Особенности формирования рудообразующего флюида золоторудного месторождения Сухой Лог

Брюханова Н.Н., Бычинский В.А., Будяк А.Е., Чудненко К.В.

Институт геохимии Сибирского Отделения Российской Академии Наук им. А.П. Виноградова, Иркутск, Россия, E-mail: nnb@igc.irk.ru

АННОТАЦИЯ: Рассмотрены условия формирования рудообразующего флюида на месторождении Сухой Лог (Восточная Сибирь). Методами физико-химического моделирования установлены соотношения флюид/порода - 0,2, а также Т-Р условия (температурах ~330-390°C и давлениях 250-1500 бар) при которых достигалась максимальная насыщенность флюида рудной компонентой – золотом. В качестве стандартного состава рудообразующего флюида использован состав газовой-жидких включений минералов сульфидно-кварцевых прожилков.

The specifics of the formation of ore-forming fluid of the Sukhoi Log gold deposit

Bryuhanova N. N., Bychinskij V. A., Budyak A. E., Chudnenko K. V.

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

ABSTRACT: The conditions for the formation of an ore-forming fluid at the Sukhoi Log deposit (Eastern Siberia) are considered. Using the methods of physicochemical modeling, the fluid / rock ratios (0,2), the TP conditions (330-390°C, 250-1500 bar) (under which the maximum saturation of the fluid with the ore component — gold were established. The reference sample SLG-1 was referred to as the composition of ore. The composition of gaseous-liquid inclusions in the minerals of sulfide-quartz veinlets was taken as the standard for ore-forming fluid.

ВВЕДЕНИЕ

Месторождение Сухой Лог расположено в центре Байкало-Патомского нагорья и приурочено к центральной части Сухоложской запрокинутой антиклинали, осложняющей более крупную Маракано-Тунгусскую синклиналь в пределах Бодайбинского синкленория. Район сложен мощной толщей рифей-вендских пород терригенно-карбонатного состава, накопление которых происходило в условиях пассивной континентальной окраины Сибирского кратона. В литературе широко освещены вопросы о геологических и геохимических особенностях оруденения [1-4]. Существует две основных гипотезы происхождения месторождений «сухоложского» типа: постмагматически-гидротермальная и метаморфогенно-гидротермальная. Согласно первой, привнос золота и сопутствующих металлов связан со становлением постметаморфических интрузий, в качестве которых выступают как гранитоиды, так и гипотетические базитовые комплексы, залегающие на глубине [1, 6, 7, 11]. Согласно второй, рудообразующие растворы генерировались при региональном метаморфизме металлоносных углеродистых толщ, а последующие интрузии, имели лишь косвенное влияние [7]. Поэтому основная цель работы - методами физико-химического моделирования определить Т-Р условия формирования рудоносного флюида, чтобы в последующем оценить возможность образования рудообразующего флюида из вмещающих пород.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для проведения расчетов за состав руды был принят состав СЛГ-1. В качестве эталона сравнения был принят состав газовой-жидких включений из минералов сульфидно-кварцевых прожилков, гомогенизирующийся в жидкость при 210 – 350 °C и 237 -190 бар содержащую NaCl, гидрокарбонат, газ CO₂ с примесью метана и азота [14]. Сформированная модель включала 25 независимых компонента: Ag, Al, As, Au, C, Cl, Cu, Ca, F, Fe, H, K, Mg, Mo, N, Na, Ni, O, P, Pb, S, Si, Ti, Zn, $\bar{e}$, 167 минеральных фаз, 27 газов и 504 компонента водного раствора. Термодинамические свойства фаз взяты из [10, 12, 13]. Расчеты выполнены с помощью ПК «Селектор» [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На первом этапе исследования определялось соотношение флюид/порода (взаимодействия флюида (H₂O + CO₂ + CH₄) с с рудой (СЛГ-1) при Т,Р-условиях соответствующих гомогенизации газовой-жидких включений в жидкость - 350C и 237 бар (рис.1)

Предварительные расчеты показали, что максимальное насыщение флюида золотом при 350°C и 237 бар (рис.1) происходит при соотношениях флюид/порода 0,05-0,5.

Поэтому все последующие расчеты осуществлялись при соотношении 0,2 – среднем значении. По данным Дубиной (2014), величиной отношения W/R (флюид/порода) обеспечивающей образование жильных тел месторождения

является 0,046-0,226, вероятно образование прожилков протекало при таком же соотношении флюид/порода [5].

На следующем этапе рассчитывался состав флюида при Т,Р условиях, от характерных для прогрессивного регионального метаморфизма ($T \sim 380^{\circ}\text{C}$, $P > 3$ кбар) [8]) до пострудных ($T = 210^{\circ}\text{C}$, $P = 150-190$ бар) (рис. 2).

Рис. 1. Количества Au (моль/1кг H₂O) во флюиде

Максимальное насыщение флюида золотом (от $1,1768\text{E-}07$ до $7,4807\text{E-}07$ моль/1 кг H₂O) происходит при температурах $\sim 330-390^{\circ}\text{C}$ и давлениях 250-1500 бар. Максимальное содержание - $1,1207\text{E-}06$ моль/1 кг H₂O, достигаемое при 400°C и 250 бар, вызывает сомнение, поскольку раскрытие системы сопровождалось постепенным снижением давления. Все рассчитанные содержания золота во флюиде ($1,1768\text{E-}07$ до $7,4807\text{E-}07$ моль/1 кг H₂O) сопоставимы с содержанием Au, обнаруженных в газовой-жидких включениях - $1,02\text{E-}07$ моль/1 кг H₂O. Из чего можно сделать вывод о Т, Р - условиях формирования рудообразующего флюида. Газовая фаза представлена H₂O, CO₂, N₂, H₂S, H₂, HF, CH₄, минеральный состав - Ap, Mgs, Mnt, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Arg, Fl, Py, Sp. pH варьировало от 4,7 до 5,6. Основными формами нахождения Au во флюиде - AuHS⁰ Au(HS)₂.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных расчетов можно сделать следующий вывод: образование рудообразующего флюида могло происходить при температурах $\sim 330-390^{\circ}\text{C}$ и давлениях 250-1500 бар при соотношении флюид/порода 0,2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буряк В. А., Хмелевская Н. М. Сухой Лог - одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). - Владивосток: Даль-наука, 1997. - 155 с.
- Викулова Л.П., Ожогина Е.Г., Дубинчук В.Т., Викулова Е.А. Минералогическо-химические критерии золотосульфидных руд Бодайбинского района (Иркутская область) // Благородные и редкие металлы

Сибири и Дальнего Востока. Иркутск: Изд-во инта географии СО РАН, 2005. - Т. 1. - С. 122-127.

3. Вуд Б.Л., Попов Н.П. Гигантское месторождение золота Сухой Лог (Сибирь) // Геология и геофизика. - 2006. - Т. 47. - № 3. - С. 315-341.

4. Гаврилов А.М., Кряжев С.Г. Минералогическо-химические особенности руд месторождения Сухой Лог // Разведка и охрана недр. - 2008. - № 8. - С. 3-16.

5. Дубинина Е. О., Чугаев А. В. , Иконникова Т. А., Авдеев А. С., Якушев А. И. Источники вещества и флюидный режим формирования кварц-карбонатных жил на месторождении золота Сухой Лог, Байкало-Патомское нагорье. // Петрология. - 2014. - Т.22. - № 4. - С. 347-379

6. Коткин В.В. Металлогеническое районирование, критерии прогноза и модель формирования золотого оруденения одного из рудных районов Восточной Сибири // Геология и полезные ископаемые юга Восточной Сибири. - Иркутск. - 1984. - С. 1-20.

7. Немеров В.К., Спиридонов А.М., Развозжаева Э.А., Мател Н.Л., Будак А.Е., Станевич А.М. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов сухоложского типа // Отечественная геология. - 2005. - № 3. - С. 17-24.

8. Петров Б.В., Макрыгина В.А. Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма. Новосибирск: Наука. - 1975. - 342 с.

9. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложение. - Новосибирск: «Гео». - 2010. - 283 с.

10. Helgeson H.C., Delany J.M., Nesbitt H.W, Bird D.K. Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals // Amer. J. Sci. - 1978. - vol. 278A. - P. 1-229.

11. Large, R.R., Maslennikov, V.V., Robert, F., Danyushevsky, L., Chang, Z., 2007. Multi-stage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia. // Economic Geology - 2007. - V.102. - P. 1233-1267.

12. Yokokawa H. Tables of thermodynamic propoties of inorganic compounds // J. Nat. Chem. Lab. Indast. - 1988. - V. - 60. - P. 27-121.

12. Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K. The properties of gases and liquides. - N.Y.: McGraw-Hill Book Company. - 1977. - 592 p.

13. Slg-1 (black shale powder) (http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/sample_query (29.01.2020)).

14. Yudovskaya, M.A., Distler, V.V., Prokofiev, V.Y., Akiniev, N.N., Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena Province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits, Geoscience Frontiers// Geoscience Frontiers. - 2016. - V. 7. - №3. - P. 453-481.

Таблица 1. Содержание Au во флюиде (моль/1 кг H₂O) в зависимости от Т (°C) и Р (бар)

Т, °C	Р, бар				
	250	500	1000	1500	2000
300	6,9955E-08	5,1382E-08	2,8962E-08	4,2084E-08	2,1256E-08
330	1,6118E-07	1,1768E-07	6,8821E-08	7,0279E-08	5,8654E-08
360	3,4728E-07	2,5195E-07	1,4794E-07	1,3322E-07	5,2275E-08
390	7,4807E-07	2,7127E-07	1,9423E-07	1,3653E-12	1,8328E-07
420	1,1207E-06	8,1231E-12	2,9049E-07	4,2084E-08	2,1256E-08

■ - твердой фазе (моль/5 кг породы); □ - флюиде (моль/1 кг H₂O);

Рис. 2. Распределение Au между твердой фазой и флюидом