

УДК 553.411.071 (407.5)

**УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТО-КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ МЕЧНИКОВСКОГО  
И АЛТЫН-ТАШСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ЮЖНЫЙ УРАЛ:  
РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИХ И ИЗОТОПНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**И.Ю. Мелекестева<sup>1</sup>, А.М. Юминов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, melekestseva-irina@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, umin@mineralogy.ru*

**FORMATION CONDITIONS OF GOLD-QUARTZ VEINS OF THE MECHNIKOVSKOE  
AND ALTYN-TASH DEPOSITS, SOUTH URALS: FLUID INCLUSION  
AND ISOTOPIC STUDY**

**I.Yu. Melekestseva<sup>1</sup>, A.M. Yuminov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, melekestseva-irina@yandex.ru*

<sup>2</sup> *South Ural State University, Miass, umin@mineralogy.ru*

Изучены флюидные включения и измерен изотопный состав кислорода в кварце Мечниковского и Алтын-Ташского месторождений золота в лиственитах, Южный Урал. Образование золото-кварцевых жил на месторождениях происходило при одинаковых температурах (207–306 и 229–294 °С) из растворов с близкими солёностью (10.6–16.7 и 9.8–1.6 мас. % NaCl-экв.) и солевым составом (NaCl с примесью NaHCO<sub>3</sub> и KCl), но при разном давлении (0.4–0.8 и 1.1–1.5 кбар) и, соответственно, глубине. Изотопный состав кислорода в кварце изученных месторождений сходен (14.7–15.4 ‰ для Мечниковского месторождения; 13.2–13.6 ‰ для Алтын-Ташского месторождения). Вычисленный изотопный состав воды (5.7–6.4 и 4.2–4.6 ‰) сходен со значениями  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  для раннего кварца Берёзовского месторождения (Бортников, 2006) и соответствует изотопному составу кислорода магматогенной воды.

Илл. 5. Табл. 2. Библ. 20.

*Ключевые слова:* золото, флюидные включения, изотопный состав кислорода, Южный Урал.

Fluid inclusions and oxygen isotopic composition of auriferous quartz were studied in quartz from the Mechnikovskoe and Altyn-Tash gold deposits associated with listvenites, South Urals. The gold-quartz veins at the deposits were formed at similar temperatures (207–306 and 229–294 °C), salinity of the fluids (10.6–16.7 and 9.8–1.6 wt. % NaCl-eq.), and major salt composition of the fluids (NaCl + NaHCO<sub>3</sub> and KCl) at different pressure (0.4–0.8 and 1.1–1.5 kbar, respectively). The oxygen isotopic composition of auriferous quartz from both deposits is similar (14.7–15.4 ‰ for Mechnikovskoe deposit; 13.2–13.6 ‰ for Altyn-Tash deposit). The calculated oxygen isotopic composition of water (5.7–6.4 and 4.2–4.6 ‰) is similar to  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  values for the early quartz from Berezovsk deposit (Bortnikov, 2006) and corresponds to the oxygen isotopic composition of magmatic water.

Figures 5. Tables 2. References 20.

*Key words:* gold, fluid inclusions, O isotopic composition, South Urals.

### Введение

Среди многочисленных золоторудных месторождений на Южном Урале известны небольшие месторождения золота в лиственитах, из которых с конца XIX до первой половины XX в. были получены сотни килограммов золота (Бородаевский, 1948; Сазонов и др., 2001). В последнее время к небольшим месторождениям возрастает интерес производственных организаций в связи с истощающимися запасами крупных месторождений. Важной частью изучения месторождений является исследование условий их образования, результаты которого могут представлять практический интерес.

В данной работе мы сосредоточились на сравнительной оценке условий образования золото-кварцевых жил, основанной на результатах изучения флюидных включений и изотопного состава кислорода в кварце из Мечниковского и Алтын-Ташского золото-кварцевых месторождений, приуроченных к лиственитам. Мечниковское месторождение в Миасском золоторудном районе является примечательным объектом также с историко-геологической точки зрения. Здесь Г. Розе впервые описал листвениты, а в р. Миасс на территории посёлка Ленинск был найден самородок золота Большой треугольник. Месторождение было открыто в 1797 г. и периодически обрабатывалось карьерами и шахтами до глубины 30–40 м (Бородаевский, 1948). Месторождение Алтын-Таш находится в 40 км к югу от г. Миасса и разрабатывалось в конце XIX в. и середине XX в. В 70-х гг. прошлого века на месторождении были проведены поисково-оценочные работы (Лобанов и др., 1974ф). Алтын-Ташское месторождение отмечено в качестве благоприятного объекта для получения быстрой отдачи при добыче золота (Сазонов и др., 2001).

Мечниковское месторождение находится в структуре Главного Уральского разлома (рис. 1). В его строении принимают участие вытянутые в ССВ-ЮЮЗ направлении пластины серпентинитов, базальтов и пироксен-плагиоклазовых андезибазальтов, а также дайка мелкозернистых гранитов (Бородаевский, 1948; Мелекесцева и др., 2011). Серпентиниты на контактах сильно карбонатизированы и оталькованы, местами до образования линзообразных карбонатно-тальковых тел; вулканы карбонатизированы и пиритизированы. Тела лиственитов с золоторудными кварцевыми и карбонат-кварцевыми жилами мощностью от нескольких миллиметров до первых десятков сантиметров

приурочены к контактам пластин серпентинитов и вулканитов. Линзы лиственитов прослежены до глубины 72 м, где они выклиниваются (Бородаевский, 1948). Вкрест простирания листвениты пересекаются карбонат-кварцевыми прожилками мощностью до 15 см с сульфидами и золотом.

Главным рудным минералом в лиственитах и жилах является пирит. К акцессорным рудным минералам относятся халькопирит, блёклые руды, галенит, никелин, мелонит, вторичные сульфиды меди. Нередко в лиственитах обнаруживаются рутил и монацит. Минералы Au и Ag найдены в кварцевых жилах и лиственитах и представлены самородным золотом, теллуридами Au и Ag и йодаргиритом. В настоящей работе рассмотрены физико-химические параметры образования золотоносного кварца из жилы в лиственитах мощностью около 1.5 см с гнёздами пирита, отобранной в центральной части Мечниковского месторождения. Многочисленные угловатые, удлинённые, округлые зёрна золота размером первые десятки микрометров находятся, в основном, в порах полуокисленных и окисленных кристаллов пирита, реже – на контактах кварца и пирита (рис. 2а). Золото содержит 3.32–5.52 мас. % серебра, 0.04–0.48 мас. % меди и 0.12–1.39 мас. % ртути (Мелекесцева и др., 2011).

Алтын-Ташское месторождение приурочено к одноимённой зоне рассланцевания в северной суженной части Магнитогорского прогиба, которая примыкает с запада к зоне Главного Уральского разлома (см. рис. 1) (Лобанов и др., 1974ф; Сазонов и др., 2001). Зона рассланцевания находится в блоке, заключённом между двумя субмеридиональными разломами, которые контролируются небольшими вытянутыми телами серпентинизированных ультрамафитов. В строении месторождения принимают участие меридионально вытянутые тела вулканитов (андезибазальтов и базальтов), хлорит-серицитовых, серицит-хлоритовых и кварц-хлоритовых сланцев и продукты лиственитизации и березитизации вулканитов (метасоматиты с кварцем, серицитом, альбитом, карбонатом, хлоритом и пиритом в различных сочетаниях). По данным бурения, под рыхлыми четвертичными образованиями установлено субвертикальное тело габбро. Рудные тела представлены кварцевыми жилами и убого сульфидизированными лиственитами. Содержание золота достигает 19–25 г/т (Лобанов и др., 1974ф).

Главные рудные минералы на месторождении – пирит, халькопирит, ковеллин. Акцессорные ми-

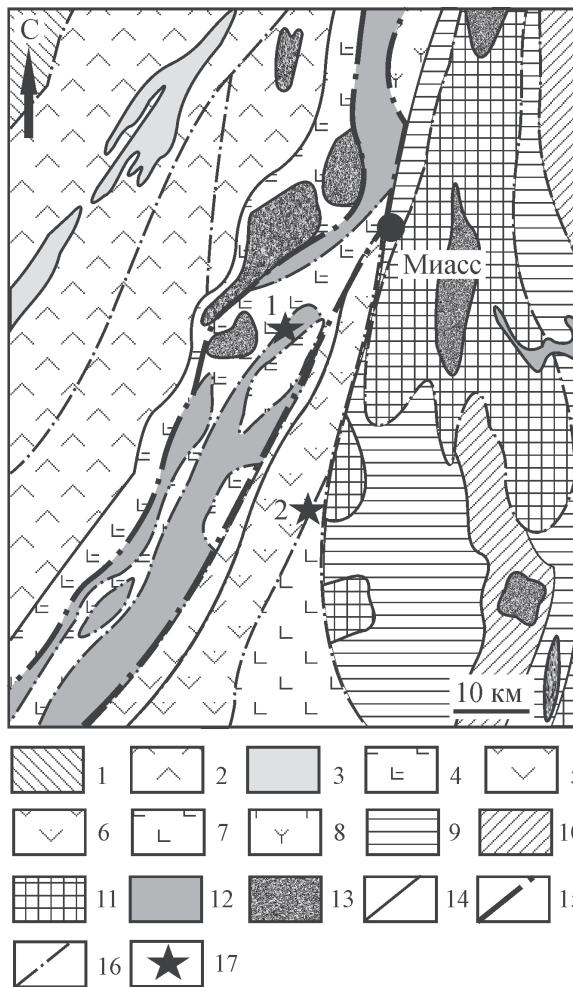


Рис. 1. Положение Мечниковского (1) и Алтын-Ташского (2) золоторудных месторождений на геологической схеме региона. Схема составлена на основе «Карты золотоносности Урала» под редакцией А.И. Кривцова и Н.К. Курбанова (ЦНИГРИ, 2003 г.) с упрощениями и дополнениями. Тектонические контакты проведены в соответствии с картой тектонического районирования Челябинской области (ГИС-Атлас «Недра России», www.vsegei.ru).

1 – шельфовый комплекс: известняки, глины, карбонатно-терригенные породы,  $O_1-C_{1-2}$ ; 2 – рифтовый комплекс: трахибазальты, базальты, риолиты, терригенные и осадочные породы,  $R_1-R_2$ ; 3 – интрузивный комплекс: габбро-диабазы, плагиограниты, граниты

рапакиви, перидотиты,  $R_2-V$ ; 4 – песчаники, глины, кремни, базальты,  $O-S$ ; 5, 6 – ранне- и позднеостроводужные комплексы: 5 – базальты, андезиты,  $D_2e_1-D_2gv$ ; 6 – базальты, андезиты, дациты, риолиты,  $D_2e_2-D_2gv_1$  и  $D_2gv$ ; 7 – позднеостроводужные комплексы: андезиты, базальты,  $D_2-D_3f$ ; 8 – раннеостроводужный комплекс: базальты, андезиты, дациты, риолиты,  $O_3-S_1$ ; 9, 10 – рифтовые комплексы: 9 – трахибазальты, базальты, кремни, терригенные породы,  $O-S$ ; 10 – базальты, риолиты, кремни, вулканомиктово-терригенные породы,  $S$ ; 11 – метаморфические породы: гнейсы, сланцы, амфиболиты, мигматиты, мраморы,  $R-V$ ; 12 – серпентиниты; 13 – коллизионные и позднеколлизионные комплексы: граниты, лейкограниты; 14 – геологические границы; 15 – зона Главного Уральского разлома; 16 – разломы; 17 – золоторудные месторождения.

Fig. 1. Geological scheme of the region and position of the Mechnikovskoe (1) and Altyn-Tash (2) gold deposits, modified and simplified after the «Map of Gold Deposits of the Urals» (edited by A.I. Krivtsov and N.K. Kurbanov, TSNIIGRI, 2003). Tectonic contacts are shown according to the Tectonic Map of Chelyabinsk district, GIS-Atlas «The Interiors of Russia» (www.vsegei.ru).

1 – Lower Ordovician–Lower to Middle Carboniferous shelf complex: limestone, clay, carbonate-terrigenous rocks; 2 – Early to Middle Riphean rift complex: trachibasalt, basalt, rhyolite, terrigenous and sedimentary rocks; 3 – Middle Riphean–Vendian intrusive complex: gabbrodiabase, plagiogranite, rapakivi granite, peridotite; 4 – Ordovician–Silurian sandstone, clay, chert, basalt; 5, 6 – early and late island arc complexes: 5 – Early Eifelian–Givetian basalt, andesite; 6 – Late Eifelian–Early Givetian and Givetian basalt, andesite, dacite, rhyolite; 7 – Middle to Late Devonian late island arc complexes: andesite, basalt; 8 – Late Ordovician–Early Silurian early island arc complexes: basalt, andesite, dacite, rhyolite; 9, 10 – rift complexes: 9 – Ordovician–Silurian trachibasalt, basalt, chert, terrigenous rocks; 10 – Silurian basalt, rhyolite, chert, volcanomictic-terrigenous rocks; 11 – Riphean–Vendian metamorphic rocks: gneiss, schist, amphibolite, migmatite, marble; 12 – serpentinite; 13 – collision and late collision complexes: granite, leucogranite; 14 – geological boundaries; 15 – Main Ural fault zone; 16 – faults; 17 – gold deposits.

нералы включают сфалерит, галенит, магнетит, молибденит, блёклые руды, арсенопирит, борнит, айкинит, тетрадимит, теллурувисмутит, алтаит, мелонит, фробергит, самородный теллур, миллерит, герсдорфит, линнеит, пирротин, пентландит (Лобанов и др., 1974ф; Попов, Спиринов, 1998). Минералы Au и Ag представлены золотом, электрумом и гес-

ситом (петцитом?) (Лобанов и др., 1974ф). Ранее указывалось, что золото на месторождении – высокопробное с содержанием серебра до 4.6 мас. % (Сазонов и др., 2001).

В данной работе изучен кварц из сульфидно-анкерит-кварцевой жилы С-3 простираения видимой мощностью около 1.5 м, расположенной в юго-восточной



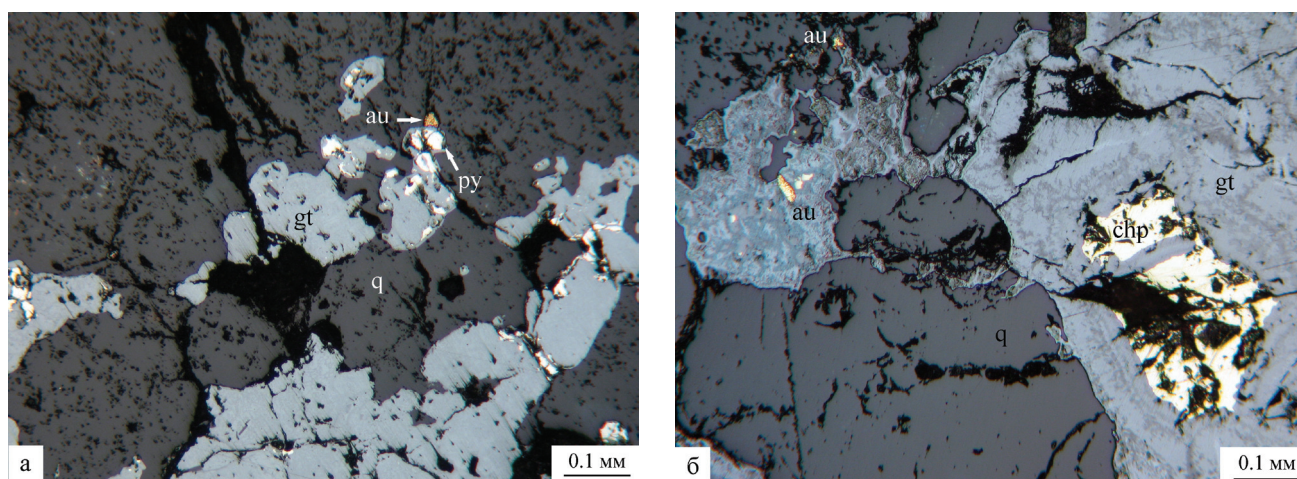


Рис. 2. Золото в жилах Мечниковского (а) и Алтын-Ташского (б) месторождений: а) зерно золота на границе окисленных кристаллов пирита и кварца, обр. Лен-10-1; б) включение золота в окисленном халькопирите и зёрна на границе с кварцем, обр. АТ-6-4. au – самородное золото, q – кварц, py – пирит, chp – халькопирит, gt – гётит.

Fig. 2. Gold in veins of the Mechnikovskoe (a) and Altyn-Tash (б) deposits: a) gold grain at the boundary of oxidized pyrite crystals and quartz, sample Len-10-1; б) inclusion of gold in oxidized chalcopyrite and gold grains at the boundary with quartz, sample AT-6-4. au – gold, q – quartz, py – pyrite, chp – chalcopyrite, gt – goethite.

части месторождения среди лиственизированных пород и хлорит-серицитовых сланцев. Образец содержал зёрна золота размером до 1 мм. Под микроскопом ксеноморфные зёрна и агрегаты золота находятся в кварце, окисленных агрегатах халькопирита или на контактах кварца и окисленных сульфидов (рис. 2б). Золото содержит 14.42–23.47 мас. % серебра и 0.43–5.75 мас. % меди (Мелекесцева и др., 2011).

### Методика исследований

Для оценки температур гомогенизации и минералообразования ( $T_{\text{гом}}$  и  $T_{\text{м}}$ ), эвтектики ( $T_{\text{э}}$ ), плавления последнего кристаллика льда ( $T_{\text{л}}$ ), тройной точки  $\text{CO}_2$  ( $T_{\text{ТСO}_2}$ ) и частичной гомогенизации ( $T_{\text{ГСО}_2}$ )  $\text{CO}_2$  растворов изучены флюидные включения в кварце в прозрачно-полированных шлифах. Анализы проводились в микрокриотермокамере Linkam THMSG-600 с использованием микроскопа Olympus BX 51-52 и программного обеспечения LinkSystem 32 DV-NC (лаборатория термобарогеохимии, ЮУрГУ, г. Миасс). Солевой состав гидротермальных растворов во включениях оценивался по температурам эвтектик (Борисенко, 1977). Температуры гомогенизации фиксировались в момент исчезновения газового пузырька при нагревании препарата в термокамере и приняты за минимальные температуры процесса минералообразования (Реддер, 1987). Концентрации солей для включений в растворах рассчитывались по температурам плавления последних кри-

сталлических фаз (Bodnar, Vityk, 1994). Давление рассчитано по плотностям углекислоты. Результаты замеров представлены в таблице 1.

Изотопный состав кислорода в золотоносном кварце определён в Аналитическом центре ДВГИ РАН (г. Владивосток, аналитик Т.А. Веливецкая). Пробы для анализа подготовлены лазерным методом фторирования. Кислород выделялся при нагреве проб инфракрасным лазером (MIR-10-30, New Wave Research, США) в атмосфере паров  $\text{BrF}_5$ . Кислород очищен методом криогенного разделения, химическим методом с использованием КВг и хроматографическим методом на капиллярной колонке MOLSIV (длина 25 м, внутренний диаметр 0.32 мм, рабочая температура 60 °С). Измерение изотопного состава кислорода выполнены на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (Thermo Scientific, Germany), работающем в режиме постоянного потока гелия, относительно лабораторного стандарта  $\text{O}_2$ , калиброванного по международному стандарту NBS-28 и стандарту UWG-2 (Valley et al., 1995). Результаты измерений представлены в общепринятой форме:  $\delta = (R_{\text{образец}}/R_{\text{стандарт}} - 1) \times 1000$  (‰) где  $R_{\text{образец}}$  и  $R_{\text{стандарт}}$  – отношение  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  в образце и стандарте, соответственно. Воспроизводимость результатов определения  $\delta^{18}\text{O}$  по стандартам составляла 0.1 ‰, что соответствует величине  $1\sigma$  при  $n = 10$ . Вес анализируемых образцов 1–2 мг. Результаты измерений  $\delta^{18}\text{O}$  образцов даны в отношении к международному стандарту VSMOW (табл. 2).

Термобарогеохимические параметры флюидных включений в кварце Мечниковского и Алтын-Ташского месторождений  
 Таблица 1  
 Table 1

Fluid inclusion data of auriferous quartz from the Mechnikovskoe and Altyn-Tash deposits

Тип включений	T <sub>р</sub> , °C	T <sub>з</sub> , °C	T <sub>р</sub> , °C	Соленость, мас. % NaCl-экв.	T <sub>ТСO<sub>2</sub></sub> , °C	T <sub>ТСO<sub>2</sub></sub> , °C	Уд. об. CO <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /кг	Давление, кбар	T <sub>м</sub> , °C
Мечниковское месторождение									
1	147–246	<u>-20.3...</u> -23.0	<u>-7.3...</u> -13.3	10.6–16.7	27.3–31.3	<u>-56.7...</u> -54.3	1.47–1.54	0.4–0.8	207–306
	217 ± 32 (n = 14)	-21.6 ± 0.7 (n = 14)	-9.7 ± 1.6 (n = 14)	13.2 ± 1.6 (n = 14)	28.7 ± 1.2 (n = 12)	-55.1 ± 1.38 (n = 3)			
2	110–256	<u>-20.8...</u> -22.9	<u>-6.1...</u> -10.8	9.1–14.3	–	–	–	–	170–316
	181 ± 32 (n = 85)	-21.6 ± 0.6 (n = 17)	-8.1 ± 1.2 (n = 20)	11.3 ± 1.5 (n = 20)	–	–			
3	112–119	–	–	–	–	–	–	–	172–179
	115 ± 3 (n = 4)	–	–	–	–	–			
Алтын-Ташское месторождение									
1	229–294	<u>-21.4...</u> -21.2	<u>-1.6...</u> -1.3	2.2–2.4	8.4–17.8	<u>-57.1...</u> -54.2	1.16–1.30	1.1–1.4	229–294
	254 ± 17 (n = 41)	-21.3 ± 0.1 (n = 2)	1.45 ± 0.2 (n = 2)	2.3 ± 0.1 (n = 2)	13.1 ± 6.6 (n = 2)	-56.1 ± 0.8 (n = 18)			
2	214–301	<u>-20.5...</u> -22.5	<u>-7...</u> -13.2	9.8–16.6	12.9–17.3	<u>-57.2...</u> -54.3	1.20–1.28	1.2–1.5	214–301
	260 ± 25 (n = 51)	-21.3 ± 0.4 (n = 49)	-8.7 ± 3.6 (n = 49)	13.6 ± 1.9 (n = 49)	15.3 ± 1.6 (n = 10)	-55.1 ± 2.2 (n = 6)			
3	118–285	–	–	–	–	–	–	–	118–285
	227 ± 44 (n = 22)	–	–	–	–	–			

Примечание. Условные обозначения см. в тексте. n – количество измерений, прочерк – параметр не измерялся. В числителе – разброс значений, в знаменателе – среднее значение.

Note. For symbols, see text; n, number of analyses; dash, not measured; nominator, range of values; denominator, average value.

Таблица 2

**Изотопный состав кислорода ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ ) в  
золотоносном кварце Мечниковского  
и Алтын-Ташского месторождений**

Table 2

**Oxygen isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ ) of  
auriferous quartz from the Mechnikovskoe and  
Altyn-Tash deposits**

№ п/п	№ пробы	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ , ‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ , ‰*
Мечниковское месторождение			
1	лен-72	15.4	6.35
2	лен-82	15.3	6.25
3	лен-85	15.3	6.25
4	лен-95	14.7	5.66
5	лен-97	15.3	6.25
Алтын-Ташское месторождение			
6	ат-4	13.6	4.57
7	ат-5	13.2	4.17
8	ат-6	13.3	4.27
9	ат-14	13.2	4.17
10	ат-27	13.4	4.37
11	ат-28	13.6	4.57

*Примечание.* \*  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  – рассчитанный изотопный состав кислорода воды (методику расчёта см. в тексте).

*Note.* \*  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ , calculated O isotopic composition of water (for calculation see text).

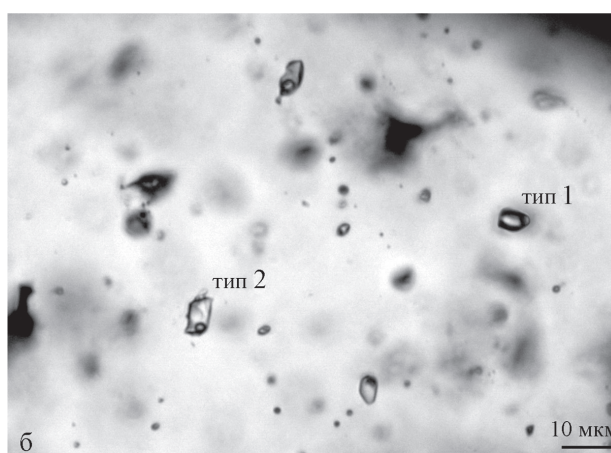
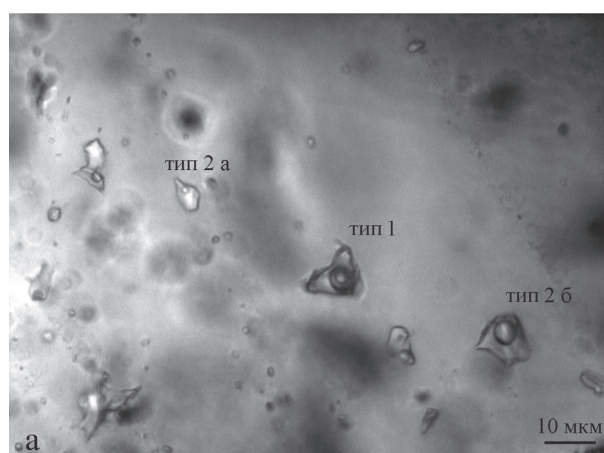
Изотопный состав кислорода воды в кварце рассчитан по уравнению фракционирования изотопов между кварцем и водой по (Clayton et al., 1972) при температуре 250 °С, что, в среднем, соответствует температурному режиму образования изученных месторождений.

### Результаты исследований

В кварце Мечниковского месторождения обнаружены первичные, первично-вторичные и вторичные флюидные включения, которые разделены на несколько типов по фазовому составу и морфологии.

Тип 1. Первичные трёхфазные включения (светлая жидкость + газ + подвижная тёмная жидкость) размером 10–12 мкм (до 20 мкм) встречаются часто, но одиночно и слагают до 10 % от общего числа включений (рис. 3а). Включения имеют округло-овальную или неправильную форму без отростков, местами обладают огранкой в виде отрицательного кристалла. Газовый пузырёк с жидкой  $\text{CO}_2$  занимает 20–40 % от объёма включения.

$T_{\text{тCO}_2}$  указывают на присутствие в газовой составляющей  $\text{CO}_2$ . Давление флюида оценивается в 0.4–0.8 кбар и соответствует глубине около 2 км.  $T_{\text{э}}$  указывают на присутствие солевой системы  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  с возможной примесью  $\text{NaHCO}_3$  и  $\text{KCl}$ .  $T_{\text{г}}$  варьируют от 147 до 246 °С (рис. 4а). Учитывая среднее давление флюида и соответствующую поправку на давление (~60 °С), температуры минералообразования составляют 207–306 °С.  $T_{\text{п}}$  указывает на солёность растворов 10.6–16.7 мас. %  $\text{NaCl}$ -экв. с пиком значений на гистограмме 12.5–13.0 мас. %  $\text{NaCl}$ -экв. (рис. 4б). Между значениями температур гомогенизации и солёностью наблюдается слабая положительная зависимость (рис. 5). Плотность флюида оценивается приблизительно в 0.9–1.0 г/см<sup>3</sup> (см. рис. 5).



**Рис. 3.** Сосуществующие флюидные включения в золотоносном кварце: а) трёх- (тип 1) и двухфазные (тип 2) включения в кварце Мечниковского месторождения, обр. Лен-10; б) двухфазные существенно жидкостные (тип 1) и газовые (тип 2) включения в кварце Алтын-Ташского месторождения, обр. АТ-6.

**Fig. 3.** Coexisting fluid inclusions in auriferous quartz: а) three-phase (type 1) and two-phase (type 2) inclusions in quartz of the Mechnikovskoe deposit, sample Len-10; б) two-phase mostly liquid (type 1) and vapor (type 2) fluid inclusions in quartz from the Altyn-Tash deposit, sample AT-6.



Тип 2. Первично-вторичные двухфазные включения (светлая жидкость + тёмный газовый пузырёк) размером 8–15 мкм подразделяются на два подтипа. Включения подтипа 2а (15–20 % от общего числа включений) характеризуются внутренней огранкой и образуют группы по 2–4 включения вблизи залеченных трещин. Газовый пузырёк занимает до 30 % от объёма включения. Включения подтипа 2б угловатой, овальной, веретенообразной формы, часто с небольшими отростками составляют более 50 % от числа включений и равномерно распространены по всему минералу, встречаются одиночно и группами (см. рис. 3а). Газовый пузырёк занимает 15–20 % от объёма включения. При охлаждении в некоторых случаях фиксируется выделение жидкой углекислоты.

Термобарогеохимические параметры подтипов 2а и 2б измерены отдельно, однако результаты измерений практически не отличаются друг от друга, что позволяет объединить их в единую группу.  $T_3$  указывают на преобладание солевой системы NaCl–H<sub>2</sub>O с возможной примесью NaHCO<sub>3</sub> и KCl.  $T_Г$  варьируют от 110 до 256 °С с пиком 160–200 °С (см. рис. 4а). С учётом поправки на давление, тем-

пературы минералообразования составляют 170–316 °С.  $T_П$  указывают на солёность растворов 9.1–14.3 мас. % NaCl-экв. с пиком значений на гистограмме в интервале 9.0–12.5 мас. % NaCl-экв. (см. рис. 4б). Зависимость между значениями температур гомогенизации и солёности не наблюдается (см. рис. 5). Плотность флюида оценивается приблизительно в 0.92–1.0 г/см<sup>3</sup> (см. рис. 5).

Тип 3. Двухфазные вторичные включения отличаются меньшими размерами (5–7 мкм, редко 10 мкм) и трубчатой формой, часто с длинными отростками. Газовый пузырёк составляет 5–20 % и менее от объёма включения. Включения находятся среди тонких прерывистых цепочек из мелких однофазных включений, секущих несколько зёрен, что характеризует их как вторичные.  $T_Г$  включений этого типа составляет 119–112 °С.

Изотопный состав кислорода в кварце золоторудных жил Мечниковского месторождения варьирует в узком интервале значений от +14.7 до +15.4 ‰ (см. табл. 2).

По фазовому составу и морфологии флюидные включения в кварце Алтын-Ташского месторождения подразделяются на три типа.

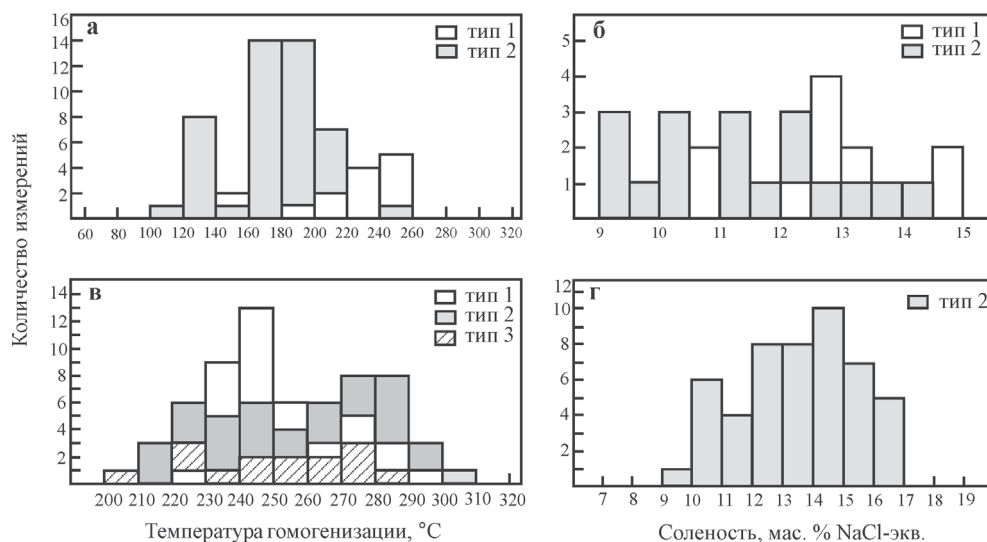


Рис. 4. Гистограммы температур гомогенизации и солёности флюидных включений в золотоносном кварце Мечниковского (а, б) и Алтын-Ташского (в, г) месторождений.

Типы флюидных включений см. в тексте. Для удобства построения гистограмм не показаны единичные значения: солёности флюидных включений типа 1 Мечниковского месторождения 16.7 мас. % NaCl-экв., типа 2 Алтын-Ташского месторождения (2.2 и 2.4 мас. % NaCl-экв.) и  $T_{гом}$  флюидных включений типа 3 Алтын-Ташского месторождения 118, 157, 159 и 168 °С.

Fig. 4. Histograms of homogenization temperatures and fluid salinity for inclusions in auriferous quartz of the Mechnikovskoe (a, б) and Altyn-Tash (в, г) deposits.

Types of fluid inclusions are described in the text. Single values of salinity of fluid inclusions of type 1 (16.7 wt. % NaCl-equiv., Mechnikovskoe deposit and 2.2 and 2.4 wt. % NaCl-equiv., Altyn-Tash deposit) and homogenization temperatures of type 3 (118, 157, 159, and 168 °С) are not shown.

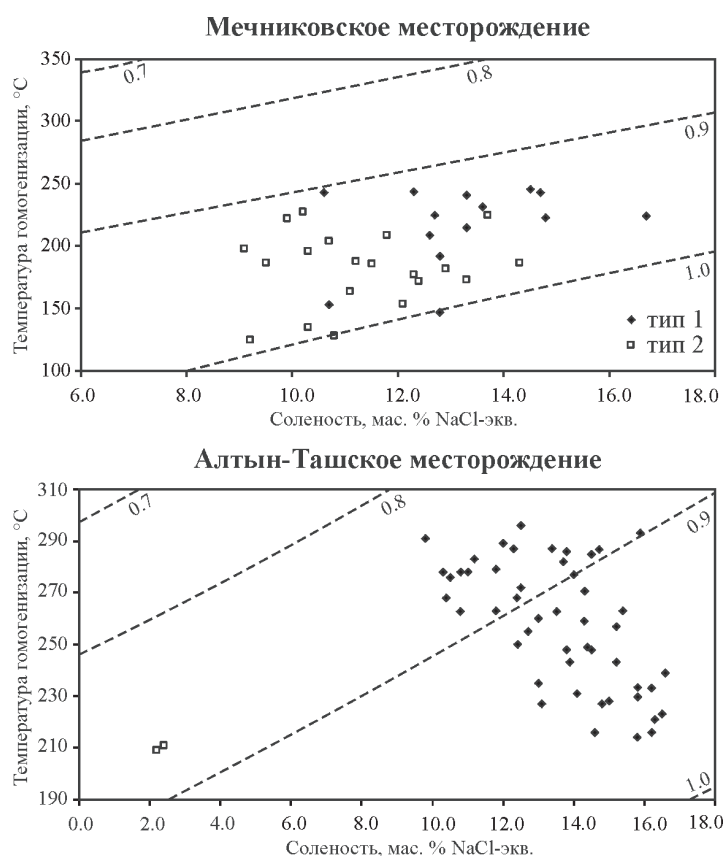


Рис. 5. Зависимость между температурой и солёностью растворов во флюидных включениях в золотоносном кварце Мечниковского и Алтын-Ташского месторождений.

Пунктир – изолинии плотности флюидных включений по (Wilkinson, 2001, рис. 6).

Fig. 5. Temperature vs. fluid salinity plot for fluid inclusions in auriferous quartz of the Mechnikovskoe and Altyn-Tash deposits.

Dash lines, density isolines of fluid inclusions according to (Wilkinson, 2001, Fig. 6).

Тип 1. Доминирующие первичные светлые двухфазные (газ + жидкость) включения размером 3–20 мкм (чаще 7–12 мкм), в которых газовый пузырёк занимает 70–80 % объёма (см. рис. 3б). В более редких трёхфазных включениях отмечается жидкая  $\text{CO}_2$  в газовом пузырьке. Включения равномерно распределены по всему объёму зёрен группами по 3–5 штук. Форма включений округло-овальная либо неправильная без отростков, местами с элементами внутренней огранки. Включения гомогенизируются в газовую фазу в интервале 229–294 °С с пиком значений 250–240 °С (рис. 4в).  $T_{\text{TCO}_2}$  указывает на преобладание  $\text{CO}_2$  в газовой составляющей и возможное присутствие некоторого количества  $\text{CH}_4$  ( $T_{\text{TCO}_2}$  ниже –56.6 °С). Тёмный цвет включений затрудняет криометрические определения из-за преобладания газовой составляющей, однако для двух более светлых включений этого типа были получены  $T_{\text{II}}$  –1.3 и –1.6 °С, что соответствует солёности флюида 2.2–2.4 мас. % NaCl-экв.  $T_3$  (–21.4...–21.2 °С) свидетельствуют о преобладании солевой системы NaCl– $\text{H}_2\text{O}$ . Плотность флюида оценивается в ~0.86 г/см<sup>3</sup> (см. рис. 5). Давление флюида оценивается в 1.1–1.4 кбар, что соответствует глубине около 4–5 км.

Тип 2. Более редкие первичные двухфазные (жидкость + газ) включения размером 8–10 мкм, в которых газовый пузырёк составляет 10–20 % объёма (см. рис. 3б). Форма включений уплощённая, слегка вытянутая по длинной оси с небольшими отростками. Реже (10–15 % включений) обнаруживаются трёхфазные включения, в которых газовый пузырёк занимает до 30 % площади и содержит небольшое количество жидкой  $\text{CO}_2$ . Эти включения равномерно распределены по минералу и не образуют скоплений.  $T_{\text{TCO}_2}$  соответствует жидкой  $\text{CO}_2$ , возможно с некоторым присутствием  $\text{CH}_4$  ( $T_{\text{TCO}_2}$  ниже –56.6 °С). Давление флюида оценивается в 1.2–1.5 кбар, что соответствует глубине около 4–5 км.

Включения гомогенизируются в жидкую фазу при температурах 214–301 °С с пиком значений 290–270 °С (рис. 4в).  $T_3$  соответствуют солевой системе NaCl– $\text{H}_2\text{O}$ ; слабый пик в интервале –21.8...–22.0 °С может свидетельствовать о присутствии солевой системы NaCl– $\text{NaHCO}_3$ – $\text{H}_2\text{O}$ .  $T_{\text{II}}$  указывают на солёность растворов 9.8–16.6 мас. % NaCl-экв. с пиком значений 14–15 мас. % NaCl-экв. Значения  $T_{\text{I}}$  и солёности слабо обратно пропорциональны друг другу (рис. 5). Плотность флюида оценивается приблизительно в 0.83–0.97 г/см<sup>3</sup> (см. рис. 5).



Одинаковый интервал температур гомогенизации сосуществующих включений типов 1 и 2 предполагает их близость истинным температурам минералообразования (Бортников и др., 1998).

Тип 3. Мелкие (5–7 мкм) первично-вторичные и вторичные двухфазные (жидкость + газ) включения трубчатой формы с длинными отростками, в которых газовый пузырёк занимает 5–10 % объёма. Включения находятся среди групп мелких однофазных включений, сгруппированных в вытянутые прерывистые цепочки, секущие несколько зёрен.  $T_f$  включений составляет 118–285 °С с неярко выраженными пиками значений 280–270 и 230–220 °С (рис. 4в).

Изотопный состав кислорода в кварце золоторудных жил Алтын-Ташского месторождения несколько ниже, чем таковые значения для кварца Мечниковского месторождения, но также варьирует в узком интервале от +13.2 до +13.6 ‰ (см. табл. 2).

### Обсуждение и выводы

Несмотря на отличия геологического строения месторождений, изученные жилы образовались при близких температурах, солёности и солевом составе растворов, но при различном давлении и, соответственно, глубине. Относительно низкое давление (0.4–0.8 кбар), определённое для Мечниковского месторождения, возможно, косвенно указывает на малый уровень среза территории и на более глубоко залегающий уровень золоторудной минерализации.

Слабый положительный тренд зависимости между температурой гомогенизации и солёности растворов трёхфазных флюидных включений в кварце Мечниковского месторождения может отражать процесс приповерхностного разбавления гидротермального раствора (Wilkinson, 2001, рис. 10). Поскольку золото-кварцевые жилы на Мечниковском месторождении образовались при существенно меньшем давлении (и, соответственно, меньшей глубине), чем таковые на Алтын-Ташском месторождении, не исключено разбавление флюидов метеорными водами, что могло привести к падению температур и солёности растворов (см. рис. 4а, 4в, 5).

Сосуществование в золотоносном кварце Алтын-Ташского месторождения включений, обогащённых  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , гомогенизация газовых включений в газовую фазу и жидкостных – в жидкость в одинаковых интервалах температур, разная солёность газовых и жидкостных включений и уменьшение солёности по мере роста температу-

ры свидетельствуют об отложении кварца из двух несмешиваемых флюидов (существенно газового и существенно водного) (Pichavant et al., 1982; Ramboz et al., 1982; Hurai, 2010; Chen et al., 2012). Присутствие подобных включений может быть также результатом фазовой сепарации (кипения), когда из-за отделения газовой фазы флюид остаётся более солёным, а газовая составляющая, соответственно, становится низкосолёной (Pichavant et al., 1982; Wilkinson, 2001 и многие другие). Однако в результате фазовой сепарации, отделяющаяся газовая фаза характеризуется низкой плотностью, в то время как плотность существенно газовых включений в изученном кварце Алтын-Ташского месторождения попадает в интервал плотности жидкостных включений (рис. 5б). Кроме того, прямые наблюдения процесса фазовой сепарации, которые в настоящее время доступны на современных гидротермальных сульфидных полях Мирового океана, показывают, что температуры газовой фазы и рассола отличаются (Butterfield et al., 1990; von Damm et al., 2003). Всё это говорит в пользу образования золотоносного кварца Алтын-Ташского месторождения из двух несмешиваемых флюидов, которые в момент своего существования находились в равновесии друг с другом при одинаковых  $P$ - $T$ -условиях.

Полученные термобарогеохимические данные по Мечниковскому и Алтын-Ташскому месторождениям практически укладываются в интервал давлений (1–3 кбар) и температур (200–400 °С) образования мезотермальных месторождений золота, в том числе крупных месторождений Урала (Бортников, 2006): 130–405 °С и 1.02–3.66 кбар (Светлинское), 255–365 °С и 0.81–3.46 кбар (Берёзовское), 180–370 °С и 0.45–2.58 кбар (Кочкарское). Солёность растворов (2–16 мас. %  $\text{NaCl}$ -экв.) также попадает в интервал солёности для Светлинского, Берёзовского и Кочкарского месторождений: 4.8–19.8, 2.0–14.9 и 6.3–16.7 мас. %  $\text{NaCl}$ -экв., соответственно.

Узкий интервал значений  $\delta^{18}\text{O}$  в кварце обоих месторождений свидетельствует об отсутствии изотопного обмена между вмещающими породами и флюидами (Goldfarb et al., 1991). Вычисленный изотопный состав воды (5.7–6.4 и 4.2–4.6 ‰, табл. 2) сходен со значениями  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  для раннего кварца Берёзовского месторождения и попадает в интервал значений, приписываемых магматогенной воде (Бортников, 2006). Повышенная солёность растворов, законсервированных во включениях, также свидетельствует о магматическом вкладе в рудообразование.

Авторы благодарят коллег из лаборатории минералогии рудогенеза за обсуждение результатов работ, а также рецензента за критические замечания к статье. Работа выполнена в рамках государственной бюджетной темы № ГР 01201350139, программой УрО РАН № 15-11-5-23 и частично поддержана грантом РФФИ № 11-05-00187-а.

### Литература

- Борисенко А.С.* Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Бородаевский Н.И.* Типы золоторудных месторождений подчинённых ультраосновным породам в Миасском и Учалинском районах Южного Урала // В кн: 200 лет золотой промышленности Урала. Свердловск: УФАН СССР, 1948. С. 316–330.
- Бортников Н.С.* Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48. № 1. С. 3–28.
- Бортников Н.С., Сазонов В.Н., Викентьева О.В., Викентьев И.В., Мурзин В.В., Носик Л.П.* Роль магматогенного флюида в формировании Берёзовского мезотермального золото-кварцевого месторождения, Урал // Доклады АН. 1998. Т. 363. № 1. С. 82–86.
- Лобанов Д.А., Усенко С.П., Деменев Ф.П.* Отчёт о поисковых работах на рудное золото, проведённых Золотогорским отрядом в 1972–1973 гг. в пределах Алтын-Ташского рудого поля. Верхняя Пышма, 1974ф. 312 с.
- Мелекесцева И.Ю., Котляров В.А., Зайков В.В., Юминов А.М.* Минералы золота и серебра Мечниковского и Алтын-Ташского золоторудных месторождений в листовниках, Южный Урал // Минералогия Урала–2011. Сборник научных статей. Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. С. 111–115.
- Попов В.А., Спириин А.В.* О находке миллерита и пентландита в золоторудном месторождении Алтын-Таш // Минералогия Урала–1998. Миасс: ИМин УрО РАН, 1998. Т. II. С. 71–72.
- Рёддер Э.* Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. 632 с.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А.* Месторождения золота Урала. Екатеринбург: УГГА, 2001. 622 с.
- Vodnar R.J., Vityk M.O.* Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O–NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Pontignana-Siena, 1994. P. 117–130.
- Butterfield D.A., Massoth G.J., McDuff R.E., Lupton J.E., Lilley M.D.* Geochemistry of hydrothermal fluids from Axial Seamount hydrothermal emissions study vent field, Juan de Fuca Ridge: Subseafloor boiling and subsequent fluid-rock interaction // Journal of Geophysical Research. 1990. V. 95. P. 12895–12921.
- Chen H., Chen Y., Baker M. J.* Evolution of ore-forming fluids in the Sawayaerdun gold deposit in the Southwestern Chinese Tianshan metallogenic belt, Northwest China // Journal of Asian Earth Sciences. 2012. V. 49. P. 131–144.
- Clayton R.N., O'Neil J.R., Mayeda T.* Oxygen isotope exchange between quartz and water // Journal of Geophysical Research. 1972. V. 77. No. 17. P. 3057–3067.
- Goldfarb R.J., Newberry R.J., Picktorn W.J., Gent C.A.* Oxygen, hydrogen and sulfur isotope studies in the Juneau gold belt, Southeastern Alaska: constraints on the origin of hydrothermal fluids // Economic Geology. 1991. V. 86. P. 66–80.
- Hurai V.* Fluid inclusion geobarometry: Pressure corrections for immiscible H<sub>2</sub>O–CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub> fluids // Chemical Geology. 2010. V. 278. P. 201–211.
- Pichavant M., Ramboz C., Weisbrod A.* Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data. I. Phase equilibria analysis – A theoretical and geometrical approach // Chemical Geology. 1982. V. 37. P. 1–27.
- Ramboz C., Pichavant M., Weisbrod A.* Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data. II. Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility // Chemical Geology. 1982. V. 37. P. 29–48.
- Valley J.W., Kitchen N., Kohn M., Niendorf C.R., Spicuzza M.J.* UWG-2, a garnet standard for oxygen isotope ratios: Strategies for high precision and accuracy with laser heating // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. V. 59. P. 5223–5231.
- von Damm K.L., Lilley M.D., Shanks W.C.III, Brockington M., O'Grady K.M., Olson E., Graham A., Proskurowski G., Bray A.M. and the SouEPR Science Party.* Extraordinary phase separation and segregation in vent fluids from the southern East Pacific Rise // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V. 206. P. 365–378.
- Wilkinson J.J.* Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // Lithos. 2001. V. 55. P. 229–272.

Поступила в редакцию 22 августа 2014 г.