

УДК 553.21/.24

П.Ю. Плечов<sup>1</sup>, Н.А. Некрылов<sup>2</sup>, Д. Бланди<sup>3</sup>**СРАВНЕНИЕ ОДНО- И ДВУСТАДИЙНОЙ МОДЕЛЕЙ  
ФОРМИРОВАНИЯ МЕДНОПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ<sup>4</sup>**

Модели формирования меднопорфировых месторождений рассмотрены с петролого-геохимической точки зрения. Принципиальным отличием обсуждаемых моделей является время и способ осаждения рудных компонентов в виде сульфидных руд и состав рудообразующего флюида. Показано, что описанные в литературе флюидные включения богатые медью содержат недостаточно серы для формирования сульфидных руд и требуется независимый источник серы для формирования меднопорфировых месторождений.

*Ключевые слова:* меднопорфировые месторождения, флюидные включения, медь, сера.

Models of copper-porphyry deposits formation examined from the petrological and geochemical points of view. The principal differences between the models are time and mechanism of sulfide ore precipitation and the composition of ore-bearing fluid. It is shown that copper-rich fluid inclusions contain insufficient amount of sulfur for sulfide ore formation and it have to be independent source of sulfur for copper-porphyry deposits formation.

*Key words:* copper-porphyry deposits, fluid inclusions, copper, sulfur.

**Введение.** Усилившийся в последние годы интерес к месторождениям меднопорфирового типа связан со скачкообразным ростом (более чем в 3 раза) цены на медь в начале 2000-х гг. [Mudd et al., 2013]. Цены на медь достигли максимума в 2011 г. (около 10 тыс. долл. США за тонну), а потом постепенно снизились до 5 тыс. долл. США за тонну, но все еще остаются на высоком уровне. На данный момент в мировой экономике меднопорфировые и молибден-порфировые месторождения (МПМ) служат главным источником меди и молибдена (более 50%). С порфировыми системами связаны месторождения золота, серебра и олова, а также попутно извлекаются Re, W, In, Pt, Pd и Se [Sinclair, 2007]. МПМ характеризуются первичным низким содержанием рудных компонентов, что компенсируется большими запасами.

В 2010 г. Россия занимала 6-е место в мире по разведанным запасам меди (59,17 млн т при среднем содержании меди в руде 1,07%) и добывала 703 тыс. т меди ежегодно [Mudd et al., 2013]. На 2004 г. было разведано только 3 месторождения меднопорфирового типа (и более 150 месторождений медно-никелевого и колчеданного типов). Однако рудный потенциал МПМ в России далеко не исчерпан. Недооценка рудного потенциала связана, в первую очередь, с недостаточным пониманием процессов формирования и локализации месторождений, из которого следуют способы поиска и разведки. Большинство меднопорфировых

месторождений открыто не по непосредственному нахождению руд, а по косвенным признакам, которые следуют из существующей модели их формирования. Более глубокое понимание процессов формирования меднопорфировых месторождений расширяет возможности прогноза и поиска новых месторождений. Всего за 10–12 последних лет поисковые и геолого-разведочные работы с участием западных компаний, имеющих богатый опыт работы на меднопорфировых месторождениях, позволили обнаружить, разведать и ввести в эксплуатацию ряд крупных месторождений мирового уровня, к которым относятся Малмыж и Светлое (Хабаровский край), Песчанка (Магаданская область), Михеевское (Южный Урал) с общими запасами более 10 млн т меди.

Первые петролого-геохимические модели формирования МПМ появились в 1970-е гг. [Lowell, Guilbert, 1970; Sillitoe, 1973; Gustafson, 1978]. Идея о концентрации рудного вещества в высококонцентрированных рассолах на фронте ретроградного кипения с участием метеорных вод и магматогенного флюида послужила мощным стимулом развития теории рудогенеза и практических аспектов обнаружения новых месторождений. Результаты многолетних детальных исследований суммированы в ряде недавних обзорных работ [Sinclair, 2007; Berger et al., 2008; John et al., 2010; Sillitoe, 2010]. В этих работах хорошо описаны основные черты меднопорфировых месторождений и зональности

<sup>1</sup> Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана, директор; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, профессор, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* pplechov@gmail.com

<sup>2</sup> Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана, науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* nekrilov.n@gmail.com

<sup>3</sup> Университет города Бристоль, Школа наук о Земле, профессор, доктор философии; *e-mail:* gljdb@bristol.ac.uk

<sup>4</sup> Работа выполнена за счет гранта РНФ (проект № 16-17-10199).

околорудных изменений. В то же время накопился ряд противоречий между теорией и наблюдениями, что привело к появлению альтернативных моделей, привлекающих независимый источник серы [Hattori, Keith, 2001; de Hoog et al., 2004; Blundy et al., 2015], к сожалению, эта дискуссия практически не освещена в русскоязычной литературе. Данная статья является первой попыткой сравнения предложенных моделей с петролого-геохимической точки зрения. К ключевым относятся проблемы источников и способов переноса рудных компонентов, а также время и механизмы формирования рудных залежей. В статье рассмотрена проблема интерпретации данных о флюидных включениях в минералах с точки зрения отражения ими этапов рудогенеза и состава рудообразующего флюида.

#### **Общие черты меднопорфировых месторождений.**

Меднопорфировые месторождения — продукт сложного взаимодействия многих процессов и МПМ определяются наличием следующих характерных признаков (по [Berger et al., 2008]):

- штокверковое строение рудных тел, в которых богатые медью сульфиды приурочены к сложной сети прожилков, заполняющих трещины. В окружающих метасоматически измененных породах сульфиды рассеяны в виде отдельных зерен;

- метасоматические изменения и оруденение на характерной глубине 1–4 км генетически связаны с магматическими резервуарами, внедрившимися на верхнекоровый уровень (глубина 6–8 км и больше). Преобладают магмы кислого или среднего состава, приуроченные к надсубдукционным зонам, где формируются многофазные очаги сложного строения;

- внедрение интрузивных комплексов непосредственно предшествовало формированию порфировых месторождений. Преобладают штоки с близкими к вертикальным контактами или системы даек;

- характерная крупномасштабная зональность метасоматических изменений, в которой зоны хлорит-серицитовых метасоматитов, вторичных кварцитов и краевых пропилитов перекрывают или окружают внутреннюю зону калиевых метасоматитов.

Медно-порфировые месторождения формируются в условиях континентальных окраин и островодужных систем. В редких случаях отмечены месторождения, связанные с пост-коллизийным вулканизмом. МПМ во фронтальных частях островодужных систем приурочены к массивам гранитоидов I-типа, относящимся к магнетитовым сериям, а в тыловых частях дуг к диоритовым массивам и субвулканическим телам шошонитов [Sillitoe, 2010 и ссылки в ней]. Для порфировых систем щелочных пород характерно увеличение роли золота. Большинство известных месторождений имеют мезозойский или кайнозойский возраст.

Они часто приурочены к системе региональных разломов, обеспечивающих режим локального растяжения и способствующих свободной миграции флюида.

Выделяются Cu-Mo, Cu-Mo-Au и Cu-Au подтипы МПМ. Экономическое значение могут иметь сопутствующие серебро, рений, платиноиды, олово, цинк, свинец. В карбонатных толщах могут формироваться сопряженные скарновые полиметаллические месторождения. В качестве хорошо изученных эталонных МПМ рассматриваются Эль-Тениенте и Эль-Сальвадор в Чили, Байя де Алумбреро в Аргентине, Грасберг в Индонезии, Пиббл и Бингем в США [Berger et al., 2008; Sillitoe, 2010] и многие другие. В России активно изучаются Михеевское месторождение (Южный Урал), Малмыж (Хабаровский край) и группа месторождений Баимской зоны (Чукотка). Геологические особенности, зональность, этапы рудной минерализации и многие другие вопросы освещены в многочисленной литературе последних лет [например, Berger et al., 2008; John et al., 2010; Klemm et al., 2007; Sillitoe, 2010; Rusk et al., 2004].

Сами МПМ — частный случай порфировых систем — крупных метасоматических ореолов вокруг сложных вулcano-плутонических комплексов, в которых формируются многочисленные месторождения (Cu, Mo, Au, Sn, W и др.). Все порфировые системы объединяет связь с интрузивами кислого состава и наличие метасоматической зональности, вызванной проработкой существенно хлоридным флюидом [Sinclair, 2007]. Геологическое строение месторождений может осложняться скарнированием карбонатных составляющих разрезов, зонами вторичной сульфидизации и другими наложенными процессами [Berger et al., 2008], связанными с эволюцией того же самого флюида, что и МПМ. Более того, общность эволюции первично-магматического флюида позволяет отнести к тому же генетическому ряду объекты, в которых собственно медно-сульфидная минерализация проявлена недостаточно для промышленной разработки. Например, W-Sn оруденение грейзенового типа в гранитах Mole (Австралия) по ряду признаков (в том числе и по составу флюида) относят к высокотемпературной части крупной порфировой системы, в которой собственно меднопорфировая составляющая не реализовалась по ряду причин [Mavrogenes et al., 2002; Seo et al., 2009; Seo и Heinich, 2013].

В неизмененных зонах месторождений медь представлена халькопиритом, борнитом и энаргитом. Рудные минералы рассеяны в метасоматически переработанных малоглубинных интрузивных комплексах и в штокверковых прожилках. Часто выделяется зональность месторождения по содержанию пирита — руды во внутренней части содержат <1%, в средней — 1–4%, а во внешней >4%

пирита. Содержание халькопирита во внутренних зонах составляет 0,1%, в средней — >0,4%, а во внешней — 0,1–0,4% [Berger et al., 2008].

Основной фактор формирования меднопорфировых месторождений — существование рудоносного флюида, отделяющегося от кристаллизующейся магмы в очаге или системе связанных очагов. Магматические очаги обычно расположены на глубине 8–10 км или больше. При отделении от очага флюид поднимается вверх и конденсируется в пределах малоглубинных (1–4 км) субвулканических комплексов. Исходная магма может быть известково-щелочной или щелочной, типичной для надсубдукционных магматических комплексов [Seedorff et al., 2005].

Существует аналогия между структурой МПМ и современными вулканическими центрами. В известных меднопорфировых системах почти всегда присутствуют в большом количестве дайки и малые интрузии андезитового, андезидацитового и более кислого состава. Крупные островодужные стратовулканы также формируются за счет сотен и тысяч индивидуальных внедрений магмы, приводящих к извержениям. В международной литературе в качестве вулканов с рудоформирующими системами изучаются Суфриере Хиллс (Soufrière Hills, Монсеррат), Маунт Сент Хеленс (Mount St Helens, США) и Маунт Унзен (Mount Unzen, Япония). В России наиболее перспективными для изучения являются вулканы Кудрявый (Курилы), Мутновский, Безымянный и Шивелуч (Камчатка).

*Одностадийная модель образования МПМ*, принятая на данный момент большинством исследователей ([Sinclair, 2007; Berger et al., 2008; John et al., 2010; Sillitoe, 2010; Richards, 2011] и ссылки в этих работах), предполагает образование

меднопорфировых месторождений при инъекции во вмещающие породы обогащенного рудными компонентами водного флюида магматического происхождения, скапливающегося в верхних частях батолитов среднего или кислого состава. Поднятия в кровле батолитов выступают при этом в роли подводящих каналов для формирующихся месторождений [Sillitoe, 2010]. Флюид, покидающий пределы магматического тела, поднимается вверх, начинает остывать, возможно, смешивается с метеорными водами и пересекает поверхность водно-солевой бинодали при 425–350 °C [Landtwing et al., 2005], разделяясь при этом на относительно малоплотный флюид с низкой соленостью и рассол. При разделении флюида начинается осаждение рудных компонентов, вызванное понижением их растворимости во флюидной фазе при остывании и декомпрессии [Sillitoe, 2010], а также реакцией диспропорционирования  $\text{SO}_2$  в водном флюиде, приводящей к образованию  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  [Landtwing et al., 2005].

*Двустадийная модель образования МПМ* предполагает разделенные во времени процессы накопления рудных компонентов в долгоживущих рассолах и их осаждение в виде сульфидов. Принципиальная схема этой модели показана на рис. 1. Медь и другие металлы накапливаются в растворенном виде в концентрированных долгоживущих рассолах в зонах активного надсубдукционного магматизма в течение десятков и сотен тысяч лет за счет постепенного выделения флюида при кристаллизации крупных объемов магмы среднего и кислого состава. Источником сернистого флюида по этой модели служат магмы основного состава. Богатый серой флюид взаимодействует с металлосодержащими рассолами при 700–800 °C (или ниже)

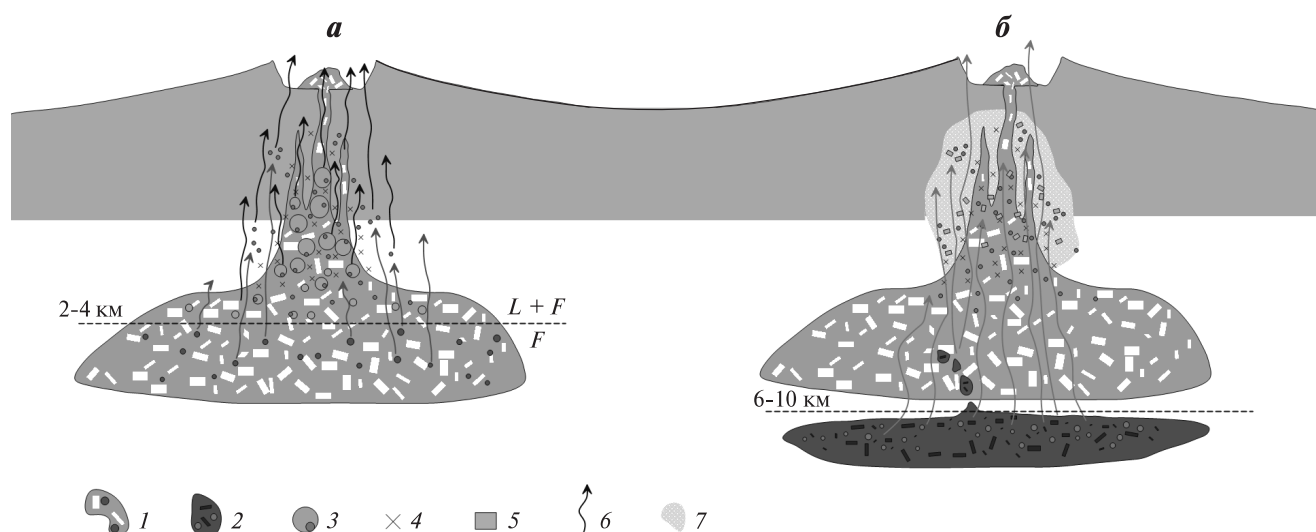


Рис. 1. Схематическое изображение двустадийной (а, б) модели образования меднопорфировых месторождений, по [Blundy et al., 2015]: 1 — магма кислого состава с гомогенным водным флюидом, обогащенным солевым и рудным компонентами; 2 — магма основного состава с гомогенным флюидом, обогащенным серой; 3 — две флюидные фазы, образовавшиеся при пересечении гомогенным водным флюидом сольвуса, — малосоленый водный флюид (крупные светлые кружки) и рассол (маленькие темные кружки); 4 — зона калиевых вторичных изменений; 5 — зоны отложения халькопирита; 6 — пути подъема флюида; 7 — зона филлитовых вторичных изменений

и вызывает массовое осаждение сульфидов, формирующих месторождения [Blundy et al., 2015].

**Принципиальные отличия одностадийной и двустадийной моделей.** Одностадийные и двустадийные модели должны принципиально отличаться по составу рудосодержащего флюида и длительности этапа отложения рудного вещества. В первом случае флюид должен нести в себе все необходимые компоненты, включая медь и серу. Во втором — медь может переноситься и концентрироваться одним флюидом, а необходимая сера — другим. При одностадийной модели рудные минералы откладываются постепенно, в течение нескольких тысяч лет, а при двустадийной модели отложение рудного вещества может произойти за несколько десятков лет [Blundy et al., 2015]. Рассмотрим эти принципиальные отличия с привлечением литературных данных о составе флюида и геологическом строении известных месторождений. Другие важные для поиска и оценки месторождений аспекты минералогии, геологии и генезиса меднопорфировых месторождений выходят за рамки статьи.

**Эволюция флюида по данным изучения флюидных включений.** Рудоформирующему флюиду и флюидным включениям в кварце меднопорфировых месторождений уделяется значительное внимание ([Landtwing et al., 2005; Klemm et al., 2007; Sillitoe, 2010; Richards, 2011; Bodnar et al., 2014; Боровиков и др., 2015] и ссылки в этих работах). Появились первые опубликованные данные о

флюидных включениях в российских меднопорфировых объектах [Николаев и др., 2016; Буханова, Плечов, 2017]. Флюидные включения консервируют часть минералообразующей среды и могут служить источником данных о составе и состоянии флюида. Существование сложного гетерогенного флюида при формировании меднопорфировых месторождений и его возможная эволюция во времени сильно затрудняют определение его состава и условий существования.

Температура гомогенизации газовой-жидких включений обычно ниже температуры их консервации, а для гетерофазных включений она может быть существенно выше [Плечов, 2014]. Флюидные включения изучаются в кварце, а не в рудных фазах, т.е. можно оценить состав флюида только тех этапов минералообразования, на которых кристаллизовался кварц. Высокотемпературные включения ( $T_h > 600^\circ\text{C}$ ) мало изучались из-за технических ограничений распространенных термокамер [Bodnar et al., 2014]. Состав гетерофазных включений соответствует смеси двух флюидов в случайной пропорции, а не чистым флюидным компонентам, при этом часть включений могла содержать минералы-узники, что необходимо учитывать при интерпретации данных.

Тем не менее результаты изучения флюидных включений дают существенную информацию о возможных вариациях состава флюида и накладывают ограничения на модели формирования меднопорфировых месторождений. Недавний

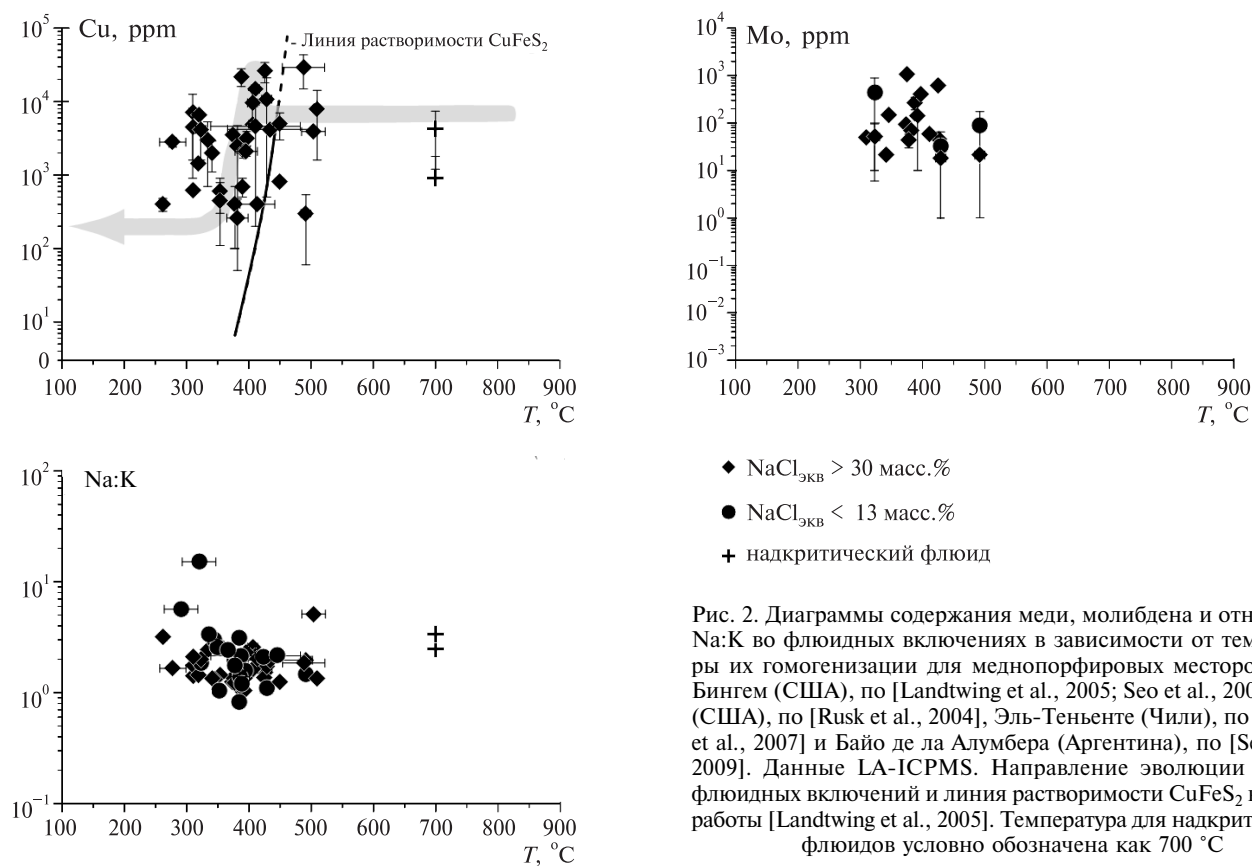


Рис. 2. Диаграммы содержания меди, молибдена и отношения Na:K во флюидных включениях в зависимости от температуры их гомогенизации для меднопорфировых месторождений Бингем (США), по [Landtwing et al., 2005; Seo et al., 2009], Батт (США), по [Rusk et al., 2004], Эль-Теньенте (Чили), по [Klemm et al., 2007] и Байо де ла Алумбера (Аргентина), по [Seo et al., 2009]. Данные LA-ICPMS. Направление эволюции состава флюидных включений и линия растворимости  $\text{CuFeS}_2$  взяты из работы [Landtwing et al., 2005]. Температура для надкритических флюидов условно обозначена как 700  $^\circ\text{C}$

обзор Р. Боднара с коллегами [Bodnar et al., 2014] включает данные о 10 700 индивидуальных включениях из 79 МПМ. Подавляющее большинство изученных включений водно-хлоридные. Температура гомогенизации (Th) варьирует в диапазоне 100–>900 °С (средняя ~300 °С), условная соленость — от 0 до 60% NaCl<sub>экв</sub>. В выборке нет включений с условной соленостью 20–30% NaCl<sub>экв</sub>. Частично это можно объяснить сложностью определения условной солености при существовании дочернего гидрогалита в диапазоне между эвтектикой (23,2 масс.% NaCl) и перитектикой (26,24 масс.% NaCl) в системе NaCl–H<sub>2</sub>O [Bodnar et al., 2014], но главная причина заключается в разделении флюида на составляющую с относительно малой соленостью (<13% NaCl<sub>экв</sub>) и рассола (>30% NaCl<sub>экв</sub>). Основные компоненты флюида — Na (250–35 000 ppm), K (100–180 000 ppm) и Fe (300–330 000 ppm). Концентрация Cu варьирует в диапазоне 3–330 000 ppm, но значения выше 10<sup>5</sup> ppm, скорее всего, получены во включениях с захваченным минералом-узником [Bodnar et al., 2014].

Для оценки эволюции флюида МПМ необходимы данные, включающие одновременно состав и условия консервации включений. На рис. 2 представлена компиляция данных о составе флюида, полученных для индивидуальных включений в кварце хорошо изученных медно-порфировых месторождений методом LA-ICPMS. Суть метода заключается во вскрытии лазером флюидного включения, очень быстром испарении его содержимого и анализе с помощью масс-спектрометрии индуктивно-связанной плазмой. Метод полуколичественный из-за таких факторов, как неоднородность внутри включений (наличие дочерних фаз), разная скорость испарения компонентов, различная способность элементов к конденсации, неопределенность в пропорции испаряемого включения и минерала-хозяина, использование в качестве внутреннего стандарта условной солености.

Нами использованы данные по составу включений для месторождений Бингем (США) [Landtwing et al., 2005; Seo et al., 2009], Батт (США) [Rusk et al., 2004], Эль-Теньенте (Чили) [Klemm et al., 2007] и Байо де ла Алумбера (Аргентина) [Seo et al., 2009]. Анализ индивидуальных включений методом LA-ICPMS показал, что флюид медно-порфировых систем содержит в среднем около 6000 ppm Cu, около 200 ppm Mo и характеризуется отношением Na:K около 2. Большинство включений гомогенизируется в диапазоне 300–500 °С и расположено вблизи линии насыщения халькопиритом. На каждом месторождении можно выделить две контрастные группы включений. К первой относятся рассолы с соленостью >30% NaCl<sub>экв</sub>, а ко второй — флюидные включения с относительно малой соленостью (0,9–13% NaCl<sub>экв</sub>). Диапазоны

содержания меди и молибдена полностью перекрываются для этих двух групп включений (рис. 2). Содержание меди во включениях не зависит от их условной солености (рис. 3). Недавно было показано, что включения в кварце не герметичны относительно ионов с ионным радиусом <1 Å, по [Seo, Heinrich, 2013] и ссылки в этой работе. К таким ионам, в частности, относятся Cu<sup>+</sup>, Ag<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup> и другие важные компоненты рудоформирующих флюидов. Это приводит к диффузионному перераспределению компонентов сквозь структуру кварца и существенному обогащению медью включений с малой соленостью.

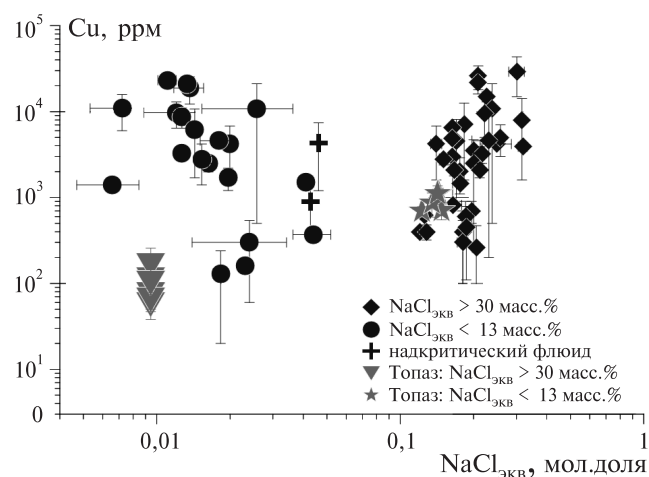


Рис. 3. Диаграмма Cu–Т для состава флюидных включений меднопорфировых месторождений Бингем (США), по [Landtwing et al., 2005; Seo et al., 2009], Батт (США), по [Rusk et al., 2004], Эль-Теньенте (Чили), по [Klemm et al., 2007] и Байо де ла Алумбера (Аргентина), по [Seo et al., 2009], полученного методом LA-ICPMS

Масштаб такого обогащения можно оценить при сравнении содержания компонентов во включениях в кварце и другом минерале, имеющем низкий коэффициент диффузии для выбранного компонента, например, в топазе. Топаз не характерен для МПМ, но встречается в более высокотемпературных «грейзеновых» областях порфировых систем [Mavrogenes et al., 2002; Seo et al., 2009; Seo и Heinrich, 2013]. На рис. 3 видно, что включения рассолов в топазе совпадают по содержанию меди с общим трендом включений рассолов в кварце, тогда как для области с малой условной соленостью содержание меди во включениях в топазе на 1–2 порядка ниже, чем во включениях в кварце. Таким образом, обогащение включений медью после их консервации весьма существенно для флюида с малой соленостью и может быть незначительно для включений рассолов [Seo, Heinrich, 2013]. Незначительная часть низкоплотных включений в кварце сохраняет содержание меди, близкое к ожидаемым значениям. При представительной выборке исследованных включений минимальную концентрацию меди для включений с одинаковой

условной соленостью можно принять как наиболее близкую к истинной.

Медь во флюидной фазе переносится в форме хлоридных комплексов ( $\text{CuCl}$ ,  $\text{NaCuCl}_2$  и др.), например в [Боровиков и др., 2015]. Возможно, это определяет связь меднопорфировых месторождений с вулканизмом надсубдукционных обстановок, для которого характерна высокая концентрация хлора. Растворимость меди в хлоридных растворах достигает нескольких процентов при высокой температуре, но резко падает при температуре  $\sim 400^\circ\text{C}$  [Landtwing et al., 2005]. В одностадийных моделях понижение температуры (и давления) поднимающегося флюида — главный фактор осаждения меди. Для двустадийной модели необходимо, чтобы богатый медью флюид существовал долгое время в порфировой системе при температуре  $>400^\circ\text{C}$ . В первом случае флюид поднимается и смешивается с метеорными водами, а во втором — флюид должен консервироваться вблизи источников тепла (крупных магматических очагов), а взаимодействие с метеорными водами должно быть ограничено.

Сера — главный компонент, необходимый для формирования сульфидных минералов МПМ. В рудных зонах МПМ соотношение пирит:халькопирит лежит в диапазоне от 2 до 40 (для внутренних зон 5–10, для средних 2–10, для внешних 10–40) [Berger et al., 2008], что в среднем по всем рудным зонам примерно соответствует 10. Если посчитать количество серы, нормированное на содержание меди, необходимое для формирования этих двух минералов, то атомарное отношение S:Cu должно лежать в диапазоне 6–80 (среднее  $\sim 22$ ). Содержание серы во флюидных включениях МПМ варьирует от 220 до 17 600 ppm (среднее 4500 ppm) [Seo et al., 2009] и для большинства из них отношение S:Cu приблизительно отвечает значению 2:1 и только для двух включений оно имеет близкие к требуемым значения 10:1 и 35:1 (рис. 4). Если для включений малоплотного флюида низкие значения этого отношения можно объяснить переуравновешиванием с окружающей средой, то для включений рассолов эти значения являются неизменными [Seo, Heinrich, 2013], так как они в существенно меньшей степени подвержены указанному процессу, что показано, в частности, и на рис. 3. Сера в МПМ помимо сульфидных минералов содержится также в виде сульфатов, объем которых может на порядки превышать сульфидную минерализацию, что делает приведенную выше оценку необходимого во флюиде отношения S:Cu минимальной. Таким образом, флюид, переносивший медь в хлоридных комплексах, содержит недостаточно серы для формирования МПМ в целом и массивных сульфидных руд в частности. Этот факт свидетельствует в пользу существования дополнительного источника серы, который мог

быть представлен высокотемпературным, богатым серой флюидом, отделившимся от более основной магмы, как предполагается двустадийной моделью образования МПМ [Blundy et al., 2015].

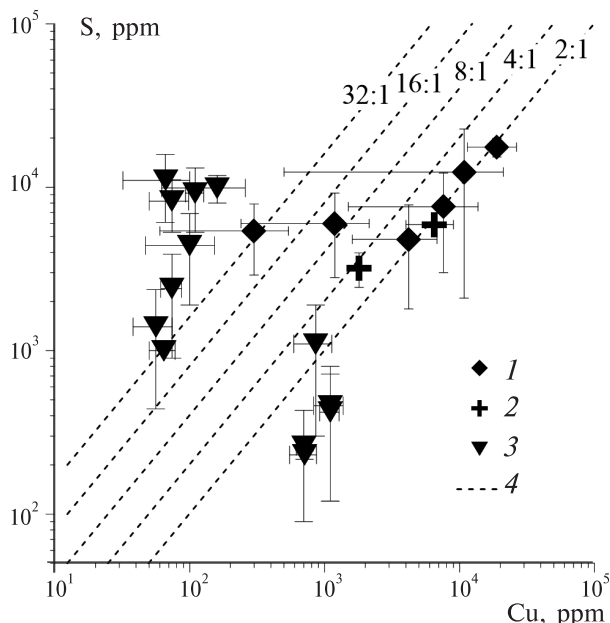


Рис. 4. Диаграмма S (ppm)—Cu (ppm) для состава флюидных включений в кварце меднопорфировых месторождений Бингем (США) (1) и Байо де ла Алумбера (Аргентина) (2), по [Seo et al., 2009], а также флюидных включений в топазе из месторождения Филдерс Хилл (Австралия) и в гранате из месторождения Донгушан (Китай) (3), по [Seo et al., 2013]; 4 — изолинии отношений S:Cu

В то же время флюидные включения в кварце не фиксируют высокотемпературный флюид, богатый серой. Это может быть связано с тем, что кварц (как главный минерал, в котором изучаются флюидные включения) не кристаллизовался на стадии существования этого флюида. Другой причиной может быть недостаточная изученность высокотемпературных включений вследствие технических ограничений микротермокамер [Bodnar et al., 2014]. Необходимы дополнительные исследования высокотемпературных включений с целью установления источника серы для формирования сульфидных руд МПМ.

Отдельный вопрос — причина появления высокотемпературных калиевых метасоматитов, характерных для всех меднопорфировых систем. Флюид в целом имеет слабовыраженную калиевую специфику. Для высокотемпературных включений отношение Na:K лежит в диапазоне 2,1–4, для включений с умеренными значениями Th обычно не превышает 2 и только в низкотемпературной области появляются включения, обогащенные Na ( $\text{Na:K} = 3\div 10$ ). Ю.Н. Николаев с соавторами [Николаев и др., 2016] для меднопорфировых месторождений Чукотки приводят значение Na:K во флюиде, которое варьирует от 6,6 до 11,9. Такие экстремально высокие отношения могут быть связаны со способом анализа. Указанные авторы

использовали валовый метод анализа вытяжек из кварца, при котором преобладающие низкотемпературные включения оказывают доминирующее влияние на валовый состав вытяжки. Калиевые метасоматиты могут формироваться при переходе к низкотемпературной стадии; за счет их образования отношение Na:K во флюиде возрастает, что и отражается в составе флюидных включений.

На Малмыжском месторождении были обнаружены [Буханова, Плечов, 2017] все типы включений, состав которых закономерно изменяется от солевых растворов-расплавов (Th~670–850 °C,  $P \sim 0,5\text{--}0,8$  кбар, 58–80 %-экв. NaCl) и рассолов (Th~330–580 °C,  $P \sim 0,1\text{--}0,5$  кбар, 30–60 %-экв. NaCl) до существенно водных и газовых включений с общей соленостью <6 %-экв. NaCl (Th~100–300 °C,  $P \sim 0,05\text{--}0,2$  кбар). К сожалению, детальных исследований индивидуальных флюидных включений недостаточно для определения эволюции состава флюида, необходимо получить новые данные, характеризующие как состав, так и условия существования флюидов на разных стадиях формирования месторождений.

**Закключение.** Широко распространенная одностадийная модель формирования порфировых месторождений хорошо описывает процессы накопления рудных компонентов в рассолах, но не учитывает недостаточное для формирования сульфидных руд содержание серы во флюиде и содержит определенные противоречия при определении источника серы.

Двухстадийная модель наследует модель формирования рудных рассолов и привлекает

независимый источник серы для формирования руд. Необходимы дополнительные геологические аргументы, подтверждающие эту модель. Такими аргументами могут стать, в частности, прецизионные датировки, показывающие перерыв между формированием рассолов и руд; находки богатых серой, но бедных рудными компонентами флюидных включений; изотопные данные для флюидных включений. Кроме того, необходимы природные и экспериментальные исследования и численное моделирование возможности накопления и существования рассолов в вулканических областях в течение длительных периодов (сотни тысяч — миллионы лет).

Систематические работы в области изучения МПМ выявили несколько серьезных проблем в интерпретации данных о флюидных включениях в кварце. Новых данных с количественно определенным составом индивидуальных включений, с выделением их генераций и учетом диффузии компонентов после консервации включений пока явно недостаточно и требуется большая работа по их накоплению и систематизации. Необходимы экспериментальные и методические работы по выявлению минералов-контейнеров, сохраняющих флюид различных стадий минералообразования. Эти исследования способны дать ключ к новому уровню понимания процессов формирования и эволюции порфировых систем, что приведет к качественному прорыву при поиске и разведке месторождений цветных и благородных металлов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боровиков А.А., Бульбак Т.А., Борисенко А.С. и др. Поведение рудных элементов в окисленных хлоридных и карбонатно-хлоридно-сульфатных гетерофазных флюидах Cu-Mo(Au)-порфировых месторождений (по экспериментальным данным) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 3. С. 557–570.
- Буханова Д.С., Плечов П.Ю. Условия формирования Au-Cu-порфирового месторождения Малмыжское (по данным исследования флюидных включений) // Вестн. КРАУНЦ. 2017. Т. 34. № 2. С. 61–71.
- Николаев Ю.Н., Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю. и др. Au-Ag минерализация порфирово-эпитептермальных систем Баимской зоны (Западная Чукотка, Россия) // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 4. С. 319–345.
- Плечов П.Ю. Методы изучения флюидных и расплавных включений. М.: КДУ, 2014. 266 с.
- Berger B.R., Ayuso R.A., Wynn J.C., Seal R.R. Preliminary model of porphyry copper deposits // U.S.G.S. Open-File Rep. 2008. N 1321. 55 p.
- Blundy J., Mavrogenes J., Tattitch B. et al. Generation of porphyry copper deposits by gas-brine reaction in volcanic arcs // Nature Geosci. 2015. Vol. 8, N 3. P. 235–240.
- Bodnar R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D., Steele-MacInnis M. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // Treatise on Geochemistry. Sec. Edn. 2014. Vol. 13. P. 119–142.
- De Hoog J.C.M., Hattori K.H., Hoblitt R.P. Oxidized sulfur-rich mafic magma at Mount Pinatubo, Philippines // Contrib. to Mineral. and Petrol. 2004. Vol. 146, N 6. P. 750–761.
- Gustafson L.B. Some major factors of porphyry copper genesis // Econ. Geol. 1978. Vol. 73, N 5. P. 600–607.
- Hattori K.H., Keith J.D. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA // Mineral. Deposit. 2001. Vol. 36, N 8. P. 799–806.
- John D.A., Ayuso R.A., Barton M.D. et al. Porphyry copper deposit model // U.S.G.S. Scie. Investigations Rep. 2010. N 5070-B. P. 169.
- Klemm L.M., Pettke T., Heinrich C.A., Campos E. Hydrothermal evolution of the El Teniente deposit, Chile: Porphyry Cu-Mo ore deposition from low-salinity magmatic fluids // Econ. Geol. 2007. Vol. 102, N 6. P. 1021–1045.
- Landtwing M.R., Pettke T., Halter W.E. et al. Copper deposition during quartz dissolution by cooling magmatic-hydrothermal fluids: The Bingham porphyry // Earth and Planet. Sci. Lett. 2005. Vol. 235, N 1. P. 229–243.
- Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits // Econ. Geol. 1970. Vol. 65, N 4. P. 373–408.
- Mudd G.M., Weng Z., Jowitt S.M. A detailed assessment of global Cu resource trends and endowments // Econ. Geol. 2013. Vol. 108, N 5. P. 1163–1183.

*Richards J.P.* Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins // *Ore Geol. Rev.* 2011. Vol. 40, N 1. P. 1–26.

*Rusk B.G., Reed M.H., Dilles J.H.* et al. Compositions of magmatic hydrothermal fluids determined by LA-ICP-MS of fluid inclusions from the porphyry copper–molybdenum deposit at Butte, MT // *Chem. Geol.* 2004. Vol. 210, N 1. P. 173–199.

*Seedorff E., Dilles J.D., Proffett J.M.* et al. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features // *Econ. Geol.* 100th anniversary volume. 2005. Vol. 29. P. 251–298.

*Seo J.H., Guillong M., Heinrich C.A.* The role of sulfur in the formation of magmatic–hydrothermal copper–gold

deposits // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2009. Vol. 282, N 1. P. 323–328.

*Seo J.H., Heinrich C.A.* Selective copper diffusion into quartz-hosted vapor inclusions: evidence from other host minerals, driving forces, and consequences for Cu–Au ore formation // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2013. Vol. 113. P. 60–69.

*Sillitoe R.H.* The tops and bottoms of porphyry copper deposits // *Econ. Geol.* 1973. Vol. 68, N 6. P. 799–815.

*Sillitoe R.H.* Porphyry copper systems // *Econ. Geol.* 2010. Vol. 105, N 1. P. 3–41.

*Sinclair W.D.* Porphyry deposits // *Geological Association of Canada // Mineral Dep. Division. Spec. publ.* 2007. Vol. 5. P. 223–243.

Поступила в редакцию  
01.02.2017