

Физико-химические параметры и состав рудообразующих флюидов орогенных месторождений золота России

Прокофьев В. Ю.¹, Бортников Н. С.¹, Гарофало П.²

¹ИГЕМ РАН, Москва, Россия, vpr@igem.ru

²Университет Болоньи, Болонья, Италия

Physical-chemical conditions and composition of ore-bildung fluids of Russian orogenic gold deposits

Prokofiev V. Yu.¹, Bortnikov N. S.¹, Garofalo P.²

¹IGEM RAS, Moscow, Russia, vpr@igem.ru

²Universita di Bologna, Bologna, Italy

Summary. The detailed research of fluid inclusions and stable isotopes in minerals of industrial ore veins large-scale orogenic gold deposits of different regions of Russia was carried out. The deposits under investigation are Berezovskoye and Kochkarskoye (Ural), Olympiada (the Yenisei Ridge), Mayskoye (Chukotka), Nezhdaninskoye (Yakutiya) and Sukhoy Log (Eastern Siberia). Temperatures of industrial ores formation for all investigated deposits are stacked in an interval 190-485 °C. Fluid pressure under ore formations changed from 1.0 up to 3.6 kbar. The hydrothermal fluid of all orogenic gold deposits under investigation is a low-mineralized water solution with the general concentration of salts 2-17 % in weight, and sodium and potassium chlorides are prevailed. For fluids from the majority of deposits the high concentrations of dissolved CO₂ (3-7 mol/kg H₂O) with a small impurity of other gases are characteristic. Variations of geochemical ratio volumes for K/Rb, Br/Cl and others which can serve as indicators of the ore-forming fluid natures are established. Au-bearing fluid from all deposits had the magmatic nature and had mixed up with formation solutions under ore sediments.

Не так давно был выделен особый класс орогенных месторождений золота, возникших на заключительных стадиях формирования орогенов (Groves, 1998). Исследования флюидных включений в минералах руд этих месторождений имеют свою специфику: высокие концентрации углекислоты (иногда с другими газами) и умеренные концентрации солей в растворе (Ridley, Diamond, 2000). В настоящее время под эгидой Юнеско действует международный проект МПГК-540, посвященный изучению состава флюидов орогенных месторождений всего мира. Настоящее сообщение посвящено изложению результатов многолетних исследований в ИГЕМ РАН флюидных включений в минералах промышленных рудных жил крупномасштабных орогенных золоторудных месторождений разных регионов России. В круг изученных объектов вошел ряд известных Российских месторождений золота большого масштаба: Березовское и Кочкарское (Урал), Олимпиада (Енисейский Кряж), Майское (Чукотка), Нежданинское (Якутия), Сухой Лог (Восточная Сибирь). Часть результатов была опубликована ранее (Прокофьев и др., 1994; Бортников и др., 1998; Prokofiev et al., 1998; Лаверов и др., 2000; Vaksheev et al., 2001; Bortnikov et al., 2003; Бортников и др., 2004; 2007; Prokofiev, Vaksheev, 2007; Bortnikov et al., 2007; Bortnikov, Prokofiev, 2007). В рудном кварце всех месторождений установлено наличие ассоциации сингенетичных существенно газовых и углекислотно-водных флюидных включений, свидетельствующих о гетерогенном состоянии рудообразующего флюида в процессе рудоотложения.

Микротермометрические исследования индивидуальных флюидных включений выполнялись при помощи измерительного комплекса на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы "Linkam" (Англия) в ИГЕМ РАН. Солевой состав растворов определялся по температурам эвтектики (Борисенко, 1977). Концентрация солей во включениях с высокими содержаниями углекислоты оценивалась по температуре плавления газгидратов (Collins, 1979; Darling, 1991). В тех включениях, где такая оценка оказалась невозможна, поскольку в углекислоте содержится большое количество метана

(температура плавления углекислоты достигает $-60.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как у чистой CO_2 – 56.6 , температура плавления газгидратов выше $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$), концентрация солей оценивалась по температуре плавления льда и корректировалась на основании измерений объемных соотношений углекислотной и водной фаз и расчета концентраций газов в растворе. Концентрация метана оценивалась также из объемных соотношений и плотности метана в газовой фазе, связанной с парциальным давлением метана, в свою очередь определяющим температуру плавления газгидратов метана (выше $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, (Claypool, Kaplan, 1974)). На основании этих данных вычислялись поправки на количество воды, связанное в газгидратах и оценивалась концентрация солей в углекислотно-метаново-водных флюоидах способом, описанным в работе (Distler et al., 2004).

Таблица. Физико-химические параметры рудоотложения и состав рудообразующего флюида крупных мезотермальных золоторудных месторождений России.

Месторождение	Тип флюида	Основные компоненты	n	$T_{\text{гом.}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$C_{\text{солей}},\text{ мас. \% экв. NaCl}$	$\text{CO}_2 \pm \text{N}_2 \pm \text{CH}_4,\text{ мас. \%}$	P, бар	$\frac{P_{\text{общее}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}}$		
Березовское, Урал	Газонасыщенный раствор	$\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2+\text{NaCl}$	380	365-255	14.9-2.0	27.7-10.6	3460-810	42.7-13.0		
	Газ	CO_2	816	-	-	98-86				
Кочкарское, Урал	Газонасыщенный раствор	$\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2+\text{NaCl}$	126	370-244	14.2-7.7	28.2-9.7	2580-450	22.7-3.8		
	Газ	CO_2	187	-	-	96-73				
	Водный раствор	$\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$	51	272-180	16.7-6.3	2-0			-	-
Олимпиада, Енисейский край	Газонасыщенный раствор	$\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$	434	485-190	17.8-2.4	6-1	2710-190	56.5-3.6		
	Газ	$\text{CO}_2 \pm \text{N}_2 \pm \text{CH}_4$	136	-	-	98-86				
	Водный раствор	$\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$	273	335-105	25.0-1.2	2-0			-	-
Майское, Чукотка	Рассол	$\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}+\text{CaCl}_2$	22	535-170	37.5-30.2	8-1	-	-		
	Газонасыщенный раствор	$\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2+\text{NaCl}$	127	430-238	8.8-2.2	22.9-7.0				
	Газ	$\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4$	103	-	-	92-75				
	Водный раствор	$\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$	130	287-119	10.1-0.7	3-1			-	-
Нежданское, Якутия	Газонасыщенный раствор	$\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2+\text{NaCl}$	330	387-249	9.6-1.2	31.7-8.4	1950-400	46.6-2.9		
	Газ	$\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4$	481	-	-	97-78				
	Водный раствор	$\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$	93	294-129	26.3-2.4	3-1			-	-
	Рассол	$\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}+\text{CaCl}_2$	15	204-199	31.1-31.0	2-1			-	-
Сухой лог, Ленский район	Газонасыщенный раствор	$\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2 \pm \text{N}_2 \pm \text{CH}_4+\text{NaCl}$	288	385-185	8.6-5.0	33.4-7.9	2450-130	70.6-1.03		
	Газ	$\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2$	369	-	-	97-70				
	Водный раствор	$\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$	213	335-130	9.5-3.7	2-0			-	-

Давление определялось для гетерогенных флюидов по пересечению изохоры и изотермы (Каложный, 1982). Для построения изохор и оценки давлений по существенно газовым включениям, содержащим плотные углекислотно-метановые смеси, использовались данные работы (Thiery et al., 1994). Валовый состав флюидных включений

из мономинеральных навесок 1.0–0.5 г фракции 0.5–0.25 мм проанализирован разными методами (газовая и ионная хроматография, ICP MS) в ЦНИГРИ (Кряжев и др., 2006). Для месторождений Олимпиада, Сухой Лог и Березовское проведены исследования газовой фазы флюидных включений методом КР-спектроскопии.

Основные результаты исследования флюидных включений в минералах руд всех изученных месторождений приведены в табл. Температуры формирования промышленных руд всех изученных месторождений укладываются в интервал 210–450 °С. Флюидное давление при формировании руд изменялось от 1.1 до 3.6 кбар. Гидротермальный флюид всех изученных орогенных месторождений золота является слабоминерализованным водным раствором с общей концентрацией солей 2–17 мас. %, в котором преобладали хлориды натрия и калия. Для флюидов большинства месторождений характерны высокие концентрации растворенной CO₂ (3–7 моль/кг H₂O) с небольшой примесью других газов. Только в газовой фазе флюида месторождения Олимпиада выявлены широкие вариации концентраций CO₂, CH₄ и N₂, что с наибольшей вероятностью связано с особенностями состава вмещающих оруденение пород. В газовой фазе флюида месторождения Сухой Лог установлено наличие высокоплотного азота. Даны оценки концентрации макро- (CO₂, CH₄, Cl, Na, K, Ca, Mg) и микрокомпонентов (Br, V, Rb, Li, Cu, Zn, Pb, Sr, Ba, Au, Ag и др.) в гидротермальных флюидах всех месторождений и выполнен сравнительный анализ. Изучены вариации величин геохимических отношений K/Rb, Br/Cl и других, которые могут служить индикаторами природы рудообразующих флюидов. Как показали исследования, гидротермальный рудообразующий раствор состоял из смеси флюидов разной природы. Обязательным компонентом рудообразующих растворов всех изученных месторождений являлся флюид магматической природы, который в ходе рудоотложения смешивался с растворами другого генезиса (метаморфогенными, формационными и др.). В рудообразующем флюиде месторождения Сухой Лог доля магматического флюида наименьшая по сравнению с остальными месторождениями. Изучение стабильных изотопов серы, углерода и кислорода, полученные для большинства рассмотренных месторождений, согласуются с данными исследования флюидных включений и подтверждают возможность смешения магматических и формационных флюидов в процессе рудоотложения.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы ОНЗ-2 РАН и проекта Международной геологической корреляции Юнеско IGCP 540.

Литература

- Борисенко А. С. Изучение солевого состава газовой фазы включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. №8. С. 16–27.
- Бортников Н. С., Брызгалов И. А., Кривичкая Н. Н., Прокофьев В. Ю., Викентьева О. В. Майское многоэтапное прожилково-вкрапленное золото-сульфидное месторождение (Чукотка, Россия): минералогия, флюидные включения, стабильные изотопы (O и S), история и условия образования // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. №6. С. 475–509.
- Бортников Н. С., Гамянин Г. Н., Викентьева О. В., Прокофьев В. Ю., Алпатов В. А., Бахарев А. Г. Состав и происхождение флюидов в гидротермальной системе Нежданского золоторудного месторождения (Саха-Якутия, Россия) // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. №2. С. 99–145.
- Бортников Н. С., Сазонов В. Н., Викентьева О. В. и др. Роль магматогенного флюида в формировании Березовского мезотермального золото-кварцевого месторождения, Урал // Доклады РАН. 1998. Т. 363. № 1. С. 82–85.
- Каложный В. А. Основы учения о минералообразующих флюидах. Киев: Наукова думка, 1982. 240 с.
- Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP MS при анализе состава рудообразующих флюидов // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2006. №4. С. 30–36.
- Лавров Н. П., Прокофьев В. Ю., Дистлер В. В., и др. Новые данные об условиях рудоотложения и составе рудообразующих флюидов золото-платинового месторождения Сухой Лог (Россия) // Доклады АН. 2000. Т. 371. №1. С.88–92.

- Прокофьев В. Ю. Типы гидротермальных рудообразующих систем (по данным исследования флюидных включений) // Геология рудных месторождений. 1998. № 6. С. 514–528.
- Прокофьев В. Ю., Афанасьева З. Б., Иванова Г. Ф., Буарон М. К., Мариньяк Х. Исследование флюидных включений в минералах Олимпиадненского Au-(Sb-W) месторождения (Енисейский край) // Геохимия. 1994. №7. С. 1012–1029.
- Прокофьев В. Ю., Спиридонов Э. М. Состав метаморфогенных флюидов и условия преобразования руд Кочкарского золоторудного месторождения (Урал) // Петрография на рубеже XXI века: Итоги и перспективы. Материалы Второго Всероссийского петрографического совещания 27-30 июня 2000 года. Геопринт: Сыктывкар, 2000. С. 88–90.
- Baksheev I. A., Prokofiev V. Yu., & Ustinov V. I. Genesis of metasomatic rocks and mineralized veins at the Berezovskoe deposit, Central Urals: evidence from fluid inclusions and stable isotopes // *Geochem. International*. 2001. V. 39. Suppl. 2. P. S129–S144.
- Bortnikov N.S., Prokofiev V.Yu. Major mesothermal gold ore deposit of Russia: composition and origin of ore-forming fluids // *Digging Deeper. Proceedings of the Ninth Biennial meeting of the society for geology applied to mineral deposits*. Dublin, Ireland, 20th-23rd august 2007. Dublin: Published Irish Association for Economic Geology, 2007. P. 793–796.
- Bortnikov N. S., Prokofiev V. Yu., Vikentieva O. V., Bryzgalov I. A., & Krivitskaya N. N. The Mayskoye disseminated gold deposit, Chukotka, Russia: mineral paragenesis, fluid inclusion, and oxygen and sulfur isotope studies // *Mineral exploration and Sustainable Development*. Eliopoulos et al. (eds). Millpress, Rotterdam, 2003. P. 743–746.
- Claypool G. M., Kaplan J. R. The origin and distribution of methane in marine sediments // *Natural gases in marine sediments*. New York and London: Plenum Press, 1974. V. 3. P. 132.
- Collins P. L. P. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity // *Economic Geology*. 1979. V. 74. P. 1435–1444.
- Darling R. S. An extended equation to calculate NaCl contents from final clatrate melting temperatures in H₂O-CO₂-NaCl fluid inclusions: Implications for P-T-isochore location // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. V. 55. P. 3869–3871.
- Distler V. V., Yudovskaya M. A., Mitrofanov G. L., et al. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia // *Ore Geology Reviews*. 2004. V. 24/1-2. P. 7–44.
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M. et al. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types // *Ore Geol. Rev.* 1998. V. 13: P. 7–27.
- Prokofiev V. Yu., Baksheev I. A. Fluid inclusion in minerals of the Berezovsky orogenic gold deposit, Central Urals, Russia // *European Current Research on Fluid Inclusions (ECROFI-XIX)*. University of Bern, Switzerland, 17–20 July 2007. Abstract Volume. P. 254.
- Prokofiev V. Yu., Distler V. V., Spiridonov A. M., et al. Fluid Regime and Conditions of Origin of the Sukhoi Log (Russia) Gold-Platinum Deposit // *PACROFI VII University of Nevada, Las-Vegas, Nevada, USA June 1-4, 1998 Program and Abstracts*. P. 53.
- Ridley J. R., Diamond L. W. Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models // *Gold in 2000. SEG Reviews*. 2000. V. 13. P. 141–162.
- Thiery R., Kerkhof A. M, Dubessy J. vX properties of CH₄-CO₂ and CO₂-N₂ fluid inclusions: modeling for T < 31 °C and P < 400 bars // *Eur. J. Miner.* 1994. №6. P. 753–771.