

УДК 553.41 (470.5)

**ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СЕРЫ СУЛЬФИДОВ  
ПРОДУКТОВ РАЗРУШЕНИЯ ПАЛЕОКУРИЛЬЩИКОВ ЮБИЛЕЙНОГО  
МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

**А.С. Целуйко<sup>1,2</sup>, В.В. Масленников<sup>2,1</sup>, Н.Р. Аюпова<sup>2,1</sup>, С.А. Садыков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе

<sup>2</sup>Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс; celyukoa@rambler.ru

**SULFUR ISOTOPIC COMPOSITION OF SULFIDES FROM THE DESTRUCTION  
PRODUCTS OF PALEOSMOKER FROM THE YUBILEYNOE VHMS DEPOSIT  
(SOUTHERN URALS)**

**A.S. Tseluyko<sup>1,2</sup>, V.V. Maslennikov<sup>2,1</sup>, N.R. Ayupova<sup>2,1</sup>, S.A. Sadykov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>South Urals State University, Miass branch

<sup>2</sup>Institute of Mineralogy UB RAS, Miass; celyukoa@rambler.ru

Определены вариации изотопного состава серы сульфидов фрагментов труб палеокурильщиков, сульфидных турбидитов и продуктов их преобразования. Для фрагментов труб палеокурильщиков характерны значения  $\delta^{34}\text{S} = +0.3 - +2.9$  ‰ CDT, соответствующие изотопному составу серы базальтов молодых гидротермальных колчеданообразующих систем. Продукты преобразования рудокластитов отличаются немного более тяжёлым изотопным составом серы:  $\delta^{34}\text{S} = +1.0 - +4.3$  ‰ CDT. Нарастание роли тяжёлого изотопа серы, вероятно, указывает на участие сульфата морской воды в образовании диагенетических сульфидов.

Илл. 2. Табл. 1. Библ. 31.

*Ключевые слова:* изотопный состав серы, сульфиды, трубы палеокурильщиков, сульфидные турбидиты, колчеданные месторождения, Урал.

Variations in sulfur composition of sulfides from fragments of the paleosmoker chimneys, sulfide turbidites, and products of their seafloor alteration are determined. The fragments of paleosmoker chimneys are characterized by  $\delta^{34}\text{S}$  values from +0.3 to +2.9 ‰ CDT, which correspond to sulfur isotopic composition of basalts from the young massive sulfide hydrothermal systems. The products of seafloor alteration of clastic ores are slightly enriched in heavy sulfur isotopes:  $\delta^{34}\text{S}$  values from +1.0 to +4.3 ‰ CDT. The increase in role of heavy sulfur isotope probably points to involvement of seawater sulfate during diagenesis of clastic sulfides.

Figures 2. Tables 1. References 31.

*Key words:* sulfur isotopic composition, sulfides, hydrothermal paleosmoker chimneys, sulfide turbidites, massive sulfide deposits, Urals.

**Введение**

Одной из главных задач изучения колчеданных месторождений является определение источников серы. Вариации изотопного состава серы совре-

менных и древних колчеданных залежей могут быть обусловлены изменениями физико-химических условий рудоотложения и вовлечением в систему серы, имеющей различное происхождение (Леин и др., 2003; Викентьев, 2004). В соответствии

с общепринятой моделью «рециклинга» считается, что основная доля серы поступает в рудообразующий гидротермальный раствор за счёт растворения магматических сульфидов ( $\delta^{34}\text{S} \approx 0 \text{ ‰}$ ) базальтов океанической коры и некоторая доля – за счёт редукции сульфатов ( $\delta^{34}\text{S} \approx +21 \text{ ‰}$ ) морской воды (Гричук, Леин, 1991). Изотопные исследования серы сульфидов современных чёрных курильщиков принесли бесценную информацию не только об источниках вещества, но и об условиях эволюции гидротермальных труб чёрных курильщиков, формирующихся в различных геодинамических обстановках современных океанов (Bluth, Ohmoto, 1988; Богданов и др., 1997, 2015; Леин и др., 2004; Викентьев, 2004; Бортников, Викентьев, 2005 и др.). Так, например, обнаружено обогащение внешних частей построек изотопом  $\delta^{34}\text{S}$  по сравнению с их внутренними частями, а также выявлено утяжеление изотопного состава серы в долгоживущих гидротермальных постройках.

В последние десятилетия проведены многочисленные исследования изотопного состава серы на Урале и в других колчеданосных регионах, результаты которых активно использовались при сравнительном анализе колчеданных месторождений. На примере колчеданных месторождений Урала рассмотрены изотопные отношения серы в различных типах месторождений (кипрском, уральском и куроко); выявлено нарастание количества лёгких изотопов серы по направлению к кровле рудной залежи; показана зависимость  $\delta^{34}\text{S}$  от метаморфических преобразований; отмечено повышение содержания лёгкого изотопа серы от пирита к сфалериту и халькопириту; выявлено резкое возрастание роли лёгкого изотопа серы в слоистых рудах и сульфидных обособлениях (Буслаев и др., 1976; Прокин и др., 1983; Скуратов, 1986; Prokin, Buslaev, 1999). Гораздо меньше данных об изотопном составе серы сульфидов конкретных рудных фаций и, в частности, древних гидротермальных труб палеокурильщиков (Масленникова, Масленников, 2007) и продуктов их разрушения и придонного преобразования (Тесалина и др., 1998). Этими работами на примере колчеданных месторождений Яман-Касы и Александринское установлены признаки донного фракционирования изотопов серы, отражающиеся в зональности гидротермальных труб и слоев сульфидных турбидитов. Однако очевидно, что подобного рода исследования требуют продолжения на примере других рудно-формационных типов колчеданных место-

рождений, среди которых наименее изученными являются месторождения, залегающие на бонинит-базальтовом основании палеоостровных дуг. К этому типу относится вскрытое карьером слабо метаморфизованное Юбилейное медноколчеданное месторождение (Южный Урал), в рудах которого хорошо сохранились многочисленные фрагменты палеокурильщиков и распространены продукты их разрушения – сульфидные брекчии и турбидиты (Maslennikov et al., 2013). Целью данной работы является выявление признаков фракционирования изотопов серы в трубах палеокурильщиков Юбилейного месторождения и продуктов их разрушения и придонного преобразования.

### Методы исследования

Полевые работы проводились в карьере Юбилейного месторождения, где нами были изучены руды Второго рудного тела. В процессе полевых исследований применен метод рудно-фациального картирования колчеданной залежи, который учитывает пространственно-временные соотношения и эволюцию минеральных типов руд в пределах рудного тела. Особое внимание было уделено кровле и флангам рудной залежи, где лучше всего сохранены фрагменты труб палеокурильщиков.

Аналитические работы выполнены на базе Южно-Уральского центра коллективного пользования Института минералогии УрО РАН (г. Миасс). Микроскопическое изучение полированных аншлифов на эпоксидной смоле производилось в отражённом свете на микроскопе Olympus BX-51 с использованием камеры Olympus DP12 для фотографирования. Определение изотопного состава серы проведено на масс-спектрометре DeltaPlusAdvantage производства фирмы ThermoFinnigan, сопряжённом с элементным анализатором EAFlash 1112 интерфейсом ConFloIII (аналитик Садыков С.А.). Погрешность анализа 0.3 ‰. Результаты исследований включают 67 анализов изотопного состава серы сульфидов гидротермальных труб палеокурильщиков, продуктов их разрушения и придонного преобразования.

### Геологическое положение

Юбилейное месторождение расположено в Бурбайском рудном районе в пределах силуро-девонской Западно-Магнитогорской островной дуги (Медноколчеданные..., 1988). Месторождение от-

носится к уральскому типу: первому подтипу U-1, характеризующемуся преобладанием меди над цинком Cu/Zn 2:1 (Прокин и др., 2011). В геологическом разрезе месторождения выделяются пять толщ, относящихся к баймак-бурибаевской свите (снизу вверх): 1) долеритовая, 2) базальтовая, 3) дацитовая, 4) андезито-базальтовая и 5) андезито-дацитовая (Медноколчеданные..., 1988). На месторождении на глубинах от 52 до 585 м установлено шесть рудных залежей линзовидной, сундучной или пластообразной форм, приуроченных к кровле базальтовой толщи. Некоторые из них могут быть реконструированы как пологие сульфидные холмы (Масленников, 1999). Рудные залежи сложены преимущественно массивными и брекчиевидными рудами, состоящими из пирита, халькопирита и сфалерита. В рудах хорошо сохранились разнообразные колломорфные, метаколлоидные и эмульсионные текстуры. В центральных частях рудных тел развиты кавернозные («выщелоченные») «сыпучие» руды, фиксирующие рудоподводящую зону. Фрагменты труб палеокурильщиков и диффузеров обнаружены в кровле и на выклинках второго рудного тела (Maslennikov et al., 2013). В основании второй и четвертой рудных залежей среди сплошных пиритовых руд была обнаружена пиритизированная фауна, диагностированная как табулята и тентакулята (Малахов, Денисенко, 1974). На выклинках рудных тел широко представлены слоистые руды (Масленников и др., 2014). В их кровле залегают либо гематитизированные базальты, либо вулканомиктовые отложения и гематит-кварц-карбонатные породы. Вулканогенные породы месторождения претерпели метаморфические преобразования эпидот-актинолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций зеленокаменного метаморфизма (Медноколчеданные..., 1988). Гидротермальный метаморфизм проявился в образовании мощных зон метасоматитов по породам основного состава.

### Результаты исследований

Нами изучены фрагменты труб «чёрных и белых курильщиков», гидротермально-биогенные, кластогенные и субмаринно-гипергенные фации Второго рудного тела.

*Трубы палеокурильщиков* представляют собой концентрически зональные образования, сложенные сульфидами и нерудными минералами. По преобладанию минералов выделены пирит-халькопирит-

товые, сфалерит-пирит-халькопиритовые и пирит-сфалеритовые трубы (рис. 1). В строении сульфидных труб выделяются три зоны: зона А – оболочка, состоящая из почковидного или дендритовидного тонкозернистого пирита, мелкозернистых сфалерита и халькопирита; зона В – крустификация стенки трубы – халькопиритовая или сфалеритовая зона С – осевой канал, обычно заполненный друзовым халькопиритом, сфалеритом, пиритом, кварцем, кальцитом или тальком. Каналы могут иметь эллипсоидную, треугольную и вытянутую форму диаметром от 2 до 12 см.

Исследуемый пирит труб представляет собой тонко- и мелкозернистые почковидные агрегаты, часто с прожилками и включениями халькопирита, сфалерита и нерудных минералов. Халькопирит зон В и С представлен друзовыми кристаллами, обычно без включений. Сфалерит труб палеокурильщиков образует друзовые и почковидные агрегаты, часто содержащие эмульсионную вкрапленность халькопирита, а также включения пирита, галенита и теннантита.

Пирит оболочек труб характеризуется изотопным составом  $\delta^{34}\text{S}$  от +0.9 до +2.9 ‰, почти таким же, как и друзовый халькопирит, выросший на стенке труб  $\delta^{34}\text{S}$  +0.7 – +2.8 ‰, и сульфиды, заполнившие осевой канал  $\delta^{34}\text{S}$  от +0.8 до +2.5 ‰ (табл.).

Следует отметить, что сульфиды сфалерит-пирит-халькопиритовых и пирит-сфалеритовых труб имеют более тяжёлый изотопный состав серы (пирит  $\delta^{34}\text{S}$  +0.5 – +2.8 ‰, халькопирит  $\delta^{34}\text{S}$  +0.9 – +2.9 ‰, сфалерит  $\delta^{34}\text{S}$  +0.3 – +2.5 ‰) по сравнению с пирит-халькопиритовыми трубами  $\delta^{34}\text{S}$  от +0.7 до +1.7 ‰. Кроме того, для некоторых пирит-сфалеритовых труб получены различные значения:  $\delta^{34}\text{S}$  = +0.3 – +0.7 ‰ и +1.4 – +2.5 ‰.

*Диффузеры* обнаружены в обломочных халькопирит-пиритовых рудах. Стенки диффузеров сложены тонкозернистым, дендритовидным и колломорфным пиритом с инкрустацией кристаллами халькопирита и пирита. Диффузеры, как и их современные аналоги, вероятно, образовывали трубы, бугры и ульевидные постройки на поверхности рудного тела. Сульфиды диффузеров имеют сходный с трубами «чёрных курильщиков» изотопный состав серы  $\delta^{34}\text{S}$  = +2.02 – +2.06 ‰ (см. табл.).

*Биоморфные руды* в рудах второй залежи на Юбилейном месторождении сложены преимущественно тонкозернистым, фрамбоидальным и колломорфным пиритом и относится к полихетам,

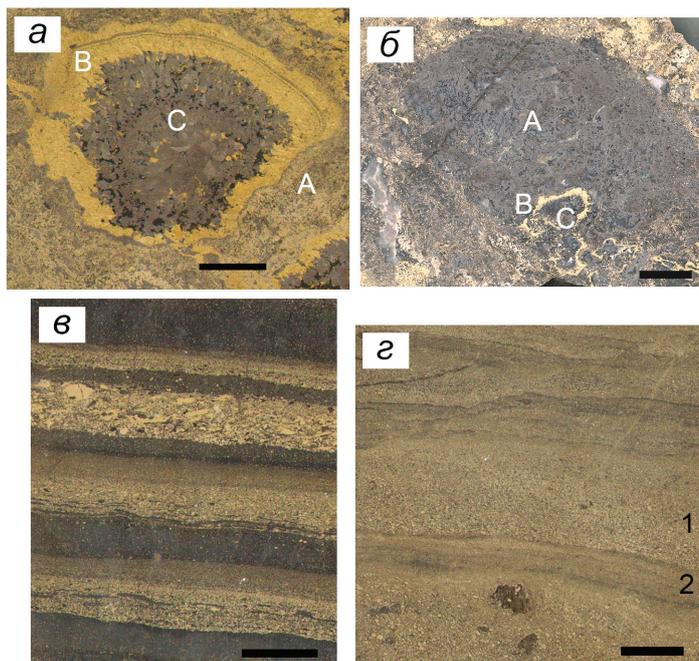


Рис. 1. Рудные фации Юбилейного медноколчеданного месторождения. Трубы палеокурильщиков:

а – сфалерит-халькопирит-пиритовая, б – сфалерит-пиритовая, А – пиритовая или сфалеритовая оболочка; В – халькопиритовая стенка; С – осевой канал, заполненный сфалеритом. Сульфидные турбидиты: в – переслаивание халькопирит-пиритовых (жёлтые) и кварц-хлоритовых (тёмно-зелёные) слоев; г – переслаивание градационно-слоистых (1) и тонкозернистых (2) пиритовых слоев. Полированные образцы. Масштаб линейки 1 см.

Fig. 1. Ore facies of the Yubileynoe massive sulfide deposit. Silfide chimneys:

а – sphalerite-chalcopyrite-pyrite, б – sphalerite-pyrite, А – pyrite or sphalerite outer zone; В – chalcopyrite wall; С – axis channel filled with sphalerite. Sulfide turbidites: в – intercalation of chalcopyrite-pyrite (yellow) and quartz-chlorite (dark green) layers; г – intercalation of gradually layered (1) and fine-grained (2) pyrite layers. Polished samples. Scale bar is 1 cm.

Таблица

### Изотопный состав серы сульфидов руд Юбилейного месторождения

Table

#### Sulfur isotopic composition of ores from the Yubileynoe deposit

Тип руды	Зона	Пирит, ‰	Халькопирит, ‰	Сфалерит, ‰
Пирит-халькопиритовые трубы	А	+0.9 – +1.7		
	В		+0.7 – +1.1	
	С		+0.9 – +1.0	
Пирит-сфалеритовые трубы	А	+1.4 – +1.6		+0.3 – +0.7
	В		+0.5	+1.7 – +2.5
	С			+0.7
Биоморфные руды		+0.6		
Сульфидные диффузеры		+2.0	+2.0	
Сульфидные брекчии		+1.4 – +2.8	+3.0	
Халькопирит-пиритовые турбидиты		+2.0	+2.9 – +3.0	
			пирит+халькопирит +1.1 – +2.2	
Пиритовые турбидиты		+3.1 – +3.9		
Сульфидные диагениты		+2.7 – +4.3		

Примечание. анализы выполнены на масс-спектрометре DeltaPlusAdvantage фирмы ThermoFinnigan, сопряженным с элементным анализатором EAFlash 1112 и интерфейсом ConFloIII (аналитик Садыков С.А.). Погрешность анализа – 0.3 ‰.

Note. analyses were carried out on a DeltaPlusAdvantage mass-spectrometer, ThermoFinnigan, coupled with an EAFlash 1112 elemental analyzer and a ConFloIII interface (analyst A.S. Sadykov). Error of analysis is 0.3 ‰.

размер которых варьирует в продольном сечении до 10 мм с диаметром 1–3 мм. Стенка трубочек выполнена фрамбоидальным пиритом с инкрустацией и крустификацией кристаллическим пиритом, центральная часть заполнена карбонатом, кварцем или халькопиритом. Иногда сульфидизированные фоссилии установлены во внешней оболочке каналов труб курильщиков. Единичное измерение изотопии серы биоморфных руд показывает для пирита  $\delta^{34}\text{S} +0.58\text{‰}$ . Это значение попадает в интервал данных, полученных ранее по оруденелой фауне Юбилейного месторождения  $\delta^{34}\text{S} -0.8 - +1.2\text{‰}$  (ср.  $\delta^{34}\text{S} +0.3\text{‰}$ ) и других колчеданных месторождений Урала (Малахов, Денисенко, 1974; Леин и др., 2004).

*Сульфидные брекчии* располагаются на флангах рудной залежи в виде пластов мощностью до нескольких метров. Брекчии состоят из обломков пиритового, халькопирит-пиритового и халькопиритового состава размером до 10 см, сцементированных более мелким обломочным сульфидным материалом и кварцем. Величины  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидных брекчий варьируют от +1.4 до +3.0 ‰, что чуть тяжелее изотопного состава серы труб палеокурильщиков (см. табл.).

*Сульфидные дистальные турбидиты* (сульфидные песчаники) обнаружены на флангах рудного тела в виде пачек мощностью в несколько метров. Мощность слоев варьирует от первых миллиметров до 8 см. Отдельные слои сульфидных песчаников характеризуются отчётливой прогрессивной сортировкой осадочного материала. По минеральному составу турбидиты можно разделить на два типа: пиритовые (рис. 1г) и халькопирит-пиритовые (рис. 1в). Сульфидный материал представлен преимущественно обломками мелкозернистых пиритовых и халькопирит-пиритовых руд, фрамбоидами, менее распространены халькопиритовые обломки. В некоторых сульфидных слоях встречаются кварц-халькопиритовые прожилки. Часто сульфидный материал смешивается с обломками хлоритизированных базальтовых гиалокластов изометричной или вытянутой формы размером до 2 см. С сульфидными турбидитами часто переслаиваются диагениты, представляющие собой хлорит-кварцевые пелитолиты с тонкими прослоями сульфидной минерализации. Слои сложены зональными идио- и гипидиоморфными кристаллами пирита, конкреционными образованиями и халькопиритовыми обособлениями размером до 2 мм.

Значения  $\delta^{34}\text{S} = +1.1 - +3.0\text{‰}$  для халькопирит-пиритовых сульфидных турбидитов сопоставимы

с таковыми для сульфидных брекчий (см. табл.). Для одного из слоёв халькопирит-пиритового турбидита мощностью 5 см с выраженной прогрессивной сортировкой материала характерно утяжеление изотопного состава серы от подошвы слоя к его кровле (от +1.0 до +2.2 ‰). Такой тренд отличается от описанного для прослоев сульфидных турбидитов на Александринском месторождении, где наблюдалось облегчение изотопного состава с +2.3 до +0.7 ‰ (Тесалина и др., 1998). Отмечено, что халькопиритовые обломки и прожилки в турбидитах имеют более тяжёлый изотопный состав ( $\delta^{34}\text{S} = +2.9$  и  $+3.0\text{‰}$ ), чем пиритовые обломки ( $\delta^{34}\text{S} = +2.0\text{‰}$ ).

Преобразованные пиритовые турбидиты обладают ещё более тяжёлым изотопным составом серы, чем их халькопирит-пиритовые аналоги:  $\delta^{34}\text{S} = +3.1 - +3.9\text{‰}$ . Максимально тяжелые изотопы серы  $\delta^{34}\text{S}$  от +2.7 до +4.9 ‰ установлены в пиритовых диагенитах, почти полностью утративших признаки рудокластического происхождения. Особняком стоят данные полученные для сульфидов рудокласта из хлоритолитов всячего борта, для которого определен лёгкий изотопный состав серы:  $\delta^{34}\text{S} = -0.3 - +0.4\text{‰}$ .

В целом,  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов труб палеокурильщиков варьирует от +0.3 до +2.9 ‰, продукты разрушения палеокурильщиков и преобразования рудокластитов незначительно, но всё же отличаются по изотопному составу серы от гидротермальных труб в сторону утяжеления изотопного состава серы:  $\delta^{34}\text{S} = +1.0 - +4.3\text{‰}$ .

### Обсуждение результатов

Таким образом, для исследованных нами руд Юбилейного месторождения получены меньшие вариации изотопов серы, чем в предшествующих исследованиях:  $\delta^{34}\text{S}$  от -0.3 до +4.3 ‰. По литературным данным изотопный состав серы  $\delta^{34}\text{S}$  руд Юбилейного месторождения варьирует от -4.6 до +6.7 ‰ (Медноколчеданные..., 1988). Такой разброс значений является промежуточным между месторождениями кипрского  $\delta^{34}\text{S} = -3.4 - +4.3\text{‰}$  и уральского типов  $\delta^{34}\text{S} = -8.0 - +7.8\text{‰}$  (Prokin, Buslaev, 1999). Установлено, что для пирита характерны значения  $\delta^{34}\text{S} = -3.8 - +5.6\text{‰}$ , при среднем +1.8 ‰; халькопирит содержит в себе больше тяжёлого изотопа серы  $\delta^{34}\text{S} = -1.9 - +6.7\text{‰}$ , в среднем +2.1 ‰; сфалерит характеризуется наиболее лёгким изотопным составом  $\delta^{34}\text{S} = -4.6 - +6.6\text{‰}$ , в среднем +1.3 ‰ (Медноколчеданные..., 1988).

Для исследованных руд Юбилейного месторождения установлена небольшая дисперсия величины  $\delta^{34}\text{S}$  от  $-0.2$  до  $+4.3$  ‰ при среднем значении  $+1.6$  ‰, что несколько меньше, чем средняя величина  $\delta^{34}\text{S}$  для сульфидов колчеданных месторождений уральского типа  $+2.4$  ‰ (Злотник-Хоткевич, 1986). Полученные значения  $\delta^{34}\text{S}$  близки к данным по другим слабо метаморфизованным месторождениям Южного Урала: Озёрному ( $-0.5$  –  $+7$  ‰), Талганскому ( $0$  –  $+5.6$  ‰), Молодёжному ( $0$  –  $+4.7$  ‰) и Бурибайскому ( $-1$  –  $+4$  ‰) (Исмагилов, Исмагилова, 1982; Медноколчеданные..., 1988; Prokin, Buslaev, 1999). Однако наблюдается некоторое утяжеление изотопного состава серы по сравнению с трубами месторождения уральского типа Яман-Касы ( $\delta^{34}\text{S} = -2.2$  –  $+1.4$  ‰), и облегчение по сравнению с трубами Александринского месторождения ( $\delta^{34}\text{S} = +1.5$  –  $+6.3$  ‰), относящегося к типу куроко (Масленникова, Масленников, 2007). Полученные результаты, вероятно, объясняются отсутствием фрамбоидального пирита в оболочке труб Юбилейного месторождения, в отличие от труб указанных месторождений.

Значения изотопного состава серы близки к значениям  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидов гидротермального поля Снейк-Пит (от  $+1.2$  до  $+2.8$  ‰), а также молодых тонкостенных труб гидротермального поля Рейнбоу ( $\delta^{34}\text{S} = +1.3$  –  $+2.9$  ‰), ассоциирующих с ультрамафитами (Викентьев, 2004). Облегчение изотопного состава серы пирит-сфалеритовых труб курильщиков, наблюдаемое на Юбилейном месторождении, характерно и для сфалеритовых руд современной гидротермальной постройки относительно молодого гидротермального поля Брокен Спур (Леин, 2000). В целом, среднее значение  $\delta^{34}\text{S} +1.64$  ‰ характерно для молодых колчеданообразующих систем, в которых сохранились неизменённые базальты (Гричук, Леин, 1991; Halbach et al., 2003).

Увеличение доли тяжёлого изотопа серы в пиритовой оболочке палеогидротермальных труб Юбилейного месторождения может быть связано с участием в сульфидообразовании сульфат-иона морской воды, что характерно для гидротермальных труб современных курильщиков  $21^\circ\text{C}$ .ш. и юга хребта Хуан де Фука (Богданов и др., 1997; Bluth, Ohmoto, 1988). Подобная изотопная зональность объясняется общим увеличением вклада изотопно-тяжёлого  $\text{H}_2\text{S}$  от ранней стадии гидротермальной деятельности к поздней (Bluth, Ohmoto, 1988). Вариации изотопного состава серы в одной из зон

трубы курильщика из Юбилейного месторождения, вероятно, связаны с быстрым осаждением сульфидных минералов, при котором не наступает изотопного равновесия (Gregory, Robinson, 1984).

Изотопный состав серы, определённый для оруденелой фауны Юбилейного месторождения, попадает в интервал значений изотопии серы, полученных для сульфидизированных полихет Сибайского и Яман-Касинского месторождений:  $\delta^{34}\text{S} = -3.4$  –  $+3.4$  ‰ (Леин и др., 2004). Пиритизированные фоссилии, состоящие из фрамбоидального пирита, обычно характеризуются низкими значениями  $\delta^{34}\text{S}$ .

Пирит слоистых руд ряда колчеданных месторождений Урала имеет более низкие значения  $\delta^{34}\text{S}$  (от  $-6$  до  $+4$  ‰) по сравнению с массивными рудами (Масленников, 1991; Тесалина и др., 1998). Одной из причин облегчения изотопного состава серы в сульфидных песчаниках Сибайского, Яман-Касинского и Сафьяновского месторождений считается наличие многочисленных фрамбоидов пирита, практически отсутствующих в кластогенных отложениях Юбилейного месторождения.

В кровле одного из сульфидных слоёв наблюдалось утяжеление изотопного состава серы по сравнению с подошвой на  $1.2$  ‰. Утяжеление изотопного состава серы от подошвы к кровле некоторых слоёв сульфидных турбидитов может быть вызвано привнесением сульфатной серы морской воды. Однако механизм низкотемпературной сульфатредукции, если не привлекать сульфатредуцирующих бактерий, для низкотемпературных условий пока не разработан. Полученные нами данные находятся в противоречии с ранее установленными фактами облегчения изотопного состава серы в кровле слоёв сульфидных турбидитов Александринского месторождения, относящегося к типу куроко (Тесалина и др., 1998). Различные значения изотопного состава серы в сульфидных брекчиях, пиритовых и халькопирит-пиритовых турбидитах, вероятно, связаны с процессами растворения части сульфидов и реакциями замещения фрагментов тонкозернистых гидротермальных руд более поздними сульфидами (Викентьев, 2004).

Постепенное утяжеление изотопного состава серы гидротермальных растворов связано с увеличением «зрелости» гидротермальной системы. Причиной утяжеления является прогрессирующее проникновение изотопно-тяжёлой серы из морской воды и ослабление поступления магматической серы из базальтов по мере развития метасоматических изменений океанической коры (Гричук, Леин,

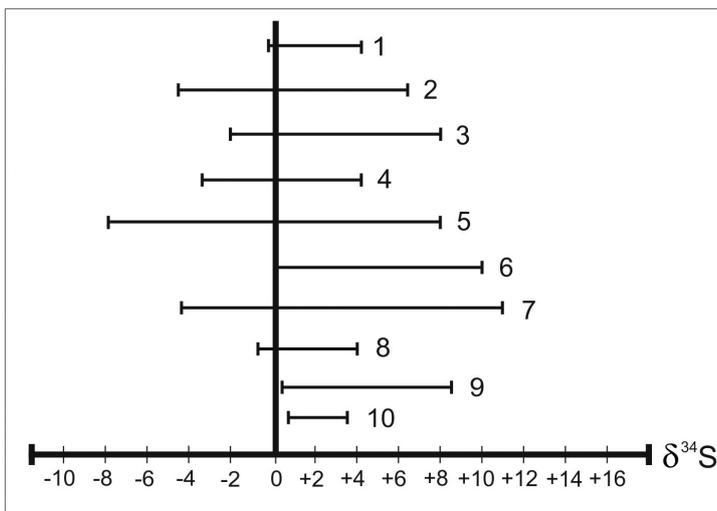


Fig. 2. Sulfur isotopic composition of sulfides from the Yubileynoe deposit, modern hydrothermal fields, and some VMS deposits of the South Urals.

1–3 – Yubileynoe deposit: 1 – original data, 2 – Copper ..., 1988, 3 – Prokin, Buslaev, 1999; 4 – Cyprus-type deposits (Prokin, Buslaev, 1999); 5 – Urals-type deposits (Prokin, Buslaev, 1999); 6 – Cyprus-type deposits (Hannington et al., 1998; Petersen et al., 2000; Vikentyev, 2004); 7 – Kuroko-type deposits (Yudovskaya et al., 1997; Vikentyev, 2004); 8 – Buribay deposit (Prokin, Buslaev, 1999); 9 – TAG hydrothermal field (Petersen et al., 2000; Vikentyev, 2004); 10 – Snake Pit hydrothermal field (Kase et al., 1990).

1991). В связи с этим могут показаться странными относительно невысокие значения изотопии серы, характерные для столь крупного колчеданного объекта, как Юбилейное месторождение. Подобное облегчение изотопного состава серы описано на Узельгинском (–11.3 – +11.1 ‰), Учалинском (–5.6 – +2.3 ‰) и Гайском (–4 – +4.5 ‰) месторождениях (Викентьев, 2004; Prokin, Buslaev, 1999). Некоторые исследователи объясняют обогащение колчеданных руд лёгкими изотопами серы процессами метаморфизма (Prokin, Buslaev, 1999). Облегчение изотопного состава серы в гидротермальной системе может происходить в результате тектонических событий, при которых в контакт с циркулирующим раствором вступают массы неизменённых базальтов (Гричук, Леин, 1991).

Таким образом, изотопный состав серы сульфидов различных рудных фаций Юбилейного месторождения отражает разнообразные условия минералообразования и многочисленные эпизоды отложения, растворения и замещения сульфидов. Полученные значения  $\delta^{34}\text{S}$  близки к данным по другим слабометаморфизованным месторождениям Южного Урала, а также гидротермальным постройкам САХ, ассоциирующим с базальтами. Результаты исследований показывают, что значения  $\delta^{34}\text{S}$ , в целом, попадают в диапазон значений изо-

топии серы месторождений кипрского, уральского и куроко типов (см. рис. 2). Небольшая дисперсия полученных данных, вероятно, связана с неполным охватом всех руд месторождения. Неоднородность значений  $\delta^{34}\text{S}$ , характерная для руд Юбилейного месторождения, устанавливается и на современных гидротермальных постройках, где с помощью ионного микрозонда были измерены значительные (от –1.0 до +7.1 ‰) вариации  $\delta^{34}\text{S}$  в сульфидах на расстоянии в несколько десятков микрон (Chaussidon et al., 1991).

топии серы месторождений кипрского, уральского и куроко типов (см. рис. 2). Небольшая дисперсия полученных данных, вероятно, связана с неполным охватом всех руд месторождения. Неоднородность значений  $\delta^{34}\text{S}$ , характерная для руд Юбилейного месторождения, устанавливается и на современных гидротермальных постройках, где с помощью ионного микрозонда были измерены значительные (от –1.0 до +7.1 ‰) вариации  $\delta^{34}\text{S}$  в сульфидах на расстоянии в несколько десятков микрон (Chaussidon et al., 1991).

## Заключение

Трубы палеокурильщиков Юбилейного месторождения наследуют изотопный состав серы сульфидов базальтов океанической коры, обогащённый изотопом  $^{34}\text{S}$  из-за смеси с серой, восстановленной из сульфата морской воды. Изотопный состав серы кластогенных руд связан с процессами переотложения, растворения и замещения сульфидов, а также взаимодействием с сульфатами морской воды в кровле слоёв. Нарастание роли тяжёлого изотопа серы в ряду от гидротермальных труб к сульфидным диагенитам, вероятно, указывает на влияние морской воды в образовании диагенетических сульфидов. Однако механизм этого процесса,

в отличие от процессов термохимической либо бактериальной низкотемпературной сульфатредукции, пока не объяснён.

Полученные данные показали перспективность привязки изотопных данных к определенным генетическим типам руд или минеральным фациям и микрофациям, и это направление исследований планируется развивать и дальше применительно к различным рудно-формационным типам колчеданных месторождений.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 14-05-00630.*

### Литература

- Богданов Ю.А., Леин А.Ю., Лисицын А.П.* Полиметаллические руды в рифтах Срединно-Атлантического хребта (15–40° с.ш.): минералогия, геохимия, генезис. М.: Геос, 2015. 256 с.
- Богданов Ю.А., Бортников Н.С., Лисицын А.П.* Закономерности формирования гидротермальных сульфидных залежей в осевых частях рифта Срединно-Атлантического хребта // Геол. рудных месторожд. 1997. Т. 39. № 5. С. 409–429.
- Бортников Н.С., Викентьев И.В.* Современное сульфидное минералообразование в мировом океане // Геол. рудных месторожд. 2005. Т. 47. № 1. С. 16–50.
- Буслаев Ф.П., Игумнов С.А., Ярош П.Я.* Вариации изотопного состава серы и метаморфизм колчеданных месторождений Урала // Геол. рудных месторожд. М. 1976. № 4. С. 22–29.
- Викентьев И.В.* Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. М.: Научный мир, 2004. 322 с.
- Гричук Д.В., Леин А.Ю.* Эволюция океанской гидротермальной системы и изотопный состав сульфидов // Доклады РАН. 1991. Т. 318. № 2. С. 422–425.
- Злотник-Хоткевич А.Г.* Условия формирования руд колчеданных месторождений в вулканогенных геосинклиналиях // Автореф. дисс.... доктора геол.-минералог. наук. Москва: ЦНИГРИ, 1986. 47 с.
- Исмагилов М.И., Исмагилова М.З.* Зональность колчеданных руд Озёрного месторождения и изотопный состав серы сульфидов / Вопросы минералогии, геохимии и генезисы полезных ископаемых Южного Урала. Уфа: БФАН СССР, 1982. С. 34–39.
- Леин А.Ю.* Изотопы серы и углерода на активных гидротермальных полях Срединно-Атлантического хребта // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2. № 4. С. 1–12.
- Леин А.Ю., Черкашев Г.А., Ульянов А.А. и др.* Минералогия и геохимия сульфидных руд полей Логачёв-2 и Рейнбоу: черты сходства и различия // Геохимия. 2003. № 3. С. 304–328.
- Леин А.Ю., Масленников В.В., Масленникова С.П., Ульянова Н.В., Зайков В.В., Спири Б.* Изотопы серы и углерода в пригидротермальных экосистемах «чёрных курильщиков» Уральского палеоокеана // Геохимия. 2004. № 7. С. 770–784.
- Малахов А.А., Денисенко 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.* Литологический контроль медноколчеданных руд (на примере Сибайского и Октябрьского месторождений Урала). Свердловск: УрО РАН СССР, 1991. 139 с.
- Масленников В.В.* Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданоносных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс: Геотур. 1999. 348 с.
- Масленникова С.П., Масленников В.В.* Сульфидные трубы палеозойских «чёрных курильщиков» (на примере Урала). Екатеринбург–Миасс: УрО РАН. 2007. 312 с.
- Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Третьяков Г.А., Мелекесцева И.Ю., Сафина Н.П., Белогуб Е.В., Ларж Р.Р., Данюшевский Л.В., Целуйко А.С., Гладков А.Г., Крайнев Ю.Д.* Токсичные элементы в колчеданообразующих системах. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. 340 с.
- Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 239 с.
- Прокин В.А., Сервкин И.Б., Виноградов А.М.* Геологические условия размещения и перспективы выявления крупных медноколчеданных месторождений на Урале // Литосфера. 2011. № 6. С. 123–133.
- Прокин В.А., Ярош П.Я., Рудницкий В.Ф.* Модель формирования колчеданных месторождений уральского типа / Генетические модели эндогенных рудных формаций. Новосибирск, 1983. Т. 2. С. 102–108.
- Скуратов В.Н.* Изотопный состав серы сульфидов Учалинского месторождения и вопросы его

генезиса / Вулканизм и металлогения геосинклиналей. Уфа, 1986. С. 98–103.

*Тесалина С.Г., Масленников В.В., Сурин Т.Н.* Александринское медно-цинково-колчеданное месторождение (Восточно-Магнитогорская палеоостровная дуга, Урал). Миасс: ИМин Ур ОРАН, 1998. 228 с.

*Юдовская М.А., Гриненко Л.Н., Еремин Н.И.* Генезис Малеевского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай, Казахстан) // Геол. рудных месторожд. 1997. Т. 39. № 2. С. 163–182.

*Bluth G.J., Ohmoto H.* Sulfide-sulfate chimneys on the East Pacific Rise, 11° and 13° N latitudes. Part II Sulfur isotopes // Canadian Mineralogist. 1988. V. 26. P. 505–515.

*Chaussidon M., Albarede F., Sheppard S.M.* Ion probe  $d^{34}S$  study of small scale variations in a hydrothermal chimney. East Pacific Rise at 21°N // Source, transport and depositions of metals. Rotterdam: A. Balkema, 1991. P. 609–614.

*Gregory P.W., Robinson B.W.* Sulphur isotope studies of the MT Molloy, Dianne and O.K. stratiform sulphide deposits, Hodgkinson Province, North Queensland, Australia // Mineralium Deposita. 1984. V. 19, P. 36–43.

*Halbach P.E., Fouquet Y., Herzig P.* Mineralization and compositional patterns in deep-sea hydrothermal systems // Energy and Mass Transfer in Marine Hydrothermal Systems / Eds. Halbach P, Tunnikliffe V., Hein J.R. Dahlem University Press, 2003. P. 86–122.

*Hannington M., Galley A.G., Herzig P.M., Petersen S.* Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposit // Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 1998. V. 158. P. 389–415.

*Kase K., Yamamoto M., Shibata T.* Copper-rich sulfide deposits near 23°N, Mid-Atlantic Ridge: chemical composition, mineral chemistry, and sulfur isotopic // Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 1990. V. 106–109. P. 163–172.

*Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Maslennikova S.P. et al.* Mineral and chemical peculiarities of vent chimneys from the Yubileynoye VMS deposit at the Early Devonian basalt-boninite basement of West Magnitogorsk arc, the Southern Urals, Russia // Proceedings of the 12 SGABiennial Meeting. Uppsala. 2013. V. 4. P. 1512–1515.

*Petersen S., Herzig P.M., Hannington M.D.* Third dimension of a presently forming VMS deposit: TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, 26°N // Mineralium Deposita. 2000. Vol. 35. P. 233–259.

*Prokin V.A., Buslaev F.P.* Massive copper-zinc sulfide deposits in the Ural // Ore Geol. Rev. 1999. № 14. P. 1–69.

*Поступила в редакцию 20 ноября 2015 г.*