

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
SHORT COMMUNICATIONS**

УДК 553.21/24(470.5)

**ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
АРКАИМСКОГО ПАЛЕОВУЛКАНА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

Н.Н. Анкушева

Институт минералогии УрО РАН

456317, Челябинская обл., г. Миасс

E-mail: ankusheva@ilmeny.ac.ru

Поступила в редакцию 3 июля 2008 г.

Изучены условия формирования гидротермальной системы, приуроченной к раннекаменноугольному трахибазальт-трахириолитовому Аркаимскому палеовулкану и связанной с дайками микрограносиенитов и диабазов. Исследованная система перспективна на барит-полиметаллическое и золотое оруденение. Охарактеризована минералогия гидротермальной системы, изучены флюидные включения в барите и кварце, их солевой, газовый состав, проведен сравнительный анализ с другими формационными типами месторождений в вулканогенных комплексах. Установлено, что Аркаимская гидротермальная система формировалась при участии хлоридно-калиево-натриевых флюидов с температурами 150-350°C и повышенной соленостью 9-19 мас. % NaCl-экв., что свидетельствует об их магматогенном источнике. По этим параметрам система аналогична таковой в золото-кварцевых месторождениях Восточно-Уральской зоны.

Ключевые слова: *палеовулкан, гидротермальная система, барит, галенит, золото, флюидные включения.*

**FLUID FORMING CONDITIONS OF ARKAIM PALEOVOLCANO
HYDROTHERMAL SYSTEM (SOUTH URALS)**

N.N. Ankusheva

Institute of Mineralogy, Urals Branch of RAS

The results of forming conditions of hydrothermal system associated with microgranosyenite and diabase dykes in Early Carboniferous trachibasalt-trachirhiolite Arkaim volcano are represented in the paper. This system is characterized by barite-gold-polymetallic mineralization. The purpose of this work is to establish physic-chemical forming conditions of Arkaim paleovolcano hydrothermal system. The mineralogical composition of this system, salt and gas fluid composition was studied. The comparison with different deposit types in volcanogenic complexes was carried out too. It was established that Arkaim hydrothermal system formed by NaCl-KCl-fluids with temperatures of 150-350°C and high salinity from 9 to 19 wt. %. It testifies to magmatic fluid source. In the author opinion the Arkaim paleovolcano hydrothermal system is close to the gold-quartz deposits of East-Uralian zone.

Key words: *paleovolcano, hydrothermal system, barite, galena, gold, fluid inclusions.*

В последние годы в каменноугольных вулканических породах Аркаимского палеовулкана (Южный Урал) обнаружены рудопроявления, которые являются перспективными на полиметаллы и золото и в то же время слабоизученными, поэтому назрела необходимость изучения физико-химических особенностей – тем-

пературного режима и солевого состава – гидротермальных систем, с которыми связаны эти рудопроявления. При этом большое значение имеют термобарогеохимические исследования, позволяющие определить параметры гидротермальных систем на различных уровнях вулканических комплексов и сопоставить их с уста-

новленными ранее для других типов месторождений в вулканогенных комплексах.

В работе использованы следующие методы изучения минерального вещества: микрометрический, включающий криометрию и гомогенизацию индивидуальных флюидных включений, рентгенофлуоресцентный, рентгеновский, электронно-микроскопический, силикатный и газово-хроматографический.

Микротермометрические исследования барита проводились в микрокриотермокамере конструкции В.А. Симонова [1993] на геологическом факультете ЮУрГУ (Миасс). Для исследований использовались двухфазные включения размером 5-30 мкм, состоящие из водного раствора и газового пузырька. Солевой состав гидротермальных растворов во включениях оценивался по температуре эвтектики [Борисенко, 1977]. Температуры гомогенизации фиксировались в момент исчезновения газового пузырька при нагревании препарата в термокамере. Они приняты за минимальные температуры процесса минералообразования [Ермаков, Долгов, 1979; Реддер, 1987]. Концентрации солей в растворах рассчитывались по температурам плавления последних кристаллических фаз [Борисенко, 1977; Реддер, 1987].

Рентгенофлуоресцентный анализ применялся для определения элементов-примесей в барите и производился на приборе РФА-ВЭПП-3 (Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск). Рентгеновский анализ проводился методами дифрактометрии (ДРОН-2.0, аналитик П.В. Хворов, ИМин УрО РАН) и Дебая-Шерера (УРС-2.0, аналитик Е.Д. Зенович, ИМин УрО РАН). Химический состав минералов изучался на растровом электронном микроскопе с энергодисперсионным микроанализатором РЭММА-202МВ (аналитик В.А. Котляров, ИМин УрО РАН). Валовый химический анализ пород выполнялся классическим химическим методом (Южно-Уральский центр коллективного пользования по исследованию минерального сырья ИМин УрО РАН, аттестат № РОСС RU.0001.514536). Газово-хроматографический анализ выполнен на хроматографе серии «Цвет-100» с пиролизической приставкой П-75 (аналитик О.Ф. Миронова, Институт геохимии и аналитической химии, Москва).

Аркаимский палеовулкан расположен в Восточно-Магнитогорской металлогенической зоне (Южный Урал) и сложен трахибазальтами и трахириолитами греховской свиты (C_1gr_1)

[Зайков, 1999]. По геологической позиции комплекс отвечает обстановке рифтинга при коллизии девонская островная дуга-континент [Бочкарев, Язева, 2000]. Палеовулканическое сооружение геоморфологически выражено тремя возвышенностями, которые разделяются логами и речной долиной. Мощность разреза постройки составляет 800 м. Магмоподводящие каналы зафиксированы в виде даек микрограносиенитов и диабазов [Юминов и др., 2007].

Изучение петрохимических особенностей вулканических пород показало, что породы основания комплекса по содержанию щелочей относятся к субщелочной серии (трахибазальты, трахиандезиты, трахидациты, и трахириолиты). Суммарная щелочность пород колеблется от 5,5 до 6,6 %. По значениям отношения Na_2O/K_2O породы принадлежат к калиево-натриевой серии для основных пород ($Na_2O/K_2O = 1,1-3,7$) и калиевой серии для кислых пород ($Na_2O/K_2O = 0,39-0,84$). Используя эталонные значения коэффициентов глиноземистости магматических пород ($Al = Al_2O_3/MgO + FeO + Fe_2O_3$), выяснено, что породы основания комплекса относятся к высокоглиноземистым разностям (коэффициент глиноземистости $Al = 1,33-1,90$, эталонные значения $Al = 1-2$), а породы кровли – к умеренно- и низкоглиноземистым ($Al = 0,18-1,02$ при эталонных значениях $Al = 0,75-1$ для умеренноглиноземистых пород и $Al < 0,75$ для низкоглиноземистых).

Из рассмотренных выше петрохимических особенностей пород вулканического сооружения можно сделать вывод, что породы основания относятся к слабо дифференцированной калиево-натриевой и натриевой субщелочной базальт-трахибазальтовой ассоциации, а породы кровли – к калиево-натриевой трахибазальт-трахириолитовой ассоциации [Классификация..., 1997].

Гидротермальная система в основании разреза вулканитов представлена сульфидно-кварцевыми, а в верхней части – галенит-баритовыми жилами. Сульфидно-кварцевые жилы развиты в трахириолитовых лавах и дайках близкого состава по всему разрезу палеовулканической постройки на протяжении 800 м. Они имеют мощность 1-5 см, залегают кулисообразно и составляют малую часть палеовулканического сооружения. Барит слагает жилы и прожилки в диабазах и вулканитах, а также, совместно с кальцитом, – миндалины в бомбах и лавах. Выделяются три зоны минерализации; для

Сравнительная характеристика разновидностей барита

Признаки	Разновидность	
	Белый	Розовый
Положение в сульфидно-баритовой жиле	Является преобладающим, также образует гнезда и прожилки в зоне баритизации, выполняет миндалины в вулканогенных породах	Слагает северо-западную часть жилы
Цвет	Белый, иногда прозрачный, с сероватым оттенком	Розовый различной степени насыщенности, иногда с желтоватым оттенком
Формы выделения	Волокнистые, параллельно-шестоватые агрегаты, пластинчатые кристаллы, плотные кристаллически-зернистые массы	Радиально-лучистые, сноповидные, метельчатые агрегаты, кристаллы столбчатого облика
Сульфиды	Редкие мелкие гнезда и вкрапления галенита	Обильная вкрапленность галенита в виде крупных гнезд и скоплений, пирит, халькопирит
Минералы-включения	Аурихальцит, биотит, рутил, кальцит, микроклин, альбит, кварц, галенит	Гиалофан (BaO – 8,77 %), галенит, пирит, халькопирит
Содержание элементов-примесей (г/т)		
Sr	до 7500	до 2350
Pb	12–126	232–500
Cu	до 188	до 40
Zn	до 1685	до 489
Параметры элементарной ячейки, X	$a_0 = 7,140(7)$ - $7,149(7)$ $b_0 = 8,849(2)$ - $8,858(8)$ $c_0 = 5,449(6)$ - $5,457(6)$ $V_0 = 345(1)$	$a_0 = 7,158(9)$ - $7,162(7)$ $b_0 = 8,876(8)$ - $8,893(8)$ $c_0 = 5,453(5)$ - $5,458(6)$ $V_0 = 347(1)$

восточной и западной зон палеовулкана свойственны прожилки барита мощностью до 5 см, а в центральной – залегает крупная галенит-баритовая жила с ореолом баритизации.

Сульфидно-кварцевые жилы установлены также в дайке микрограносиенитов мощностью 1-3 м и вмещающих трахириолитах. Дайка имеет субмеридиональное простирание, субвертикальное падение и сопровождается роговиками. Микрограносиениты представлены массивными породами светло-серого цвета со слабым зеленоватым оттенком. В основной массе породы установлены кварц, плагиоклаз, серицит, амфибол. Повышенный интерес к этим породам вызвало наличие в них редкоземельной минерализации, приуроченной к псевдоморфозам лимонита по пириту. Псевдоморфозы образуются по кубическим и уплощенным кристаллам пирита, а также их разнообразным сросткам. На отдельных гранях сохранилась характерная для пирита параллельная штриховка. В псевдоморфозах выделены четыре вида структур: пятнисто-пористая, колло-

морфно-крустификационная, друзовидно-крустификационная, каемчатая [Анкушев, 2008]. В составе псевдоморфоз зафиксированы гетит, лепидокрокит, маггемит, сульфиды (халькопирит, пирит), альбит и калиевый полевошпат, ильменит, зерна хорошо ограненных кристаллов апатита, гематита и рутила.

Редкоземельная минерализация представлена монацитом и ксенотимом. Монацит встречается в виде удлиненных зерен размером 10-30 мкм и изометричных выделений по периферии гетитовых псевдоморфоз. Помимо Се, в составе монацита установлены La, Nd, Pr, Sm и Gd. Ксенотим встречается в виде мелких изометричных зерен совместно с монацитом. Кроме Y, в нем установлены Dy, Er, Yb, Ho, Tb, Sm и Eu [Юминов и др., 2007].

Самородное золото обнаружено в шлиховых пробах из россыпи на изученной площади, в которых оно ассоциирует с псевдоморфозами лимонита по пириту. Золотины имеют разную степень окатанности: слабую, среднюю и хорошую. В состав золотин, по данным мик-

Параметры гидротермальных растворов колчеданосных гидротермальных систем
и золото-кварцевых месторождений

Месторождение, минерал	Соленость (мас. %, NaCl-экв.), состав	Температура гомогенизации, °C	Источник
Палеогидротермальная система Аркаимская			
Кварцевые жилы: в трахириолитах, в микрограносиенитах дайки Барит в диабазах дайки	9-13, NaCl-KCl 14-19, NaCl-KCl 17-18, NaCl	270-330 270-310 155-180	Данные автора
Золото-кварцевые месторождения			
Березовское (кварц) Кочкарское (кварц)	8,4-17,0, NaCl-MgCl ₂ 7,7-15,7, NaCl-MgCl ₂	300-390 180-370	[Бакшеев и др., 1998] [Прокофьев, Спиридонов, 2005]
Медноколчеданные месторождения			
Балта-Тау (барит)	3,2-4,7, NaCl	140-170	[Boyce et al., 2003]
Современные сульфидные постройки			
Венский лес (барит) Франклин (барит)	6,6, NaCl-KCl 2,7-6,9, NaCl-KCl	216-235 203-316 (270-350)*	[Бортников и др., 2004]

Примечание. * – результаты прямых измерений.

розового анализа, входит Ag (0-10 %), и Cu (до 0,5 %). Пробность золота колеблется в пределах 900-990. Распределение серебра неравномерное: для окатанных форм характерна тонкая высокопробная кайма, практически полностью лишенная примесей, что свойственно золоту из зрелых россыпей. Наличие в россыпи слабо- и среднеокатанных форм, может свидетельствовать о близости коренного источника золота.

Галенит-баритовая жила прослеживается вкрест простираения пачки агломератовых туфов кровли палеовулкана на 25 м, приурочена к дайке диабазов и имеет мощность 10-40 см. На контакте жилы с вмещающими породами наблюдаются брекчии диабазов, сцементированные баритом, и баритизированные породы. Зона баритизации прослеживается в южном направлении на 40 м при мощности 5-10 м. Экзоконтактовые метасоматиты состоят из кварца, кальцита, барита и плагиоклаза, иногда с мелкими кристаллами галенита и пирита.

Основной объем жилы сложен баритом, при этом крупнопластинчатые агрегаты барита расположены в ее центральной части. В западном контакте жилы фиксируется кальцит. Он образует пластинчатые выделения и зернистые массы. Между кальцитом и баритом наблюдаются индукционные поверхности совместного роста. К восточному контакту и осевой части жилы приурочена сульфидная минерализация. В жиле выделены две разновидности

барита: белый и розовый (табл. 1). Контакт между этими разновидностями постепенный, обозначенный максимальными скоплениями галенита. Уменьшение параметров элементарной ячейки в белом барите связано с замещением части Ba^{2+} катионами Sr^{2+} . Галенит приурочен как к белому, так и к розовому бариту и образует гнезда размером до 15 см. Между галенитом и баритом также наблюдаются индукционные поверхности совместного роста. Мелкие выделения галенита ассоциируют с кристаллами пирита; наблюдаются также графические сростания галенита с пиритом и халькопиритом.

Для определения условий образования были изучены флюидные включения в кварце из жил в микрограносиенитах и трахириолитах основания системы, а также в кварце и барите из жил в дайках диабазов. Результаты исследования флюидных включений представлены в табл. 2.

В жилах из трахириолитов изучены двухфазные флюидные включения с газовыми пузырьками, составляющими 20-50 % объема включения. Согласно полученным температурам эвтектики и плавления льда, равным $-23,0...-23,9$ и $-11,7...-5,9^{\circ}C$ соответственно, в составе гидротермальных растворов преобладают хлориды K и Na в концентрациях 9-13 мас. %. Температуры гомогенизации составили $270-330^{\circ}C$.

Флюидные включения в кварце из жил в дайке микрограносиенитов имеют небольшой

газовый пузырек (10-15 % объема включения). Температуры эвтектики $-23,0...-23,7^{\circ}\text{C}$ – указывают на преобладание в растворе солей NaCl с примесью KCl . Концентрации солей в растворах включений 14-19 мас. %. Гомогенизировались включения при температурах $270-310^{\circ}\text{C}$.

Для термобарогеохимических исследований белого барита использовались образцы без сульфидов, отобранные из центральной части жилы. Флюидные включения в барите распределены неравномерно, образуя группы по 3-6 включений, имеют размеры, в среднем, 10-15 мкм, редко до 20 мкм. Форма – округлая, овальная с плавными границами, реже каплевидная, с отростками. В редких случаях присутствуют элементы огранки (форма включений в сечении близка ромбовидной или квадратной). Газовые пузырьки занимают от 15 до 30 % объема включения. Рядом с первичными включениями располагаются серии вторичных включений. Они приурочены к трещинам, образуют цепочки, имеют размеры менее 10 мкм. Согласно проведенным экспериментам, температура эвтектики включений составляет $-21,6...-21,7^{\circ}\text{C}$, что говорит о преобладании в составе гидротермального раствора солей NaCl с возможной примесью Na_2SO_4 . Температуры плавления льда находятся в пределах $-14,6...-15,6^{\circ}\text{C}$, что соответствует концентрации солей во включениях 17-18,6 мас. %. Термометрические исследования показали, что температуры гомогенизации попадают в диапазон $155-180^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, солевой состав растворов в изученных включениях – преимущественно NaCl с возможными примесями KCl и Na_2SO_4 . Концентрация солей в растворах, формировавших кварцевожильную минерализацию, уменьшается снизу вверх в гидротермальной системе. Наиболее высокие концентрации солей установлены в кварце из жил в дайке микрограносиенитов и барите из галенит-баритовой жилы, приуроченной к дайке диабазов (14-19 мас. %). Температурный режим формирования кварцевых жил одинаков ($270-330^{\circ}\text{C}$), тогда как формирование барита происходило при относительно невысокой температуре ($155-180^{\circ}\text{C}$). В условиях невысокого давления в вулканогенных системах температуры минералообразования близки к температурам гомогенизации включений [Реддер, 1987].

По результатам газовой хроматографической анализа, общая флюидонасыщенность (сумма всех газов и воды) кварца из жил в тра-

хизальтах, трахириолитах и микрограносиенитах составляет, в среднем, 750-3000 мкг/г. Содержание воды в кварце изменяется в диапазоне от 720 до 2600 мкг/г. Максимальные содержания воды свойственны кварцу из жил, приуроченных к дайке микрограносиенитов. Кварц в основании гидротермальной системы характеризуется минимальными содержаниями воды – около 700 мкг/г. Содержание углекислоты в кварце изменяется в широком диапазоне от 19 до 460 мкг/г. В меньшей степени варьируют концентрации N_2 – от 0,21 до 0,32 мкг/г. Как и концентрация воды, «углекислотность» флюида максимальна в кварце из дайки микрограносиенитов. Среди углеводородов обнаружен метан (1,7-4,6 мкг/г). Повышенные содержания метана наблюдаются в кварце из жил в трахириолитах основания системы. Таким образом, газовый состав флюида, сформировавшего исследуемые кварцевые жилы, определяется преобладанием H_2O , CO_2 , CH_4 и незначительным содержанием N_2 .

Полученные параметры гидротермальных растворов сопоставимы с данными по гидротермальной минерализации золото-кварцевых (Березовское, Кочкарское) месторождений Урала [Бакшеев и др., 1998; Прокофьев, Спиридонов, 2005]. Эти месторождения располагаются в Восточно-Уральской зоне и связаны с гранодиоритами и гранит-порфирами. Для них также характерны повышенные концентрации солей (8,4-17,0 и 6,3-1,7 мас. %, соответственно), в солевом составе растворов преобладают NaCl с примесью MgCl_2 . Температуры растворов $180-400^{\circ}\text{C}$.

Сравнительный анализ полученных данных с параметрами растворов флюидных включений в баритах из прожилково-вкрапленных руд месторождения Балта-Тау, и современных сульфидных построек «Венский лес» (бассейн Манус) и горы Франклин (бассейн Вудларк) Тихого океана выявил различия во флюидном режиме данных объектов. Соленость флюидов в них, по сравнению с рассматриваемым комплексом, значительно ниже (2,7-7,0 %), что объясняется островодужной природой рудоносных структур [Бортников и др., 2004; Boyle et al., 2003].

Таким образом, важной особенностью флюидов, сформировавших исследуемую систему, являются повышенные концентрации в них солей (до 19 мас. %) в барите и кварце из жил, приуроченных к дайкам диабазов и мик-

рограносиенитов, что указывает на значительное участие в минералообразовании магматогенного флюида. Кварц из жил, развитых во вмещающих трахириолитах, образовался из растворов с соленостью 9-13 мас. %. Температуры растворов составляли 270-330°C для кварца и 150-200°C – для барита. Параметры флюидов Аркаимской гидротермальной системы сходны с таковыми для золото-кварцевых месторождений Восточно-Уральской зоны – типичными представителями связанного с магматизмом рудообразования, что указывает на магматогенно-гидротермальную природу этой системы. Об этом также свидетельствует геологическая позиция оруденения и его пространственная связь с телами магматитов.

Автор выражает благодарность своим коллегам В.В. Зайкову, А.М. Юминову, Д.А. Артемьеву, В.А. Котлярову, П.В. Хворову и другим за помощь в исследованиях, консультации и поддержку; Г.Б. Здановичу, А.М. Кисленко за содействие в полевых работах; О.Ф. Мироновой (ГЕОХИ РАН, Москва) за участие в выполнении аналитических работ и консультации.

Исследования были поддержаны РФФИ (07-05-00260-а; 06-05-74774-з), Министерством образования РФ (РНП.2.1.1.1840), интеграционным проектом ученых Уральского и Сибирского отделений РАН, Южно-Уральским госуниверситетом и Фондом содействия отечественной науке.

Список литературы

- Анкушев М.Н. Минералогические особенности и последовательность формирования псевдоморфоз лимонита по пириту в карьере «Осьминог» (заповедник Аркаим, Южный Урал) // Металлогения древних и современных океанов-2008. Миасс: ИМин УрО РАН, 2008. С. 357-358.
- Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю., Устинов В.И. Условия формирования жильного кварца Березовского золоторудного поля, Средний Урал, по данным изучения флюидных включений и изотопным данным // Уральская летняя минералогическая школа-98. Екатеринбург: УТГА, 1998. С. 41-49.
- Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 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. Т. 46. № 1. С. 74-87.
- Бочкарев В.В., Язева Р.Г. Субщелочной магматизм Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 256 с.
- Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. М.: Недра, 1979. 271 с.
- Зайков В.В. Геологическое строение и полезные ископаемые района музея-заповедника Аркаим // Природные системы Южного Урала. Челябинск: ЧГУ, 1999. С. 5-35.
- Зайков В.В., Масленников В.В., Зайкова Е.В., Херрингтон Р. Рудно-формационный и рудно-фациальный анализ колчеданных месторождений Уральского палеоокеана. Миасс: ИМин УрО РАН, 2001. 313 с.
- Классификация магматических (изверженных) горных пород и словарь терминов Подкомиссии по систематике изверженных пород Международного союза геологических наук. М.: Недра, 1997. 248 с.
- Прокофьев В.Ю., Спиридонов Э.М. Состав метаморфогенных флюидов и условия преобразования руд Кочкарского золоторудного месторождения (Южный Урал) // Мат-лы II Всерос. петрографического совещ. «Петрография на рубеже XXI века». Т. 3. Сыктывкар, 2005. С. 88-90.
- Реддер Э. Флюидные включения в минералах. Т. 1. М.: Мир, 1987. 560 с.
- Симонов В.А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск: ОИГТМ СО РАН, 1993. 247 с.
- Юминов А.М., Зайков В.В., Котляров В.А. Редкоземельная и редкометалльная минерализация в дайках карбоновых микрогранодиоритов заповедника Аркаим (Южный Урал) // Минералогия Урала. Мат-лы V Всерос. совещ. Миасс-Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С. 83-86.
- Boyce A.J., Herrington R.J., Holland N.G., Roberts S. The Balta Tau VMS deposit: An ancient gold-rich white smoker? // Mineral Exploration and Sustainable Development. V. 1. Rotterdam: Millpress, 2003. P. 123-126.

Рецензент доктор геол.-мин. наук В.В. Мурзин