

## ГАЛОГЕНЫ – КРИТЕРИИ РУДОНОСНОСТИ ГРАНИТОИДОВ НА МЕДНО– ПОРФИРОВОЕ ОРУДЕНЕНИЕ: НОВНИКОЛАЕВСКО-ТАРУТИНСКАЯ РУДОНОСНАЯ ЗОНА

**В.В. Холоднов, И.Н. Бушляков**

Для пород и руд медно-порфировых месторождений различных регионов [Сотников и др., 1984, 1991; Parry et al., 1978; Dilles, 1987; Бушляков, Холоднов, 1986; Чашухина и др., 1989 и др.] установлены широкие вариации хлоро- и фтороносности. Это зависит от состава рудоносных магматических серий, состава субстрата в зонах магмогенерации и палеогеодинамического фактора. С количеством хлора и фтора в рудно-магматическом процессе коррелируется геохимический профиль оруденения. На медных, часто с повышенной золотоносностью месторождениях, формирующихся преимущественно в островодужных условиях, рудообразующие флюиды характеризуется высоким содержанием хлора. На молибденовых месторождениях в составе вулканоплутонических поясов, наложенных на структуры со зрелой континентальной корой, определяющим среди летучих становится F. Выявлена зависимость активности Cl и F в рудно-магматическом процессе от типа щелочности продуктивных магматических серий. Существенно натровые серии в большей степени специализированы на Cl, тогда как калиевые – на F. С хлор-натриевым типом продуктивного андезитоидного магматизма ассоциирует преимущественно медно-порфировая минерализация, а с фтор-калиевым – медно-молибден-порфировая, при широком развитии в зонах околорудной калишпатизации.

Медно-порфировая минерализация на Урале, как и в других регионах, преимущественно связана с поздними порфировыми гранитоидами, которые образуют как самостоятельные малые интрузии и дайковые поля, так и являются заключительными дифференциатами ранних более крупных диорит-гранодиоритовых

интрузий андезитоидного ряда. В составе медно-порфировой минерализации Урала установлено не только традиционное прожилково-вкрапленное оруденение, но и сопутствующее ему полиметаллическое, скарновое и золото-кварцевое. В последние годы выявлено и нетрадиционное для Урала промышленное мезо-, эпitherмальное Au-порфировое оруденение (Березняковское месторождение).

Образование Cu-порфировых месторождений ( $D_3 - C_1$ ), в составе Новониколаевско-Тарутинской рудоносной зоны, связано с формированием протяженных по вертикали рудно-магматических колонн, характеризующихся эволюцией в составе оруденения на различных срезах их глубинности [Грабежсв, 2000]. На более глубоких (гип- и мезоабиссальных) уровнях образуется преимущественно прожилково-вкрапленное Cu-Mo-порфировое оруденение, нередко сочетающееся с бедным скарново-магнетитовым (Тарутинский тип скарново-медно-порфировых месторождений). На более высоком – это мелкие жильные и штокверковые тела, обогащенные Au, Ag, Zn, As (Новониколаевское рудное поле). На наименее глубинном субвулканическом уровне преобладает комплексное Cu-Zn-Ag-Au-порфировое оруденение (Березняковский тип). Ниже приведена характеристика режима галогенов в процессе формирования двух отличных по уровню глубинности рудно-магматических систем Новониколаевско-Тарутинской рудоносной зоны: Тарутинского и Михеевского месторождений.

**Тарутинское месторождение.** В продуктивных гранитоидах Тарутинского рудного поля (Карамысовский массив) в соотношении Cl и F в апатитах четко выражены две тенден-

ции (рис. 1а). В диоритовых порфиритах кристаллизация апатита происходит при накоплении Cl и F и выдержанности отношения  $Cl / F = 0,9$ . В гранодиоритах процесс кристаллизации апатита сопровождается уже снижением содержания Cl при увеличении количества F. Апатиты гидротермально-метасоматических образований Тарутинского месторождения, в целом, характеризуются низкими концентрациями Cl. При этом, в хлоритизированных и эпидотизированных породах апатиты заметно богаче Cl (до 0,20%) и бедны F (1,0 – 1,5%), а в серицитизированных они более фтороносны (до 2,0% и более) при снижении содержания Cl до 0,05%.

В апатитах из диоритовых порфиритов Варненского массива (рис. 1б) концентрации Cl являются для данного района наиболее высокими (до 1,93%). В процессе кристаллизации происходит накопление Cl и F, при высоком значении отношения  $Cl / F = 1,2$ : от мелких игольчатых включений апатита в порфириновых выделениях плаггиоклаза к более крупному межзерновому апатиту и апатиту, находящемуся в основной массе. Постмагматический апатит, образующий включения в хлорите, имеет пониженные содержания Cl (0,97%) и F (1,02%).

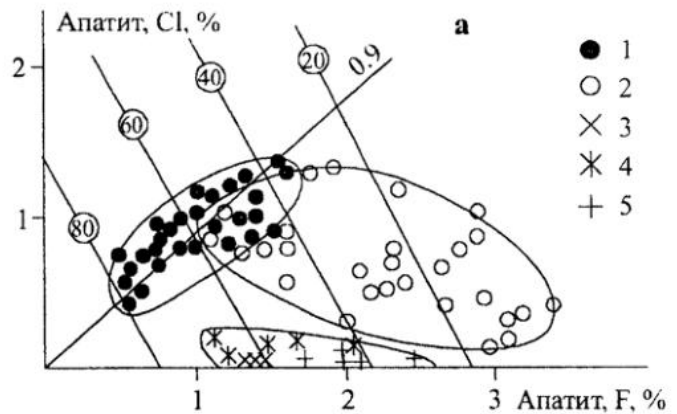
**Михеевское месторождение.** Соотношение содержаний Cl и F в апатитах из пород Михеевского месторождения свидетельствует (рис. 1б), что на раннем этапе в

расплаве происходит значительное дискретное накопление только Cl. На это указывает увеличение содержаний Cl в апатитах: от габбро-диоритов ( $Cl / F = 0,2$ ), к диоритам и диоритовым порфиритам ( $Cl / F = 0,8$ ). Максимальные концентрации Cl в апатитах из включений в амфиболе на этом этапе достигают 1,4%, при содержании F – 1,6%. Дальнейшая эволюция магматического расплава: от диоритов ( $Cl / F = 0,8$ ) к кварцевым диоритам ( $Cl / F = 0,2$ ) и далее к адамеллит-порфирам ( $Cl / F = 0,05$ ), сопровождалась уже снижением концентраций Cl в апатитах, при существенном росте содержаний F (до 3,5 – 4% в апатитах адамеллитов).

Тенденция снижения содержаний Cl проявляется и в процессе кристаллизации отдельных пород (диоритов и кварцевых диоритов), но в этом случае она характеризуется более постепенным снижением концентраций Cl в апатитовых включениях. Снижение концентраций Cl здесь в целом достигает 1,0%. Кроме того, в апатитовых включениях адамеллит-порфира с ростом содержаний F наблюдается снижение содержаний S от 0,10% до 0,04%.

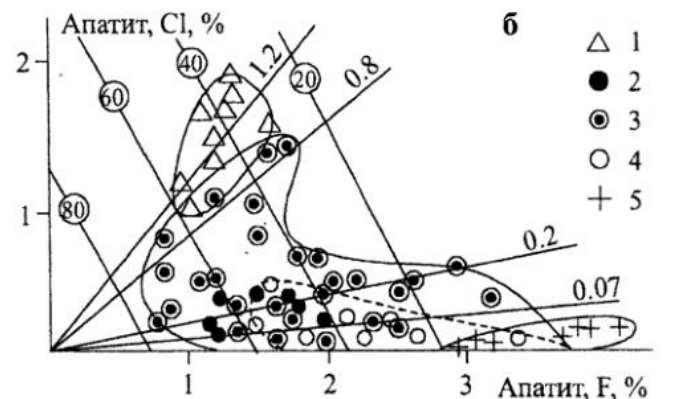
Апатиты позднего Соляноозерского массива бедны Cl (< 0,1%) и максимально обога-

Рис. 1. Соотношение содержаний Cl и F в апатитах продуктивных гранитоидов и околорудных метасоматитов Тарутинского рудного поля (а), гранитоидов Новоиколаевского рудного поля и Варненского массива (б).



а) 1 – диоритовые порфириды, 2 – плаггиогранодиориты, 3 – гранодиориты серицитизированные и карбонатизированные, 4 – хлоритизированный плаггиогранит, 5 – серицитизированный и карбонатизированный гранит-порфир.

б) 1 – диоритовые порфириды Варненского массива, 2-5 – Михеевское месторождение: 2 – габбро-диорит из ксенолита в диоритах ранней фазы, 3 – диориты и диоритовые порфириды, 4 – кварцевые диориты, 5 – адамеллиты и адамеллит-порфиры. Параллельные линии с цифрами – теоретическое содержание гидроксилapatита (мол. %).



щены F (до 4,0%). На повышенную фтороносность этого массива указывает и значительное содержание F в мусковитах (0,75%). Как известно, с поздними порфировыми дайками Соляноозерского массива связана молибденовая микропрожилковая минерализация [Грабежев и др., 1986].

Сравнительный анализ состава апатитов Тарутинского и Михеевского месторождений, таким образом, показал наличие двух особенностей в режиме галогенов при их формировании. Первая связана с различной динамикой поведения Cl и F при кристаллизации различных пород. В Тарутинском месторождении снижение концентраций Cl в апатитах при кристаллизации наиболее богатых хлором пород (гранодиоритов) происходит менее интенсивно, чем при кристаллизации богатых хлором диоритов и диоритовых порфиритов Михеевского месторождения. Эта особенность подтверждает связь с их возможным формированием в условиях различных фаций глубинности [Грабежев, Бел-

городский, 1992]: Тарутинского месторождения – в более глубинных условиях, а Михеевского в менее и при большем градиенте РТ-параметров. Этим обусловлена интенсивная дегазация расплавов при формировании Михеевского месторождения. Обилие богатых Cl флюидно-солевых включений подтверждает наличие такой дегазации. Концентрации Cl из таких включений последовательно возрастают от 1,8 – 2,1% Cl в минералах диоритов, до 4,2 – 5,6% Cl в кварцевых диоритах и далее до 10 – 11,7% Cl в адамеллитах, при очень низких концентрациях F (0,05 – 0,10%).

Вторая особенность связана с тем, что на Михеевском месторождении, в сравнении с Тарутинским, рудно-магматическая система раскрылась на более раннем этапе формирования. Наиболее интенсивное снижение концентраций Cl здесь приходится на более основные по составу породы (диориты, диоритовые порфиры). На этом этапе в Тарутинской системе еще происходило накопление летучих. Она раскрылась на этапе формирования гранодиоритового расплава. Тарутинское месторождение в этом отношении может являться близким фациальным аналогом Верхнеуральского Cu-Mo-порфирового месторождения, где также главный этап выноса Cl был связан с кристаллизацией пород гранодиоритового состава (рис.2). Сходство подтверждается и близкой динамикой поведения Cl и F в процессе кристаллизации апатитов в гранодиоритах и других породах этих месторождений.

**Верхнеуральское месторождение.** Для месторождения характерен рост содержаний Cl от 0,52% в апатитах монцогаббро, до 1,2% в апатитах гранодиорит-порфиров и рост отноше-

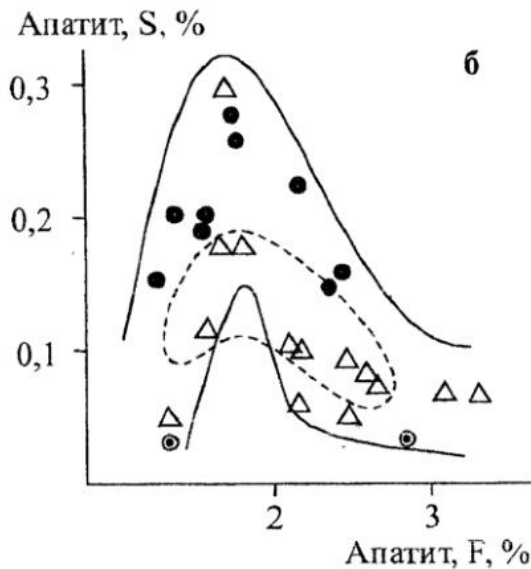
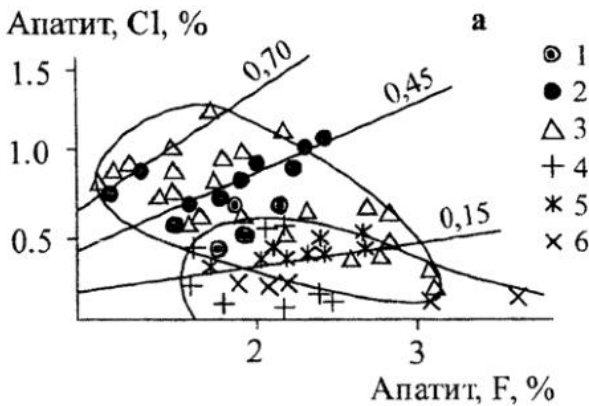


Рис. 2. Соотношение содержаний Cl, S и F в апатитах из магматических пород и околорудных метасоматитов Верхнеуральского медно-молибден - порфирового месторождения:

а) 1 – монцогаббро; 2 – кварцевый сиенит; 3 – гранодиорит-порфир; 4 – гранодиорит интенсивно серицитизированный и хлоритизированный; 5 – хлорит-карбонат-альбитовый метасоматит; 6 – карбонат-серицит-кварцевый метасоматит;

б) условные обозначения те же. Пунктирной линией ограничено поле состава апатитов в карбонат-серицит-кварцевых метасоматитах.

ния Cl/F от 0,3 в апатитах монцогаббро, до 0,45% в кварцевых сиенитах и до 0,70 в ранних генерациях апатита в гранодиорит-порфирах. В процессе кристаллизации монцогаббро и сиенитов наблюдается накопление Cl и F при выдержанности отношения Cl/F. При кристаллизации гранодиорит-порфиров содержание Cl снижается на 1% (от ранних генераций апатита к поздним), при росте F на 2%. Для серы, находящейся в структуре апатита, также характерен рост содержаний от монцогаббро к кварцевому сиениту и гранодиорит-порфиру. Максимум ее концентраций (0,30%) наблюдается при содержании F в апатитах около 2,0%. При дальнейшем росте F в поздних генерациях апатита гра-

нодиорит-порфира содержание S снижается до 0,05% (рис.26). На накопление S в процессе дифференциации указывает рост ее содержаний (до 0,5 % и более) непосредственно в самих породах (кварцевых сиенитах и гранодиоритах). В более кислых породах валовые концентрации S снижаются до 0,05%. С учетом данных по распределению S в апатитах, это указывает на первично-магматический источник серы в этом месторождении.

Микрозондовым сканированием выявлена неоднородность (зональность) в распределении Cl, F и S в отдельных кристаллах апатита гранодиорит-порфиров (рис.3). Интенсивное накопление Cl наблюдается в краевых зонах

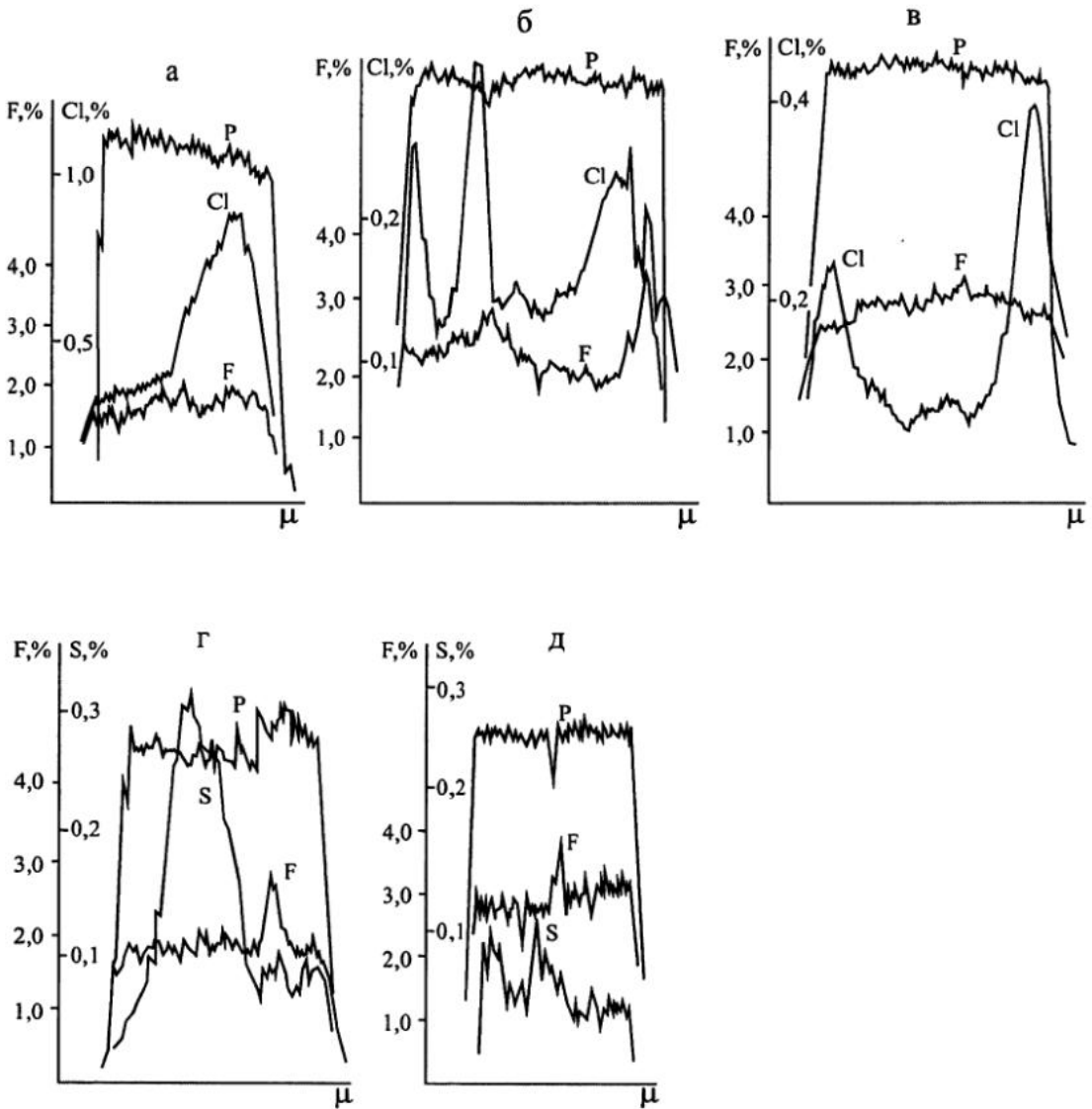


Рис. 3. Характер зональности Cl, S и F в кристаллах апатита из гранодиорит-порфиров Верхнеуральского месторождения.

На верхнем рисунке – с преимущественным накоплением Cl в краевых зонах кристаллов. На нижнем рисунке: г – с максимальными концентрациями S в центральной зоне кристаллов, д – с накоплением S в краевой зоне.

ранних кристаллов. Этот тип распределения ближе соответствует первой тенденции охарактеризованной выше. Содержание S меняется в обратной корреляции с количеством F. Встречаются кристаллы, в которых максимум S приурочен к их центральным зонам. Такое распределение серы подтверждает ее изоморфный характер и не связано с включениями сульфидов.

В целом, в процессе формирования продуктивных порфировых гранитоидов Верхне-Уральского месторождения по режиму галогенов также могут быть выделены два последовательных этапа: более ранний – с синхронным накоплением Cl и S в расплавах кварцевых сиенитов и гранодиорит-порфиров и последующий с выносом Cl и S. Он проявляется в процессе кристаллизации флюидонасыщенного гранодиоритового расплава. Остаточный гранодиоритовый расплав на данном месторождении является важным источником Cl, F и S в составе рудообразующих флюидов.

Характер распределения Cl, S и F в апатитах из хлорит-карбонат-альбитовых и карбонат-серицит-кварцевых метасоматитов Верхнеуральского месторождения (рис.2) обнаруживает заметную унаследованность от распределения этих летучих компонентов в составе магмогенных апатитов гранодиорит-порфиров.

Здесь также отмечается связь между интенсивностью процессов серицитизации и хлоритизации с количеством Cl и F в составе гидротермальных апатитов. Наиболее значительные концентрации F (>2,5 %) наблюдаются в составе апатита из жильного серицит-кварцевого метасоматита, а Cl (до 0,7%) – в апатите из хлорит-альбитового метасоматита. В последнем концентрации F и Cl обнаруживают прямопропорциональный тренд распределения – с соотношением Cl/F близким 0,15. Профильное сканирование отдельных кристаллов апатита хлорит-карбонат-альбитовых метасоматитов подтверждает, что режим галогенов при их образовании был неустойчивым и характеризовался как периодами более высокой активности Cl, так и F. Это проявляется и в отношении поведения S (рис.4).

С различием в составе дегазирующего расплава и фациями глубинности коррелируются особенности минерального состава оруденения на Тарутинском и Михеевском месторождениях. На Михеевском месторождении с более основным по составу дегазирующим расплавом связан иной (с большим медно-полиметаллическим уклоном) комплекс экстрагируемых флюидом элементов (Cu, Zn, Ag и др.). На Тарутинском месторождении при более диф-

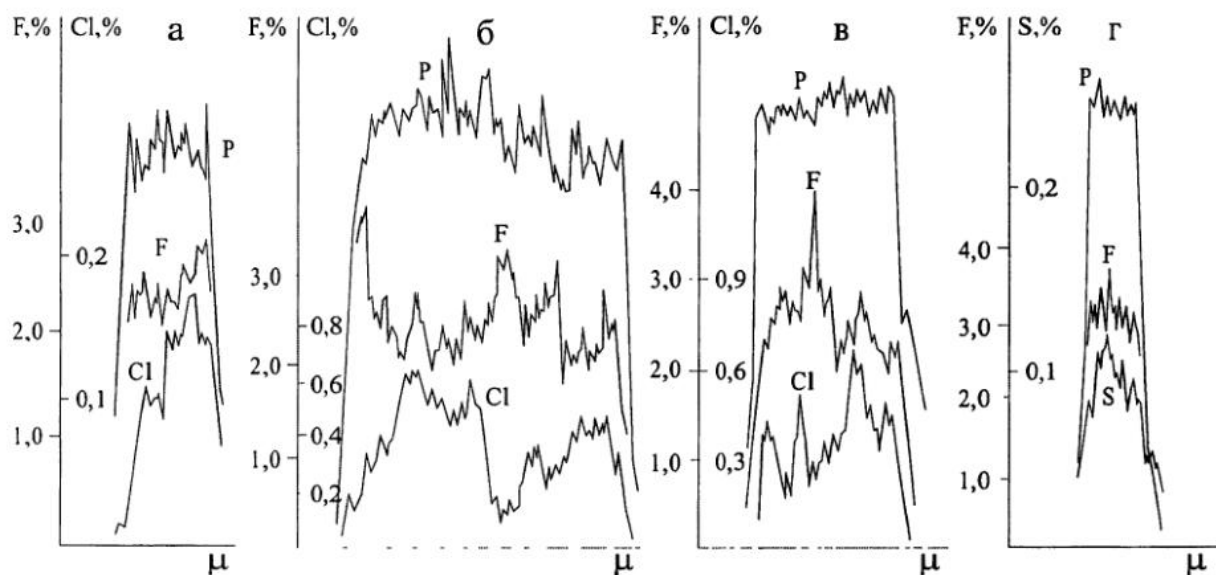


Рис. 4. Характер зональности Cl, S и F в кристаллах апатита из хлорит-карбонат-альбитового метасоматита Верхнеуральского месторождения.

а – с прямопропорциональным характером связи между содержаниями Cl и F (мелкие кристаллы); б – с обратнопропорциональным соотношением Cl и F (центральная часть раннего крупного кристалла); в – с комбинированным соотношением Cl и F в позднем прожилковидном апатите; г – характер распределения S и F в наиболее мелких кристаллах апатита.

ференцированном и кислом составе дегазирующего расплава во флюиде нарастают концентрации F. Это определяет дополнительную концентрацию в нем калия и Мо. Глубинный тип и длительная эволюция рудно-магматической системы этого месторождения определяет и более окислительный режим процессов петро- и рудогенеза. С этим связано образование магнетитовых скарнов и появление Мо в составе поздней прожилково-вкрапленной минерализации. В таких более окислительных условиях, как свидетельствуют экспериментальные данные [Иванов и др., 1999], степень окисления серы в растворе нарастает, определяя хлоридно-гидросульфидный (при  $SO_2 > H_2S$ ) состав рудообразующих растворов.

Применительно к этим месторождениям в стадийности дегазации расплава может быть намечен последовательный ряд в направлении:  $Cl \rightarrow F \rightarrow SO_2 + H_2S \rightarrow CO_2$ . Ранний, более высокотемпературный, этап этого ряда, характеризующийся преимущественным выносом сначала Cl, а затем F и  $SO_2$ , отвечает формированию более глубинного Тарутинского скарново-Си-Мо-порфинового месторождения, а поздний с усилением активности  $H_2S$  – формированию Au-полиметаллического (Cu, Zn, Ag, As) оруднения (Михеевское и другие месторождения). Последний тип [Грабежев, 2000] более характерен для верхних частей рудно-магматической колонны.

## ВЫВОДЫ

Эти данные подтверждают сложный хлоридно-гидросульфидный состав рудообразующих флюидов медно-порфиновых месторождений, при близости концентраций в них хлоридных и гидросульфидных соединений и переменных концентрациях фтора. Рост активности фтора в растворах усиливает специализацию месторождений на молибден и некоторые другие фторофильные элементы.

Магматогенный источник для Cl, S и F в рудообразующих флюидах Си-порфиновых месторождений Урала вполне вероятен. Это доказывается составом гидроксилсодержащих минералов, в первую очередь апатита, содержащего повышенные концентрации Cl и S. Для S магматогенный источник подтверждается также наличием большого количества акцессорных сульфидов в составе самих магматических пород. При этом содержание Си в рудных телах уральских месторождений находится в прямой

пропорциональной связи с количеством здесь серы [Грабежев, Белгородский, 1992].

Выявлена сложная динамика режима галогенов в процессах дифференциации и кристаллизации магматических расплавов, формирующих продуктивные Си-Мо-порфиновые комплексы Урала. Как и для скарново-магнетитовых и других рудно-магматических систем, здесь выделены два последовательных этапа в режиме галогенов. На раннем этапе, в условиях закрытой рудно-магматической системы, процессы дифференциации и кристаллизации характеризовались накоплением хлора, серы, воды и некоторых других летучих с формированием флюидонасыщенных диорит-гранодиоритовых расплавов. Второй этап при раскрытии системы отличался преимущественным выносом хлора, серы и воды в процессе кристаллизации флюидонасыщенных расплавов.

Образование околорудных метасоматитов на Тарутинском и Верхнеуральском месторождениях происходило при участии постмагматических растворов, закономерно меняющих свой состав. Участие более хлороносных растворов наблюдается при образовании скарново-магнетитового оруднения, эпидотизации и хлоритизации. При процессах микроклинизации, образовании серицит-кварцевых метасоматитов в растворах возрастает количество F. Рост содержания F в апатитах в этом случае может быть использован в качестве индикатора интенсивности процессов серицитизации, микроклинизации, специализации оруднения на молибден.

## Список литературы

- Бушляков И.Н., Холоднов В.В. Галогены в петрогенезисе и рудоносности гранитоидов. М.: Наука, 1986. 190 с.
- Грабежев А.И. Металлогения Мо-Аи-Си-порфиновых систем Урала // Металлогения и геодинамика Урала: Тезисы доклада III Всесоюзного металлогенического совещания. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 98-100.
- Грабежев А.И., Белгородский Е.А., Чащухина В.А. Медно-порфировая минерализация Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. 65 с.
- Грабежев А.И., Белгородский Е.А. Продуктивные гранитоиды и метасоматиты медно-порфиновых месторождений (на примере Урала) Екатеринбург: Наука, 1992. 198 с.
- Иванов И.П., Караджов М., Каназарян М. Зависимость рудных парагенезисов сульфидов и оксидов железа и меди от концентрации серы в растворе и фугитивности кислорода в интервале  $T=200-450^\circ$

С, при  $P=1$  кбар // Докл. РАН. 1999. Т. 369. № 4. С. 511-513.

*Сотников В.И., Берзина А.И.* Основные геолого-генетические и физико-химические характеристики медно-молибденовой рудной формации // Геология и геофизика. 1984. №8. С.66-74.

*Чашухина В.А., Грабежев А.И., Холоднов В.В.* О составе летучих в апатитах из гранитоидов, сопровождаемых медно-порфировой минерализаци-

ей // Ежегодник-1988, ИГГ. Свердловск: УрО РАН, 1989. С. 101-103.

*Dilles Y.H.* Petrology of the Yerington batholith, Nevada: Evidence for evolution of porphyry copper ore fluids //Econ.Geol. 1987. Vol. 82. N 7. P. 1750-1789.

*Parry W.T., Ballantyne G.H., Wilson I.C.* Chemistry of biotite and apatite from a vesicular quartz latite porphyry plug at Bingham, Utah //Econ. Geol. 1978. Vol. 73. N 7. P. 1308-1314.