

УДК 552.11:553.3/4:550.4:551.2

МАГМАТИЗМ И ЭПИТЕРМАЛЬНОЕ Ag-Au ОРУДЕНЕНИЕ КРАСНОЯРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев Анатолий Иванович¹,

anzerg@mail.ru

Табакаева Евгения Михайловна¹,

tabakaeva16@mail.ru

¹ Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет имени В.М. Шукшина, Россия, 659333, г. Бийск, ул. Владимира Короленко, 53.

Актуальность исследования определяется необходимостью освещения новых данных по петрологии, геохимии субвулканических пород и эпитеpmальному Ag-Au оруденению Красноярского рудного поля Горного Алтая. С субвулканическими штоками гранитоидов пространственно и парагенетически связаны различные типы оруденения: меди, кобальта, мышьяка, вольфрама и золота. Впервые для Горного Алтая исследован высоко-серный тип Ag-Au оруденения.

Цель исследования: изучить петрологические, геохимические особенности пород и оруденения Красноярского месторождения с использованием экспериментальных диаграмм, позволяющих выявлять генетические проблемы и физико-химические особенности петро-рудогенезиса.

Методы исследования включали изучение состава горных пород с применением лазерно-абляционного анализа методом индуктивно-связанной плазмы на спектрометре «ОПТИМА&4300» с высокой чувствительностью определения элементов в Лаборатории Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (г. Москва). Изотопный состав серы и кислорода определен на масс-спектрометре МИ 1201В в той же лаборатории.

Результаты. Главными рудогенерирующими объектами в Красноярском рудном поле являются субвулканические штоки гранитоидов среднего девона коргонского комплекса, которые относятся к пералюминиевому типу с варьирующими характеристиками по магнито и железу. В породах проявлен тетрадный эффект фракционирования P3Э W-типа. Концентрации Au и Ag в породах увеличиваются с уменьшением величины тетрадного эффекта фракционирования P3Э W-типа. Глубинный магматический очаг эволюционировал в сторону повышения его уровня с формированием резко кислотно-серных характеристик и формированием околорудных аргиллизитов. Оруденение Красноярского месторождения представлено серией сближенных кварцевых жил, с образованием своеобразного линейного штокверка. Руды сформированы в три стадии: существенно сульфидную, теллуридную и пострудную. Основные рудные минералы: пирит, галенит, сфалерит, тетраэдрит, теннантит, электрум, тетрадимит, редко – алтаит, гессит, энаргит, люцит. Основные жильные минералы: кварц, кальцит, хлорит, сидерит, каолинит, монтмориллонит, иллит. Концентрации золота в рудах варьируют от 0,5 до 29,6 г/т, серебра – от 15 до 5000 г/т. Соотношение Ag/Au в рудах варьирует от 135 до 150 и позволяет относить Красноярское месторождение к Ag-Au типу. Температуры гомогенизации газозо-жидких включений в кварце разных генераций от стадии к стадии снижались от 265 до 175 °С. Фугитивность серы снижалась от первой стадии (–10–11) ко второй (–15–16), f_{Te_2} повышалась от (–15) до (–10) и f_{O_2} от (–39,5) до (–37). Изотопы серы и кислорода свидетельствуют о магматогенном источнике серы и метеорном – кислорода.

Ключевые слова:

Геохимия, петрология, гранитоиды, штоки, тетрадный эффект фракционирования P3Э, жилы, свинец, медь, золото, серебро, фугитивность S_2 , O_2 , Te_2 .

Введение

Эпитеpmальное Ag-Au оруденение занимает значительной объём в добыче серебра и золота, составляя для золота более 17 %, для серебра более 6 % мировой добычи [1]. На Алтае такой тип оруденения также получил распространение. Одним из интереснейших объектов, который обрабатывается в настоящее время, является Суричское месторождение, расположенное на западе Алтайского края. Оно относится к низко-серному (low sulfidation) типу [2]. Красноярское месторождение относится к другому типу эпитеpmальных систем – высоко-серному (high-sulfidation). К этому типу относятся такие известные гигантские Ag-Au месторождения, как Голдфилд (Невада, США), Лепанто (Филиппины), Ивато (Япония). Развитие сырьевой базы золота и серебра на Алтае весьма актуально, и изучение Красноярского месторождения обеспечит новый тип эпитеpmальных Ag-Au и порфириновых Cu-Au систем региона.

Субвулканические породы

Красноярского рудного поля

В пределах Красноярского рудного поля среди вулканитов коргонской свиты ($\lambda D_2 krg_2$) выявлены два небольших субвулканических штока, сложенных преимущественно плагиогранит-порфирами и плагиолейкогранит-порфирами (рис. 1). Западное субвулканическое тело имеет размеры 500×200 м, восточное – 450×100 м. Они имеют субсогласное залегание, и в их экзоконтактовых частях локализуются проявления меди, свинца и Красноярское месторождение золота. Штоки и проявления меди, свинца, цинка, урана, мышьяка, вольфрама контролируются зонами субширотных разломов сбросо-сдвиговой кинематики. Породы указанных штокообразных тел характеризуются плохой гомогенизацией и неравномерной раскристаллизацией слагающих их минералов. Нередки шпильки темноцветных минералов удлиненной овальной формы размерами от 1,5 до 2,5 см. Как

правило, породы имеют порфировую структуру с размерами вкрапленников кварца и полевого шпата от 1,5 до 2,5 мм, а также микрографическую структуру основной ткани породы. В краевой фации нередки переходы в фельзиты и фельзит-порфиры. В краевой части более крупного западного штока отмечены также фрагменты гранодиорит-порфиров размерами от 1,5 до 3,2 м в поперечнике.

Преобладающие плагиогранит-порфиры и плагиолейкогранит-порфиры сложены альбитом, олигоклазом (55–65 %), кварцем (30–44 %), иногда присутствует биотит, мусковит и наложенный слабо-решетчатый микроклин (до 6 %). Во вкрапленниках плагиоклаз преобладает над кварцем. Акцессорные минералы представлены сфеном, апатитом, магнетитом, цирконом, редко – монацитом, ильменитом, турмалином. Химический состав субвулканических пород характеризуется высокой натриевостью ($\text{Na}_2\text{O}=4,2\text{--}6,55\%$), глиноземистостью (индекс Шенда=1,06–1,08) и низкой калиевостью ($\text{K}_2\text{O}=0,3\text{--}1,17\%$). Низкое уран-ториевое отношение (менее 1) в породах указывает на сравнительно неизменённый состав пород с отсутствием наложенных вторичных процессов. Из микро-

элементов повышенными концентрациями отличаются Sc, Zr, Au, Ag, сумма РЗЭ, а в некоторых породах – Pd и Pt (табл. 1). Наблюдается некоторая деплегированность пород высоко-зарядными элементами Nb, Ti, Ta, а также элементами с большим ионным радиусом (K, Rb, Cs, Pb). По нормированным отношениям к хондриту (La/Yb_N и La/Sm_N) можно заключить о значительном дифференцированном типе распределения РЗЭ в породах. В целом субвулканические образования характеризуются повышенными концентрациями и мантийных, и коровых элементов, указывая на мантийно-коровое взаимодействие при их генерации. Отношение Eu/Eu^* в породных типах менее 1, что ниже хондритовых значений. Сумма РЗЭ в них варьирует в значительных пределах от 144,1 до 349,2 и в целом указывает на обогащённость лантаноидами.

На канонических диаграммах фигуративные точки составов пород локализуются в поле пералюминиевых разностей, а также магнезиальных и железистых разновидностей со значительными вариациями соотношений железа и магния в породах (рис. 2).

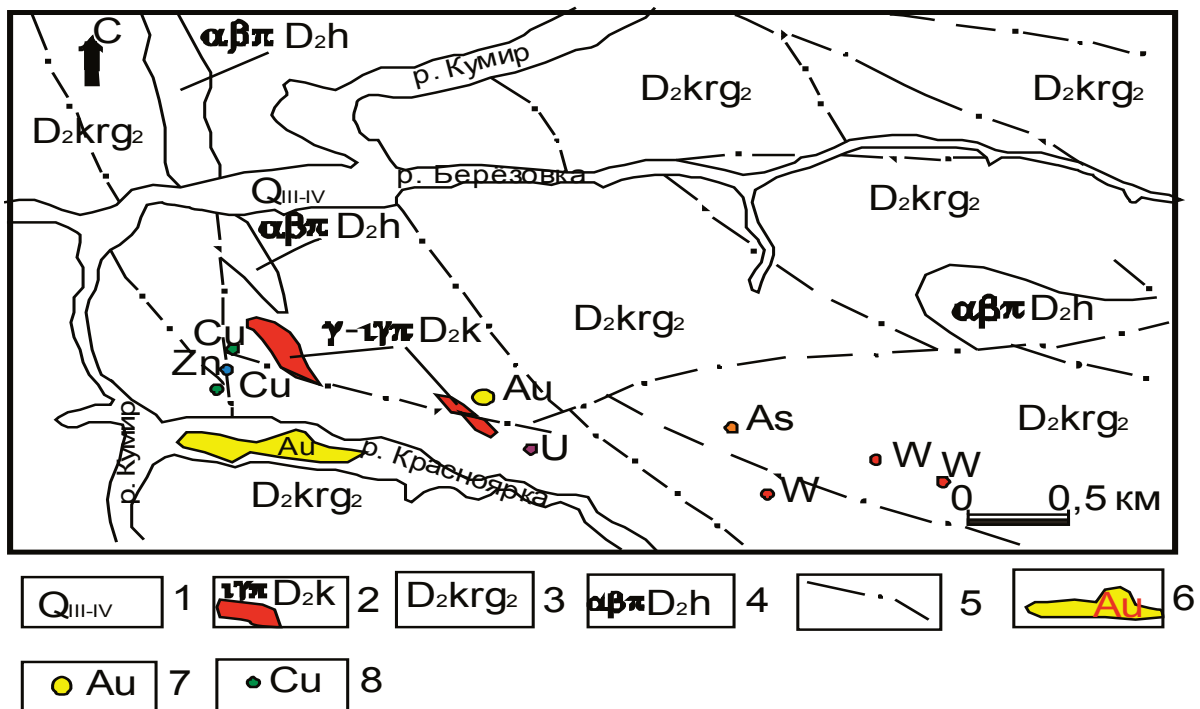


Рис. 1. Схематическая карта полезных ископаемых Красноярского рудного поля (составлена авторами с учётом данных В.В. Миронова): 1 – современные аллювиальные образования; 2 – субвулканические плагиогранит-порфиры и плагиолейкогранит-порфиры коргонского комплекса; 3 – туфы, лавы, игнимбриты риолитов коргонской свиты; 4 – андезибазальтовые порфиры холзунской свиты; 5 – разломы; 6 – Красноярская россыпь золота; 7 – Красноярское месторождение золота; 8 – проявления (меди, свинца, цинка, мышьяка, урана, вольфрама)

Fig. 1. Schematic map of mineral resources of Krasnoyarsk ore field (composed by the authors considering the data of V.V. Mironov): 1 are the modern alluvial deposits; 2 are the subvolcanic plagiograniteporphyres and plagiocogranite-porphyres of Korgon complex; 3 are the tuffs, lava, ignimbrites of rhyolites of Korgonsk suite; 4 are the basaltic andesite porphyrites of Kholzunskaia suite; 5 are the faults; 6 is the Krasnoyarsk placer of gold; 7 is the Krasnoyarsk deposit of gold; 8 are the manifestations (copper, lead, zinc, arsenic, uranium, tungsten)

Таблица 1. Содержания оксидов (масс. %) и микроэлементов (г/т) в субвулканических породах коргонского комплекса Красноярского рудного поля

Table 1. Contents of oxides (wt. %) and microelements (ppm) in subvolcanic rocks of Korgonsk complex of Krasnoyarsk ore field

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	65,6	70,2	72,2	73,11	73,71	73,82	74,08	74,23	75,9
TiO ₂	0,77	0,69	0,43	0,42	0,51	0,49	0,44	0,38	0,23
Al ₂ O ₃	13,6	13,8	14,7	13,74	12,9	13,75	14,3	14,2	13,5
Fe ₂ O ₃	4,6	2,9	1,45	1,1	1,06	0,85	1,56	1,4	1,59
FeO	2,9	1,9	1,03	0,94	0,99	0,5	0,9	0,8	1,1
MnO	0,16	0,13	0,14	0,14	0,15	0,14	0,13	0,13	0,13
MgO	0,9	1,55	0,97	0,67	1,23	0,63	1,24	0,97	0,63
CaO	1,2	0,47	1,6	2,6	1,03	1,95	0,34	0,6	0,12
Na ₂ O	5,95	4,2	5,65	5,15	5,04	6,55	5,5	5,6	6,25
K ₂ O	0,7	2,4	0,73	1,17	0,74	0,43	0,7	0,75	0,3
P ₂ O ₅	0,15	0,12	0,1	0,09	0,1	0,08	0,06	0,06	0,03
П.П.П. LOI	0,9	1,2	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3
Сумма Sum	99,8	99,8	99,4	100,1	100,1	100,3	99,9	100,2	100,4
V	9,0	8,5	1,5	2,0	1,6	1,8	1,7	0,2	8,0
Cr	4,1	2,6	1,5	1,0	1,4	1,6	2,0	2,5	2,2
Ba	424	256	185	400	120	118	70	19	170
Ni	5,8	2,6	1,9	1,7	1,5	1,6	1,3	1,4	2,0
Co	4,8	1,9	1,8	1,6	1,4	1,7	1,1	1,0	3,0
Cu	10,8	2,6	2,5	2,2	2,1	1,9	0,9	0,4	9,0
Zn	18,3	9,2	3,6	3,2	3,0	2,6	0,9	0,3	9,1
Pb	8,9	7,9	7,1	7,0	6,3	5,5	4,4	3,4	3,5
Sn	2,1	2,8	1,2	1,3	1,1	1,0	0,9	1,1	2,0
Sc	76	53	55	58	72	70	76	75	9,9
Sr	245	256	260	270	210	220	115	97	12,5
Zr	163	176	180	200	198	165	180	156	181
Nb	13,8	12,9	10	10,1	10,3	9,5	9,8	9,7	9,2
Y	30,4	30,6	29,2	35,8	35,3	33,1	31,9	28,8	35,5
Yb	3,7	2,3	5,2	5,0	5,1	4,9	4,9	4,9	5,2
U	2,2	1,8	1,1	1,0	0,9	1,2	1,3	1,2	2
Th	7,9	9,5	10,1	11,2	9,7	12,1	13,2	13,1	8,5
Li	0,9	2,9	2,5	2,61	2,58	2,14	1,95	0,77	3,2
Be	6,5	5,7	5,5	1,7	0,6	11,1	15,5	11,4	10,8
W	1,8	2,6	1,0	1,2	1,3	1,2	1,3	0,8	1,6
Mo	1,6	1,8	0,9	1,1	1,3	0,8	0,7	1,0	2,1
Rb	34	46	24	45	30	15	21	19	11,0
Cs	4,1	2,3	3,5	3,5	4,1	4,2	4,8	4,2	8,4
Ga	15,9	14,8	15,1	14,2	19,3	17	16,3	17,2	16,3
La	22,4	23,5	95	97,2	99	98	94	100,6	101,3
Ce	45,5	43,7	115	118	114,2	116	113	117	118
Pr	4,1	4,8	5,5	5,6	5,7	6,0	4,9	5,8	6,1
Nd	17,8	18,3	49,7	50,0	50,6	50,9	49,8	51,8	52,1
Sm	3,9	5,4	9,9	10,1	10,3	10,2	9,7	10,1	11,9
Eu	1,45	0,96	1,3	1,5	1,4	1,6	1,62	1,55	1,5
Gd	6,2	5,9	7,3	7,2	7,5	7,4	7,3	7,56	7,6
Tb	0,9	0,74	1,1	1,2	1,25	1,32	1,18	1,32	1,4
Dy	1,1	0,9	0,8	0,9	0,85	0,91	0,64	0,6	0,7
Ho	3,5	3,4	3,5	3,6	3,4	3,7	3,6	3,8	4,0
Er	0,8	0,73	0,7	0,66	0,7	0,8	0,83	0,8	0,9
Tm	2,1	2,0	2,1	2,2	2,3	2,2	2,0	2,3	2,5
Lu	0,29	0,35	0,3	0,33	0,4	0,41	0,37	0,4	0,45
Hf	4,97	3,9	6,2	6,1	6,3	6,8	6,5	5,8	6,0
Ta	0,55	0,65	0,5	0,52	0,54	0,6	0,63	0,62	0,7
Au	0,01	0,01	0,04	0,05	0,05	0,07	0,1	0,09	0,08
Ag	3,1	3,5	6,8	8,1	8,2	10,3	11,6	11,1	10,3
Sb	0,15	0,11	0,1	0,1	0,1	0,18	0,2	0,25	0,19
Ge	1,6	1,1	1,2	1	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6

Окончание табл. 1

Table 1

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ru	–	<0,002	–	<0,002	<0,002	<0,002	–	<0,002	<0,002
Rh	–	<0,002	–	<0,002	<0,002	<0,002	–	<0,002	<0,002
Pd	0,006	0,0067	–	0,0059	0,0034	0,0056	0,007	<0,002	<0,002
Ir	–	<0,002	–	<0,002	<0,002	<0,002	–	<0,002	<0,002
Pt	0,007	<0,002	–	0,0051	<0,002	<0,002	0,007	<0,002	<0,002
ΣREE	144,1	144,6	326,6	339,3	330,9	337,4	325,7	337,3	349,2
La/YbN	3,99	6,72	12,1	12,75	12,76	13,18	12,5	13,68	12,78
La/SmN	3,52	2,7	5,9	5,9	5,8	5,9	5,9	6,1	5,2
Eu/Eu*	0,91	0,52	0,45	0,52	0,47	0,54	0,57	0,53	0,46
U/Th	0,28	0,19	0,10	0,089	0,093	0,099	0,09	0,092	0,23

Примечание. П.П.П. – потери при прокаливании; N – элементы нормированы по [3]. Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. Субвулканические породы Красноярского рудного поля: 1 – гранодиорит-порфир; 2, 3 – плагиогранит-порфиры, 4–9 – плагиолейкогранит-порфиры.

Note. LOI – loss on ignition. N – elements normalized after [3]. Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. Subvolcanic rocks of Krasnoyarsk ore field: 1 – granodiorite-porphyre; 2, 3 – plagiogranite-porphyre; 4–9 – plagiogranite-porphyres.

Таблица 2. Отношения элементов и ТЭФ РЗЭ в породах Красноярских штоков

Table 2. Ratio of elements and tetrad effect of REE fractionation (TEF REE) in rocks of Krasnoyarskii stocks

Отношения элементов и значения ТЭФ Ratios of elements and meanings of TEF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Отношения в хондритах Ratios in chondrites
Y/Ho	8,7	9,0	8,3	10,0	10,3	8,9	8,6	7,4	8,7	29,0
Zr/Hf	32,8	45,1	29,0	32,8	31,4	24,3	27,7	26,9	30,2	36,0
La/Nb	1,6	1,8	9,5	9,6	9,6	10,3	9,6	10,3	10,9	30,75
La/Ta	40,7	36,2	190	186	183	163	149	161	144	17,57
Sr/Eu	170	267	200	180	150	137	71	62	8,3	100,5
Eu/Eu*	0,91	0,52	0,45	0,52	0,47	0,54	0,57	0,53	0,46	1,0
Sr/Y	8,1	8,4	8,9	7,5	6,0	6,7	3,7	3,5	0,4	4,62
TE _{1,3}	0,6	0,59	0,36	0,37	0,365	0,38	0,33	0,34	0,36	–

Примечание. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по В. Ирбер [6]; Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. Значения в хондритах приняты по [3]. Субвулканические породы Красноярского рудного поля: 1 – гранодиорит-порфир; 2, 3 – плагиогранит-порфиры, 4–9 – плагиолейкогранит-порфиры.

Note. TE_{1,3} – tetrad effect of REE fractionation (average between the first and the third tetrads) after V. Irber [6]; Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. Values in chondrites are taken after [3]. Subvolcanic rocks of Krasnoyarsk ore field: 1 – granodiorite-porphyre; 2, 3 – plagiogranite-porphyre; 4–9 – plagiogranite-porphyres.

В субвулканических породах штоков проявлен тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов W-типа, варьирующий от 0,33 до 0,6 (граничное значение менее 0,9) (табл. 2). В табл. 2 приведены также характерные

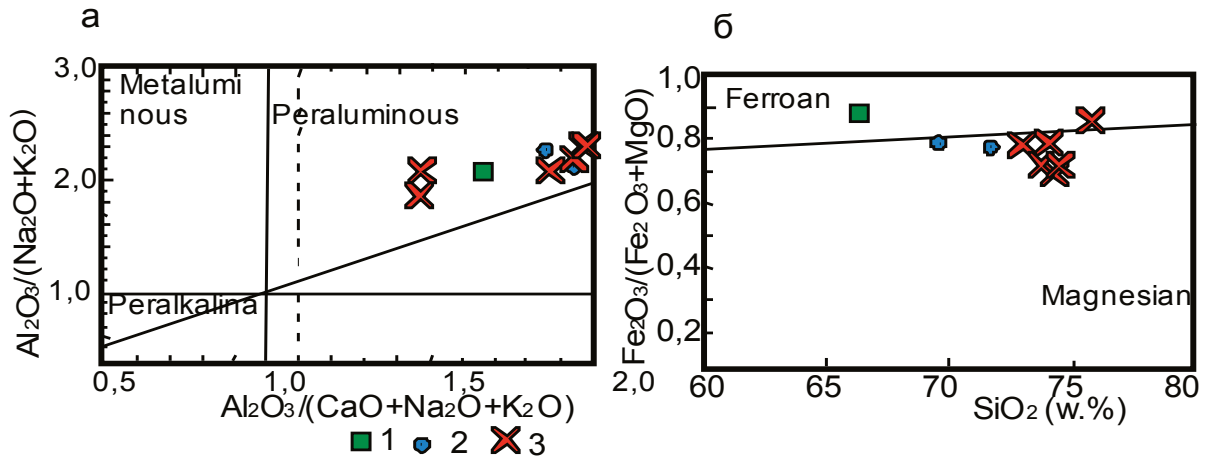


Рис. 2. Классификационные диаграммы: а) диаграмма $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) - Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ по [4]; б) диаграмма $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO) - SiO_2$ по [5] для субвулканических пород коргонского комплекса Красноярского рудного поля: 1 – гранодиорит-порфиры, 2 – плагиогранит-порфиры, 3 – плагиолейкогранит-порфиры

Fig. 2. Classification plots: а) plot $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ vs. $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ after [4]; б) plot $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO)$ vs. SiO_2 after [5] for subvolcanic rocks of Korgon complex of Krasnoyarsk ore field: 1 – granodiorite-porphyre; 2 – plagiogranite-porphyre; 3 – plagioclearite-porphyres

отношения элементов и сравнение с таковыми в хондритах. Следует отметить, что некоторые отношения элементов в породах устойчиво ниже хондритовых (Y/No , La/Nb , Eu/Eu^*), а другие дают разброс значений и выше, и ниже хондритовых (La/Ta , Zr/Hf , Sr/Eu , Sr/Y). Это свидетельствует о резком изменении содержания элементов в породах, вызванных различными причинами (мантийными и коровыми процессами, мантийно-коровым взаимодействием).

На диаграмме соотношений $Au-TE_{1,3}$ в породах субвулканического комплекса наблюдается увеличение ТЭФ РЗЭ W-типа с уменьшением концентраций золота (рис. 3). Содержания золота повсеместно ниже хондритовых значений. Следовательно, золото как мантийный элемент в процессе генерации риолитов и субвулканических образований претерпело значительные трансформации в сторону значительных снижений концентраций металлов в породах.

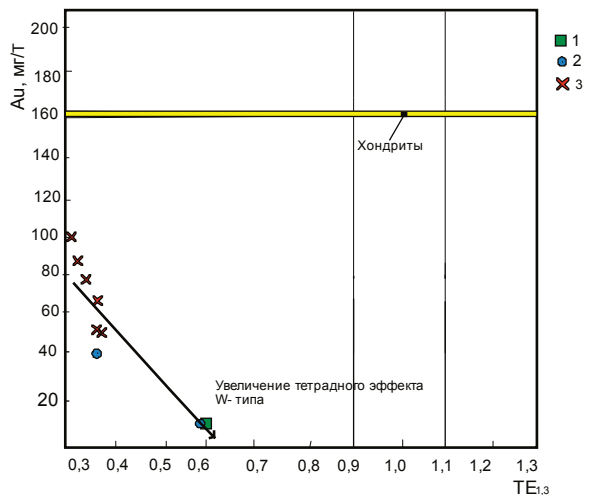


Рис. 3. Диаграмма $Au-TE_{1,3}$ по [7] для пород субвулканического комплекса Красноярского рудного поля. Желтое поле показывает концентрации золота в магматических породах по [8]; содержания золота в хондритах по [9]. Условные обозначения – на рис. 2

Fig. 3. Plot Au vs. $TE_{1,3}$ after [7] for rocks of subvolcanic complex of Krasnoyarsk ore field. Yellow field shows gold concentration in magmatic rocks after [8]; gold content in chondrites is after [9]. Legend is in the Fig. 2

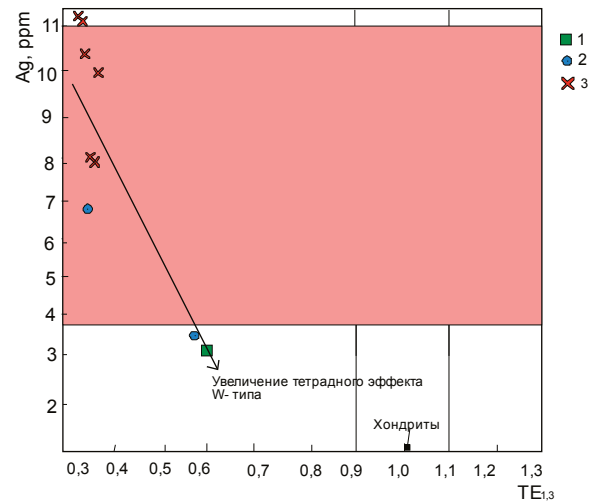


Рис. 4. Диаграмма $Ag-TE_{1,3}$ для пород субвулканического комплекса Красноярского рудного поля. Розовое поле показывает вариации концентраций серебра в магматических породах по [8]; содержания серебра в хондритах по [9]. Условные обозначения – на рис. 2

Fig. 4. Plot Ag vs. $TE_{1,3}$ for rocks of subvolcanic complex of Krasnoyarsk ore field. The pink field shows silver concentration in magmatic rocks after [8]; silver content in chondrites is after [9]. Legend is in the Fig. 2

Совершенно иная картина на такой же диаграмме наблюдается для серебра. Концентрации его в субвулканических породах выше, чем в хондритах, и тренд увеличения величин ТЭФ РЗЭ значительно круче, чем для золота, хотя тенденция снижения концентраций серебра с увеличением значений ТЭФ РЗЭ сохраняется (рис. 4).

Оруденение Красноярского рудного поля

Оруденение контролируется зоной смятия и дробления риолитовых порфиров коргонской свиты широтной и субширотной ориентировок. В отдельных тектонических швах зоны смятия выявляется сбросо-сдвиговая кинематика. Она контролирует размещение субвулканических тел, кварцевых жил и метасоматитов Красноярского месторождения и ряда проявлений Cu, Zn, Co, As, W. Простираение жил СЗЗ (азимуты 280–290°), падение на ЮЮЗ под углами 55–70°. Красноярское месторождение представляет собой своеобразный линейный штокверк из сближенных кварцевых жил и мелких прожилков между ними. Известно семь наиболее крупных жил, из которых наибольший интерес представляет жила № 1 (главная).

Жила № 1 имеет азимут падения 200° под углом 60°; прослежена по простираению канавами с поверхности на 1000 м и разведана на глубину до 100 м двумя штольнями длиной 75 и 200 м. Мощность жилы меняется от первых сантиметров до 3,6 м. Сопровождается аргиллизитами в виде окремнения с иллитом, монтмориллонитом и каолинитом в виде гнезд. Местами кварц ноздреватый. Главные гипогенные минералы (галенит, халькопирит, блёклые руды, энаргит, сфалерит) и гипергенные (церуссит, малахит, азурит, редко ковеллин) развиты как в кварце жил, так и в их зальбандах. Их количество и соотношение меняется в широких пределах – от редкой рассеянной вкрапленности до массивных руд. Выделяются восточная (богатая) и западная (бедная) части жилы № 1. В восточной части наблюдаются наиболее богатые сливные руды, где помимо преобладающего галенита присутствуют теннантит, тетраэдрит, энаргит. В рудах установлены содержания (%): Pb – от 0,5 до 60,2; Sb – от 1,5 до 10; Cu – от 0,8 до 8,8; Zn – от 0,04 до 0,17; Ag и Au (по штольне № 1) – до 5000 и 29,6 г/т, соответственно (по канавам до 3497 и 27,2 г/т, соответственно). Кроме этого, в повышенных содержаниях в рудах присутствуют Mo, Cd и As. Редко отмечаются повышенные концентрации ртути и висмута. В западном направлении жила выклинивается, в восточном направлении её следует прослеживать. Подсчёт запасов свинца категорий В+С₁ до глубины 130 м даёт цифру 1725 т. Средняя мощность рудного тела по месторождению составляет около 1 м (99 см), среднее содержание свинца – 3,4 %. Баранчинским рудоуправлением запасы Au категорий В+С₁+С₂ оценены в 63,2 кг (по категории С₁ они составляли 140,2 кг) при среднем содержании 2,72 г/т и средней мощности тела 87 см. По состоянию на

01.01.1956 г. запасы отнесены к забалансовым в количестве 280,4 кг (С₁=140,2 кг+С₂=140,2 кг). На остальные металлы подсчёт запасов не проводился.

Жила № 2 расположена в 4 м к северу от жилы № 1. Она представлена серией прожилков мощностью 2–3 см из кварца, хлорита, иллита, монтмориллонита и кальцита с примазками малахита, и азурита с азимутом падения 180–200°, углами падения 70–80°. Общая мощность жильной зоны варьирует от 1 до 3 м. Содержания Au – 0,2–0,4 г/т, Ag – 8,9–20,8 г/т, Pb – 0,2–0,45 %, Sb – 0,03–0,07 %. Жильная зона сопровождается аргиллизитами.

Жила № 3 расположена в 3 м севернее жилы № 2. Она преимущественно кварцевая с примесью кальцита, хлорита, сидерита мощностью 1–4 м с азимутом падения 205°, углом падения 80°. Содержания Au от 0,5 до 11,6 г/т, Ag – от 12 до 491,8 г/т, Pb – от 1,6 до 9,54 %, Sb – от 0,3 до 1,17 %. Кедровской партией вскрыта в 10 м восточнее при мощности 15 см с незначительным содержанием сульфидов Pb, Cu.

Жилы № 4, 5 расположены соответственно в 30 м севернее и в 65 м южнее жилы № 1 (р-н канавы № 1) в коренном залегании в обнажениях. Канавами не вскрывались, не прослеживались и не опробовались как безрудные (Котларов). Жилой № 5 могут являться прожилки безрудного кварца мощностью до 10–15 см, пересечённые К-1000 в её начале в 45 м южнее жилы № 1.

Жила № 6 кварц-сидеритового состава с хлоритом, иллитом, монтмориллонитом и вкрапленностью пирита расположена в 220 м южнее жилы № 1 по левому борту ключа Аммональный. Мощность её 40 см, азимут падения 160°, углы падения 65–70°. Прослежена в ЮЗ направлении на 90 м. По химическим анализам значимые содержания Pb, Cu, Au и Ag отсутствуют (в лучшем случае «следы»).

Жила № 7 расположена в 190 м ниже (южнее) по склону от жилы № 1 на водоразделе ручьёв Аммональный и Зайков. Залегание её субгоризонтальное (падение под углами 5–10° на ЮЮЗ). Мощность 10–20 см, прослежена по простираению на 11,2 м, на всём протяжении содержит крупнокристаллический галенит, теннантит, тетраэдрит, редко энаргит, а также халькопирит, пирит, малахит и азурит, образующие гнезда размером до 10–20 см и более, вплоть до сливных массивных руд, аналогичных наблюдаемым в восточной части жилы № 1. Мощные аргиллизиты развиты в висячем боку жилы. Содержания золота составляют от 0,5 до 8,9 г/т, серебра – от 15 до 127 г/т. В канавах установлено, что жила взброшена (северный край опущен по отношению к южному примерно на 1 м) разломом субширотного простираения крутого южного падения. В 15 м северо-западнее канавой вскрыта также субгоризонтальная жила мощностью 10 см с гнездами галенита. Задириковая проба показала содержания Pb – 15,1 %, Cu –

2,35 %, Zn – 0,1 %. Жила подсечена двумя канавами и прослежена по простираению в свалах от правого борта ручья Аммональный до русла ручья Зайков. Магистральной канавой К-1000 длиной 141 м на водоразделе ручьёв Аммональный–Зайков жила № 1 пересечена под острым углом в интервале ПК56–59 при истинной мощности около 1 м, где она представлена зоной 0,6–0,7 м сливных полиметаллических руд, в лежачем боку зона ожелезнённой кварцевой сыпучки сильно ноздреватого кварца, глинистых минералов иллит-монтмориллонитового ряда также отвечает околорудным аргиллизитам. По жиле отобрано три бороздовые пробы, показавшие содержания: Ag – 2268–6673 г/т, Au – 26–43,8 г/т, Pb – до 15,9 %, Cu – до 7,25 %, Zn – 0,2 %, As, Sb – >1 %, Bi – 0,06 %, Cd – 0,03.

В 400 м западнее и в 250 м гипсометрически ниже жила № 1 подсечена канавой К-1003 в правом борту ручья Аммональный. Здесь её мощность составляет 3 м. В ноздреватом кварце вкрапленность пирита, галенита и блёклых руд рассеянная не более 1–3 %, максимальные содержания Ag – 123 г/т, Au – 3,04 г/т. Далее в западном направлении жила прослежена в отвалах старых канав и в виде обломков на склоне с содержаниями Au от 0,92 до 6,5 г/т, Ag от 2,5 до 126 г/т. В восточном направ-

лении от канавы К-1000 жила также прослеживается вначале по канавам, затем по обломкам в делювии с убыванием степени минерализации и, соответственно, содержаниями золота от 0,28 до 7,86 г/т, серебра от 25 до 235 г/т, что связано с увеличением уровня эрозионного среза жилы.

На площади рудного поля кроме коренного оруденения известно пять россыпей золота, частично отработанных до 1950 г.: Красноярская, Кумирская, Щербноухинская, Кытминская, Татарская.

Минеральный состав руд Красноярского месторождения

По текстурным взаимоотношениям (пересечениям прожилков и дроблению) в составе эндогенных руд выделяются три стадии минерализации. Первые две стадии можно рассматривать рудными, а третью стадию – пострудной. Типоморфной ассоциацией руд месторождения является теннантит-тетраэдрит-энаргит-люционитовая, указывающая на значительную сернистость сульфидов, что характерно для высокосерных эпitherмальных систем [10, 11]. Минеральный состав и последовательность минералообразования в рудах при визуальном изучении, а также исследованиях в шлифах и аншлифах представлены в табл. 3

Таблица 3. Парагенетическая схема последовательности минералообразования

Table 3. Paragenetic scheme of mineral forming sequence

Минералы/ Minerals	Эндогенные стадии/Endogenetic stages			Гипергенез / Gipergeneses
	1 стадия/ 1 stage	2 стадия/ 2 stage	3 стадия/ 3 stage	
Кварц/Quartz				
Кальцит/Calcite				
Сидерит/Siderite				
Пирит/Pyrrite				
Галенит/Galenite				
Сфалерит/Sphalerite				
Халькопирит/Chalcopyrite				
Теннантит/Tennantite				
Тетраэдрит/Tetrahedrite				
Энаргит/Enargite				
Люционит/Luzonite				
Электрум/Electrum				
Аргентит/Argentite				
Гессит/Hessite				
Тетрадимит/Tetrademite				
Алтаит/Altaite				
Иллит/Illite				
Монтмориллонит/Montmorillonite				
Каолинит/Kaolinite				
Хлорит/Chlorite				
Церуссит/Cerussite				
Гематит/Hematite				
Малахит/Malachite				
Азурит/Azurite				
Ковеллин/Covellite				
Ярозит/Jarosite				

Электрум тесно ассоциирует с теллуридами и имеет пробность 617–624 ‰. В качестве примесей, кроме серебра, присутствуют медь и мышьяк. Размеры выделений электрума варьируют от 0,005 до 1,6 мм.

По отношениям Ag/Au руды Красноярского месторождения следует относить к Ag-Au объектам [12], так как в них это отношение превышает 10 и достигает 135–150.

Физико-химические особенности рудного процесса

Температуры гомогенизации первичных газожидких включений в кварце 1, 2 и 3 генераций снижались от 255 к 245 °C и 180 °C, соответственно. Солёность растворов также снижалась от 6–7 вес. % NaCl до 0,5–1 вес. % NaCl. Это свидетельствует о процессах смешения ювенильных растворов на поздних этапах становления гидротермальной системы. Некоторые термобарометрические и изотопные данные приведены в табл. 4.

Таблица 4. Термобарогеохимические и изотопные данные исследований минералов Красноярского месторождения

Table 4. Thermobarogeochemical and isotopic data of Krasnoyarsk deposit minerals research

Минерал Mineral	n	$T_{\text{гом}}/T_{\text{ном}}$, °C	Солёность, мас. % экв. NaCl Salinity, eq. wt. % NaCl	$\delta^{34}\text{S}$, ‰	$\delta^{34}\text{S}$, ‰ SMOW
Кварц 1 Quartz 1	2	265–250	6,0–7,0	–	15,8–16,2
Кварц 2 Quartz 2		250–245	2,0–1,8	–	17,0–18,8
Кварц 3 Quartz 3		175–185	0,5–1,0	–	–
Пирит 1 Pyrite 1	2	–	–	(–3,5)–(–1,7)	–
Пирит 2 Pyrite 2		–	–	(–1,5)–(+5,5)	–

Примечание. n – число проб; SMOW – среднее содержание в морской воде.

Note. n is the number of samples; SMOW (Standard Mean Ocean Water) is the average content in sea water.

Существенно сфалерит-теннантит-галенитовые руды с хлоритом восточной части зоны № 1 формировались из хлоридно-натриевых слабо концентрированных (7,0–6,0 мас. % экв. NaCl) растворов при температуре 260–255 °C. Согласно хлоритовому термометру в полиметаллических рудах хлорит формировался при температурах 255–250 °C. Содержания тяжёлого изотопа серы в пирите отвечает магматогенному источнику, а кислорода – метеорным водам.

Для оценки зависимостей температур и фугитивности серы (fS_2) при кристаллизации руд Красноярского месторождения были использованы фазовые взаимоотношения и изменения состава минералов в системе Fe-Zn-S [13]. Предварительно в составе сфалерита 1 генерации содержание FeS определено в количестве 0,5–8,4 мол. %, а в составе сфалерита 2 генерации – 1–5,7 мол. %. На основании этих данных изменение фугитивности серы

можно отразить на диаграмме (рис. 5). С понижением температуры кристаллизации минеральных парагенезисов происходило снижение фугитивности серы. Для первой стадии фугитивность серы составляет (–10–11), а для второй стадии (–15–16).

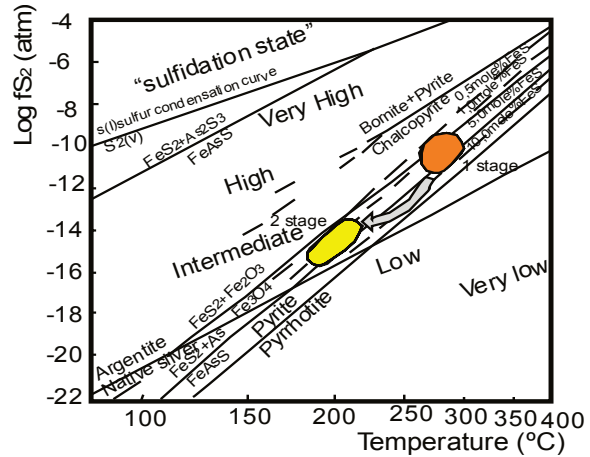


Рис. 5. Диаграмма $\text{Log}fS_2$ – температура для рудной минерализации Красноярского месторождения. Изоплеты FeS содержания для сфалерита рассчитаны с использованием уравнений по [13]. Оранжевое поле – приблизительные оценки фугитивности серы и температурные условия для 1 стадии, жёлтое поле – для 2 стадии

Fig. 5. Plot $\text{Log}fS_2$ vs. temperature for ore mineralization for Krasnoyarsk deposit. Isoleths of FeS content for sphalerite are calculated using the equations after [13]. Orange field is the approximate estimates of sulfur fugacity and temperature for 1st stage, yellow field – for 2nd stage

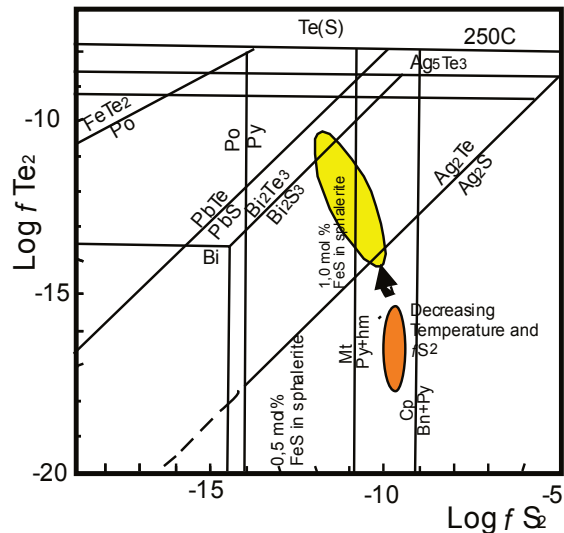


Рис. 6. Диаграмма $\text{Log}fTe_2$ – $\text{Log}fS_2$ для руд Красноярского месторождения. Диаграмма показывает равновесие между теллуридами и сульфидами для руд Красноярского месторождения при 250 °C в условиях газового насыщения по [14]. Оранжевое поле – для сульфидной ассоциации, жёлтое поле – для теллуридной ассоциации руд Красноярского месторождения

Fig. 6. Plot $\text{Log}fTe_2$ vs. $\text{Log}fS_2$ for ores of Krasnoyarsk deposit. The plot shows the equilibria between tellurides and sulfides for ores of Krasnoyarsk deposit at 250 °C in condition of vapor saturation after [14]. Orange field is for sulfide association, yellow – for telluride association of Krasnoyarsk deposit ores

Условия отложения минералов теллуридного парагенезиса могут быть также определены с использованием равновесий между сульфидами и теллуридами. Вариации фугитивностей f_{Te_2} и S_2 в условиях равновесия теллуриды-сульфиды при 250 °C по [14] показаны на рис. 6.

Сульфидная ассоциация минералов была отложена при температуре 250 °C при фугитивности f_{S_2} от -10,5 до -9,5 и фугитивности f_{Te_2} менее -15. Теллуридный парагенезис отлагался при значениях $\log f_{S_2}$ в диапазоне от -12 до -10 и фугитивности f_{Te_2} от -14 до -10.

Оценка фугитивности кислорода и pH среды может быть проведена в комбинации с фазовыми взаимоотношениями в системе Fe-O-S. Учитывая определённые молекулярные количества FeS в сфалерите и ассоциации глинистых минералов – иллита и каолинита, построена диаграмма $\text{Log}f_{O_2}$ – pH (рис. 7). Фугитивность кислорода оценена в пределах от -39,5 до -37. При этом она увеличивалась при отложении энаргита, теннангита и теллуридов. pH варьировала от 4 до 5,4.

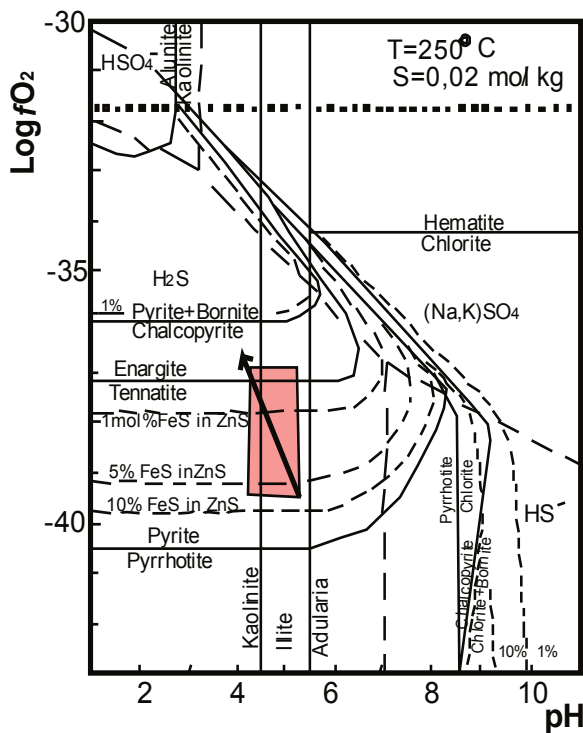


Рис. 7. Диаграмма $\text{Log}f_{O_2}$ – pH для руд Красноярского месторождения. Значения pH и f_{O_2} первичных рудных флюидов модифицированы по [15]. Стрелкой показано изменение состояния рудных флюидов от нейтральных к слабо кислотным. Розовым цветом показано поле стабильности для различных минералов с мол. % FeS в сфалерите при $T=250$ °C, $\Sigma S=0,02$ мол/кг

Fig. 7. Plot $\text{Log}f_{O_2}$ vs. pH for ores of Krasnoyarsk deposit. Values of pH and f_{O_2} of primary ore fluids modified after [15]. Arrow shows the ore fluid state changing from neutral to slightly acidic. Pink colour shows stability field for different minerals with mol. % FeS in sphalerite at $T=250$ °C, $\Sigma S=0,02$ mol/kg

Интерпретация результатов

В настоящее время предполагается три главных процесса, приводящих к образованию и дифференциации риолитового материала в вулканогенных поясах с эпитеpмальным оруденением: кристаллизационное фракционирование [16, 17], частичное плавление континентальной коры [18, 19] и термогравитационная диффузия, при которой химическое фракционирование достигалось при полном расплавлении [20].

Популярная модель термодиффузии в жидкой среде, предложенная В. Хилдретом [20], способна объяснить различие интерпретаций образования риолитов, в том числе и субвулканических кислых образований, в различных районах. Она раскрывает механизм обогащения совместимыми сидерофильными элементами (такими как Y, Sc и Mn) и несовместимыми элементами, характерной особенностью которых является несовместимость с любой системой и прежде всего с системой кристалл-жидкость. По указанным параметрам к Красноярской магмо-рудно-метасоматической системе может быть применима именно модель термодиффузии. Она также даёт объяснение механизмам фракционирования тяжёлых редкоземельных элементов относительно лёгких без привлечения фракционирования циркона или апатита. Модель помогает понять процесс обогащения флюидной фазы магматитов благородными элементами. Главные летучие компоненты в большинстве магм представлены H_2O , CO_2 и S_2 или H_2S [21]. В субвулканических породах проявлен тетрадный эффект фракционирования РЗЭ W-типа и его величины негативно коррелируются с содержаниями золота и серебра в породах.

Однако модель термодиффузии для условий Красноярской магмо-рудно-метасоматической системы была генерирована в результате процессов смешения базальтового источника и корового материала, что подтверждается анализом соотношений La/Nb и Ce/Y (рис. 8).

Известно, что высоко-серные эпитеpмальные золото-серебряные месторождения характеризуются наличием в рудах энаргита и люционита [21, 23, 24], как это имеет место и в рудах Красноярского месторождения. Установлено, что высоко-серные эпитеpмальные Au-Cu месторождения развиваются в обстановках, где летучие компоненты поднимаются вверх очень быстро из глубинного магматического источника и не взаимодействуют с вмещающими породами и окружающими водами на глубине, становясь очень горячими кислыми гидротермальными флюидами, которые только на эпитеpмальных близ-поверхностных уровнях взаимодействуют с вмещающими породами [25]. Прогрессивное охлаждение и нейтрализация горячих кислых гидротермальных флюидов вмещающими породами в близ-поверхностной обстановке продуцирует кислотно-сульфатный тип изменений и зо-

нальные аргиллизиты с формированием типичных ассоциаций пирита, энаргита, люционита [26].

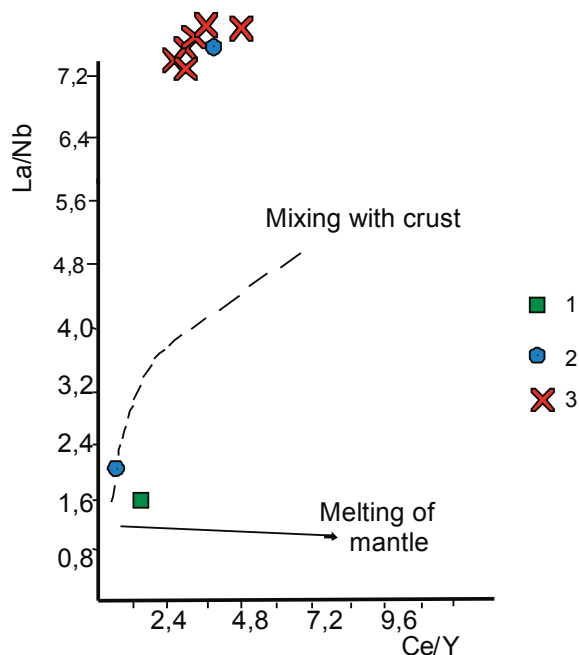


Рис. 8. Диаграмма соотношений $La/Nb-Ce/Y$ по [22] для субвулканических пород Красноярского рудного поля. Условные обозначения – на рис. 2

Fig. 8. Plot ratio La/Nb vs. Ce/Y after [22] for subvolcanic rocks of Krasnoyarsk ore field. Legend is in the Fig. 2

Аналогичный механизм предполагается и для формирования руд Красноярского месторождения. Физико-химические и термодинамические условия формирования руд месторождения весьма показательны и находят много общих черт с объектами подобного типа, описанными в различных регионах [27, 28]. От сульфидной стадии к теллуридной в рудах Красноярского месторождения происходило понижение температуры кристаллизации при значительном снижении фугитивности серы и повышении фугитивности теллура и кислорода. От ранней стадии к поздней происходила трансформация рН среды от близ-нейтральной в сульфидном парагенезисе до сильно кислой среды при отложении теллуридов. Такая смена термодинамического режима генерации руд объясняется повышением уровня становления магматического глубинного очага [29, 30].

В последнее время стало известно, что месторождения порфирово-эпитермальных минеральных систем ассоциированы с островодужным магматизмом в пределах конвергентных геодинамических обстановок. Такие системы зональны и глубже эпитермального оруденения должно локализоваться порфиоровое и, возможно, скарновое. Совмещение порфиорового и эпитермального Au-Ag оруденения отмечается в рудах Михеевского место-

рождения на Урале [28], Au-Ag месторождениях Роговик и Баймка на Северо-Востоке России [31, 32], в Айлаошаньском рудном поясе на Северо-Западе Китая [33].

В Красноярском рудном поле возможно выявление, кроме эпитермального, медно-порфиорового и скарнового оруденения.

Заключение

Магмо-рудно-метасоматическая система Красноярского рудного поля охватывает вулканиты риолитового состава, субвулканические штоки плагиолейкогранит-порфиров и плагиогранит-порфиров коргонского комплекса среднего девона. Субвулканические образования формировались в результате смешения мантийного и корового материала, что сказалось на формировании околорудных метасоматитов и эпитермального оруденения. В объяснении формирования геохимического облика магматитов, метасоматитов и рудных парагенезисов привлекается модель термодиффузии в жидкой среде. Основную роль среди летучих компонентов играли H_2O , CO_2 и S_2 или H_2S . Поэтому в породах проявлен ТЭФ РЗЭ W-типа. С уменьшением величин ТЭФ РЗЭ увеличиваются концентрации Au и Ag в субвулканических образованиях. Околорудные метасоматиты охватывают комплекс окварцевания, аргиллизации с развитием каолинита, монтмориллонита и иллита.

Эпитермальное оруденение Красноярского рудного поля отнесено к высоко-серному типу с парагенезисами блёклых руд, энаргита и люционита, типоморфных высоко-серных сульфидов. Вторая рудная стадия характеризовалась проявлением теллуридов (тетрадимита, алтаита, гессита и других). Такая резкая смена парагенезисов вызвана изменениями в глубинном очаге с повышением его уровня. Резко кислотная обстановка формирования оруденения создавала интенсивные процессы окремнения и окварцевания и изменение фугитивностей серы, теллура и кислорода с варьированием рН среды от почти нейтральной до сильно кислой. Сера сульфидов имела мантийные метки, а изотопы кислорода отвечают значениям метеорных вод. Флюиды, формировавшие оруденение, в процессе быстрого подъёма не смешивались с метеорными водами и лишь на близ-поверхностном уровне происходило смешение ювенильных флюидов и метеорных вод.

В районе Красноярского рудного поля может быть выявлено, помимо эпитермального, медно-порфиоровое и скарновое оруденение.

Работа выполнена при поддержке регионального гранта РФФИ «Петрология магматизма и генезис оруденения Коргоно-Красноярского рудного района Алтайского края» (номер проекта: 18-45-220022, код и название конкурса: p_a, региональный конкурс проектов фундаментальных научных исследований).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. White N.C., Hedenquist J.W. Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1990. – V. 36. – № 1–3. – P. 445–474. URL: [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G) (дата обращения 23.03.2018).
2. Гусев Н.И., Шокальский С.П., Гусев А.И. Возраст магматизма (U-Pb, SHRIMP II), контролирующего эпitherмальное оруденение Новофирсовского золоторудного узла (Алтай) // *Региональная геология и металлогения*. – 2011. – № 45. – С. 98–105.
3. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1989. – V. 53. – № 1. – P. 197–214. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90286-X.
4. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geological Society of America Bulletin*. – 1989. – V. 101. – № 5. – P. 635–643. DOI: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2.
5. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts // *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*. – 1998. – V. 89. – № 2. – P. 113–119. DOI: 10.1017/S0263593300007045
6. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1999. – V. 63. – № 3–4. – P. 489–508. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00027-7. URL: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00027-7) (дата обращения 01.04.2018).
7. Гусев А.И. К геохимии акцессорного пирита Кошрабадского массива Западного Узбекистана // *Актуальные проблемы геологии, геофизики и металлогении: материалы конференции, посвященной 80-летию создания Института геологии и геофизики и 105-летию со дня рождения академика Х.М. Абдуллаева*. – Ташкент, 2017. – С. 229–232.
8. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в горных породах // *Геохимия*. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
9. Wasson J.T., Kallemejn G.W., Runcorn S.K., Turner G., Wolfson M.M. Compositions of chondrites // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*. – 1988. – V. 325. – № 1587. – P. 535–544. DOI: 10.1098/rsta.1988.0066. URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0066> (дата обращения 01.04.2018).
10. Meyer C., Hemiey J.J. Wall rock alteration // *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* / Ed. by H.L. Barnes. – New York: Holt, Rinehart and Winston, 1967. – P. 166–235.
11. Hedenquist J.W. Precious metal vein systems in the National District, Humboldt County, Nevada; discussion // *Economic Geology*. – 1986. – V. 81. – № 4. – P. 1020–1023. URL: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.4.1020> (дата обращения 23.03.2018).
12. Золоторудные месторождения нетрадиционных типов – основа укрепления сырьевой базы в районах золотодобычи Алтая / С.С. Вартамян, Ю.М. Щелотьев, А.И. Зайцев, Н.П. Бедарев, Ю.Н. Николаев // *Руды и металлы*. – 2006. – № 3. – С. 5–13.
13. Scott S.D., Barnes H.L. Sphalerite geothermometry and geobarometry // *Economic Geology*. – 1971. – V. 66. – № 4. – P. 653–669. URL: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.4.653> (дата обращения 23.03.2018).
14. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides; I, Thermochemical data and calculated equilibria // *Economic Geology*. – 1988. – V. 83. – № 2. – P. 377–394. URL: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.2.377> (дата обращения 23.03.2018).
15. John D.A. Miocene and Early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the Northern Great basin, Western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism // *Economic Geology*. – 2001. – V. 96. – № 8. – P. 1827–1853. URL: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1827> (дата обращения 23.03.2018).
16. Cameron M., Bagby W.C., Cameron K.L. Petrogenesis of Voluminous mid-Tertiary ignimbrites of the Sierra Madre Occidental, Chihuahua, Mexico // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1980. – V. 74. – № 3. – P. 271–284. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00371697> (дата обращения 23.03.2018).
17. Bagby W.C., Cameron K.L., Cameron M. Contrasting evolution of calc-alkalic volcanic and plutonic rocks of western Chihuahua, Mexico // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. – 1981. – V. 86. – Iss. B11. – P. 10402–10410. URL: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10402> (дата обращения 23.03.2018).
18. Moll E.J. Geochemistry and petrology of Mid-Tertiary ash flow tuffs from the Sierra el Virulento Area, eastern Chihuahua, Mexico // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. – 1981. – V. 86. – Iss. B11. – P. 10321–10334. URL: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10321> (дата обращения 23.03.2018).
19. Pleistocene high-silica rhyolites of the Coso Volcanic Field, Inyo County, California / C.R. Bacon, R. Macdonald, R.L. Smith, P.A. Baedeker // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. – 1981. – V. 86. – Iss. B11. – P. 10223–10241. URL: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10223> (дата обращения 23.03.2018).
20. Hildreth W. Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. – 1981. – V. 86. – Iss. B11. – P. 10153–10192. URL: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10153> (дата обращения 23.03.2018).
21. Sillitoe R.H., Hedenquist J.W. Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions and Epithermal Pressurized Metal Deposits // *Society of Economic Geologists. Special Publication*. – 2003. – V. 10. – P. 315–343.
22. Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments // *Lithos*. – 1999. – V. 46. – Iss. 3. – P. 605–626. URL: [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00085-1) (дата обращения 23.03.2018).
23. Cooke D.R., Simmons S.F. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits // *Reviews in Economic Geology*. – 2000. – V. 13. – P. 221–244.
24. Enargite-luzonite hydrothermal vents in Manus Back-Arc Basin: submarine analogues of high-sulfidation epithermal mineralization / V.M. Dekov, O. Rouxel, K. Kouzmanov, L. Bindi, D. Asael, Y. Fouquet, J. Etoubleau, G. Burgaud, M. Wälle // *Chemical Geology*. – 2016. – V. 438. – P. 36–57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.05.021> (дата обращения 23.03.2018).
25. Corbett G. Anatomy of porphyry-related Au-Cu-Ag-Mo mineralized systems: Some exploration implications // *AIG Bulletin*. – 2009. – № 49. – P. 33–46.
26. Hedenquist J.W. Epithermal High Sulfidation Gold Deposits. URL: http://www.geologinesia.com/2015/11/epithermal-high-sulfidation-gold_9.html (дата обращения 26.03.2018).
27. Mineralogy, alteration patterns, geochemistry, and fluid properties of the Ag-Au epithermal deposit Nová Baňa, Slovakia / J. Majzlan, K. Berkh, S. Kiefer, P. Kodera, A.E. Fallick, M. Chovan, F. Bakos, A. Biron, S. Ferenc, J. Lexa // *Mineralogy and Petrology*. – 2018. – V. 112. – Iss. 1. – P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.1007/s00710-017-0516-0> (дата обращения 26.03.2018).
28. Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting / O.Y. Plotinskaya, O.B. Azovskova, S.S. Abramov, E.O. Groznova, K.A. Novoselov, R. Seltmann, J. Spratt // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – V. 94. – P. 239–260. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.025> (дата обращения 26.03.2018).
29. Zhai D., Liu J. Gold-telluride-sulfide association in the Sandawanzi epithermal Au-Ag-Te deposit, NE China: implications for phase equilibrium and physicochemical conditions // *Mineralogy and Petrology*. – 2014. – V. 108. – Iss. 6. – P. 853–871. URL:

- <https://doi.org/10.1007/s00710-014-0334-6> (дата обращения 26.03.2018).
30. Yuningsih E.T., Matsueda H. Genesis and origin of Te-bearing gold-silver-base metal mineralization of the Arinem deposit in western Java, Indonesia // *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. – 2014. – V. 109. – Iss. 2. – P. 49–61. URL: <https://doi.org/10.2465/jmps.130118a> (дата обращения 26.03.2018).
31. Physicochemical models of formation of gold–silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia) / T.V. Zhuravkova, G.A. Palyanova, K.V. Chudnenko, R.G. Kravtsova, I.R. Prokopyev, A.S. Makshakov, A.S. Borisenko // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 91. – P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.10.017> (дата обращения 26.03.2018).
32. Gold-Silver mineralization in porphyry-epithermal systems of the Baimka trend, western Chukchi Peninsula, Russia / Yu.N. Nikolaev, I.A. Baksheev, V.Yu. Prokofiev, E.V. Nagornaya, L.I. Marushchenko, Yu.N. Sidorina, A.F. Chitalin, I.A. Kal'ko // *Geology of Ore Deposits*. – 2016. – V. 58. – № 4. – P. 284–307. DOI: 10.1134/s107570151604005x
33. Paleogene magmatism and gold metallogeny of the Jinping terrane in the Ailaoshan ore belt, Sanjiang Tethyan Orogen (SW China): Geology, deposit type and tectonic setting / J. Zhang, H. Wang, S. Li, T. Li // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 91. – P. 620–637. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.08.032> (дата обращения 26.03.2018).

Поступила 04.04.2018 г.

Информация об авторах

Гусев А.И., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры естественно-научных дисциплин, безопасности жизнедеятельности и туризма Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета имени В.М. Шукшина.

Табакаева Е.М., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник управления научно-исследовательской деятельности Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета имени В.М. Шукшина.

UDC 552.3:550.4:550.42:550.93

MAGMATISM AND EPITHERMAL Ag-Au ORE MINERALIZATION OF KRASNOYARSK GOLD ORE FIELD OF GORNY ALTAI

Anatoliy I. Gusev¹,
anzerg@mail.ru

Evgeniya M. Tabakaeva¹,
tabakaeva16@mail.ru

¹ Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University,
53, Vladimir Korolenko street, Biysk, 659333, Russia.

The relevance of the study is caused by the need of researching petrology, geochemistry subvolcanic rocks and epithermal Ag-Au ore mineralization of Krasnoyarsk ore field of Gorny Altai. Different types of ore mineralization: copper, cobalt, arsenic, tungsten and gold, are associated in space and paragenetic with subvolcanic stocks of granitoids. High sulfidation type of Ag-Au ore mineralization was re-searched first in Gorny Altai.

The main aim of the research is to study petrology, geochemical features of rocks and ore mineralization of Krasnoyarsk deposit using the experimental diagrams, which allow solving the genetic problems and revealing the physic-chemical features of petro- and ore-genesis.

Methods. Elements were determined in rocks by inductively coupled plasma method on the mass spectrometer «OPTIMA-4300» in the Laboratory of Institute of mineralogy, geochemistry and crystallochemistry of rare elements (Moscow). Isotopes of sulfur and oxygen were determined on the mass-spectrometer MI 1201B in the same laboratory.

Results. Subvolcanic stocks of granitoids of the Middle Devonian of Korgonskiy complex are the main ore generating objects in Krasnoyarsk ore field. These granitoids are of the peraluminous type with varying contents of Mg and Fe. The tetrad effect of REE fractionation (W-type) is revealed in rocks. The contents of Au and Ag in rocks increase with decreasing value of tetrad effect of REE fractionation (W-type). The deep magma chamber evolved toward increasing its level with the formation of sharply acid-sulfur characteristics and with the formation of near ore argillizites. Mineralization of the Krasnoyarsk deposit is represented by a series of nested quartz lodes with the formation of a kind of linear stockwork. Ores are formed in three stages: sulfidic, telluridic and postmineral. The main ore minerals are pyrite, galenite, sphalerite, tetrahedrite, tennantite, electrum, tetradymite, seldom – altaite, hessite, enargite, luzonite. The main minerals of lodes are quartz, calcite, chlorite, siderite, kaolinite, montmorillonite, illite. Gold content in ores changes from 0,5 to 29,6 ppm, silver – from 15 to 5000 ppm. Ratio of Ag/Au in ores is from 135 to 150. This indicates that the Krasnoyarsk deposit belongs to the Ag-Au type. The temperatures of homogenization of gas-liquid inclusions in quartz of different generations from stage to stage decreased from 265 to 175 °C. The sulfur fugacity decreased from the first stage (–10–11) to the second one (–15–16), fTe₂ increased from (–15) to (–10) and fO₂ increased from (–39,5) to (–37). Isotopes of sulfur and oxygen indicate a magmatic source for sulfur and meteoric for oxygen.

Key words:

Geochemistry, petrology, granitoids, stocks, tetrad effect fractionation of REE fractionation, lodes, lead, copper, gold, silver, fugacity of S₂, O₂, Te₂.

The research was supported by the RFBR regional grant «Petrology of magmatism and genesis of ore-formation of Korgon-Krasnoyarsk ore area in Altai region» (project no. 18–45–220022, code and title of the contest: p_a, regional contest of projects of fundamental researches).

REFERENCES

- White N.C., Hedenquist J.W. Epithermal environments and styles of mineralization: Variations and their causes, and guidelines for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 1990, vol. 36, no. 1–3, pp. 445–474. Available at: [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90063-G](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G) (accessed 23 March 2018).
- Gusev N.I., Shokalskii S.P., Gusev A.I. The age of magmatism (U-Pb, SHRIMP II) controlling the epithermal mineralization of the Novofirsovsky gold ore cluster (Altai). *Regional Geology and Metallogeny*, 2011, no. 45, pp. 98–105. In Rus.
- Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, vol. 53, no. 1, pp. 197–214. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90286-X.
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, vol. 101, no. 5, pp. 635–643. DOI: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TD0G>2.3.CO;2.
- Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1998, vol. 89, no. 2, pp. 113–119. DOI: 10.1017/S0263593300007045
- Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, vol. 63, no. 3–4, pp. 489–508. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00027-7. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00027-7) (accessed 1 April 2018).
- Gusev A.I. K geokhimii aktsessornogo pirita Koshrabadskogo massiva Zapadnogo Uzbekistana [To the geochemistry of accessory pyrite of the Koshrabad massif of Western Uzbekistan]. *Aktualnye problemy geologii, geofiziki i metallogenii. Materialy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu sozdaniya Instituta geologii i geofiziki i 105-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Kh.M. Abdullaeva* [Actual problems of geology, geophysics and metallogeny. Conference materials devoted to the 80th anniversary of creation of the Institute of Geology and Geophysics and the 105th anniversary of the birth of Academician H.M. Abdullaev]. Tashkent, 2017. pp. 229–232.
- Vinogradov A.P. Average content of chemical elements in rocks. *Geochemistry International*, 1962, no. 7, pp. 555–571. In Rus.

9. Wasson J.T., Kallemeyn G.W., Runcorn S.K., Turner G., Woolfson M.M. Compositions of chondrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, 1988, vol. 325, no. 1587, pp. 535–544. DOI: 10.1098/rsta.1988.0066. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0066> (accessed 1 April 2018).
10. Meyer C., Hemiey J.J. Wall rock alteration. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* Ed. by H.L. Barnes. New York, Holt, Rinehart and Winston, 1967. pp. 166–235.
11. Hedenquist J.W. Precious metal vein systems in the National District, Humboldt County, Nevada; discussion. *Economic Geology*, 1986, vol. 81, no. 4, pp. 1020–1023. Available at: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.4.1020> (accessed 23 March 2018).
12. Vartanyan S.S., Schepotev Yu.M., Zaytsev A.I., Bedarev N.P., Nikolaev Yu.N. Gold ore deposits of non-traditional types – the basis for strengthening the resource base in the gold mining areas of Altai. *Ores and Metals*, 2006, no. 3, pp. 5–13. In Rus.
13. Scott S.D., Barnes H.L. Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Economic Geology*, 1971, vol. 66, no. 4, pp. 653–669. Available at: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.4.653> (accessed 23 March 2018).
14. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides; I, Thermochemical data and calculated equilibria. *Economic Geology*, 1988, vol. 83, no. 2, pp. 377–394. Available at: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.2.377> (accessed 23 March 2018).
15. John D.A. Miocene and Early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the Northern Great basin, Western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology*, 2001, vol. 96, no. 8, pp. 1827–1853. Available at: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1827> (accessed 23 March 2018).
16. Cameron M., Bagby W.C., Cameron K.L. Petrogenesis of Voluminous mid-Tertiary ignimbrites of the Sierra Madre Occidental, Chihuahua, Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1980, vol. 74, no. 3, pp. 271–284. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00371697> (accessed 23 March 2018).
17. Bagby W.C., Cameron K.L. Cameron M. Contrasting evolution of calc-alkalic volcanic and plutonic rocks of western Chihuahua, Mexico. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, Iss. B11, pp. 10402–10410. Available at: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10402> (accessed 23 March 2018).
18. Moll E.J. Geochemistry and petrology of Mid-Tertiary ash flow tuffs from the Sierra el Virulento Area, eastern Chihuahua, Mexico. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, Iss. B11, pp. 10321–10334. Available at: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10321> (accessed 23 March 2018).
19. Bacon C.R., Macdonald R., Smith R.L., Baedeker P.A. Pleistocene high-silica rhyolites of the Coso Volcanic Field, Inyo County, California. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, Iss. B11, pp. 10223–10241. Available at: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10223> (accessed 23 March 2018).
20. Hildreth W. Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, Iss. B11, pp. 10153–10192. Available at: <https://doi.org/10.1029/JB086iB11p10153> (accessed 23 March 2018).
21. Sillitoe R.H., Hedenquist J.W. Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions and Epithermal Precious Metal Deposits. *Society of Economic Geologists. Special Publication*, 2003, vol. 10, pp. 315–343.
22. Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 1999, vol. 46, no. 3, pp. 605–626. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00085-1) (accessed 23 March 2018).
23. Cooke D.R., Simmons S.F. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 2000, vol. 13, pp. 221–244.
24. Dekov V.M., Rouxel O., Kouzmanov K., Bindi L., Asael D., Fouquet Y., Etoubleau J., Burgaud G., Wälle M. Enargite-luzonite hydrothermal vents in Manus Back-Arc Basin: submarine analogues of high-sulfidation epithermal mineralization. *Chemical Geology*, 2016, vol. 438, pp. 36–57. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.05.021> (accessed 23 March 2018).
25. Corbett G. Anatomy of porphyry-related Au-Cu-Ag-Mo mineralized systems: Some exploration implications. *AIG Bulletin*, 2009, no. 49, pp. 33–46.
26. Hedenquist J.W. *Epithermal High Sulfidation Gold Deposits*. Available at: http://www.geologinesia.com/2015/11/epithermal-high-sulfidation-gold_9.html (accessed 26 March 2018).
27. Majzlan J., Berkh K., Kiefer S., Koděra P., Fallick A.E., Chovan M., Bakos F., Biron A., Ferenc S., Lexa J. Mineralogy, alteration patterns, geochemistry, and fluid properties of the Ag-Au epithermal deposit Nová Baňa, Slovakia. *Mineralogy and Petrology*, 2018, vol. 112, no. 1, pp. 1–23. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00710-017-0516-0> (accessed 26 March 2018).
28. Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltmann R., Spratt J. Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 94, pp. 239–260. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.025> (accessed 26 March 2018).
29. Zhai D., Liu J. Gold-telluride-sulfide association in the Sandawanzi epithermal Au-Ag-Te deposit, NE China: implications for phase equilibrium and physicochemical conditions. *Mineralogy and Petrology*, 2014, vol. 108, no. 6, pp. 853–871. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00710-014-0334-6> (accessed 26 March 2018).
30. Yuningsih E.T., Matsueda H. Genesis and origin of Te-bearing gold-silver-base metal mineralization of the Arinem deposit in western Java, Indonesia. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2014, vol. 109, no. 2, pp. 49–61. DOI: <https://doi.org/10.2465/jmps.130118a>
31. Zhuravkova T.V., Palyanova G.A., Chudnenko K.V., Kravtsova R.G., Prokopyev I.R., Makshakov A.S., Borisenko A.S. Physicochemical models of formation of gold-silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia). *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 91, pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.10.017> (accessed 26 March 2018).
32. Nikolaev Yu.N., Baksheev I.A., Prokofiev V.Yu., Nagornaya E.V., Marushchenko L.I., Sidorina Yu.N., Chitalin A.F., Kal'ko I.A. Gold-Silver mineralization in porphyry-epithermal systems of the Baimka trend, western Chukchi Peninsula, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2016, vol. 58, no. 4, pp. 284–307. DOI: 10.1134/s107570151604005x
33. Zhang J., Wang H., Li S., Li T. Paleogene magmatism and gold metallogeny of the Jinping terrane in the Ailaoshan ore belt, Sanjiang Tethyan Orogen (SW China): Geology, deposit type and tectonic setting. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 91, pp. 620–637. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.08.032> (accessed 26 March 2018).

Received: 4 April 2018.

Information about the authors

Anatoliy I. Gusev, Dr. Sc., professor, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University.

Evgeniya M. Tabakaeva, Cand. Sc., researcher, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University.