

УДК 550.41

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РУДООБРАЗУЮЩЕГО ФЛЮИДА МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЯ)

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

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия



Методами физико-химического моделирования рассмотрены постмагматически-гидротермальная и метаморфогенно-гидротермальная гипотезы образования золоторудных месторождений сухоложского типа. В результате расчетов установлено, что содержание Au в модельном рудоносном флюиде, сопоставимое с составом включений, достигалось при –237 бар и 350 °С, а оруденение сформировалось из минерализованных сланцев в объеме рудного тела и окаймляющих его минерализованных сланцев.

Ключевые слова: Сухой Лог, рудообразование, флюид, фаза, золото, физико-химическое моделирование.

Введение

В настоящее время физико-химическое моделирование (ФХМ) широко используется для исследования как глобальных геохимических процессов (образования зональности в коре выветривания [Кашик, Карпов, 1978], явления тепломассопереноса в верхней мантии Земли [Владимиров и др., 2019] и пр.), так и локальных (образование минеральных ассоциаций в условиях метаморфизма [Авченко и др., 2019], построение физико-химической модели для гидротерм озера Кипящего [Малышева, 2017] и др.). Также ФХМ применяется для моделирования процессов формирования месторождений золота [Zhuravkova et al., 2017; Гаськова и др., 2018], молибдено-вольфрамовых руд [Боровиков и др., 2020], ртути [Оболенский и др., 2006] и пр.

В данном исследовании с помощью ФХМ рассчитан вероятный состав рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог (Ленский золоторудный район Байкало-Патомского нагорья) и определен источник золота. Основными гипотезами происхождения месторождений сухоложского типа являются постмагматически-гидротермальная и метаморфогенно-гидротермальная. Согласно первой, привнос золота связан со становлением постметаморфических интрузий, в качестве которых выступают гранитоиды (Константиновский штук), и гипотетические базитовые комплексы (Угаханский плутон), залегающие на глубине [Рунквист и др., 1992; Дистлер и др., 1995; Laverov et al., 2001]. Вторая гипотеза основана на предположении, что рудообразующие растворы генерировались при региональном метаморфизме металлоносных углеродистых толщ, а интрузии имели второстепенное значение, влияя только на температурный режим [Немеров и др., 2005; Tarasova et al., 2020].

Сценарий, на основе которого проводилось моделирование, включает три этапа. Этап I – конседиментационный (седиментация и диагенез, 610–580 млн лет), во время которого происходит накопление и диагенетическое преобразование осадков с высоким содержанием сидеро-халькофильных элементов [Будяк и др., 2016]. На этом этапе золото связано с рассеянной пиритовой минерализацией, частично с глинистыми минералами и органическим веществом. Этап II – раннеколлизионный (катагенез, 570–540 млн лет), связан с прохождением катагенного преобразования осадков, которому способствовало формирование пологих складчатых структур, возникших в результате тектонического напряжения из-за аккреции Байкало-Муйского композитного террейна и более молодых островодужных систем. Миграция катагенного флюида в сводовые части пологих антиклиналей, обеспечила аномальный фон золота и формирование сульфидной минерализации. На III коллизионном этапе метаморфизма (450–420 млн лет) формируются рудные тела. На первой стадии в T-, P-условиях, соответствующих зелено-сланцевой фации метаморфизма: 300–390 °С, 5–6 кбар [Петров, Макрыгина, 1975], органическое вещество, сосредоточенное в апикальных частях антиклиналей, карбонизируется до состояния неструктурированного графита. Распад металлоносных флюидов сопровождается образованием воды, углекислоты, метана, сероводорода и азота. Золото и сопутствующие элементы частично переходят в метаморфогенные растворы, а оставшаяся часть восстанавливается до свободного металла и образует рассеянную минерализацию в самородной форме и в виде интерметаллических соединений [Дистлер и др., 1995]. Формируется высокотемпературная минеральная ассоциация «кальцит, кварц, пирит, пирротин, арсенопирит». Следующая стадия характеризу-

ется более низкими температурами (270–320 °С) и давлениями (0,5 кбар), что обусловлено метаморфическими преобразованиями и появлением зон трещиноватости вдоль осей складок в обезвоженных толщах. Как следствие, флюид, поступающий в зоны разуплотнения, формирует прожилково-вкрап-ленную минеральную ассоциацию, где высокотемпературный пирротин переходит в пирит и образуется полиметаллическая минеральная ассоциация с золотом. Рудоотложение становится более низкотемпературным, формируется сидерит – анкерит – кварцевой минеральная ассоциация с низким содержанием дисперсного золота.

Цель данной работы – методом физико-химического моделирования подтвердить или опровергнуть предположение о возможности образования рудообразующего флюида из вмещающих пород.

Экспериментальная часть

В расчетах использовался состав вмещающих пород: метапелитов хомолхинской свиты Байкало-Патомского нагорья, минерализованных сланцев надрудной зоны [Немеров и др., 2010; Tarasova et al., 2020]; за состав руды принят стандартный образец СЛг-1 (табл. 1) [Yudovskaya et al., 2016].

Таблица 1

Химический состав пород месторождения Сухой Лог

Table 1

The chemical composition of the Suhoi Log deposit

	Вмещающие породы ¹	Минерализованные сланцы ²	Руда ³
	Вес. %		
SiO ₂	59,95	58,8	57,6
TiO ₂	0,98	1,09	0,88
Al ₂ O ₃	17,64	18,07	15,53
Fe ₂ O ₃	6,7	2,55	7,47
MnO	0,08	0,08	0,11
MgO	2,98	2,85	3,06
CaO	0,53	0,69	1,06
Na ₂ O	1,67	1,72	1,28
K ₂ O	3,1	3,24	2,85
п.п.п. ⁵	н.д. ⁴	6,14	9,5
P ₂ O ₅	0,2	0,19	0,12
S	0,15	0,53	1,02
C _{org}	2,77	3,49	0,93
n проб	40	23	н.д.
Σ	96,75	94,95	100
	г/т		
Au	0,002	0,13	2,5
Ag	0,20	0,2	0,47
Mo	3,00	0,1	0,95
Ni	45,00	54,2	50
Zn	150	135	97
Pb	20	25	14,9
Cu	50	44,2	39
As	50	47,9	46

Примечание. 1 – углеродистые сланцы хомолхинской свиты Байкало-Патомского нагорья [Немеров, 1988], 2 – минерализованные сланцы из надрудной зоны [Немеров и др., 2005], 3 – СЛг-1: черные сланцы в контуре промышленного золоторудного тела [SLg-1, 2020]; 4 – н.д. – нет данных; 5 – п.п.п. – потери при прокаливании.

Note. 1 – carbonaceous shales of the Khomolkhin Formation of the Baikal-Patom Upland [Nemerov, 1988]; 2 – mineralized shales from the supra-ore zone [Nemerov et al., 2005]; 3 – SLg-1: black shales in the contour of an industrial gold-ore body [SLg-1, 2020]; 4 – н.д. – no data; 5 – п.п.п. – loss on ignition.

Поскольку более 80 % золота связано с сульфидами и приурочено к мелким кварц-сульфидным прожилкам, в качестве состава рудообразующего флюида использовался состав газовой-жидких включений из минералов сульфидно-кварцевых прожилков [Yudovskaya et al., 2016]. Термодинамические свойства фаз взяты из [Reid et al., 1977; Yokokawa, 1988; Helgeson et al., 1978].

Модель включала 25 независимых компонентов: 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. Расчеты выполнены с помощью ПК «Селектор» [Чудненко, 2010].

Химический состав пород месторождения Сухой Лог приведен в табл. 1.

Обсуждение результатов

На первом этапе моделировалось образование рудоносного флюида в результате взаимодействия гидротермального ($H_2O + CO_2 + CH_4$) содержащего раствора с рудой (СЛг-1) в условиях гомогенизации водно-солевых растворов [Yudovskaya et al., 2016]. Расчеты проводились при Р-, Т-условиях, характерных для прогрессивного метаморфизма – 385 °С, 2 430 бар; регрессивного метаморфизма – 350 °С, 237 бар; стадии максимального рудоотложения – 210 °С, 237 бар и пострудной стадии – 210 °С, 190 бар при соотношениях флюид/порода (фл/п) = 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 10. Максимальное перераспределение содержаний рудных компонентов между флюидом и породой происходили при отношении фл/п (1 кг/5 кг) = 0,2. Новообразованная газовая фаза представлена H_2O , CO_2 , N_2 , H_2S , H_2 , HF , CH_4 . Рассчитанный состав рудоносного флюида сопоставим с составом газожидких включений кварцевых прожилков рудной зоны (табл. 2).

В результате определены оптимальное соотношение фл/п 0,2 и Р-, Т-условия процесса формирования рудообразующего флюида 350 °С, 237 бар.

На втором этапе моделировался процесс взаимодействия флюида ($H_2O + CO_2 + CH_4$) с вмещающими породами при 350 °С и 237 бар, соотношение флюид / порода изменялось от 100 до 5 гр/100 гр породы. Установлено, что образование Au-содержащей твер-

дой фазы и равновесного с ней флюида не происходит. Минеральный состав представлен Chl, Mag, Mnt, Pl, Ap, Mgs, sluda, Apy, Qz, Ccp, Gn, Py, Rt, Fl (рис. 1). рН флюида изменяется 5,6–5,9. Основная форма нахождения золота в растворе – $Au(HS)_2^-$, $AuHS^0$.

На третьем этапе моделировался процесс формирования рудообразующего раствора. Со сланцами надрудной зоны (см. табл. 1) взаимодействует флюид содержащий CO_2 , CH_4 . Приняты Р-, Т-условия, соответствующие формированию рудного флюида, – 237 бар и 350 °С. В реальных условиях такой процесс возможен, когда раствор, взаимодействующий с породами (см. табл. 1), находится в состоянии, близком к термодинамическому равновесию. Расчеты проводились при соотношениях фл/п от 0,0781 (7,81 г/100 г) до 1 (100 г/100 г). Установлено, что соотношение фл/п 0,08 является наиболее вероятным для формирования флюида, близким по составу к составу газожидких включений в прожилках кварца [Yudovskaya et al., 2016] (табл. 3).

С уменьшением соотношения флюид / порода содержание золота во флюиде снижается, количество кварца, пирротина и пирита возрастает (рис. 2). Высокие содержания золота на месторождениях привязаны к кварцевым прожилкам с высоким содержанием, сульфидов, поскольку химический механизм осаждения золота связан с переходом серы из флюида в новообразованные твердые фазы – пирит, пирротин, аргентит и газовую фазу H_2S .

Таблица 2

Содержание химических элементов в рудообразующем флюиде, моль/кг H_2O

Table 2

Content of chemical elements in the ore-forming fluid, mol/kg H_2O

Элемент	СЛг-1 (рассчитанные) фл/п 0,2				[Yudovskaya et al., 2016]
	1-я стадия 385 °С, 2430 бар	2-я стадия 350 °С, 237 бар	3-я стадия 210 °С, 237 бар	4-я стадия 210 °С, 190 бар	
K	0,8	0,26	0,21	0,18	$1,59 \cdot 10^{-2}$
Mg	0,39	$7,83 \cdot 10^{-3}$	$4,54 \cdot 10^{-3}$	$3,27 \cdot 10^{-3}$	$6,60 \cdot 10^{-3}$
Ca	$3,60 \cdot 10^{-3}$	$6,17 \cdot 10^{-5}$	$3,56 \cdot 10^{-6}$	$2,61 \cdot 10^{-6}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$
As	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-5}$	$6,19 \cdot 10^{-5}$	$4,71 \cdot 10^{-5}$	$9,70 \cdot 10^{-5}$
Ag	$1,91 \cdot 10^{-6}$	$7,93 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-8}$	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$
Au	$2,93 \cdot 10^{-8}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$	$2,85 \cdot 10^{-9}$	$2,85 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
Zn	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$3,88 \cdot 10^{-6}$	$1,95 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-7}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$
Pb	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-7}$	$1,85 \cdot 10^{-9}$	$1,12 \cdot 10^{-9}$	$9,60 \cdot 10^{-6}$
Ni	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$4,82 \cdot 10^{-3}$	$4,84 \cdot 10^{-3}$	$4,83 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
pH	4,84	5,57	5,96	6,08	
Eh, B	–0,15	–0,27	–0,24	–0,26	
Состав твердой фазы	Chl, Ap, Mgs, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Arg, Fl, Py, Sp	Ap, Mgs, Mnt, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Arg, Fl, Py, Sp	Mgs, Mnt, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, F-Ap, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Sd, Arg, Py, Sp	Mgs, Mnt, Pl, Ms, Pg, Apy, Ccp, Dol, F-Ap, Gn, Hem, Qz, Au, Ilm, Arg, Py, Sp	

Примечание. Mgs – магнезит, Mnt – монтмориллонит, Dol – доломит, Ccp – халькопирит, Fl – флюорит, Hem – гематит, Qz – кварц, Au – самородное золото, Ilm – ильменит, Py – пирит, Sp – сфалерит, Ap – апатит, Mag – магматит, Chl – хлорит, Pl – плагиоклаз, Gn – галенит, Apy – арсенопирит, Ms – мусковит, Pg – парагонит, Sd – сидерит, F-Ap – фторапатит, Arg – аргентит [Whitney, Evans, 2010].

Note. Mgs – magnesite, Mnt – montmorillonite, Dol – dolomite, Ccp – chalcopyrite, Fl – fluorite, Hem – hematite, Qz – quartz, Au – native gold, Ilm – ilmenite, Py – pyrite, Sp – sphalerite, Ap – apatite, Mag – magmatite, Chl – chlorite, Pl – plagioclase, Gn – galena, Apy – arsenopyrite, Ms – muscovite, Pg – paragonite, Sd – siderite, F-Ap – fluorapatite, Arg – argentite [Whitney, Evans, 2010].

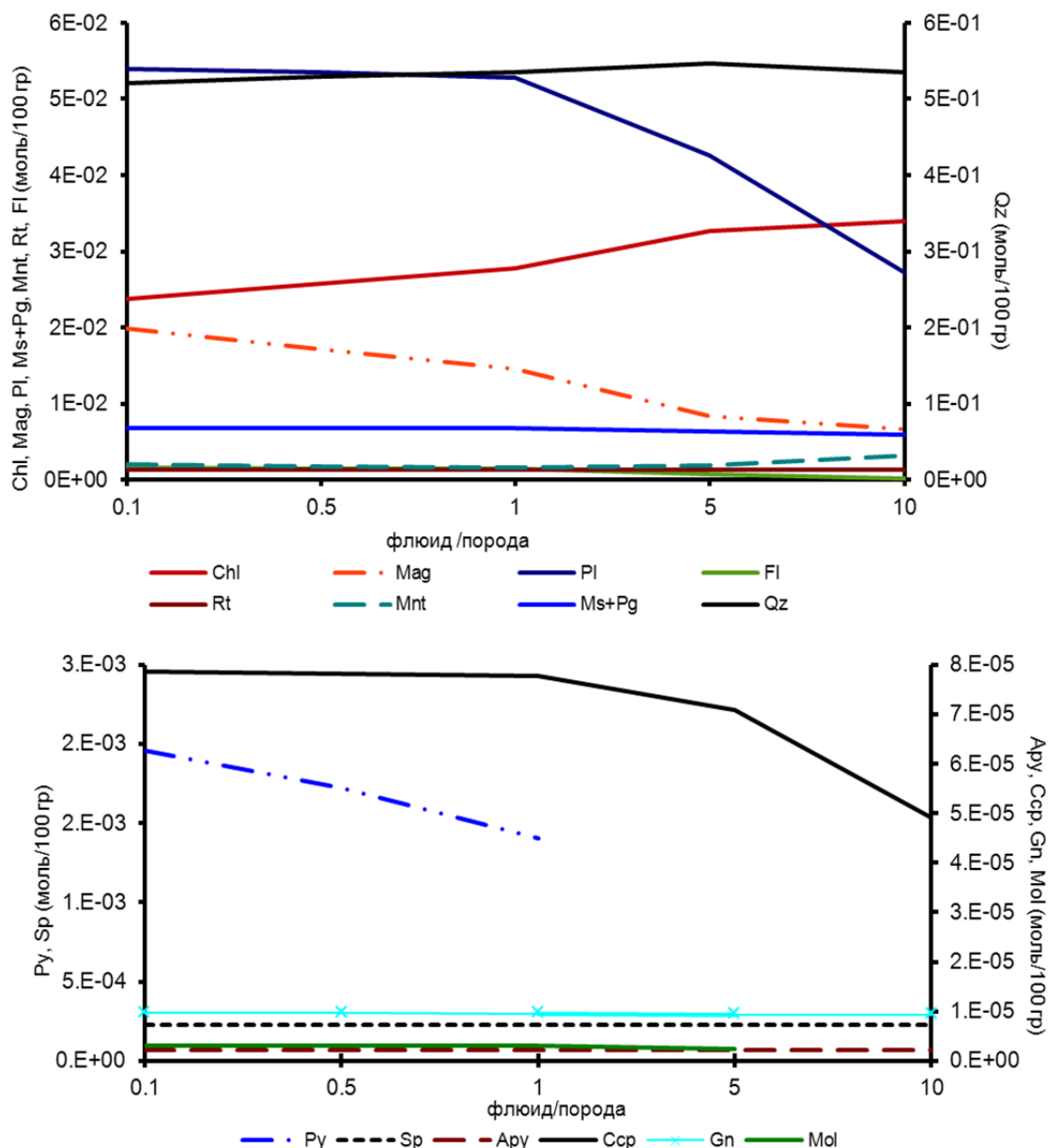


Рис. 1. Минеральный состав твердой фазы (моль/100 г породы), образующейся при взаимодействии флюида с вмещающими породами

Chl – хлорит, Mag – магнетит, Pl – плагиоклаз, Fl – флюорит, Rt – рутил, Mnt – монтмориллонит, Ms – мусковит, Pg – парогонит, Qz – кварц, Py – пирит, Sp – сфалерит, Apy – арсенопирит, Ccp – халькопирит, Gn – галенит, Mol – молибденит [Whitney, Evans, 2010]

Fig. 1. Mineral composition of the solid phase (mol/100 g of rock) formed as a result of fluid interaction with the host rocks

Chl – chlorite, Mag – magnetite, Pl – plagioclase, Fl – fluorite, Rt – rutile, Mnt – montmorillonite, Ms – muscovite, Pg – paragonite, Qz – quartz, Py – pyrite, Sp – sphalerite, Apy – arsenopyrite, Ccp – chalcopyrite, Gn – galena, Mol – molybdenite [Whitney, Evans, 2010]

Таблица 3

Изменение состава флюида в зависимости от соотношения флюид / порода, моль/кг H₂O

Table 3

Change in the fluid composition depending on the fluid / rock ratio, mol/kg H₂O

Элемент	Флюид – порода					[Yudovskaya et al., 2016]
	0,078	0,08	0,1	0,5	1	
Mg	$2,92 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$9,25 \cdot 10^{-7}$	$2,59 \cdot 10^{-7}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$6,60 \cdot 10^{-3}$
Ca	$3,40 \cdot 10^{-2}$	$2,73 \cdot 10^{-3}$	$9,86 \cdot 10^{-5}$	$2,35 \cdot 10^{-5}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$
K	$3,69 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$2,85 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$
As	$2,75 \cdot 10^{-11}$	$4,32 \cdot 10^{-11}$	$5,34 \cdot 10^{-11}$	$4,69 \cdot 10^{-11}$	$4,15 \cdot 10^{-11}$	$9,70 \cdot 10^{-5}$

Элемент	Флюид – порода					[Yudovskaya et al., 2016]
	0,078	0,08	0,1	0,5	1	
Ag	$2,19 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$3,48 \cdot 10^{-6}$	$4,39 \cdot 10^{-6}$	$2,01 \cdot 10^{-6}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$
Au	$9,93 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$3,77 \cdot 10^{-7}$	$5,98 \cdot 10^{-7}$	$6,32 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
Zn	$6,13 \cdot 10^{-5}$	$4,84 \cdot 10^{-6}$	$9,53 \cdot 10^{-8}$	$1,14 \cdot 10^{-8}$	$9,91 \cdot 10^{-9}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$
Pb	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$3,86 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^{-6}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$9,60 \cdot 10^{-6}$
Ni	$1,53 \cdot 10^{-6}$	$2,32 \cdot 10^{-6}$	$2,87 \cdot 10^{-6}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$2,82 \cdot 10^{-6}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
Mo	$1,22 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$4,12 \cdot 10^{-7}$	$6,10 \cdot 10^{-7}$	$5,81 \cdot 10^{-7}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$
pH	5,63	5,93	6,41	6,71	6,73	
Eh, B	-0,42	-0,49	-0,55	-0,59	-0,59	

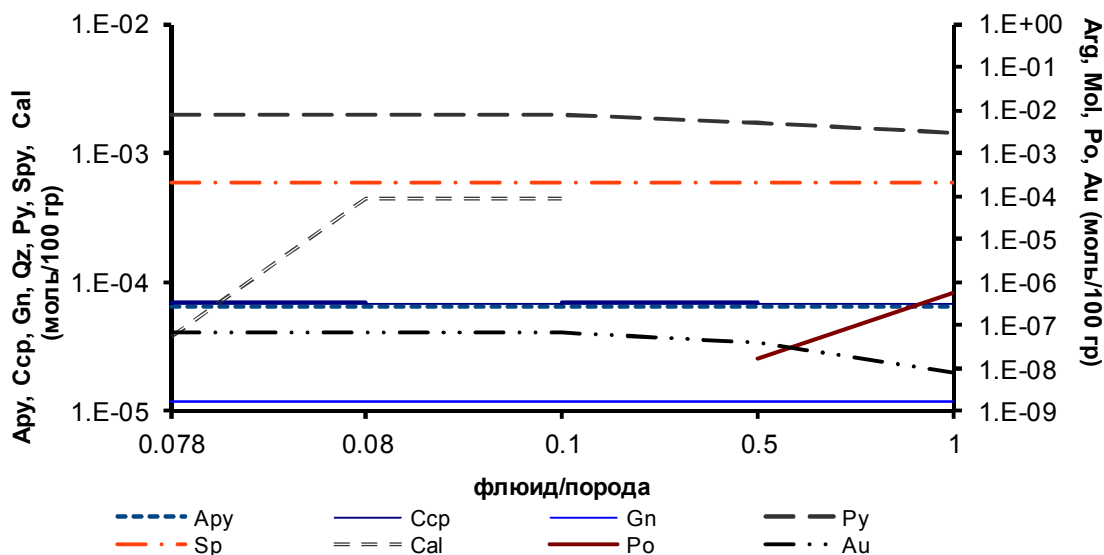


Рис. 2. Минеральный состав твердой фазы (моль/100 г породы) равновесной с флюидом в зависимости от соотношения флюид / порода

Apy – арсенопирит, Ccp – халькопирит, Gn – галенит, Py – пирит, Sp – сфалерит, Cal – кальцит, Po – пирротин, Au – самородное золото [Whitney, Evans, 2010]

Fig. 2. Mineral composition of the solid phase (mol/100 g of rocks) with the fluid, depending on the fluid / rock ratio

Apy – arsenopyrite, Ccp – chalcopyrite, Gn – galena, Py – pyrite, Sp – sphalerite, Cal – calcite, Po – pyrrhotite, Au – native gold [Whitney, Evans, 2010]

Таблица 4

Химический состав рудоносных флюидов, моль/кг H₂O

Table 4

Chemical composition of the ore-bearing fluids, mol/kg H₂O

Элемент	Флюид / сланцы (0,08)	Флюид / СЛГ-1 (0,2)	[Юдовская и др., 2015]
Mg	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$9,31 \cdot 10^{-3}$	$6,60 \cdot 10^{-3}$
Ca	$2,73 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$3,70 \cdot 10^{-3}$
K	$1,45 \cdot 10^{-1}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$
As	$4,32 \cdot 10^{-11}$	$3,14 \cdot 10^{-5}$	$9,70 \cdot 10^{-5}$
Ag	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$4,39 \cdot 10^{-7}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$
Au	$1,92 \cdot 10^{-7}$	$3,38 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$
Zn	$4,84 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$
Pb	$3,86 \cdot 10^{-6}$	$7,24 \cdot 10^{-6}$	$9,60 \cdot 10^{-6}$
Ni	$2,32 \cdot 10^{-6}$	$8,58 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-4}$
Mo	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$9,97 \cdot 10^{-7}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$
pH	5,3	5,4	
Состав твердой фазы	Chl, Mag, Mnt, Pl, sluda, Apy, Ccp, Gn, Ap, Po, Qz, Rt, Au-Ag, Mol, Fl, Py, Sp	Ap, Mgs, Mag, Mnt, sluda, Apy, Ccp, Dol, Hem, Qz, Au-Ag, Ilm, Py, Sp	

Примечание. Chl – хлорит, Mag – магнетит, Mnt – монтмориллонит, Pl – плагиоклаз, Fl – флюорит, Rt – рутил, Ms – мусковит, Pg – парагонит, Qz – кварц, Py – пирит, Sp – сфалерит, Apy – арсенопирит, Ccp – халькопирит, Gn – галенит, Mol – молибденит; Au-Ag – самородное золото / серебро, sluda – слюда, Hem – гематит, Dol – доломит, Ilm – ильменит.

Note. Chl – chlorite, Mag – magnetite, Mnt – montmorillonite, Pl – plagioclase, Fl – fluorite, Rt – rutile, Ms – muscovite, Pg – paragonite, Qz – quartz, Py – pyrite, Sp – sphalerite, Apy – arsenopyrite, Ccp – chalcopyrite, Gn – galena, Mol – molybdenite; Au-Ag – native gold / silver, sluda – mica, Hem – hematite, Dol – dolomite, Ilm – ilmenite.

Выводы

1. Содержание Au в модельном рудоносном флюиде, сопоставимое с составом включений [Yudovskaya et al., 2016], достигалось при –237 бар и 350 °С. На основе результатов моделирования можно предположить, что для основной стадии рудообразования характерны эти Т-, Р-условия. Оптимальным соотношением флюид / порода для Слг-1 является 0,2, а для минерализованных сланцев – 0,08 (см. табл. 3, 4).

2. Образование флюида, равновесного с твердой фазой Au, сопоставимой по составу с рудным золотом из минерализованных сланцев, позволяет считать, что источником золота являются вмещающие

месторождение черносланцевые породы, без дополнительного эндогенного источника.

3. Рудный процесс происходил при локальном перераспределении вещества. Оруденение сформировалось из минерализованных сланцев в объеме рудного тела и окаймляющих его минерализованных сланцев.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по Проектам IX.130.3.1 (0350–2016–0032) и IX.130.3.1 (0350–2016–0010). Аналитические исследования проведены в ЦКП изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Авченко О.В., Чудненко К.В., Александров И.А. Физико-химическое моделирование минеральных систем. М. : Юрайт, 2019. 232 с.
- Боровиков А.А., Гущина Л.В., Говердовский В.А., Гимон В.О. Физико-химическая модель формирования руд Мо-W Колгунинского месторождения: термодинамическое моделирование // Геохимия 2020. Т. 65, № 1. С. 31–45. DOI: 10.31857/S0016752520021.
- Будяк А.Е., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения южного обрамления Сибирского кратона в протерозое // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470, № 5. С. 562–565. DOI: 10/7868/S0869565216290181.
- Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Полянский О.П., Травин А.В. Тепломассоперенос в верхней мантии и земной коре: петрологические индикаторы и математическое моделирование // Геодинамика и тектонофизика 2019. Т. 10, № 2. С. 189–196. DOI:10.5800/GT-2019-10-2-0411
- Гаськова О.Л., Редин Ю.О., Неволько П.А., Колпакова М.Н., Наймушина О.С. Физико-химическое моделирование высокотемпературных стадий отложений золота Лугоканского месторождения (Восточное Забайкалье) // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 10. С. 57–66.
- Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золото-рудном месторождении Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 38, № 6. С. 467–484.
- Кашик С.П., Карпов И.К. Физико-химическая теория образования зональности в коре выветривания. Новосибирск : Наука, 1978. 152 с.
- Малышева К.С. Определение минерального состава твердой фазы в системе «вода-порода» с помощью физико-химического моделирования (ПК «Селектор», термальные источники влк. Головинина, о. Кунашир) // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 6–2 (60). С. 116–120. DOI: 10.18454/IRJ. 2227-6017.
- Немеров В.К. Геохимические черты эволюции условий накопления позднедокембрийских толщ Байкало-Патомского нагорья // Доклады Академии наук СССР. 1988. Т. 298, № 6. С. 1446.
- Немеров В.К., Спиридонов А.М., Развозжаева Э.А., Матель Н.Л., Будяк А.Е., Станевич А.М. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов суходожского типа // Отечественная геология. 2005. № 3. С. 17–24.
- Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах байкало-патомского региона. // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 5. С. 729–747.
- Оболенский А.А., Гущина Л.В., Борисенко А.С. Физико-химические модели процессов рудообразования на ртутных месторождениях // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 12. С. 1344–1360.
- Петров Б.В., Макрыгина В.А. Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма. Новосибирск : Наука, 1975. 342 с.
- Рундквист И.К., Бобров В.А., Смирнова Т.Н., Смирнов М.Ю., Данилова М.Ю., Ашеуков А.А. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района // Геология рудных месторождений. 1992. Т. 34, № 6. С. 3–15.
- Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложение. Новосибирск : Гео, 2010. 283 с.
- 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. V. 278A. P. 1–229.
- Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Gol'tsman Y.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. Formation stages of the large-scale noble metal mineralization in the Sukhoi Log deposit, east Siberia: Results of isotope-geochemical study // Doklady Earth Sciences. 2001. V. 415, No 1. P. 810–814.
- Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K. The properties of gases and liquids. N.Y. : McGraw-Hill Book Company, 1977. 592 p.
- Slg-1 (black shale powder). URL: http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/sample_query.asp?lackshale (дата обращения: 29.01.2020).
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // Ore Geology Reviews. 2020. V. 119. P. 103365. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103365.
- Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // American Mineralogist. 2010. V. 95. P. 185–187. DOI: 10.2138/am.2010.3371.

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

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, No 7. P. 453–481. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.

Zhuravkova T.V., Palanova G.A., Prokopyev I.R., Borisenko A.S., Chudnenko K.V., Kravtsova R.G., Makshakov A.S. Physicochemical models of formation of gold-silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia) // Ore Geology Reviews. 2017. V. 91. P. 1–20. DOI: 10.1016/j.oregeorev. 2017.10.017

Авторы:

Брюханова Наталья Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: nmb@igc.irk.ru

Бычинский Валерий Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: val@igc.irk.ru

Будяк Александр Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: budyakl@igc.irk.ru

Чудненко Константин Вадимович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: chud@igc.irk.ru

Geosphere Research, 2020, 4, 25–32. DOI: 10.17223/25421379/17/2

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

A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

PHYSICAL-CHEMICAL MODELING OF THE ORE-FORMING FLUID OF THE SUKHOI LOG DEPOSIT

The main hypotheses on the origin of Sukhoi Log deposits are referred to as (a) postmagmatic–hydrothermal and metamorphic–hydrothermal. The former states that the inflow of gold is caused by the emplacement of post-metamorphic intrusions being the granitoids of the Konstantinovskiy stock and hypothetic basic rock complexes of the Ugakhan pluton occurring at depth. The latter is based on the supposition that the ore-forming solutions generated at regional metamorphism of metalliferous carbonaceous sequences, and intrusions were of minor importance depending on the temperature regime only.

The physical-chemical modeling (PCM) is currently used for investigating both global geochemical processes, i.e. formation of zonation in the weathering crust, phenomenon of mass transfer in the upper mantle of the Earth, and local ones, i.e. formation of mineral associations under metamorphism conditions, construction of physical-chemical model for the hydrothermae of Kipyaschii Lake. Besides, PCM is applied for constructing models disclosing formation of the deposits of gold, molybdenum-tungsten and barite-pyrite ores. Authors Shapkin (1998), Karpov (2001), Kashik (1978) and Chudnenko (2019) reported the results acquired by these studies. In addition, PCM was employed to check the metamorphic–hydrothermal hypothesis on the Sukhoi Log gold ore deposits. Modeling proceeded through three stages. (1) sedimentation, when sediments with siderite-chalcophyllite elements accumulate; (2) early collision linked with catagenic alteration of sediments and (3) collision, when the ore bodies were derived. The goal of modeling was to verify or to reject the assumption on possible formation of ore-forming fluid from host rocks. In the computations, we used the composition of host rocks, e.g. metapelites of the Khomolkho formation within the Baikal-Patom upland and mineralized shales of supra-ore zone. 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. The model involved 25 independent components: Ag, Al, As, Au, C, Cl, Cu, Ca, F, Fe, H, K, Mg, Mo, N, Na, Ni, O, P, Pb, S, Si, Ti and Zn, 1894 mineral phases, 27 gases and 504 components of aqueous solution. The computations performed with the “Selector” program identified, that in the simulated ore-bearing fluid the Au content comparable with the composition of inclusions was reached at 237 bar and 350 °C. This fluid is in equilibrium with the solid phase of Au fitting the ore gold from mineralized shales. Consequently, the host black shale rocks represent the main source for gold. The mineralization originated from the mineralized shales within the ore body and surrounding mineralized shales.

Keywords: *Sukhoi Log, ore-formation, fluid, phase, gold, physical-chemical modeling.*

Reference

Avchenko O.V., Chudnenko K.V., Aleksandrov I.A. *Fiziko-himicheskoe modelirovanie mineral'nyh sistem* [Physico-chemical modeling of mineral systems]. Moscow: Yurajt Publ.; 2019. 232 p. In Russian

Borovikov A.A., Gushchina L.V., Gimon V.O., Goverdovskii V.A. Physicochemical conditions of ore formation at the Kalguty Mo–W deposit: thermodynamic modeling // *Geochemistry International*. 2020. V. 58. No 1. pp. 27–39.

Budyak A.E., Goryachev N.A., Skuzovatov S.Y. Geodynamic background for large-scale mineralization in the southern environs of Siberian Craton in the Proterozoic // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 470. No 2. pp. 1063–1066.

Vladimirov A.G., Kruk N.N., Polyansky O.P., Travin A.V. Heat and mass transfer in the upper mantle and the deep crust: petrological indicators and mathematical modeling // *Geodynamics & Tectonophysics*. 201, No. 10(2). pp. 189–196. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0411>. In Russian.

Gaskova O.L., Redin Y.O., Navolko P.A., Kolpakova M.N., Naymushina O.S. Physico-chemical modeling of high-temperature stage of gold at the Lugokanskoe deposit (Eastern Transbaikalia) // *Izv-tiya TPU. Inzhiniring georesursov=Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018. V. 329. No 10. pp. 57–66. In Russian

- Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K. Forms of the presence of platinum group metals and their genesis in the Sukhoi Log gold ore deposit (Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdenij – Geology of ore deposits*. 1995. V. 38. No 6. pp. 467–484. In Russian
- Kashik S.P., Karpov I.K. *Fiziko-himicheskaya teoriya obrazovaniya zonal'nosti v kore vyvetrivaniya* [Physicochemical theory of the formation of zoning in the weathering crust]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. 152 p. In Russian
- Malysheva K.S. Determination of mineral composition of solid phase in the water-breed system by means of physico-chemical modeling (PC Selektor, thermal sources of Golovin volcano, Kunashir Island) = *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skij zhurnal International research journal*. 2017. V. 6–2. No. 60. pp. 116–120. DOI:10.18454/IRJ.2227-6017. In Russian
- Nemerov V.K. Geochemical features of the evolution of the conditions of accumulation of the Late Prekembrian strata of the Baikal-Patom highlands // *DAN SSSR = DAN of the USSR*. 1988. V. 298. No 6. pp. 1446–1449. In Russian
- Nemerov V.K., Spiridonov A.M., Razvozhayava E.A., Matel N.L., Budyak A.E., Stanevich A.M. Major factors of ontogenesis of Sukhoi Log – type precious deposits // *Otechestvennaya geologiya*. 2005. V. 3. pp. 17–24. In Russian
- Nemerov V.K., Razvozhayava E.A., Budyak A.E., Stanevich A.M., Kornilova T.A. Biogenic sedimentation factors of mineralization in the neoproterozoic strata of the Baikal-Patom reguon // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. V. 51. No 5. pp. 572–586. (In Russian)
- Obolensky A.A., Gushchina L.V., Borisenko A.S. Physicochemical models for ore formation processes at mercury deposits // *Geologiya i geofizika = Geology and Geophysics*. 2006. V. 47. No 12. pp. 1344–1360. In Russian
- Petrov B.V., Makrygina V.A. *Geokhimiya regional'nogo metamorfizma i ul'trametamorfizma* [Geochemistry of regional metamorphism and ultrametamorphism] Novosibirsk. Nauka Publ.; 1975. 342 p. In Russian
- Rundqvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N. Stages of formation of Bodaibisky gold-ore area // *Geologiya rudnykh mestorozhdenij = Geology of Ore Deposits*. 1992. V. 34. No 6. pp. 3–18. In Russian
- Chudnenko K.V. *Termodinamicheskoe modelirovaniye v geokhimii: teoriya, algoritmy, programmnnoye obespechenie, prilozhenie* [Thermodynamic modeling in geochemistry: the theory, algorithms, the software, applications]. Novosibirsk. GEO Publ.; 2010. 287 p. In Russian
- 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. V. 278A. pp. 1–229.
- Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Gol'tsman Y.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. Formation stages of the large-scale noble metal mineralization in the Sukhoi Log deposit, east Siberia: Results of isotope-geochemical study // *Doklady Earth Sciences*. 2001. V. 415. No 1. pp. 810–814. In Russian
- Reid R.C., Pausnitz J.M., Sherwood T.K. *The properties of gases and liquides*. New York: McGraw-Hill Book Company; 1977. 592 p.
- Slg-1 (black shale powder) http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/sample_query.asp (accessed 29.01.2020).
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Abramova V.D., Gareev B.I., Bryukhanova N.N., Parshin A.V. Mineralogical and isotope-geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // *Ore Geology Reviews*. V. 119, April 2020, 103365 DOI 10.1016/j.oregeorev.2020.103365.
- Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. 2010. V. 95. pp. 185–187. DOI: 10.2138/am.2010.3371.
- Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds // *J. Nat. Chem. Lab. Indust.* 1988. V. 60. pp. 27–121.
- Yudovskaya, M.A., Distler, V.V., Prokofiev, V.Y., Akinfeev, N.N. Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena Province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits // *Geoscience Frontiers*. 2016. V. 7. No 3. pp. 453–481. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.
- Zhuravkova T.V., Palanova G.A., Prokopyev I.R., Borisenko A.S., Chudnenko K.V., Kravtsova R.G., Makshakov A.S. Physicochemical models of formation of gold-silver mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia) // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 91. pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.10.017.
- Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*. 2010. V. 95. pp. 185–187. DOI: 10.2138/am.2010.3371.

Author's:

Bryuhanova Natal'ya N., Cand. Sci. (Geol-Miner.), Researcher, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.

E-mail: nnb@igc.irk.ru

Bychinskij Valerij A., Cand. Sci. (Geol-Miner.), Senior Researcher, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.

E-mail: val@igc.irk.ru

Budyak Aleksandr E., Cand. Sci. (Geol-Miner.), Head of Department, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.

E-mail: budyakl@igc.irk.ru

Chudnenko Konstantin V., Dr. Sci. (Geol-Miner.), Head of Department, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia.

E-mail: chud@igc.irk.ru