УДК 553.43: 553.21

УСЛОВИЯ ФОССИЛИЗАЦИИ ПРИГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ФАУНЫ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА И ПОНТИД: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Н.Н. Анкушева, В.В. Масленников, Н.П. Сафина

Институт минералогии УрО РАН, г. Muacc; ankusheva@mail.ru Южно-Уральский госуниверситет, филиал в г. Muacce

PHYSICO-CHEMICAL CONDITIONS OF VENT FAUNA FOSSILIZATION IN THE VMS DEPOSITS OF THE URALS AND PONTIDES: FLUID INCLUSION DATA

N.N. Ankusheva, V.V. Maslennikov, N.P. Safina

Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, ankusheva@mail.ru South Urals State University, Miass Branch

Изучены флюидные включения в кварце, барите и кальците из оруденелой фауны гидротермальных массивных и обломочных руд месторождений Урала (Валенторское, Сафьяновское, Юбилейное, Молодёжное, Шемурское) и Понтид (Киллик, Кызылкая) методами термометрии, КР-спектроскопии и газовой хроматографии. Кварц из фауны гидротермальных руд кристаллизовался из водно-солевых растворов NaCl и NaCl-KCl с солёностью 5–10 мас. % NaCl-экв. и температурами гомогенизации включений (T_{rom}) 100–180 °С. Кальцит отлагался растворами меньшей солёности (3.5–7 мас. % NaCl-экв.) и более высокими T_{rom} 200–250 °С. Включения в барите в реликтах фауны в брекчиях характеризуются разбросом солёности от разбавленных (0.7–2 мас. %) до солёных растворов (6–11 мас. % NaCl-экв.) и T_{rom} 100–200 °С. Кварц фауны полосчатых руд образован среднетемпературными (T_{rom} 120–180 °С) водными NaCl–KCl растворами с солёностью 5–9 мас. % NaCl-экв. Газовой хроматографией и КРспектроскопией установлено, что минералообразующие растворы содержат CO₂, CH₄ и N₂ в различных соотношениях.

Илл. 8. Табл. 3. Библ. 29.

Ключевые слова: Урал, Понтийский пояс, колчеданные месторождения, фауна, кварц, кальцит, барит, термобарогеохимия, летучие компоненты, рамановская спектроскопия.

Fluid inclusions in quartz, barite and calcite from fossilized fauna of hydrothermal massive and clastic ores from the deposits of the Urals (Valentorka, Saf'yanovka, Yubileynoe, Molodezhnoe, Shemur) and Pontides (Killik, Kyzylkaya) are studied with microthermometry, Raman spectroscopy and gas chromatography. Quartz from hydrothermal fauna was formed from NaCl and NaCl-KCl fluids with salinity up to 5–10 wt. % NaCl-equiv. and homogenization temperatures (T_{hom}) varying from 100 to 180 °C. Calcite from fauna was formed from the fluids with higher T_{hom} (200–250 °C) and lower salinity (3.5–7 wt. % NaCl-equiv.). Fluid inclusions in barite from fauna in clastic ores are characterized by variable salinity from 0.7–2 wt. % to 6–7 wt. % NaCl-equiv. (max 11 wt. %) and low to moderate T_{hom} (100–200 °C). Quartz of fauna from banded ores was formed from medium-temperature (T_{hom} 120–180 °C) NaCl-KCl fluids with salinity of 5–9 wt. % NaCl-equiv. According to gas chromatography and Raman spectroscopy, the fluids contain variable amounts of CO₂, CH₄ and N₂.

Figures 8. Tables 3. References 29.

Key words: Urals, Pontides, VMS deposits, fauna, quartz, calcite, barite, volatiles, thermobarogeochemistry, Raman spectroscopy.

Введение

Данные о находках пригидротермальной фауны в рудах медноколчеданных месторождений Урала приведены в монографиях (Масленников, 1999, 2006; Аюпова, Масленников, 2005; Зайков, 2006), где рассмотрены условия её нахождения в сульфидных холмах «чёрных курильщиков», описаны текстурно-структурные и минералогические особенности биоморфных руд и результаты изучения типохимизма слагающих их сульфидов. Установлено, что оруденелая фауна может существовать не только в центральных частях сульфидных холмов в составе гидротермально-биогенных фаций, но и на флангах среди обломочных разностей (рудокластических фаций) в зонах выклинивания в составе продуктов придонного преобразования обломочных руд (субмаринных гипергенных фаций). Одним из интересных примеров работ является статья В.А. Симонова с соавторами (2006) о физикохимических параметрах минералообразования в «чёрных курильщиках» и биоморфных рудах месторождения Яман-Касы. Флюидные включения в барите оруденелой фауны Яман-Касы характеризуются NaCl-KCl-растворами солёностью 1.6-5 мас. % и температурами 112-168 °С и 183-267 °C.

Целью работы стало сопоставление условий фоссилизации оруденелой фауны в рудных фациях колчеданных месторождений Урала и Понтийского пояса. В ходе работы получены минералогические и термобарогеохимические данные по флюидным включениям в прозрачных минералах из фаунистических остатков, обнаруженных в гидротермально-биогенной и кластогенной фациях палеозойских месторождений Урала (Шемурское, Валенторское, Сафьяновское, Молодёжное, Юбилейное) и мезозойских месторождений Понтийского пояса (Киллик, Кызылкая). Палеозойские колчеданные объекты отличаются по степени разрушенности сульфидных холмов, что выражается в различном соотношении гидротермальных и рудокластических фаций (Масленников, 2006). Понтийский пояс имеет юрско-третичный возраст и располагается в северо-восточной части Турции. В его составе, согласно геодинамическим реконструкциям (Pejatovic, 1979), выделяются Центральная, Северная и Южная островные дуги. Колчеданные месторождения приурочены к осевой части Понтийского пояса и его западному флангу. Изученные месторождения Понтийского пояса сопоставимы с

МИНЕРАЛОГИЯ № 1 2016

умеренно-разрушенными сульфидными холмами уральских колчеданных месторождений, в составе которых преобладают рудокластические фации и продукты их субмаринного преобразования.

Краткая характеристика месторождений и руд

В составе сульфидных холмов «чёрных курильщиков» как Урала, так и Понтид остатки фауны обнаружены среди колломорфных пиритовых, сфалерит-пиритовых, реже – халькопирит-пиритовых руд, сохранившихся в кровле сульфидных холмов поблизости от гидротермальных труб «палеокурильщиков» и диффузеров (Валенторское, Сафьяновское, Юбилейное) и рудокластических фаций, концентрирующихся в виде ритмично-слоистых пластов на флангах и зонах выклинивания месторождений (Молодёжное, Шемурское, Киллик и Кызылкая) (рис. 1, 2).

Валенторское месторождение, расположенное на Северном Урале в северной части Тагило-Сакмарской зоны, представляет собой слаборазрушенный сульфидный холм (Масленников, 2006). Рудные тела залегают в силурийском риолит-базальтовом комплексе. На месторождении в большей степени развиты донные гидротермальные фации, представленные массивными рудами пирит-сфалерит-халькопиритового, барит-халькопирит-сфалеритового и гематит-кварц-халькопирит-галенитсфалеритового состава. Биоморфные структуры, приуроченные к пирит-сфалерит-халькопиритовым рудам, сложены псевдоморфозами пирита, халькопирита, сфалерита и кварцем по тонким (2-3 мм в диаметре) трубчатым червям, напоминающим современные полихеты (рис. 3а, б).

Сафьяновское месторождение на Среднем Урале в Режевском рудном районе также характеризуется высокой степенью сохранности сульфидного холма «чёрного курильщика» (Масленников, 2006). Рудоносной является риолит-дацитовая толща девона-нижнего карбона с прослоями вулканокластитов, тефроидов и туффитов смешанного состава. В кровле холмообразной постройки присутствуют отложения гидротермально-биогенной фации, представленные колломорфными пирит-марказитовыми рудами с многочисленными трубчатыми червями – полихетами – размером от 100 мкм до 2 см в длину (см. рис. 3в, г.). Оболочка червей имеет концентрически-зональное строение, сложена фрамбоидальным и кристаллически-зернистым друзовым пиритом, внутренняя часть инкрусти-



Рис. 1. Схема размещения колчеданоносных районов в палеогеодинамических структурах Урала. По: (Масленников, 2006), с упрощениями.

Месторождения: 1 – уральского типа, 2 – кипрского типа и типа бесси, 3 – типа куроко, 4 – филизчайского типа; ВУ – Восточно-Уральское поднятие, Т – Тагильское окраинное море, М – Магнитогорская палеоостровная дуга. Треугольниками (внемасштабный знак) показаны исследованные месторождения.

Fig. 1. Location of VMS regions in paleogeodynamic structures of the Urals, simplified after (Maslennikov, 2006).

Types of deposits: 1 – Uralian, 2 – Cyprus and Bessi, 3 – Kuroko, 4 – Filizchay; BY – East Uralian uplift, T – Tagil marginal sea, M – Magnitogorsk paleoisland arc. Triangles, deposits studied.

рована кварцем двух генераций. Кварц-1 образует зёрна до 0.5 мм, окружённые более поздней разновидностью микрокристаллического кварца-2. Барит также широко распространён в колломорфных рудах и цементирует фрамбоиды, конкреции и кри-



Рис. 2. Схема расположения месторождений Киллик и Кызылкая в Понтийском поясе. По (Revan et al., 2014), с упрощениями.

1 – андезиты, базальты и лавокластиты (K₂); 2 – вулканические породы (эоцен); 3 – интрузивные тела дацитов и риолитов (K₂-эоцен); 4 – вулканогенно-осадочные породы (J); 5 – месторождения.

Fig. 2. Location of the Killk and Kyzylkaya deposits in Pontides, simplified after (Revan et al., 2014).

1 - andesites, basalts and lavoclastites (K₂); 2 - volcanic rocks (Eocene); 3 - plutonic bodies of dacites and rhyolites (K₂-Eocene); 4 - volcanosedimentary rocks (J); 5 - deposits.

сталлы пирита. Редкие пластинчатые кристаллы барита размером до 0.2 мм в виде реликтов присутствуют в кварц-пиритовой матрице. Барит ассоциирует с зёрнами кварца-1 и рассекается поздним микрокристаллическим кварцем-2.

Юбилейное месторождение относится к Макан-Мамбетовской зоне растяжения на Южном Урале. Шесть рудных тел линзовидной формы залегают на контакте базальтовой и андезит-риолит-дацитовой толщ и реконструированы как пологие сильноразрушенные сульфидные холмы (Масленников, 2006). На месторождении преобладают массивные и брекчиевидные руды, состоящие из пирита, халькопирита и сфалерита. В рудах хорошо сохранились колломорфные, метаколлоидные и эмульсионные текстуры. Во Второй и Четвёртой рудных залежах в массивных пирит-халькопирит-сфалеритовых рудах встречена оруденелая фауна, определённая как кораллы, табуляты и тентакулиты, сходные с реликтами сульфидизированных трубчатых червей (Малахов, Денисов, 1974; Масленников, 1999). Оболочка трубчатых червей сложена колломорфным, зернистым и фрамбоидальным пиритом, осевые полости заполнены кальцитом. Размеры остатков в продольном сечении достигают 10 мм, в поперечном – 3 мм (Целуйко и др., 2013).

68



Рис. 3. Биоморфные структуры в рудах месторождений: а, б – Валенторское; в, г – Сафьяновское; д – Молодёжное; е – Шемурское; ж, з – Киллик: ж – барит-1, з – барит-2.

Fig. 3. Biomorphic textures in ores from the VMS deposits: a, 6 - Valentorka; B, r - Saf'yanovka; d - Molodezhnoe; e - Shemur; π , 3 - Killik: $\pi - \text{barite-1}$, 3 - barite-2.

Молодёжное месторождение расположено в восточной части Узельгинского рудного поля на Южном Урале и является сильноразрушенным сульфидным холмом (Масленников, 2006). Рудовмещающей является риолит-риодацитовая толща среднего девона с прослоями ксенолавокластитов, эдафогенных брекчий, кварц-хлорит-гематитовых пород и хлоритолитов (Зайков и др., 2001). Четыре рудных тела линзовидной формы сложены халькопирит-пиритовыми и сфалерит-халькопирит-пиритовыми рудами. На месторождении преобладают фации обломочных руд, залегающие в кровле и южной зоне выклинивания I рудного тела и почти полностью слагающие II рудную залежь. В сульфидных брекчиях сохранены обломки с колломорфными текстурами и псевдоморфозами пирита, халькопирита, барита и, реже, кварца по тонким трубчатым червям, сходным с полихетами размером 1–2 см (см. рис. 3д). Барит формирует столбообразные и пластинчатые выделения размером 2–5 мм, крупнокристаллические и прозрачные.

Шемурское месторождение на Северном Урале располагается в северо-западной части одноимённой вулкано-тектонической депрессии на северном замыкании Тагильской мегазоны (Трякина, 1979) и является сильноразрушенным сульфидным холмом «чёрного курильщика» (Масленников, 2006). Рудные тела залегают в кислых вулканитах нижнешемурской толщи, прорванных дайками основного и кислого составов. На месторождении широко распространены дистальные турбидиты с неясно-полосчатыми текстурами (Сафина и др., 2010). Главным минералом является пирит, реже встречаются сфалерит и магнетит. В составе цемента преобладает кварц. Биоморфные структуры, обнаруженные в кварце, представлены трубками длиной до 1 мм, которые состоят из вытянутых колец, скреплённых в цепочки. В ассоциации с трубками встречаются жёлто-бурые до чёрного обособления с сотовой структурой в виде пятен (50-200 мкм) с заливчатыми очертаниями, напоминающие колонии трубчатых организмов (см. рис. 3е). Нередко вокруг таких колоний сохраняются фрагменты каймы с шестоватым строением и ориентировкой индивидов перпендикулярно ядру.

В рудах мезозойских медноколчеданных месторождений Киллик и Кызылкая в Понтийском поясе Турции В.В. Масленниковым и М.К. Реваном в 2009 г. впервые были обнаружены фрагменты оруденелых вестиментифер диаметром 1–2 см.

Месторождения Киллик и Кызылкая располагаются в пределах Южной островной дуги и принадлежат южной части Лаханос-Кызылкайского рудного поля (Рејаtovic, 1979). Вмещающими породами являются дациты, риолиты и их лавокластиты, перекрытые вулканогенно-осадочными отложениями. Часть руд имеет массивные и колломорфные текстуры. Преобладающей рудной фацией является рудокластическая, представленная брекчиями, сложенными крупными обломками труб «чёрных курильщиков» и фрагментами сульфидно-баритовых трубок вестиментифер размером от нескольких миллиметров до первых сантиметров, редко до-

стигая 10 см (Revan et al., 2014). По минеральному составу выделены пирит-халькопирит-сфалеритбаритовые и барит-пиритовые трубки вестиментифер (см. рис. 3ж, з). Первые сложены сфалеритом, стенки каналов последовательно инкрустированы пиритом, халькопиритом, сфалеритом и баритом. Барит представлен пластинчатыми полупрозрачными белыми кристаллами или плотными скрытокристаллическими массами. Пирит-баритовые трубки имеют худшую сохранность и представлены крупнопластинчатыми баритовыми агрегатами, заполнившими полости вестиментифер.

Характеристика флюидных включений

В кварце из фауны *Валенторского месторождения* были найдены двухфазные включения размерами 5–15 мкм со сложными очертаниями с угловатыми выступами, реже – округлой, иногда с некоторой огранкой формы. Проанализированные включения не связаны с видимыми трещинами и располагаются в кварце неравномерно, образуя скопления по 3–4 включения либо обособленно друг от друга. Размеры газовых пузырьков в них варьируют от 10 до 30 % объёма включения. Кроме того, встречены однофазные существенно газовые и жидкостные включения размером менее 5 мкм, образующие полосы или зоны в кварце.

На Сафьяновском месторождении исследовался кварц, замещающий органические остатки в колломорфных рудах, и барит из окружающей кварц-пиритовой матрицы. Флюидные включения в кварце крупные (до 20 мкм), располагаются обособленно, имеют угловатую удлинённую форму с элементами кристаллографической огранки (рис. 4а). Газовый пузырёк занимает до 20-25 % объёма включения. В реликтовых зёрнах барита флюидные включения размером от 10 до 40 мкм характеризуются формой «негативного кристалла», иногда со сглаженными углами, располагаются группами по 3-5 включений; как и в кварце, они не связаны с видимыми трещинами. Газовые пузырьки занимают 20-30 % объёма включения. Также широко распространены в барите преимущественно однофазные (газовые) включения размером менее 5-7 мкм, остроугольные в сечении.

В кальците, выполняющем фаунистические остатки в массивных рудах *Юбилейного месторождения*, двухфазные флюидные включения размером 5–13 мкм располагаются равномерно в зёрнах и ориентированы по их удлинению. Кальцит



прозрачный или полупрозрачный, с желтоватым оттенком, среднезернистый. Преобладают плоские включения удлинённой формы. Газовые пузырьки во включениях занимают до 10–15 % их объёма.

На Молодёжном месторождении исследовались флюидные включения в пластинчатом барите из фауны в брекчиевидных рудах. При визуальном изучении выделены однофазные существенно газовые и жидкостные (преобладающие) и двухфазные газово-жидкие включения с небольшим газовым пузырьком (до 5 % объёма включения). Размеры включений не превышают 10 мкм. Исследования проводились на двухфазных включениях.

На Шемурском месторождении исследованы включения в мелкозернистом кварце, дымчатом до чёрного с участками белого полупрозрачного. Наиболее распространены однофазные газовые включения округлой формы размером до 5 мкм, которые образуют цепочечные скопления по границам кристаллов кварца. Двухфазные включения имеют размер от 5 до 40 мкм и подразделяются на два типа. К первому типу отнесены редкие крупные включения размером 20-40 мкм. Они объёмные и имеют чёткие границы, прямоугольную в сечении или пластинчатую форму, крупные газовые пузырьки с небольшой каймой водного раствора. Температуры гомогенизации единичных крупных включений не измерялись, чтобы избежать декрепитации остальных включений. Включения второго типа угловатые, изометричные, вытянутые, иногда с кристаллографическими очертаниями размером 5-12 мкм, располагающиеся группами по 2-4 включения в центральных частях кристаллов (см. рис. 4б). Объём газовых пузырьков изменяется от 10 до 40 %. Рис. 4. Флюидные включения в минералах оруденелой фауны месторождений: а – Сафьяновское (кварц); б – Шемурское; в – Киллик; г – Кызылкая.

Fig. 4. Fluid inclusions in minerals of fossilized fauna from the deposits: a - Saf'yanovka (quartz); $6 - Shemur; B - Killik; <math>\Gamma - Kyzylkaya$.

Эти включения маркируют заключительный момент роста кристаллов кварца и преобразование исходных обломочных руд.

На месторождениях Киллик и Кызылкая исследовались флюидные включения в пластинчатых полупрозрачных кристаллах барита размером до 3 мм в остатках фауны в фации крупнообломочных руд. В пирит-халькопирит-сфалерит-баритовых трубках (барит-1) и в барите Кызылкая флюидные включения имеют размеры ~ 10 мкм, располагаются группами по 3–5 включений. Включения имеют чёткие границы, угловатую форму, редко с отростками (см. рис. 4в, г). Газовые пузырьки чёткие, занимают порядка 15–20 % объёма включения. В барит-пиритовых трубках (барит-2) исследованы редкие крупные двухфазные флюидные включения размером порядка 50 мкм.

Методы исследования

Микротермометрические исследования флюидных включений проводились в микрокриотермокамере THMSG-600 (Linkam), позволяющей производить измерения температур фазовых переходов в интервале –196 до +600 °С, с микроскопом Olympus (Геологический факультет ЮУрГУ, г. Миасс, аналитик Н.Н. Анкушева), программное обеспечение LinkSys V-2.39. Погрешность измерительной аппаратуры составляет ±0.1 °С в интервале –20...+80 °С и ±1 °С – за пределами этого интервала. Солевой состав растворов во включениях оценивался по температурам эвтектик (Борисенко, 1977). Температуры гомогенизации фиксировались в момент исчезновения газового пузырька при нагревании препарата в термокамере. Концентрации солей в растворах рассчитывались по температурам плавления последних кристаллических фаз (Bodnar, Vityk, 1994). Обработка результатов измерений выполнена в программе Statistica 6.1.

С помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния была определена газовая фаза флюидных включений. Исследование газовых пузырьков включений проводилось в лаборатории термобарогеохимии ИГМ СО РАН с использованием спектрометра Horiba Lab Ram HR 800 с полупроводниковым детектором, возбуждение производилось твёрдотельным лазером (532 нм) мощностью 50 мВт, для получения удовлетворительного соотношения сигнал/шум производилось 10 накоплений по 10 секунд каждое (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, аналитик Н.Н. Анкушева). Оценка молекулярных соотношений газов в пузырьках без учета паров воды проводилась с использованием величин относительного рамановского сечения по (Burke, 2001). Пределы обнаружения зависят от чувствительности прибора, парциального давления каждого газа и формы и размеров индивидуальных включений. Процедуры вычитания фона и сглаживания проведены в программе Origin 8.0.

Методом газовой хроматографии был проанализирован валовый газовый состав флюидных включений в барите (ГЕОХИ РАН, г. Москва, аналитик О.Ф. Миронова). Анализы выполнены на газовом хроматографе серии «Цвет-100» с пиролитической приставкой П-75. Содержимое включений извлекалось термическим вскрытием и подавалось на детекторы: катарометр для определения CO₂ и H₂O и пламенно-ионизационный – для определения CH₄ и тяжёлых углеводородов. В качестве сорбента использовался «Полисорб-1». Навеска для поинтервального анализа составляла 50–150 мг. Чувствительность определения газовых компонентов (мкл): N₂ 0.1; CH₄ 4 × 10⁻²; CO₂ 3 × 10⁻²; H₂O 5 × 10⁻⁵. Газовыделение происходило при 200–500 °C.

Температуры гомогенизации, солевой и газовый состав и солёность растворов

Результаты исследований флюидных включений представлены в табл. 1–3 и на рис. 5–8.

На Валенторском месторождении в солевом составе флюидных включений в кварце присутствуют растворы NaCl-H₂O и NaCl-KCl-H₂O. Гомогенизация включений в жидкую фазу происходит при 120–150 °C. Распределение значений температур гомогенизации одномодальное с пиком 130–150 °С (см. рис. 5, I). Концентрация солей варьирует от 4.8 до 8.5 мас. % NaCl-экв. Для значений солёности характерно бимодальное распределение с пиками 5.5–6.5 и 7.5–8 мас. % NaCl-экв. По результатам КР-спектроскопии в газовых пузырьках включений установлен преимущественно CO₂ (86.3–100 мол. %) и, в подчинённом количестве, N₂ (до 13.7 мол. %) (табл. 2).

Температуры эвтектики включений в барите *Сафьяновского месторождения* показали, что в водном растворе содержится NaCl. Флюидные включения гомогенизировались при 160–190 °С. Распределения значений температур гомогенизации и солёности одномодальные с пиками 175–180 °С и 2– 3 мас. % NaCl-экв., соответственно (см. рис. 5, IIa).

Флюидные включения в кварце оруденелой фауны Сафьяновского месторождения характеризуются сходным солевым составом с включениями в барите. Отличия наблюдаются в температурах гомогенизации и солёности. Общий интервал температур гомогенизации составляет 95–117 °С, преобладают значения 100–110 °С. Значения солёности составляют 8.2–10.7 мас. % NaCl-экв. и отличаются равномерным распределением без выраженных пиков (см. рис. 5, II). КР-спектроскопией установлено, что в составе флюидных включений присутствуют CH₄ (79–100 мол. %) и N₂ (до 21 мол. %) (см. табл. 2).

Во включениях в кальците *Юбилейного месторождения* содержатся растворы NaCl–H₂O и NaCl–KCl–H₂O. Распределение значений температур гомогенизации имеет одномодальный характер с пиком 200–220 °C. Для значений солёности характерно одномодальное распределение с пиком 5.5–6.5 мас. NaCl-экв. (см. рис. 5, III).

Эвтектика растворов включений в барите Молодёжного месторождения указывает на присутствие солевой системы NaCl-KCl-H₂O. Гомогенизация включений происходила при 65–107 °C. Распределение температур гомогенизации одномодальное, с пиком 90–100 °C (см. рис. 6, I). Распределение значений солёности также одномодальное с пиком 9–10 мас. % NaCl-экв.

Шемурское месторождение. Температуры эвтектики растворов включений близки эвтектике системы NaCl-KCl-H₂O. Гомогенизация включений происходила в интервале от 100 до 180 °C (единичные значения до 230 °C) (см. рис. 6, II). Распределение температур гомогенизации одномодальное с пиком 140–150 °C. Значения солёности варьируют от 5.5 до 9.5 мас. % с полимодальном распре-

Таблица 1

Результаты исследований флюидных включений в минералах биоморфных руд медноколчеданных месторождений Урала и Понтид

Table 1

Fluid inclusion data on minerals of biomorphic ores from the VMS deposits of the Urals and Pontides

Месторождение (минерал)	N	T _{∋вт} , °C	Солевая система Т _{пл} , °С		С, мас. %, NaCl-экв.	Т _{гом} , °С
Валенторское (кварц)	34	-21.321.8 -23.123.8	NaCl-H ₂ O NaCl-KCl-H ₂ O	-3.05.5	4.8-8.5	123–158
Сафьяновское (барит)	35	-21.722.3	NaCl-H,O	-1.52.7	2.2–4.5	160–190
(кварц)	30	-21.521.8	2	-5.37.2	8.2–10.7	95–117
Юбилейное (кальцит)	35	-21.721.8 -23.023.7	NaCl-H ₂ O NaCl-KCl-H ₂ O	-2.14.5	3.5–7	180–227
Молодежное (барит)	32	-23.023.9	NaCl-KCl-H ₂ O	-5.27.7	8-11	65–107
Шемурское (кварц)	12	-23.024.0	NaCl-KCl-H ₂ O	-6.13.0	5.0–9.3	100–160
Киллик барит-1 барит-2	85 42	-22.923.9 -2121.7°	NaCl-KCl-H ₂ O NaCl-H ₂ O	-2.05.1 -0.53	4.5–8 0.7–4	140–200 100–140
Кызылкая (барит)	70	-21.022.0	NaCl-H ₂ O	-1.83.8	2–6	100–130

Примечание. Т_{эвт} – температура эвтектики; Т_{пл} – температура плавления льда; С – концентрация солей в растворе; Т_{пм} – температура гомогенизации; N – число измерений.

Note. T_{fm} – first melting temperature; T_{fin} – final melting temperature; C – salinity, T_{hom} – homogenization temperature; N – number of measurements.



Рис. 5. Распределение значений солёности и температур гомогенизации включений в минералах оруденелой фауны в гидротермальных массивных рудах месторождений: I – Валенторское; Сафьяновское: II – кварц; IIа – барит; III – Юбилейное.

Fig. 5. Histograms of salinity and T_{hom} in minerals of fossilized fauna in hydrothermal massive ores from the VMS deposits: I – Valentorka; Saf'yanovka: II – quartz, IIa – barite; III – Yubileinoye.

МИНЕРАЛОГИЯ № 1 2016

Таблица 2

Table 2

Состав газов во флюидных включениях по данным рамановской спектроскопии, мол. %

- -

Volatile contents	in	fluid	inclus	ions	according
to Raman	sp	ectro	scopy,	mol	. %

№ п/п	CO ₂	N ₂	CH4			
Валенторское месторождение (кварц)						
1	98.8	1.2	0.0			
2–6	100	0.0	0.0			
7	96.5	3.5	0.0			
8	86.3	13.7	0.0			
9	94.0	6.0	0.0			
10	91.5	8.5	0.0			
11	88.2	11.8	0.0			
12	100	0.0	0.0			
Сафьяновское месторождение (кварц)						
1–2	0.0	0.0	100			
3	0.0	16.4	83.6			
4	0.0	16.0	84.0			
5	0.0	11.0	89.0			
6	0.0	16.6	83.4			
7	0.0	20.9	79.1			
8	0.0	16.7	83.3			
9	0.0	13.0	87.0			
10-12	0.0	0.0	100			
Шемурское месторождение (кварц)						
1	0.0	83.2	16.8			
2	34.3	59.8	5.9			
3	96.1	0.0	3.9			
4–5	100	0.0	0.0			
6	97.3	0.0	2.7			
Киллик местрождение (барит)						
1-8	100	0.0	0.0			



Рис. 6. Распределение значений солёности и температур гомогенизации включений в минералах оруденелой фауны в обломочных рудах месторождений: І – Молодёжное; ІІ –Шемурское; Киллик: ІІІ – барит-1, ІІІа – барит-2; IV – Кызылкая.

Fig. 6. Histograms of salinity and T_{hom} in minerals of fossilized fauna in clastic ores from the VMS deposits I – Molodezhnoe; II – Shemur; Killik: III – barite-1, IIIa – barite-2; IV – Kyzylkaya.

Таблица 3

Состав газов во включениях в барите оруденелой фауны месторождений Киллик и Кызылкая по данным газовой хроматографии

Table 3

Volatile contents in fluid inclusions from barite of fossilized fauna from the Killik and Kyzylkaya deposits according to gas chromatography

							ť			
Месторождение	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	H,O
		МКГ/Г					мол. %			
Киллик: барит-1 барит-2	1.97 0.73	56.9 10.2	0.65 0.21	152 42.3	1843 1614	0.1 0.03	1.9 0.4	0.04 0.01	3.2 1.05	94.8 98.5
Кызылкая	1.3	2.43	0.38	19.8	1265	0.07	0.3	0.03	0.8	99.7

МИНЕРАЛОГИЯ № 1 2016



Рис. 7. Соотношение концентраций солей (С, мас. % NaCl-экв.) и температур гомогенизации (Т_{гом}, °С) включений в минералах оруденелой фауны в гидротермальных массивных рудах месторождений: І – Валенторское; Сафьяновское: II – кварц; IIa – барит; III – Юбилейное. SW – солёность морской воды при н.у. (25 °С).

Fig. 7. Salinity vs T_{hom} of fluid inclusions in minerals of fossilized fauna in hydrothermal massive ores from the VMS deposits: I – Valentorka; Saf³yanovka: II – quartz, IIa – barite; III – Yubileinoye. SW – seawater salinity at 25 °C.

делением значений на гистограмме. По данным КР-спектроскопии, в газовых пузырьках флюидных включений была обнаружена смесь газов, состоящая из CO₂, N₂ и CH₄. Соотношения газов варьируют (см. табл. 2).

Во включениях в барите-1 *месторождения* Киллик содержится водно-солевой раствор NaCl– KCl–H₂O. Распределение значений температур гомогенизации одномодальное с пиком 160–190 °C (см. рис. 6, III). Концентрации солей составили 3.5– 8 мас. % NaCl-экв. На гистограмме распределения значений преобладает интервал 5–7 мас. %.

Включения в барите-2 месторождения Киллик содержат водные растворы NaCl. Они гомогенизируются при 100–140 °С. Распределение температур гомогенизации одномодальное с пиком 120–130 °С. Солёность растворов составляет 1–5 мас. %, преобладающее количество значений попадает в интервал 2–3 мас. % NaCl-экв (см. рис. 6, IIIа). По результатам КР-спектроскопии газовые пузырьки включений в барите содержат чистый CO₂ (см. табл. 2).

В барите *месторождения Кызылкая* гомогенизация флюидных включений происходила при 100–130 °С. Распределение значений температур гомогенизации имеет вид гистограммы с обрывом слева с пиком 110–120 °С. Распределение значений



Рис. 8. Соотношение концентраций солей (С, мас. % NaCl-экв.) и температур гомогенизации (Т_{гом}, °С) включений в минералах оруденелой фауны в обломочных рудах месторождений: I – Молодёжное; II –Шемурское; Киллик: III – барит-1, IIIa – барит-2; IV – Кызылкая. SW – солёность морской воды при н.у. (25 °C).

Fig. 8. Salinity vs T_{hom} of fluid inclusions in minerals of fossilized fauna of clastic ores from the VMS deposits: I – Molodezhnoe; II – Shemur; Killik: III – barite-1, IIIa – barite-2; IV – Kyzylkaya. SW – seawater salinity at 25 °C.

солёности на гистограмме бимодальное, выделяется 2 пика – 3–3.5 и 4–4.5 мас. % (см. рис. 6, IV).

По данным газовой хроматографии, в составе включений в барите оруденелых вестиментифер месторождений Киллик и Кызылкая, помимо H_2O , преобладают CO_2 и CO; CH_4 и N_2 присутствуют в незначительных количествах (см. табл. 3). Содержания газов во включениях в барите-1 месторождения Киллик значительно превышают таковые в барите-2. Соотношение CO_2/H_2O всегда значительно меньше 1 (барит-1 – 0.082 и барит-2 – 0.026 – Киллик, 0.015 – для барита Кызылкая).

Таким образом, минералообразующие растворы для оруденелой фауны гидротермально-биогенных фаций месторождений преимущественно водные состава NaCl и NaCl-KCl. В газовом составе преобладают CO₂ (Валенторское) или CH₄ (Сафьяновское). Солёность растворов во включениях в кварце значительно выше морской воды, в барите – ниже или близко солёности морской воды (см. рис. 7). Температуры гомогенизации включений укладываются в интервал от 100 до 200 °C. В целом, наблюдается обратная зависимость между температурами гомогенизации и концентрациями солей в растворах. Минерализация фауны в фациях обломочных руд исследованных месторождений образована также водными растворами NaCl и NaCl-KCl. Среди газовых компонентов преобладает CO₂ (Киллик, Кызылкая, Шемур), также в кварце Шемурского месторождения встречены включения с преобладанием N₂. Солёность растворов во включениях в кварце (Молодежное, Шемур) и барите-1 (Киллик) превышает солёность морской воды (до 3 раз). Для барита-2 (Киллик) и барита Кызылкая она близка или меньше таковой в морской воде (см. рис. 8). Температуры гомогенизации включений образуют широкий интервал от 65 до 200 °C. Зависимости между значениями Т_{гм} и солёности не наблюдается.

Обсуждение результатов термобарогеохимических исследований

Как показано в работах коллег, гидротермальные и рудокластические фации – это две разные системы, характеризующиеся различными пространственными, минералого-геохимическими и физико-химическими характеристиками (Зайков и др., 2001; Аюпова, Масленников, 2005; Зайков, 2006; Масленников, 2006). На флангах и в участках выклинивания рудных тел господствуют процессы диагенеза, аналогичные осадочным породам. Соответственно, результаты изучения прозрачных минералов, заместивших фауну в рудах исследованных месторождений, также характеризуются своими типоморфными признаками, обнаруженными методами термобарогеохимии.

Минералы из фауны гидротермально-биогенных фаций

Валенторское месторождение. По параметрам флюидных включений кварц из фауны сходен с рудным кварцем из подводящих каналов сульфидной постройки. Согласно данным В.А.Симонова с соавторами (2007), физико-химические параметры кристаллизации кварца, заполнившего подводящие каналы, следующие: NaCl-KCl раствор с солёностью 5.6–8.9 мас. % и температурами гомогенизации 140–180 °С. Растворы, отложившие кварц в сульфидной трубе «чёрного курилыщика» Валенторского месторождения, имеют натрий-хлоридно-сульфатный состав, солёность 0.5–7 мас. %, минимальные температуры 125–220 °С (Симонов, 2008). С двухфазными включениями в кварце из фауны ассоциируют однофазные газовые и жидкостные включения. По аналогии с современными гидротермальными постройками, это указывает на процессы фазовой сепарации флюида, протекавшего по подводящим каналам в нижней части рудной залежи на Валенторском месторождении (Бортников и др., 2004; Vanko et al., 2004; Симонов и др., 2007). Существенно водные включения, обнаруженные в кварце, предполагают их захват при низких температурах менее 50 °C (Goldstein, Reynolds, 1994), т.е. флюиды непрерывно захватывались по мере их охлаждения. Газовый состав флюида азотно-углекислотный. Повышенные содержания СО, могут быть связаны с реакциями с органическим веществом из вмещающих пород, а также являться свидетельством участия глубинного магматического флюида. По мнению некоторых исследователей, углекислотные флюиды отражают более поздние наложенные гидротермальные процессы, не относящиеся к формированию колчеданных руд (Xu et al., 2011).

На Сафьяновском месторождении выявляются два типа растворов, отложивших барит и кварц: более высокотемпературный разбавленный (барит) и более солёный и низкотемпературный (кварц). По солевому составу эти растворы сходны и содержат NaCl. Подобная ситуация была отмечена для кремнистого материала из барит-полиметаллических корок вулканов Хук Ридж и Три Сестры (Антарктика) (Petersen et al., 2004). Авторы считают, что это отражает повышенную концентрацию кремнезёма в более солёном минералообразующем флюиде. Увеличение солёности раствора может быть связано с изменением состава растворов в результате кипения в подводящем канале и дальнейшим переходом в более солёный флюид. Ещё одной причиной повышения солёности могло стать участие высококонцентрированного глубинного флюида (Kamenetsky et al., 2001). Для осаждения барита были благоприятны растворы с низкой солёностью. Понижение солёности можно объяснить разбавлением раствора новообразованными водами при диа- или катагенетических преобразованиях (Логвиненко, Орлова, 1987). Среди газовых компонентов во флюиде преобладает СН₄ (до 100 %). Повышенные содержания СН₄ обычно отмечаются во флюидах гидротермальных сульфидных полей, ассоциирующих с гипербазитами (Леин и др., 2000). Однако, в то же время присутствие СН, во флюиде может быть связано с восстановлением СО, при взаимодействии с вмещающими породами (Xu et al., 2011).

Позиция кальцита в оруденелой фауне *Юбилейного месторождения* остаётся неясной. По значениям солёности минералообразующий раствор близок кварцу Валенторского месторождения, но является наиболее высокотемпературным (Т_{гом} до 230 °C).

Минералы из фауны рудокластических фаций

Молодёжное месторождение. Отложение барита в пиритизированных трубчатых червях этого месторождения связано с низкотемпературными (T_{гом} 65–107 °C), но высокосолёными (8–11 мас. % NaCl-экв.) растворами. Предполагается, что барит, заполняющий осевые полости трубчатых червей, был образован при постседиментационном (поздний диагенез – катагенез) преобразовании обломочных руд. Полученная солёность растворов увеличивается почти вдвое, и максимальная концентрация солей в три раза выше, чем в морской воде. Ассоциация однофазных газовых, жидкостных и концентрированных двухфазных включений свидетельствует о фазовой сепарации флюида на Молодёжном месторождении.

Шемурское месторождение. Температуры гомогенизации включений (100-160 °C) в кварце, заместившем органические остатки в обломочных рудах месторождения, совпадают с температурами катагенетических преобразований осадочных пород (Япаскурт, 2008). Это объясняет отсутствие корреляции между температурами гомогенизации и солёностью растворов. Широкие вариации солёности и температур гомогенизации включений - может быть результатом смешивания флюидов с меньшей или большей солёностью при изменении РТ-параметров среды минералообразования (Wilkinson, 2001) или связаны со значительной степенью преобразованности обломочных руд на месторождении. В газовом составе включений преобладает углекислый газ и, в некоторых случаях, азот. Наличие азота описано во флюидах труб «чёрных курильщиков» гидротермального поля ТАГ (Леин и др., 2000). Присутствие азота во флюидах золоторудных месторождений связывают с разрушением аммонийсодержащих силикатов вмещающих пород, в которых азотом в форме NH₄⁺ изоморфно замещается калий (Гибшер и др., 2011).

Месторождения Киллик и Кызылкая. По данным термобарогеохимии и газовой хроматографии, растворы, отлагавшие барит оруденелой фауны, делятся на два типа, различных по составу, солёности и температурам. Барит-1 в пирит-халькопирит-сфалерит-баритовых трубках отлагался более газонасыщенными водными NaCl-KCl растворами с повышенными относительно морской воды концентрациями солей (до 8 мас. %) и температурами гомогенизации включений 140-200 °С. Растворы, отложившие барит-2 в пирит-баритовых трубках, аналогичны таковым для барита оруденелой фауны на месторождении Кызылкая: более разбавленные (солёность не превышает 4 мас. %), низкотемпературные (Т_{гом} 100-140 °С) и имеют состав NaCl. Такое явление может быть результатом смешения более холодного флюида и более горячим флюидом высокой солёности, а температура смешанного флюида контролируется вмещающими породами (Dubessy et al., 2003).

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о физико-химических особенностях минералообразующих сред, их сложном фазовом составе сред в период кристаллизации гидротермальнобиогенных руд и придонном преобразовании их обломочных разностей. Отмечается устойчивость биогенных компонентов в условиях гидротермального, позднего диа- и катагенетического преобразования руд.

Заключение

С помощью исследований флюидных включений в прозрачных минералах из рудных ассоциаций различных по механизму отложения руд месторождений Урала и Понтид, проведено сопоставление изменения температур, состава и концентраций флюидов при фоссилизации фауны в гидротермальных массивных и обломочных рудах месторождений Урала и Понтийского пояса.

Минералообразующие растворы имели преимущественно NaCl и NaCl-KCl солевой состав. Первыми отлагались колломорфный и фрамбоидальный пирит, халькопирит или сфалерит, затем кварц, замещающий фауну в гидротермально-биогенных рудах, барит и новообразованный кварц обломочных руд.

На склонах сульфидных холмов в обломочных рудах и зонах выклинивания полосчатых руд в результате их постседиментационного преобразования происходило взаимодействие гидротермальных флюидов с обломками руды, примесными биогенными компонентами и нерудными минералами цемента, и характер флюидов менялся. На этом этапе происходило формирование новообразованных минералов (пирита, кварца, сфалерита), а полости трубок заполнялись баритом, кальцитом или кварцем.

Повышение солёности растворов относительно морской воды является следствием кипения (фазовой сепарации), свидетельствами которой являются ассоциации малоплотных газовых, существенно жидкостных и более концентрированных газово-жидких включений в кварце Валенторского и Молодёжного месторождений. Увеличение концентраций солей и преобладание CO₂ и CH₄ в растворах также может быть связано с взаимодействием с вмещающими породами. Не исключается также роль глубинных магматических флюидов, на что косвенно указывает также присутствие KCl в растворе.

Значения солёности ниже морской воды связываются с участием в минералообразовании поровых растворов при диа- и постдиагенетических преобразованиях гидротермальных руд. В частности, барит месторождений Киллик и Кызылкая характеризуется пониженными значениями солёности и повышенной температурой гомогенизации включений. Это можно объяснить кристаллизацией нерудных минералов из растворов «обеднённых» гидротерм в условиях постдиагенетического преобразования.

Авторы признательны своим коллегам из Института минералогии УрО РАН за консультации при выполнении и обсуждении работы, а также к.г.-м.н. О.Ф. Мироновой (ГЕОХИ РАН, г. Москва) за выполнение газовохроматографического анализа и д.г.-м.н. С.З. Смирнову (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) за предоставленную возможность изучения флюидных включений в кварце методом КР-спектроскопии и плодотворное обсуждение результатов работы.

Исследования поддержаны госбюджетной темой Института минералогии УрО РАН № АААА-А16-116021010244-0 «Минералогия и геохимия рудных и рудоносных фаций как отражение геологической истории палеогидротермальных систем».

Литература

Аюпова Н.Р., Масленников В.В. Гиалокластиты Узельгинского колчеданоносного поля (Южный Урал). Миасс: УрО РАН, 2005. 199 с. Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1997. № 8. С. 16–28.

Бортников Н.С., Симонов В.А., Богданов Ю.А. Флюидные включения в минералах из современных сульфидных построек: физико-химические условия минералообразования и эволюция флюида // Геология рудных месторождений. 2004. № 1. Т. 46. С. 74–87.

Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Рябуха М.А., Тимкина А.Л. Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и РТ-условия образования кварцевых жил (Енисейский кряж, Россия) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 11. С. 1851–1867.

Зайков В.В., Масленников В.В., Зайкова Е.В., Херрингтон Р. Рудно-формационный и руднофациальный анализ колчеданных месторождений Уральского палеоокеана. Миасс: ИМин УрО РАН, 2001. 313 с.

Зайков В.В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин. 2-е издание. М.: Наука, 2006. 429 с.

Леин А.Ю., Гричук Д.В., Гурвич Е.Г., Богданов Ю.А. Новый тип гидротермальных растворов, обогащенных водородом и метаном в рифтовой зоне срединно-атлантического хребта // Доклады РАН. 2000. Т. 375. № 3. С. 380–383.

Логвиненко Н.В., Орлова Л.В. Образование и изменение осадочных пород на континенте и в океане. Л.: Недра, 1987. 237 с.

Малахов А.А., Денисов Е.А. Изотопный состав серы пиритизированных окаменелостей из медноколчеданных месторождений Южного Урала // Доклады АН СССР. 1974. Т. 218. № 4. С. 934–937.

Масленников В.В. Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 384 с.

Реддер Э. Флюидные включения в минералах: в 2-х т. Т. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 560 с.

Сафина Н.П., Аюпова Н.Р., Жуков И.Г., Аптикеев Е.Р. Текстурно-структурная и минералогическая характеристика кластогенных руд Шемурского месторождения // Уральская минералогическая школа. Екатеринбург, 2010. С. 154–158.

Симонов В.А. Физико-химические условия гидротермальных систем древних и современных «чёрных курильщиков» (данные по флюидным включениям) / XIII Всероссийская конференция по термобарогеохимии. М.: ИГЕМ РАН, 2008. С. 117–121. Симонов В.А., Арсентьева Е.А., Масленников В.В. Роль фазовой сепарации в гидротермальных системах древних «чёрных курильщиков» / XVII Международная Школа морской геологии. М.: ГЕОС, 2007. С. 77–79.

Симонов В.А., Ковязин С.В., Тереня Е.О., Масленников В.В., Зайков В.В., Масленникова С.П. Физико-химические параметры магматических и гидротермальных процессов на колчеданном месторождении Яман-Касы, Южный Урал // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48. № 5. С. 423–438.

Трякина Н.П. Некоторые особенности геологического строения и зональности руд Шемурского месторождения // Вопросы генезиса эндогенной зональности колчеданных месторождений. Тр. ЦНИГРИ. Вып. 148. М.: ЦНИГРИ, 1979. С. 62–65.

Целуйко А.С., Масленников В.В., Аюпова Н.Р. Биоморфные структуры в колчеданных рудах Юбилейного месторождения (Южный Урал) // Колчеданные месторождения – геология, поиски, добыча и переработка руд. Материалы Всероссийской научной конференции (V Чтения памяти С.Н. Иванова). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2013. С. 167–170.

Япаскурт О.В. Стадиальный анализ осадочного процесса // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 4. С. 364–377.

Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H_2O -NaCl fluid inclusions / Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Pontignana-Siena, 1994. P. 117–130.

Burke E.A.J. Raman microspectrometry of fluid inclusions // Lithos. 2001. V. 55. № 1. P. 139–158.

Dubessy J., Derome D., Sausse J. Numerical modelling of fluid mixings in the H₂O-NaCl system application to the North Caramal U prospect (Australia) // Chemical Geology. 2003. V. 194. P. 25–39.

Goldstein R.H., Reynolds T.J. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals // Society for Sedimentary Geology Short Course 31. Tulsa, USA: SEPM, 1994. 213 p.

Kamenetsky V.S., Binns R.A., Gemmel J.B., Crawford A.J., Mernagh T.P., Maas R., Steele D. Parental basaltic melts and fluids in eastern Manus backarc Basin // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. V. 184. № 3–4. P. 685–702.

Pejatovic S. Metallogeny of the Pontid type massive sulfide deposits. Ankara, 1979. 98 p.

Petersen S., Herzig P.M., Schwarz-Schampera U., Hannington M.D., Jonasson I.R. Hydrothermal precipitates associated with bimodal volcanism in the Central Bransfield Strait, Antarctica // Mineralium Deposita. 2004. V. 39. P. 358–379.

Revan M.K., Genc Y., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. Mineralogy and trace-element geochemistry of sulfide minerals in hydrothermal chimneys from the Upper-Cretaceous VMS deposits of the eastern Pontide orogenic belt (NE Turkey) // Ore Geology Reviews. 2014. V. 63. P. 129–149.

Vanko D.A., Bach W., Roberts S., Yeats C.J., Scott S.D. Fluid inclusion evidence for subsurface phase separation and variable fluid mixing regimes beneath the deep-sea PACMANUS hydrothermal field, Manus Basin back arc rift, Papua New Guinea // Journal of Geophysical Research. 2004. V. 109. P. 1–14.

Wilkinson J.J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // Lithos. 2001. V. 55. P. 229–272.

Xu J., Hart C.J., Wang L., Chu H., Lin L., Wei H. Carbonic fluid overprints in volcanogenic massive sulfide deposits: examples from The Kelan volcanosediventary basin, Altaides, China // Economic Geology. 2011. V. 106. P. 145–158.

Поступила в редакцию 15 февраля 2016 г.