

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИТТРИЯ В КАЛЬЦИТЕ АУ-СУ-ПОРФИРОВЫХ РУД И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ КУТУЕВСКОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

С. Е. Знаменский, Н. М. Знаменская

*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,  
450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2, E-mail: Znamensky\_Sergey@mail.ru*

Изучено распределение РЗЭ и Y в кальците Au-Cu-порфировых руд и во вмещающих породах Кутуевского рудопроявления, расположенного в зоне Главного Уральского разлома на Южном Урале. Содержания РЗЭ и Y определены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометре ELAN 9000 в ИГГ УрО РАН. Показано, что кальцит и интрузивные породы рудопроявления имеют близкие спектры распределения РЗЭ, характеризующиеся накоплением легких лантаноидов, отсутствием дифференциации среди тяжелых РЗЭ, а также отрицательными аномалиями Се. Отличительной особенностью кальцита являются положительные аномалии Eu, свидетельствующие о высокотемпературной обстановке его формирования (>250°C) из восстановленного флюида. Значения Y/Ho в кальците и во вмещающих породах указывают на взаимодействие флюид/известняк. Результаты исследований подтверждают вывод, полученный на основании изотопных данных, об участии в образовании порфировой минерализации флюидов и компонентов магматогенной и метаморфогенной природы.

*Ключевые слова:* Южный Урал, Au-Cu-порфировое оруденение, редкоземельные элементы, иттрий, аномалии Eu

## REE AND YTTRIUM PATTERNS IN CALCITE OF AU-CU-PORPHYRY ORE AND HOST ROCKS OF KUTUEVKA ORE OCCURRENCE (SOUTHERN URALS)

S. E. Znamensky, N. M. Znamenskaya

*Institute of Geology, Ufa Federal Research Center of RAS, 16/2, K. Marx St., Ufa, 450077,  
Russia, E-mail: Znamensky\_Sergey@mail.ru*

The distribution of REE and Y in calcite of Au-Cu-porphyry ores and in host rocks of the Kutuevka ore occurrence located in the zone of the Main Ural Fault in the Southern Urals is studied. The content of REE and Y was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) on the ELAN 9000 spectrometer at the IGG of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. It is shown that calcite and intrusive rocks of the ore occurrence have similar REE patterns, characterized by the accumulation of light lanthanides, the lack of differentiation among heavy REEs, and negative Ce anomalies. A distinctive feature of calcite is the positive Eu anomalies, indicating a high-temperature environment of its formation (>250°C) from the reduced fluid. The Y/Ho values in calcite and host rocks indicate a fluid/limestone interaction. The results of the studies confirm the conclusion obtained on the basis of isotopic data about the participation of fluids and components of magmatogenic and metamorphogenic nature in the formation of porphyry mineralization.

*Keywords:* Southern Urals, Au-Cu-porphyry mineralization, rare earth elements, yttrium, Eu anomalies

---

**Для цитирования:** Знаменский С.Е., Знаменская Н.М. Распределение редкоземельных элементов и иттрия в кальците Au-Cu-порфировых руд и вмещающих породах Кутуевского рудопроявления (Южный Урал) // Геологический вестник. 2021. № 1. С. 98–104. DOI: 10.31084/2619-0087/2021-1-9.

**For citation:** Znamensky S.E., Znamenskaya N.M. (2021) REE and yttrium patterns in calcite of Au-Cu-porphyry ore and host rocks of Kutuevka ore occurrence (Southern Urals). *Geologicheskii vestnik*. No. 1. P. 98–104. DOI: 10.31084/2619-0087/2021-1-9.

---

## Введение

Редкоземельные элементы (РЗЭ) и близкий к ним по химическим свойствам иттрий относятся к числу важнейших геохимических индикаторов процессов гидротермального рудообразования. В последнее время данные по распределению этих элементов в минералах руд, наряду с исследованиями стабильных изотопов, стали широко использоваться для выяснения физико-химических параметров, состава и источников минералообразующих флюидов [Debruyne et al., 2016; Muchez, Corbella, 2012; Znamenskii et al., 2017; и мн. др.]. Наиболее информативными являются модели редкоземельных элементов и иттрия в Са-содержащих минералах (шеелите, флюорите, карбонатах и др.), так как лантаноиды и иттрий имеют близкие к кальцию ионные радиусы и могут замещать его в кристаллической решетке этих минералов.

Цель статьи — рассмотреть особенности распределения редкоземельных элементов и иттрия в кальците руд, во вмещающих интрузивных породах и околорудных метасоматитах и на этой основе оценить физико-химические характеристики, а также возможные источники флюидов, участвовавших в формировании Au-Cu-порфировой минерализации Кутуевского рудопроявления (Южный Урал).

## Методы исследований

Определение содержаний РЗЭ выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометре ELAN 9000 фирмы Perkin Elmer в Институте геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург, аналитик Д.В. Киселева). В тексте, в таблице и на графиках нижний индекс N обозначает значения, нормированные на хондрит C1 [McDonough, Sun, 1995]. Аномалии Eu и Ce рассчитывались по формулам:  $Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{0.5}$ ,  $Ce/Ce^* = 2Ce_N / (La_N + Pr_N)$ . Результаты определений и рассчитанные геохимические коэффициенты приведены в таблице.

## Краткая геологическая характеристика Кутуевского рудопроявления

Кутуевское рудопроявление расположено в зоне Главного Уральского разлома на северном замыкании Магнитогорской мегазоны, в 25 км юго-западнее города Учалы Республики Башкортостан. Рудопроявление относится к нетрадиционному для Южного Урала полиформационному типу с совме-

щенным Co-Cu-колчеданным и Au-Cu-порфирым оруденением [Знаменский и др., 2019а].

Современная структура рудопроявления представляет собой пакет крутопадающих тектонических пластин (рис. 1). Пластины сложены терригенно-тефроидными породами с прослоями обломочных известняков и яшм, предположительно относящимися к ильтибановской толще ( $D_1lh$ ), массивными известняками, серпентинитами, серпентинитокластическими брекчиями, местами перекрытыми толщей афировых и плагиофировых долерито-базальтов, пироксен-плагиофировых базальтов и андезибазальтов.

Залежь массивных колчеданных руд пирит-пирротин-халькопиритового состава залегает среди оталькованных и карбонатизированных серпентинитокластических брекчий. Прожилковая Au-Cu-порфировая минерализация связана с дайками, состав которых варьирует от габбро до кварцевых диоритов. Преобладают плагиофировые разновидности пород. Эффузивные и интрузивные породы рудопроявления по геохимическим характеристикам близки к вулканитам баймак-бурибаевской свиты ( $D_1e_2$ ), распространенной в южных районах Магнитогорской мегазоны [Знаменский и др., 2019б].

Основная зона Au-Cu-порфиновых руд, представляющая собой линейный сульфидно (пирит-халькопирит-сфалерит-пирротин)-карбонат-кварцевый штокверк, локализована в наиболее крупном теле, сложенном плагиофировыми габбро-диоритами и диоритами. По данным термического анализа карбонат в рудных прожилках представлен кальцитом. Кальцит отлагался раньше кварца. Околорудные метасоматиты имеют хлорит-серицит-кварцевый состав, иногда с примесью карбоната. В зоне восточного контакта рудоносной интрузии в метасоматитах появляются биотит и эпидот. Вдоль западного экзоконтакта интрузии развиты листвениты фуксит-карбонат-кварцевого состава, образовавшиеся в основном по известнякам. Листвениты наложены на Au-Cu-порфиновую минерализацию.

По данным гомогенизации флюидных включений, кальцит Au-Cu-порфиновых руд сформировался при температуре 220–299°C, кварц — 220–269°C [Знаменский и др., 2019а]. Кристаллизация кальцита и кварца происходила из Ca-Mg-Na(K) водно-хлоридных растворов с соленостью 6–12 мас. % NaCl-экв. Данные по стабильным изотопам углерода, кислорода и серы свидетельствуют о том, что в формировании порфировой минерализации участвовали флюиды магматогенной и метаморфогенной природы.

Таблица. Содержание (г/т) редких и редкоземельных элементов в интрузивных породах, карбонат-хлорит-серицит-кварцевом метасоматите и кальците рудных прожилков

Table. Content (ppm) of rare and rare earth elements in intrusive rocks, carbonate-chlorite-sericite-quartz metasomatite and calcite of ore veins

Образец Компонент	302/68	302/86	375/109	375/32	375/35	375/108	375/135	375/161
La	5.09	5.57	3.42	0.163	0.087	1.535	0.139	0.263
Ce	10.68	12.27	6.89	0.258	0.139	2.436	0.182	0.481
Pr	1.38	1.62	0.91	0.035	0.018	0.301	0.022	0.073
Nd	5.98	6.73	3.85	0.148	0.084	1.306	0.091	0.392
Sm	1.37	1.44	1.03	0.043	0.026	0.201	0.026	0.109
Eu	0.39	0.45	0.24	0.031	0.030	0.422	0.032	0.052
Gd	1.15	1.2	1.04	0.048	0.028	0.216	0.036	0.146
Tb	0.18	0.18	0.18	0.007	0.004	0.019	0.005	0.019
Dy	1.17	1.22	1.19	0.048	0.024	0.125	0.034	0.136
Ho	0.26	0.27	0.27	0.010	0.005	0.033	0.008	0.033
Er	0.8	0.89	0.83	0.033	0.016	0.099	0.023	0.099
Tm	0.13	0.13	0.14	0.005	0.003	0.013	0.003	0.015
Yb	0.87	0.97	0.94	0.038	0.017	0.097	0.025	0.104
Lu	0.13	0.15	0.15	0.007	0.003	0.019	0.004	0.017
Y	8.1	6.5	8.2	0.546	0.315	1.83	0.368	1.527
Sr	447	459	157	1267	1377	254	1081	347
$\Sigma$ РЗЭ	29.58	33.09	21.08	0.874	0.484	6.822	0.63	1.939
(La/Yb) <sub>N</sub>	4.17	4.12	2.61	3.09	3.68	11.38	4.0	1.82
(La/Sm) <sub>N</sub>	2.4	2.5	2.14	2.45	2.16	4.93	3.45	1.56
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.09	1.02	0.92	1.05	1.36	1.84	1.19	1.16
Eu/Eu*	0.95	1.05	0.71	1.81	2.61	4.62	1.39	1.31
Ce/Ce*	0.89	0.92	0.85	0.72	0.71	0.76	0.62	0.77
Y/Ho	31.9	24.1	30.4	54.6	63	55.5	46	46.3

Примечания: Обр. 302/68, 302/86 — интрузивные породы габбро-диоритового и диоритового состава; обр. 375/109 — околорудный метасоматит карбонат-хлорит-серицит-кварцевого состава по диориту; обр. 375/32, 375/35, 375/108, 375/135, 375/161 — кальцит рудных прожилков.

Notes: Samples 302/68, 302/86 — intrusive rocks of gabbro-diorite and diorite composition; sample 375/109 — near-ore metasomatite of carbonate-chlorite-sericite-quartz composition after diorite; samples 375/32, 375/35, 375/108, 375/135, 375/161 — calcite of ore veins.

### Обсуждение результатов и основные выводы

По данным ICP-MS анализа габбро-диориты и диориты, слагающие рудоносную интрузию, имеют относительно невысокие для порфировых систем содержания РЗЭ ( $\Sigma$ РЗЭ = 29.58–33.09 г/т) (см. табл.). Хондрит-нормированные спектры распределения РЗЭ характеризуются накоплением легких лантаноидов ((La/Yb)<sub>N</sub> = 4.12–4.17), отсутствием дифференциации среди тяжелых редких земель ((Gd/Yb)<sub>N</sub> = 1.02–1.09), а также наличием небольших отрицательных аномалий церия (Ce/Ce\* = 0.89–0.92) (рис. 2а). Аномалии европия не выражены (Eu/Eu\* = 0.95–1.05). Европий присутствует в природных системах, в том числе и в магматических

породах, в двух- и трехвалентной форме. Eu<sup>2+</sup> имеет по сравнению с Eu<sup>3+</sup> и другими трехвалентными соседними лантаноидами больший ионный радиус [Bau, Möller, 1992]. В магматических породах основным концентратом европия является плагиоклаз. Из-за меньшего ионного радиуса Eu<sup>3+</sup> по сравнению с Eu<sup>2+</sup> обладает большей способностью входить в кристаллическую решетку плагиоклаза, где он замещает Ca<sup>2+</sup>. Отсутствие аномалии европия в кутуевских гранитоидах свидетельствует о преобладании в расплаве Eu<sup>3+</sup> и, соответственно, высокой степени его окисленности и/или водонасыщенности [Richards et al., 2012].

Околорудный метасоматит карбонат-хлорит-серицит-кварцевого состава, образовавшийся по диоритоидам, отличается от эдукта меньшим

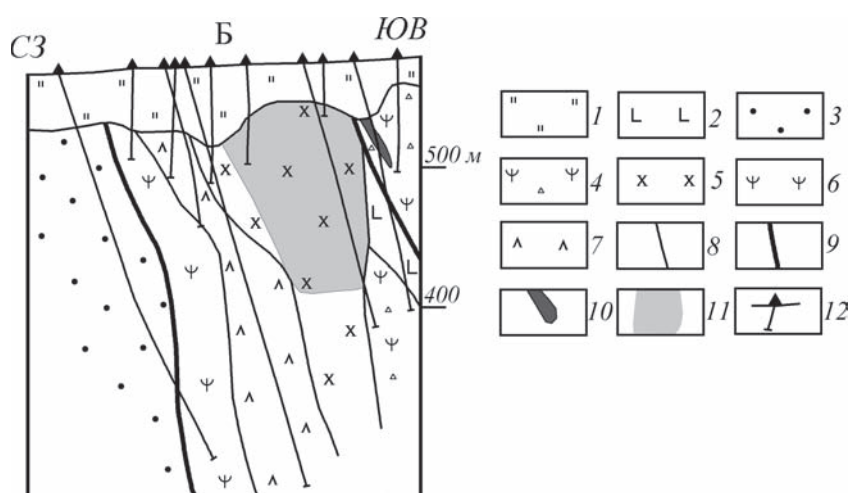


Рис. 1. Геологический разрез Кутуевского рудопоявления (составлен с использованием данных Учалинского филиала ОАО «Башкиргеология»)

Условные обозначения: 1 — кора выветривания; 2 — пироксен-плаггиофировые базальты и долерито-базальты; 3 — терригенно-тефроидные гравелиты, песчаники, алевролиты, яшмоиды и обломочные известняки; 4 — серпентинитокластические эдафогенные брекчии; 5 — габбро-диориты и диориты; 6 — серпентиниты; 7 — листваниты; 8 — геологические границы; 9 — разломы; 10 — массивная колчеданная руда; 11 — зона штокверковой медно-порфировой минерализации; 12 — скважины.

Fig. 1. Geological section of the Kutuevka ore occurrence (compiled with use of data of the Uchalinsky Department of “Bashkirgeologiya” Ltd.)

Legend: 1 — weathering crust; 2 — pyroxene-plagiophyric basalts and dolerite-basalts; 3 — terrigenous-tephroid gravelites, sandstones, siltstones, jasperoids and clastic limestones; 4 — serpentinitoclastic edaphogenic breccias; 5 — gabbro-diorites and diorites; 6 — serpentinites; 7 — listwanites; 8 — geological boundaries; 9 — faults; 10 — massive sulfide ore; 11 — zone of stockwork copper-porphyry mineralization; 12 — wells.

содержанием РЗЭ ( $\sum \text{РЗЭ} = 28.07 \text{ г/т}$ ) (см. табл.). Как видно на графиках, представленных на рис. 2б, при метасоматозе диоритоидов происходил незначительный вынос легких лантаноидов, а тяжелые РЗЭ вели себя инертно. Среди легких лантаноидов наиболее подвижным был европий, что привело к появлению в метасоматите отрицательной аномалии этого элемента. Очевидно, что флюид, из которого в дальнейшем кристаллизовался кальцит рудных прожилков, после взаимодействия флюид/порода был обогащен легкими лантаноидами, и особенно европием.

Кальцит Au-Cu-порфировых руд Кутуевского рудопоявления имеет очень низкие

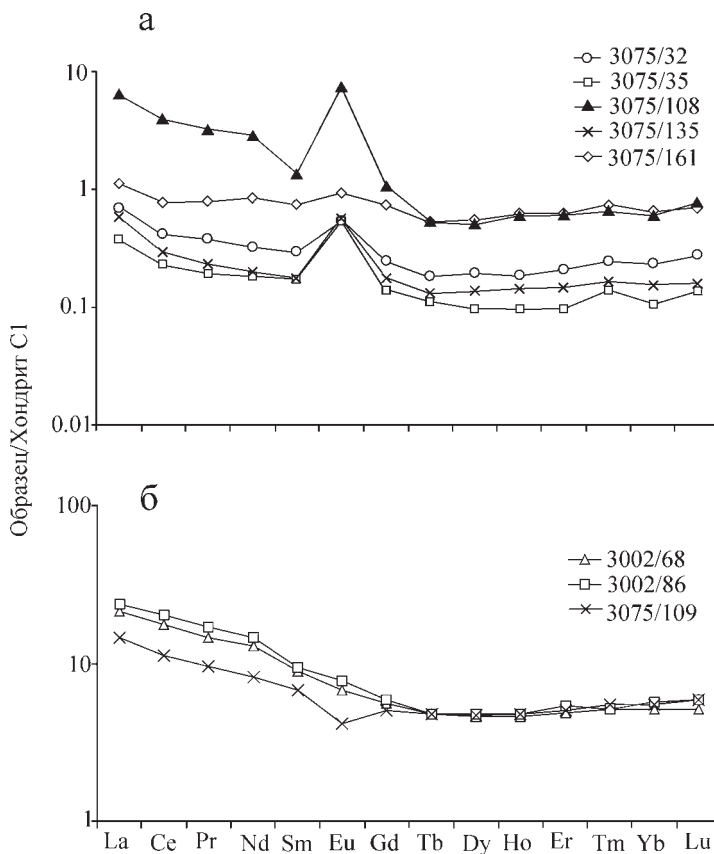


Рис. 2. Спектры распределения редкоземельных элементов в кальците (а), интрузивных породах и карбонат-хлорит-серицит-кварцевом метасоматите(б)

Fig. 2. REE patterns of calcite (a), intrusive rocks, and carbonate-chlorite-sericite-quartz metasomatism (б)

содержания РЗЭ, варьирующие от 0.48 до 6.82 г/т (см. табл.), что характерно для закрытых рудообразующих систем [Debruyne et al., 2016]. Тренды распределения РЗЭ обогащены легкими лантаноидами относительно тяжелых  $((La/Yb)_N = 1.82-11.38)$  и характеризуются наличием небольших отрицательных аномалий церия  $(Ce/Ce^* = 0.62-0.77)$ , а также отсутствием заметной дифференциации среди тяжелых редких земель  $((Gd/Yb)_N = 1.05-1.84)$ . В целом тренды распределения РЗЭ в рудном кальците сопоставимы с графиками поведения лантаноидов во вмещающих интрузивных породах (см. рис. 2). Такое сходство, в сочетании с изотопными данными, свидетельствующими об участии в рудообразовании магматических флюидов, позволяет полагать, что одним из источников РЗЭ в гидротермальной системе Кутуевского рудопроявления служили габбро-диориты и диориты.

Отличительной особенностью рудного кальцита являются положительные аномалии европия  $(Eu/Eu^* = 1.31-4.62)$ , указывающие на фракционирование РЗЭ в высокотемпературной обстановке  $(>250^\circ C)$ , в которой доминировал  $Eu^{2+}$  [Sverjensky, 1984; Bau, Moller, 1992], что согласуется с приведенными выше данными по температуре гомогенизации флюидных включений в кальците. Однако из флюида такого состава должен был кристаллизоваться кальцит с отрицательными аномалиями Eu, так как из-за большого ионного радиуса  $Eu^{2+}$  по сравнению с  $Ca^{2+}$  его вхождение в кристаллическую решетку карбоната затруднено. Окисление Eu до трехвалентного состояния в высокотемпературной обстановке маловероятно, так как для этого требуется экстремально низкая фугитивность кислорода  $(<10^{-80}$  бар) [Bau, 1991]. По-видимому, положительные аномалии европия в кальците Au-Cu-порфировых руд обусловлены сочетанием нескольких факторов. Во-первых, как было показано выше, флюид изначально характеризовался высокими значениями  $Eu/Eu^*$ . Во-вторых, по данным ICP-MS анализа (см. табл.), кальцит имеет повышенные содержания Sr (до 1377 г/т).  $Eu^{2+}$  и  $Sr^{2+}$  имеют близкие ионные радиусы — 117 и 118 пм соответственно [Shannon, 1976]. Поэтому  $Eu^{2+}$  мог замещать  $Sr^{2+}$  в кристаллической решетке кальцита. В-третьих, вероятно, низкой была активность Cl, с которым  $Eu^{2+}$  образует устойчивые комплексные соединения. В закрытой гидротермальной системе с низкими концентрациями РЗЭ это способствовало осаждению  $Eu^{2+}$ . Подобные ситуации описаны и на других месторождениях, например, на стратиформном Cu-Co месторождении Нкана-Миндола (Зимбабве) [Debruyne et al.,

2016]. На этом месторождении поздние секущие кливаж жилы кальцита и анкерита с положительными аномалиями Eu сформировались в условиях высокотемпературного зеленосланцевого метаморфизма в закрытой рудообразующей системе с низкими содержаниями РЗЭ. По всей вероятности, в процессе эволюции порфировой рудно-магматической системы Кутуевского рудопроявления произошла смена окислительного режима, существовавшего во время образования интрузивных пород, на восстановительные условия на стадии кристаллизации кальцита руд.

Кальцит по сравнению с возможным источником лантаноидов во флюиде — интрузивными породами характеризуется меньшими значениями  $Ce/Ce^*$  (см. табл.). Согласно термодинамическим расчетам М. Бау [Bau, 1991], образование аномалий Ce в водном флюиде в высокотемпературной обстановке  $(>250^\circ C)$  невозможно. Отрицательные аномалии Ce в кальците, по-видимому, обусловлены как наследованием флюидом состава РЗЭ в диоритах, так и отчасти являются результатом взаимодействия флюида с известняками, которые в значительном объеме присутствуют в разрезе Кутуевского рудопроявления (см. рис. 1). Весьма информативным показателем источника компонентов в минералообразующем флюиде является Y/No отношение в минералах руд [Bau, 1996]. Значения этого коэффициента в кальците Кутуевских порфировых руд (46–63) соответствуют величинам Y/No в морских известняках (рис. 3), что позволяет предполагать присутствие во флюиде компонентов, извлеченных из известняков. В диоритах значения Y/No составляют 24.1–31.9, в околорудном метасоматите — 30.4. Следует отметить, что для морских известняков характерны отрицательные аномалии Ce, которые в процессе взаимодействия флюид/известняк сохраняются [Castorina, Masi, 2008]. На участие в образовании Au-Cu-порфировой минерализации метаморфогенных флюидов указывают также данные по стабильным изотопам кислорода и углерода в кальците [Знаменский и др., 2019a].

Таким образом, результаты выполненных исследований подтверждают ранее полученные данные по стабильным изотопам углерода, кислорода и серы, которые указывают на полигенную природу флюидов, участвовавших в формировании Au-Cu-порфировой минерализации Кутуевского рудопроявления. Рудные компоненты, в том числе РЗЭ и Y, поступали в гидротермальную систему рудопроявления из магматических источников и извлекались из вмещающих пород. Образование кальцита руд

**Рис. 3. Величина отношений Y/No в кальците, интрузивных породах и карбонат-хлорит-серицит-кварцевом метасоматите**

Примечание: Значения Y/No в хондрите, магматическом кальците и карбонатах морских осадков по [Bau, 1996].

**Fig. 3. Y/No ratio in calcite, intrusive rocks, and carbonate-chlorite-sericite-quartz metasomatite**

Note: The Y/No values in chondrite, igneous calcite, and marine sedimentary carbonates according to [Bau, 1996].



происходило в закрытой системе в высокотемпературной обстановке (>250°C) из восстановленного флюида.

Исследования выполнены по программе государственного заказа ИГ УФИЦ РАН № 0246-2019-0078.

#### Список литературы:

Знаменский С.Е., Анкушева Н.Н., Знаменская Н.М. Условия образования Au-Cu-порфировой минерализации Кутуевского рудопроявления (Южный Урал) // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ. 2019а. № 26. С. 8–13.

Знаменский С.Е., Косарев А.М., Шафигуллина Г.Т. Фациальный состав, геохимические особенности и геодинамические обстановки образования позднеэмских островодужных комплексов зоны Главного Уральского разлома на Южном Урале // Вестник Пермского университета. Геология. 2019б. Т. 18, № 1. С. 1–16.

Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and significance of oxidation state of europium // *Chemical Geology*. 1991. Vol. 93. P. 219–230. DOI: 10.1016/0009-2541(91)90115-8.

Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/No, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1996. Vol. 123. P. 323–333. DOI: 10.1007/S004100050159.

Bau M., Möller P. Rare Earth Element Fractionation in Metamorphogenic Hydrothermal Calcite, Magnesite and Siderite // *Mineralogy and Petrology*. 1992. Vol. 45. P. 231–246.

Castorina F., Masi U. REE and Nd-isotope evidence for the origin siderite from the Jebel Awam deposit (Central Morocco) // *Ore Geology Reviews*. 2008. Vol. 34. P. 337–342. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2008.03.001.

Debruyne D., Hulsbosch N., Muechez P. Unraveling rare earth element signatures in hydrothermal carbonate minerals

using a source-sink system // *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 72. P. 232–252. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.07.022.

McDonough W. F., Sun S. The composition of the Earth // *Chemical Geology*. 1995. Vol. 120. P. 223–253. DOI: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.

Muechez P., Corbella M. Factors controlling the precipitation of copper and cobalt minerals in sediment-hosted ore deposits: Advances and restrictions // *Journal of Geochemical Exploration*. 2012. Vol. 118. P. 38–46. DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.04.006.

Richards J.P., Spell T., Rameh E., Raziq A., Fletcher T. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu±Mo±Au potential: examples from the Tethyan arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan // *Economic Geology*. 2012. Vol. 107. P. 295–332. DOI: 10.2113/econgeo.107.2.295.

Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // *Acta Crystallographica Section A*. 1976. Vol. 32. P. 751–767. DOI: 10.1107/S0567739476001551.

Sverjensky D.A. Europium redox equilibria in aqueous solution // *Earth Planet Science Letters*. 1984. Vol. 67. P. 70–78. DOI: 10.1016/0012-821X(84)90039-6.

Znamensky S.E., Ankusheva N.N., Velivetskaya T.A., Shanina S.N. Composition and sources of mineral-forming fluids of the Orlovka orogenic gold deposit (Southern Urals) // *Russian Geology and Geophysics*. 2017. Vol. 58. P. 1070–1080. DOI: 10.1016/j.rgg.2017.08.003.

#### References:

Bau M. (1991) Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and significance of oxidation state of europium. *Chemical Geology*, **93**, 219–230. DOI: 10.1016/0009-2541(91)90115-8.

Bau M. (1996) Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/No, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **123**, 323–333. DOI: 10.1007/S004100050159.

Bau M., Möller P. (1992) Rare Earth Element Fractionation in Metamorphogenic Hydrothermal Calcite, Magnesite and Siderite. *Mineralogy and Petrology*, **45**, 231-246.

Castorina F., Masi U. (2008) REE and Nd-isotope evidence for the origin siderite from the Jebel Awam deposit (Central Morocco). *Ore Geology Reviews*, **34**, 337-342. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2008.03.001.

Debruyne D., Hulsbosch N., Muchez P. (2016) Unraveling rare earth element signatures in hydrothermal carbonate minerals using a source-sink system. *Ore Geology Reviews*, **72**, 232-252. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.07.022.

McDonough W. F., Sun S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, **120**, 223-253. DOI: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.

Muchez P., Corbella M. (2012) Factors controlling the precipitation of copper and cobalt minerals in sediment-hosted ore deposits: Advances and restrictions. *Journal of Geochemical Exploration*, **118**, 38-46. DOI: 10.1016/j.jgexplo.2012.04.006.

Richards J.P., Spell T., Rameh E., Raziq A., Fletcher T. (2012) High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu±Mo±Au potential: examples from the Tethyan arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan. *Economic Geology*, **107**, 295-332. DOI: 10.2113/econgeo.107.2.295.

Shannon R.D. (1976) Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A*, **32**, 751-767. DOI: 10.1107/S0567739476001551.

Sverjensky D.A. (1984) Europium redox equilibria in aqueous solution. *Earth Planet Science Letters*, **67**, 70-78. DOI: 10.1016/0012-821X(84)90039-6.

Znamensky S.E., Ankusheva N.N., Velivetskaya T.A., Shanina S.N. (2017) Composition and sources of mineral-forming fluids of the Orlovka orogenic gold deposit (Southern Urals). *Russian Geology and Geophysics*, **58**, 1070-1080. DOI: 10.1016/j.rgg.2017.08.003.

Znamensky S.E., Ankusheva N.N., Znamenskaya N.M. (2019a) Conditions of formation of Au-Cu-porphyry mineralization of Kutuevka ore occurrence (Southern Urals). *Geologiya. Izvestiya Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnih resursov AN RB – Geology. Bulletin of the Department of Earth Sciences and Natural Resources of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, (26), 8-13 (in Russian).

Znamensky S.E., Kosarev A.M., Shafigullina G.T. (2019b) Facies composition, geochemical features and geodynamic settings of the formation of the Late Emsian island-arc complexes of the Main Ural fault zone in the Southern Ural. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya – Perm University Bulletin. Geology*, **18**(1), 1-16 (In Russian).

#### *Сведения об авторах:*

**Знаменский Сергей Евгеньевич**, доктор геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: Znamensky\_Sergey@mail.ru

**Знаменская Нина Михайловна**, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа, e-mail: ninaznam@mail.ru

#### *About the authors:*

**Znamensky Sergei Evgenievich**, doctor of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. Znamensky\_Sergey@mail.ru

**Znamenskaya Nina Michailovna**, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. ninaznam@mail.ru