
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКИХ И РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЖИЛЬНЫХ КАРБОНАТАХ ВОРОНЦОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И САФЬЯНОВСКОГО МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

© 2017 г. Е. И. Сорока, М. Е. Притчин, О. Л. Галахова

Изучали карбонатную жильную минерализацию Воронцовского золоторудного месторождения (Северный Урал) и Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал), представленную кальцитом, доломитом. Исследования проводили в целях выяснения особенностей карбонатной минерализации рудных месторождений и связи с рудообразованием.

ВВЕДЕНИЕ

Воронцовское месторождение локализовано в краевой части Ауэрбаховского андезитоидного вулканоплутонического комплекса девонского возраста [Замятина, Мурзин, 2016]. Самородное золото связано с сульфидной минерализацией карбонатных брекчий. На генезис месторождения существуют разные точки зрения. Некоторые исследователи предполагают связь золотого оруденения с молодой позднепалеозойской тектономагматической активизацией и аргиллизацией [Мурзин и др.,

2010; Замятина, Мурзин, 2016]. Предполагается также, что Воронцовское месторождение является частью медно-порфировой системы и находится на ее фланге. Предложена трехэтапная модель формирования месторождения: на первом этапе воды подогревались в осадках, которые извлекали золото; на втором этапе внедрение Ауэрбаховского массива вызвало перемещение золотоносных флюидов в краевые части системы в мраморизованные известняки; на третьем этапе произошел подток магматогенного флюида, обогащенного Pb, Zn, Ag [Мурзин и др., 2010]. Вблизи контакта с интрузией сформированы золотоносные скарны и кварцевые жилы. Карбонаты возникают в процессе всех стадий формирования руд. Жильная карбонатная минерализация на месторождении приурочена к тектоническим нарушениям, границам раздела пород и руд [Мурзин и др., 2010]. Монофракции карбонатов были отобраны из приконтактных жильных образований с вулканитами и дайками основных пород, а также рудоносных метасоматитов (табл. 1).

Таблица 1. Образцы жильных карбонатов Воронцовского золоторудного месторождения и Сафьяновского медноколчеданного месторождения

№ п/п	Образец, минерал (об. %), место отбора
1	Вор 2/15, кальцит, жила в туфоалевролитах, Южный карьер Воронцовского месторождения, южный борт, гор. 125
2	Вор 3/15, доломит (73), кварц (14), кальцит (11), пр. каолинита, жила в туфоалевролитах, там же
3	Вор 6/15, Mg-кальцит (81), кварц (17), пр. хлорита, пирита, жила в тектоническом контакте с дайкой лампритов в туфоалевролитах, там же
4	Вор 7/15к, кальцит (97), кварц, из туфоалевролитов, Южный карьер Воронцовского месторождения, южная часть, гор. 125
5	Вор 9/15ж, доломит (29), кварц (58), кальцит (9), пр. каолинита, жила из контакта известняков с вулканитами, Северный карьер Воронцовского месторождения, северная часть, гор. 55
6	Вор 10/15, кальцит (93), кварц (6), доломит, жила, там же
7	Вор 12/15, кальцит (80), доломит (16), кварц (4), пр. полевого шпата, жила из тектонического контакта рудоносных брекчий известняков с вулканитами, Северный карьер Воронцовского месторождения, северная часть, гор. 50
8	Вор 14/15, доломит (49), кальцит (39), кварц (12), жила из контакта известняков и лампроитов, там же
9	Вор 17/15, кальцит (99), кварц (1), пр. доломит, обеленный известняк, там же
10	Саф 19/15, доломит (70%), кварц (17), сидерит (7), кальцит (3), пр. каолинита, окolorудные породы вблизи медно-цинковых руд, южный борт Сафьяновского карьера, гор. 35
11	Саф 20/15, кальцит (72), кварц (28), тектонический контакт андезитов и риолитов, гор. 110, северо-западный борт Сафьяновского карьера
12	Саф 27/15, кальцит (87), кварц (14), цемент брекчии по андезитам, гор. 110, северо-западный борт Сафьяновского карьера
13	Саф 28/15, доломит (56), кварц (32), сидерит(12), тектоническая трещина в кислых вулканитах, гор. 110, северный борт Сафьяновского карьера

Массивные колчеданные, медно-цинковые и прожилково-вкрапленные руды Сафьяновского месторождения локализованы в измененных вулканитах кислото-среднего состава и вулканогенно-осадочных породах девонского возраста [Коровко и др., 1991]. Карбонаты присутствуют в породах метасоматического ореола Сафьяновского медноколчеданного месторождения, который имеет субмеридиональное простирание, крутое падение на запад и четко выраженную зональность относительно рудных тел [Грабежев и др., 2001]. В центральной части ореола на контакте массивных пирит-халькопиритовых руд наблюдаются пирит-халькопирит-хлорит-кварцевые и алуни-каолинит-серицит-пирит-кварцевые метасоматиты [Грабежев и др., 2001]. От контакта с рудными телами к периферии ореола выделены зоны хлорит-серицит-кварцевых, каолинит-карбонат-кварцевых и карбонат-гидросерицит-кварцевых метасоматитов, карбонаты представлены кальцитом, доломитом, сидеритом. В надколчеданной части месторождения развиты каолинит-карбонат-кварцевые метасоматиты [Грабежев и др., 2001]. Карбонатно-серицит-хлоритовые метасоматиты ассоциируют с медно-цинковыми вкрапленными рудами, а кварц-серицит-хлоритовые – с медными штокверковыми. Установлено зональное распределение карбонатов в пределах этого ореола: по мере приближения к богатым медным рудам доломит сменяется железистым магнезитом и сидеритом [Язева и др., 1992; Сорока и др., 2016]. По нашим данным [Сорока и др., 2016], маложелезистая магнезитовая минерализация на Сафьяновском месторождении является естественным продолжением пострудных преобразований вмещающих пород и их тектонического разрушения при релаксации внутренних напряжений. Кальцитовые и кальцит-доломитовые жилы связаны с тектоническими нарушениями и развиты на тектонических контактах измененных разностей влуканических и вулканогенно-осадочных пород и руд. Монофракции были отобраны из жильных карбонатных образований на тектонических контактах с надрудными андезитами и в околорудных породах на контакте с пирит-сфалеритовыми рудами (см. табл. 1).

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рентгеноструктурные исследования монофракций карбонатов выполнены на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu) в лаборатории физико-химических методов исследований (ФХМИ) ИГГ УрО РАН, аналитик О.Л. Галахова. Расчет содержаний минерала в пробе проведен при помощи программы SIROQUANT (см. табл. 1). Анализы проб на РЗЭ и элементы-примеси выполняли в лаборатории ФХМИ методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой

(ICP-MS) на масс-спектрометре ELAN 9000 (аналитики Н.В. Чередниченко, Л.К. Дерюгина).

В результате исследований в карбонатах Воронцовского месторождения установлены значительные вариации содержаний РЗЭ: от 128.8 до 10.9 г/т. Повышенное содержание РЗЭ представлено в карбонатах из гидротермально измененных туфоалевролитов (обр. Вор 3/15) и контакта известняков и дайки лампроитов – 80.95 г/т (обр. Вор 14/15). Наименьшее содержание РЗЭ представлено в кальците из гидротермально измененного известняка (Вор 17/15) (табл. 2).

Суммарное содержание РЗЭ в жильных кальцитах и доломитах Сафьяновского месторождения в отличие от такового Воронцовского месторождения колеблется в более узких пределах: 90.63–43.36 г/т (см. табл. 2). Особенностью распределения РЗЭ в них является положительная аномалия Eu/Eu^* (см. табл. 2). Нужно отметить, что тренды (Вор 5/15, Вор 6/15, Вор 10/15, Вор 14/15) имеют положительный подъем в области Eu (рис. 1а). На некоторых трендах карбонатов (Вор 17/15, Вор 10/15, Вор 9/15) наблюдается отрицательная Se -аномалия (см. рис. 1а, табл. 2).

Хондрит-нормализованные тренды распределения РЗЭ карбонатов имеют в основном положительный наклон $HREE < LREE$ (см. рис. 1а). В образце Саф 19/15 из карбонатной жилы в околорудных метасоматитах Сафьяновского месторождения наблюдается некоторое обогащение $HREE$.

Распределение рассеянных элементов в карбонатах изучаемых месторождений практически одинаково. В целом их содержание низкое – около 1 г/т (см. табл. 2). На диаграмме распределения рассеянных элементов (рис. 1б) выделяются обр. Саф 19/15 из приконтактных околорудных метасоматитов – по высокому содержанию Cu , и обр. Саф 27/15, который отличается низким содержанием Th , Zr . Кроме того, выделяется обр. Вор 14/15 из зоны контакта известняков с дайкой лампроитов – резким снижением содержания Sr и относительно повышенным содержанием Pb . Образцы Вор 2/15, 10/15 отличаются практически отсутствием Cs и низким содержанием Rb .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты исследования карбонатов Воронцовского месторождения подтверждают данные [Мурзин и др., 2010], что концентрации примесных компонентов в них невысоки – около 1 г/т. Некоторые превышения по Pb , W , Y , Va наблюдаются в карбонатах из контакта рудоносных брекчий с вулканитами и дайками лампроитов. Присутствие элементов базит-ультрабазитового профиля может быть связано с влиянием вулканического материала. В то же время отмечаются резкое снижение содержания Sr и повышение содержания Pb в жильных карбо-

Таблица 2. Содержание РЗЭ, редких и рассеянных элементов в жильных карбонатах Воронцовского и Сафьяновского месторождений, г/т

Обр/элемент	Вор 2/15	Вор 3/15	Вор 6/15	Вор 7/15	Вор 9/15	Вор 10/15	Вор 12/15	Вор 14/15	Вор 17/15	Саф 19/15	Саф 20/15	Саф 27/15	Саф 28/15
La	11.164	30.003	7.034	16.115	5.202	4.121	2.914	15.598	4.086	7.120	21.990	11.150	6.020
Ce	11.547	45.033	11.297	15.913	10.387	3.869	6.148	28.398	2.241	6.210	14.380	7.160	5.430
Pr	1.708	5.800	1.370	3.127	1.470	0.808	0.692	3.754	0.594	6.160	10.400	5.410	4.630
Nd	6.753	23.744	5.872	12.967	6.423	3.596	3.018	16.816	2.328	6.340	7.900	4.240	4.150
Sm	1.091	5.310	1.521	2.763	1.607	0.736	0.690	4.355	0.356	7.480	4.400	2.760	4.110
Eu	0.664	2.668	4.137	0.725	0.376	0.220	0.216	3.434	0.067	7.710	13.390	5.710	5.010
Gd	1.240	5.941	1.768	3.342	1.738	0.983	0.792	4.679	0.399	9.160	2.660	2.250	4.370
Tb	0.171	0.856	0.260	0.518	0.272	0.153	0.125	0.654	0.051	8.500	1.680	1.590	4.050
Dy	1.083	4.736	1.633	3.286	1.795	1.051	0.837	3.879	0.326	7.570	1.110	1.120	3.460
Ho	0.228	0.880	0.319	0.686	0.376	0.246	0.189	0.723	0.080	6.380	0.770	0.750	2.980
Er	0.655	2.137	0.862	1.888	1.100	0.739	0.579	1.882	0.231	5.600	0.600	0.500	2.870
Tm	0.085	0.261	0.110	0.241	0.157	0.100	0.080	0.238	0.027	4.500	0.470	0.330	2.360
Yb	0.476	1.272	0.670	1.362	1.041	0.638	0.491	1.371	0.131	4.130	0.400	0.210	2.490
Lu	0.066	0.186	0.090	0.183	0.154	0.092	0.070	0.173	0.022	3.770	0.320	0.180	2.380
Σ REE	36.931	128.83	36.943	63.116	32.098	17.352	16.841	85.954	10.939	90.630	80.470	43.360	54.410
Eu/Eu*	1.75	2.11	0.40	4.19	4.44	3.87	3.42	1.31	5.63	1.07	0.26	0.44	0.85
Ce _{ан}	0.124	0.227	0.245	0.042	0.255	0.002	0.317	0.244	-0.139	-0.034	0.038	0.018	0.036
Редкие и рассеянные элементы													
Cs	0.000	0.183	0.016	0.041	0.021	0.000	0.222	0.058	0.038	0.169	0.056	0.017	0.787
Rb	0.0018	0.1051	0.0185	0.0238	0.0368	0.0034	0.1829	0.04813	0.0651	0.0682	0.0403	0.0115	0.2177
Th	0.0146	0.2293	0.0071	0.0329	0.0704	0.0253	0.0143	0.01274	0.0062	0.0607	0.0030	2.8571	0.1303
U	0.0395	0.2270	0.0786	0.2155	0.1902	0.3684	0.0354	0.0461	0.1655	0.4426	0.0909	0.0066	0.4014
Pb	2.0261	0.7880	0.8068	0.0874	1.9708	0.5621	0.3436	12.1390	0.0937	0.3684	0.1178	0.1535	0.4181
Ba	0.0122	0.1139	0.9138	0.0194	0.0869	0.0202	1.9330	0.0242	0.1122	0.2440	0.0831	0.0335	8.9891
Nb	0.0054	0.0303	0.0049	0.0120	0.0235	0.0077	0.0192	0.0024	0.0460	0.0097	0.0045	0.0032	0.0295
Ta	0.1692	0.0749	0.1189	0.1158	0.0266	0.0780	2.0961	0.0074	0.0973	0.0554	0.0267	0.0308	0.0281
Be	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.062	0.068	0.000	0.000	0.096
W	0.0001	0.1248	0.1179	0.0457	4.1014	0.0359	0.4754	0.07916	0.1992	1.2774	1.2026	0.5026	1.9770
Sr	0.8560	0.4193	1.2000	0.5902	0.3082	0.5021	0.5564	0.9220	0.5147	4.5591	0.9663	0.7218	2.6813
Zr	0.0025	0.0731	0.0052	0.0134	0.0849	0.0147	0.0084	0.0092	0.0080	0.0945	0.0098	0.0001	0.2087
Hf	0.0098	0.0860	0.0116	0.0235	0.0908	0.0143	0.0129	0.01777	0.0126	0.0848	0.0091	0.0015	0.1717
Li	0.0018	0.1989	0.0674	0.0114	0.3264	0.0063	0.0233	0.2407	0.0099	0.1572	0.6240	0.0612	0.1734
Ho	0.2925	1.1276	0.4090	0.8793	0.4819	0.3157	0.2418	0.9271	0.1030	0.6297	0.0763	0.0743	0.2939
Y	0.5331	1.6498	0.5340	1.3545	0.5771	0.5593	0.3231	1.2235	0.0914	0.8360	0.0958	0.0703	0.3911
Ti	0.0006	0.0381	0.0153	0.0096	0.0982	0.0032	0.0106	0.0102	0.0243	0.0115	0.0090	0.0050	0.0773
Cu	0.0166	0.0814	0.2015	0.0436	0.0682	0.0164	0.0120	0.03442	0.0516	106.30	0.1235	0.0233	0.0513
Sc	0.0377	0.0962	0.0591	0.0334	0.0887	0.0513	0.0679	0.1111	0.0235	0.1343	0.0473	0.0251	0.2449
V	0.0064	0.0794	0.0235	0.0095	0.1433	0.0088	0.0456	0.0465	0.0156	0.0156	0.0107	0.0039	0.1540
Co	0.0228	0.0778	0.0514	0.0386	0.1062	0.0415	0.0373	0.0622	0.0560	0.2051	0.0429	0.0302	0.0993
Ni	0.0621	0.0448	0.0645	0.1068	0.0381	0.1430	0.0589	0.0325	0.0988	0.0345	0.0628	0.0576	0.0679
Cr	0.0282	0.0066	0.0119	0.0147	0.0259	0.0506	0.0053	5.4054	0.0196	0.0933	0.0340	0.0032	0.0334

Примечание. Расчет Ce- и Eu-аномалий проводили по формулам $Ce_{ан} = \lg Ce_n / Ce^* = \lg [Ce_n / (La_n Nd_n)^{1/2}]$ [Akagi, Masuda, 1998], $Eu_{ан} = Eu_n / (Sm_n Nd_n)^{1/2}$ [McDonough, Sun, 1995]; индекс "н" – содержание, нормированное на хондрит [McDonough, Sun, 1995].

натах на контакте известняков и дайки лампроитов (Вор 14/15), что может являться следствием распределением этих элементов между минералообразующим флюидом и карбонатом.

Кроме того, исследования показали, что в карбонатах Воронцовского месторождения наблюдаются три вида трендов распределения РЗЭ: первый – с отрицательной Ce-аномалией и отрицательной Eu-аномалией; второй – с положительной Eu-аномалией; третий – пологий тренд, характерный для карбонатов рудных метасоматитов [Мур-

зин и др., 2010]. Нужно отметить, что в кальците измененного обеленного известняка (Вор 17/15) содержание РЗЭ не только самое низкое среди карбонатов данной выборки, но и много ниже, чем в слабо измененном брекчированном известняке [Мурзин и др., 2010]. Известняки вмещающей толщи Воронцовского месторождения имеют повышенную фоновую концентрацию РЗЭ [Замятина, Мурзин, 2016]. Таким образом, можно говорить о выносе РЗЭ из известняка в процессе рудообразования. Кальцит измененного обеленно-

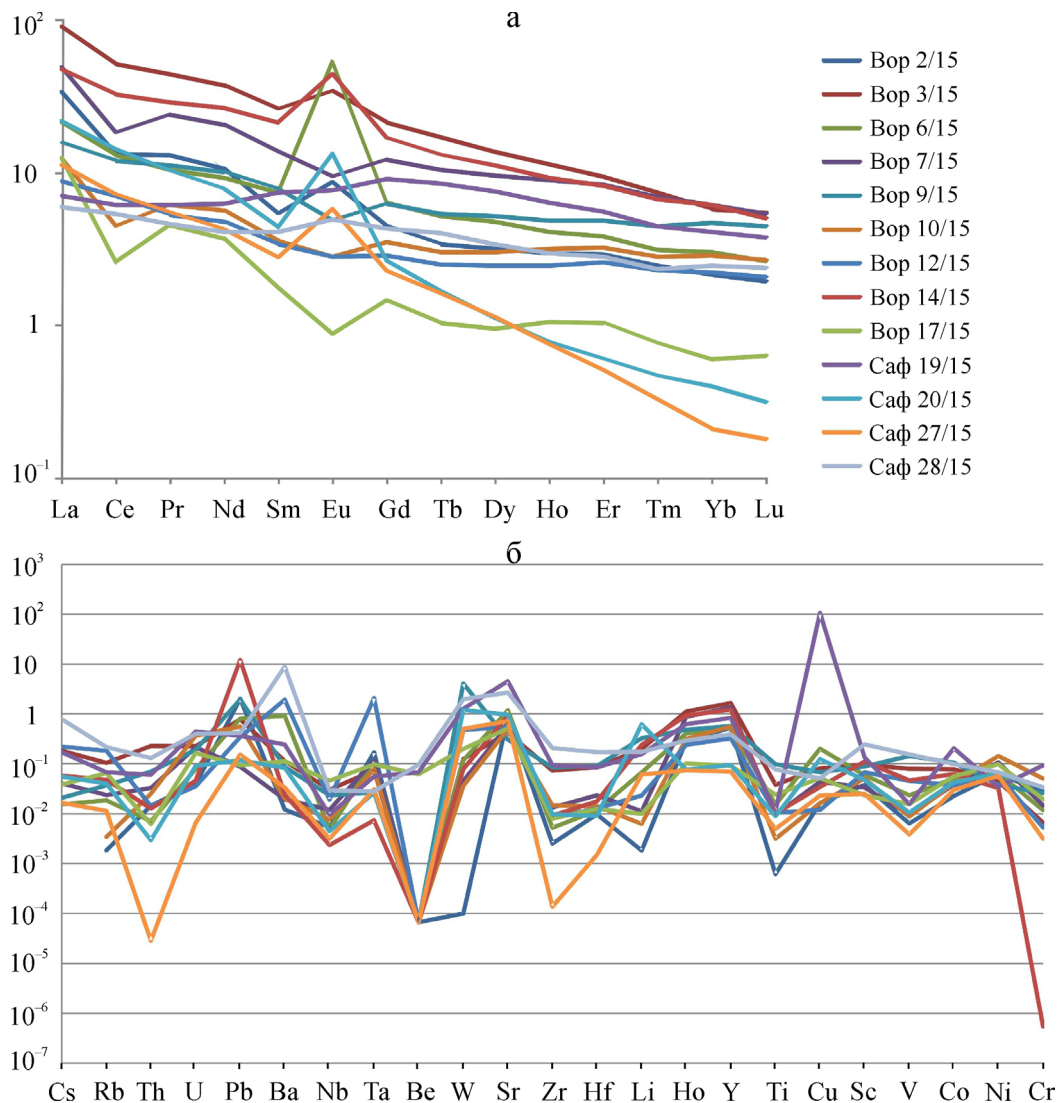


Рис. 1. Нормированное на хондрит [McDonough, Sun, 1995] содержание РЗЭ (а) и элементов-примесей (б) в жильных карбонатах Сафьяновского медноколчеданного месторождения и Воронцовского золоторудного месторождения.

го известняка, видимо, является более поздним. В работе А.И. Грабежева с соавторами высказано предположение, что известняк выступает основным поставщиком РЗЭ в рудообразующем флюиде [2001]. Исчезновение Се-аномалии в джаспероиде и скарне Воронцовского месторождения исследователи трактуют как участие магматоганного флюида на последнем, третьем, этапе рудообразования [Мурзин и др., 2010]. Однако отсутствие отрицательной Се-аномалии в некоторых жильных карбонатах изучаемой выборки может свидетельствовать и о влиянии на распределение РЗЭ вмещающих пород. По данным Ю.Н. Водняцкого [2012], степень Се-аномалии зависит не только от изменения рН и Eh флюида, но и от обогащенности среды марганцем.

Концентрации примесных элементов в карбонатах Сафьяновского месторождения также невысо-

кое – в основном около 1 г/т. Повышенное содержание **Сu** в **обр. Саф 19/15** из околорудных метасоматитов вызвано влиянием медно-цинковых руд, что может указывать на близкое по времени образование карбонатов из рудообразующего флюида. В остальных образцах выборки наблюдается несколько повышенное содержание **Sr**, что, скорее всего, отражает воздействие вмещающих андезитов. В выборке карбонатов (кальцита, доломита) с Сафьяновского месторождения отмечены пологие тренды с некоторым превышением HREE > LREE и тренды с положительной Eu-аномалией. Отрицательная Се-аномалия в них не установлена.

Некоторые исследователи считают, что положительная Eu-аномалия может быть связана с изменением форм переноса Eu во флюиде при снижении температуры [Попова и др., 2016]. По данным Г.Р. Колонина [2006], в растворе Eu^{3+} присутствует

в значительном количестве при флюидодоминирующем режиме. Можно ожидать, что на последующих стадиях геохимических процессов “избыточный” Eu фиксируется в виде положительных аномалий в жильных образованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, пологие тренды распределения РЗЭ в карбонатах, а также HREE > LREE могут свидетельствовать об изменении pH и Eh флюида, в результате которого LREE образуют свои минеральные фазы (монацит) либо входят в новообразованные фазы, например Се-эпидот, хлорит, апатит. По данным Г.Р. Колонина и Г.П. Широносковой [2012], в близнезтральном флюиде понижение концентрации РЗЭ + Y наблюдается при охлаждении раствора с 400 до 200°C, причем La, Ce, Pr – в 3 раза, Nd – в 5, Sm, Eu, Gd – в 6 раз. В этом случае возможно обогащение жильных карбонатов – как LREE, так и HREE – при суммарном низком содержании РЗЭ. Возможно выпадение собственных минеральных фаз, обогащенных РЗЭ (монацита, гоацита), что наблюдалось на Сафьяновском месторождении [Притчин и др., 2014]. Положительная Eu-аномалия может свидетельствовать о том, что карбонат был образован из рудоносного флюида.

Работа выполнена при поддержке проекта УрО РАН № 15-11-5-17.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водняцкий Ю.Н.* Геохимическое фракционирование лантаноидов в почвах и горных породах (обзор литературы) // Почвоведение. 2012. № 1. С. 1–13.
- Грабежнев А.И., Молошаг В.П., Сотников В.И.* Метасоматический ореол Сафьяновского Zn-Cu-колчеданного месторождения, Средний Урал // Петрология. 2001. № 3. С. 294–312.
- Замятина Д.А., Мурзин В.В.* Источники вещества и флюида при формировании золотосульфидного оруденения Ауэрбаховского вулканоплутонического пояса на Северном Урале // Литосфера. 2016. № 1. С. 169–177.
- Колонин Г.Р.* Физико-химические особенности европия как возможного индикатора условий минералообразования // Докл. АН. 2006. Т. 408, № 4. С. 508–511.
- Колонин Г.Р., Широноскова Г.П.* Влияние кислотности-щелочности растворов на распределение РЗЭ в процессах рудообразования (термодинамическое моделирование) // Докл. АН. 2012. Т. 443, № 5. С. 613–616.
- Коровко А.В., Двоеглазов Д.А., Лещев Н.В. и др.* Сафьяновское медно-цинковое колчеданное месторождение (Средний Урал) // Геодинамика и металлогения Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1991. С. 152–153.
- Мурзин В.В., Сазонов В.Н., Ронкин Ю.Л.* Модель формирования Воронцовского золоторудного месторождения на Урале (карлинский тип): новые данные и проблемы // Литосфера. 2010. № 6. С. 66–73.
- Попова Ю.А., Бычков А.Ю., Матвеева С.С.* Геохимические особенности лантаноидов при формировании месторождения Светлое (Чукотка) // Геохимия. 2016. № 8. С. 761–768.
- Притчин М.Е., Сорока Е.И., Молошаг В.П., Замятин Д.А.* Находки гоацита в метасоматитах Сафьяновского медноколчеданного месторождения // Сборник мат-лов УМШ-2014. Екатеринбург, 2014. С. 213–216.
- Сорока Е.И., Притчин М.Е., Лютюев В.П., Галахова О.Л.* Магнетитовая минерализация окolorудных пород Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал) // Зап. РМО. 2016. № 3. С. 23–35.
- Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарев В.В.* Геология Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал). Препринт. Екатеринбург: Наука, 1992. 70 с.
- Akagi T., Masuda A.* A simple thermodynamic interpretation of Ce anomaly // J. Geochem. 1998. V. 32. P. 301–314.
- McDonough W.F., Sun S.* The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. V. 120, no. 3–4. P. 223–253.