

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.88.10.013>

## ЗАВИСИМОСТЬ ПРОБЫ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОТ СОСТАВА ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Научная статья

**Нерода О.Н.<sup>1</sup>, Остапенко Н.С.<sup>2</sup>\***

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-1265-9203;

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0001-9301-3684;

<sup>1,2</sup> Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия

\* Корреспондирующий автор (ostapenko\_ns[at]mail.ru)

### Аннотация

Обычно считается, что проба золота гидротермальных месторождений определяется типами источников исходных флюидов, соотношениями Au и Ag в них, P, T и глубинами формирования месторождений и составами сопутствующих минеральных парагенезисов. В данном исследовании показана определяющая роль дополнительного фактора – типа щелочности рудовмещающих пород. В процессе предрудного и синрудного метасоматоза они могут дополнительно обогащать глубинные флюиды Na или K, что может значительно менять растворимость в них Au и Ag. На примере трех золоторудных месторождений установлена следующая зависимость. Терригенные породы Na-K специализации месторождения Токур (Россия) лишь незначительно меняли соотношение Na / K в исходных калиевых флюидах, вследствие этого в рудах отлагалось золото промежуточной и низкой пробы (811–691%). Флюиды месторождений Одолго (Россия) и Калгурли (Австралия), формировавшихся в породах Na специализации, в процессе метасоматоза значительно обогащались натрием. Проба золота, отлагавшегося в рудах этих месторождений выше 900%.

**Ключевые слова:** месторождение золота, вмещающие породы, проба золота.

## DEPENDENCE OF STANDARD OF FINENESS OF FREE GOLD OF HYDROTHERMAL DEPOSITS ON COMPOSITION OF HOST ROCKS

Research article

**Neroda O.N.<sup>1</sup>, Ostapenko N.S.<sup>2</sup>\***

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-1265-9203;

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0001-9301-3684;

<sup>1,2</sup> Institute of Geology and Nature Management, FEB RAS, Blagoveshchensk, Russia

\* Corresponding author (ostapenko\_ns[at]mail.ru)

### Abstract

It is generally believed that the standard of fineness of gold of hydrothermal deposits is determined by the types of sources of the initial fluids, the ratios of Au and Ag in them, P, T and the depths of deposits formation as well as the composition of the host mineral paragenesis. This study shows the decisive role of an additional factor and namely the alkalinity of ore-bearing rocks. In the process of pre- and synergetic metasomatism, they can additionally enrich deep Na or K fluids, which, in turn, can significantly change the solubility of Au and Ag in them. Using the example of three gold ore deposits, the following relationship is established. Terrigenous rocks of Na-K specialization of the Tokur deposit (Russia) have slightly changed the Na/K ratio in the initial potassium fluids; as a result, intermediate and low-grade gold was deposited in ores (811–691 %). The fluids of the Odolgo (Russia) and Kalgoorlie (Australia) deposits, which were formed in the Na specialization rocks, were significantly enriched in sodium during metasomatism. The standard of fineness of gold deposited in the ores of these deposits is above 900 %

**Keywords:** gold deposit, host rocks, standard of fineness of gold.

### Введение

В рудах золоторудных гидротермальных месторождений мира проба самородного золота широко варьирует (от n: 100 до 1000‰). Это отчетливо наблюдается не только от месторождения к месторождению, но нередко и в рудных телах одного месторождения. Причины этого явления исследователи видят в различиях глубин формирования месторождений, температур отложения продуктивных парагенезисов золота, от минеральных составов его парагенезисов в рудах [1], а также от типов рудоформирующих флюидов (по кислотности-щелочности и хлоридности) [2], [3], и соотношений в них содержаний золота и серебра [2]. Вместе с тем, на основе данных широкомасштабного изучения многими исследователями флюидных включений в минералах руд различных месторождений золота, установлено, что катионный и анионный составы реликтов рудообразующих флюидов во многом стандартны. В них присутствуют одни и те же группы катионов, анионов, газовых компонентов [3], но их количественные соотношения переменные. Это свидетельствует о своеобразии состава и последующей эволюции поступающих глубинных флюидов на каждом месторождении по мере их взаимодействия с вмещающими породами, остывания и разгрузки. Минералоотложение на каждом из золоторудных месторождений происходило в несколько стадий, из них продуктивными на золото являлись либо одна, либо несколько.

Проба отлагавшегося золота зависела от множества из вышеперечисленных факторов (причин), влиявших на эволюцию флюида. Мы считаем необходимым дополнить вышеизложенный перечень фактором влияния исходного состава вмещающих пород на эволюцию состава флюида, в том числе на изменение в нем соотношений концентрации и активностей Na и K. Влияние этого фактора исследователями изучено пока ещё недостаточно.

Предрудный и синрудный метасоматоз большого объема вмещающих пород, несомненно, вызывал глубокое преобразование состава «исходного» флюида и изменение параметров его pH, Eh и концентрации компонентов и, что особенно важно, на изменение его качественной щелочности (Na / K). В соответствии с [3], [4, С. 234], существенное преобладание концентраций того или иного из них могло отразиться на растворимости и устойчивости комплексов благородных металлов во флюидах на этапах их переноса и отложения и, соответственно, на составе кристаллизующегося золота. Ранее нами [5] была подмечена зависимость пробы золота, отложенного в рудных телах месторождений Селемджинского рудного района Приамурья от соотношения концентраций Na и K во вмещающих породах и подвижности этих элементов в процессах их околорудного метасоматоза. Рассмотрим детальнее эту особенность рудоформирования на примерах трех золоторудных месторождений различных рудных районов России и Австралии, размещающихся в различающихся по составу и натриевости вмещающих породах.

На месторождениях по намеченным профилям через минеральные зоны и околожилные метасоматиты были отобраны образцы исходных и метасоматизированных пород. Проведены исследования под микроскопом их минерального состава, а по результатам сопоставления силикатных анализов тех и других оценено влияние исходных пород на эволюцию поступающего металлоносного флюида. Так как количественный состав исходного глубинного металлоносного флюида, поступившего в рудолокализирующие структуры не известен, его эволюцию под влиянием взаимодействия с вмещающими рудные тела породами мы оцениваем по показателю относительного изменения его натриевости:  $\pm \Pi \frac{Fl}{Na} = n_1 + n_2$  [5]. Этот показатель рассчитывался как сумма количеств  $n_1$  ( $\pm Na_2O$ ) и  $n_2$  ( $\pm K_2O$ ) в мас.%, поступивших (+) во флюид из пород при их метасоматозе и их количеств, расходуемых (-) флюидом на метасоматоз пород

#### Краткая характеристика геологии и состава вмещающих пород и руд месторождений золота

**Месторождение Одолго** размещается в Становой складчатой области Приамурья (рис. 1), в метаморфических породах докембрийского возраста, представленных гнейсами, кристаллическими сланцами и прорывающими их гранитоидами древнестанового комплекса. Рудовмещающие гнейсы имеют повышенную основность и отчетливую «специализацию».

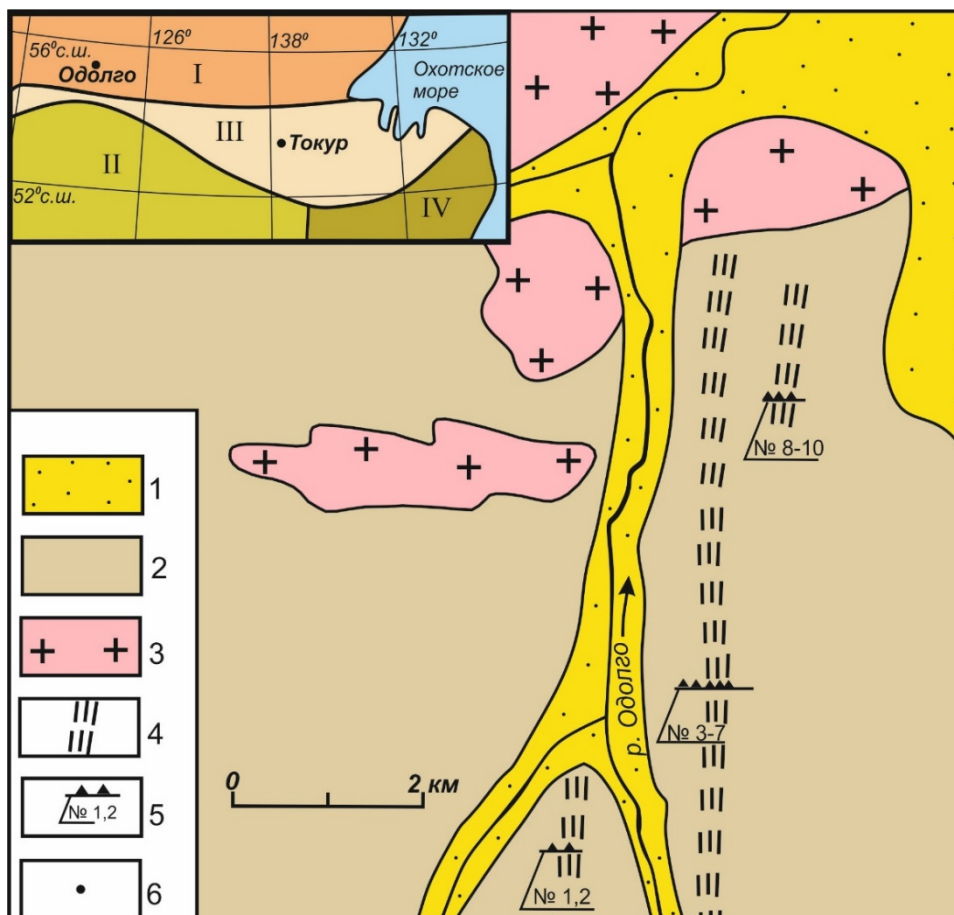


Рис. 1 – Схема геологического строения месторождения Одолго

1 – аллювий; 2 – серые гнейсы с прослоями амфиболитов и гранатсодержащих сланцев докембрия; 3 – докембрийские средне- и мелкозернистые гнейсовидные гранодиориты и пегматоидные граниты; 4 – зоны кварц-мусковитовых метасоматитов; 5 – места отбора образцов и их номера; 6 – положение месторождений на врезке.

*Примечание: на врезке: I–IV – основные геологические структуры: I – докембрийская становая складчатая область, II – Амурский микроконтинент, III и IV – соответственно Монголо-Охотский палеозойский и Сихоте-Алинский мезозойский складчатые пояса*

В этих породах выявлены три субвертикальные золотоносные зоны мусковитизации субмеридионального простирания мощностью по несколько десятков метров каждая. Составы исходных пород и метасоматитов приведены

в таблице 1. В зонах метасоматитов присутствуют будины и линзы кварца. Золото присутствует в кварце и в мусковитизированных породах с вкрапленностью магнетита.

Таблица 1 – Составы вмещающих пород и метасоматитов месторождения Одолго и показатели изменения натриевости рудовмещающего флюида  $\Pi_{Na}^{Fl}$  по данным авторов

Компоненты	Зона метасоматитов № 1			Зона метасоматитов № 2					Зона метасоматитов № 3			
		0–5 м <sup>1</sup>	Привнос (+) вынос (-)	0–5 м <sup>1</sup>	10–15 м <sup>1</sup>	15–25 м <sup>1</sup>	25–30 м <sup>1</sup>	Привнос (+) вынос (-)		0–5 м <sup>1</sup>	5–9 м <sup>1</sup>	Привнос (+) вынос (-)
	1	2		3	4	5	6		7	8	9	
SiO <sub>2</sub>	58,27	60,09	+	57,61	53,21	65,32	68,80	+	55,90	55,70	53,47	–
TiO <sub>2</sub>	1,11	1,11		1,01	1,35	0,30	0,44		1,18	1,38	1,25	+
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,32	19,07	+	17,86	23,94	18,58	16,80		19,06	21,91	24,12	+
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,70	5,27	+	3,06	9,14	2,26	2,35		4,00	5,83	9,30	+
FeO	3,00	1,46	–	3,37	1,13	1,36	0,75	–	3,36	2,61	0,60	–
MnO	0,13	0,12		0,12	0,07	0,11	0,12	–	0,23	0,14	0,11	–
MgO	2,69	1,24	–	2,81	1,03	1,30	1,15	–	2,75	1,70	1,10	–
CaO	6,27	2,49	–	6,63	0,53	1,10	0,50	–	6,53	2,46	0,65	–
SO <sub>3</sub>	–	0,02	+	–	–	–	–		–	–	–	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,23	0,25		0,30	0,18	0,06	0,08	–	0,24	0,21	0,16	–
H <sub>2</sub> O	0,92	2,13	+	0,51	1,38	1,01	1,04	+	0,72	1,48	1,06	+
ППП	–	–		0,20	1,41	1,16	0,88	+	0,50	0,69	2,04	+
Na <sub>2</sub> O	3,58	0,94	–2,64	3,39	2,46	2,84	2,40	–	3,39	2,55	1,58	–
K <sub>2</sub> O	2,28	6,60	+4,32	2,65	3,86	5,32	5,52	+	2,88	5,42	8,14	+
Na/K	1,6	0,14		1,3	0,64	0,53	0,45		1,2	0,47	0,22	
$\Pi_{Na}^{Fl}$			+6,96 <sup>2</sup>	+0,6 <sup>2</sup>	+2,7 <sup>2</sup>	+3,8 <sup>2</sup>	+4,42 <sup>2</sup>			+3,38	+7,07	

Примечание: <sup>1</sup> расстояния мест отбора образцов от краевых зон метасоматитов к их средней части.

Образцы пород: 1 – неизменный биотит–амфиболовый гнейс с гранатом; 2 – мусковитовый метасоматит; 3 – биотит–амфиболовый гнейс с кварц–полевошпатовыми прожилками; 4 – магнетит–мусковитовый метасоматит; 5 и 6 – мусковитовые метасоматиты; 7 – неизменный биотит–амфиболовый гнейс; 8 – мусковитизированный гнейс; 9 – магнетит–мусковитовый метасоматит;

<sup>2</sup> рассчитаны относительно состава неизменного гнейса образца 1

**Месторождение Калгурли** (Западная Австралия) размещается в зеленокаменном поясе Northman Wiluna тектоноблока Йилгарн. Оно характеризуется по материалам [6], [7], [8]. Это крупнейшее по запасам золота (более 1500 т) месторождение сформировалось в наиболее интенсивно тектонически нарушенном и метасоматизированном блоке пород протяженностью более 4 км, шириной около 1500 м. Вмещающими являются архейские комплексы пород основного состава – покровные базальты, долериты, силлы габбро-долеритов и ультрабазитов с прослоями осадочных пород. Они метаморфизованы в зеленые сланцы и амфиболиты. Территория рудного поля фрагментирована на ряд тектонических блоков, смещенных относительно друг друга по разломам северо-западного простирания. Золото-сульфидная с теллуридами минерализация контролировалась серией крутозалегающих сближенных параллельных, либо сопрягающихся под острыми углами, нарушений основного северо-западного и второстепенного меридионального и северо-восточного простираний. Узлы их пересечений контролировали поступление флюидов, широко проявленный предрудный хлорит-альбит-карбонат-серицит-кварцевый метасоматоз пород и формирование рудных тел мощностью 0,1–10 м с вкрапленностью, гнездами и прожилками пирита, других сульфидов, блеклых руд и теллуридов в ассоциации с кварцем. Химический состав исходных пород и метасоматитов приведен в таблице 2 по [9].

Таблица 2 – Химический состав (в мас.%) вмещающих амфиболитов и метасоматитов золоторудного месторождения Калгурли и показатель изменения натриевости  $\Pi_{Na}^{Fl}$  флюида в процессе предрудного метасоматоза.

Компоненты	Амфиболит неизменный Обр. 3231*	Метасоматиты		Привнос (+) в породы и вынос (-) компонентов из них при метасоматозе	
		хлорит-серицит-карбонат-пиритовый Обр. 1753*	хлорит-серицит-карбонат-пиритовый с Au+Ag обр. 206*	Колонки 2 и 3	Колонки 2 и 4
1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	48,86	46,94	51,27	-1,92	+2,41
TiO <sub>2</sub>	0,22	0,14	0,23	-0,08	+0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,91	12,49	13,85	-2,42	-1,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,13	0,33	1,54		
FeO		9,20	2,63		
MgO	7,65	3,56	4,18	-4,09	-3,47
CaO	12,19	6,43	6,40	-5,76	-5,79
MnO	0,72	0,32	следы	-0,40	-0,72
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,04	0,19	0,10		
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	1,51	0,30	0,22		
CO <sub>2</sub>	нет	13,41	8,02	+13,41	+8,02
Te	Нет	нет	следы	нет	+следы
FeS <sub>2</sub>	нет	2,28	7,41	+2,28	+7,41
Na <sub>2</sub> O	2,58	1,84	1,78	-0,74	-0,80
K <sub>2</sub> O	0,19	2,57	2,37	+2,38	+2,18
Сумма, %	100	100	100		
Na/K	13,6	0,71	0,75		
$\Pi_{Na}^{Fl}$		+3,12	+2,98		

Наложённая на метасоматиты рудная минерализация, по [6], сформировалась в три стадии: 1) вкрапленный пирит с золотом, выделялся на завершающем этапе предрудного метасоматоза; 2) основная вкрапленная золото-пиритовая ассоциация; 3) тетраэдрит-полисульфидно-теллуридная ассоциация. Самородное золото частично отлагалось на завершающем этапе предрудного метасоматоза пород и в последующих рудных парагенезисах. Часть золота руд связана в теллуридах (около 20%), 10% рассеяно в сульфидах и около 70% присутствует в свободной форме. Проба самородного золота 901–972‰.

**Месторождение Токур** расположено в центральной части Селемджинско-Кербинской металлогенической зоны Приамурья Монголо-Охотской складчатой области. Это месторождение является примером рудного объекта, сформированного в толще терригенных пород верхнего палеозоя, регионально метаморфизованных в цеолитовой фации. Оно формировалось в позднем мезозое над нескрытым раннемеловым гипабиссальным гранитоидным плутоном. Размещается месторождение в южном крыле крупной антиклинали на сопряжении с продольно секущим ее флюидопроводящим Главным разломом широтной ориентировки. Месторождение детально охарактеризовано [9], [11]. Состав неизменных вмещающих пород и метасоматитов показан в таблице 3.

Все три жильные зоны с большим количеством золото-сульфидно-кварцевых жил мощностью от 0,05 до 0,7 м, иногда до 1–2 м в раздувах, размещаются в висячем крыле указанного флюидопроводника, косо причленяясь к нему в западной части рудного поля. Разлом и жильные тела падают в южных румбах под углами 35–50° и 30–35°, соответственно. Жильные зоны размещаются в толще хрупких песчаников и алевролитов токурской свиты К-Na и К специализации. Они залегают несколько круче их слоистости и выклиниваются под экраном толщи аргиллитов с пластами песчаников вышележащей экимчанской свиты.

$$\Pi_{Na}^{Fl} = \frac{Au}{Au + Ag}$$

Таблица 3 – Перераспределение щелочей (в масс.%) между вмещающими золото-кварцевую жилу породами и исходным флюидом в процессе пред- и синрудного метасоматоза. Месторождение Токур, жила 184.

Гориронты месторождения, расстояния отбора проб от жилы	№ пробы	Опробованная порода	Содержания компонентов в породе			Привнос (+), вынос (-)				Показатели относительного изменения натриевости флюида $PI_{Na}^{Fl}$		Проба самородного золота, $\frac{Au}{Au + Ag}$ %***	
			SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	порода		флюид		в точках опробования (П <sub>1</sub> , П <sub>2</sub> , П <sub>3</sub> )	Средневзвеш.* * для интервалов метасоматоза пород 0–2,5 м от жил	по данным авторов	по данным [3]
						Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O <sub>Fl</sub>	K <sub>2</sub> O <sub>1</sub>				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Горизонт 777 м	Средний состав (2)	аргиллит неизм.	62,15	2,37	4,14								
25 м	Н-178	песчаник неизм.	66,01	2,92	3,58						-0.459	$\frac{691 - 733}{711}$ (6)	718
0,1 м	Н-261	аргиллит*	63,98	2,90	4,45	+0,53	+0,31	-0,53	-0,31	-0,22			
0,5 м	Н-262	песчаник*	68,29	3,22	3,43	+0,3	-0,15	-0,3	+0,15	-0,45			
2,0 м	Н-264	аргиллит*	62,75	2,61	3,92	+0,24	-0,22	-0,24	+0,22	-0,48			
Гори-зонт 700 м	Н-178	песчаник неизм.	66,01	2,92	3,58						+0.706	$\frac{734 - 854}{789}$ (7)	$\frac{700 - 803}{757}$
0,1 м	Н-175	песчаник*	66,36	4,11	2,89	+1,19	-0,69	-1,19	+0,69	-1,88			
0,5 м	Н-176	песчаник*	63,97	2,75	4,22	-0,17	+0,64	+0,17	-0,64	+0,81			
2,0 м	Н-177	песчаник*	64,68	2,80	4,29	-0,12	+0,71	+0,12	-0,71	+0,83			
Гори-зонт 90 м	Н-157	аргиллит неизм.	61,24	1,98	4,38						+0.424	$\frac{747 - 845}{811}$ (5)	нет данных
0,1 м	Н-151	аргиллит*	62,78	1,89	4,50	-0,09	+0,12	+0,09	-0,12	+0,21			
0,5 м	Н-152	аргиллит*	62,17	1,80	4,92	-0,18	+0,54	+0,18	-0,54	+0,72			
2,0 м	Н-153	аргиллит*	61,89	1,51	4,17	-0,47	-0,21	+0,47	+0,21	+0,26			

Примечания: \* изменённые породы; \*\* рассчитаны по формуле  $PI_{Na}^{Fl} = \frac{0,1 \cdot \Pi_1 + 0,9 \cdot \Pi_2 + 1,5 \cdot \Pi_3}{2,5 \cdot m}$ , где  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$  – расчетные показатели для точек опробования;

\*\*\* в числителе пределы вариации, в знаменателе – среднее; в круглых скобках указано число анализов

Простирание жильных зон более 2 км, на глубину прослежены на 500 м. Основные богатые золотом жильные тела приурочены к средним и верхним горизонтам. Жилы разведывались и обрабатывались подземным способом. Отработка рудных столбов в них производилась с 1939 по 1995 годы в интервале глубин от поверхности до 350 м. Объект недоразведан. На руднике добыто 33,7 т золота. Вмещающие рудные жилы песчаники подверглись серицит-кварцевому метасоматозу и сульфидизации, а на большем удалении от жил также и карбонатизации. Золоторудная минерализация относится к жильному малосульфидному (сульфидов 0,5–3%) золото-пирит-арсенопирит-кварцевому типу. Она формировалась в три стадии. Парагенезисы двух первых из них продуктивны: ранний кварц-пирит-арсенопиритовый с тонкодисперсным золотом в пиритах (среднее по 8 анализам – метод фотометрии с бриллиантовым зеленым – 14,94 г/т,) и арсенопиритах (среднее по 10 анализам – тот же метод – 25,5 г/т), и главный золото-кварц-полиметаллический со свободным золотом различной крупности, содержаниями 1–50 г/т, а в локальных участках до 100–500 г/т. Проба золота низкая (620–740‰) на верхних горизонтах, а на глубину она повышается до 800 и более ‰ (табл. 3). Кварц-карбонатные прожилки завершающей стадии безрудные. Источником металлоносных флюидов являлся магматический очаг, дифференциатами которого являются неэродированный предрудный гипабиссальный гранитоидный плутон раннемелового возраста и послерудные малые интрузии, представленные в рудном поле секущими штоками диоритов и субмеридиональными дайками плагиогранитов и диоритовых порфириров.

Взаимосвязь эволюции натриевости  $\Pi \frac{Fl}{Na}$  флюида в процессах пред- и синрудного метасоматоза вмещающих пород и изменения пробы отлагавшегося золота

При формировании на месторождении Одолго мусковитовых метасоматитов в зонах нарушенных и трещиноватых гнейсов, в процессе

взаимодействия «флюид-порода» (табл. 1) в них частично привносились  $K_2O$  и  $SiO_2$ , из них частично выносились  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ , а в минералах метасоматитов перераспределялись  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $MnO$  и окислы Fe. Отношение  $Na_2O/K_2O$  в исходных породах составляло 1,2–1,6, а в метасоматитах каждой зоны это соотношение менялось на обратное (0,64–0,14). Показатель относительного обогащения флюидов натрием (или обеднения калием) в зонах метасоматоза значительно варьировал в пределах величин от +2,7 до +7,07. Большой вклад исходных пород в такой тренд эволюции качественной щелочности флюидов на предрудной и рудной стадиях объясняется повышенной исходной натриевостью вмещающих пород и высокой активностью калия в поступавших грубинных флюидах. На примере зоны 2 (рис. 1 и табл. 1) по четырем пробам отчетливо видно устойчивое нарастание натриевости рудообразующего флюида от +0,6 в краевой, до +4,42 в центральной части зоны, где отложилась основная часть золота. Его проба высокая – 900–940‰.

При формировании на месторождении Калгурли по амфиболитам высоконатриевой специализации хлорит-альбит-серицит-карбонатных метасоматитов с пиритом и золотой минерализацией (табл. 2), флюиды в зоны нарушенных и трещиноватых амфиболитов привносили S,  $CO_2$ ,  $K_2O$ , Te, Au и Ag. В породах перераспределялись в новых минеральных парагенезисах метасоматитов и частично выносились во флюид  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $MnO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ , а в метасоматитах и возникавших полостях отлагались  $SiO_2$  и Fe в форме прожилков, жил и вкрапленности пирита. Отношение  $Na_2O / K_2O$  в исходных амфиболитах составляло около 13,5, а в метасоматитах, за счет реакций обмена с флюидами, оно резко понижалось до 0,7–0,75. За счет значительного расхода поступающим флюидом калия на образование серицита и частичного выноса из амфиболитов Na, рудообразующий флюид, относительно исходного, обогащался натрием ( $\Pi \frac{Fl}{Na}$  около +3,0) Из такого флюида, по [6], отлагалось самородное золото с пробой 901–972‰.

**На месторождении Токур** неизменные рудовмещающие породы имеют калиевую специализацию (табл. 3). При этом, аргиллиты обогащены калием по отношению к натрию в большей степени (в 1,7–2,2 раза), нежели песчаники (в 1,2 раза). В процессе формирования околожильных кварц-серицит-сульфидных и кварц-карбонат-серицитовых предрудных метасоматитов по неизменным песчаникам, алевролитам и аргиллитам, флюидами в породы привносились S,  $SiO_2$ , K, Au, Ag и частично выносился во флюид Na. При этом, в объеме метасоматитов перераспределялись те же основания, что и на выше охарактеризованных месторождениях (в таблице 3 мы их не показываем). Несмотря на калиевую специализацию исходных рудовмещающих пород, при серицитизации содержащихся в них плагиоклазов, на нижние и средние уровни рудоносных зон флюидом дополнительно привносилось некоторое количество калия, а избыток натрия из пород поступал во флюиды.

На верхнем горизонте картина была иной – в пачку переслаивания пород частично привносился Na, а выносился K. Вследствие этого, на нижнем и среднем уровнях этой и других рудоносных зон месторождения Токур, из флюидов с повысившейся натриевостью ( $\Pi \frac{Fl}{Na}$  до +0,42 и +0,706) в кварцевых жилах отлагалось золото промежуточной пробы (диапазон 734–854‰), а на верхнем уровне, из флюидов с резко понизившейся натриевостью ( $\Pi \frac{Fl}{Na}$  -0,459) отлагались кварц, адуляр и низкопробное золото (691–733‰).

### Резюме

В процессе пред- и синрудного метасоматоза пород, вмещающих рудные тела охарактеризованных месторождений, под действием поступающих магматогенных флюидов, из них в подвижное состояние переходило значительное количество различных компонентов, оказавшихся избыточными при формировании на их месте новых устойчивых парагенезисов минералов. Среди них  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ , окислы Fe, а также Na и K (табл. 1–3). Большая часть этих компонентов перераспределялась между новообразованными минералами в различных зонах метасоматоза. Меньшая их часть, совместно с некоторыми компонентами исходного флюида, формировала новые минералы, в том числе рудные. Последние отлагались среди метасоматитов, а также в возникавших в них микро- и макрополостях в виде вкрапленности, гнезд, прожилков и жильных тел. В процессе метасоматоза пород во флюидах

постоянно менялись концентрации солевых компонентов, соотношения концентраций Na и K, кислотность-щелочность, протекали реакции, приводившие к образованию новых растворимых соединений и отложению в возникавших полостях твердофазных продуктов этих реакций.

В процессах метасоматоза особенно важное значение имела подвижность Na и K. Их привнос флюидами с фиксацией в метасоматитах и вынос из пород часто разнонаправлены. Изменение соотношений их концентраций во флюидах и, соответственно, активности каждого из них в трансформированных растворах, могло отражаться на растворимости [12, С. 478], [13, С. 24-31], устойчивости хлоридных и иных комплексов золота и серебра в растворах, на соотношении концентраций этих металлов в них [4, С. 234-235] и, следовательно, на пробности отлагавшегося золота в различных парагенезисах [5, С. 381-386]. Как показано на примере трех выше охарактеризованных разновозрастных золоторудных месторождений, более высокопробное золото отлагалось из трансформированных остывающих более натриевых растворов (руды месторождений Одолго и Калгурли); промежуточное и низкопробное – из растворов менее богатых натрием или с доминированием калия (руды месторождения Токур нижнего и среднего уровней и, особенно, верхнего уровня, соответственно). На примере жильного тела № 184 этого месторождения (табл. 3) отчетливо видно последовательное снижение пробы самородного золота, отложенного в одну стадию, от нижнего к верхнему его уровню, в соответствии со снижением натриевости рудоформирующего флюида в этом направлении.

Из изложенного выше материала по трем золоторудным месторождениям можно сделать однозначный вывод, что факт влияния состава рудовмещающих пород на состав отлагавшегося самородного золота и на сульфидность руд, очевиден. Проба отлагавшегося в рудах этих месторождений самородного золота коррелируется, в общих чертах, с исходной натриевостью неизменных вмещающих пород, подвижностью выносимого из них натрия в процессах их пред- и синрудного метасоматоза и сложившимися активностями натрия и калия в трансформированных рудообразующих растворах.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

- Петровская Н.В. Самородное золото / Петровская Н.В. – 1973. – М.: Наука. – 347 с.
- Пальянова Г.А. Физико-химические особенности поведения золота и серебра в процессах гидротермального рудообразования / Г.А. Пальянова; отв. ред. А.С. Борисенко. – 2008. – Новосибирск: СО РАН. – 221 с.
- Моисеенко В.Г. Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока / В.Г. Моисеенко; отв. ред. Г.П. Воларович. – М.: Наука. – 1977. – 304 с.
- Щербина В.В. Различия геохимических процессов, протекающих с участием калия и натрия / Щербина В.В. // Геохимия. – 1963. – № 3. – С. 229–236.
- Остапенко Н.С. Зависимость пробы кристаллизующегося золота от изменения соотношения щелочей во флюидах при их взаимодействии с рудовмещающими породами (на примере месторождений Приамурья) / Остапенко Н.С. // ДАН. – 2006. – Т. 410 – № 3. – С. 381–386.
- Shackleton J.M. Telluride mineralogy of the Golden Mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia / Shackleton J.M., Bateman R. // The Canadian Mineralogist. – 2003. – Vol. 41. – P. 1503–1524.
- Сафонов Ю.Г. Пространственные и генетические соотношения прожилково-вкрапленного и жильного гидротермального оруденения / Сафонов Ю.Г., Злобина Т.М., Сароян М.Р. // Руды и металлы. – 2006. – № 3. – С. 20–33.
- Сясько А.А. Сравнительный анализ докембрийских золотоносных образований кристаллических щитов / Сясько А.А., Гриб Н.Н., Рэдлик Э.Ф. // Горные науки и технологии. – 2017. – № 2. – С. 11–27.
- Lindgren W. Metasomatic processes in the gold deposits of Western Australia / Lindgren W. // Economic Geology. – 1906. – Vol. 1. – № 6. – P. 530–544.
- Эйриш Л.В. Золоторудное месторождение Токур (Дальний Восток, Россия) / Эйриш Л.В., Остапенко Н.С., Моисеенко В.Г. // Геология рудных месторождений. – 2002. – Т. 44. – № 1. – С. 42–58.
- Остапенко Н.С. Условия отложения и особенности распределения индивидов самородного золота в жилах мезотермального месторождения Токур (Россия) / Остапенко Н.С., Нерода О.Н. // Геология рудных месторождений. – 2016. – Т. 58. – №3. – С. 239–250.
- Глюк Д.С. Растворимость золота в воде, растворах HCl, HF хлоридов, фторидах, карбонатов и бикарбонатов натрия и калия при давлении 1000 кг/см<sup>2</sup> / Глюк Д.С., Хлебникова А.А. // ДАН. – 1980. – Т. 254. – № 2. – С. 475–479.
- Некрасов И.Я. Высокотемпературная растворимость золота в растворах HCl и KCl и генезис золоторудных месторождений / Некрасов И.Я., Диман Е.Н. // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 1989. – № 2. – С. 24–31.

#### Список литературы на английском языке / References in English

- Petrovskaya N.V. Samородное zoloto [Free Gold] / Petrovskaya N.V. – 1973. – M.: Nauka. – 347 p. [in Russian]
- Palyanova G.A. Fiziko-khimicheskie osobennosti povedeniya zolota i serebra v protsessakh gidrotermalnogo rudoobrazovaniya [Physico-Chemical Features of Gold and Silver in the Processes of Hydrothermal Ore Formation] / G.A. Palyanova; resp. ed. A.S. Borisenko. – 2008. – Novosibirsk: SB RAS. – 221 p. [in Russian]
- Moiseenko V.G. Geokhimiya i mineralogiya zolota rudnykh rayonov Dalnego Vostoka [Geochemistry and Mineralogy of Gold Ore Regions of the Far East] / V.G. Moiseenko; resp. ed. G.P. Volarovich. – M.: Nauka. – 1977. – 304 p. [in Russian]
- Shcherbina V.V. Razlichiya geokhimicheskikh protsessov, protekayushchikh s uchastiem kaliya i natriya [Differences in Geochemical Processes Involving Potassium and Sodium] / Shcherbina V.V. // Geochemistry. – 1963. – No. 3. – P. 229–236. [in Russian]
- Ostapenko N.S. Zavisimost proby kristallizuyushchegosya zolota ot izmeneniya sootnosheniya shchelochey vo flyuidakh pri ikh vzaimodeistvii s rudovmeshchayushchimi porodami (na primere mestorozhdenii Priamurya) [Dependence of Standard

- of Fineness of Crystallizing Gold on a Change in Ratio of Alkalies in Fluids during their Interaction with Ore-Bearing Rocks (on the example of Priamurye deposits)] / Ostapenko N.S. // DAN. – 2006. – V. 410 – No. 3. – P. 381–386. [in Russian]
6. Shackleton J.M. Telluride mineralogy of the Golden Mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia / Shackleton J.M., Bateman R. // The Canadian Mineralogist. – 2003. – Vol. 41. – P. 1503–1524.
7. Safonov Yu.G. Prostranstvennyye i geneticheskie sootnosheniya prozhilkovno-vkraplennogo i zhilnogo gidrotermalnogo orudneniya [Spatial and Genetic Relationships of Vein Disseminated and Vein Hydrothermal Mineralization] / Safonov Yu.G., Zlobina T.M., Saroyan M.R. // Rudy i metally [Ores and Metals]. – 2006. – No. 3. – P. 20–33. [in Russian]
8. Syasko A.A. Sravnitelnyy analiz dokembriyskikh zolotonosnykh obrazovaniy kristallicheskikh shchitov [Comparative Analysis of Precambrian Gold Formations of Crystalline Shields] / Syasko A.A., Grib N.N., Redlikh Ye.F. // Gorniyе науки i tekhnologii [Mining Science and Technology]. – 2017. – No. 2. – P. 11–27. [in Russian]
9. Lindgren W. Metasomatic processes in the gold deposits of Western Australia / Lindgren W. // Economic Geology. – 1906. – Vol. 1. – № 6. – P. 530–544.
10. Erish L.V. Zolotorudnoye mestorozhdeniye Tokur (Dalnii Vostok, Rossiya) [Gold Mine in Tokur (Far East, Russia)] / Erish L.V., Ostapenko N.S., Moiseenko V.G. // Gologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]. – 2002. – V. 44. – No. 1. – P. 42–58. [in Russian]
11. Ostapenko N.S. Usloviya otlozheniya i osobennosti raspredeleniya individov samorodnogo zolota v zhilakh mezotermalnogo mestorozhdeniya Tokur (Rossiya) [Deposition Conditions and Distribution Features of Free Gold in the Tokur Mesothermal Deposit (Russia)] / Ostapenko N.S., Neroda O.N. // Gologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits] – 2016. – V. 58. – No. 3. – P. 239–250. [in Russian]
12. Gluck D.S. Rastvorimost zolota v vode, rastvorakh HCl, HF khloridov, ftoridakh, karbonatov i bikarbonatov natriya i kaliya pri davlenii 1000 kg/sm<sup>2</sup> [Gold Solubility in Water, Solutions of HCl, HF Chlorides, Fluorides, Sodium and Potassium Carbonates and Bicarbonates at a Pressure of 1000 kg/cm<sup>2</sup>] / Gluck D.S., Khlebnikova A.A. // DAN. – 1980. – V. 254. – No. 2. – P. 475–479. [in Russian]
13. Nekrasov I.Ya. Vysokotemperaturnaya rastvorimost zolota v rastvorakh HCl i KCl i genezis zolotorudnykh mestorozhdeniy [High Temperature Solubility of Gold in HCl and KCl Solutions and Genesis of Gold Deposits] / Nekrasov I.Ya., Diman E.N. // Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka [University News. Geology and Exploration]. – 1989. – No. 2. – P. 24–31. [in Russian]