

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 553.411:553.21/24

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
ЭПИТЕРМАЛЬНЫХ ЗОЛОТО-РУТУТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Е. А. Наумов, А. А. Боровиков, А. С. Борисенко, М. В. Задорожный, В. В. Мурзин*

Институт геологии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

* *Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620151, Екатеринбург, Почтовый пер., 7, Россия*

Методами термобарогеохимии (термо-, криометрия, КР-спектроскопия газовой фазы) изучены флюидные включения в минералах руд более чем 22 золото-ртутных месторождений (Средняя Азия, Урал, Восточные Саяны, Горный Алтай, Северо-Восток России, Монголия и т. д.). Установлено, что золото-ртутные месторождения относятся к низкотемпературным (280—50 °С) гидротермальным образованиям, формирование которых происходило в близповерхностных (вулканогенно-гидротермальные) или условиях малых глубин (плутоногенно-гидротермальные) при давлениях ниже 500—600 бар. Вулканогенно-гидротермальные Au-Hg месторождения формировались при участии низко концентрированных (10—0,5, реже до 14 мас. %) хлоридных или хлоридно-бикарбонатно-натриевых гидротермальных флюидов с малоплотной азотно-углекислотной ($\pm \text{CH}_4$) газовой фазой. Рудообразующие флюиды плутоногенно-гидротермальных месторождений отличались более широкими вариациями концентраций (от 0,2 до 25 мас. %), сложным солевым составом (NaCl, CaCl₂, FeCl₂, KCl и др.), плотной существенно углекислотной газовой фазой ($\text{CO}_2 > \text{N}_2 > \text{CH}_4$) и по своему солевому составу и восстановленному характеру обнаруживают сходство с магматическими флюидами. Особенностью флюидного режима рудообразующих систем вулканогенно- и плутоногенно-гидротермальных Au-Hg месторождений является гетерогенное состояние рудообразующих флюидов. В целом в конкретных рудных районах физико-химические параметры формирования вулканогенно- и плутоногенно-гидротермальных Au-Hg месторождений близки к параметрам образования, аналогичным по типу Au-Sb, Sb и Sb-Hg месторождений. Результаты проведенных термобарогеохимических исследований подчеркивают полигенный характер Au-Hg месторождений.

Золото, ртуть, золото-ртутные месторождения, флюидные включения, состав и концентрация рудообразующих флюидов, гидротермальное рудообразование.

PHYSICOCHEMICAL CONDITIONS OF FORMATION OF EPITHERMAL GOLD-MERCURY DEPOSITS

E. A. Naumov, A. A. Borovikov, A. S. Borisenko, M. V. Zadorozhnyi, and V. V. Murzin

Fluid inclusions in minerals from more than 22 Au-Hg deposits (Central Asia, Urals, East Sayan, Gorny Altai, northeastern Russia, Mongolia, etc.) have been examined by thermobarogeochemical methods (thermo- and cryometry, Raman spectroscopy of gas phase). It has been established that Au-Hg deposits are low-temperature (280–50 °C) hydrothermal objects which formed in subsurface (volcanogenic-hydrothermal) or shallow-depth (plutonogenic-hydrothermal) conditions, under pressures lower than 500–600 bars. The volcanogenic-hydrothermal Au-Hg deposits were formed with participation of weakly concentrated (10–0.5, less frequently, to 14 wt. %) chloride or chloride-bicarbonate-sodium hydrothermal fluids with low-density N₂-CO₂ ($\pm \text{CH}_4$) gas phase. The ore-forming fluids of plutonogenic-hydrothermal deposits are characterized by wider variations in concentration (from 0.2 to 25 wt. %), complex salt composition (NaCl, CaCl₂, FeCl₂, KCl, etc.), and dense high-CO₂ gas phase ($\text{CO}_2 > \text{N}_2 > \text{CH}_4$); in salt composition and reduced character they are similar to magmatic fluids. The characteristic feature of the fluid regime of ore-forming systems of volcanogenic- and plutonogenic-hydrothermal Au-Hg deposits is the heterogeneous state of ore-forming fluids. In particular ore districts, the physicochemical parameters of formation of volcanogenic- and plutonogenic-hydrothermal Au-Hg deposits are generally close to the parameters of formation of similar Au-Sb, Sb, and Sb-Hg deposits. The results obtained from the thermobarogeochemical study stress the polygene nature of Au-Hg deposits.

Gold, mercury, Au-Hg ore deposits, fluid inclusions, composition and concentration of ore-forming fluids, hydrothermal ore deposition

Месторождения золото-ртутного геолого-промышленного типа выдвинулись в последние годы в число одних из наиболее перспективных золоторудных объектов на территории России. В ряде золоторудных провинций мира уже выявлены и успешно эксплуатируются достаточно крупные объекты такого типа: Карлин, Кортец, Белл (Невада); Ноксвилл, Нью-Идрия (Калифорния); Хемло (Канада); Алшар (Македония); Воронцовское (Урал); Кючюс, Галхая, Светлое (Якутия); Тас-Урях (Хабаровский край); Кончоч, Джалама (Средняя Азия); Мурзинское (Алтай); Солонешное, Тунгинский рудный узел (Забайкалье) и многие другие [1—10 и др.]. Золото-ртутные месторождения,

несмотря на поразительное сходство своего минерального состава (Au, пирит, арсенопирит, киноварь, реальгар, антимонит, минералы Tl, барит и др.) и геохимических особенностей руд (Au, Hg, As, Sb, Tl, Ba и др.), являются конвергентными образованиями, относящимися к различным формационным типам, сформировавшимся в ходе развития различных гидротермальных рудообразующих систем: вулканогенно-гидротермальных и плутоногенно-гидротермальных. Более определенно сложились представления о вулканогенно-гидротермальных рудообразующих системах Au-Hg месторождений. Основываясь на данных [1, 7, 11 и др.], зарождение и развитие таких систем протекает в обстановках внутривулканогенного рифтогенеза в генетической связи с субаэральными базальт-андезит-риолитовым или трахибазальт-трахиандезит-трахириолитовым вулканизмом (Невада, Калифорния в США, Македония, Турция, Иран, Новая Зеландия, Монголия и др.) Производными таких рудообразующих систем являются золото-серебряное, золото-ртутное, сурьмяно-ртутное и флюоритовое оруденения. В таких системах выделяется несколько различных уровней рудоотложения: поверхностный — травертины, металлоносные (Au, Hg, Sb, As, Tl, Ba) осадки озер (Новая Зеландия, Калифорния, Турция, Чили), приповерхностный (Au-Hg месторождения Карлин, Кортес, Белл и др. в Неваде, Нью-Идрия и Ноксвилл в Калифорнии, Алшар в Македонии, Заршуран в Иране, Унэгэн Дэл в Монголии и др.) и умеренно глубинный (Au-Hg и Au-Ag оруденение Невады, Турции, Ирана и др.). Зарождение и развитие плутоногенно-гидротермальных рудообразующих систем связано со становлением габбро-диорит-гранитных или сиенит-граносиенит-гранитных комплексов. Золото-ртутная минерализация в таких рудообразующих системах пространственно и генетически сопряжена с двумя комплексами гидротермального оруденения: 1) Au-Cu — скарновым, Au-Cu — кварцево-жильным, золото-ртутным и сурьмяно-ртутным и 2) золото-сульфидно-кварцевым (арсенопиритовый тип), золото-сурьмяным и золото-ртутным, с которыми она образует вертикальные и латеральные (возрастные и фациальные) генетические ряды рудных формаций, по [13].

Для золото-ртутных месторождений прослеживается единая направленная последовательность развития гидротермального процесса, как правило, выделяются три его стадии: 1) гидротермального изменения пород, 2) золото-полисульфидная и 3) антимонит-киноварная. Первая стадия представлена зонами низкотемпературных метасоматитов (листвениты, березиты, окварцованные известняки, джаспероиды, аргиллизиты) с вкрапленностью сульфидов — пирита и арсенопирита, которые характеризуются повышенным содержанием золота (до $n \cdot 10$ —1000 г/т). Вслед за метасоматитами формируется золото-полисульфидная ассоциация минералов, представленная тонкими кварцевыми или кварц- или халцедон-карбонатными жилами, прожилками (зоны штокверков) с золотом, пиритом, арсенопиритом (кристаллы игольчатого габитуса), халькопиритом, Hg-сфалеритом, галенитом, колорадоитом, ртутистыми тетраэдритом и тенантитом и сульфосолями Cu, Fe, Pb, Sb, As, Tl. Процесс рудоотложения заканчивается образованием кварц-карбонатных жил и прожилков с ассоциацией простых сульфидов Fe, Sb, Hg, As — пирит, киноварь, метацинабарит, антимонит, реальгар и аурипигмент. На некоторых месторождениях (Карлин) наблюдается еще более поздняя минеральная ассоциация, представленная кварц-карбонатными прожилками с баритом и иногда с пиритом, галенитом и сфалеритом.

Для расшифровки генезиса этого нового типа золоторудных месторождений весьма важно на данном этапе изучение флюидного режима гидротермальных рудообразующих систем и физико-химических параметров и главных факторов рудоотложения.

ИЗУЧЕНИЕ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Исследование флюидных включений было проведено с применением комплекса методов исследования флюидных включений в минералах: гомогенизации (оценка температур минералообразования) [14, 15], криометрии (определение солевого состава и концентрации растворов) [16, 17], рамановской спектроскопии (изучение состава газовой фазы). Исследование температур гомогенизации флюидных включений проводилось в термокамере конструкции Ю. А. Долгова—Л. Ш. Базарова [18], криометрические исследования — в криокамере, разработанной в ОИГГМ СО РАН, изучение газовой фазы на КР-спектрометре Ramanog U-1000 с использованием Ar лазера.

Флюидные включения изучались главным образом в кварце, а также в карбонатах. Жильный кварц золото-ртутных месторождений представлен кристаллическим, криптокристаллическим, халцедоновидными кварцем или колломорфными разновидностями кремнезема. В рудах вулканогенно-гидротермальных Au-Hg месторождений широко распространен криптокристаллический кварц, а также халцедон и опал. Халцедоновидный кварц участвует в строении прожилков и брекчий и часто совместно с сульфидами (пирит, арсенопирит, киноварь, антимонит и др.) отлагается после шестоватого кристаллического кварца, нарастающего на обломки пород, и сам пересекается прожилками, сложенными щетками и друзами шестоватых или изометричных кристаллов кварца. Для плутоногенно-гидротермальных Au-Hg месторождений характерен средне-, мелкозернистый кристаллический кварц, развивающийся в виде прожилков среди гидротермально измененных пород.

Кварц рудных жил вулканогенно-гидротермальных месторождений (Тунгинский рудный узел в Забайкалье, Au-Hg месторождения Южно-Гобийского золоторудного пояса и др.) содержит одно- и двухфазные включения водно-солевых растворов, а также газовые однофазные и существенно газовые двухфазные включения с небольшим количеством раствора. Для рудного кварца плутоногенно-гидротермальных месторождений (Воронцовское, Лялинское на Урале, Кючюс, Галхая в Якутии, Кундат и Тибик в Кузнецком Алатау и др.), кроме одно- и двухфазных включений водно-солевых растворов, характерны двух-, трехфазные включения, содержащие жидкую при комнатной температуре CO_2 с небольшим количеством газа и (или) раствора.

В кварце ранних минеральных ассоциаций обычно наблюдаются шлейфы мелких (менее 5 мкм) вторичных одно-, двухфазных водно-солевых, а также одно- и двухфазных существенно газовых флюидных включений или включений с жидкой CO_2 . Сравнительно крупные (от 10 мкм и более) первичные и псевдвторичные включения встречаются под кристаллическими гранями раннего кварца в редких жеодах. В шестоватом и зернистом кварце более поздних генераций, кристаллы которого часто имеют зональное строение, содержатся крупные (более 10 мкм) водно-солевые, газовые и углекислотные первичные включения, располагающиеся по зонам роста отдельных кристаллов.

На изученных золото-ртутных месторождениях общий температурный интервал гомогенизации флюидных включений в минералах лежит в пределах $270\text{--}50^\circ\text{C}$ (табл. 1, рис. 1). Двухфазные водно-солевые включения в кварце руд вулканогенно-гидротермальных Au-Hg месторождений гомогенизируются в интервале $270\text{--}75^\circ\text{C}$, в замороженных растворах этих включений эвтектики плавятся при $-50\text{...}-10$, лед при $-6,5\text{...}-1,6^\circ\text{C}$, что говорит об их незначительной концентрации (9,6—2,6 мас. %) и хлоридно-бикарбонат-натриевом, хлоридно-натриевом и реже хлоридно-натриево-кальциевом составах. В кварце руд плутоногенно-гидротермальных Au-Hg месторождений двухфазные водно-солевые включения гомогенизируются при близких температурах, в интервале $270\text{--}50^\circ\text{C}$, и содержат хлоридно-натриево-кальциевые растворы низкой и умеренной концентрации (25—0,5 мас. %) с температурами плавления эвтектик $-79\text{...}-21^\circ\text{C}$, льда $-28\text{...}-1,0^\circ\text{C}$. Низкие температуры плавления эвтектик $-62\text{...}-64^\circ\text{C}$, устанавливаемые в некоторых случаях, свидетельствуют о присутствии в составе растворов FeCl_2 [19].

Глубокое охлаждение газовых и существенно газовых включений в минералах вулканогенно-гидротермальных Au-Hg месторождений (Тунгинский рудный узел, Унэгэн Дэл, Торомхонсайр и др.) не приводит к конденсации газовой фазы, и только в особенно крупных включениях (20—30 мкм) иногда отмечается выпадение крайне незначительного количества твердой CO_2 , которая сублимирует при температурах ниже -57°C . Исследование газовой фазы таких флюидных включений методом КР-спектроскопии лишь в редких случаях выявляет присутствие ощутимых количеств CO_2 (Тунгинский рудный узел, табл. 2), таким образом, газовая фаза гетерогенных флюидов

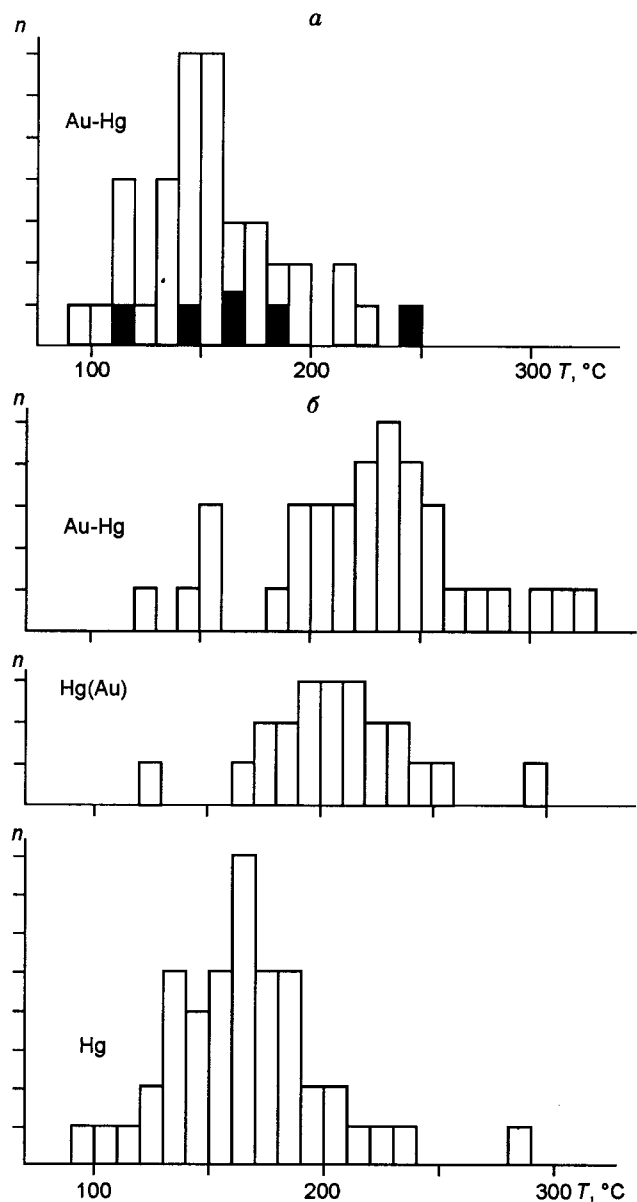


Рис. 1. Температуры гомогенизации флюидных включений в минералах руд золото-ртутных, золотосодержащих ртутных и ртутных месторождений.

a — средние значения температур гомогенизации из табл. 1, черным показаны данные, относящиеся к вулканогенно-гидротермальным месторождениям; *б* — данные, опубликованные в литературе, в том числе и авторов статьи.

Таблица 1. Результаты изучения флюидных включений в минералах руд Au-Hg месторождений

Месторождение	Минерал или ассоциация	Температура, °C			Концентр. в мас. % NaCl-экв.
		гомоген.	пл. эвт.	пл. льда	
<i>Вулканогенно-гидротермальные Восточное Забайкалье</i>					
Тунгинский р.у.	Кварц-пирит-марказит	145—75	Не опр.	5	7,9
<i>Монголия: Южно-Гобийский пояс</i>					
Унэгэн Дэл	Кварц-антимонит	175—150	-23...-21	-3,1...-1,6	5,1—2,6
	Кварц-пирит	165—155	-50...-10	-3,0...-1,6	4,9...2,6
Хара Нойон	»	150—145	-50...-21	-2,4...-2,0	3,9—3,4
Орцог-2	»	210—160	Не опр.	-2,5...-2,0	3,4—4,0
Торомхонсайр	»	270—225	-40...-34	-6,5...-4,5	9,8—7,2
<i>Плутоногенно-гидротермальные Au-Hg месторождения Урал</i>					
Воронцовское	Карбонат-кварц-пирит-арсен.	150—130	-49	-6...-4	9,2—6,4
	Карбонат-пирротин-пирит	140—130	-55	-5...-4	7,9—6,4
	Карбонат-пирит-сфалерит	115—110	-46	-5...-4	7,9—6,4
	Карбонат-пирит-реальгар	<100	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Лялинское	Кварц I-киноварь-золото	135—125	-34...-38	-0,8...-4,6	7,2—1,5
	Кварц II-Hg-сфалерит-блеклая руда-пирит	165—135	-34...-38	-2...-4	6,4—1,4
<i>Якутия</i>					
Кючюс	Кварц-антимонит	160—145	-38...-34	-3...-1	4,9—1,7
	Кварц	135—100	Не опр.	-3...-0,5	4,9—0,8
Светлое	Кварц-Ag-сульфосоли	215—145; <100	-64...-62	-10...-4	14—6,4
	Кварц	150—130; <100	-64...-62	-3...-0,5	5—0,8
Левосакыджинское	Кварц	240—190	Не опр.	-2...-0,9	3—1,5
	Флюорит	190—160	»	-3,8...-2,7	6—4,5
	Кальцит	130—110	»	-0,9...-0,2	1,5—0,5
<i>Хабаровский край</i>					
Тас-Урях	Кварц	160—150	-24...-23	-1,5	2
<i>Восточное Забайкалье</i>					
Майское	Кварц-антимонит	200—150	-54...-50	-4...-3	6,4—4,9
<i>Алтай</i>					
Мурзинское	Кварц	215—130	-64...-54	-11...-3	15—4,9
	Кварц-гематит	170—130	-62...-60	-7...-1	10,5—1,7
<i>Тянь-Шань</i>					
Терек Сай	Кварц-антимонит-золото	250—130	-66...-64	-16...-15	20—19
	Кварц-антимонит	194—100	-22...-21	-8...-6	12—10
Джалама	Кварц-карбонат-реальгар	130—50	-54...-50	-5...-4	7,9—6,4
<i>Кузнецкий Алагау</i>					
Кундат	Кварц-антимонит-пирит	160—130	-50...-49	-10...-2	14—3,3
Тибикское	Кварц-антимонит-реальгар	145—120	-55	-7,5...-1	11—1,7
Юзикское	Кварц I-карбонат-графит	245—185	-62...-60	-18...-14	21,2—17,9
	Кварц II-карбонат-золото	175—150	-63...-60	-17...-12	21,2—15,0
<i>Восточный Саян</i>					
Зеленое	Кварц-пирит	270—175	-54,2...-52	-28...-11,9	25—16
Южное	»	190—105	-23...-21	-4...-0,5	6,4—0,7*
<i>Монгольский Алтай</i>					
Сагсайское	Кварц-сидерит-Hg-тетраэдрит	160—115	-66...-50	-24...-7	23—10,5
Кобдо Гол	Кварц I-ферберит	170—125	-21	-5...-4	7,9—6,4
	Кварц II-халькопирит	200—190	-79...-76	-50 лед	37
	Кварц III-шеелит-антимонит	140—160	-21	-4...-0,1	4,9—0,2

Таблица 2. Результаты КР-спектроскопического анализа газовой фазы флюидных включений (в мольных %)

Месторождение	Фазовый состав включений*	$T_{\text{плав}} \text{ CO}_2$ в °С	$T_{\text{гомоген}}^{**} \text{ CO}_2$ в °С	CO ₂	N ₂	CH ₄
Кючюс	Г + Жр-р			45,7	51,5	2,8
	Г + Жр-р			70,0	29,0	1,0
	Г			100	0	0
Галхая	Г + Жр-р			56,1	0	43,9
	Г + ЖСО ₂ + Жр-р	-58	+15(ж)	97,9	1,7	0,4
	ЖСО ₂ + Жр-р	-58,5	+13(ж)	94,7	4,0	1,3
Тибикское	Г + Жр-р			97,9	0	2,1
	Г + ЖСО ₂ + Жр-р	-59	+21(ж)	88,4	11,6	0
Кундат	Г + ЖСО ₂ + Жр-р	-57,8	+29(ж)	99,8	0	0,2
Сагсайское	Г + Жр-р			88,6	10,8	0,6
	Г + ЖСО ₂ + Жр-р	-58	+24(ж)	99,1	0,9	0
	ЖСО ₂ + Жр-р	-58	-2(ж)	98,5	1,1	0,4
Светлое	Г + Жр-р			7,5	75,4	17,1
	Г + Жр-р			20,0	71,1	8,9
Мурзинское	Г + Жр-р			35	59,3	5,7
	Г + Жр-р			7,5	75,4	17,1
	Г + Жр-р			39,1	60,9	0
	Г + Жр-р			35,0	59,3	5,7
	Г + Жр-р			100	0	0
Терек Сай	Г + Жр-р			57,2	0	42,8
	Г + Жр-р			100	0	0
Майское	Г + Жр-р			97,0	0	3,0
Джалама	Г + Жр-р			100	0	0
	Г + Жр-р			97,8	0	2,2
	Г + Жр-р			88,4	11,6	0
Тунгинский р.у.	Г			100	0	0

* Г+Жр-р — двухфазные водно-солевые включения (раствор > газ); Г + ЖСО₂ + Жр-р — трехфазные включения с жидкой СО₂ (жидкая углекислота > раствор+газ); ЖСО₂+Жр-р — двухфазные включения с жидкой СО₂ (жидкая углекислота > раствор); Г — двухфазные существенно газовые (газ > раствор).

** Гомогенизация СО₂ в жидкость (ж).

Au-Hg вулканогенно-гидротермальных месторождений представлена в основном парами воды иногда с примесью СО₂. На Au-Hg месторождениях плутоногенно-гидротермального типа (Галхая, Сагсайское, Воронцовское и др.) жидкая углекислота, содержащаяся во включениях, плавится при -62...-57 °С и гомогенизируется в жидкость при -2...+31 °С. При температурах гомогенизации двухфазных водно-солевых включений в таких газовых включениях, содержащих СО₂, развивается давление более 510—210 бар [20]. По данным КР-спектроскопического анализа (см. табл. 2), включения с жидкой СО₂ в минералах плутоногенно-гидротермальных Au-Hg месторождений представлены преимущественно СО₂ с примесью N₂ (до 11,6 мол.%) и CH₄ (до 1,25 мол.%). В то же время газовая фаза в двухфазных водно-солевых включениях, сосуществующих с включениями жидкой СО₂, обогащена N₂ (до 71,1 мол.%) и CH₄ (до 43,9 мол.%). На большинстве других месторождениях того же типа (Кючюс, Светлое, Тас-Урях и др.), где в

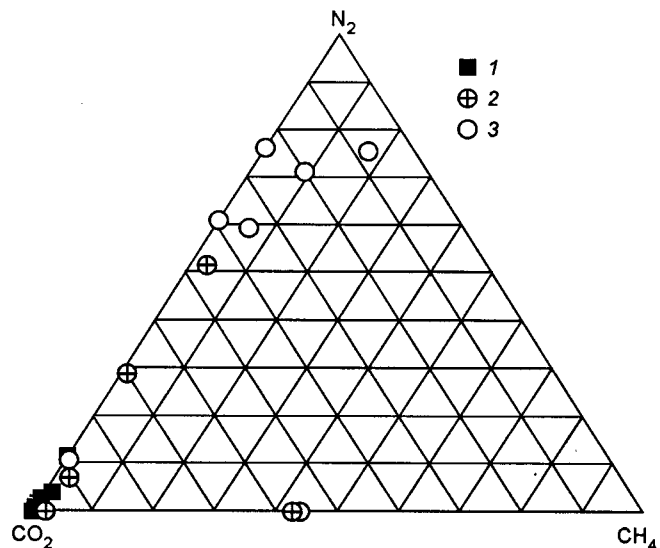


Рис. 2. Состав газовой фазы флюидных включений в минералах руд Au-Hg месторождений вне районов проявления вулканизма (по данным КР-спектроскопии).

1 — существенно газовые флюидные включения с жидкой СО₂; 2 — двухфазные включения, сосуществующие с включениями с жидкой СО₂; 3 — двухфазные включения на месторождениях, где не обнаружены включения с жидкой СО₂.

изученных образцах не было зафиксировано наличие включений с жидкой CO_2 , газовая фаза двухфазных водно-солевых включений также содержит значительную примесь N_2 (до 75,4 мол.%) и CH_4 (до 17,1 мол.%) (см. табл. 2, рис. 2). Таким образом, рудообразующие флюиды Au-Hg вулканогенно-гидротермальных месторождений являются более окисленными по сравнению с содержащими метан рудообразующими флюидами Au-Hg плутогенно-гидротермальных месторождений.

Наличие в минералах руд Au-Hg месторождений включений с жидкой CO_2 , а также существенно газовых ($\text{H}_2\text{O} \gg \text{CO}_2$), наряду с водно-солевыми включениями указывает на гетерогенное состояние рудообразующих флюидов. При формировании вулканогенно-гидротермального Au-Hg оруденения рудообразующий флюид вскипает в близповерхностной обстановке с обособлением малоплотной парогазовой фазы. Для формирования плутогенно-гидротермального Au-Hg оруденения характерна дегазация флюидов с обособлением существенно углекислотной газовой фазы ($\pm \text{CH}_4$ и N_2), что в принципе свидетельствует о больших давлениях газонасыщенного рудообразующего флюида и большей глубине формирования этого типа Au-Hg оруденения по сравнению с вулканогенно-гидротермальным.

ВЫВОДЫ

Золото-ртутные месторождения относятся к низкотемпературным гидротермальным образованиям, формирование которых происходило в близповерхностных (вулканогенно-гидротермальные) условиях или условиях малых глубин (плутогенно-гидротермальные) при давлениях ниже 500—600 бар и участии низко- и умеренно концентрированных (0,5—10, реже 15—23 мас.%) растворов с метан-азотно-углекислотной ($\text{CO}_2 > \text{N}_2 > \text{CH}_4$) или углекислотно-паровой газовой фазой. Этот вывод основывается на данных термобарогеохимических исследований по 22 изученным авторами месторождениям и проявлениям (Кючюс, Левосакыджинское в Якутии, Воронцовское, Лялинское на Урале, Тас-Урях в Сетте-Дабане, Мурзинское, Сагсайское, Юзикское, Кундат, Тибикское и др. в западной части Алтае-Саянской области, Зеленое в Восточном Саяне, Унэгэн Дэл, Орцог и др. в Монголии, Джалама в Киргизии и т. д.), а также на литературных данных [1, 4, 7, 12, 21—26]. По классификации В. Ю. Прокофьева [27], рассматриваемые месторождения формируются в условиях открытых или полуоткрытых рудообразующих систем. Температуры образования руд Au-Hg месторождений в целом близки — 270—50 °С (см. табл. 1). Для многих из них устанавливается направленное снижение температур минералообразования от ранних стадий к поздним. Более существенные различия устанавливаются в составе и концентрации минералообразующих растворов. Для вулканогенно-гидротермальных месторождений характерны, как правило, низкоконцентрированные растворы (10—0,5, реже до 14 мас.%) хлоридные или хлоридно-бикарбонатно-натриевые растворы с малоплотной газовой фазой. Причем для более низкотемпературных объектов (<150—170°) характерны и более низкоконцентрированные растворы (0,5—7 мас.%). На ряде месторождений, формировавшихся при более высоких температурах, отмечаются явления вскипания растворов с обособлением газовой фазы ($\text{H}_2\text{O} \gg \text{CO}_2$). Плутоногенно-гидротермальные месторождения отличаются более широкими вариациями концентрации рудообразующих растворов от 0,2 до 25 мас.%, более сложным солевым составом (NaCl , CaCl_2 , FeCl_2 , KCl и др.) и существенно углекислотной газовой фазой ($\text{CO}_2 > \text{N}_2 > \text{CH}_4$). Во флюидных включениях нередко отмечается фаза жидкой углекислоты (Сагсайское, Левосакыджинское, Тибикское, Кундатское и др.), что свидетельствует о более высоких давлениях гидротермальных растворов (до 510 бар). Для месторождений, руды которых представлены парагенезисами золота, Hg-блеклой руды, Hg-сфалерита, арсенидов Ni, Co и Fe, барита (Сагсайское в Монголии, Юзикское в Кузнецком Алатау, Динамитное, Зеленое в Восточном Саяне, Мурзинское на Алтае и др.) характерны высокие концентрации (до 10—25 мас.%) и существенно $\text{CaCl}_2 + \text{FeCl}_2 + \text{NaCl}$ солевой состав. Золото-ртутные руды, представленные антимонитом, киноварью, реальгаром и аурипигментом, пиритом и арсенопиритом, отлагались из растворов с концентрацией от 0,5 до 5—7, реже 10—14 мас.% и $\text{NaCl} + \text{KCl}$ или $\text{NaCl} + \text{NaHCO}_3$ солевого состава с существенно углекислотной или углекислотно-азотной ($\pm \text{H}_2\text{S}$) газовой фазой. Типичны процессы гетерогенизации флюида с обособлением существенно газовой фазы ($\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{N}_2$).

Особенностью развития рудообразующих систем вулканогенно- и плутогенно-гидротермальных месторождений является гетерогенное состояние рудообразующих флюидов. Причем для близповерхностных вулканогенно-гидротермальных месторождений гетерогенизация флюидов связана с кипением растворов в условиях низких давлений и обособлением малоплотной окисленной парогазовой фазы, а на плутогенно-гидротермальных месторождениях, гетерогенизация рудообразующих флюидов обусловлена дегазацией и обособлением плотной газовой фазы, состоящей из CO_2 с существенной примесью N_2 и CH_4 . В последнем случае с этим процессом связано понижение окислительно-восстановительного потенциала и возрастание значения pH водно-солевой части гетерогенных минералообразующих флюидов в результате перераспределения CO_2 и CH_4 между их

газовой составляющей и раствором [28]. Уровень гетерогенизации флюидов может служить геохимическим барьером для осаждения золота. В целом флюиды вулканогенно-гидротермальных Au-Hg месторождений содержат незначительное количество растворенных газов и являются более окисленными по сравнению с рудообразующими флюидами плутоногенно-гидротермальных Au-Hg месторождений, что свидетельствует о более глубоких условиях формирования последних.

Исследования флюидного режима рудно-магматических систем Au-Cu геохимического профиля, продуктами которых являются золото-медно-порфировые, золото-скарновые, Au-Cu-кварцево-жильные и плутоногенные золото-ртутные месторождения, позволили установить общую направленность изменения состава гидротермальных флюидов во времени для разных уровней рудно-магматических систем [27—35 и данные авторов]. На глубоких (корневых) уровнях таких систем в минералах ранних стадий (скарны, апоскарновые метасоматиты, высокотемпературные халькопирит-пирротиновые руды), как правило, устанавливаются флюидные включения четырех типов: 1) многофазные (раствор + NaCl + KCl + X фаза + газ); 2) двух- или трехфазные (раствор < газ + CO₂); 3) газовые (CO₂); 4) смешанного типа (м-ния Синюхинское, Майское, Петрачкова Гора и др.). Это свидетельствует о том, что магматический флюид, отделявшийся от расплава, явно находится в гетерогенном состоянии и был представлен высококонцентрированной (45—30 и более мас. % NaCl) водно-солевой фазой и газовой фазой (раствор с концентрацией 10—2 мас. % с переменным содержанием CO₂). В кварце преобладают включения 2 и 3-го типов, в которых углекислота присутствует в сжиженном состоянии при комнатной температуре. Присутствие высокоплотной углекислоты во включениях и растворение кристаллов NaCl на 50—80° выше гомогенизации газовой фазы указывают на высокие давления, превышающие 1,5—2,2 кбар [31, 32]. В кварце более поздних рудных стадий (золото-полиметаллических, золото-висмут-теллуридных) присутствуют в основном двух- (р-р + газ), трехфазовые (р-р + CO_{2(ж)} + газ) включения. Концентрация растворов этих стадий существенно ниже и колеблется от 26 до 0,5 мас. %, солевой состав определяется преобладанием NaCl, KCl, CaCl₂. В составе газовой фазы преобладает CO₂, в меньших количествах отмечается N₂ и CH₄. Явления гетерогенизации флюидов определяются в основном в обособлении газовой (CO₂ > CH₄ > N₂) фазы.

Такая же направленность изменения состава рудообразующих флюидов устанавливается и на высоких (близповерхностных) уровнях Cu-Au рудно-магматических систем, где собственно рудные стадии представлены низкотемпературным золото-ртутным оруденением (м-ния Мурзинское, Юзиковское, Воронцовское, Новолушниковское и др.). Все это наряду с установленной на золото-ртутных месторождениях эндогенной вертикальной зональностью, геохимической общностью близповерхностного низкотемпературного (<280°) золото-ртутного и более высокотемпературного (350—200 °C) Au-Cu-кварцево-жильного оруденения, их тесной пространственной и временной сопряженностью свидетельствует о генетической связи плутоногенного Au-Hg с другими типами Au-Cu- оруденения и принадлежности к единым рудно-магматическим системам.

Таким образом, данные исследования флюидного режима формирования гидротермальных рудообразующих систем Au-Cu геохимического профиля, формирующих Au-Cu-скарновые и Au-Cu-кварцево-жильные месторождения, с которыми предполагается генетическая связь золото-ртутных месторождений, демонстрируют сходство состава и агрегатного состояния высокотемпературных рудообразующих флюидов и гидротермальных растворов плутоногенно-гидротермальных Au-Hg месторождений, расположенных в пределах ареалов предшествующего им Au-Cu оруденения. Это выражается, прежде всего, в их восстановленном характере, повышенной газонасыщенности (CO₂, N₂, CH₄) и особенностях солевого состава, и может указывать на участие магматогенных флюидов в процессах формирования Au-Hg оруденения плутоногенно-гидротермального типа.

Проведенное сопоставление *PT*-условий образования Au-Hg месторождений с Au-Au-Hg, Hg золотосодержащими и Hg месторождениями, а также с Sb и Sb-Hg и различными типами золоторудных месторождений на основе собственных и обширных литературных данных показало, что:

— крупные золото-ртутные месторождения Карлин, Кортцец, Ноксвил и др. (Невада), Миттенберг, Вайч (Австрия), Саламон (Пиренеи), Кончоч (Тянь-Шань), Лухуми (Кавказ) формировались при более высоких температурах, максимальные температуры образования этих золото-ртутных месторождений достигали 300 °C и в среднем составляли 228 °C (см. рис. 1); ртутные месторождения формировались при более низких температурах <250 °C (среднее значение 166 °C), а золотосодержащие (Au < 1—2 г/т), ртутные, занимают в этом отношении промежуточное положение и формируются при температурах <260 °C, среднее значение 210 °C [35—39 и др.];

— Au-Hg месторождения вулканогенно- и плутоногенно-гидротермального типов весьма сходны по *PTX*-условиям формирования с аналогичными типами сурьмяно-ртутных месторождений, хотя и являются несколько более высокотемпературными образованиями (270—50 °C — Au-Hg; 220—50 °C — Sb-Hg);

— сходство составов и концентраций рудообразующих растворов Au-Hg и Sb-Hg месторождений особенно отчетливо проявляется на примере конкретных регионов: Алтай, Тува — концентрированные до 25—27 мас. % хлоридные (CaCl₂, NaCl, FeCl₂, CO₂) растворы; Восточное Забайкалье —

низкоконцентрированные (до 7—8 мас.%) хлоридные или хлоридно-бикарбонатные (NaCl, NaHCO₃, CO₂); Южно-Гобийский золоторудный пояс (Монголия) — низкоконцентрированные (<5 мас.%) хлоридные (NaCl) и т. д. Такие региональные различия состава и концентрации минералообразующих растворов Au-Hg месторождений, как и Sb-Hg, связаны с участием в рудоотложении разных типов экзогенных вод (метеорных, хлоридных рассолов и т. д.) [36, 40];

— другие типы золотого оруденения существенно отличаются от Au-Hg: золото-сурьмяное является более высокотемпературным 320—100 °С, а рудообразующие растворы отличались существенно хлоридно-углекислотным составом (NaCl — 2—10 мас.%, CO₂ — до 20 мас.%) и высокими давлениями до 2 кбар [41—46 и др.]; различные типы вулканогенно-гидротермальных золото-серебряных месторождений отличаются прежде всего более высокими температурами рудообразования до 400 °С и значительными вариациями концентраций рудообразующих растворов, что характерно и для плутоногенных гидротермальных месторождений золота [27, 28, 47—50 и др.].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные термобарогеохимические исследования показали, что вулканогенно- и плутоногенно-гидротермальные Au-Hg месторождения являются низкотемпературными образованиями (<270 °С) и в целом весьма сходны по *PT*-условиям формирования между собой, а также с соответствующими типами сурьмяно-ртутных месторождений. В то же время они существенно отличаются от других типов золотого оруденения — золото-сульфидно-кварцевого, золото-серебряного, золото-сурьмяного, которые являются более высокотемпературными образованиями. Особенности состава гидротермальных растворов золото-ртутных месторождений во многом определяются участием в рудообразовании различных типов экзогенных вод (метеорных, хлоридных рассолов, нефтяных вод и т. д.). Это проявляется в специфике их состава для конкретных регионов, отличающихся своеобразием палеогеологических обстановок формирования золото-ртутных месторождений в близповерхностных условиях. При формировании Au-Hg оруденения одними из главных факторов осаждения Au и Hg являются снижение температуры, давления и гетерогенизация рудообразующих флюидов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 01-05-65096 и 02-05-64795).

ЛИТЕРАТУРА

1. Radtke A. S., Rye R. O., Dickson F. W. Geology and stable isotope studies of the Carlin gold deposits, Nevada // *Econ. Geol.*, 1980, v. 75, № 5, p. 671—672.
2. Harris D. C. The mineralogy and geochemistry of the Hemlo gold deposit, Ontario // *Econ. Geol. Rept., Geol. Surv. Canad.*, 1989, v. 38, p. 1—88.
3. Степанов В. А., Моисеенко В. Г. Геология золота, серебра и ртути, Ч. I. Владивосток, Дальнаука, 1993, 227 с.
4. Мустафин С. К. Золото-сурьмяное оруденение среднеазиатской сурьмяно-рудной провинции: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., ИГЕМ РАН, 1994, 51 с.
5. Percival T. J., Radtke A. S. Sedimentary-Rock-Hosted Disseminated Gold Mineralization in the Alsar District // *Macedonia Canad. Miner.*, 1994, v. 32, p. 649—665.
6. Суплецов В. М. Вкрапленные месторождения Невадийского типа в карбонатных породах Селенняжского кряжа // Геологическое строение и полезные ископаемые Республики Саха (Якутия). Якутск, 1997, с. 34—38.
7. Carlin-type gold deposits field conference / Red. T.B. Thompson. Guidebook Series Guidebook Prepared for the Society of Economic Geologists Field Conference — 16—18 October 1997, 1997, v. 28, 287 p.
8. Mehrabi B., Yardley B.W.D., Cann J. R. Sediment hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran // *Miner. Depos.*, 1999, v. 34, № 6, p. 673—697.
9. Борисенко А. С., Оболенский А. А., Шаров Г. Н. и др. Золото-ртутное оруденение западной части Алтае-Саянской складчатой области: условия образования, закономерности размещения // *Металлогения, нефтегазоносность и геодинамика Северо-Азиатского кратона и орогенных поясов его обрамления. Материалы Всерос. металлоген. совещания. Иркутск, 1998, с. 198—202.*
10. Борисенко А. С., Ковалев К. Р., Бабич В. В. и др. Ртутистое золото Салаира и проблема поисков его коренных источников // *Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых Сибири. (Материалы конференции, посвященной 70-летию со дня открытия кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых в Томском политехническом университете (институте), 100-летию геологического образования в Сибири и 300-летию геологической службы России, 25—27 сентября 2000 г.) Томск, 2000, с. 301—305.*

11. Berger B. R., Eimon P. I. Comparative models of epithermal precious deposits: American Institute of Mining Engineers. Preprint 82—13, 1982, 36 p.
12. Tuisuz N., Аксау М. The gold occurrences in volcanic arc of the eastern Pontides, NE-Turkey // Miner. Deposits: Research and Exploration, Proceedings of the 4-th SGA, Meeting 1997, p. 331—334.
13. Константинов Р. М. Основы формационного анализа гидротермальных рудных месторождений. М., Наука, 1973, 213 с.
14. Ермаков Н. П. Геохимические системы включений в минералах. М., Недра, 1972, 376 с.
15. Рёддер Е. Флюидные включения в минералах. М., Мир, 1987, т. 1, 2, 632 с.
16. Борисенко А. С. Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика, 1977, № 8, с. 16—27.
17. Борисенко А. С. Анализ солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. М., Недра, 1982, с. 37—47.
18. Долгов Ю. Ф., Базаров Л. Ш. Камера для исследования включений минералообразующих растворов и расплавов при высоких температурах // Минералогическая термометрия и барометрия. М., 1965, с. 203—205.
19. Боровиков А. А., Гущина Л. В., Борисенко А. С. Определение хлоридов железа (II, III) и цинка в растворах флюидных включений при криометрических исследованиях // Геохимия, 2002, № 1, с. 70—79.
20. Sterner S. M., Bodnar R. J. Synthetic fluid inclusions. X. Experimental determination of P-V-T-X properties in the CO₂—H₂O system to 6 kbar and 700 °C // Amer. J. Sci., 1991, v. 291, p. 1—54.
21. Аксау М., Ozkan H. M., Moon C. J., Spiro B. Fracture controlled and strata bound stibnite, and cinnabar deposits of western Turkey: A genetical approach // Miner. Deposits: Research and Exploration, Proceedings of the 4-th SGA Meeting, 1997, p. 37—40.
22. Kucha E., Stumpf E., Prochaska W. Au-Oxisulfide inclusions in gold and their meaning for gold transport and deposition, Mitterberg, Austria // Ibid., p. 225—228.
23. Spiridonov E. M. Granitic rocks and gold mineralization // Granite-related ore deposits of central Kazakhstan and adjacent areas. St. Petersburg, 1996, p. 197—219.
24. Константинов М. М., Некрасов Е. М., Сидоров А. А., Стружков С. Ф. Золоторудные гиганты России и мира. М., Научный мир, 2000, 269 с.
25. Широких И. Н., Акимцев В. А., Васьков А. С. и др. Месторождение Юзик — новый тип золоторудной минерализации в Кузнецком Алатау // Труды международного симпозиума „Золото Сибири (геология, геохимия, технология, экономика)“. Красноярск, 2001, с. 44—46.
26. Айриянц Е. В., Жмодик С. М., Миронов А. Г. и др. Золото-ртутный и золото-серебряный типы оруденения в Восточном Саяне: минеральный состав, физико-химические условия образования // Геология и геофизика, 2002, т. 43, № 3, с. 273—285.
27. Прокофьев В. Ю. Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов (по данным исследования флюидных включений). Новосибирск, Наука, Сиб. издательская фирма РАН, 2000, 192 с.
28. Naumov E. A., Guschina L. V., Borisenko A. S. et al. Conditions of forming of Hg-gold at the Au-Hg deposits // Mineral deposits at the beginning of the 21st century. 2001, p. 867—870.
29. Arcos D., Soler A., Delgado J. Fluid evolution in the Cu-Au deposit related to the Carles granodiorite (Asturias): [Pap.] ECROFI XIII Symp., Barcelona, 21—23 June, 1995 // Eur. J. Miner., 1996, v. 8, № 5, p. 975—985.
30. Наумов В. Б., Коваленкер В. А., Мызников И. К. и др. Высокобарические флюиды гидротермальных жил Рябиновского щелочного массива (Центральный Алдан) // Докл. РАН, 1995, т. 343, № 1, с. 99—102.
31. Ettliger A. D., Meiner L. D. Copper-gold skarn mineralization at the Veselyi mine. Siniukhinskoe district, Siberia, USSR // Econ. Geol., 1991, v. 86, № 1, p. 185—194.
32. Zacharias J., Pertold Z., Pudilova M. et al. Geology and genesis of Varican porphyry-style gold mineralization, Petrá čkova hora deposit, Bohemian Massif, Czech Republic // Mineralium deposita, 2001, v. 36, p. 517—541.
33. Гусев А. И. Типы и геохимия золоторудных месторождений Горного Алтая и Горной Шории // Труды международного симпозиума „Золото Сибири (геология, геохимия, технология, экономика)“. Красноярск, 2001, с. 42—43.
34. Коробейников А. Ф. Состав и свойства минералообразующих растворов золоторудных месторождений Саяно-Алтайской складчатой области по включениям в минералах // Основные

- параметры природных процессов эндогенного рудообразования. Т. 2. Новосибирск, Наука, 1979, с. 161—174.
35. Васильев В. И., Оболенский А. А., Борисенко А. С. Температурные условия формирования ртутных месторождений / Докл. АН СССР, 1973, т. 209, № 2, с. 451—454.
 36. Оболенский А. А., Борисенко А. С. Физико-химические параметры и главные факторы рудообразования на эпитермальных месторождениях ртути, сурьмы и мышьяка // Основные параметры природных процессов эндогенного рудообразования. Т. 2. Новосибирск, Наука, 1979, с. 181—193.
 37. Radtke A. S. Geology of Carlin Gold Deposit, Nevada // US Geol. surv. profess. pap., 1985, v. 1, № 1267, p. 124.
 38. Borisenko A., Borovikov A., Naumov E. et al. Physic-chemical conditions of Au-Hg deposit formation // ECROFI XV: Abstracts. Potsdam, Germany, 1999, p. 50—52.
 39. Борисенко А. С., Боровиков А. А., Наумов Е. А. и др. Физико-химические условия формирования золото-ртутных месторождений // Тезисы докладов IX международной конференции по термобарогеохимии. Александров, 18—22 октября, ВНИИСИМС, 1999, с. 238—240.
 40. Борисенко А. С. Палеогидрогеологический контроль размещения эпитермального оруденения складчатой области // Источники рудного вещества и физико-химические условия эпитермального рудообразования // Тр. ИГиГ СО АН СССР, вып. 749, Новосибирск, Наука, 1990, с. 74—85.
 41. Дистанов Э. Г., Стеблева А. Т., Оболенский А. А. и др. Генезис Удерейского золото-сурьмяного месторождения в Енисейском кряже // Геология и геофизика, 1977, № 8, с. 19—27.
 42. Манучарянц Б. О., Наумов В. Б., Ходаковский И. Л. Физико-химические условия формирования гидротермальных месторождений сурьмы и ртути // Геохимия, 1970, № 11, с. 1291—1301.
 43. Манучарянц Б. О., Прушинская Э. Я., Владимиров В. Г. Некоторые данные о характере гидротермальных растворов, формирующих золотое и золото-сурьмяное оруденение Якутии // Основные параметры природных процессов эндогенного рудообразования. Т. 2. Новосибирск, Наука, 1979, с. 210—220.
 44. Прушинская Э. Я., Манучарянц Б. О., Владимиров В. Г. Основы геолого-генетической модели золото-сурьмяных месторождений востока СССР // Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций. Новосибирск, Наука, 1988, с. 279—285.
 45. Бергер В. И. Сурьмяные месторождения. Л., Недра, 1978, 296 с.
 46. Бергер В. И., Мамонов С. В. Геолого-геохимическое обоснование метаморфогенно-гидротермальной модели золото-антимонитовой березитовой формации // Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций. Новосибирск, Наука, 1988, с. 285—295.
 47. Гончаров В. И., Сидоров А. А. Термобарогеохимия вулканогенного рудообразования. М., Наука, 1979, 207 с.
 48. Коваленкер В. А. Минералого-геохимические закономерности формирования эпитермальных руд золота и серебра: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. М., ИГЕМ РАН, 1995, 102 с.
 49. Наумов В. Б., Сафонов Ю. Г., Миронова О. Ф. Некоторые закономерности пространственного изменения параметров флюида золоторудного месторождения Колар (Индия) // Геология рудных месторождений, 1988, т. 30, № 6, с. 105—109.
 50. Ляхов Ю. В., Павлунь Н. Н., Пизнюр А. В., Попивняк И. В. Термобарогеохимия золота (прогнозирование, поиски и оценка оруденения). Львов, Свит, 1995, 280 с.

*Рекомендована к печати 8 апреля 2002 г.
Г. В. Поляковым*

*Поступила в редакцию
4 марта 2002 г.*