

ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАГМАТИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ КОЛЧЕДАННЫХ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РУДНОГО АЛТАЯ И ТУВЫ

И.В. Гаськов, В.А. Симонов, С.В. Ковязин

Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Исследования расплавных включений в минералах вулканогенных пород колчеданных рудно-магматических систем в Рудном Алтае и Туве выявили специфические особенности их развития. При некоторых чертах сходства проявлений вулканизма в этих районах отмечаются и существенные отличия.

Химический состав расплавных включений в кварце кислых вулканитов колчеданных месторождений Рудного Алтая близок химическому составу пород, а по содержанию РЗЭ они отвечают островодужным магмам. На ранних этапах развития магматической системы формировались кислые высокотемпературные (1230—1250 °С) сухие (0,19—0,77 мас.% H₂O) расплавы с высоким содержанием меди (844—7118 г/т). Обогащение ею расплавов происходило, очевидно, за счет притока мантийных газовых потоков, где медь находилась в виде хлоридных комплексов. В процессе дальнейшего развития системы сухие расплавы сменялись водонасыщенными (1,56—4,30 мас.% H₂O) и содержание меди в силикатном расплаве уменьшалось (124—1393 г/т), что, вероятно, было связано с обособлением флюидной существенно водной фазы и экстрагированием в нее части меди из расплава. На заключительных этапах развития магматической системы формировались магмы, обедненные флюидными и рудными компонентами.

Исследования расплавных включений в минералах из вулканогенных пород колчеданных месторождений Восточной Тувы показали, что расплавы по содержанию РЗЭ отвечают островодужным условиям формирования. Кислые породы рудовмещающей пачки и кислые расплавы включений в кварце андезита являются остаточными продуктами кристаллизационной дифференциации исходной базальтовой магмы, а повышенные содержания меди в расплавах (325—1028 г/т), возможно, связаны с накоплением ее в остаточных расплавах за счет повышенного кларка этого элемента в исходных основных породах. Невысокие концентрации воды (0,41—0,87 мас.%) в этом расплаве, по-видимому, способствовали сохранению повышенных содержаний меди в силикатном расплаве на этом этапе эволюции магматической системы.

Колчеданные месторождения, расплавные включения, медь, геохимические особенности, физико-химические параметры.

EVOLUTION OF PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF MAGMA MELTS DURING THE DEVELOPMENT OF ORE-MAGMATIC PYRITE SYSTEMS OF RUDNY ALTAI AND TUVA

I.V. Gas'kov, V.A. Simonov, and S.V. Kovyazin

As inferred from melt inclusions, the minerals of volcanogenic rocks of ore-magmatic pyrite systems of Rudny Altai and Tuva had quite a specific history. Volcanism manifestations in these regions have both similarities and differences.

The chemical composition of melt inclusions in quartz of acid volcanic rocks from the pyrite deposits of Rudny Altai is close to the chemical composition of the rocks, and in REE content they correspond to island-arc magmas. At the early stages of development of a magmatic system, acid high-temperature (1230–1250°C) melts formed, which were dry (0.19–0.77 wt.% H₂O) and rich in copper (844–7118 ppm). The copper enrichment was evidently due to the mantle gas flows containing chloride complexes of Cu. During the subsequent development of the system, the dry melts gave way to water-saturated melts (1.56–4.30 wt.% H₂O) and the Cu content in the silicate melt decreased (124–1393 ppm), which was possibly consequent on the fact that the highly water fluid phase was isolated and some copper from the melt was extracted into it. At the final stages of development of the magmatic system, magmas depleted in fluid and ore components formed.

Studies of melt inclusions in minerals from volcanogenic rocks of pyrite deposits of eastern Tuva have shown that in REE contents the melts correspond to island-arc formation conditions. Acid rocks of the ore-bearing member and acid melts of inclusions in quartz of andesite-dacite are residual products of crystallization differentiation of the initial basaltic magma, whereas elevated copper contents in melts (325–1028 ppm) are possibly related to its accumulation in residual melts at the expense of elevated clark of this element in the initial basic rocks. Low concentrations of water (0.41–0.87 wt.%) in this melt seemed to promote higher contents of Cu in the silicate melt at this stage of evolution of the magmatic system.

Pyrite deposits, melt inclusions, copper, geochemical features, physicochemical parameters

ВВЕДЕНИЕ

Колчеданно-полиметаллические месторождения, широко развитые в Рудном Алтае и Восточной Туве, относятся к вулканогенному гидротермальному типу (VHMS-тип) и связаны с проявлением соответственно девонского и кембрийского вулканизма [Зайков, 1976; Гаськов и др., 1991].

Девонские колчеданно-полиметаллические месторождения северо-западной части Рудного Алтая являются составной частью протяженного Рудноалтайского полиметаллического пояса и включают в себя более двух десятков колчеданно- и барит-полиметаллических месторождений (Корбалихинское, Среднее, Зареченское, Золотушинское, Юбилейное, Захаровское, Рубцовское и др.). Оруденение генетически связано с многоактным вулканизмом контрастной базальт-риолитовой формации, которая имеет мантийно-коровую природу и специфические черты [Гаськов и др., 1999]: антидромную направленность развития; преобладание кислых пород над основными в соотношении 9:1; невысокую щелочность с существенно калиево-натриевым и натриевым составом; высокую кремнистость кислых разновидностей и повышенные содержания свинца, цинка, меди и бария.

Месторождения локализуются на разных стратиграфических уровнях средневерхнедевонского разреза в породах, сформировавшихся в различных фациальных условиях — от существенно вулканогенных до осадочных. По своему генезису все изученные месторождения Рудного Алтая относятся к вулканогенному гидротермальному типу и сформировались по модели придонного (sub-sea floor) рудоотложения в условиях небольших глубин без выхода гидротермальных растворов в бассейн седиментации [Гаськов и др., 1991].

Кембрийские колчеданные месторождения Кызыл-Таштыгского рудного поля Восточной Тувы расположены в юго-восточной части Улугуйской металлогенической зоны, тесно связанной с Каахемским офиолитовым поясом венд-кембрийского возраста [Зайков, 1976; Симонов и др., 1999]. Рудовмещающая нижнекембрийская толща сложена вулканогенно-осадочными отложениями, в состав которой входят базальты, андезит-базальты, дациты и риолиты, а также вулканомиктовые брекчии и туфы соответствующего состава. Осадочные отложения имеют подчиненное развитие и представлены углеродистыми алевролитами, песчаниками, силицитами, известняками [Дистанов, 1977; Кузечный и др., 2001]. По своему генезису месторождения Кызыл-Таштыгского рудного поля относятся к вулканогенным гидротермальным образованиям и сформировались по типу современных черных курильщиков [Зайков, 1991].

Целью настоящей статьи является изучение эволюции магматических расплавов в процессе развития колчеданных рудно-магматических систем Рудного Алтая и Тувы на основе изучения их физико-химических и геохимических особенностей по расплавленным включениям.

Вопросам изучения специфики вулканогенных образований разных рудных районов Рудноалтайского полиметаллического пояса посвящены многие работы [Яковлев, Яковлева, 1973; Чернов, 1974; Филатов, 1986; Авдонин, 1987; Гаськов и др., 1991, 1999]. Однако проблема выявления отличительных физико-химических и геохимических признаков собственно рудоносных расплавов в процессе развития вулканогенных систем в различных районах с колчеданным оруденением остается открытой. Данный вопрос постоянно привлекает к себе внимание, но большинство работ в этом направлении [Яковлев, Яковлева, 1973; Авдонин, 1987] основаны на изучении „особенностей рудоносного вулканизма“ опираясь на исследования пород собственно базальт-риолитовой формации, которые, являясь конечным продуктом кристаллизации магм, не в полной мере отражают свойства расплавов. К тому же породы в большинстве случаев значительно изменены в ходе вторичных процессов, что затушевывает их первичные признаки и затрудняет расшифровку первичных свойств магматических расплавов. Вместе с тем магматический расплав, с внедрением которого связано формирование оруденения, должен характеризоваться определенными свойствами, способствовавшими накоплению рудных компонентов и экстрагированию их в рудообразующий флюид. Для установления этих отличительных особенностей требуются прямые исследования первичных расплавов. Такую возможность дает изучение расплавленных включений в минералах вулканогенных пород. Законсервированный расплав в таких включениях позволяет установить специфику рудоносных расплавов. В настоящее время можно найти только отдельные публикации, содержащие данные по расплавленным включениям в вулканогенных породах магматических комплексов колчеданноносных рудных районов [Карпухина и др., 1998; Лапухов и др., 2001; Симонов и др., 2002а,б, 2005]. Но и в этих статьях не всегда есть информация по содержанию рудных компонентов непосредственно в расплавленных включениях, которые, наряду с концентрациями летучих, являются, на наш взгляд, определяющими признаками рудоносных расплавов. Такие исследования нами проведены на примере месторождений Юбилейное (Рудный Алтай) и Кызыл-Таштыг (Восточная Тува).

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

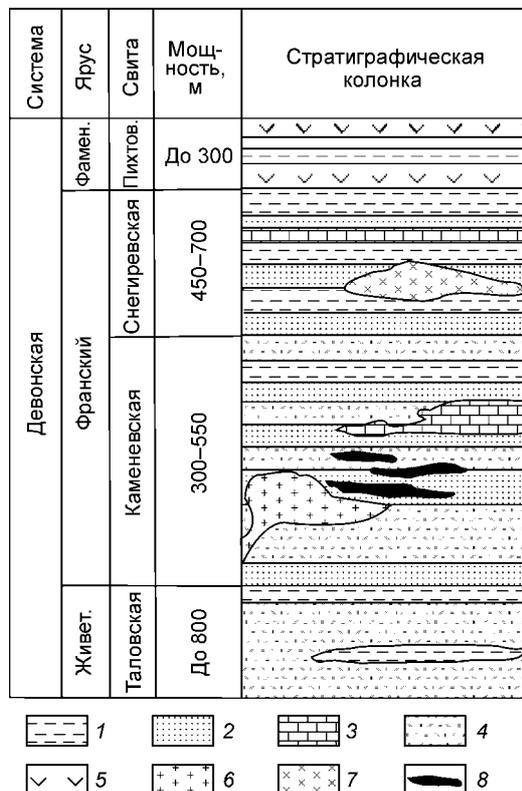
Расплавленные включения исследовались в высокотемпературной термокамере с инертной средой [Соколов, Слуцкий, 1984]. Эксперименты с включениями при высоких температурах проводились по опубликованной ранее методике [Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994]. Составы гомогенизированных

расплавных включений установлены на рентгеновском микроанализаторе „Сameбах-Микро“. Все экспериментальные исследования расплавных включений проведены в ОИГГМ СО РАН (г. Новосибирск). Содержания редких (РЭ), редкоземельных (РЗЭ) элементов и воды в расплавных включениях определены методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микроанализаторе IMS-4f в Институте микроэлектроники РАН (г. Ярославль) по методике, опубликованной ранее [Соболев, 1996]. Составы пород определены с помощью рентгенофлуоресцентного анализа в ОИГГМ СО РАН (г. Новосибирск).

Месторождение Юбилейное находится в Золотушинском рудном районе Рудноалтайского полиметаллического пояса и локализуется среди вулканогенно-осадочной толщи девонского возраста. Оно приурочено к блоковой Титовско-Сургутановской структуре и контролируется субширотным Орловско-Карагужихинским разломом [Астафьев, 1982; Гаськов и др., 1991]. Участок месторождения имеет моноклиналиное строение и сложен вулканогенно-осадочными породами. В разрезе толщи выделяется четыре свиты — таловская (D_2d_3), каменевская, снегиревская (D_3d_6) и пихтовская (D_3d_7) (рис. 1). Вулканогенные образования представлены лавами и туфами кислого состава, развитыми в основном в низах разреза участка месторождения (таловская свита), и субвулканическими телами риолитовых и риолит-дацитовых порфиров различного возраста. Среди них выделяются согласные и секущие тела риолитовых порфиров мощностью до 150 м, развитые среди отложений каменевской свиты и пространственно ассоциирующие с колчеданно-полиметаллическим оруденением, и субвулканические риолит-дацитовые и дацитовые силлы, образующие мощные (до 500 м) субсогласные тела среди отложений снегиревской и каменевской свит. Внедрение этих тел в отложения снегиревской свиты, слагающей самые верхи франского яруса, показывает, что они относятся к позднедевонскому проявлению вулканизма, эффузивными аналогами которых являются отложения пихтовской свиты фаменского возраста [Роташар и др., 1982]. Как правило, эти риолит-дацитовые и дацитовые образования развиваются автономно и не связаны с оруденением. Таким образом, в пределах участка месторождения Юбилейного выделяются вулканогенные образования, представленные лавовыми потоками живетского возраста (дорудные), субвулканическими телами рудоносных франских риолитовых порфиров и пострудных риолит-дацитовых порфиров фаменского возраста.

По расплавным включениям в кварце риолитов [Симонов и др., 2005] изучены химический состав, содержания рудных, редких и редкоземельных элементов, а также летучих в дорудных, рудоносных и пострудных риолитовых порфирах и проведено их сопоставление с данными, полученными непосредственно по породам.

Анализ химического состава включений показывает в целом сходные величины исследуемых расплавов с валовым составом пород (табл. 1, 2). В расплавных включениях отмечаются лишь более низкие содержания железа и магния. Установлено некоторое увеличение CaO и суммы щелочей во включениях от ранних живетских к поздним фаменским образованиям (см. табл. 1).



Распределение редкоземельных элементов в расплавных включениях, по данным ионного зонда, в целом соответствует данным, полученным по самим риолитовым порфирам (рис. 2). В целом спектры РЗЭ хорошо согласуются с данными по риолитам Курило-Камчатской островной дуги и подтверждают островодужные условия формирования кислых пород месторождения Юбилейное. Для включений характерно явное обогащение легкими лантаноидами и отчетливый европиевый минимум, свидетельствующий об эволюции кислых расплавов при фракционировании плагиоклазов. Кислые расплавы месторождения Юбилейное характеризуются повышенными значениями практически всех компонентов РЗЭ, что их резко отличает от кислых магм медно-колчеданного месторождения Яман-Касы (Южный Урал), сформировавшегося в условиях

Рис. 1. Стратиграфическая колонка участка колчеданно-полиметаллического месторождения Юбилейное (Рудный Алтай).

1–5 — вулканогенно-осадочные отложения средневерхнедевонского возраста (D_2d_5 – D_3d_7): 1 — углисто-глинисто-кремнистые алевролиты, 2 — полимиктовые песчаники и туфопесчаники, 3 — известняки и известковистые сланцы, 4 — туфы и лавы кислого состава, 5 — андезит-базальты и туфы основного состава; 6, 7 — субвулканические тела: 6 — риолитового (D_3d_6) и 7 — дацитового состава (D_3d_7); 8 — рудные тела колчеданно-полиметаллического состава.

Таблица 1. Представительные анализы составов гомогенизированных расплавных включений в кварце из порфиров месторождения Юбилейное

| Компонент | Дорудный порфир | | | | Рудноносный порфир | | | | | Пострудный порфир | | |
|--------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|--------------------|--------|---------|---------|--------|-------------------|--------|---------|
| | 1-4/1 | 1-4/3 | 1-4/5 | 1-4/6 | 1069/2 | 1069/4 | 1069/11 | 1069/12 | 1020/7 | 1020/8 | 1020/9 | 1020/12 |
| SiO ₂ , мас. % | 70,63 | 75,29 | 75,68 | 77,28 | 77,49 | 75,50 | 77,16 | 77,68 | 73,81 | 71,88 | 74,50 | 73,06 |
| TiO ₂ | 0,04 | 0,02 | 0,10 | 0,01 | 0,14 | 0,13 | 0,19 | 0,38 | 0,14 | 0,27 | 0,12 | 0,12 |
| Al ₂ O ₃ | 16,92 | 14,23 | 14,95 | 14,44 | 10,79 | 11,27 | 11,92 | 11,24 | 13,97 | 13,66 | 14,37 | 14,26 |
| FeO | 1,83 | 1,51 | 1,50 | 1,41 | 0,94 | 0,97 | 1,04 | 0,91 | 1,15 | 1,46 | 1,15 | 1,27 |
| MnO | 0,11 | 0,13 | 0,09 | 0,12 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,07 | 0,05 | 0,07 |
| MgO | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,11 | 0,12 | 0,14 | 0,11 | 0,09 | 0,15 | 0,06 | 0,08 |
| CaO | 0,57 | 0,61 | 0,45 | 0,51 | 0,94 | 1,02 | 1,19 | 0,76 | 0,98 | 1,92 | 0,87 | 0,88 |
| Na ₂ O | 2,08 | 2,08 | 2,63 | 2,49 | 2,09 | 3,11 | 2,28 | 2,02 | 4,98 | 5,19 | 3,66 | 5,16 |
| K ₂ O | 1,86 | 1,73 | 1,08 | 1,67 | 2,89 | 3,21 | 3,09 | 3,13 | 3,45 | 2,38 | 3,87 | 3,81 |
| Сумма | 94,09 | 95,63 | 96,50 | 97,96 | 95,38 | 95,35 | 97,02 | 96,25 | 98,63 | 96,98 | 98,64 | 98,71 |
| Th, г/т | 11,13 | 9,51 | 11,03 | 11,18 | 10,88 | 8,92 | 10,18 | 9,36 | 10,52 | 4,86 | 11,94 | 8,07 |
| Sr | 12,3 | 16,8 | 9,7 | 16,5 | 40,6 | 31,3 | 40,7 | 23,5 | 42,9 | 66,2 | 31,7 | 29,3 |
| V | 4,34 | 4,09 | 5,00 | 6,39 | 2,01 | 3,45 | 4,66 | 2,36 | 5,54 | 4,95 | 4,70 | 5,24 |
| Y | 75,8 | 72,0 | 60,9 | 69,2 | 32,3 | 27,3 | 27,4 | 29,8 | 58,8 | 30,9 | 62,8 | 44,7 |
| Zr | 160,4 | 141,4 | 162,8 | 158,6 | 96,4 | 84,3 | 88,8 | 85,3 | 139,8 | 144,3 | 143,2 | 102,2 |
| Nb | 13,97 | 14,16 | 12,69 | 14,72 | 9,26 | 8,03 | 9,43 | 9,46 | 10,36 | 6,43 | 9,92 | 7,64 |
| Cu | 844 | 7118 | 1059 | 4067 | 264 | 167 | 246 | 361 | 45 | 44 | 97 | 25 |
| Pb | 8,97 | 9,63 | 7,28 | 10,52 | 10,21 | 8,12 | 6,96 | 4,87 | 14,97 | 13,66 | 15,01 | 9,96 |
| Ba | 701,4 | 637,0 | 536,9 | 650,1 | 563,8 | 478,3 | 599,5 | 471,8 | 556,7 | 273,0 | 574,1 | 430,6 |
| H ₂ O | 0,65 | 0,73 | 0,45 | 0,60 | 4,30 | 3,74 | 2,31 | 3,20 | 1,84 | 1,24 | 1,56 | 0,94 |
| F | 0,05 | 0,05 | 0,02 | 0,09 | 0,06 | 0,04 | 0,08 | 0,08 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| T _{гом} , °C | 1230 | 1240 | 1245 | 1250 | 1095 | 1140 | 1175 | 1165 | 1150 | 1160 | 1170 | 1160 |

Таблица 2. Химический состав магматических пород из разреза участка месторождения Юбилейное, мас. %

| п/п | Номер образца | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | H ₂ O ⁺ | S | P ₂ O ₅ | П.п.п. | Сумма |
|--|---------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|-------------------------------|--------|--------|
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>Живетские дорудные риолитовые порфиры</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Ю-1086-574 | 76,48 | 0,11 | 9,41 | 2,64 | 0,87 | 0,03 | 2,92 | 0,28 | 0,16 | 2,42 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 3,75 | 99,08 |
| 2 | Ю-2 | 71,04 | 0,49 | 13,60 | 2,03 | 1,13 | 0,09 | 0,69 | 1,23 | 5,20 | 2,42 | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 1,52 | 99,55 |
| 3 | Ю-3 | 71,23 | 0,46 | 13,46 | 1,99 | 1,10 | 0,09 | 0,79 | 1,23 | 5,42 | 2,32 | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 1,32 | 99,53 |
| 4 | Ю-1077-724 | 68,16 | 0,31 | 15,96 | 0,94 | 2,60 | 0,09 | 1,38 | 1,51 | 6,50 | 0,63 | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 1,97 | 100,16 |
| <i>Франские рудноносные риолитовые порфиры</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Ю-1013-1 | 74,84 | 0,30 | 14,70 | 0,48 | 0,36 | 0,03 | 0,48 | 0,28 | 6,50 | 0,22 | 0,48 | 0,01 | 0,01 | 1,33 | 99,15 |
| 2 | Ю-1024-8 | 77,00 | 0,04 | 11,00 | 1,43 | 2,66 | 0,11 | 2,14 | 0,14 | 0,07 | 2,66 | 0,05 | 0,58 | 0,01 | 2,20 | 100,09 |
| 3 | Ю-1024-9 | 76,81 | 0,04 | 11,20 | 0,80 | 2,01 | 0,08 | 2,17 | 0,00 | 0,16 | 2,66 | 0,22 | 0,25 | 0,004 | 2,90 | 99,26 |
| 4 | Ю-1023-22 | 78,20 | 0,04 | 10,32 | 0,39 | 2,16 | 0,10 | 1,59 | 0,10 | 2,34 | 1,25 | 0,09 | 0,14 | 0,004 | 2,91 | 99,63 |
| 5 | Ю-1027-145 | 76,75 | 0,06 | 10,41 | 0,52 | 3,81 | 0,08 | 2,80 | 0,00 | 2,32 | 1,55 | 0,01 | 0,34 | 0,016 | 1,47 | 100,14 |
| 6 | Ю-1027-146 | 76,98 | 0,06 | 9,60 | 0,57 | 4,65 | 0,09 | 2,65 | 0,07 | 1,69 | 1,77 | 0,15 | 0,55 | 0,023 | 1,86 | 100,71 |
| 7 | Ю-1013-197 | 68,31 | 0,17 | 12,03 | 5,20 | 3,02 | 0,09 | 0,35 | 0,27 | 5,30 | 2,56 | 0,73 | 0,29 | 0,06 | 2,93 | 101,31 |
| 8 | Ю-1015-32 | 76,66 | 0,06 | 10,53 | 0,51 | 1,37 | 0,06 | 2,11 | 0,56 | 0,21 | 3,10 | 0,28 | 0,20 | 0,009 | 4,23 | 99,89 |
| <i>Фаменские пострудные риолит-дацитовые порфиры</i> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Ю-1150-552 | 62,85 | 0,38 | 14,15 | 2,27 | 3,56 | 0,09 | 3,78 | 2,48 | 3,10 | 0,68 | 0,00 | 0,00 | 0,27 | 5,55 | 99,16 |
| 2 | Ю-1069-407 | 66,96 | 0,65 | 13,88 | 1,46 | 2,77 | 0,07 | 1,62 | 1,50 | 4,78 | 1,83 | 0,00 | 0,00 | 0,19 | 4,71 | 100,42 |
| 3 | Ю-1069-244 | 69,52 | 0,42 | 13,27 | 0,80 | 2,45 | 0,07 | 1,29 | 1,92 | 5,20 | 0,92 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,39 | 100,35 |
| 4 | Ю-1120-91 | 76,30 | 0,20 | 11,00 | 1,71 | 0,85 | 0,04 | 0,59 | 1,78 | 4,93 | 0,63 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,92 | 98,98 |
| 5 | Ю-1120-609 | 72,60 | 0,33 | 13,18 | 0,76 | 1,66 | 0,05 | 2,47 | 0,89 | 3,08 | 1,78 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 3,08 | 99,95 |
| 6 | Ю-1120-554 | 75,25 | 0,25 | 12,38 | 0,54 | 0,5 | 0,02 | 1,09 | 1,51 | 3,05 | 1,46 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 3,28 | 99,72 |
| 7 | Ю-1135-163 | 61,63 | 1,15 | 15,98 | 1,86 | 4,55 | 0,13 | 1,08 | 1,09 | 4,51 | 3,34 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | 4,45 | 100,18 |

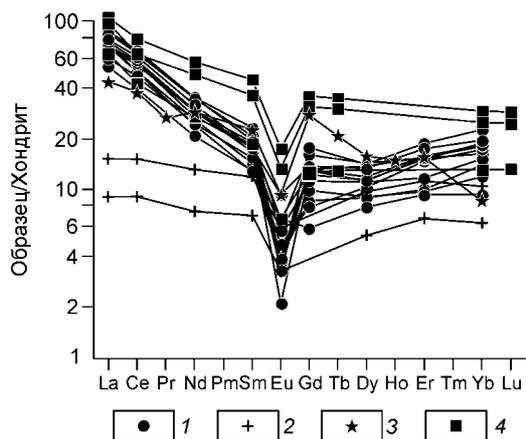


Рис. 2. Распределение редкоземельных элементов.

1 — в расплавных включениях в кварце рудоносных риолитовых порфиров месторождения Юбилейное; 2 — в кварце риолита месторождения Яман-Касы (поле данных по расплавным включениям); 3 — в риолитовых порфирах Курило-Камчатской островной дуги; 4 — в рудоносных риолитовых порфирах месторождения Юбилейное. Содержания элементов нормированы к составу хондрита согласно [Boynnton, 1984]. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов Симонова и др. [2005].

Определение с помощью ионного зонда содержания рудных компонентов в расплавных включениях риолитовых порфиров месторождения Юбилейное выявило близкие к кларку содержания свинца, бария

и некоторых других редких элементов (см. табл. 1). Более высокие содержания установлены для меди. Ее концентрации в расплавах до-рудного (844—7118 г/т) и рудоносного (124—1393 г/т) вулканизма в десятки раз превышают кларковые значения и величины в пострудных расплавах (25—97 г/т). Эти данные анализа на ионном зонде хорошо согласуются с результатами измерений на микроанализаторе „Самбах-Микро“ и сканирующем микроскопе с рентгено-спектральной приставкой (Link) (рис. 3). Атомно-абсорбционный анализ самих риолитовых порфиров, в кварце которых включения обогащены медью, показывает повышенные содержания меди (101 г/т) и цинка (95 г/т), а содержания свинца в них также не превышают кларковый уровень и составляют менее 10 г/т.

Анализ расплавных включений на ионном зонде выявил различную флюидонасыщенность кислых расплавов. Максимальные концентрации

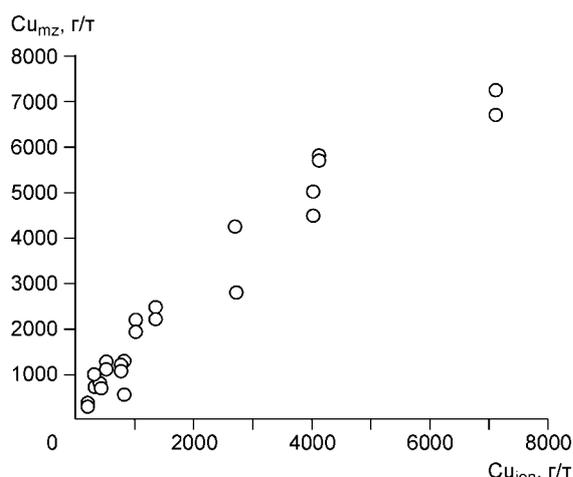


Рис. 3. Соотношение содержаний меди в расплавных включениях месторождения Юбилейное по данным анализа на ионном зонде (Cu_{ion}) и на рентгеновском микроанализаторе (Cu_{mz}).

задугового бассейна [Зайков и др., 1995; Симонов и др., 2002a]. Необходимо отметить, что дорудные, синрудные и пострудные кислые расплавы, обладая практически идентичными формами спектров РЗЭ, хорошо различаются по общему содержанию элементов, наименьшие минимальные значения которых характерны для рудоносных магм.

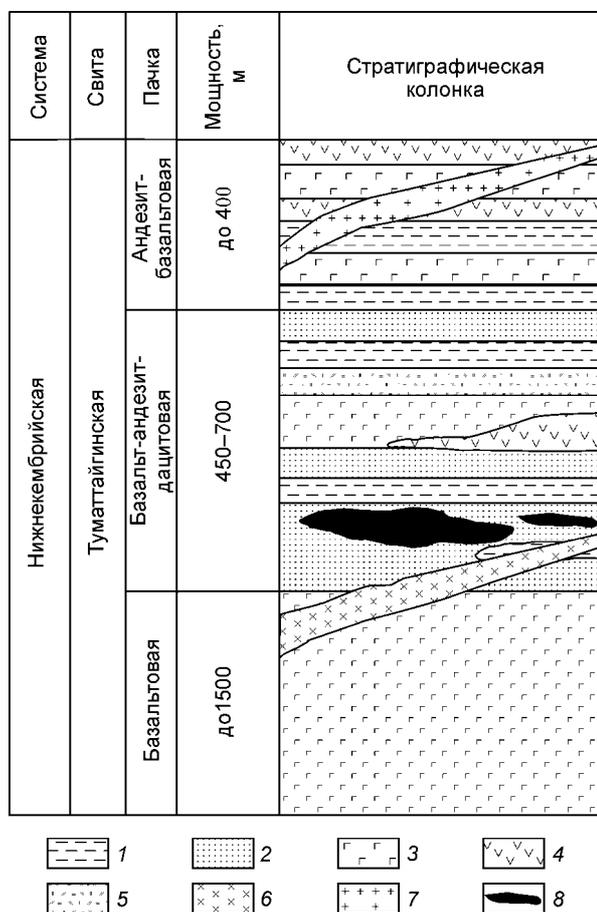


Рис. 4. Стратиграфическая колонка участка колчеданно-полиметаллического месторождения Кызыл-Таштыг.

1—5 — отложения туматтайгинской свиты (C_{1t}): 1 — углисто-кремнистые и карбонатно-глинисто-кремнистые алевролиты, 2 — вулканомиктовые песчаники и туфы дацитового состава, 3 — миндалекаменные базальты и туфы основного состава, 4 — андезит-базальты и туфы среднего состава, 5 — лавы и туфы кислого состава; 6, 7 — субвулканические тела (C_{1s}): 6 — дацитового, 7 — риолитового состава; 8 — рудные тела колчеданно-полиметаллического состава.

Таблица 3. Составы гомогенизированных расплавных включений в клинопироксенах из базальтовых порфиритов и в кварце из андезитов Кызыл-Таштыгского рудного поля, мас. %

| Номер | | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | Сумма | T _{гом} , °C |
|-------|------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|-------------------|------------------|-------|-----------------------|
| п/п | образца | | | | | | | | | | | | |
| 1 | C17-6/22 | 53,10 | 0,72 | 8,78 | 0,03 | 10,74 | 0,22 | 8,89 | 14,2 | 1,25 | 0,24 | 98,17 | 1190 |
| 2 | C17-6/23 | 54,33 | 0,66 | 8,9 | 0,02 | 11,08 | 0,24 | 9,05 | 13,65 | 1,26 | 0,24 | 99,43 | 1190 |
| 3 | C17-6/24 | 53,17 | 0,64 | 9,48 | 0,04 | 10,53 | 0,21 | 9,14 | 13,85 | 1,22 | 0,26 | 98,54 | 1190 |
| 4 | C17-7/26 | 53,34 | 0,58 | 10,97 | 0,03 | 13,47 | 0,3 | 6,77 | 11,4 | 1,68 | 0,19 | 98,73 | 1140 |
| 5 | C17-7/27 | 53,7 | 0,67 | 10,74 | 0,04 | 14,32 | 0,3 | 5,83 | 10,46 | 1,91 | 0,2 | 98,17 | 1140 |
| 6 | C17-7/28 | 53,56 | 0,84 | 11,05 | 0,02 | 14,19 | 0,3 | 5,42 | 10,02 | 1,98 | 0,3 | 97,68 | 1140 |
| 7 | C17-7/29 | 52,12 | 0,55 | 9,09 | 0,07 | 13,39 | 0,31 | 8,68 | 13,32 | 1,36 | 0,13 | 99,02 | 1140 |
| 8 | C17-8/32 | 55,26 | 0,52 | 11,96 | 0,01 | 8,58 | 0,22 | 5,83 | 11,45 | 2,29 | 0,46 | 96,58 | 1130 |
| 9 | C17-9/36 | 51,82 | 0,5 | 10,72 | 0,02 | 11,59 | 0,3 | 8,71 | 12,02 | 1,68 | 0,2 | 97,56 | 1180 |
| 10 | C17-9/37 | 54,94 | 0,69 | 9,15 | 0,01 | 11,5 | 0,36 | 5,45 | 10,73 | 2,04 | 0,43 | 95,3 | 1120 |
| 11 | C17-10/39 | 50,69 | 0,64 | 11,06 | 0,06 | 10,25 | 0,25 | 8,43 | 13,18 | 1,54 | 0,2 | 96,3 | 1170 |
| 12 | C17-10/40 | 50,90 | 0,6 | 11,15 | 0,05 | 10,47 | 0,24 | 8,32 | 13,19 | 1,56 | 0,24 | 96,72 | 1170 |
| 13 | C17-10/42 | 52,57 | 0,57 | 11,00 | 0,05 | 9,52 | 0,24 | 8,08 | 14,18 | 1,9 | 0,2 | 98,31 | 1170 |
| 14 | C10b-7/28 | 70,95 | 0,09 | 13,76 | 0 | 1,9 | 0,1 | 0,11 | 0,99 | 4,53 | 1,87 | 94,3 | — |
| 15 | C10b-7/29 | 77,08 | 0,04 | 11,51 | 0 | 1,82 | 0,07 | 0,07 | 0,75 | 3,03 | 1,79 | 96,17 | — |
| 16 | C10b-8/30 | 73,68 | 0,14 | 12,33 | 0 | 2,45 | 0,1 | 0,11 | 1,13 | 2,59 | 1,8 | 94,31 | — |
| 17 | C10b-8/31 | 75,32 | 0,06 | 11,63 | 0 | 2,38 | 0,1 | 0,09 | 0,96 | 2,74 | 1,77 | 95,05 | — |
| 18 | C10b-8/41 | 76,31 | 0,19 | 11,17 | 0 | 2,37 | 0,1 | 0,09 | 0,96 | 2,32 | 1,62 | 95,14 | — |
| 19 | C10b-11/39 | 73,01 | 0,15 | 14,52 | 0 | 3,52 | 0,09 | 0,12 | 1,79 | 1,85 | 1,93 | 96,98 | 920 |
| 20 | C10b-12/34 | 73,7 | 0,06 | 12,33 | 0 | 2,43 | 0,08 | 0,12 | 1,48 | 3,21 | 1,59 | 95,01 | 1150 |
| 21 | C10b-12/35 | 63,98 | 0,16 | 18,04 | 0 | 4,17 | 0,19 | 0,2 | 2,86 | 4,00 | 1,79 | 95,4 | — |
| 22 | C10b-12/43 | 72,76 | 0,07 | 13,26 | 0 | 2,5 | 0,12 | 0,13 | 1,7 | 2,62 | 1,68 | 94,82 | 1150 |
| 23 | C12-1/4 | 51,50 | 0,41 | 14,1 | 0,01 | 8,24 | 0,19 | 7,03 | 11,72 | 2,12 | 0,23 | 95,54 | 1130 |
| 24 | C12-1/7 | 51,66 | 0,48 | 12,87 | 0,05 | 8 | 0,21 | 8,09 | 13,43 | 2,02 | 0,27 | 97,07 | 1130 |
| 25 | C12-2/2 | 53,07 | 0,36 | 9,78 | 0,04 | 8,2 | 0,2 | 8,74 | 14,55 | 1,82 | 0,35 | 97,11 | 1170 |
| 26 | C12-3/9 | 50,68 | 0,42 | 10,3 | 0,07 | 8,77 | 0,2 | 10,18 | 14,41 | 1,46 | 0,2 | 96,69 | 1210 |
| 27 | C12-3/10 | 50,73 | 0,42 | 11,29 | 0,04 | 8,43 | 0,21 | 9,03 | 13,92 | 1,71 | 0,21 | 95,98 | 1210 |
| 28 | C12-3/11 | 51,06 | 0,37 | 10,4 | 0,07 | 8,6 | 0,21 | 10,2 | 14,31 | 1,46 | 0,18 | 96,88 | 1210 |
| 29 | C12-3/12 | 51,12 | 0,41 | 10,55 | 0,05 | 8,66 | 0,21 | 10,05 | 14,05 | 1,43 | 0,19 | 96,71 | 1210 |
| 30 | C12-4/15 | 50,58 | 0,47 | 10,73 | 0,02 | 10,12 | 0,25 | 9,41 | 13,43 | 1,56 | 0,19 | 96,75 | 1180 |
| 31 | C12-4/16 | 50,11 | 0,44 | 10,76 | 0,02 | 10,27 | 0,23 | 9,55 | 13,59 | 1,58 | 0,19 | 96,73 | 1180 |
| 32 | C12-5/18 | 51,30 | 0,51 | 11,18 | 0,04 | 10,73 | 0,25 | 7,89 | 11,78 | 2,03 | 0,47 | 96,17 | 1170 |
| 33 | C12-5/19 | 51,36 | 0,54 | 10,89 | 0,05 | 10,6 | 0,23 | 8,41 | 12,14 | 1,78 | 0,41 | 96,41 | 1170 |
| 34 | C12-5/20 | 51,67 | 0,48 | 11,07 | 0,04 | 10,42 | 0,23 | 8,35 | 12,1 | 1,77 | 0,43 | 96,55 | 1170 |
| 35 | C12-6/25 | 53,75 | 0,54 | 11,48 | 0 | 9,89 | 0,2 | 6,53 | 11,43 | 2,35 | 0,39 | 96,56 | 1180 |
| 36 | C12-6/27 | 52,92 | 0,57 | 11,33 | 0 | 10,39 | 0,21 | 6,73 | 11,78 | 2,2 | 0,36 | 96,49 | 1180 |
| 37 | C4-1/3 | 51,51 | 0,77 | 10,43 | 0,04 | 11,25 | 0,24 | 9,25 | 16,75 | 1,15 | 0,2 | 101,5 | 1160 |
| 38 | C4-1/6 | 50,81 | 0,75 | 10,55 | 0,04 | 11,07 | 0,23 | 8,82 | 16,45 | 0,9 | 0,13 | 99,75 | 1160 |
| 39 | C4-2/8 | 56,75 | 0,52 | 13,76 | 0,08 | 6,82 | 0,13 | 5,65 | 7,84 | 2,08 | 0,95 | 94,58 | 1085 |
| 40 | C4-3/15 | 51,46 | 0,92 | 13,5 | 0,04 | 9,78 | 0,19 | 7,43 | 11,23 | 1,61 | 0,9 | 97,06 | 1110 |
| 41 | C4-4/17 | 51,73 | 0,67 | 11,31 | 0,1 | 8,77 | 0,16 | 8,76 | 13,24 | 2,03 | 0,43 | 97,2 | 1165 |
| 42 | C4-4/18 | 51,18 | 0,66 | 11,13 | 0,08 | 8,73 | 0,19 | 8,65 | 13,35 | 1,92 | 0,44 | 96,33 | 1165 |
| 43 | C4-5/20 | 53,83 | 0,76 | 13,45 | 0 | 10,45 | 0,25 | 6,66 | 11,43 | 1,63 | 0,29 | 98,75 | 1115 |

Примечание. Включения: 1—13 — в клинопироксенах надрудной андезит-базальтовой толщи, 14—22 — в кварце из рудоносной базальт-андезит-дацитовой толщи, 23—43 — в клинопироксенах из подрудной существенно базальтовой толщи.

Таблица 4. Составы пород из разреза туматтайгинской свиты Кызыл-Таштыгского рудного поля, мас. %

| Номер | | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Ba | П.п.п. | Сумма |
|-------|------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|--------|--------|
| 1 | C-6v-98 | 46,96 | 0,81 | 16,16 | 11,89 | 0,18 | 6,40 | 8,82 | 1,98 | 0,39 | 0,09 | 0,01 | 6,08 | 99,76 |
| 2 | C-8-98 | 52,34 | 1,32 | 12,81 | 12,70 | 0,52 | 3,92 | 5,09 | 4,18 | 0,05 | 0,84 | 0,00 | 5,97 | 99,75 |
| 3 | C-9a-98 | 47,67 | 0,72 | 16,45 | 10,97 | 0,21 | 7,53 | 9,61 | 2,72 | 0,45 | 0,07 | 0,00 | 3,38 | 99,79 |
| 4 | C-9b-98 | 46,72 | 0,79 | 16,51 | 12,51 | 0,25 | 7,44 | 9,84 | 2,22 | 0,38 | 0,06 | 0,00 | 3,17 | 99,89 |
| 5 | C-11/5-98 | 52,56 | 1,49 | 14,60 | 14,01 | 0,40 | 3,94 | 3,18 | 4,80 | 0,05 | 0,97 | 0,00 | 3,73 | 99,74 |
| 6 | C-11/6-98 | 51,04 | 1,40 | 14,12 | 13,91 | 0,50 | 3,88 | 6,66 | 4,08 | 0,06 | 0,89 | 0,00 | 3,26 | 99,80 |
| 7 | C-11/7-98 | 50,28 | 1,46 | 14,16 | 13,15 | 0,36 | 3,78 | 6,81 | 3,32 | 0,20 | 0,92 | 0,00 | 5,11 | 99,54 |
| 8 | C-11/8-98 | 54,00 | 1,23 | 14,83 | 10,64 | 0,20 | 5,80 | 3,13 | 3,78 | 0,07 | 0,46 | 0,02 | 5,19 | 99,36 |
| 9 | C-11/13-98 | 54,78 | 1,48 | 14,73 | 11,85 | 0,28 | 4,62 | 1,89 | 3,33 | 0,55 | 0,88 | 0,02 | 5,29 | 99,70 |
| 10 | C-14-98 | 44,30 | 0,99 | 16,98 | 8,67 | 0,22 | 4,67 | 9,52 | 5,27 | 0,48 | 0,17 | 0,02 | 8,99 | 100,27 |
| 11 | C-17-98 | 47,89 | 0,89 | 15,53 | 12,70 | 0,20 | 7,25 | 10,15 | 1,86 | 0,21 | 0,11 | 0,02 | 3,11 | 99,90 |
| 12 | C-18a-98 | 44,96 | 0,53 | 12,99 | 7,72 | 0,25 | 6,38 | 12,58 | 4,65 | 0,08 | 0,08 | 0,00 | 9,83 | 100,05 |
| 13 | C-19b-98 | 46,54 | 0,88 | 17,02 | 12,86 | 0,24 | 6,11 | 4,10 | 5,10 | 0,17 | 0,07 | 0,05 | 6,55 | 99,68 |
| 14 | C-10b-98 | 62,07 | 0,36 | 15,74 | 8,26 | 0,11 | 2,48 | 1,47 | 4,60 | 0,92 | 0,04 | 0,04 | 3,54 | 99,63 |
| 15 | КТ-8 | 71,18 | 0,32 | 13,93 | 3,52 | 0,06 | 1,06 | 1,62 | 3,91 | 2,86 | 0,10 | Н.о. | 0,90 | 99,46 |
| 16 | КТ-9 | 68,44 | 0,38 | 14,37 | 4,41 | Н.о. | 1,74 | 1,64 | 5,26 | 1,99 | 0,14 | » | 1,16 | 99,53 |
| 17 | КТ-10 | 71,96 | 0,29 | 9,79 | 7,30 | 0,07 | 1,57 | 1,24 | 5,53 | 0,39 | 0,11 | » | 1,32 | 99,57 |
| 18 | КТ-11 | 71,79 | 0,24 | 14,10 | 5,02 | 0,17 | 0,25 | 1,11 | 3,91 | 0,91 | 0,07 | » | 2,70 | 100,27 |
| 19 | C-4-98 | 47,51 | 0,76 | 14,41 | 7,86 | 0,16 | 4,77 | 10,13 | 5,30 | 0,07 | 0,16 | 0,00 | 8,78 | 99,91 |
| 20 | C-7-98 | 48,48 | 1,72 | 15,00 | 15,01 | 0,24 | 5,56 | 8,07 | 2,54 | 0,19 | 0,30 | 0,00 | 2,77 | 99,88 |
| 21 | C-12-98 | 47,83 | 1,00 | 15,75 | 9,83 | 0,17 | 5,25 | 11,37 | 2,70 | 0,26 | 0,18 | 0,02 | 5,92 | 100,28 |
| 22 | C-16-98 | 44,37 | 1,00 | 16,25 | 11,61 | 0,19 | 5,03 | 7,19 | 3,57 | 1,17 | 0,17 | 0,05 | 9,76 | 100,35 |

Примечание. Толща: 1—13 — надрудная андезит-базальтовая, 14—18 — рудоносная базальт-андезит-дацитовая, 19—22 — подрудная существенно базальтовая. Н.о. — элемент не определялся.

Таблица 5. Содержание редких элементов, фтора и воды в расплавленных включениях в кварце рудовмещающих андезитов месторождения Кызыл-Таштыг

| Образец | Номер включения | Cu | Pb | Ba | Cr | V | Sr | Zr | Li | Be | B | F | H ₂ O |
|----------|-----------------|------|-----|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------------------|
| | | г/г | | | | | | | | | | | мас. % |
| C-10b-98 | 1 | Н.о. | — | 680 | 0,92 | 5,92 | 91,7 | 165,9 | 3,03 | 1,07 | 20,0 | Н.о. | 0,50 |
| | 2 | » | — | 697 | 2,01 | 6,70 | 103,7 | 151,9 | 1,35 | 1,12 | 17,9 | » | 0,51 |
| | 3 | 349 | 3,2 | Н.о. | Н.о. | 11,01 | 113,6 | 192,8 | 2,76 | 0,78 | 15,3 | 0,12 | 0,87 |
| | 4 | 1028 | 1,2 | » | » | 4,81 | 60,2 | 85,7 | 2,83 | 0,25 | 4,4 | 0,02 | 0,41 |
| | 5 | 325 | 2,5 | » | » | 6,86 | 126,8 | 234,1 | 1,03 | 0,44 | 13,1 | 0,2 | 0,49 |

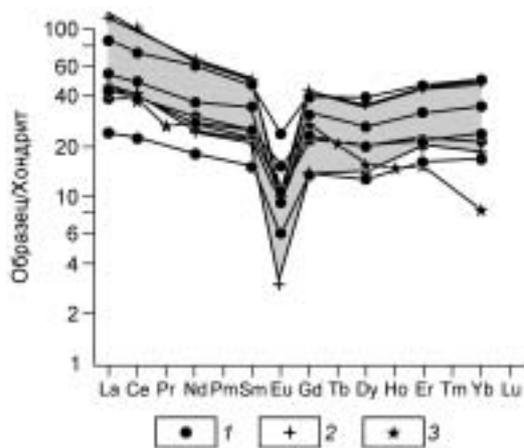
воды (2,31—4,30 мас. %) установлены в рудоносных расплавах, а наиболее сухими (0,45—0,73 мас. %) являются дорудные расплавы, характеризующиеся максимальными содержаниями меди (см. табл. 1).

Температуры гомогенизации расплавленных включений имеют различные величины: для рудоносных и пострудных порфиров они близки и изменяются в диапазоне 1050—1180 °С, а для дорудных — значительно выше и составляют 1230—1250 °С. Температуры гомогенизации рудоносных и пострудных порфиров (1050—1180 °С) сопоставимы с температурами кристаллизации кислых вулканогенных расплавов, установленными многими другими исследователями [Карпухина и др., 1998; Лапухов и др., 2001]. Однако завышенные величины температуры дорудных порфиров (1230—1250 °С) требуют объяснения.

Месторождение Кызыл-Таштыг приурочено к Кызыл-Таштыгской вулканотектонической депрессии размером 4 × 12 км и генетически и пространственно связано с дифференцированной базальт-андезит-дацитовой формацией известково-щелочной серии. Участок месторождения сложен нижнекембрийскими терригенно-вулканогенными отложениями туматтайгинской свиты (Є₁t). В ее строении выделяются три разнородные пачки: нижняя существенно базальтового состава; средняя (рудовмещающая), сложенная чередованием глинисто-кремнистых алевролитов, вулканомиктовых песчаников и туфов андезит-базальтового и дацитового составов и верхняя, представленная в основном андезит-базальтами и

Рис. 5. Распределение редкоземельных элементов в кислых расплавах во включениях.

1 — в кварце андезит-дацита месторождения Кызыл-Таштыг; 2 — в кварце риолита месторождения Юбилейное (поле распределения); 3 — в риолитах Курило-Камчатской островной дуги. Содержания элементов нормированы к составу хондрита согласно [Boynnton, 1984].



туфами среднего состава (рис. 4). Кроме того, в разрезе толщи широко развиты субвулканические тела, являющиеся комаматами всех эффузивных аналогов. Оруденение приурочено к вулканогенно-осадочным отложениям базальт-андезит-дацитовый пачки. Оно представлено компактной линзовидной залежью зонального строения, сформировавшейся на дне морского бассейна синхронно с вмещающими породами [Зайков, 1991].

С целью выявления особенностей состава расплава и его эволюции было проведено изучение расплавных включений в минералах из пород подрудных, рудовмещающих и надрудных вулканогенных комплексов. По расплавным включениям в клинопироксене базальтов и кварце андезитов были изучены химический состав, содержания рудных, редких и редкоземельных элементов, а также летучих компонентов и проведено их сопоставление с данными, полученными непосредственно по породам (табл. 3—5, рис. 5). Для всех расплавных включений отмечается более кислый состав по сравнению с составом вмещающих их пород и обеднение глиноземом (Al_2O_3), железом (Fe_2O_3) и Na_2O . Температуры гомогенизации включений в общем согласуются с основностью пород: в клинопироксенах базальтов подрудной пачки они составляют 1085—1210 °С, в андезит-базальтах надрудной пачки изменяются в пределах 1130—1190 °С, в кварце андезит-дацитов рудовмещающей толщи не превышают 920—1150 °С.

Анализ расплавных включений в кварце андезита показал, что кислый расплав, установленный в них, обогащен РЗЭ, а конфигурация спектров в целом совпадает с данными по включениям в риолитах Рудного Алтая и отвечает риолитам Курило-Камчатской островной дуги (см. рис. 5). Фиксируется отчетливый европиевый минимум, который свидетельствует о дифференциации кислых расплавов с фракционированием плагиоклазов, но наклон спектров РЗЭ довольно пологий, что указывает на более высокие по сравнению с аналогами Алтая и Камчатки содержания в них тяжелых лантаноидов.

Определение с помощью ионного зонда в расплавных включениях содержания рудных и редких элементов показало в основном кларковые их величины (см. табл. 5). Исключение составляет медь, концентрации (325—1028 г/т) которой, как и в расплавах месторождения Юбилейное, превышают кларковые величины в 30—100 раз. В отличие от кислых расплавов рудоносных риолитовых порфиров месторождения Юбилейное кислые расплавы включений в андезит-даците рудовмещающей пачки месторождения Кызыл-Таштыг характеризуются значительно меньшими концентрациями воды (0,41—0,87 мас.%).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования расплавных включений в минералах из магматических пород колчеданных рудных полей на примере месторождений Юбилейное (Рудный Алтай) и Кызыл-Таштыг (Восточная Тува) позволили выявить общие особенности и определенную специфику геохимической эволюции расплавов при развитии колчеданных рудно-магматических систем в верхнем девоне и нижнем кембрии.

В целом изучение расплавных включений в кварце порфиров участка колчеданно-полиметаллического месторождения Юбилейное показало сложную картину эволюции магматической системы при его образовании. На ранних этапах развития магматического очага формировались сухие (0,19—0,77 мас.% H_2O) высокотемпературные (1230—1250 °С) кислые расплавы с высокими содержаниями меди (844—7118 г/т), которые сменялись водонасыщенными (1,56—4,30 мас.% H_2O) магматическими системами также с повышенными концентрациями рудного компонента (124—1393 г/т). Резкое увеличение флюидной составляющей в расплавах, вероятно, создавало условия для последующего отделения флюидной фазы и насыщения ее рудными компонентами за счет экстрагирования из расплава, что в итоге приводило к образованию рудообразующих гидротермальных растворов и формированию собственно колчеданно-полиметаллического месторождения. На заключительном этапе эволюции системы формировались магмы, обедненные флюидными (0,94—1,84 мас.% H_2O) и рудными компонентами (25—97 г/т).

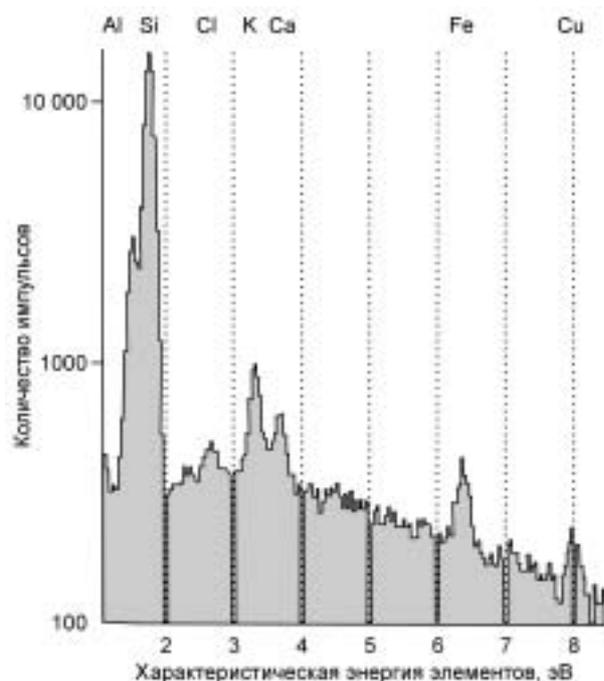
Как видно из вышеприведенного, обогащение медью кислых расплавов происходит на ранних этапах развития магматической системы, когда типично коровые элементы (свинец и барий) имеют в них кларковые величины. Установлено, что практически сухие кислые расплавы с „аномально“ высокими

температурами гомогенизации имеют максимальные содержания меди. Учитывая, что изученные риолитовые порфиры являются составной частью контрастной базальт-риолитовой формации и, очевидно, формируются в коровых очагах под воздействием базальтовой магмы, логично предположить, что высокие температуры и низкие содержания воды могут быть следствием прогрева базальтовыми магмами. Такие высокие температуры гомогенизации расплавных включений в кварце кислых пород ранее были получены А.Д. Бабанским с соавторами [1995] и объяснялись потерей летучих компонентов кислым расплавом вследствие его нагрева снизу поднимающейся базальтовой магмой. Однако с этих позиций трудно объяснить содержания меди в кислых расплавах на 2 порядка выше кларка даже в основных породах. По причине низкой концентрации воды в расплаве также исключается привнос меди флюидной фазой. В то же время содержание меди во включениях чрезвычайно неравномерное и меняется от кларковых величин до 0,71 % в разных включениях одного образца (см. рис. 3). С целью выявления во включениях обособленного сульфидного расплава были проведены их исследования на электронном микроскопе с помощью приставки „Link“ и на рентгеноспектральном микроанализаторе. Значимых концентраций серы во включениях не выявлено. Однако по данным анализа на электронном микроскопе зафиксирован пик повышенных содержаний хлора (рис. 6).

Исследования расплавных включений в кварце других типов месторождений [Dietrich et al., 1999; Stancea et al., 2001] показывают, что на Cu-порфировом месторождении Валя-Морий (Румыния) во включениях с содержанием Cu до 0,16 % содержится до 0,19 % Cl, при этом наиболее сильно обогащены этими элементами газовые пузырьки. В кварце оловопорфировой системы установлено, что повышенные концентрации меди также связаны с газовой фазой расплавных включений. Все это дает основание предположить, что и в нашем случае привнос меди в сухой кислый расплав, вероятно, осуществлялся в газовой фазе, возможно, в виде хлоридных комплексов или соединений. По данным многих исследователей, хлор практически постоянно присутствует в расплавах. Например, В.И. Коваленко с соавторами [2000] установили, что концентрации его в расплавах островодужных областей независимо от содержания SiO₂ достигают 0,5 мас.%, а в работе [Чевычелов, Сук, 2003] показано, что количество хлора в кислых расплавах достигает 4,7 мас.%.

Несколько иная картина развития рудно-магматической системы устанавливается на месторождении Кызыл-Таштыг. В целом вулканизм здесь представлен дифференцированным рядом с гомодромной последовательностью развития — от базальтовых (дорудных) к андезит-дацитовым (рудовмещающим) и вновь к базальтовым (надрудным) образованиям.

В отличие от рудноалтайских порфиров расплавные включения в клинопироксене базальтов и кварце андезитов имеют более кислый состав по сравнению с вмещающими их породами. С ростом SiO₂ во включениях уменьшаются содержания Al₂O₃, Fe₂O₃ и Na₂O, а также температуры их гомогенизации. Такие же особенности были отмечены М.Л. Толстых и др. [2003] для расплавных включений во вкрапленниках андезитов вулканогенных пород Курило-Камчатского региона и свидетельствуют о кристаллизационной дифференциации этих расплавов на ранней стадии развития.



В отличие от Рудного Алтая, где кислые породы в составе базальт-риолитовой формации резко преобладают и имеют коровую природу [Гаськов и др., 1999], кислые породы на месторождении Кызыл-Таштыг характеризуются подчиненным развитием. Установленный факт, что расплавы, захваченные в виде включений в клинопироксене и кварце, имеют более кислый состав по сравнению с породой-хозяйном, явно указывают на дифференциацию первичных базальтовых расплавов и логично предположить, что кислые расплавы и дацитовые породы рудовмещающей пачки, являются остаточным расплавом, образующимся в результате кристаллизационной дифференциации мантийных базальтов. Такая природа кислых расплавов хорошо согласуется с гомодромной последовательностью развития вулканизма на участке месторождения Кызыл-Таштыг.

Рис. 6. Пики значимых элементов по данным анализа расплавного включения на электронном микроскопе.

Повышенные концентрации меди (325—1028 г/т) здесь могут быть связаны с накоплением ее в остаточных расплавах за счет более высокого кларка этого элемента в исходных основных породах. Невысокие концентрации воды (0,41—0,87 мас.%) в этом кислом расплаве, по-видимому, способствовали сохранению повышенных содержаний меди в силикатном расплаве на этом этапе эволюции магматической системы.

ВЫВОДЫ

Исследования развития колчеданных рудно-магматических систем в Рудном Алтае и Туве показали, что при некоторых чертах их сходства (островодужные условия образования, дискретное многоэтапное проявление, связь с колчеданно-полиметаллическим оруденением) отмечаются и существенные отличия.

Базальт-риолитовая формация Рудного Алтая является мантийно-коровым образованием, что обусловило резкое преобладание в ее составе кислой составляющей. На ранних этапах ее развития формировались кислые высокотемпературные сухие расплавы с высоким содержанием меди (844—7118 г/т). Обогащение расплавов медью связано, вероятно, с привнесением ее из мантии газовыми потоками. Наиболее вероятная форма нахождения меди в расплаве — это хлоридные комплексы. При дальнейшем развитии системы сухие расплавы сменялись водонасыщенными и содержание меди в силикатном расплаве уменьшалось (124—1393 г/т), что, по-видимому, было связано с обособлением флюидной фазы и экстрагированием в нее части меди из расплава. На заключительных этапах развития магматической системы формировались магмы, обедненные флюидными и рудными компонентами.

Базальт-андезит-дацитовая формация северо-востока Тувы представляет собой продукт дифференциации мантийных базальтоидов. Кислые породы играют в ней подчиненную роль и являются остаточными продуктами кристаллизационной дифференциации исходной базальтовой магмы, а повышенные содержания меди в расплавах (325—1028 г/т), очевидно, связаны с накоплением ее в остаточных расплавах за счет повышенного кларка этого элемента в исходных основных породах. Невысокие концентрации воды (0,41—0,87 мас.%) в этом расплаве, по-видимому, способствовали сохранению повышенных содержаний меди в силикатном расплаве на этом этапе эволюции магматической системы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 05-05-64341), интеграционного проекта совместных исследований Сибирского и Уральского отделений РАН (№ 6.8), целевой программы Минобрнауки Российской Федерации (проекты РНП.2.1.1.1840, РНП.2.1.1.702) и гранта Научной школы (НШ-4933.2006.5).

ЛИТЕРАТУРА

Авдониин В.В. Ликвация и формирование рудоносных вулканогенных комплексов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1987, 238 с.

Астафьев М.П. О генезисе Юбилейного полиметаллического месторождения на Рудном Алтае // Изв. вузов, Сер. Геология и разведка, 1982, № 1, с. 63—66.

Бабанский А.Д., Ашихмина Н.А., Коваленко В.И., Ляtifова Е.Н., Кононкова Н.Н. Исходная магма пород Верхнечегемского кальдерного комплекса (Северный Кавказ) по данным изучения включений в минералах // Докл. РАН, 1995, т. 344, № 2, с. 226—228.

Гаськов И.В., Дистанов Э.Г., Миронова Н.Ю., Чекалин В.М. Колчеданно-полиметаллические месторождения верхнего девона северо-западной части Рудного Алтая. Новосибирск, Наука, 1991, 121 с.

Гаськов И.В., Дистанов Э.Г., Калугин И.А., Тикунов Ю.В. Металлогеническая специализация и петрохимические особенности девонского вулканизма Рудного и Горного Алтая // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (5), с. 703—715

Дистанов Э.Г. Колчеданно-полиметаллические месторождения Сибири. Новосибирск, Наука, 1977, 349 с.

Зайков В.В. Рудоносные вулканические комплексы протерозоя и кембрия Тувы. Новосибирск, Наука, 1976, 127 с.

Зайков В.В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин (на примере колчеданноносных зон Урала и Сибири). М., Наука, 1991, 204 с.

Зайков В.В., Шадлун Т.Н., Масленников В.В., Бортников Н.С. Сульфидная залежь Яман-Касы (Южный Урал) — руины древнего „черного курильщика“ на дне Уральского палеоокеана // Геология рудных месторождений, 1995, т. 37, с. 511—529.

Карпухина В.С., Наумов В.Б., Баранов Э.Н., Кононкова Н.Н. Состав расплавов кислых вулканических пород верхнеуральского рудного района (Южный Урал) по данным изучения включений в кварце // Докл. РАН, 1998, т. 358, № 1, с. 100—103.

Коваленко В.И., Наумов В.Б., Ярмолюк В.В., Дорофеева В.А. Летучие компоненты (H_2O , CO_2 , Cl , F , S) в базитовых магмах различных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол // *Петрология*, 2000, т. 8, № 2, с. 131—164.

Кузбный В.С., Макаров В.А., Калеев Е.А., Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р., Бухаров Н.С., Глазунов С.П., Чупахин Л.М. Кызыл-Таштыгский колчеданно-полиметаллический рудный узел Восточной Тувы. Красноярск, 2001, 292 с.

Лапухов А.С., Симонов В.А., Ковязин С.В. Особенности формирования магматических комплексов Салаирского колчеданно-полиметаллического рудного поля (Западная Сибирь) // *Геология и геофизика*, 2001, т. 42 (8), с. 1186—1195.

Ротараш И.А., Самыгин С.Г., Гредюшко Е.А., Кейльман Г.А., Милеев В.С., Перфильев А.С. Девонская активная континентальная окраина на Юго-Западном Алтае // *Геотектоника*, 1982, № 1, с. 44—59.

Симонов В.А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1993, 247 с.

Симонов В.А., Зайков В.В., Ковязин С.В. Палеогеодинамические условия развития гидротермальных систем Кызыл-Таштыгского месторождения (Восточная Тува) // *Металлогения древних и современных океанов — 99: Рудоносность гидротермальных систем. Миасс, ИМ УрО РАН, 1999, с. 16—23.*

Симонов В.А., Зайков В.В., Ковязин С.В. Особенности распределения редких и редкоземельных элементов в кислых расплавах медно-колчеданного месторождения Яман-Касы (Южный Урал) // *Металлогения древних и современных океанов — 2002. Формирование и освоение месторождений в офиолитовых зонах. Миасс, ИМ УрО РАН, 2002а, с. 207—211.*

Симонов В.А., Ступаков С.И., Зайков В.В., Масленников В.В., Ковязин С.В. Особенности распределения редких и редкоземельных элементов в кислых расплавах колчеданно-полиметаллического месторождения Кызыл-Таштыг (Восточная Тува) // *Геохимия и петрология магматических процессов. Иркутск, Изд-во ИргТУ, 2002б, с. 52—54.*

Симонов В.А., Гаськов И.В., Ковязин С.В., Борисенко А.С. Эволюция геохимических параметров кислых расплавов при формировании колчеданных месторождений Рудного Алтая // *Докл. РАН, 2005, т. 403, № 5, с. 674—677.*

Соболев А.В. Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // *Петрология*, 1996, т. 4, № 3, с. 228—239.

Соболев А.В., Слущкий А.Б. Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм // *Геология и геофизика*, 1984 (12), с. 97—110.

Толстых М.Л., Наумов В.Б., Бабанский А.Д., Богоявленская Г.Е., Хубуная С.А. Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов, формировавших андезиты вулканов Курило-Камчатского региона // *Петрология*, 2003, т. 11, № 5, с. 451—470

Филатов Е.И. Полиметаллические месторождения фанерозоя. М., Недра, 1986, 196 с.

Чевычелов В.Ю., Сук Н.И. Влияние состава магматического расплава на растворимость в нем хлоридов металлов при давлении 0,1—3,0 кбар // *Петрология*, 2003, т. 11, № 1, с. 68—81.

Чернов В.И. Вулканогенные формации и порфиоровые интрузии Рудного Алтая. М., Наука, 1974, 264 с.

Яковлев Г.Ф., Яковлева Е.Б. Флюид-порфиоровые комплексы подвижных зон // *Эволюция вулканизма в истории Земли (Тр. 1-го всесоюзного палеовулканического симпозиума)*. М., 1973, с. 368—373.

Boynnton W.V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, 1984, p. 63—114.

Dietrich A., Lehmann B., Wallianos A., Traxel K. High copper and silver abundances in melt inclusions of Bolivian tin porphyry systems // *Mineral deposits: processes to processing (Proc. 5th Quadren. IAGOD Symp., London, 22—25 Aug., 1999)*. Rotterdam; Brookfield (Vt), Balkema, 1999, p. 337—339.

Grancea L., Cuney M., Leroy J.L. Using melt inclusions to understand magmatic-hydrothermal evolution in epithermal-porphyry copper environment: some examples from mining areas of Peru and Romania // *Miner. deposits at the beginning of the 21st century (Proc. of the Joint 6 Biennial SGA-SEG Meeting, Krakow, 26—29 Aug., 2001)*. Liss etc., Balkema, 2001, p. 425—428.

Sobolev A.V., Danyushevsky L.V. Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga Trench: constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas // *J. Petrol.*, 1994, v. 35, p. 1183—1211.

*Поступила в редакцию
6 марта 2006 г.*