

**ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА И ФЛЮИДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ
ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ АУЭРБАХОВСКОГО
ВУЛКАНО-ПЛУТОНИЧЕСКОГО ПОЯСА НА СЕВЕРНОМ УРАЛЕ**

© 2016 г. Д. А. Замятина, В. В. Мурзин

*Институт геологии и геохимии УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15
E-mail: d.zamyatina@gmail.com*

Поступила в редакцию 06.04.2015 г.

Принята к печати 15.05.2015 г.

Приводятся данные по изотопному составу С, О, Sr и S карбонатов, кварца и сульфидов из Тамуньерского и Воронцовского золоторудных месторождений, локализованных в Ауэрбаховском вулканоплутоническом поясе. Установлено, что по изотопным характеристикам минералов наиболее близким аналогом оруденения в березитах Тамуньерского месторождения является золото-полиметаллический тип оруденения в джаспероидах Воронцовского месторождения. Расчет изотопного состава С, О и S рудоносного флюида свидетельствует об участии в рудообразовании двух основных резервуаров вещества – породного (морские карбонаты и биогенный пирит вмещающих вулканогенно-осадочных толщ) и флюидного (металлоносные магматогенные, а также метаморфогенные флюиды, связанные внедрением интрузивных масс).

Ключевые слова: *изотопная геохимия, рудообразование, золото-сульфидные месторождения, источники рудного вещества.*

ВВЕДЕНИЕ

В схеме металлогенического районирования Ауэрбаховский вулканоплутонический пояс протягивается на 2000 км от Среднего до Полярного Урала [5]. Он локализован в восточном борту Тагильской мегазоны и сложен островодужными позднесилурийско-девонскими андезитовидными вулканогенно-осадочными, вулканогенными и комагматичными им интрузивными формациями, образующими единый рудно-формационный ряд.

Изученное нами золото-сульфидное оруденение в Ауэрбаховском поясе локализуется в вулканогенно-осадочных породах двух литолого-стратиграфических уровней – нижнем тамуньерском (S_2-D_1) и расположенном выше по разрезу воронцовском (D_1) [5]. На Северном Урале к этим горизонтам приурочены типовые месторождения – соответственно Тамуньерское и Воронцовское (рис. 1).

Золотопродуктивные вулканогенно-осадочные породы на Тамуньерском месторождении представлены горизонтами брекчий и туфобрекчий с преимущественно осадочной послойной вкрапленностью пирита (фрамбоидальный, конкреционный) и наложенной гидротермальной прожилково-вкрапленной полисульфидной минерализацией, сопряженной с процессом березитизации-лиственизации [1]. Из магматических образований здесь известны небольшие субвулканические

тела дацитовых порфиров и риолитов, ассоциирующих с брекчированными породами [5]. На месторождении выделены три стадии рудообразования. Среди рудных минералов в первую стадию образуется пирит и единичные зерна арсенопирита, для второй и третьей стадий характерно наличие пирита, сфалерита, галенита, блеклых руд, халькопирита, энаргита и золота, при этом во второй стадии преобладает пирит, а в третьей – сфалерит. Особенностью третьей стадии является наличие ртутистого золота. Завершают рудный процесс кварц-карбонатные прожилки с сульфидами и без сульфатов. Температурные границы формирования руд, определенные с помощью минералов-геотермометров, а также по газовой-жидким включениям, составляют 370–100°C.

Рудные тела на Воронцовском месторождении приурочены к горизонтам брекчированных туфогенных пород в верхних частях разреза и карбонатных брекчий с туфогенным цементом – в его нижних частях. Метасоматические изменения в туфогенных породах с рассеянной вкрапленностью пирита и арсенопирита представлены прожилитами (иногда с альбитом, серицитом), а в карбонатных брекчиях – кварц-серицитовыми метасоматитами [6]. Специфической чертой формирования руд Воронцовского месторождения явилось влияние теплового поля Ауэрбаховской полифазной габбро-диорит-гранитной интрузии и связанной с ней гидротер-

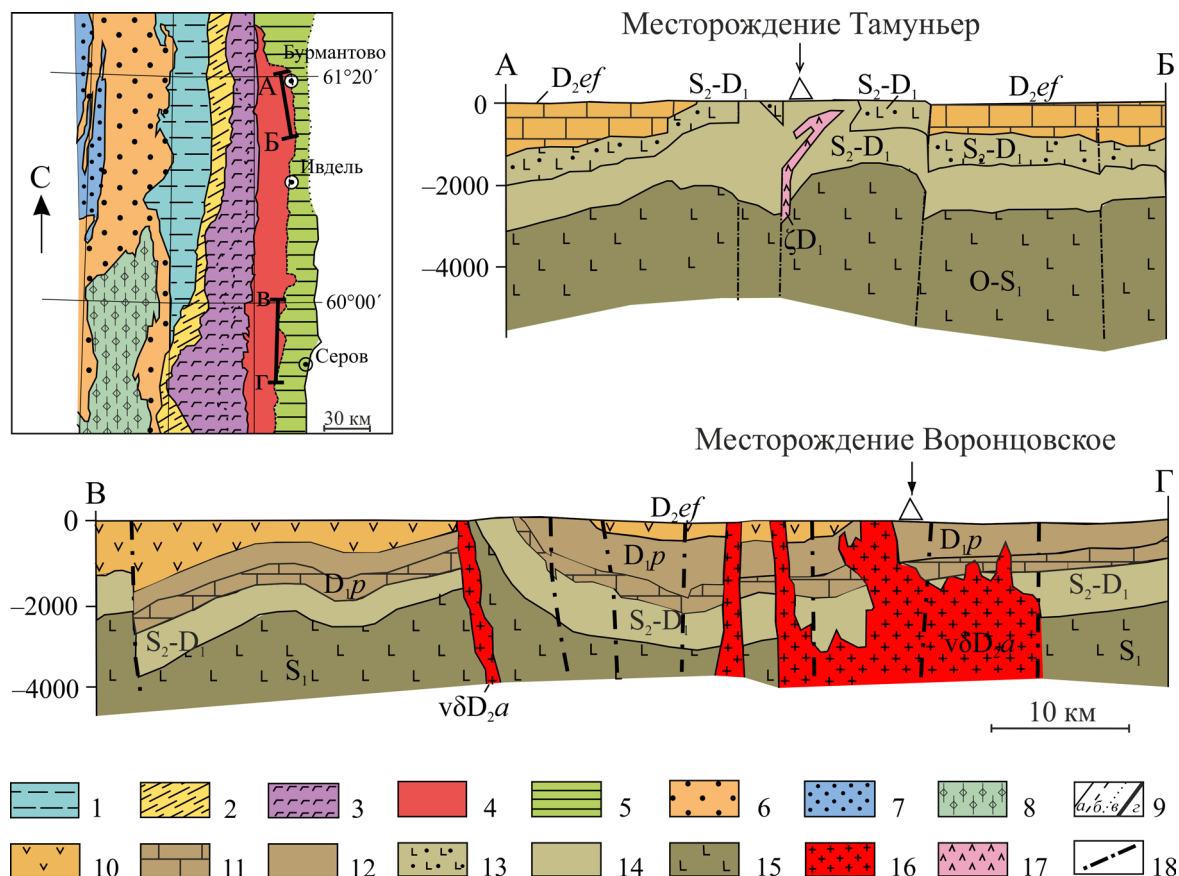


Рис. 1. Структурно-формационные зоны восточного района Северного Урала и геологические разрезы Котлийско-Тамуньерского (А–Б) и Воронцовского (Б–Г) рудных районов по [5].

Зоны на врезке: 1 – Ляпинская; 2 – Салатимская; 3 – Тагильская, южный сегмент Ультрабазитового пояса Урала; 4 – Ауэрбах-Краснотурьинская, южный сегмент Ауэрбаховского вулcano-плутонического пояса; 5 – структурно-вещественные комплексы Ауэрбаховского вулcano-плутонического пояса под чехлом мезозойско-кайнозойских отложений; 6 – Бельско-Елецкая зона, южный сегмент; 7 – комплексы чехла Восточно-Европейской платформы; 8 – Кваркушская зона, северная часть; 9 – границы: а – структурно-формационных зон; б – структурно-формационных подзон и блоков; в – Ауэрбаховского вулcano-плутонического пояса под чехлом мезозойско-кайнозойских отложений; г – зоны глубинных разломов. Стратифицированные формации на разрезах: 10 – туфогенно-вулканогенная и терригенно-туфогенно-вулканогенная базальт-андезитовая, D_{2ef} ; 11 – карбонатная (известняковая), D_{2ef} и рифогенная, D_{1p} ; 12 – туфогенно-карбонатно-кремнисто-терригенная Воронцовского рудоносного литолого-стратиграфического уровня, D_{1p} ; 13 – карбонатно-вулканогенная андезит-базальтовая, S_2-D_1 ; 14 – туфогенно-карбонатно-кремнисто-терригенная с субвулканическими телами риодацитов Тамуньерского литолого-стратиграфического уровня; 15 – вулканогенные комплексы основания Ауэрбаховского вулcano-плутонического пояса, $O-S_1$; интрузивные формации: 16 – габбро-диорит-гранитовая ауэрбаховского комплекса, $v\delta D_{2a}$, 17 – дацитовая (субвулканические тела), ζD_1 ; 18 – тектонические нарушения.

Fig. 1. The structural-formational zones of the Northern Urals eastern area and geological sections of the Kotliysk-Tamunier (A–B) and Vorontsovsk (B–G) ore areas according to [5].

The zones on the inset: 1 – Lyapin; 2 – Salatim; 3 – Tagil, southern segment of the Urals ultrabasic belt; 4 – Auerbach-Krasnoturyinsk, southern segment of the Auerbach volcano-plutonic belt; 5 – Auerbach structural-matter complexes under the cover of Mesozoic-Cenozoic deposits; 6 – southern segment of Belsk-Elets zone; 7 – the East-European platform cover complexes; 8 – northern part of Kvarukush zone; 9 – boundaries: a – of structural-formational zones, б – structural-formational subzones and blocks, в – the Auerbach volcano-plutonic belt under the cover of Mesozoic-Cenozoic deposits, г – zones of deep faults. Stratified formations on the sections: 10 – tuffaceous-volcanogenic and terrigenous-tuffaceous-volcanogenic basalt-andesite, D_{2ef} ; 11 – carbonate (calcareous), D_{2ef} and reefy, D_{1p} ; 12 – tuffaceous-carbonate-cherty-terrigenous of the Vorontsovsk ore-bearing litholog-stratigraphical level, D_{1p} ; 13 – carbonate-volcanogenic andesite-basalt, S_2-D_1 ; 14 – tufogene-carbonate-cherty-terrigenous with subvolcanic rhyodacite bodies of the Tamunier lithological-stratigraphical level; 15 – volcanogenic complexes of the Auerbach volcano-plutonic belt basement, $O-S_1$; intrusive formations: 16 – gabbro-diorite-granite of the Auerbach complex, $v\delta D_{2a}$, 17 – dacite (subvolcanic bodies), ζD_1 ; 18 – tectonic disturbances.

мальной деятельности. С тепловым воздействием интрузии на осадочные и вулканогенно-осадочные

породы связана генерация метаморфогенных рاسب-творов с вовлечением в них As, Sb, Hg, Tl и дру-

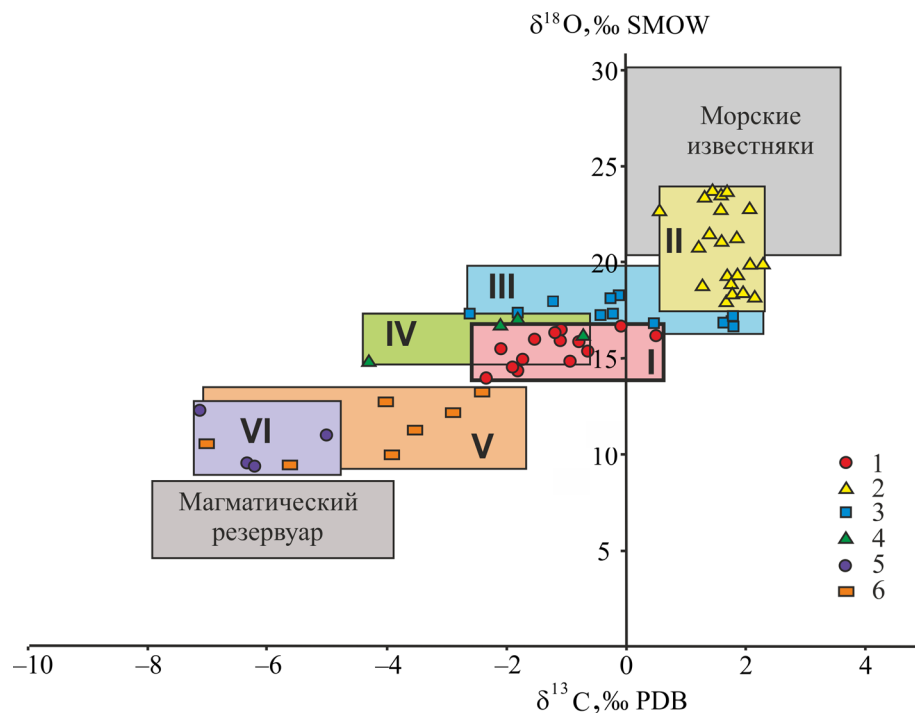


Рис. 2. Диаграмма соотношений изотопов углерода и кислорода в карбонатах Тамуньерского месторождения (поле I) и различных метасоматитов Ауэрбаховского рудного поля (поля II–V).

1 – рассеянный и прожилковый карбонат березитов Тамуньерского месторождения; 2 – карбонат из мраморизованных известняков; 3, 4 – карбонат рудоносных известковых брекчий (3) и джаспероидов (4) Воронцовского месторождения; 5 – карбонат скарновых Cu-Fe руд Воронцовского и Песчанского месторождений; 6 – карбонат кварцевых жил Песчанского золоторудного месторождения. На диаграмму нанесены также поля глобального магматического резервуара и карбоната морских известняков.

Fig. 2. A diagram of carbon and oxygen isotope correlation in carbonates of the Tamunier deposit (area I) and different metasomatites of the Auerbakh ore field (areas II–V).

1 – dispersed and streaky carbonate of the Tamunier deposit beresites; 2 – carbonate from marbled limestones; 3, 4 – carbonate of ore-bearing calcareous breccias (3) and jasperoids (4) of the Vorontsovsk deposit; 5 – carbonate of scarn Cu-Fe ores of the Vorontsovsk and Peschansk deposits; 6 – carbonate of quartz veins of the Peschansk gold-ore deposit. At the diagram also present the fields of a global magmatic reservoir and carbonate of marine limestones.

гих элементов и отложением при их разгрузке в проницаемых брекчированных известняках с реальгаровой и сульфосольной минерализацией. По минералого-геохимическим характеристикам такие руды близки к рудам карлинского типа [3]. С гидротермальной деятельностью Ауэрбаховской интрузии связано появление на площади месторождения других золотоносных образований – сульфидно-магнетитовых скарнов, окварцованных известняков (джаспероидов) и кварцевых жил с золото-полиметаллической сульфидной минерализацией.

Цель данного исследования заключается в выявлении основных резервуаров – источников вещества и рудоносного флюида при формировании золото-сульфидного оруденения в северном сегменте Ауэрбаховского вулcano-плутонического пояса на основе изотопного состава минералов, слагающих руды и метасоматиты. Помимо ранее опубликованных данных по изотопному составу минералов Воронцовского месторождения [3, 6]

нами использованы анализы изотопного состава кислорода, углерода и стронция карбонатов, кислорода кварца, а также серы пирита Тамуньерского месторождения. Эти анализы выполнены в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН по методикам, опубликованным в [2, 11]. Воспроизводимость определения (1σ) $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{34}\text{S}$ составляет 0.1‰, $\delta^{13}\text{C}$ – 0.05‰. Изотопный состав стронция измерен в ИГ КарНЦ РАН, аналитик Д.В. Елизаров. Для расчета изотопного состава компонентов флюида использовался **web-калькулятор фракционирования стабильных изотопов** между различными минералами, а также минералами и водой [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные нами данные по изотопному составу C, O и Sr карбоната на Воронцовском месторождении [3, 6] характеризуют карбонат вмещающего известняка, а также образованный в ходе все-

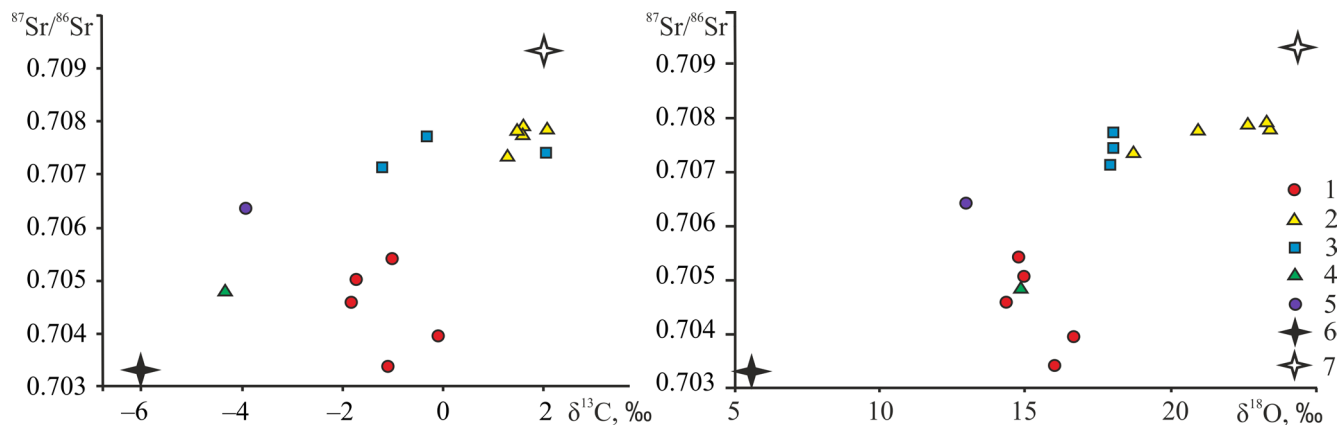


Рис. 3. Соотношения изотопного состава углерода, кислорода и стронция карбонатов Тамуньерского (1) и Воронцовского (2–5) месторождений.

1 – рассеянный и прожилковый карбонат березитов; 2 – известняк вмещающей толщи и обломков известковых брекчий, в том числе перекристаллизованный и мраморизованный; 3 – карбонат из цемента рудоносных известковых брекчий; 4 – карбонат джаспероидов; 5 – кальцит скарнов; 6 – репер глобального мантийного резервуара; 7 – репер морских известняков.

Fig. 3. Carbon, oxygen and strontium isotope correlations from carbonates of the Tamunier (1) and Vorontsovsk (2–5) deposits.

1 – dispersed and streaky carbonate of beresites; 2 – limestone of the host strata and calcareous breccia fragments, including the recrystallized and marbled one; 3 – carbonate from the cement of ore-bearing calcareous breccia; 4 – jasperoid carbonate; 5 – calcite from scarn; 6 – global mantle reservoir datum; 7 – marine limestones datum.

го периода формирования руд (рис. 2, 3). Интерпретация этих данных дает основания для ряда заключений: 1) изотопный состав известняка вмещающей карбонатной толщи соответствует породному резервуару морских карбонатов фанерозойского времени, укладываясь в диапазон $\delta^{13}\text{C} = 1.3\text{--}2.3\text{‰}$ PDB, $\delta^{18}\text{O} = 17.9\text{--}23.6\text{‰}$ SMOW; 2) процессы преобразования известняка (перекристаллизация, мраморизация, брекчирование) оказывают слабое влияние на изменения исходных изотопных характеристик карбоната, выражающееся лишь в некотором облегчении $\delta^{18}\text{O}$ по отношению к резервуару морских карбонатов (см. рис. 2, поле II); 3) в процессе формирования золоторудных парагенезисов образуется карбонат с последовательным облегчением изотопного состава углерода и кислорода в ряду: рудоносные известковые брекчии–джаспероиды–скарны–кварцевые жилы (см. рис. 2, поля III–VI). На рис. 3 показано, что изотопный состав стронция карбонатов также образует единый тренд от репера морского известняка к мантийному в той же последовательности рудообразующих процессов.

Изотопные характеристики карбонатов Тамуньерского месторождения варьируют в достаточно узком диапазоне: $\delta^{13}\text{C} = 0.5\text{--}2.4\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 14.0\text{--}16.7\text{‰}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70337\text{--}0.70501$ (табл. 1). На диаграмме $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$ поле их изотопного состава располагается на тренде, характеризующем карбонаты Ауэрбаховского рудного поля, совпадая с полем карбонатов из джаспероидов Воронцовского месторождения (см. рис. 2, поля I и IV).

Карбонаты из березитов Тамуньерского и джаспероидов Воронцовского месторождений также обладают наименее радиогенным изотопным составом стронция (см. рис. 3).

Изотопный состав серы магматических пород Ауэрбаховского массива и сульфидов скарновых руд близок к метеоритному стандарту – соответственно $\delta^{34}\text{S} = -2.9\text{--}2.7$ и $-1.2\text{--}0.2\text{‰}$ (рис. 4). Несколько более облегченные изотопные соотношения ($\delta^{34}\text{S} = -1.8\text{--}4.6\text{‰}$) характерны для пирита, арсенопирита и антимонита из измененных пород (пропилитизация, серицитизация, аргиллизация) вулканогенной части разреза Воронцовского месторождения. Пирит из вулканогенно-осадочного цемента известковых рудоносных брекчий этого месторождения содержит еще более облегченную серу ($\delta^{34}\text{S} = -0.4\text{--}7.8\text{‰}$), что свидетельствует об участии биогенной серы и подтверждается присутствием здесь реликтов тонкоглобулярного пирита. Сульфиды джаспероидных апоизвестняковых руд (пирит, сфалерит, халькопирит) несут изотопно утяжеленную серу ($\delta^{34}\text{S} = 1.6\text{--}4.5\text{‰}$), по-видимому, за счет вовлечения сульфатной серы растворяемых известняков. Утяжеленная сера зафиксирована также в образце сфалерита из кварцевой жилы в гранодиорите Ауэрбаховского массива.

Изотопный состав серы березитизированных вулканогенно-осадочных пород и руд Тамуньерского месторождения в целом соответствует изотопным характеристикам пирита из аналогичных пород Воронцовского месторождения. Дорудная генерация

Таблица 1. Изотопный состав карбоната и кварца и расчетный изотопный состав компонентов флюида Тамуньерского месторождения**Table 1.** Isotope composition of carbonate, quartz and the calculated isotope composition fluid of the Tamunier deposit

Минерал	Порода	Номер скв.-гл.	Изотопный состав минералов			Расчетный изотопный состав компонентов флюида, ‰			
			$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	T расч, °C	$\delta^{13}\text{C} (\text{CO}_2)$	$\delta^{18}\text{O} (\text{CO}_2)$	$\delta^{18}\text{O} (\text{H}_2\text{O})$
Карбонат	Березит	835-185.3	-1.8	14.4	0.70456 ± 18	300	0.2	23.2	8.6
		827-127.6	-1.1	15.8	—	300	0.9	24.6	10.0
		827-129.7	-1.2	16.3	—	300	0.8	25.1	10.5
	Кварц-карбонат-сульфидные прожилки	868-148.8	-0.8	15.9	—	250	0.5	25.3	8.4
		850-220.4	-1.7	15.0	0.70501 ± 16	250	-0.4	24.4	7.5
		833-262.2	-2.1	15.5	—	250	-0.8	24.9	8.0
	Кальцит-баритовые прожилки	827-127.3	-0.1	16.7	0.70396 ± 15	250	1.2	26.1	9.2
		827-129.7	-1.1	16.0	0.70337 ± 19	250	0.2	25.4	10.3
		834-299.7	0.5	16.2	—	250	1.8	25.6	8.7
	Кварц-карбонатные прожилки	811-25.7	-0.7	15.4	—	250	0.6	24.8	7.9
		827-128.5	-1.2	16.3	—	250	0.1	25.7	8.8
		857-65.7	-1.1	16.5	—	250	0.2	25.9	9.0
		833-168.0	-1.0	14.8	0.70538 ± 17	250	0.3	24.2	7.3
		833-265.4	-1.6	16.0	—	250	-0.3	25.4	10.3
		833-273.0	-2.4	14.0	—	250	-1.1	23.4	6.5
		835-185.3	-1.9	14.5	—	300	0.1	23.3	8.7
Кварц	Кварцевые прожилки	835-185.3	—	15.3	—	250	—	—	6.3
		831-189.5	—	17.2	—	200	—	—	5.6
		849-301.3	—	16.7	—	200	—	—	5.1

Примечание. Величины $\delta^{13}\text{C}$ даны в PDB (‰), значения $\delta^{18}\text{O}$ — в SMOW (‰). Для расчета $\delta^{13}\text{C} (\text{CO}_2)$ карбоната использовано изотопное равновесие кальцит- CO_2 (1000 ln $\alpha = -2.0\text{‰}$ для 300°C и -1.3‰ для 250°C [10]). Для расчета $\delta^{18}\text{O} (\text{CO}_2)$ использовано изотопное равновесие CO_2 -кальцит (1000 ln $\alpha = 8.8\text{‰}$ для 300°C и 9.4‰ для 250°C [13]). Для расчета $\delta^{18}\text{O} (\text{H}_2\text{O})$ использовано изотопное равновесие кальцит-вода (1000 ln $\alpha = 5.8\text{‰}$ для 300°C и 7.5‰ для 250°C [13]) и кварц-вода (1000 ln $\alpha = 9.0\text{‰}$ для 250°C, 11.6‰ для 200°C и 15.5‰ для 150°C [12]). Прочерки — не определялось.

Note. Value $\delta^{13}\text{C}$ are given in PDB (‰), value $\delta^{18}\text{O}$ in SMOW (‰). For calculated $\delta^{13}\text{C} (\text{CO}_2)$ of carbonate used isotopic equilibrium calcite- CO_2 (1000 ln $\alpha = -2.0\text{‰}$ for 300°C and -1.3‰ for 250°C [10]). For calculated $\delta^{18}\text{O} (\text{CO}_2)$ used isotopic equilibrium CO_2 -calcite (1000 ln $\alpha = 8.8\text{‰}$ for 300°C and 9.4‰ for 250°C [13]). For calculated $\delta^{18}\text{O} (\text{H}_2\text{O})$ used isotopic equilibrium calcite-water (1000 ln $\alpha = 5.8\text{‰}$ for 300°C and 7.5‰ for 250°C [13]) and quartz-water (1000 ln $\alpha = 9.0\text{‰}$ for 250°C, 11.6‰ for 200°C and 15.5‰ for 150°C [12]). Dash — not determined.

пирита, рассеянного в массе березита внешней зоны, имеет наиболее облегченный изотопный состав серы на месторождении $\delta^{34}\text{S} = -7.2\text{‰}$ (табл. 2). Преобладающий в березите и аргиллизите Тамуньерского месторождения прожилково-вкрапленный пирит I стадии непродуктивной колонки по 8 определениям характеризуется узким диапазоном $\delta^{34}\text{S}$ от -1.3 до -4.4‰ , совпадающим с изотопным составом серы сульфидов этого месторождения ($\delta^{34}\text{S} = -2...-5\text{‰}$ по 26 определениям), приведенным в [5]. Пирит II рудной стадии продуктивной колонки несет в целом более утяжеленную серу со значениями $\delta^{34}\text{S}$, варьирующими от -2.5 до 2.4‰ . Наконец, $\delta^{34}\text{S}$ пирита из поздних прожилков различного состава наиболее изменчиво: из кварц-карбонатного и кальцит-баритового прожилков он облегчен ($\delta^{34}\text{S} = -4.4$ и -7.5‰), а из пострудного кварцевого прожилка, напротив, сильно утяжелен ($\delta^{34}\text{S} = 12\text{‰}$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В более раннем нашем исследовании [4] было показано, что принадлежность метасоматитов Тамуньерского месторождения к березит-лиственитовой формации не позволяет отождествлять его с Воронцовским. Установлены также различия в составе рудных минералов в этих месторождениях, если для Тамуньерского месторождения характерна золото-пирит-полиметаллическая ассоциация, то на Воронцовском в основной массе руд распространены тонко рассеянные пирит, арсенопирит, сульфиды As, Sb, Hg и Tl. В то же время приведенные выше данные об изотопном составе минералов этих месторождений, а также результаты рудно-формационного анализа Ауэрбаховского вулканоплутонического пояса [5] показывают, что, несмотря на указанные различия,

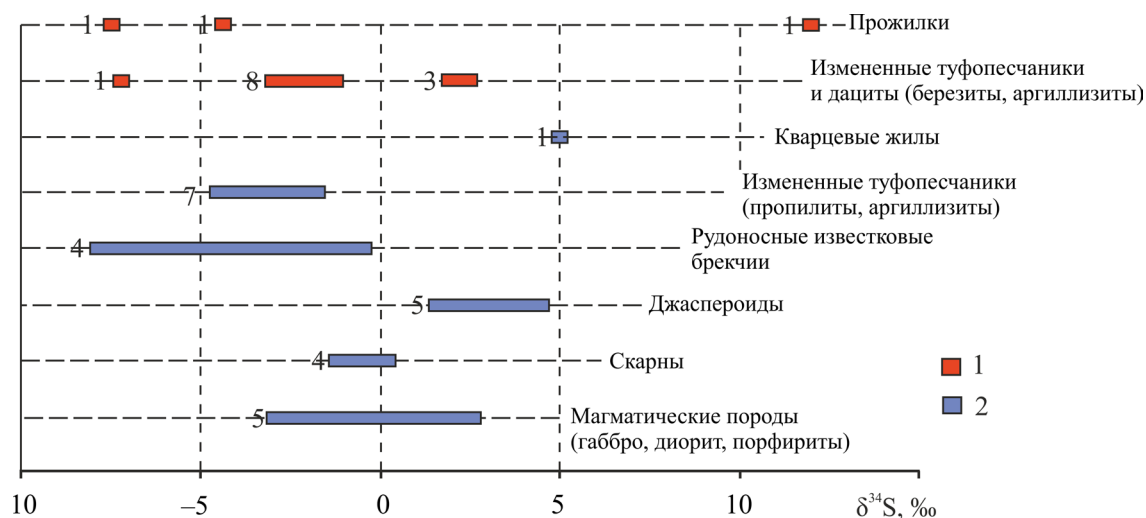


Рис. 4. Изотопный состав серы сульфидов из различных рудно-метасоматических образований Тамуньерского (1) и Воронцовского (2) месторождений.

Цифрами показано количество анализов.

Fig.4. Isotope composition of sulfide sulfur from different ore-metasomatic formations of the Tamunier (1) and Vrontsovsk (2) deposits.

The numbers show the amount of tests.

а также приуроченность Воронцовского и Тамуньерского месторождений к различным литолого-стратиграфическим уровням, эти месторождения имеют ряд сходных генетических черт. К ним относятся существенная роль в образовании оруденения ранних вулканогенных гидротермально-осадочных процессов (S_2 - D_1), а также масштабная трансформация ранних отложений под воздействием девонских интрузий гранитоидов. На тамуньерском уровне к золотопродуктивным интрузиям отнесены субвулканические тела дацитовых порфиритов и риолитов D_1 [5], а на воронцовском уровне – плутонические Верхнелобвинский гранодиоритовый (D_2ef_1) и Ауэрбаховский габбро-диорит-гранитовый (D_2ef_2) комплексы [7, 8].

Сочетание последовательно проявленных золотоконцентрирующих гидротермальных процессов вулканогенно-осадочного и магматогенного, а на Воронцовском месторождении и метаморфогенного этапов рудообразования находят свое отражение в значительных вариациях изотопного состава минералов метасоматитов и руд. Наиболее полно вариации изотопного состава минералов проявлены в карбонатах Воронцовского месторождения (см. рис. 2, 3), для которых фиксируется последовательное облегчение изотопного состава C, O и Sr в ряду рудоносные известковые брекчии–джаспероиды–скарны–кварцевые жилы. Карбонат Тамуньерского месторождения по своим изотопным характеристикам наиболее близок к карбонату золотоносных джаспероидов Воронцовского месторождения. Рудоносные березиты и джаспероиды этих место-

рождений сходны по минералогическим признакам – высокому содержанию в рудах сульфидов Zn, Pb, Cu и гнездовому характеру их выделений, высоким содержаниям серебра в рудах ($Ag/Au \gg 1$) и присутствию в них собственных минералов серебра (Ag-содержание блеклые руды, гессит), наличию арсенопирита и нескольких генераций самородного золота в широком диапазоне пробности (от 940 до менее 500).

Приведенные выше данные свидетельствуют о существенной роли осадочных и вулканогенно-осадочных пород, прежде всего известняков, как поставщика углерода, кислорода стронция и серы при формировании золотого оруденения как воронцовского, так и тамуньерского литолого-стратиграфических уровней. В частности, рассчитанный нами для Тамуньерского месторождения изотопный состав углерода и кислорода углекислоты флюида в равновесии с карбонатом, составивший $\delta^{13}C_{CO_2} = -1.1 \dots -1.8\text{‰}$ и $\delta^{18}O_{CO_2} = 23.2 \dots 26.1\text{‰}$ (табл. 3), в полной мере соответствует изотопному составу известняков морского происхождения ($\delta^{13}C = 0 \dots 5\text{‰}$ и $\delta^{18}O = 20 \dots 30\text{‰}$). Аналогичные расчеты изотопного состава кислорода воды в равновесии с карбонатом и кварцем $\delta^{18}O_{H_2O} = 5.1 \dots 10.5\text{‰}$, напротив, сходны с составом воды глубинного магматического резервуара ($\delta^{18}O = 6 \dots 10\text{‰}$). Значения изотопного соотношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ карбонатов Тамуньерского месторождения также близки к источнику глубинного происхождения, однако вклад коровой составляющей (тех же морских известняков) достаточно весом.

Таблица 2. Изотопный состав серы пирита и барита Тамуньерского месторождения и расчетного $\delta^{34}\text{S}$ флюида Тамуньерского месторождения**Table 2.** Sulfur isotope composition of pyrite, barite and the calculated $\delta^{34}\text{S}$ fluid of the Tamunier deposit

Колонка	Порода	Номер скв.-гл.	$\delta^{34}\text{S}$, ‰ CDT	$\delta^{34}\text{S}$, флюида (H_2S)
Непродуктивная (пирит I стадии)	Березит внешней зоны	834-249.9	2.4	0.9
		849-171.7	-2.3	-3.8
		813-111.8	-7.2	-8.7
Продуктивная (пирит II стадии)	Березит промежуточной зоны	833-139.5	-1.8	-3.3
		832-132.5	2	0.5
	Березит центральной зоны	811-25.7	1.9	0.4
		833-217.6	-1.3	-2.8
		821-152.3	-1.9	-3.4
		831-227.6	-2.5	-4
Непродуктивная	Аргиллизит	825-166.7	-2.6	-4.1
		828-55.5	-2.8	-4.3
		828-90.3	-3	-4.5
		867-130.3	12	10.5
	Кварцевый прожилок	868-148.8	-4.4	-5.9
	Карбонатный прожилок	834-299.7	-7.5	-9
	Баритовый прожилок (пирит)	834-299.8	16.2	-9
	Баритовый прожилок (барит)			

Примечание. Для расчета $\delta^{34}\text{S}$ (H_2S) пирита использовано изотопное равновесие пирит- H_2S ($1000 \ln \alpha = 1.5\text{‰}$ для 250°C [10]). Для расчета $\delta^{34}\text{S}$ (H_2S) барита использовано изотопное равновесие барит- H_2S ($1000 \ln \alpha = 25.2\text{‰}$ для 250°C [10]).

Note. For calculated $\delta^{34}\text{S}$ (H_2S) of pyrite used isotopic equilibrium pyrite- H_2S ($1000 \ln \alpha = 1.5\text{‰}$ for 250°C [10]). For calculated $\delta^{34}\text{S}$ (H_2S) of barite used isotopic equilibrium barite H_2S ($1000 \ln \alpha = 25.2\text{‰}$ for 250°C [10]).

Изотопный состав серы ранней генерации пирита Тамуньерского месторождения близок к сере глубинного происхождения, немного отклоняясь от нее в отрицательную область, по-видимому, за счет вовлечения биогенной осадочной серы, заключенной в породах в виде пирита глобулярного строения. По мере развития золотопродуктивного березитизирующего процесса роль осадочной облегченной серы снижается вследствие продолжающегося подтока глубинного сероводорода, а глубинной – увеличивается. Расчетный изотопный состав сероводорода флюида продуктивной II стадии, по [10], в равновесии при 250°C с пиритом ($\delta^{34}\text{S}_{\text{пирит}} = 1.9\text{--}2.4\text{‰}$) составляет $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} 0.4\text{--}0.9\text{‰}$, что наиболее приближено к изотопному составу серы глубинного происхождения. Отложение пирита заключительной генерации в прожилках происходило при окислении глубинного сероводорода до серы в сульфатной форме, о чем свидетельствует появление в прожилках барита и целестина. Фракционирование серы между отлагающимися сульфатными и сульфидными минералами ведет к образованию сульфатов с тяжелой серой ($\delta^{34}\text{S}_{\text{барит}} = 16.2\text{‰}$) и пирита – с облегченной ($\delta^{34}\text{S}_{\text{пирит}} = -7.5\text{‰}$) ‰. Этот процесс имел место при температуре около 250°C , определенной по изотопному пирит-баритовому геотермометру. Утяжеленный изотопный состав серы сульфидов, превышающий нулевую метку глубинной серы, в том числе серы в пирите кварцевого прожилка ($\delta^{34}\text{S} = 12\text{‰}$), обусловлен, вероятно, как и в пирите джаспероидов Воронцовского месторождения, смешением глубинной и сульфатной серы вмещающих вулканогенно-осадочных пород.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Полученные нами данные по изотопному составу минералов метасоматитов и руд Воронцовского и Тамуньерского золото-сульфидных месторождений, локализованных на различных литолого-стратиграфических уровнях Ауэрбаховского вулканоплутонического пояса, свидетельствуют об участии в рудообразовании двух основных резервуаров вещества – породного (морские карбонаты и биогенный пирит вмещающих вулканогенно-осадочных толщ) и флюидного (металлоносные магматогенные, а также метаморфогенные флюиды, связанные внедрением интрузивных масс).

2. Золотое оруденение на воронцовском уровне по отношению к таковому на тамуньерском уровне значительно более разнообразно в рудно-формационном плане (золотосодержащее Fe-Cu-скарновое, золото-сульфиднокварцевое жильное, золото-сульфидное в джаспероидах, известковых брекчиях и вулканогенно-осадочной толще), что связано с большим объемом внедрившихся интрузивных масс. По изотопным характеристикам наиболее близким аналогом золото-сульфидного оруденения Тамуньерского месторождения является золото-полиметаллическое оруденение в джаспероидах Воронцовского месторождения.

3. Участие вещества вулканогенно-осадочных пород при формировании руд изученных месторождений, которое нашло свое отражение в выявленных вариациях изотопного состава O, C, Sr и S минералов метасоматитов и руд, дает основа-

ние для дальнейшей разработки вопроса о роли вулканогенно-осадочного рудообразования в концентрировании золота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Замятина Д.А., Мурзин В.В., Молошаг В.П., Варламов Д.А., Замятин Д.А., Ким Л.П., Горева А.А., Викентьев И.В. (2014) Минералогия, геохимия и физико-химические условия формирования Тамуньерского золоторудного месторождения, Северный Урал. *Литосфера*. (6). 102–117.
2. Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А. (2004) Лазерная методика выделения воды из ОН-минералов для измерения изотопного состава водорода. *XVII симпозиум по геохимии изотопов*. М.: ГЕОХИ РАН, 98.
3. Мурзин В.В., Сазонов В.Н., Ронкин Ю.Л. (2010) Модель формирования Воронцовского золоторудного месторождения на Урале (карлинский тип): новые данные и проблемы. *Литосфера*. (6). 66–73.
4. Нохрина Д.А., Мурзин В.В., Молошаг В.П., Егоров С.А. (2010) Вещественный состав метасоматитов и руд Тамуньерского месторождения (Северный Урал). *Ежегодник-2009. Тр. ИГГ УрО РАН*. Вып. 157, 234–236.
5. Ожерельева А.В., Арифюлов Ч.Х., Арсентьева И.В. (2014) Золотоносность Ауэрбаховского вулканоплутонического пояса (Северный, Приполярный, Полярный Урал). *Отчет. геология*. (2). 4–19.
6. Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Григорьев Н.А. (1998) Воронцовское золоторудное месторождение – пример минерализации карлинского типа на Урале, Россия. *Геология рудн. месторождений*. **40**(2). 157–170.
7. Смирнов В.Н., Мурзин В.В., Язева Р.Г. (1996) О корреляции девонского магматизма и рудных формаций восточной части Тагильской и Петрокаменско-Верхотурской зон на Среднем Урале. *Ежегодник-1995*. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 106–107.
8. Язева Р.Г., Бочкарев В.В. (1993) Постколлизийный девонский магматизм Северного Урала. *Геотектоника*. (4), 56–65.
9. Beaudoin G., Therrien P. (2009) The updated web stable isotope fractionation calculator. *Handbook of stable isotope analytical techniques. II*. Elsevier. 112–1122.
10. Ohmoto H., Rye R.O. (1979) Isotope of sulfur and carbon. *Geochemistry of Hydrothermal deposits* (Ed. H.L. Barnes). John Wiley and Sons, 509–567.
11. Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Gorbarenko S.A. (2009) Carbon and oxygen isotope microanalysis of carbonate. *Rapid communications in mass spectrometry*. **23**. 2391–2397.
12. Zheng Y.F. (1993) Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **57**, 1079–1091.
13. Zheng Y.F. (1999) Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochem. J.* **33**. 109–126.

Substance and fluid sources in gold sulfide mineralization of the Auerbakh volcanic-plutonic belt in the Northern Urals

D. A. Zamyatina, V. V. Murzin

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

The data on C, O, Sr and S isotope composition of the carbonates, quartz and sulfides from the Tamunier and Vorontsovsk gold-ore deposits, localized in the Auerbakh volcano-plutonic belt are cited. It is established that on mineral isotope characteristics the nearest analogue of mineralization in beresites of the Tamunier deposit is the gold-polymetallic mineralization in jasperoids of the Vorontsovsk deposit. Calculation of the C, O and S isotope composition of the ore-bearing fluid testifies to a participation in ore-formation of two main substance reservoirs – the rock (sea carbonates and biogenic pyrite of host volcanogenic-sedimented series) and the fluid one (metalliferous magmatogene, as well as metamorphogenic fluids connected by the intrusive mass injection).

Key words: *isotope geochemistry, ore formation, gold-sulfide deposits, sources of ore substance.*

REFERENCES

1. Zamyatina D.A., Murzin V.V., Moloshag V.P., Varlamov D.A., Zamyatin D.A., Kim L.P., Goreva A.A., Vikent'ev I.V. (2014) Mineralogija, geohimija i fiziko-khimicheskie uslovija formirovanija Tamun'erskogo zolotorudnogo mestorozhdenija, Severnyj Ural [Mineralogy, geochemistry and physico-chemical conditions of formation Tamunier gold deposit, Northern Urals]. *Litosfera*. (6). 102–117. (in Russian)
2. Ignat'ev A.V., Veliveckaja T.A. (2004) Lazernaja metodika vydelenija vody iz ON-mineralov dlja izmerenija izotopnogo sostava vodoroda [Laser technique of separation of water from OH minerals to measure the isotopic composition of hydrogen]. *XVII simpozium po geohimii izotopov*. Moscow: GEOHI RAN. 98. (in Russian)
3. Murzin V.V., Sazonov V.N., Ronkin Ju.L. (2010) Model' formirovanija Vorontsovskogo zolotorudnogo mestorozhdenija na Urale (karlinskij tip): novye dannye

- i problemy [Model formation Vorontsov gold deposit in the Urals (Carlin type): new data and problems]. *Litosfera*. (6). 66-73. (in Russian)
4. Nohrina D.A., Murzin V.V., Moloshag V.P., Egorov S.A. (2010) Veshchestvennyj sostav metasomatitov i rud Tamun'erskogo mestorozhdenija (Severnyj Ural) [The material composition of the metasomatic rocks and ores Tamunier deposit (The Northern Urals)]. *Ezhegodnik-2009. Tr. IGG UrO RAN. Vyp. 157*, 234-236. (in Russian)
 5. Ozherel'eva A.V., Arifulov Ch.H., Arsent'eva I.V. (2014) Zolotonosnost' Auerbahovskogo vulkanoplutonicheskogo pojasa (Severnyj, Pripoljarnyj, Poljarnyj Ural) [Gold mineralization Auerbakh volcano-plutonic belt (North, Pre-Polar, Polar Urals)]. *Otechestvennaja geologija*. (2). 4-19. (in Russian)
 6. Sazonov V.N., Murzin V.V., Grigor'ev N.A. (1998) Vorontsovskoe zolotorudnoe mestorozhdenie – primer mineralizacii karlinskogo tipa na Urale, Rossiya [Vorontsov gold deposit – an example of Carlin-type mineralization in the Urals, Russia]. *Geologija rudnykh mestorozhdenij*. **40**(2). 157-170. (in Russian)
 7. Smirnov V.N., Murzin V.V., Jazeva R.G. (1996) O korelljacii devonskogo magmatizma i rudnykh formatsij vostochnoj chasti Tagil'skoj i Petrokamensko-Verhoturskoj zon na Srednem Urale [On correlation Devonian magmatism and ore formations of the eastern part of the Tagil and Petrokamensk-Verkhoturuskaja zones in the Middle Urals]. *Ezhegodnik-1995*. Ekaterinburg: IGG UrO RAN, 106–107. (in Russian)
 8. Jazeva R.G., Bochkarev V.V. (1993) Postkollizionnyj devonskij magmatizm Severnogo Urala. *Geotektonika*. (4), 56-65. (in Russian)
 9. Beaudoin G., Therrien P. (2009) The updated web stable isotope fractionation calculator. *Handbook of stable isotope analytical techniques. II*. Elsevier. 112-1122.
 10. Ohmoto H., Rye R.O. (1979) Isotope of sulfur and carbon. *Geochemistry of Hydrothermal deposits* (Ed. H.L. Barnes). John Wiley and Sons, 509-567.
 11. Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Gorbarenko S.A. (2009) Carbon and oxygen isotope microanalysis of carbonate. *Rapid communications in mass spectrometry*. **23**. 2391-2397.
 12. Zheng Y.F. (1993) Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **57**, 1079-1091.
 13. Zheng Y.F. (1999) Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochem. J.* **33**. 109-126.