

МЕДНО-МОЛИБДЕН-ПОРФИРОВАЯ РУДНАЯ ФОРМАЦИЯ: ПРИРОДА, ПРОБЛЕМА ОБЪЕМА И ГРАНИЦ

В.И. Сотников

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

С позиции генетической специфики и характера проявления рудоносного порфирового магматизма, геохимического профиля и зональности оруденения, геологических и физико-химических условий развития рудно-метасоматических процессов обсуждается проблема объема и границ Cu-Мо-порфировой рудной формации. Обосновывается, что с учетом общего медно-молибденового геохимического профиля месторождений (с отклонением к существенно медным, с одной стороны, и существенно молибденовым, с другой), их тесной связи с гранитоидными порфировыми интрузивами, имеющими глубинное базальтоидное инициирующее начало и формирующимися на относительно малых глубинах в относительно открытой обстановке, все разнообразные месторождения медно-молибден-порфирового семейства целесообразно объединять в общую Cu-Мо-порфировую рудную формацию с подразделением ее на медно-порфировую, молибден-медно-порфировую, медно-молибден-порфировую и молибден-порфировую субформации. При установлении границ рудной формации важным представляется анализ всех производных Cu-Мо-порфировой рудно-магматической системы с учетом общей зональности продуцируемого ею оруденения: Fe—Mo (Cu)—Cu (Mo)—Cu (Au)—Fe (Au)—Pb, Zn—Au (Ag).

Cu-Мо-порфировая рудная формация (объем и границы), мантийно-короевое взаимодействие, смешение разнотипных магм.

PORPHYRY COPPER-MOLYBDENUM ORE ASSOCIATION: GENESIS, DIMENSIONS AND BOUNDARIES

V.I. Sotnikov

The problem of the dimensions and boundaries of porphyry Cu-Mo ore association is discussed in terms of the genesis and occurrence of ore-forming porphyry magmatism, geochemistry and zoning of mineralization, and geologic and physicochemical conditions of ore-metasomatic processes. With regard to the common Cu-Mo geochemical profile of deposits (though essentially copper and essentially molybdenum deposits were also considered) and their intimate relationship with granitoid porphyry intrusions (of both deep-level basaltoid and shallow-depth geneses in a relatively open environment), all porphyry Cu-Mo deposits can be united into a single porphyry Cu-Mo ore association, which is subdivided into porphyry Cu, porphyry Mo-Cu, porphyry Cu-Mo, and porphyry Mo types. Defining the boundaries of ore association requires analysis of all products of a porphyry Cu-Mo ore-magmatic system with regard to the common zoning of produced mineralization: Fe—Mo (Cu)—Cu (Mo)—Cu (Au)—Fe (Au)—Pb, Zn—Au (Ag).

Porphyry Cu-Mo ore association (dimensions and boundaries), mantle-crust interaction, mixing of different magmas

В работах академика В.А. Кузнецова последних лет особое место занимало учение о рудных формациях, теоретическое значение которого особенно велико для развития основ прогнозно-металлогенического анализа, типизации рудных месторождений и решения генетических вопросов рудообразования. Понимая рудную формацию как устойчиво проявляющуюся в природе группу месторождений сходного минерального состава с закономерной последовательностью формирования минеральных парагенезисов, образующихся в близких геологических условиях, В.А. Кузнецов неоднократно обращал внимание на важность четкого представления об объеме и границах рудной формации, считая это одной из важнейших проблем рудно-формационного анализа [1]. При этом он возражал как против чрезмерного расширения объема понятия о рудной формации настолько, что оно в сущности сливается с понятием о генетических типах и группах месторождений, так и против обратной тенденции „к выделению большого числа рудных формаций, отличающихся одна от другой сравнительно незначительными вариациями минерального состава руд“ [1, с. 8].

Полученная за последнее время обширная информация о геолого-генетических особенностях многочисленных медно-молибденовых месторождений мира, геодинамических обстановках их формирования, геохимической специфике руд, источниках вещества и физико-химических условиях проявления магматических и рудно-метасоматических процессов дает возможность рассмотреть эту проблему в рамках выделяемой Cu-Мо-порфировой рудной формации [2].

Для месторождений медно-молибден-порфирового семейства при решении поставленных вопросов необходим учет комплекса признаков, отражающих взаимосвязь их геотектонических (геодинамических)

позиций, типа рудоносного порфирического магматизма и геохимического профиля оруденения (как в отношении основных, так и сопутствующих рудных компонентов).

Характерной особенностью, объединяющей эти месторождения, наряду с их связью с развитием порфирического магматизма, реализующегося в формировании штоко- и дайкообразных интрузивов, является постоянное сочетание в рудах меди и молибдена. Отношение этих элементов по отдельным месторождениям варьирует в широком диапазоне: от 250—300 и более до 1 и менее. Обычно отмечается корреляция Cu/Мо с типом рудоносного порфирического магматизма (по кремнеземистости доминирующих на месторождении порфирических образований). На этой основе часто выделяются различные типы месторождений: Cu-порфирический и Cu(Au)-порфирический, Мо-Cu-порфирический, Cu-Мо-порфирический, Мо-порфирический, для которых были предложены соответствующие модели: диоритовая [3], гранодиоритовая [4], монзонитовая [5] и гранитовая [4, 6]. В этих моделях оруденение связывается с магматизмом известковой, щелочно-известковой, известково-щелочной и субщелочной серий.

Значения индексов $S/I = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$ [7] для порфирических магматитов от диоритовой модели (максимальные Cu/Мо в рудах) к гранитовой (минимальные Cu/Мо) возрастают от 0,6—0,9 до 0,9—1,3, что свидетельствует о повышении доли седиментогенного материала в переплавляемых геологических образованиях при формировании рудоносных магм.

В этом же направлении обычно увеличиваются значения $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ рудоносных порфиров, фиксируя определенный рост коровой составляющей (см. рисунок). Низкая величина $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ — на уровне 0,703—0,705 характерна для островодужных рудоносных порфирических комплексов, в составе которых широко проявлены кварцевые диоритовые и тоналитовые порфириты, плагиигранит-порфиры [8, 9]. Руды островодужных месторождений существенно медные, обычно с повышенным содержанием золота и незначительным количеством молибдена. Хотя имеются и исключения: на месторождении Сипалей (Филиппины) среднее содержание Мо в рудах составляет 0,015 % [10, 11].

В работе [8] авторы полагали, что значение $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0 = 0,705$ является границей между островодужными интрузиями и интрузиями, развивающимися в континентальной обстановке, для которых этот параметр выше. Однако по мере увеличения данных по изотопии стронция рудоносных порфиров все

чаще стали появляться отклонения от такого предположения. В качестве иллюстрации

можно привести некоторые молибден- и медно-молибден-порфирические месторождения Сибири (Россия) и Монголии [12].

На месторождении Аксуг, Северо-Восточная Тува [13] (Cu/Мо в рудах составляет 40—70) рудоносный порфирический комплекс (порфирические тоналиты, кварц-плагноклазовые порфиры девонского возраста — 404—401 млн лет, $^{40}Ar/^{39}Ar$ метод) проявился после таннуольского диорит-тоналит-плагиигранитового комплекса (ордовик — импульсы: 497 ± 1 , 490—488 и 462 млн лет), формирование которого связано с существованием активной континентальной окраины в ходе закрытия Палеоазиатского океана [14]. Становление порфирического комплекса предшествовало рифтогенному магматизму, представленному трахибазальт-трахириолитовыми вулканитами и интрузиями субщелочно-лейкогранитовой формации с сиенитами [15]. Для рудоносных порфиров $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0 = 0,70454—0,70462$ [13]. Такое низкое значение этого параметра можно,



Начальные стронциевые отношения в порфирах рудоносных магматических комплексов.

Месторождения: 1 — Cu-порфирические; 2 — Мо-Cu-порфирические; 3 — Cu-Мо-порфирические; 4 — Мо-порфирические.

очевидно, объяснить наследованием породами рудоносного порфирикового комплекса петрогеохимических характеристик островодужного магматизма, представленного в районе кембрийскими вулканитами базальтовой формации с андезитами, дацитами и интрузиями преимущественно габброидов с диоритами [16].

Близкая геологическая ситуация характерна для существенно медного ($\text{Cu}/\text{Mo} = 90\text{—}100$) месторождения Хармагтай в Южной Монголии (298 ± 5 млн лет, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$), локализованного среди туфогенно-осадочных образований островодужного комплекса, формировавшегося при среднепалеозойской субдукции [16, 17]. Для диоритовых порфиритов рудоносного комплекса этого месторождения ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ еще ниже — 0,70418 [12].

Устойчиво низкие значения ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ получены для всех пермотриасовых интрузивных образований, развитых на площади месторождения Эрдэнэтуин-Обо в Северной Монголии ($\text{Cu}/\text{Mo} = 30\text{—}50$). Это эрдэнэтуинский рудоносный порфириковый комплекс (доминируют гранодиорит-порфиры) — от 0,70406 до 0,70424 и вмещающий селенгинский гранодиорит-граносиенит-плагиогранитовый комплекс — от 0,70393 до 0,70437 [12, 18]. Формирование пермотриасовых магматитов рудного узла, включая и широко развитые здесь вулканогенные базальтоидные образования, происходило в области влияния мантийного плюма, взаимодействующего с литосферой в условиях активной континентальной окраины [19].

Наконец, низким ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ = 0,70460 характеризуются рудоносные субщелочные порфиры на существенно молибденовом ($\text{Cu}/\text{Mo} = 2\text{—}4$) месторождении Сора, Кузнецкий Алатау [12, 20]. Они формируются в тыловодужной обстановке при переходе к рифтогенному режиму развития региона. Месторождение Сора по ряду характеристик соответствует молибден-порфириковому типу, описываемому „гранитовой“ моделью [4].

Такие же низкие значения ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ отмечаются и для других молибден-медно-порфириковых месторождений окраинно-континентальных магматических дуг: например, Эль-Сальвадор (0,70380—0,70417), Чукикамата (0,70432—0,70465), Эль-Абра (0,70447—0,70457), Лос Пеламбрес (0,70439—0,70461) и другие в Чили [21, 22]. В целом же для этого типа месторождений (особенно медно-молибден-порфирикового) более характерны относительно повышенные первоначальные $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, находящиеся в диапазоне 0,704—0,710, что указывает на некоторую контаминацию рудоносной магмы веществом континентальной коры [23—27].

Повышенные значения ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ установлены для месторождений молибден-порфирикового типа, которые встречаются в пределах окраинно-континентальных магматических дуг и в тыловодужных рифтогенных зонах [28]. Это имеет место в случае кайнозойских месторождений рудного пояса Колорадо, где для месторождения Клаймакс с содержанием $\text{Mo} = 0,15\text{—}0,6\%$; ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ в рудоносных риолитовых порфирах составляет 0,7105 [29]. Происхождение рудоносных магм типа Клаймакс связывается с частичным фракционным плавлением высокометаморфизованных докембрийских пород под воздействием поднявшейся из астеносферы базитовой магмы [30]. Для молибден-порфирикового месторождения Цзиньдуйчэн (Китай, провинция Шаньси), сопоставимого по многим геохимическим и изотопным характеристикам с типом Клаймакс, этот параметр равен 0,7087—0,7095 [31, 32].

Таковыми же повышенными ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ характеризуются рудоносные порфириковые комплексы, с которыми связываются существенно молибденовые месторождения (Cu/Mo в рудах около единицы) Восточного Забайкалья: Жирекен — 0,70642 [12, 33]; Шахтама — 0,70741—0,70782 [12, 34], а также Становика: Бадис — 0,70565—0,70633; Выходное — 0,70736; Чубачи — 0,70845—0,70902 [12]. Внедрение порфириковых интрузивов, в составе которых обычно доминируют гранит-порфиры, происходило при переходе регионов к рифтогенному режиму развития, широко проявившемуся здесь в конце юры и мелу [35, 36].

Из приведенного краткого обзора Sr-изотопной специфики разнотипных медно-молибден-порфириковых месторождений видно, что, за некоторым исключением, в целом достаточно отчетливо проявляется уменьшение Cu/Mo в рудах с ростом величины ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀ в рудоносных порфириковых комплексах. Последнее свидетельствует об определенной коровой контаминации рудоносных магм. Однако степень ее обычно незначительна и сохраняется доминирующая роль мантийной составляющей при магмообразовании. В этом же направлении увеличивается доля кремнекислых пород в составе рудоносного порфирикового комплекса.

Кроме вышеохарактеризованных четырех типов порфирикового оруденения с медью и молибденом имеется еще группа прожилково-вкрапленных медных и медно-молибденовых месторождений, связанных с развитием щелочно-базитового (и ультрабазитового) магматизма, которые многими исследователями также относятся к семейству порфириковых. Такие месторождения широко проявлены в Британской Колумбии (Гейлор-Крик, Лоррэйн, Карибу-Белл, Эйджакс-Уэст и др.), на Аляске (Грабстэйк) [37—39], в России: Рябиновое, Центральный Алдан [40], Кирганик, Камчатка [41]. Петрогеохимические особенности магматических образований, развитых в рудных полях этих месторождений, свидетельствуют о значительных глубинах формирования рудоносных магм.

Геохимическая специфика рассмотренных выше типов порфировых месторождений во многом определяется соотношением Cu и Mo — элементов, имеющих определенные различия по геохимической истории в магматических процессах. Медь является типичным халькофильным элементом, специфичным для базитовых магматитов. Максимальные ее концентрации характерны для основных пород и хондритов. Молибден относится к группе литофильных и сидерофильных элементов и отличается повышенной „гранитофильностью“. Кларковые Cu/Mo составляют: 166 (хондриты), 71 (основные породы), 40 (средние), 20 (кислые), что в определенной степени коррелирует со значениями Cu/Mo в рудах рассматриваемых месторождений в направлении от медно-порфировых к молибден-порфировым.

На медно-порфировых месторождениях в рудоносных магматических комплексах обычно преобладают кварцевые диоритовые порфириты, плагиогранит-порфиры. На Mo-Cu- и Cu-Mo-порфировых месторождениях широко развиты гранодиорит- и адамеллит-порфиры, а также кварцевые монзонит-порфиры. При этом дайки, пересекающие порфировые штоки, во многих случаях имеют более основной состав. Так, на месторождениях Центрального Казахстана (Коунрад, Саяк и др.), ассоциирующихся со штоками гранодиорит-порфиров, среди поздних дайковых образований встречаются кварцевые диоритовые и диоритовые порфириты, габбро-диабазы [42]. Дайки диоритовых и амфибол-биотитовых андезитовых порфиритов характерны для заключительного этапа развития рудно-магматической системы месторождения Эрдэнэтуин-Обо в Северной Монголии, в которой также доминируют гранодиорит-порфировые штоки [43]. На ряде месторождений встречаются лампрофировые дайки: керсантиты — Кальмакыр, Узбекистан; минетты — Бингхем, США [44] и др.

На молибден-порфировых месторождениях оруденение чаще ассоциирует со штоками гранит-порфиров, кварцевых порфиров и риолит-порфиров. В ряде случаев имеются дайки кварцевых диоритовых порфиритов, которые предшествуют штокам или пересекают их. Такая ситуация, в частности, зафиксирована на существенно молибденовых месторождениях Восточного Забайкалья: Жирекен [45], Шахтама [34, 46] и др. На Шахтаминском месторождении, где подобные дайки развиты довольно широко, для ранних даек кварцевых диоритовых порфиритов, которые прорываются штоком гранит-порфиров, получен Rb-Sr возраст 155 ± 8 млн лет, а для поздней диоритовой дайки, пересекающей гранит-порфиры, $151 \pm 1,8$ млн лет ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) [46]. На этих же месторождениях встречаются дайки лампрофиров, которые особенно характерны для Шахтамы, где они представлены спессартитами, керсантитами и малхитами, проявившимися до внедрения штоков гранит-порфиров. На последнем месторождении широко распространены сложные дайки, состав которых изменяется по мощности, простиранию и падению. Центральная их часть обычно представлена гранит-порфирами, а периферийные зоны — диоритовыми порфиритами и лампрофирами. Контакты между разновидностями пород резкие. В гранит-порфирах присутствуют ксенолиты диоритовых порфиритов и лампрофиров. Содержание Cu изменяется от 0,2 (диоритовые порфириты) до 0,001 мас.% (гранит-порфиры). Такие дайки формируются в результате неоднократного внедрения разнородного расплава [2].

Предрудные порфиритовые и лампрофировые дайки (спессартиты, керсантиты), которые прорываются штоко- и дайкообразными телами субщелочных гранит-порфиров, встречаются на существенно молибденовом Сорском месторождении в Кузнецком Алатау. Для этой группы даек получены $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировки $404,8 \pm 2,2$ и 402 ± 4 млн лет, а для гранит-порфиров — 398—388 млн лет [20]. Порфировые образования рассмотренных выше существенно молибденовых месторождений могут быть отнесены к классу бимодальных с резким доминированием гранитной составляющей.

Характерной особенностью диоритовых порфиритов и лампрофиров Шахтамы является постоянное присутствие крупных овоидов калишпата и оплавленных зерен кварца, окруженных реакционными каемками из роговой обманки и биотита. Часто наблюдаются резорбированные вкрапленники плагиоклаза с обратной зональностью. Подобные вкрапленники широко развиты в дайках основных пород и на многих других молибден-порфировых месторождениях Восточного Забайкалья. В свое время такие дайки были отнесены к гибридным порфирам [47]. Генезис вкрапленников связывался с реакционным взаимодействием магматического расплава с поступившими в него ксенолитами. Однако это предположение впоследствии было поставлено под сомнение: вкрапленники рассматривались как „магматические автогенные образования“ [48]. В последнее время происхождение подобных вкрапленников обычно связывается со смешением базитовых и кремнекислых магм при формировании гибридных пород.

Смешение разнотипных магм все чаще начинают привлекать для объяснения отдельных аспектов генезиса Cu-Mo-содержащих порфировых месторождений, в первую очередь это касается источников металлов и серы [44, 49—53]. При этом отмечается, что кремнекислые магмы, производные которых (штокообразные интрузивы) являются существенной частью в составе рудоносных порфировых комплексов на многих месторождениях этого типа, не могут полностью обеспечить баланс серы (а часто и меди) в рудно-магматической системе [54, 55 и др.]. Следует отметить, что при высоком S/(Cu + Mo) и больших запасах руды (сотни млн тонн) общее количество серы на таких месторождениях очень значительное.

В качестве иллюстрации подобной ситуации можно привести существенно молибденовое месторождение Жирекен в Восточном Забайкалье (Cu/Мо в рудах составляет 1—2), в гранит-порфирах которого были зафиксированы признаки смешения разнотипных магм. Для гранит-порфиров, резко доминирующих на месторождении, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ составляет 0,70642, что свидетельствует о мантийно-коровом взаимодействии при их формировании [33]. Значения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов (пирит, молибденит, халькопирит) на Жирекене колеблются в интервале от $-0,6$ до $+4,1$ ‰, соответствующем магматическому источнику серы [56]. Серосодержащие осадочные образования, которые могли бы быть дополнительным источником S, в ближайшем районе отсутствуют.

В гранит-порфирах Жирекена вкрапленники, составляющие до 40—50 % объема породы, представлены в основном КППШ, плагиоклазом (альбит-олигоклаз) и кварцем, реже биотитом. Основная масса порфиров тонкозернистая (0,01—0,05 мм) и состоит из тех же минералов. В основной массе встречаются шаро- и эллипсообразные мелкокристаллические выделения (до 3—5 мм в диаметре) с резкой гипидиоморфно-зернистой структурой, имеющие облик „игольчатых“ диоритов. В этих выделениях интерстиции между лейстами плагиоклаза, иногда образующими сферолитоподобные агрегаты, выполнены биотитом, калишпатом, кварцем. Плагиоклаз в выделениях по сравнению с плагиоклазом основной массы и порфировых вкрапленников более обогащен анортитовым компонентом (андезин). Из аксессуаров присутствуют магнетит, апатит, целестин.

По содержанию петрогенных компонентов глобулярные выделения резко отличаются от гранит-порфиров и несколько приближаются к поздним керсантитам (см. таблицу). Относительно последних для них характерны значительные концентрации SrO и SO₃. Магнетит из таких выделений отличается высоким содержанием хрома (Cr₂O₃ до 3,2 мас. %); присутствуют Cu (1500 г/т) и Мо (1—2 г/т), а также Co, Ni (30—50 г/т). В магнетите из гранит-порфиров при несколько большей концентрации Мо (3—10 г/т) содержание Cr₂O₃ (0,27—0,40 %) и Cu (до 100 г/т) заметно ниже.

Происхождение подобных по морфологии и составу глобулярных выделений в гранитоидах часто связывается с инъекциями базитового расплава в камеры, заполненные не полностью затвердевшей кислой магмой [57, 58 и др.]. В случае гранит-порфиров Жирекенского месторождения определенное участие в магматическом процессе базитового расплава, наряду с петрогеохимическими особенностями самих глобулярных выделений, косвенно подтверждается повышенными концентрациями Pd и Pt в молибденитах (соответственно 684 и 299 мг/т) [59], а также высокими температурами формирования этих порфиров [60]: 1020—910 °С (по расплавному включению), 850—790 °С (по биотитовому геотермометру). Следует отметить идентичность ⁴⁰Ar/³⁹Ar датировок основной массы гранит-порфиров ($158,5 \pm \pm 0,3$ млн лет) и заключенных в ней глобулярных кристаллических выделений ($158,9 \pm 1,3$ млн лет).

Определенным подтверждением участия смешения базитовых и кремнекислых магм в развитии жирекенского рудоносного порфирового комплекса является, очевидно, также присутствие в дайках керсантитов вкрапленников кварца и КППШ, часто с реакционными каемками. Зерна кварца (до 2—3 мм) обычно округлые, иногда амебообразные, несут следы деформационных преобразований и корродиро-

Химический состав (мас. %) порфировых пород и глобулярных кристаллических выделений в гранит-порфирах

Компонент	Гранит-порфиры	Глобулярные выделения в гранит-порфирах	Керсантиты
SiO ₂	70,60	54,62	59,00
TiO ₂	0,25	0,96	0,86
Al ₂ O ₃	13,40	13,80	14,60
Fe ₂ O ₃	1,01	3,84	2,61
FeO	3,23	3,63	4,67
MnO	0,03	0,08	0,06
MgO	0,57	5,66	4,91
CaO	1,20	2,94	3,02
Na ₂ O	3,33	3,50	4,33
K ₂ O	4,50	3,48	3,67
P ₂ O ₅	0,05	0,28	0,22
SrO	He опр.	2,80	He опр.
SO ₃	He обн.	2,20	0,30
П.п.п.	0,99	1,76	1,60
Сумма	99,16	100,45	100,07

ваны основной массой. Встречаются агрегаты зерен кварца. В кварце имеются раскристаллизованные включения, аналогичные по составу и структуре базису гранит-порфиров. Калишпат представлен крупными (до $1 \times 1,5$ см) выделениями, в ряде случаев с резорбированными краями и окруженными тонкой плагиоклазовой каемкой.

В гранит-порфирах в участках развития глобулярных выделений встречаются резорбированные кристаллы плагиоклаза с сетчатой текстурой и более основными внешними каймами. Согласно экспериментальным данным [61], такая текстура возникает при частичном растворении кислого плагиоклаза в более основном расплаве.

Апатит из глобулярных выделений содержит 5700—7200 г/т S, что, с учетом коэффициента распределения [62], соответствует концентрациям серы в формирующем их расплаве на уровне 630—800 г/т. В то же время при содержании 600—1000 г/т S в акцессорном апатите самих гранит-порфиров последний параметр для этих образований составляет всего 65—110 г/т. При таких повышенных концентрациях S в базитовом расплаве его инъекции в кремнекислую магму могли оказать существенное влияние на общий баланс серы в Cu-Мо-порфировой рудно-магматической системе. Судя по высоким содержаниям Cu (1500 г/т) в магнетите из глобулярных выделений, ее концентрация в базитовом расплаве также была повышенной.

Признаки смешения разнотипных магм при формировании порфировых образований устанавливаются и на других существенно молибденовых месторождениях Восточного Забайкалья, в составе рудоносных магматических комплексов которых доминируют гранит(гранодиорит)-порфиры. В этом плане представляет интерес обсуждавшееся выше месторождение Шахтама, для которого характерно несоответствие существенно молибденового профиля оруденения с повышенной ролью хлора в магматогенном флюиде [63, 64]. По данному параметру рудоносные порфиры Шахтамы приближаются к таковым Эрдэнэтского месторождения, где в рудах $Cu/Mo = 30—50$. Биотиты и позднемагматические акцессорные апатиты шахтаминских гранит-порфиров содержат соответственно 0,20 и 0,40 мас.% Cl, что близко к концентрациям хлора в аналогичных минералах из лампрофировых даек (0,17 и 0,50 мас.%). Следует отметить, что на Шахтаминском месторождении (при $Cu/Mo \leq 1$ в кварцевых жилах и в около-жилных прожилковых зонах) в эксплозивных брекчиях, окаймляющих шток гранит-порфиров, установлено прожилково-вкрапленное оруденение с $Cu/Mo = 8—15$.

Приведенные выше данные позволяют предполагать, что смешение сиалических магм с инъекциями глубинных базитовых расплавов является одним из факторов, определяющих формирование рудной минерализации Cu-Мо геохимического профиля с различными соотношениями меди и молибдена и общую продуктивность рассматриваемых порфировых рудно-магматических систем.

Учитывая общий медно-молибденовый геохимический профиль рассмотренных выше типов месторождений с отклонением к существенно медным, с одной стороны, и существенно молибденовым, с другой, их тесную ассоциацию с гранитоидными порфировыми интрузивами, имеющими глубинное базальтоидное иницирующее начало и формирующимися на относительно малых глубинах, все эти месторождения, очевидно, целесообразно объединять в Cu-Мо-порфировую рудную формацию с подразделением ее на медно-порфировую, молибден-медно-порфировую, медно-молибден-порфировую и молибден-порфировую субформации. Последние в определенной степени коррелируют с модельными типами рудных месторождений (mineral deposit models), которые часто используются в зарубежной литературе [65].

В дополнение к указанным можно привести еще ряд характеристик, общих (типоморфных) для объединяемых в Cu-Мо-порфировую формацию типов месторождений:

- относительная открытость рудно-магматических систем;
- определяющая роль мантийно-корового взаимодействия в развитии РМС;
- повышенный окислительный потенциал;
- высокая соленость рудообразующих флюидов;
- широкий диапазон температур рудно-метасоматических процессов;
- гетерогенизация (вскипание) растворов;
- проявление эксплозивных брекчий;
- широкое развитие метасоматических процессов (в разных сочетаниях: кварц-биотит-калишпатовые метасоматиты, кварц-серицитовые метасоматиты, пропициты, аргиллизиты);
- доминирование прожилково-вкрапленного оруденения.

При установлении объема и особенно границ Cu-Мо-порфировой рудной формации важным представляется анализ всех производных рудно-магматической системы с учетом зональности продуцируемого ею оруденения: Fe—Mo (Cu)—Cu (Mo)—Cu (Au)—Fe (Au)—Pb, Zn—Au (Ag) [66]. При этом, наряду с совмещением в пределах отдельных месторождений всех указанных минеральных ассоциаций, возможна пространственная обособленность (в пределах тех же рудных узлов и районов) поздней более низкотемпературной Pb, Zn и Au (Ag) минерализации [49, 67, 68 и др.]. Представительным примером

последнего может служить северная часть о-ва Лузон (Филиппины), где обоснована генетическая связь Cu-Au эпitherмального месторождения Лепанто с Cu (Au)-порфировым месторождением Фар-Саут-Ист [69].

Таким образом, Cu-Mo-порфировая рудная формация выступает фактически в качестве интегрального элемента, объединяющего гомологичные минеральные типы, являющиеся производными однотипных по природе и стилю развития рудно-магматических систем. Принцип гомологии, учитывающий генетические связи между рудно-метасоматическими образованиями этих систем, позволяет отчетливее представить рудную формацию в возможно полном объеме с учетом составляющих ее рядов субформаций и минеральных типов. Только в этом варианте она может наиболее успешно использоваться при систематике рудных месторождений, генетических и прогнозно-металлогенических построениях.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (04-05-64238), НШ-1573.2003.5 и интеграционного проекта СО и ДВО РАН (ИП-69).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.А. Рудные формации // Геология и геофизика, 1972 (6), с. 3—14.
2. Сотников В.И., Берзина А.П., Никитина Е.И. и др. Медно-молибденовая рудная формация (на примере Сибири и сопредельных регионов). Новосибирск, Наука, 1977, 424 с.
3. Hollister V.F., Potter R.R., Barker A.L. Porphyry-copper deposits of the Appalachian orogen // *Econ. Geol.*, 1974, v. 69, p. 618—630.
4. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Попов В.С. Медно-порфировые месторождения мира. М., Недра, 1986, 236 с.
5. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits // *Econ. Geol.*, 1970, v. 65, p. 373—409.
6. Clark R.F. Stockwork molybdenum deposits in the Western Cordillera of North America // *Econ. Geol.*, 1972, v. 67, p. 731—758.
7. Griffiths J.R., Goodwin C.J. Metallogeny and tectonics of porphyry copper-molybdenum deposits in British Columbia // *Can. J. Earth Sci.*, 1983, v. 20, p. 1000—1018.
8. Kesler S.E., Jones L.M., Walker R.L. Intrusive rocks associated with porphyry copper mineralization in island arc areas // *Econ. Geol.*, 1975, v. 75, p. 515—526.
9. Miller D., Kaminski K., Uhlig S. et al. The transition from porphyry- to epithermal-style gold mineralization at Ladolam, Lihir Island, Papua New Guinea: a reconnaissance study // *Miner. Depos.*, 2002, v. 37, p. 61—74.
10. Motegi M. Porphyry copper deposits in the Philippines — their tectonic setting and present status of development // *Mining Geol.*, 1977, v. 27, p. 221—230.
11. Gustafson L.B. Some major factors of porphyry copper genesis // *Econ. Geol.*, 1978, v. 73, p. 600—607.
12. Сотников В.И., Пономарчук В.А., Берзина А.Н. и др. Эволюция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в изверженных породах медно-молибден-порфировых рудных узлов // Геология и геофизика, 2000, т. 41, с. 1112—1123.
13. Сотников В.И., Пономарчук В.А., Шевченко Д.О., Берзина А.Н. Аксугское Cu-Mo-порфировое месторождение в Северо-Восточной Туве: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронология, источники вещества // Геология и геофизика, 2003, т. 44, с. 1119—1132.
14. Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Коваленко В.И. и др. Возраст постколлизийного магматизма ранних каледонид Центральной Азии (на примере Тувы) // Докл. РАН, 1998, т. 360, № 4, с. 514—517.
15. Карта магматических формаций юга Восточной Сибири и северной части МНР, м-б 1:1 500 000 / Под ред. Г.Я. Абрамовича, Г.Л. Митрофанова, Г.В. Полякова, П.М. Хренова. М., Мингео СССР, 1988.
16. Гордиенко И.В. Палеозойский магматизм и геодинамика Центрально-Азиатского пояса. М., Наука, 1987, 328 с.
17. Хасин Р.А., Суетенко О.Д., Филиппова И.Б. Геодинамические обстановки палеозоя Восточной Монголии // Геология и полезные ископаемые Монгольской Народной Республики, Вып. 1. М., Недра, 1990, с. 20—34.
18. Сотников В.И., Пономарчук В.А., Шевченко Д.О., Берзина А.П. Cu-Mo-порфировое месторождение Эрдэнэтуин-Обо (Северная Монголия): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронология, факторы крупномасштабного рудообразования // Геология и геофизика, 2005, т. 46, с. 633—644.
19. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И. Геодинамические обстановки образования батолитов в Центрально-Азиатском складчатом поясе // Геология и геофизика, 2003, т. 44, с. 1305—1320.
20. Сотников В.И., Пономарчук В.А., Шевченко Д.О. и др. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронология магматических и метасоматических событий в Сорском Cu-Mo-порфировом рудном узле (Кузнецкий Алатау) // Геология и геофизика, 2001, т. 42, с. 786—801.

21. **Sillitoe R.H.** Copper, gold and subduction: a trans-Pacific perspective // Pacific Rim Congress 87: an international congress on the geology, structure, mineralization and economics of the Pacific Rim / E. Brennan (ed.). Parkville, Victoria, Australia, Australas. Inst. Min. Metall., 1987, p. 399—403.
22. **Reich M., Parada M.A., Palacios C. et al.** Adakite-like signature of Late Miocene intrusions at the Los Pelambres giant porphyry copper deposit in the Andes of Central Chile: metallogenic implications // Miner. Depos., 2003, v. 38, № 7, p. 876—885.
23. **Armstrong R.L., Taubeneck W.H., Hales P.O.** Rb-Sr and K-Ar geochronometry of Mesozoic granitic rocks and their Sr isotopic compositions, Oregon, Washington and Idaho // Bull. Geol. Soc. Amer., 1977, v. 88, p. 397—441.
24. **Farmer G.L., DePaolo D.J.** Nd and Sr isotope study of hydrothermally altered granite at San Manuel, Arizona: implications for element migration paths during the formation of porphyry copper ore deposits // Econ. Geol., 1987, v. 82, p. 1142—1151.
25. **Lang J.R., Tittley S.R.** Isotopic and geochemical characteristics of Laramide magmatic systems in Arizona and implications for the genesis of porphyry copper deposits // Econ. Geol., 1998, v. 93, p. 138—170.
26. **Weishi L., Jiuru D.** Metallogenic conditions and series of volcanic rock-porphyry type polymetallic deposits on the northwestern slope of Daxingan range // Trans. Nonferrous Metals Soc. China, 1996, v. 6, № 3, p. 175—180.
27. **Kroll T., Müller D., Seifert T. et al.** Petrology and geochemistry of the shoshonite-hosted Skouries porphyry Cu-Au deposit, Chalkidiki, Greece // Miner. Depos., 2002, v. 37, p. 137—144.
28. **Sillitoe R.H.** Types of porphyry molybdenum deposits // Mining Mag., 1980, v. 142, p. 550—553.
29. **Stein H.J.** Genetic traits of Climax-type granites and molybdenum mineralization, Colorado mineral belt // Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1988, Special Volume 39, p. 394—401.
30. **White W.H., Bookstrom A.A., Kamilli R.J. et al.** Character and origin of Climax-type molybdenum deposits // Econ. Geol., 1981, 75th Anniversary Volume, p. 270—316.
31. **Huang D., Nie F., Wang Y., Jiang X.** Petrological characteristics and petrogenesis of the granitoids in the Jinduicheng-Huanglongpu area and their relation to molybdenum deposits // Institute of Miner. Depos. Bull., 1985, v. 16, № 4, p. 95—119.
32. **Stein H.J., Markey R.J., Morgan J.W. et al.** Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China // Econ. Geol., 1997, v. 92, № 7/8, p. 827—835.
33. **Пономарчук В.А., Сотников В.И., Берзина А.Н.** Изотопно-геохронологическая неоднородность гранит-порфиров Жирекенского Cu-Mo-порфирового месторождения (Восточное Забайкалье) // Геохимия, 2004, № 6, с. 679—683.
34. **Сотников В.И., Пономарчук В.А., Травин А.В. и др.** Возрастная последовательность проявления магматизма в Шахтаминском рудном узле, Восточное Забайкалье (Ar-Ar, K-Ar, Rb-Sr) // Докл. РАН, 1998, т. 359, № 2, с. 242—244.
35. **Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М.** Тектоника литосферных плит территории СССР, Кн. 1. М., Недра, 1990, 328 с.
36. **Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г.** Внутриплитная позднемезозойско-кайнозойская вулканическая провинция Центрально-Восточной Азии — проекция горячего поля мантии // Геотектоника, 1995, № 5, с. 41—67.
37. **Holister V.F., Anzalone S.A., Richter D.H.** Porphyry copper deposits of Southern Alaska and contiguous Yukon Territory // Can. Min. Metall. Bull., 1975, v. 68, p. 104—112.
38. **Sutherland-Brown A., Cathro R.I., Panteleev A., Ney C.S.** Metallogeny of the Canadian Cordillera // Can. Min. Metall. Bull., 1977, v. 64, p. 37—61.
39. **Ross K.V., Dawson K.M., Godwin C.I., Bond L.** Major lithologies of the Ajax West pit, an alkalic copper-gold porphyry deposit, Kamloops, British Columbia // CA Geol. Surv. Canad., 1992, № 49-1A, p. 179—183.
40. **Кочетков А.Я., Пахомов В.Н., Попов А.Б.** Магматизм и метасоматизм Рябиновского рудоносного щелочного массива (Центральный Алдан) // Магматизм медно-молибденовых рудных узлов. Новосибирск, Наука, 1989, с. 79—110.
41. **Власов Г.М., Василевский М.М.** Гидротермально измененные породы Центральной Камчатки, их рудоносность и закономерности пространственного размещения. М., Недра, 1964, 220 с.
42. **Kudryavtsev Y.K.** The Cu-Mo deposits of Central Kazakhstan // Granite-related ore deposits of Central Kazakhstan and adjacent areas. St. Petersburg, Glagol Publishing House, 1996, p. 119—144.
43. **Гаврилова С.П., Лучицкая А.И., Фрих-Хар Д.И. и др.** Вулкано-плутонические ассоциации Центральной Монголии. М., Наука, 1991, 232 с.
44. **Maughan D.T., Keith J.D., Christiansen E.H. et al.** Contributions from mafic alkaline magmas to the Bingham porphyry Cu-Au-Mo deposit, Utah, USA // Miner. Depos., 2002, v. 37, p. 14—37.

45. **Покалов В.Т.** Рудно-магматические системы гидротермальных месторождений. М., Недра, 1992, 288 с.
46. **Сотников В.И., Пономарчук В.А., Сорокин А.А. и др.** Возрастные рубежи формирования Cu-Мо-порфирирового месторождения в структурах обрамления Монголо-Охотского орогенного пояса // Докл. РАН, 2005, т. 403, № 4, с. 522—525.
47. **Бородаевская М.Б., Шмидт А.И.** Некоторые вопросы генезиса порфирировых пород Восточного Забайкалья // Зап. ВМО, 1956, № 3, с. 358—372.
48. **Литвинов В.Л., Соломин Ю.С.** О генезисе вкрапленников калиевого полевого шпата и кварца в породах амуджиканского типа (Восточное Забайкалье) // Известия Забайкальского филиала геогр. о-ва СССР, 1970, т. VI, вып. 2, с. 18—34.
49. **Sillitoe R.H.** Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region // Austral. J. Earth Sci., 1997, v. 44, p. 373—388.
50. **Kress V.** Magma mixing as a source for Pinatubo sulphur // Nature, 1997, v. 389, p. 591—593.
51. **Hattori K.H., Keith J.D.** Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA // Miner. Depos., 2001, v. 36, № 8, p. 799—806.
52. **Richards J.P.** Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposits formation // Econ. Geol., 2003, v. 98, p. 1515—1533.
53. **Audetat A., Pettke T., Dolejs D.** Magmatic anhydrite and calcite in the ore-forming quartz-monzodiorite magma at Santa Rita, New Mexico (USA): genetic constraints on porphyry-Cu mineralization // Lithos, 2004, v. 72, p. 147—161.
54. **Sparks S.R.J., Sigurdsson H., Wilson L.** Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruptions // Nature, 1977, v. 267, p. 315—318.
55. **Banks N.G.** Sulfur and copper in magma and rocks // Advances in geology of the porphyry copper deposits in southwestern North America / S.R. Tittley (ed.). Tucson, University of Arizona Press, 1982, p. 227—257.
56. **Сотников В.И., Пономарчук В.А., Перцева А.П. и др.** Эволюция изотопов серы в Cu-Мо-порфирировых рудно-магматических системах Сибири и Монголии // Геология и геофизика, 2004, т. 45, с. 963—974.
57. **Goldie R.** Magma mixing in the Flavrian pluton, Noranda area, Quebec // Canad. J. Earth. Sci., 1978, v. 15, № 1, p. 132—144.
58. **Büsch W., Otto J.** Endogenic inclusions in granites of the Black Forest, Germany // Neues Jahrb. Miner. Monatsh., 1980, H. 6, S. 269—282.
59. **Sotnikov V.I., Berzina A.N., Economou-Eliopoulos M., Eliopoulos D.G.** Palladium, platinum and gold distribution in porphyry Cu ± Mo deposits of Russia and Mongolia // Ore Geol. Rev., 2001, v. 18, № 1—2, p. 95—111.
60. **Сотников В.И., Поливеев А.Г., Берзина А.Н.** Физико-химические условия формирования гранитоидов рудоносного комплекса на Жирекенском медно-молибденовом месторождении // Докл. АН СССР, 1985, т. 283, № 6, с. 1463—1465.
61. **Tsuchiyama A.** Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside-albite-anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesites // Contr. Miner. Petrol., 1985, v. 89, № 1, p. 1—16.
62. **Baker L.L., Rutherford M.J.** Crystallization of anhydrite bearing magmas // Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci., 1996, v. 87, p. 243—250.
63. **Сотников В.И., Берзина А.Н., Берзина А.П.** Галогены в магматических образованиях медно-молибден-порфирировых рудных узлов Сибири и Монголии // Докл. РАН, 2000, т. 371, № 2, с. 223—226.
64. **Kesler S., Issigonis M.H., Brownlow A.H. et al.** Evaluation of the use of Cl, F and H₂O content of igneous biotites as an exploration tool // Mining Engineering, 1973, v. 25, № 12, p. 47—48.
65. **Nokleberg W.J., Rodionov S.M., Badarch G. et al.** Mineral resources database for Northeast Asia // Mineral deposits at the beginning of the 21st century. Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, 2001, p. 1125—1127.
66. **Павлова И.Г.** Медно-порфирировые месторождения. Л., Недра, 1978, 234 с.
67. **Eaton P.C., Setterfield T.N.** The relationship between epithermal and porphyry hydrothermal systems within the Tavua caldera // Econ. Geol., 1993, v. 88, p. 1053—1083.
68. **Sillitoe R.H.** Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline and consequences for exploration // Miner. Depos., 2002, v. 37, № 1, p. 4—13.
69. **Arribas A., Jr., Hedenquist J.W., Itaya T. et al.** Contemporaneous formation of adjacent porphyry and epithermal Cu-Au deposits over 300 ka in northern Luzon, Philippines // Geology, 1995, v. 23, p. 337—340.