APO-3 слабо вариативен. Мезостазис центра отличается минимальным содержанием редких элементов, в особенности Zr, Hf, Y и REE. Мезостазис края агрегата в целом значительно схож с мезостазисом матрицы, однако характеризуется повышенным содержанием LREE 1,50 ppm.

Спектры распределения редких элементов в мезостазисе пироксен-оливинового агрегата практически не дифференцированы (рис.3, *д*). Содержание редких элементов в мезостазисе находится на уровне хондритовых значений. Фракционирование HREE и LREE не наблюдается в мезостазисе агрегата и матрицы метеорита Бородино. Спектр распределения редких элементов в мезостазисе агрегата практически полностью совпадает с мезостазисом плагиоклаза углистого хондрита Renazzo. Однако отличается повышенным содержанием рефракторных Zr и Hf и низким суммарным количеством REE.

Порфировая хондра 14PO-4 сложена только оливином и мезостазисом, имеет практически идеально округлую форму с небольшим носиком, характеризуется малым размером (500 мкм) и отсутствием силикатной и металлической кайм. Оливин хондры представлен довольно крупными идиоморфными зернами, наибольшие из которых достигают 250 мкм по удлинению, наименьшие – 50-70 мкм. Мезостазис равномерно распределен по объему хондры, заполняет интерстиции между зернами оливина, на BSE-изображениях выглядит однородным.

Оливин хондры 14PO-4 соответствует форстериту (Fo 81), выглядит довольно трещиноватым и отличается от оливина матрицы наличием хорошо проявленных граней и довольно крупным размером. Содержание главных элементов в оливине хондры практически не варьируется (табл.4).

Редкие элементы в оливине хондры 14PO-4 варьируют значительно. Так, оливин центра хондры характеризуется промежуточными концентрациями редких элементов относительно оливина края и матрицы метеорита. Оливин края хондры характеризуется минимальными концентрациями редких элементов, особенно низкие содержания характерны для Y 0,03, Al 56,7, REE 0,19 и Sr 0,11 ppm. Оливин матрицы метеорита Бородино обогащен Zr, Hf и LREE относительно оливина хондры 14PO-4.

Спектры распределения редких элементов в оливине хондры 14PO-4 слабо дифференцированы (рис.3, *б*). Содержание редких элементов достигает хондритовых значений, что значительно выше содержания редких элементов в оливине UOC. Наибольшее преобладание характерно для тугоплавких Zr, Hf, Nb и REE. Оливин хондры 14PO-4 отмечается преобладанием LREE над HREE.

Мезостазис хондры 14PO-4 представлен довольно однородным слабо раскристаллизованным стеклом олигоклазового состава (An 11 Or 4). Иногда вместе с плагиклазом встречаются микронные зерна троилита и хромита. Состав главных элементов в мезостазисе практически не варьируется, за исключением небольших колебаний FeO 0,67-2,03 мас.%.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т.265. С. 16-33
© К.Г.Суханова, 2024

Таблица 4

Состав силикатных минералов хондры 14PO-4 метеорита Бородино по главным (мас.%) и редким (ppm) элементам

Компонент	Ol			Mes		
	Центр	Край	Матрица	Центр	Край	Матрица
SiO_2	39,45	39,50	39,50	64,37	64,63	–
Al_2O_3	0,00	0,00	0,00	20,86	21,33	–
MgO	42,65	43,05	42,94	0,11	0,09	–
TiO_2	0,00	0,02	0,03	0,04	0,06	–
CaO	0,03	0,04	0,02	2,44	2,47	–
FeO	17,80	17,69	17,89	2,03	0,67	–
MnO	0,47	0,47	0,48	–	–	–
Cr_2O_3	0,02	0,02	0,05	–	–	–
NiO	0,01	0,00	0,00	–	–	–
Na_2O	–	–	–	–	–	–
K_2O	–	–	–	–	–	–
Сумма	100,44	100,78	100,91	100,71	100,40	–
Zr	3,00	0,76	13,0	9,86	4,81	49,2
Hf	0,15	0,08	0,23	0,13	0,22	1,15
Ca	4340	3753	3513	–	–	–
Y	0,17	0,03	0,25	0,04	0,07	2,50
Al	1239	56,7	3967	–	–	–
Ti	70,4	75,4	739	281	250	1737
Nb	0,44	0,17	0,83	0,17	0,08	0,99
La	0,14	0,01	0,62	0,11	0,41	0,99
Ce	0,23	0,02	0,89	0,21	0,59	2,92
Pr	0,05	b.d.l.	0,15	0,01	0,07	0,25
Nd	0,14	0,07	0,48	0,03	0,31	1,16
Sm	0,11	b.d.l.	0,08	0,03	0,15	0,34
Eu	0,05	0,03	0,04	0,59	0,53	0,07
Gd	0,06	b.d.l.	0,14	0,04	0,10	0,37
Tb	–	–	–	–	–	–
Dy	0,03	b.d.l.	0,03	0,01	0,02	0,43
Ho	–	–	–	–	–	–
Er	b.d.l.	0,06	0,01	0,04	0,03	0,31
Yb	0,02	b.d.l.	0,06	b.d.l.	b.d.l.	0,37
Lu	0,01	b.d.l.	0,02	b.d.l.	b.d.l.	0,04
Sr	2,18	0,12	5,13	90,2	81,2	7,52
Ba	3,16	0,49	3,19	37,8	35,1	10,6
V	29,9	33,3	55,3	13,5	28,2	178
Ni	82,4	39,0	44,1	–	–	–
Cr	1111	1636	2792	24,5	648	3209
Rb	3,65	2,21	1,54	20,3	25,6	2,87
REE	0,85	0,19	2,52	1,07	2,21	7,24
LREE	0,73	0,13	2,25	0,98	2,06	5,72
HREE	0,12	0,06	0,27	0,09	0,15	1,52

Редкие элементы в мезостазисе хондры 14PO-4 также варьируют слабо. Мезостазис центра и края хондры различается только минимальным содержанием LREE в мезостазисе центра хондры. Мезостазис матрицы обогащен редкими и редкоземельными элементами относительно мезостазиса хондры, за исключением Eu.

Спектры распределения редких элементов дифференцированы относительно расположения мезостазиса в хондре или за ее пределами (рис.3, *е*). Так, мезостазис центра и края хондры обеднен редкими элементами и характеризуется преобладанием LREE над HREE и ярко выраженной положительной европиевой аномалией. Мезостазис матрицы обогащен редкими элементами относительно мезостазиса хондры, имеет слабовыраженную отрицательную европиевую аномалию и практически не демонстрирует фракционирования легких и тяжелых редкоземельных элементов.

Мезостазис хондры в большей степени накладывается на линию плагиоклаза углистого хондрита Renazzo, хотя и отличается высокими содержаниями рефракторных элементов (Zr, Hf). Мезостазис матрицы демонстрирует значительное сходство со спектром плагиоклаза из углистого хондрита Vigarano, но отличается высоким содержанием Zr и Hf, а также отрицательной европиевой аномалией.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Обсуждение. Оливин порфировых (14POP-1 и 14PO-4) и колосниковой 14BOP-2 хондр, пироксен-оливинового агрегата 14APO-3 и матрицы метеорита Бородино практически не различается по содержанию главных элементов, однако имеет некоторые отличия по редкоэлементному составу.

Спектр распределения редких элементов в оливине в целом слабо дифференцирован, хотя выделяется группа оливинов, обогащенных несовместимыми LREE, Sr и Ba (рис.4, *а*, *б*). Эти оливины относятся к разным объектам (хондры и агрегат) в метеорите, гомогенны на BSE-изображениях и выделяются крупным размером зерна (более 200 мкм). При этом разницы в редкоэлементном составе оливина в зависимости от его расположения в центре объекта, на краю или в матрице не наблюдается.

Различия объектов метеорита Бородино проявляются на графиках соотношения Ca/Ni (рис.4, *в*) и Cr/Nb (рис.4, *г*). Оливин колосниковой хондры 14BOP-2 обогащен Ca и Ni относительно других объектов метеорита Бородино и образует отдельно стоящее облако точек. Оливин пироксен-оливинового агрегата 14APO-3 и колосниковой хондры обогащен Cr и Nb относительно оливина порфировых хондр. Оливин метеорита Бородино отличается высокими концентрациями редких тугоплавких и редкоземельных элементов относительно оливина UOC. При этом большая часть оливина характеризуется низкой концентрацией Al по сравнению с UOC.

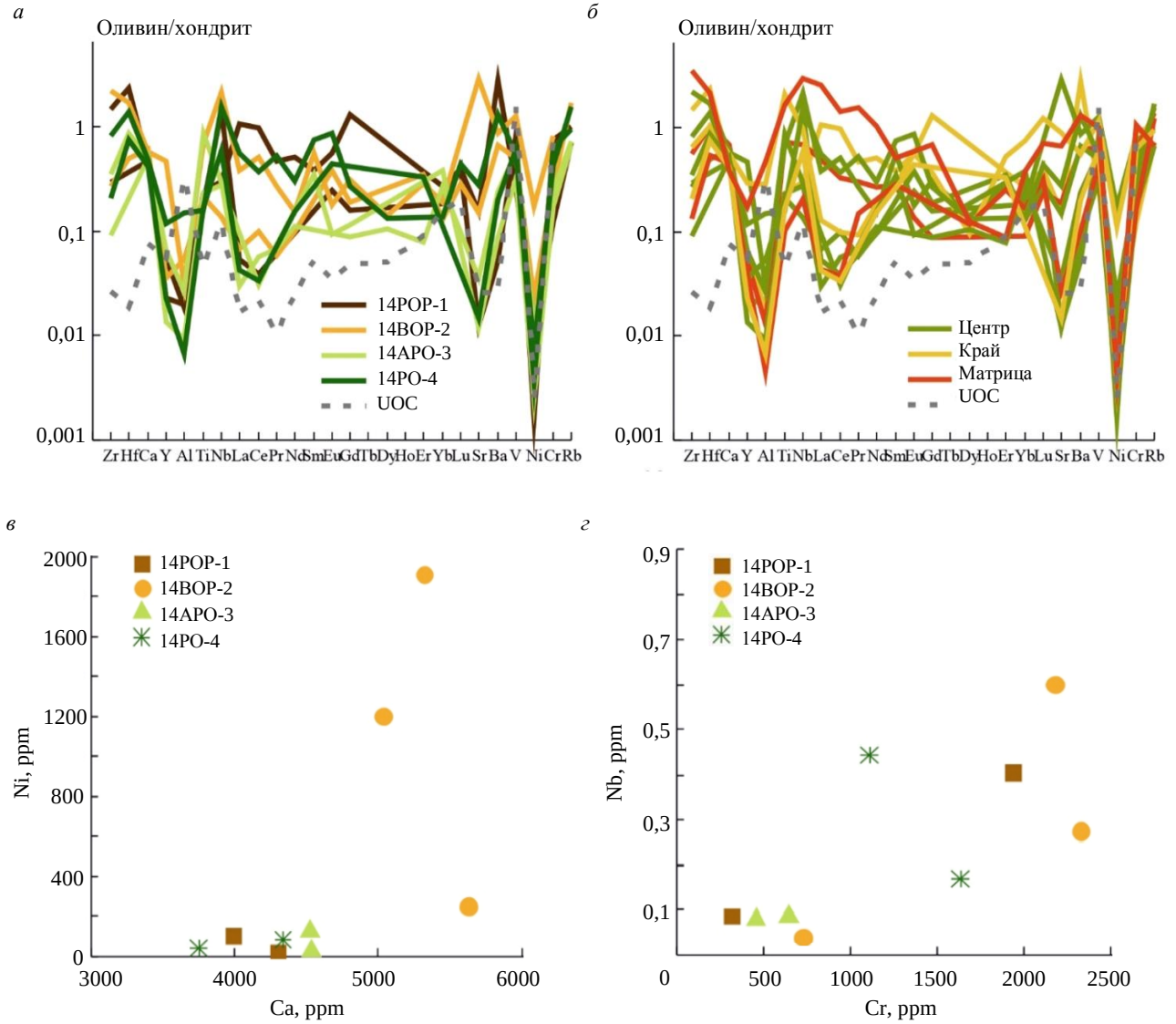


Рис.4. Спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту, в оливине метеорита Бородино относительно различных хондр (*а*) и расположения зерен внутри/снаружи хондры (*б*); соотношение Ca и Ni (*в*) и Cr и Nb (*г*). Данные о составе минералов UOC приведены по статьям [20, 21]

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т.265. С. 16-33
© К.Г.Суханова, 2024

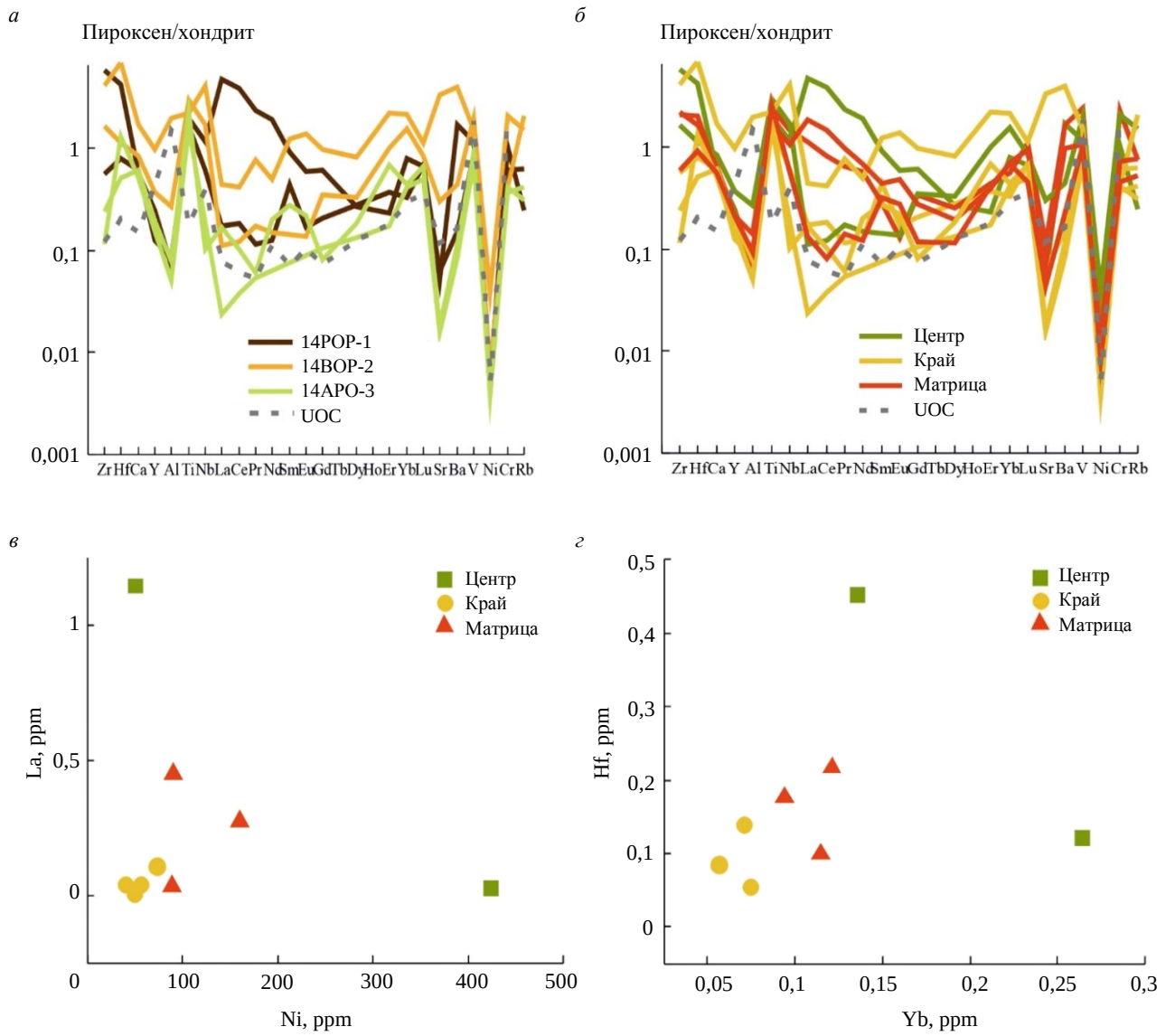


Рис.5. Спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту, в низко-Ca пироксене метеорита Бородино относительно различных хондр (*а*) и расположения зерен внутри/снаружи хондры (*б*); соотношение Ni и La (*в*) и Yb и Hf (*г*). Данные о составе минералов UOC приведены по статьям [20, 21]

Низко-Ca пироксен проявляет больше различий в содержании редких элементов в зависимости от объекта, в котором он находится. Так, пироксен колосниковой хондры 14BOP-2 обогащен редкими элементами относительно пироксена порфировой хондры 14POP-1 и агрегата 14APO-3 (рис.5, *а*). Пироксен порфировой хондры 14POP-1 характеризуется низкими концентрациями редких элементов. Пироксен матрицы метеорита также обеднен редкими элементами по сравнению с колосниковой хондрой и в большей степени сравним с пироксеном порфировой хондры (рис.5, *б*).

Пироксен метеорита Бородино практически не отличается от пироксена порфировых хондр UOC, за исключением низкого количества Al и высокого содержания Ti.

Содержание некоторых редких элементов в низко-Ca пироксене зависит от его расположения в объекте метеорита. По соотношению Nb/Y (см. рис.3, *г*), Ni/La (рис.5, *в*), Yb/Hf (рис.5, *г*) выделяются поля точек, соответствующие позиции пироксена – в центре, на краю объекта или в матрице метеорита. Так, пироксен центра обычно обогащен редкими элементами, пироксен края объекта обеднен ими, а пироксен матрицы метеорита занимает промежуточное положение. Выявленные тенденции характерны для пироксена порфировой и колосниковой хондр и пироксен-оливинового агрегата.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

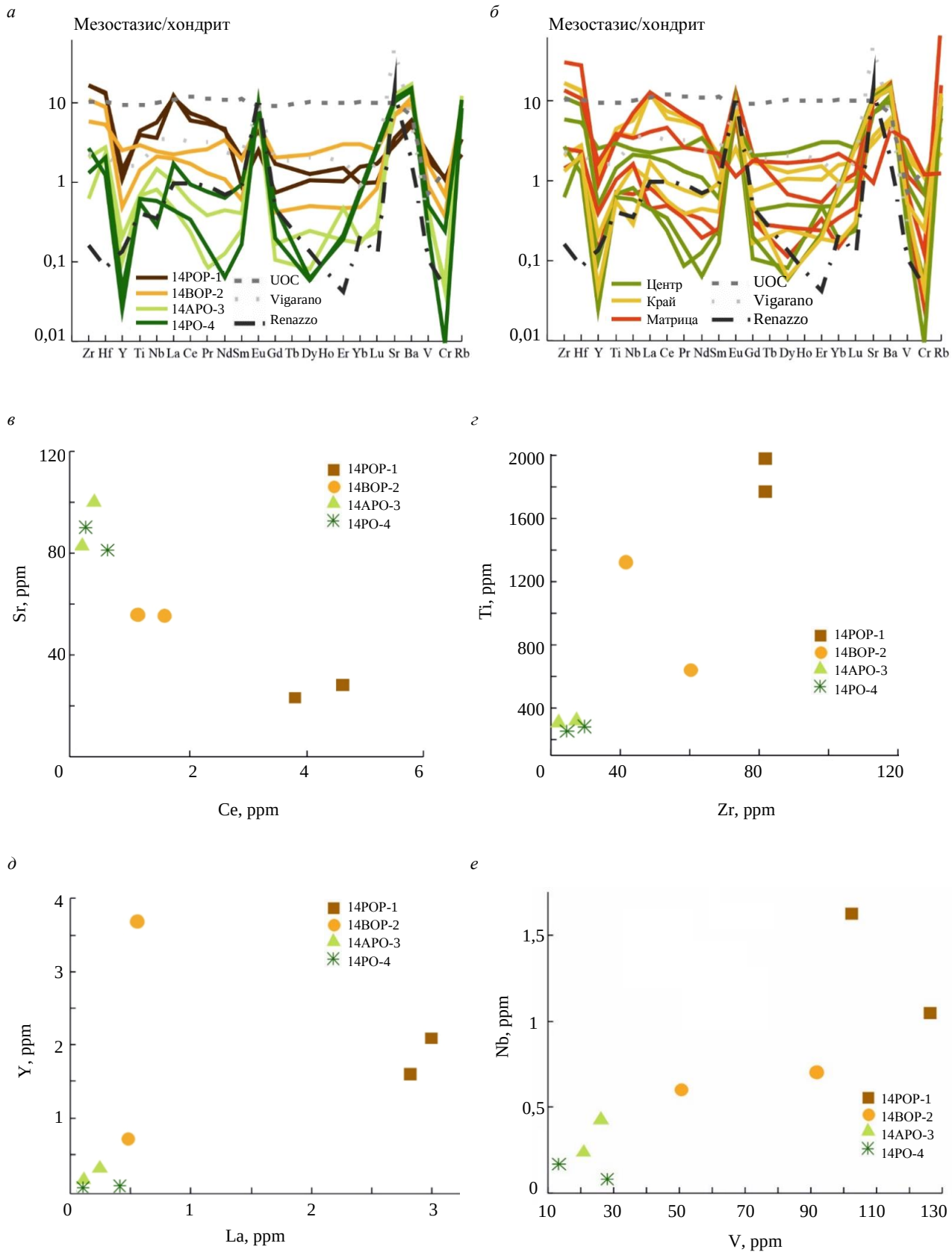


Рис.6. Спайдердиаграммы для редких элементов, нормированных к CI хондриту, в мезостазисе метеорита Бородино относительно различных хондр (*а*) и расположения зерен внутри/снаружи хондры (*б*); соотношение Ce и Sr (*в*), Zr и Ti (*г*), La и Y (*д*) и V и Nb (*е*). Данные о составе минералов UOC приведены по статьям [20, 21]

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т.265. С. 16-33
© К.Г.Суханова, 2024

Редкоэлементный состав мезостазиса в большей степени информативен относительно объекта метеорита, в котором он находится, по сравнению с оливином и низко-Ca пироксеном. Мезостазис колосниковой 14BOP-2 и порфировой 14POP-1 хондр обогащен редкими элементами относительно мезостазиса порфировой хондры 14PO-4 и пироксен-оливинового агрегата 14APO-3 (рис.6, *а, б*). При этом спектр распределения редких элементов мезостазиса 14BOP-2 и 14POP-1 схож со спектром распределения метеорита Vigarano или несколько обеднен относительно него.

Мезостазис остальных объектов метеорита обеднен редкими элементами и повторяет спектр плагиоклаза углистого хондрита Renazzo.

Различия в содержании редких элементов в мезостазисе относительно объекта метеорита также проявляются на графиках соотношения Ce/Sr (рис.6, *в*), Zr/Ti (рис.6, *г*), La/Y (рис.6, *д*) и V/Nb (рис.6, *е*). При этом на первых трех графиках наблюдаются три обособленные группы точек, соответствующие обедненному редкими элементами мезостазису 14PO-4 и 14APO-3, промежуточное положение обычно занимает мезостазис колосниковой хондры 14BOP-2, а наиболее обогащенный мезостазис порфировой хондры 14POP-1 обычно занимает противоположное крайнее положение. На графике корреляции Ce и Sr наблюдается обратная зависимость: мезостазис 14PO-4 и 14APO-3 обогащен Sr, но обеднен Ce. Мезостазис хондры 14POP-1 обогащен Ce, но имеет минимальную концентрацию Sr, а мезостазис колосниковой хондры занимает промежуточное положение.

Несмотря на очевидные различия редкоэлементного состава мезостазиса различных объектов метеорита Бородино, зависимости химического состава мезостазиса от положения внутри объекта не наблюдается.

Выводы. Таким образом, минералы порфировой оливин-пироксеновой и колосниковой хондр отличаются повышенным содержанием редких элементов, концентрация редких элементов в оливине коррелирует с наблюдаемым размером зерна, редкоэлементый состав низко-Ca пироксена зависит от положения зерна пироксена внутри объекта метеорита, а состав мезостазиса – от самого объекта. Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии следов уравновешивания редкоэлементного состава силикатных минералов в метеорите Бородино.

В неравновесных обыкновенных хондритах UOC описана корреляция высоких значений LREE/HREE с уменьшением размера зерна, что интерпретируется как следствие быстрого остывания маленьких зерен [21]. Экспериментально установлено, что накопление редких элементов в оливине и низко-Ca пироксене усиливается при увеличении скорости кристаллизации хондры и, соответственно, скорости роста оливина в ней. Тем не менее полученные данные противоречат описанным в настоящей работе наблюдениям и требуют дальнейшего изучения, в том числе исследования накопления редких элементов в оливине в зависимости от сечения зерна и определения реального, а не наблюдаемого, размера оливина.

Низко-Ca пироксен и мезостазис колосниковой хондры отличаются повышенным содержанием редких элементов, что соответствует экспериментальным данным и отражает быструю кристаллизацию расплава хондры в протопланетном диске. Низко-Ca пироксен демонстрирует увеличение содержания редких элементов в последовательности: край – матрица – центр, что может быть следствием взаимодействия хондры с небулярным газом [35].

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ivanova M.A., Nazarov M.A.* History of the meteorite collection of the Russian Academy of Sciences // Geological Society, London, Special Publications. 2006. Vol. 256. P. 219-236. DOI: 10.1144/GSL.SP.2006.256.01.11

2. *Оболонская Э.В., Попова Е.Е.* Метеорит «Бородино» // Русская история. 2012. № 1. С. 95-96.

3. *Оболонская 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, Россия. Челябинск: Челябинский государственный краеведческий музей, 2014. С. 355-363.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

4. *Scott E.R.D., Krot A.N.* Chondrites and Their Components // Treatise on Geochemistry (Second Edition). 2014. Vol. 1. P. 65-137. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00104-2

5. Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes / Ed. by S.S.Russell, Jr.H.C.Connolly, A.N.Krot. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. 450 p. DOI: 10.1017/9781108284073

6. *Jacquet E., Piralla M., Kersaho P., Marrocchi Y.* Origin of isolated olivine grains in carbonaceous chondrites // Meteoritics & Planetary Science. 2021. Vol. 56. № 1. P. 13-33. DOI: 10.1111/maps.13583

7. *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

8. *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

9. *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

10. *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

11. *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

12. *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

13. *Grossman J.N., Brearley A.J.* The onset of metamorphism in ordinary and carbonaceous chondrites // Meteoritics & Planetary Science. 2005. Vol. 40. Iss. 1. P. 87-122. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2005.tb00366.x

14. *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

15. *Cherniak D.J.* REE diffusion in olivine // American Mineralogist. 2010. Vol. 95. № 2-3. P. 362-368. DOI: 10.2138/am.2010.3345

16. *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

17. *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

18. *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

19. *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

20. *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

21. *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

22. *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

23. *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

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. № 1. P. 5-16. DOI: 10.1007/s12583-021-1422-2

25. *Румянцева Н.А., Скублов С.Г., Ваништейн Б.Г. и др.* Циркон из габброидов хребта Шака (Южная Атлантика): U-Pb возраст, соотношение изотопов кислорода и редкоэлементный состав // Записки Российского минералогического общества. 2022. Ч. CLI. № 1. С. 44-73. DOI: 10.31857/S0869605522010099

26. *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

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

28. *Ашихмин Д.С., Скублов С.Г., Мельник А.Е. и др.* Геохимия породообразующих минералов в мантийных ксенолитах из базальтов вулкана Сверре, арх. Шпицберген // Геохимия. 2018. № 8. С. 820-828. DOI: 10.1134/S0016752518080022

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

30. *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

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

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

32. *Zanetta P.-M., Le Guillou C., Leroux H. et al.* Modal abundance, density and chemistry of micrometer-sized assemblages by advanced electron microscopy: Application to chondrites // Chemical Geology. 2019. Vol. 514. P. 27-41. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2019.03.025

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. Iss. 3-4. 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. *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. Iss. 1. P. 248-286. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.06.016

Автор **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*).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0