

УДК 552.3:550.4:550.42:550.93

DOI: [10.46698/VNC.2023.36.94.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.36.94.007)

Оригинальная статья

Типизация эпитермальных золото-серебряных систем Большого Кавказа

А.И. Гусев 

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет
им. В.М. Шукшина, Россия, 659333, г. Бийск, ул. Короленко, 53,
e-mail: anzerg@mail.ru

Статья поступила: 12.04.2023, доработана: 17.05.2023, одобрена в печать: 24.05.2023

Резюме: Актуальность работы. На Большом Кавказе описаны различные месторождения и рудопроявления золотого оруденения, в том числе и эпитермального. Однако типизация золото-серебряного эпитермального оруденения с использованием физико-химических условий их формирования на современном уровне не проведена. **Целью исследования** является получение комплексной геолого-минералогической и физико-химической характеристики руд и их типизация на современном уровне. Объектом для исследований были выбраны эпитермальные месторождения и проявления золото-серебряного типа во всех тектонических зонах региона. Материалы, используемые в статье, получены автором в процессе проведения поисковых, поисково-оценочных, геолого-съёмочных (1:50000) и специализированных металлогенических исследований, проводимых с 1967 года на Большом Кавказе. В 2014-2018 годах собраны дополнительные материалы по эпитермальным системам: Радужной, Ковалевской, Кериго. **Методы исследования.** Методы изучения, кроме геологического и петрографического описания руд и окколорудных метасоматитов, включали получение количественных характеристик определения температур кристаллизации минералов, фугитивностей кислорода и серы, P_h и других термодинамических параметров оруденения. Фугитивности серы, кислорода и теллура получены из стандартных графиков соотношений физико-химических параметров. **Результаты исследования.** В результате комплексных исследований получены новые данные по типизации эпитермальных золото-серебряных систем различных тектонических юнитов Большого Кавказа. Магматизм, с которым связано оруденение, характеризуется повышенной щёлочностью и аномальными параметрами флюидного режима. Все золото-серебряные эпитермальные объекты отнесены к низкосернистому, промежуточно-сернистому и высокосернистому типам, отличающимися особенностями составов руд и окколорудных метасоматитов, температурами кристаллизации продуктивных стадий минерализации, окколорудных метасоматитов, величинами фугитивностей кислорода и серы, различным соотношением селенидов и теллуридов в рудах. Совмещение медно-молибден-золото-порфирирового и эпитермального золото-серебряного оруденения в регионе представляет наибольшие перспективы. К числу таких районов относятся: потенциальное рудное поле Кериго, а также Танадон-Сонгутидон-Казбекский рудный район, где развиты периферические части порфирировой системы, которая может сопровождаться и эпитермальной золото-серебряной минерализацией.

Ключевые слова: эпитермальные системы, золото, серебро, фугитивности серы и кислорода.

Для цитирования: Гусев А.И. Типизация эпитермальных золото-серебряных систем Большого Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 82-94. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.94.007.

DOI: [10.46698/VNC.2023.36.94.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.36.94.007)

Original paper

Typization of epithermal gold-silver systems of Greater Caucasus

A.I. Gusev 

Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy, 53 Korolenko Str., Biisk 659333,
Russian Federation, e- mail: anzerg@mail.ru

Received: 12.04.2023, revised: 17.05.2023, accepted: 24.05.2023

Abstract: Relevance. The different deposits and manifestations of gold ore mineralization on the Greater Caucasus described and so an epithermal. Typization of gold-silver epithermal ore mineralization with using physic-chemical of conditions it forming on the modern level did not lead. **The aim of the study** is to receive complex geology-mineralogical and physic-chemical characteristic of ores and it typezation on the modern level. Objects of researching were choose an epithermal deposits and manifestations gold-silver types in all tectonic zones of region. Materials, using in paper, received by of author in process carrying out of prospecting, prospecting-estimation, geology-survey (1:50000) and special metallogenic researching that it conducted from 1967 year on the Greater Caucasus. The additional materials on epithermal systems of Raduzhnaya, Kovalevskaya, Kerigo collected in 2014-2018 years. **Methods.** Methods of study except of geological and petrographic of description of ores and metasomatic include receiving quantitative characteristic of determination of temperatures of crystallization minerals, fugacities oxygen, and sulfur, Ph and other thermodynamic parameters of ore mineralization. Fugacities oxygen, sulfur and tellurium received from standard plots of ratio physic-chemical parameters. **Results.** New data received on typezation of an epithermal gold-silver systems of different tectonic unites of Greater Caucasus in result of complex researching. Magmatism with that connected ore mineralization characterized by high alkali and anomaly parameters of fluid regime. All gold-silver epithermal objects carry to low sulfidation, intermediate sulfidation and high sulfidation types distinguishing of peculiarities content of ores and ore metasomatic changes, temperatures of crystallization productive stages of mineralization, metasomatic changes, quantify fugacity asoxygen, sulfur, different ratio of selenides and tellurides in ores. Reconciling of copper-molybdenum-gold-porphyry and epithermal gold-silver ore mineralization in region present more perspective. The potential ore field Kerigo and Tanadon-Sangutidon-Kazbek ore district where it developed periphery sites of porphyry system that it may accompany and by epithermal gold-silver mineralization refer to such districts.

Keywords: epithermal systems, gold, silver, fugacity of sulfur and oxygen.

For citation: Gusev A.I. Typization of epithermal gold-silver systems of Greater Caucasus. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(2): 82-94. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.94.007.

Введение

Фундаментальной проблемой геологии рудных месторождений является прогноз и поиски новых геолого-промышленных типов месторождений благородных металлов. К ним относится и класс эпитермальных золото-серебряных месторождений, тесно ассоциирующих с вулканогенными разрезами и субвулканическими образованиями. Эпитермальное Ag-Au оруденение занимает значительный объ-

ём в добыче серебра и золота, составляя для золота более 17,5% (без месторождения Витватерсранд), для серебра более 6% мировой добычи [Hedenquist, 1996]. Большинство гигантских эпитермальных золото-серебряных месторождений локализуется в обстановках молодых вулканических дуг, таких как месторождение Янакоча в Южной Америке и месторождение Лихир в Папуа Новой Гвинее [Richards, 2013]. В схожих геодинамических обстановках золото-серебряные объекты мирового класса по запасам металлов обнаруживаются и в более древних образованиях [Гусев, 2019; Хулелидзе и др., 2016; Holley et al., 2017; Zhong et al., 2017].

В связи с рекомендациями Государственной геологической службы России, в условиях истощения минерально-сырьевой базы в известных золоторудных районах России, одной из важных задач, обеспечивающих устойчивое развитие золотодобывающей отрасли, является проведение геологоразведочных работ, ориентированных на выявление крупных месторождений с рядовыми и бедными рудами [Караганов, 2002], т.е. крупно-объемных месторождений, и на новых площадях. К числу таких районов следует отнести и Северный Кавказ, где имеются предпосылки выявления подобных золоторудных объектов.

В последнее время пристальное внимание геологов привлекают районы совмещения эпитермального золото-серебряного и медно-молибден-золото-порфирового оруденения с выделением комплексного порфирово-эпитермального медно-золото-серебряного семейства руд. Такие комплексные системы зональны и глубже эпитермального оруденения должно локализоваться порфировое и, возможно, скарновое. Совмещение порфирового и эпитермального Au-Ag оруденения отмечается в рудах Михеевского месторождения на Урале, Au-Ag месторождениях Роговик и Баимка на Северо-Востоке России, в Айлаошаньском рудном поясе на Северо-Западе Китая, Красноярского Au-Ag месторождения на Алтае [Гусев, 2019; Zhong et al., 2017]. Большой Кавказ в этом плане может стать регионом, где также могут совмещаться указанные типы оруденения, а это залог открытия очень крупных по запасам металлов месторождений.

Цель исследования. На основе комплексных геолого-минералогических и термодинамических параметров провести типизацию эпитермальных золото-серебряных систем Большого Кавказа.

Методы исследований

Микротермометрические исследования флюидных включений проводились с помощью криотермокамеры THMSG600 фирмы Linkam при температурах от -180 до $+300^{\circ}\text{C}$ в Аналитическом центре СО РАН г. Новосибирска. Изотопный состав серы, углерода и кислорода определён на масс-спектрометре МИ 1201В в Лаборатории Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (г. Москва).

Результаты работы и их обсуждение

Эпитермальное золото-серебряное оруденение распространено на Большом Кавказе в районах распространения ранне-среднеюрских вулканогенных разрезов

и субвулканических образований и имеют с ними пространственно-парагенетическую связь. Этот тип оруденения распространён в зонах Главного хребта Центрального Кавказа (Радужное месторождение), зоне Северо-Кавказского краевого массива в области Транскавказского трансформного поперечного поднятия (проявления Ковалёвское, Мара, Джендаркольское, Гитчезен), подзоне Бокового хребта Центрального Кавказа (проявления Кериго, Хаснат) (рис. 1).

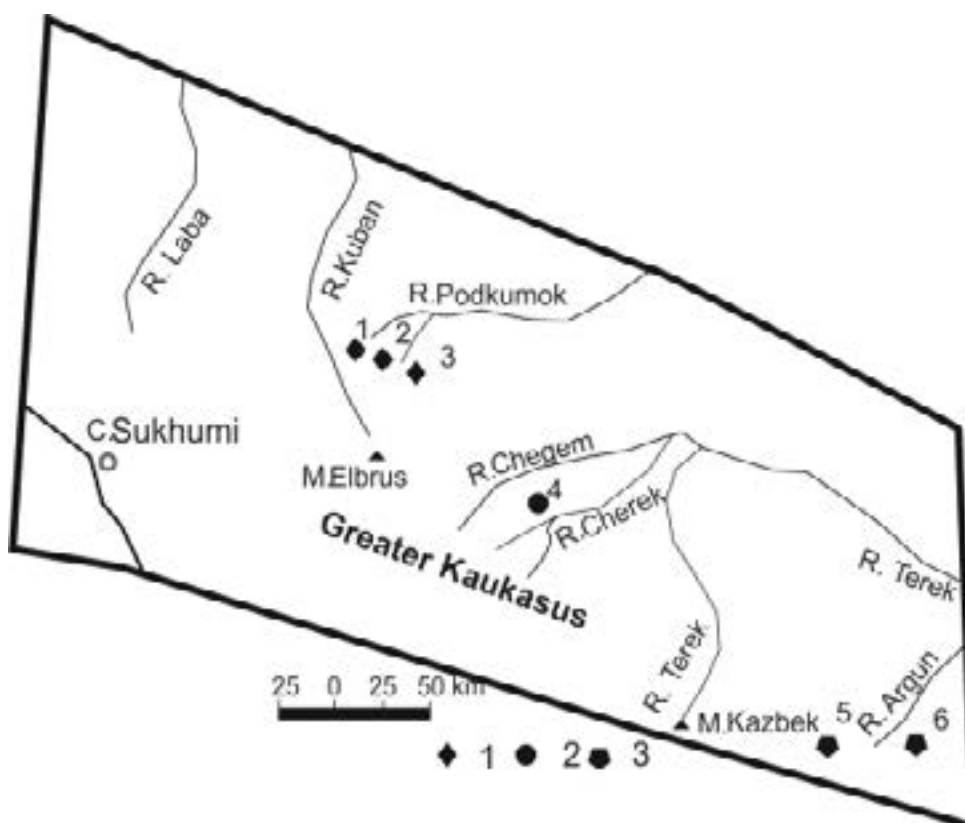


Рис. 1. Схема размещения типов эпитермального золото-серебряного оруденения Большого Кавказа

1 – низкосернистый тип (1 – Ковалевское, 2 – Мара, 3 – Гитчезен);
2 – промежуточно-сернистый тип (4 – Радужное); 3 – высокосернистый тип
(5 – Хаснат, 6 – Кериго) /

Fig. 1. Scheme of localization types epithermal gold-silver ore mineralization of Greater Caucasus:

1 – Low sulfidation type (1 – Kovalevskoe, 2 – Mara, 3 – Gitcheezen);
2 – intermediate sulfidation type
(4 – Raduzhnoe); 3 – high sulfidation type (5 – Khasnat, 6 – Kerigo)

Особенности вещественного состава руд и некоторых минералов, термодинамических параметров эпитермального золото-серебряного оруденения региона позволяют согласно современным представлениям [Гусев, 2019; John, 2001; Hedenquist et al., 1996; Sillitoe et al., 2003] отнести их к следующим типам: низкосернистым (Lowsulfidation) (Ковалёвское месторождение, проявление Мара), промежуточно-сернистым (Intermediatesulfidation) (Радужное месторождение, Лаурское проявление), высокосернистым (Highsulfidation) (проявления Кериго, Хаснат). По указан-

ным объектам приведены данные об их составе и физико-химическим условиям формирования (рис. 2).

Компоненты/Components	Месторождения/Deposits		
	Ковалёвское/ Kovalevskoe (LS)	Радужное/ Raduzhnoe (IS)	Керитто/ Keritso (HS)
Кварц/Quartz	●	●	●
Кальцит/Calcite	●	●	●
Сидерит/Siderite	●	●	●
Пирит/Pyrrite	●	●	●
Арсенопирит/Arsenopyrite	●	●	●
Гематит/Hematite	●	●	●
Галенит/Galena	●	●	●
Сфалерит/Sphalerite	●	●	●
Халькопирит/Chalcopyrite	●	●	●
Теннантит/Tennantite	●	●	●
Тетраэдрит/Tetrahedrite	●	●	●
Энаргит/Enargite	●	●	●
Люзонит/Luzonite	●	●	●
Электрум/Electrum	●	●	●
Аргентит/Argentite	●	●	●
Гессит/Hessite	●	●	●
Тетрадимит/Tetrademite	●	●	●
Алтаит/Altaite	●	●	●
Адуляр/Adularia	●	●	●
Монтмориллонит/Montmorillonite	●	●	●
Каолинит/Kaolinite	●	●	●
Иллит/Illite	●	●	●
Алунит/Alunite	●	●	●
Сульфиды в %/Sulfides in %	1-3	7-10	11-16
Теллуриды и селениды/ Tellurides and selenides	Селениды/ Selenides	Селениды и теллуриды/Selenides and tellurides	Теллуриды/ Tellurides
FeS in ZnS in mol. %	2-3	6,5-7,5	9-10
log f_{O_2}	-36,1 - 37,3	-38 - -39	-39 - 40,5
Ph	7-8,2	6,8-7,5	4-5,5
PI sphalerite	207,6	207,1	206
log f_{S_2}	-9 - -10	-7 - -8,2	-6 - -3,8
Главные металлы/Basic metals	Pb, Zn ± Ag	Ag-Au, Zn, Pb, Cu	Au-Ag, Cu

Рис. 2. Сопоставление минерального состава и некоторых физико-химических параметров типов эпитермальных золото-серебряных систем Большого Кавказа: типы эпитермальных систем: LS – низкосернистый, IS – промежуточносернистый, HS – высокосернистый.

Красным цветом показаны главные минералы. PI – потенциал ионизации по [Жариков, 1967]; f – fugitivity компонентов /

Fig. 2. Comparison of mineral composition and some physic-chemical parameters of type an epithermal gold-silver systems of Greater Caucasus: Types of an epithermal systems:

LS – low sulfide, IS – intermediate sulfide, HS – high sulfide. Red colour show main minerals.

PI – potential of ionization after [Zharikov, 1967]; f – fugacity of components

Температуры гомогенизации первичных газовой-жидких включений в кварце главной продуктивной стадии формирования золото-серебряного оруденения всех типов варьировали от 240 до 290°C (табл. 1). Анализ сопоставительных данных показывает, что типы эпитермального золото-серебряного оруденения различаются по многим параметрам.

Таблица 1 / Table 1

**Термобарогеохимические и изотопные данные исследований минералов
эпитермальных систем Большого Кавказа / Thermobarogeochemical
and isotopic data researching of minerals epithermal systems
of Greater Caucasus**

Месторождения и минералы / Deposits and minerals	n	T _{гом.} , °C / T _{гом.} , °C	Солёность, масс. %-экв. / Salinity, eq.wt.% NaCl	δ ³⁴ S, ‰	δ ¹³ C, ‰	δ ¹⁸ O, ‰ SMOW
Ковалевское / Kovalevskoe: кварц 2 / quartz 2 кварц 3 / quartz 3 пирит 2 / pyrite 2 кальцит / calcite	2 2 2 2	290-285 220-225 -	6,5-7,5 4,5-3,5	- - (-3,9)–(-2,7)	 (-5,1)–(-4,8)	15,9-16,6 16,5-17,5
Радужное / Raduzhnoe: кварц 2 / quartz 2 кварц 3 / quartz 3 пирит 2 / pyrite 2 кальцит / calcite	2 3 3 2	280-265 195-200	7,0-7,8 3, 8-4,0	- (-5,9)–(-2,5)	 (-5,0)–(-4,9)	15,0-15,8 17,5-18,1 -
Кериго / Kerigo: кварц 2 / quartz 2 кварц 3 / quartz 3 халькопирит / chalcopyrite кальцит / calcite	2 2 2 2	255-260 175-185	5,5-4,8 0,5-1,0	(-1,5)–(-5,5)	(-5,5)–(-5,9)	15,5-16,5 15,0-15,5

Примечание: n – количество проб. / Note: n – quantitative of probes.

Низкосернистый тип эпитермального оруденения выявлен в области развития вулканитов маринского комплекса, характеризующийся повышенной щёлочностью. Наиболее изученным является Au-Ag проявление Ковалевское, которое расположено в верховьях р. Подкумок и приурочено к полосе развития флюидо-эксплозивных брекчий, аргиллизитов и пропилитов. Прогнозные ресурсы по категории P₁ составляют: Au – 10–15 т, Ag – 180 т. Здесь выявлены три рудные зоны мощностью 45–150 м, прослеженные по простиранию на 640–820 м и на глубину 200–250 м. Среднее содержание Au 4 г/т (максимально до 20 г/т), содержания серебра от 40 до 480 г/т [Газеев и др., 2013, 2022; Чотчаев и др., 2021]. Размер золотинок до 1–3 мм, редко 5–9 мм; пробность золота варьирует от 790 до 835‰. Низкосернистое месторождение Ковалёвское характеризуется присутствием индикаторной ассоциации минералов, и в первую очередь, наличием адуляра, а из рудных минералов – арсенопирита, и значительной ролью в рудах галенита и сфалерита. Специфической чертой Ковалёвского участка является наличие крустификационных текстур в кварце. Температура кристаллизации минералов продуктивной стадии в рудах

была наиболее высокой (290°C) из всех изученных эпitherмальных систем представляемого класса. Фугитивности кислорода для LS объектов были самые высокие, а серы – минимальные (рис. 3, 4).

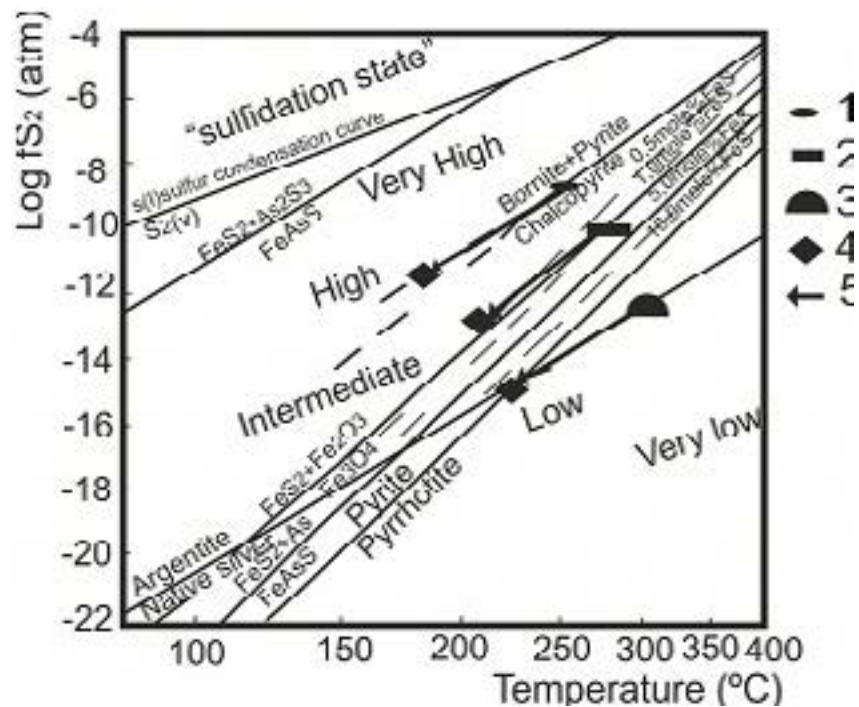


Рис. 3. Диаграмма $\text{Log} f\text{S}_2$ – температура для рудной минерализации эпitherмального золото-серебряного оруденения Большого Кавказа. Изоплеты FeS содержаний для сфалерита рассчитаны с использованием уравнений по [Scott et al., 1971]. Положение на диаграмме продуктивной второй стадии минерализации месторождений и проявлений, а также приблизительные оценки фугитивности серы и температурные условия для: 1 – Кериго, 2 – Радужное, 3 – Ковалевское; 4 – третья стадия всех типов эпitherмальных систем региона; 5 – направление снижения температур кристаллизации кварца и фугитивности серы от второй к третьей стадиям /

Fig. 3. Plot $\text{Log} f\text{S}_2$ vs. – temperature for ore mineralization for ore mineralization of epithermal gold-silver ore mineralization of Greater Caucasus. Isopleths of FeS content for sphalerite are calculated using the equations after [Scott et al., 1971]. Localization on plot of quick 2^d stage mineralization of deposits and manifestations and so approximate valuation of fugacity sulfur and temperature conditions for; 1 – Kerigo, 2 – Raduzhnoe, 3 – Kovalevskoe; 4 – third stage of all types epithermal systems of region; 5 – direction of decreasing temperature crystallization of quartz and fugacity of sulfur from second to third stages

Потенциал ионизации сфалерита является показателем кислотности – основности среды рудоотложения [Гусев, Табакаева, 2019] и, в силу, максимальных содержаний железа в сфалерите, обладал максимальной основностью и pH среды. По соотношению в рудах селенидов и теллуридов низкосернистый тип характеризуется присутствием исключительно селенидов и по этому признаку может быть отнесен к селенистому типу (наличие селенидов: агуларита, науманнита в рудах в ассоциации с пруститом) [Choi et al., 2005].

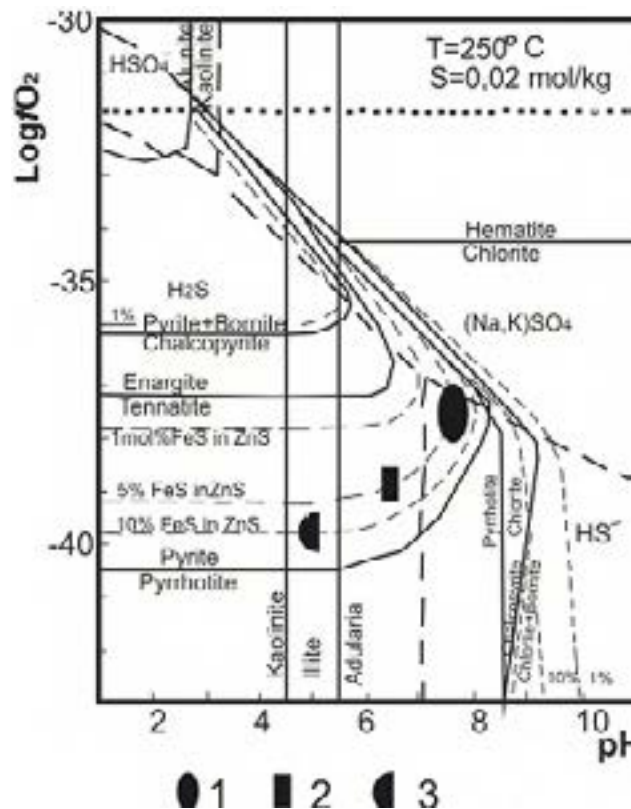


Рис. 4. Диаграмма $\text{Log} f\text{O}_2 - \text{pH}$ для руд эпITHERМАЛЬНЫХ Au-Ag систем Большого Кавказа. Значения pH и $f\text{O}_2$ первичных рудных флюидов модифицированы по [John, 2001]. Стрелкой показано изменение состояния рудных флюидов от нейтральных к слабо кислотным. Цветом показаны поля стабильности для различных минералов с мол.% FeS в сфалерите при $T=250^\circ\text{C}$, $\Sigma S = 0,02 \text{ mol/kg}$ /

Fig. 4. Plot $\text{Log} f\text{O}_2 - \text{pH}$ for ores of epithermal Au-Ag systems of Greater Caucasus. Meanings pH and $f\text{O}_2$ of essential ore fluids modify after [John, 2001]. Arrow shows the ore fluid state changing from neutral to slightly acidic. Colour shows stability field for different minerals with mol.% FeS in sphalerite at $T=250^\circ\text{C}$, $\Sigma S = 0.02 \text{ mol/kg}$

Высокосернистый тип (Highsulfidation – проявление Кериги) расположен в верховьях одноименной реки на границе Грузии и Чеченской Республики в области Бокового хребта. Проявление приурочено к тектоническому разлому, контролирующему размещение вулcano-плутонического центра с развитием туфов, реже лав трахиандезитов и субвулканических тел трахидацитовых порфириров. Зона минерализации представлена окварцованными и аргиллизированными туфами и флюидо-эксплозивными брекчиями мощностью от 3,5 до 7,9 м и видимой протяженностью более 300 м. Нередко отмечаются кварц-алунитовые жилы и прожилки с сульфидами и золотом. Характерной чертой зоны минерализации Кериги является частая встречаемость ноздреватого кварца. Руды проявления отличаются присутствием индикаторных минералов высокосульфидизированного типа – энаргита и люционита, а также резким преобладанием в рудах халькопирита, борнита, теннантита, тетраэдрита и халькозина. Этот тип максимальносульфидный (до 16%). Содержания золота в рудах варьируют от 2 до 12 г/т, серебра – от 48 до 196 г/т. Размеры золотин колеблются от 0,5 до 1,8 мм. Пробность золота варьирует от 690 до 720%. Гидротермы проявления Кериги характеризовались минимальной фугитивностью кислорода, и максимальной – серы. Ph среды кислая, а потенциал ионизации сфалерита самый

низкий по величине, что отвечает наиболее кислой обстановке его кристаллизации по сравнению с другими типами. Цинковая обманка относится к низкожелезистой разновидности. Температуры гомогенизации газовой-жидких включений в кварце второй (продуктивной) стадии показывают самые низкие значения (240–260°C), и третьей стадии – 170–180°C. Руды проявления Кериго содержат максимальное количество теллуридов, таких как алтаит и тетрадимит. И как следствие – в гидротермах этого объекта были самые высокие фугитивности теллура (рис. 5).

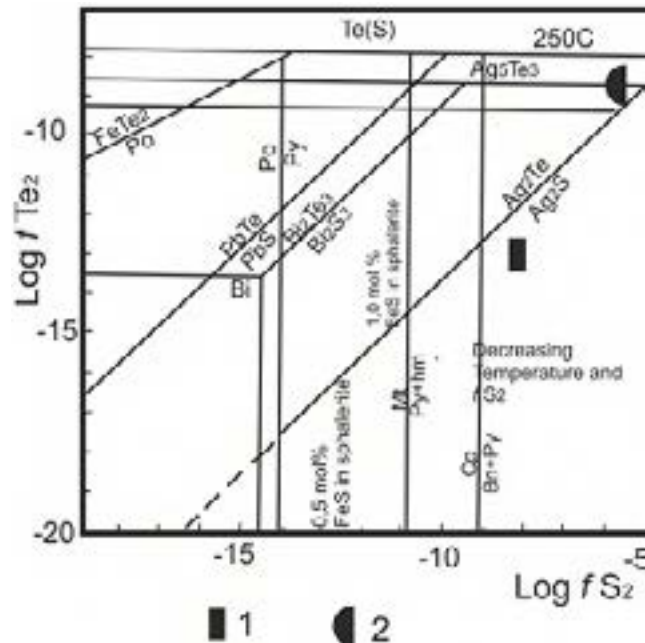


Рис. 5. Диаграмма $\text{Log}f\text{Te}_2 - \text{Log}f\text{S}_2$ для руд эпитермальных систем региона. Диаграмма показывает равновесие между теллуридами и сульфидами для руд Радужного месторождения и проявления Кериго при 250°C в условиях газового насыщения по [Afifi et al., 1988]. 1 – Радужное месторождение, 2 – проявление Кериго /

Fig. 5. Plot $\text{Log}f\text{Te}_2$ vs. $\text{Log}f\text{S}_2$ for ores of epithermal systems of region. Plot shows equilibria between tellurides and sulfides for ores of Raduzhoe deposit and manifestation Kerigo at 250°C in condition of vapor saturation after [Afifi et al., 1988]. 1 – Raduzhnoe deposit, 2 – manifestation Kerigo

В рудах этого проявления не зафиксировано селенидов. В субвулканических телах трахидацитовых порфириров проявления Кериго обнаружено прожилково-вкрапленное молибден-золото-порфиоровое оруденение с содержаниями золота от 1,5 до 3,5 г/т. Порфиновый тип оруденения требует проведения поисково-оценочных работ.

К этому же типу золото-серебряного оруденения относится проявление Хаснат, расположенное на территории Грузии в приграничной полосе с Чеченской Республикой и также в области Бокового хребта.

Эпитермальное золото-серебряное оруденение промежуточного по сернистости типа (Intermediatesulfidation – месторождение Радужное) детально описано [Парада, 2017]. Оно имеет промежуточные характеристики по многим вышеуказанным параметрам между низкосернистым и высокосернистым эпитермальным оруденением региона. Физико-химические параметры кристаллизации руд охарактеризованы нами детально ранее [Гусев, 2018] и показывают промежуточные характеристики физико-химических параметров [Кайгородова и др., 2022].

Приведенные данные показывают, что все описанные объекты действительно относятся к эпитермальным системам, руды которых формировались ниже 300°C. Типизация их по комплексу признаков позволяет выделять среди них низкосерни-

стые, умеренносернистые и высокосернистые, как это и фиксируется для молодых островных дуг (Индонезия, Камчатка, Курилы).

На тесную пространственную связь всех эпиптермальных золото-серебряных объектов Большого Кавказа с магматизмом повышенной щёлочности указывают соотношения стабильных изотопов углерода и кислорода. Все трассеры указанных изотопов тяготеют к магматическому источнику.

Аналогичный результат получен и в отношении источника серы сульфидов в рудах эпиптермальных систем. Значения тяжёлого изотопа серы локализуются в области магматического источника серы. Магматический источник имели не только показатели стабильных изотопов, но и благородных металлов.

Различия, указанные для каждого типа эпиптермальных систем Большого Кавказа, вероятно, кроются в особенностях глубинных очагов и механизмах действия гидротермальных систем.

Для низкосернистых объектов (Ковалёвское) главным отличием являлись процессы вскипания разбавленных хлоридно-углекислых флюидов по мере их восхождения к поверхности на глубинах 1-2 км, где пересекается кривая кипения водных флюидов. При вскипании происходит потеря CO_2 , что вызывает увеличение pH, фугитивности кислорода и снижение фугитивности серы. В результате происходит сдвиг стабильности минерал-гидротермы в направлении кристаллизации адуляра (отмечаемого в ассоциации с золотом в прожилках) и отложение селенидов.

Высокосернистые системы (Кериго) характеризуются низкими pH, минимальными фугитивностями кислорода и максимальными фугитивностями серы и теллура, что приводит к сильному гидролитическому выщелачиванию с образованием ноздреватого кварца и флюидо-эксплозивных брекчий. Золото тесно ассоциирует с теллуридами, а также с высокосернистыми минералами – энаргитом, люционитом, часто в парагенезисе с пиритом, теннантит-тетраэдритом, борнитом и халькозинном. Термодинамические условия высокосернистого типа приводили к смене выщелоченного кремнезёма и последующему отложению кварц-алунитовых и кварц-каолининовых ассоциаций.

Промежуточносернистый тип эпиптермальных систем региона (Радужное месторождение), имея сходство и с низкосернистым и высокосернистым типами, обладает медианными термодинамическими параметрами между крайними членами и несёт переходные черты от ранней стадии высокосернистого типа к поздней стадии низкосернистого. По этой причине в рудах месторождения присутствуют алуляр, а также селениды и теллуриды. К нему применима модель термодиффузии в жидкой среде по [Hildreth, 1981; Monecke et al., 2017], объясняющая особенности флюидного режима рудогенерирующих трахириолит-порфиоров хуламского комплекса и трансформацию его магматогенных флюидов в гидротермальные растворы с преобладанием таких летучих компонентов как HCl , B_2O_3 , H_2O , CO_2 и SO_2 , участвовавших в переносе металлов, в том числе Au и Ag. Модель термодиффузии помогает объяснить возникновение и флюидо-эксплозивных брекчий, присутствующих на месторождении, обильную баритизацию, адуляризацию и каолинизацию вмещающих пород.

Следует отметить, что Большой Кавказ не ограничивается перспективами эпиптермального золото-серебряного оруденения юрского структурного этажа. Более молодое золото-серебряное оруденение может быть обнаружено в пределах Танадонского рудного узла, связанного с теплинским плиоцен-плейстоценовым магматическим комплексом. Именно в этой части Танадон-Сонгутидон-Казбекского рудного района развиты периферические части порфировой системы, благоприятной для локализации эпиптермального золото-серебряного оруденения [Парада, 2021].

Выводы

Эпитермальные системы Большого Кавказа связаны с вулcano-плутоническими образованиями повышенной щёлочности, характеризовавшимися различными условиями формирования со специфическими параметрами флюидного режима, обеспечивавшими формирование всех ныне выделяемых типов: низкосернистых, умеренно-сернистых и высокосернистых. Для каждого типа эпитермальных золото-серебряных систем характерны свои специфические составы руд, околорудных метасоматитов. Термодинамические отличия каждого из выделенных типов весьма контрастны и могут быть использованы при дальнейшей оценке эпитермального золото-серебряного оруденения. Источник серы, углерода, кислорода и металлов был магматический. Весьма перспективными системами могут стать объекты со вмещения порфирового и эпитермального семейства руд.

Литература

1. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Борисовский С.Е. Золотоносность раннеюрских вулканитов активной окраины Скифской плиты. // В сб.: Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений. – М.: ИГЕМ РАН, 2013. – С. 20.
2. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Кондрашов И.А. Раннекиммерийские вулcano-плутонические образования из района Садонской группы полиметаллических месторождений Северной Осетии: геодинамическая типизация и минерогения. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №2. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001
3. Гусев А.И. Минеральный состав и физико-химические особенности эпитермального золото-серебряного Радужного месторождения (Большой Кавказ). // XI Международная научно-практическая конференция «Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы». – Пенза: Наука и Просвещение, 2018. – С. 43–47.
4. Гусев А.И. Тьдугемская эпитермальная магмо-рудно-метасоматическая система юго-восточной части Горного Алтая. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2019. – №3(39). – С. 85–93. DOI: 10.20403/2078-0575-2019-3-85-93
5. Жариков В.А. Кислотно-основные характеристики минералов. // Геология рудных месторождений. – 1967. – №5. – С. 75–89.
6. Кайгородова Е.Н., Чугаев А.В., Лебедев В.А., Садасюк А.С., Гареев Б.И., Баталин Г.А. Ау-сульфидное месторождение Радужное (Северный Кавказ): геологическое строение, минералогические особенности и источники вещества. // Геология рудных месторождений. – 2022. – Т. 64. №5. – С. 423–450. DOI: 10.31857/S0016777022040037
7. Караганов В.В. Итоги работы государственной геологической службы за 2001 г. и приоритетные направления деятельности МПР России в развитии минерально-сырьевой базы России и ее континентального шельфа в 2002 г. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2002. – №1-2. – С. 4–11.
8. Парада С.Г. Перспективные типы месторождений и рудопроявлений золота Юга России. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №1. – С. 57–72.
9. Парада С.Г. Рудно-магматические системы медно-порфирового типа Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.011
10. Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Заалишвили В.Б., Бетров З.С. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. №1. – С. 46–51. – DOI 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51
11. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007

12. 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.
13. Choi S.-G., Ryu I., Pak S.J. et al. Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. // *Ore Geology Reviews*. – 2005. – Vol. 26. – pp. 115-135.
14. 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. – pp. 1827-1893.
15. Hedenquist J.W., Izawa E., Arribas A., White N.C. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. // *Resource Geology Special Publication Number 1*. –Tokyo, 1996. – 368 pp.
16. 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.
17. Holley E.A., Monecke T., Bissig T., Reynolds T.J. Evolution of High-Level Magmatic-Hydrothermal Systems: New Insights from Ore Paragenesis of the Veladero High-Sulfidation Epithermal Au-Ag Deposit, El Indio-Pascua Belt, Argentina. // *Economic Geology*. – 2017. – Vol. 112(7). – pp. 1747-1771.
18. Monecke T., Bissig T., Reynolds T.J. Evolution of High-Level Magmatic-Hydrothermal Systems: New Insights from Ore Paragenesis of the Veladero High-Sulfidation Epithermal Au-Ag Deposit, El Indio-Pascua Belt, Argentina. // *Economic Geology*. – 2017. – Vol. 112(7). – pp. 1747-1771.
19. Porter T.M. Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: A global perspective. – Adelaide: PGC Publishing, 2000. – 350 pp.
20. Porter T.M. Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: A global perspective. – Adelaide: PGC Publishing, 2002. – 377 pp.
21. Richards J.P. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. // *Nat. Geosci*. – 2013. – Vol. 6. – pp. 911–916.
22. Scott S.D., Barnes H.L. Sphalerite geothermometry and geobarometry. // *Economic Geology*. – 1971. – Vol. 66. – pp. 653–669.
23. 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. 1-29.
24. Zhong J., Chen Y.-J., Qi J.-P., Chen J., Li J. Geology, fluid inclusion and stable isotope study of the Yueyang Ag-Au-Cu deposit, Zijinshan ore field, Fujian Province, China. // *Ore geology reviews*. – 2017. – Vol. 86. – pp. 254-270.

References

- 1 Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Dokuchaev A.J., Borisovskiy S.E. Gold content of the Early Jurassic volcanic rocks of the active margin of the Scythian Plate. In: *Ore-forming processes: from genetic concepts to the forecast and discovery of new ore provinces and deposits*. Moscow. IGEMRAN, 2013. p. 20. (In Russ.).
2. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Dokuchaev A.Y., Kondrashov I.A. Early Cimmerian volcano-plutonic formations of the Sadon group of polymetallic deposits in North Ossetia: geodynamic typification and minerageny. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 6–18. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001
3. Gusev A.I. Mineral composition and physico-chemical peculiarity of epithermal gold-silver Raduzhnoe deposit (Great Caucasus). XI International Scientific and Practical Conference “Breakthrough Scientific Research: Problems, Patterns, Prospects”. Penza. Nauka i Prosveshcheniye, 2018. pp. 43-47. (In Russ.)
4. Gusev A.I. The Tydtugem epithermal magma-ore-metasomatic system of the southeast of the Gorny Altai. *Geology and mineral resources of Siberia*. 2019. No.3(39). pp. 85-93. (In Russ.) DOI: 10.20403/2078-0575-2019-3-85-93
5. Zharikov V.A. Acid-base characteristics of minerals. *Geology of ore deposits*. 1967. No.5. pp. 75-89. (In Russ.)

6. Kaygorodova E.N., Chugaev A.V., Lebedev V.A., Sadasjuk A.S., Gareev B.I., Batalin G.A. Au-sulfide deposit Raduzhnoye (Northern Caucasus): geological structure, mineralogical features and sources of matter. *Geology of Ore Deposits*. 2022. Vol. 64. No.5. pp. 423-450. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016777022040037
7. Karaganov V.V. Results of the work of the State Geological Service in 2001 and priority areas of activity of the Ministry of Natural Resources of Russia in the development of the mineral resource base of Russia and its continental shelf in 2002. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2002. No. 1-2. pp. 4-11. (In Russ.)
8. Parada S.G. Promising types of golden deposits and ore manifestations of Russian South. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2017. No.1. pp. 57 – 72. (In Russ.)
9. Parada S.G. Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.3. pp. 129-147. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.011
10. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betzov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016. Vol. 8(1). pp. 46–51. (In Russ.)
11. Chotchaev Kh.O., Burdzieva, O.G., Zaalishvili, V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81–94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007
12. 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.
13. Choi S.-G., Ryu I., Pak S.J. et al. Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. *Ore Geology Reviews*. 2005. Vol. 26. pp. 115-135.
14. 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. pp. 1827-1893.
15. Hedenquist J.W., Izawa E., Arribas A., White N.C. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. *Resource Geology Special Publication Number 1*. Tokyo, 1996. 368 pp.
16. 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.
17. Holley E.A., Monecke T., Bissig T., Reynolds T.J. Evolution of High-Level Magmatic-Hydrothermal Systems: New Insights from Ore Paragenesis of the Veladero High-Sulfidation Epithermal Au-Ag Deposit, El Indio-Pascua Belt, Argentina. *Economic Geology*. 2017. Vol. 112(7). pp. 1747-1771.
18. Monecke T., Bissig T., Reynolds T.J. Evolution of High-Level Magmatic-Hydrothermal Systems: New Insights from Ore Paragenesis of the Veladero High-Sulfidation Epithermal Au-Ag Deposit, El Indio-Pascua Belt, Argentina. *Economic Geology*. 2017. Vol. 112(7). pp. 1747-1771.
19. Porter T.M. Hydrothermal iron oxide copper gold and related deposits: A global perspective. Adelaide: PGC Publishing, 2000. 350 pp.
20. Porter T.M. Hydrothermal iron oxide coppergold and related deposits: A global perspective. Adelaide: PGC Publishing, 2002. 377 pp.
21. Richards J.P. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. *Nat. Geosci*. 2013. Vol. 6. pp. 911–916.
22. Scott S.D., Barnes H.L. Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Economic Geology*. 1971. Vol. 66. pp. 653–669.
23. 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. 1-29.
24. Zhong J., Chen Y.-J., Qi J.-P., Chen J., Li J. Geology, fluid inclusion and stable isotope study of the Yueyang Ag-Au-Cu deposit, Zijinshanorefield, Fujian Province, China. *Ore geology reviews*. 2017. Vol. 86. pp. 254-270.