

УДК 550.4.02:553.21/24

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ Au-Cu-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАЛМЫЖСКОЕ, ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ (ПО ДАННЫМ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ)

© 2017 Д.С. Буханова<sup>1</sup>, П.Ю. Плечов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: [dasha-snejinka@yandex.ru](mailto:dasha-snejinka@yandex.ru)

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119992

Представлены результаты исследования флюидных включений из кварцевых жил и прожилков пересекающих метасоматиты, вмещающие рудную минерализацию, в различных частях Центральной системы Малмыжского золото-меднопорфирового месторождения (Хабаровский край). Установлена стадийность формирования месторождения. Выявлены характерные для различных стадий геохимические и P-T условия. Для определения состава многофазных флюидных включений использовались методы рамановской спектроскопии и электронный микронзондовый анализ. Данные изучения флюидных включений показывают, что месторождение начинает формироваться из Fe-Ca-Na-K-(Cl-S-C-O-H) расплава, сосуществующего с водяным паром очень низкой плотности, при температуре ~800–900°C. Формирование порфировых руд месторождения происходило в постмагматической гидротермальной обстановке на глубине 1–2 км в диапазоне температур от 580 до 330°C.

*Ключевые слова:* генезис Малмыжского золото-меднопорфирового месторождения, флюидные включения.

### ВВЕДЕНИЕ

Порфировые месторождения относятся к числу основных источников Cu, Mo, Au, Ag, Sn в мире, а также содержат сопутствующие Re, W, In, Pt, Pd, и Se (Sillitoe, 2010). На их долю приходится около 60% мирового производства меди и более 90% мирового производства молибдена (Sinclair, 2007). Медно-порфировые месторождения характеризуются штокверковой формой рудных тел, преимущественно крупными размерами с невысоким содержанием, но относительно равномерным пространственным распределением меди и наличием извлекаемых попутных ценных примесей (Hedenquist, Richards, 1998).

Особенно интенсивно порфировые месторождения мира изучались в течение последних трех десятилетий (Bodnar, Bean, 1980; Burnham, 1979; Candela, Piccoli, 1995; Cline, Bodnar, 1991; Hedenquist, Lowenstern, 1994; Hedenquist, Richards, 1998; Heinrich et al., 2005; Richards, 2011; Sillitoe, 2010, 2012), тем не менее, решение проблем генезиса месторождений и источника металлов

в рудах остается довольно противоречивым. Согласно ортомагматической модели, образование некоторых типов рудных месторождений, таких как медно-порфировые, происходит в процессе кристаллизации магмы, при этом рудообразующие компоненты распределяются между магмой и эксгаляционным флюидом. Позже, в ходе гидротермальных процессов, они перераспределяются, формируя месторождение (Перетяжко, Савина, 2010; Burnham, 1979; Gustafson, Hunt, 1975; Corbett, Leach, 1998; Henley, Mc Nabb, 1978; Titley, Bean, 1981; Reynolds, Beane, 1985; Hedenquist, Lowenstern, 1994; Proffett, 2003; Williams-Jones, Heinrich, 2005; Landtwing et al., 2005; Shen et al., 2010; Richards, 2011; Kodera et al., 2014). По мнению Хеденквиста и Ловенштерна (Hedenquist, Lowenstern, 1994), многочисленные события насыщения пара происходят еще в основной магматической камере, каждое из которых соответствует внедрению в вышележащие породы как магматических, так и рудоносных гидротермально-магматических флюидов. Некоторые исследователи, наоборот, считают, что

внедрение интрузий инициирует интенсивную конвекцию гидротермальной системы, при этом микроэлементы экстрагируются из окружающих пород и концентрируются, формируя рудные тела (Banks, Page, 1977; Cathles, 1977; Norton, 1982).

Для расшифровки условий рудообразования порфировых систем большое значение имеет изучение флюидных включений. Некоторые исследователи (Bodnar, 1981; Bodnar, Bean, 1980; Campos, 2002; Eastoe, 1978, 1982; Eastoe, Eadincton, 1986; Li, 2011; Moore, Nash, 1974; Nash, Cunningham, 1974; Nash, Theodore, 1971; Roedder, 1971; Ulrich, 2002) в своих работах демонстрируют широкую распространенность высокотемпературных (от 400 до 800°C) и высокосолёных (от 35 до 80% NaCl<sub>экв</sub>) флюидных включений. Кроме того, состав расплавных и флюидных включений, богатых летучими фазами, несет очень полезную информацию о поведении природных систем (Каменецкий и др., 1999; Коваль, Прокофьев, 1998; Roedder, 1992; Roedder, Coombs, 1967;

Thomas et al., 2000). Но в настоящее время данных о процессах, происходящих с магмой во время и после затвердевания, вплоть до формирования рудной минерализации, еще не достаточно. Одной из причин может быть недостаточная изученность высокотемпературных включений вследствие технических ограничений микротермокамер (Bodnar et al., 2014), и этот вопрос требует дальнейшего изучения.

### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Медно-порфировое месторождение Малмыжское расположено в северо-восточной части Средне-Амурской депрессии в 80 км от г. Комсомольск на Амуре (рис. 1). Оно приурочено к Журавлевскому террейну — раннемеловому синдвиговому турбидитовому бассейну западнее Центрального Сихотэ-Алинского разлома (Ханчук и др., 2004).

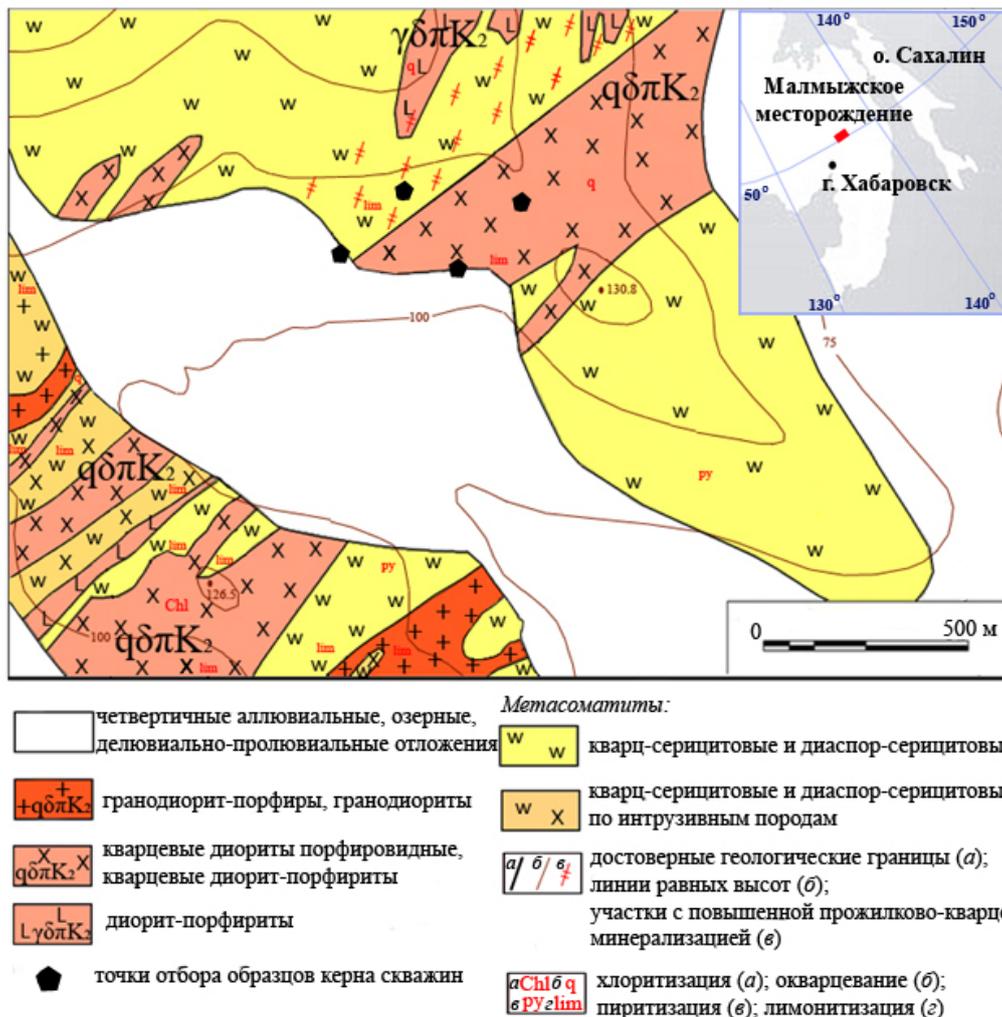


Рис. 1. Схема геологического строения Центрального участка месторождения Малмыжское (Чернявский, Шавкунов, 1977<sup>1</sup>).

<sup>1</sup> Чернявский В.С., Шавкунов Н.А. Отчет о результатах поисковых работ на золото на участках Малмыжских и Болоньских высот, Хоми, Карги и Юбилейном Малмыжской партии за 1974–76 гг. Министерство геологии РСФСР. Общий фонд ДВТГУ. №17994. Комсомольск-на-Амуре. 1977. 134 с.

Малмыжская порфировая система является частью Нижне-Амурского рудного кластера. Общие прогнозные ресурсы (категории  $P_1+P_2$ ) на основании опубликованных данных составляют 4.9 миллиона тонн меди и 266 т золота, при средних содержаниях меди 0.3–0.4% и золота 0.1–0.3 г/т (Читалин и др., 2013). Это первое крупное месторождения золото-меднопорфирового типа в регионе, открытое в постсоветский период. Поисковые и оценочные работы проведены в 2007–2014 гг. компанией ООО «Амур Минералс».

В геологическом строении рудного поля принимают участие осадочные терригенные отложения ниже- и верхнемелового возраста, прорванные верхнемеловыми интрузиями и дайками диорит-гранодиоритового состава. Все эти образования перекрыты четвертичными рыхлыми образованиями преимущественно аллювиального, озерно-аллювиального и пролювиального генезисов (рис. 1).

На площади месторождения развиты верхнемеловые магматические породы, относимые к ниже-амурской интрузивной серии. Выделены три позднемеловых интрузивных комплекса:

- диориты, кварцевые диориты, кварцевые диоритовые порфириты;
- гранодиориты, гранодиорит-порфиры и гранит-порфиры;
- дайки диоритовых и кварцсодержащих диоритовых порфиритов (Чернявский, Шавкунов, 1977<sup>1</sup>). На территории Центрального участка месторождения наиболее распространены метасоматиты, генетически связанные с интрузивными породами первой и третьей фаз. Они представлены калиевыми (биотит-магнетитовыми и содержащими вторичный калиевый полевой шпат), хлорит-серицитовыми, кварцевыми, кварц-серицитовыми (филлизиты) и карбонат-эпидот-хлоритовыми (пропилиты) разновидностями.

Основные рудные минералы — пирит и халькопирит, реже встречаются галенит, сфалерит, борнит и халькозин. Они наблюдаются в виде тонко-дисперсной рассеянной вкрапленности преимущественно в калиевых и хлорит-серицитовых метасоматитах, образуют скопления и гнезда в местах замещения темно-цветных силикатов, а также формируют сульфидные и кварц-сульфидные прожилки.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования было отобрано 10 образцов из керна скважин в интервале глубин от 36 до 630 м, что позволяет проследить за порфировой системой на всех уровнях (рис. 2). Около 100 газовой-жидких включений были исследованы

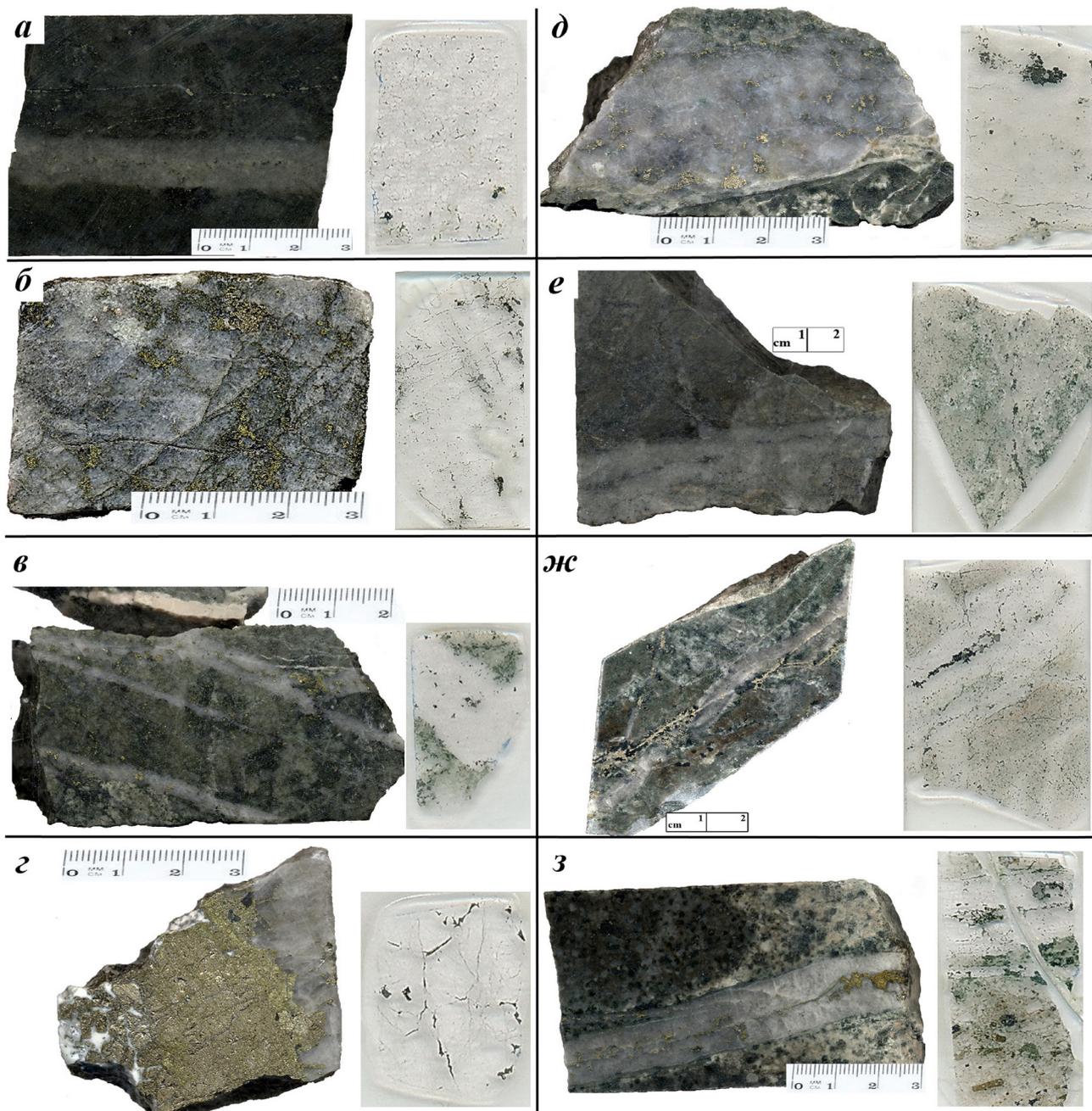
и проанализированы микротермометрически в лаборатории кафедры петрологии геологического факультета МГУ на установках Linkam THMS 600 и Linkam THMSG 1500. Для экспериментов с замораживанием использовалась установка Linkam THMS 600 с охлаждением жидким азотом. Для того, чтобы определить минералы-узники и летучие вещества в газовой-жидких включениях, образцы анализировались с использованием автоматического рамановского спектрометра XPIoRA (Horiba Scientific) с аргоновым лазером с длиной волны 532 нм. Для определения элементарного состава многофазных включений использовался электронный микросонд JEOL JXA-8530F, оснащенный пятью WDS спектрометрами (метод дисперсионной рентгеновской спектроскопии по длине волны) и системой Thermo System 7 SDD-EDS, в Университете Аляски Фэрбенкс (UAF).

Концентрация солей во флюидных включениях, содержащих галит, определена по уравнению Стернера (Stern, 1988), а для трехфазных включений, содержащих галит и сильвин  $H_2O-NaCl-KCl$ , использовались диаграммы Реддера (Roedder, 1984). Давления (бар) рассчитаны на основе системы  $H_2O-NaCl$  (Driesner, Heinrich, 2007).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

В соответствии с классификацией флюидных включений (Campos et al., 2002), в исследованных образцах выделены следующие типы включений (рис. 3): М-тип (расплавные включения в кварце), MS-тип (многофазные, содержащие несколько растворимых полупрозрачных кристаллов, а также небольшое количество жидких и газовых фаз), G-тип (преимущественно газовые включения), В-тип (включения с высокой концентрацией солей) и W-тип (преимущественно жидкие включения) (Буханова, 2014).

Включения М («melt») типа — расплавные включения в кварце, содержащие как захваченные силикаты, так и рудные минералы (преимущественно оксиды железа). Выявить такие включения можно только при нагревании, так как при комнатной температуре не различимы какие-либо газовые и жидкие фазы. Гомогенизируются они при высоких температурах — более 1140°C. Такие включения представляют собой магматический расплав, захваченный растущими кристалликами кварца. Включения типа М встречаются редко, расположены только в центральных частях зерен, имеют размеры от 15 до 40 мкм. Вероятно, они представляют собой первичные включения в магматическом кварце, захваченном растущими кварцевыми



**Рис. 2.** Образцы и сечения с высоко-температурными флюидными включениями, содержащими минеральные фазы: MD41-446.9 — халькопирит-пирит-кварцевый прожилок в калиевых метасоматитах по диоритам (а); MD41-608.2 — пирит-халькопирит-кварцевая жила (б); MD42-95.8 — халькопирит-пирит-кварцевые прожилки в кварц-серицит-хлоритовых метасоматитах по диоритам (в); MD43-327.4 — серицит-карбонат-сульфидная (пирит-халькопирит-сфалерит-галенит) жила (г); MD44-121.3 — серицит-сульфидно-кварцевая жила в кварц-хлорит-серицитовых метасоматитах по диоритам (д); MD45-157.7 — кварцевый прожилок центрального типа с сульфидами (пирит-халькопирит, редко сфалерит) и магнетитом (е); MD44-175.9 — хлоритизированные калиевые метасоматиты по песчаникам с магнетит-сульфидными (халькопирит>>пирит) прожилками секущими кварцевые (ж); MD49-329.3 — кварц-сульфидный прожилок центрального типа секущий диориты с калиевыми вторичными изменениями, сменяющимися кварц-серицитовыми (з).

прожилками при последующих гидротермально-метасоматических процессах.

Включения MS («multi solid») типа — чрезвычайно концентрированные, практически не содержат каких-либо жидких фаз при комнатной температуре (до 10% от общего объема включения). В этом отношении они напоминают

«безжидкостные» включения, описанные в комплексе Бушвелд (Schiffries, 1990). Размер включений MS не превышает 30 мкм. Во время наблюдений при комнатной температуре не всегда легко отличаются от более типичных для порфировых месторождений включений типа В. Они могут быть определены лишь при посте-

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ

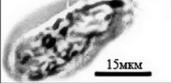
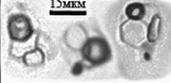
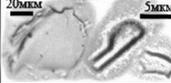
Тип включений	Облик включений	Т гом., °С	Концентрация солей, мас. %	Давление, бар
M		> 1140	-	800-1000
MS <sub>2</sub>		850-1000	68-80	680-830
MS <sub>1</sub>		670-730	58-73	550-710
B <sub>3</sub>		542-580	53-60	460-550
B <sub>2</sub>		405-503	35-58	200-400
B <sub>1</sub>		331-409	27-37	100-210
G		431-466	до 4	350-450
W <sub>2</sub>		220-305	до 6	50-180
W <sub>1</sub>		100-196	до 4	до 50

Рис. 3. Классификация включений Малмыжского золото-меднопорфирового месторождения.

пенном нагреве до высоких температур (вплоть до 1000°C).

Кроме дефицита жидкости и относительно постоянного объема газовой фазы, такие включения содержат четко определенные, постоянные минеральные вещества, достаточно легко диагностируемые (рис. 4). Преимущественно это типичный набор дочерних минералов: три полупрозрачных кристалла и небольшой рудный. Растворимые полупрозрачные кристаллы — галит (NaCl), сильвин (KCl) и хлорид железа (FeCl<sub>3</sub>). Хлорид железа — полупрозрачный минерал, который обычно показывает зеленовато-голубой цвет в проходящем свете и имеет сильное двулучепреломление. Нередко кристаллы хлоридов также содержат едва различимую рудную фазу.

Среди включений типа MS выделяется два подтипа (рис. 3). Подтип MS<sub>1</sub> объединяет включения относительно небольших размеров — до 10 мкм. Газовая фаза в таких включениях преимущественно не превышает 10–20% объема вакуоли. Включения подтипа MS<sub>2</sub> — большего, около 15–30 мкм, размера и чаще всего газовый пузырек в них занимает около 30% объема вакуоли. Включения подтипа MS<sub>2</sub> часто тяготеют к центральным частям кристаллов, в то время как для подтипа MS<sub>1</sub> более характерно линейное распределение вдоль растущих граней в кристалле-хозяине.

Гомогенизируются MS включения всегда в жидкость; для подтипа MS<sub>2</sub> характерны температуры 850–1000°C, а для MS<sub>1</sub> 670–730°C. При охлаждении включений типа MS из-за недостатка жидкости фазовый переход не наблюдается.

Судя по минеральным фазам, наблюдаемым в MS включениях, скорее всего, это система NaCl-KCl-CaCO<sub>3</sub>-((Fe±Cu)Cl-S)-H<sub>2</sub>O. К сожалению, для такой системы пока еще не существует достаточного количества экспериментальных данных. На рис. 4 показано распределение элементов во включении MS типа, где сульфиды меди, железа и цинка сосредоточены в кристалле галита. Вероятно, это Si<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>O<sub>z</sub>-NaCl-KCl-((Fe-Cu±Zn)Cl-S). Для определения концентрации солей такой среды, возможно, использовать приближение к системе H<sub>2</sub>O-NaCl-KCl.

Исходя из температур растворения галита и сильвина, можно предполагать, что соленость находится в пределах 58–80 мас. % NaCl экв. (рис. 5), что соответствует рассолам-расплавам. Поскольку включения MS-типа соответствуют более сложной системе, чем NaCl-H<sub>2</sub>O, то представленные солености имеют приблизительные значения.

Включения типа В («bring»), как правило, на 30–50% состоят из жидкой фазы, на 20–40% из газовой фазы и на 20–50% из минеральной. Минеральная фаза зачастую представлена бесцветными кристаллами; в основном, это хорошо сформировавшиеся кубики галита. Среди включений типа В выделяется три подтипа. Включения подтипа В<sub>1</sub> — двухфазные, твердых фаз в них не наблюдается. Во включениях подтипов В<sub>2</sub> и В<sub>3</sub> кубики галита (NaCl) сопровождается более округлыми прозрачными кристалликами — вероятно сильвином (KCl). Иногда, так же, как и во включениях типа MS, наблюдается хлорид железа. В некоторых включениях типа В различных подтипов встречается небольшое количество метана выявленное как при замораживании включений, так и с использованием рамановского спектрометра (Буханова, 2014).

Чаще включения типа В распределены вдоль растущих граней в кристалле-хозяине. Их размеры варьируют от нескольких микрон до 15–20 мкм. Включения такого типа обычно округлые или удлинённые, и они всегда тяготеют к отрицательным формам кристаллов.

Включения подтипов В<sub>2</sub> и В<sub>3</sub> выделены по температурам гомогенизации. При микроскопическом исследовании включения подтипа В<sub>3</sub> отличаются от подтипа В<sub>2</sub> лишь чуть более крупными, 10–20 мкм, размерами. Иногда включения содержат зерна рудных минералов (оксиды железа, пирит и халькопирит). Реже присутствуют и другие твердые фазы неизвестного состава.

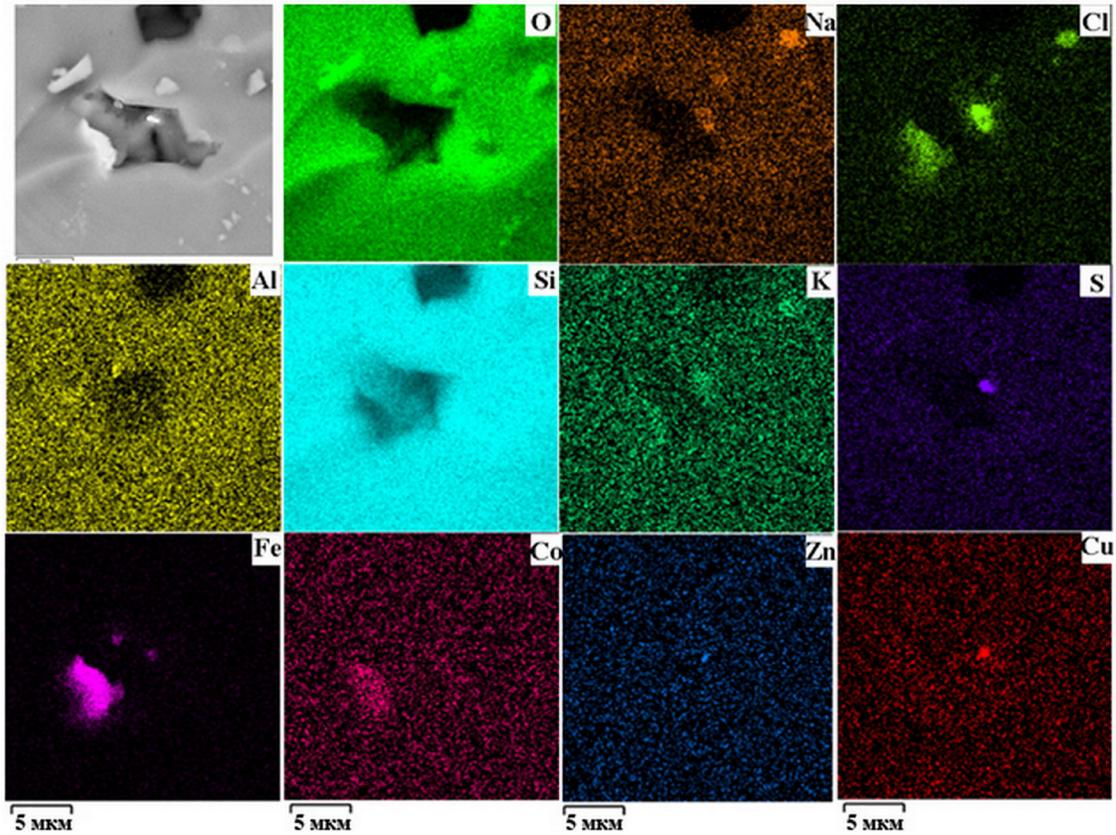


Рис. 4. Микрофотография включения MS типа, содержащего фазы сульфидов меди и цинка в обратно рассеянных электронах, и карта распределения элементов (O, Na, Cl, Al, Si, K, S, Fe, Co, Zn, Cu). Интенсивность окраски обозначает степень концентрации данного элемента. Анализ выполнен на электронном микроскопе JEOL JXA-8530F в Университете Аляски Фэрбенкс. Аналитики: К. Северин, Д.С. Буханова.

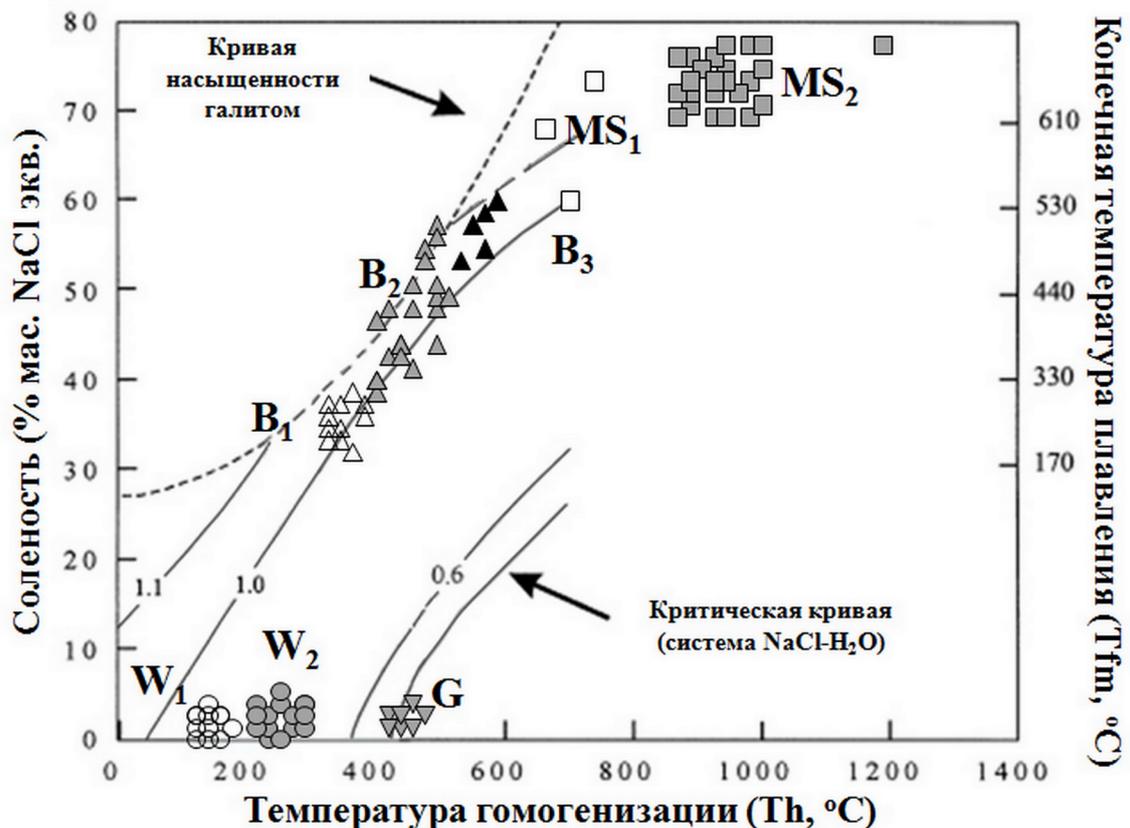


Рис. 5. Эволюция температуры гомогенизации включений и солёности (Буханова, 2015).

Гомогенизация включений типа В происходит как в жидкую, так и в газовую фазу, что свидетельствует о связи данных включений с основными событиями вскипания гидротермального рудного раствора. Температуры гомогенизации включений подтипа  $V_1$  от 331 до 409°C,  $V_2$  от 405 до 503°C и  $V_3$  от 542 до 580°C (Буханова, 2014).

Все типы и подтипы флюидных включений представлены на диаграмме эволюции включений — зависимости температур гомогенизации от их состава (рис. 5). Наиболее поразительным является большой диапазон температур гомогенизации различных подтипов включений типов В и MS. Так, например, флюидные включения типа В захватывались в очень широком диапазоне температур: от 620°C — близких к магматическим, до 330°C — близких к температурам поздних включений.

Сложность определения солёности для многофазных включений подтипов  $V_2$  и  $V_3$  заключается в том, что NaCl-эквиваленты не в состоянии служить показателем реальной системы. Но так как во включениях присутствуют вместе галит, сильвин и хлориды железа, для оценки использовалась система NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O (Roedder, 1984). Концентрация солей для включений подтипа  $V_1$  принята в пределах 27–37 мас.% NaCl экв., для подтипа  $V_2$  35–58 мас.% NaCl экв., а для подтипа  $V_3$  53–60 мас.% NaCl экв. (что означает в действительности NaCl-KCl-FeCl эквивалент).

Включения типа G («gas rich») — преимущественно сложены газовой фазой, низко солёные и низкоплотные. Газовая фаза в таких включениях занимает более 80% от объема вакуоли, а водная фаза образует тонкий ободок вокруг пузырька. Размер этих включений колеблется от первых до 10 мкм. Часто такие включения пространственно тесно связаны с включениями типа В.

Во время криометрических исследований при охлаждении включений типа G не наблюдалось изменений ни в размере газового пузырька, ни в его морфологии, а вследствие малого размера включений и незначительного количества жидкой фазы оценить температуру эвтектики не представлялось возможным. Тем не менее для нескольких включений температуры плавления льда были измерены (около -2.5°C и менее) и соответствуют < 4 мас.% NaCl экв. (Буханова, 2015).

Включения типа W («water rich») — преимущественно жидкие. Их легко отличить от включений типа В по значительно меньшему объёму газового пузырька при комнатной температуре и отсутствию каких-либо дочерних минералов или же их присутствию в незначительных количествах. Они всегда гомогенизируются в жидкость при более низкой температуре, чем включения типа В — от 220 до 305°C для включений подтипа  $W_2$  и между 100 и 196°C для включений подтипа

$W_1$ . Концентрация солей во включениях тип  $W_2$  не превышает 6 мас.% NaCl экв., а для  $W_1$  4 мас.% NaCl экв. (Буханова, 2015). Как правило, это включения неправильной формы, выстраивающиеся вдоль микротрещин, также они наиболее крупные, до 100 мкм, среди всех типов. Судя по их морфологии и распределению, они безусловно являются вторичными.

Во включениях подтипа  $W_1$  иногда присутствует минеральная фаза — прозрачный белый сульфат, который растворяется при температурах около 100-150°C. Вероятно, вторичные включения подтипа  $W_1$  характеризуют условия поступления флюида, формировавшего гипс-ангидритовые или цеолитовые прожилки, распространённые на месторождении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В жильном кварце золото-меднопорфирового месторождения Малмыжское выявлено пять типов включений (рис. 6): М (магматические, расплавные), MS (многофазные преимущественно состоящие из минеральных агрегатов и небольшого количества флюида), В (рассолы), G (преимущественно газовые) и W (преимущественно водные).

MS включения, которые содержат ряд твердых при комнатной температуре веществ, а также небольшую водную фазу (вероятно, это система NaCl-KCl-CaCO<sub>3</sub>-((Fe-Cu)Cl-S)-H<sub>2</sub>O, при средней солёности 70 мас.% NaCl<sub>экв.</sub>), гомогенизируются при магматических температурах около 950°C и, безусловно, представляют собой включения рудоносного флюида, захваченные при формировании прожилков в процессе кислотного выщелачивания. Такие включения представляют собой первый эксгаляционный флюид, который отделялся от магмы на глубине. Но фактически сделанные оценки температурного режима формирования таких включений дают завышенные значения. Методами рамановской спектроскопии во включениях рассолов установлено присутствие кристаллогидратных соединений железа, для которых характерно переменное количество молекулярно-связанной воды. В процессе первичного нагрева кристаллогидраты растворяются, а при быстром охлаждении кристаллизуются, но с меньшим содержанием воды. В изохорических условиях увеличение количества флюида и уменьшение объёма кристаллических фаз приводит к значительному повышению температуры гомогенизации включений, причем разница в значениях температур гомогенизации во включениях, содержащих кристаллогидраты, может достигать 100–250°C (Перетяжко, Савина, 2010).

В отличие от типа MS, включения типа В вторичные в данной системе. Не смотря на это

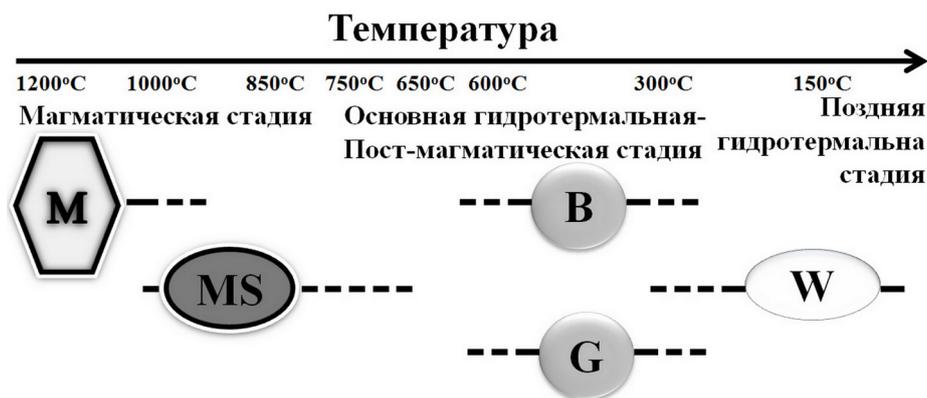


Рис. 6. Эволюция флюида месторождения Малмыжское (Буханова, 2014).

сингенетичны основной стадии формирования золото-меднопорфировых руд Малмыжского месторождения.

Участие флюидов и летучих компонентов в системе расплав-флюид особенно важно, так как в их присутствии происходит более глубокая дифференциация магм, а следовательно, и концентрация флюидом рудных компонентов. Формирование Малмыжского месторождения происходило при высоких содержаниях в первичном флюиде системы  $\text{HCl}$  и  $\text{SO}_2$ , отвечающих за перенос рудных элементов из расплава, кислотное выщелачивание и отложение. Возможно, это определяет связь медно-порфировых месторождений с вулканизмом надсубдукционных обстановок, для которого характерны высокие концентрации хлора. При разделении флюида происходит 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 (Landtwing et al., 2005). В то же время, растворимость меди в хлоридных растворах резко падает при температуре, близкой к  $400^\circ\text{C}$ , соответствующей температуре захвата включений типа В и G (Landtwing et al., 2005).

Изучение флюидных включений в кварце прожилков показывает, что это месторождение начинает формироваться из Fe-Ca-Na-K-(Cl-S-C-O-H) расплава, сосуществующего с водяным паром — включения типа  $\text{MS}_2$ . Для образования такого флюида требовался магматический источник диоритового состава, богатый железом и хлороводородом, заложенный на малой ( $< 3$  км) глубине, дегазирующий и выделяющий гиперминерализованную жидкость и пар при высокой ( $\sim 800$ – $900^\circ\text{C}$ ) температуре. При охлаждении до температур около  $600$ – $700^\circ\text{C}$ , создаются условия для открытия первых трещин, чему, вероятно, соответствуют включения типа  $\text{MS}_1$ . При дальнейшем охлаждении в постмагматической гидротермальной обстановке, на глубине 1–2 км и при температурах от  $580$  до  $330^\circ\text{C}$  происходит захват

включений типа В и G, сингенетичных основной стадии формирования руд месторождения. Слабоминерализованные преимущественно жидкие включения типа W захватываются при температурах менее  $305^\circ\text{C}$  и соответствуют завершающей стадии притока флюида в систему.

Авторы признательны сотрудникам и руководству ООО «Амур Минерал», сотрудникам лаборатории вулканогенного рудообразования ИВиС ДВО РАН, Райнеру Ньюберри (Rainer Newberry) и Кену Северину (Ken Severin) из Университета Аляски в городе Фэрбенкс (UFA). Работа выполнена при финансовой поддержке ДВО РАН (грант №15-1-2-095) с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

#### Список литературы

- Буханова Д.С. Высокотемпературные газожидкие включения в жильном кварце меднопорфирового месторождения Малмыж, Дальний Восток России // Материалы XIII региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки». ИВиС ДВО РАН. 2014. С. 69–80.
- Буханова Д.С. Малмыжское Au-Cu-порфировое месторождение (Хабаровский край): условия формирования Центрального участка по данным исследования флюидных включений // Материалы XIII региональной молодежной научной конференции «Исследования в области наук о Земле». ИВиС ДВО РАН. 2015. С. 4–16.
- Коваль П.В., Прокофьев В.Ю. Т-Р условия кристаллизации гранитоидов Монголо-Охотской зоны по данным исследования расплавных и флюидных включений // Петрология. 1998. Т. 6. № 5. С. 497–511.
- Перетяжко И.С., Савина Е.А. Флюидно-магматические процессы при образовании пород массива онгонитов Ары-булак (Восточное

- Забайкалье) // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 10. С. 1423–1442.
- Ханчук А.И., Голозубов В.В., Симащенко В.П., Малиновский А.И.* Гигантские складки с крутопадающими шарнирами в структурах орогенных поясов (на примере Сихотэ-Алиня) // ДАН. 2004. Т. 394. № 6. С. 791–795.
- Читалин А.Ф., Ефимов А.А., Воскресенский К.И. и др.* Малмыж — новая крупная золотомедно-порфировая система мирового класса на Сихотэ-Алине // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 3. С. 65–69.
- Banks N.A., Page N.J.* Some observations that bear on the origin of porphyry copper deposits // United States Geol. Survey. 1977. № 77–127. 14 p.
- Bodnar R.J.* Use of fluid inclusions in mineral exploration: comparison of observed features with theoretical and experimental data on ore genesis // Geological Survey Abstracts. 1981. V. 13. № 5. 412 p.
- Bodnar R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D., Steele-MacInnis M.* Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // Treatise on Geochemistry. 2014. V. 13. P. 119–142.
- Bodnar R.J., Bean R.E.* Temporal and spatial variations in hydrothermal fluid characteristics during vein filling in preore cover overlying deeply buried Porphyry Copper-type mineralization at Red Mountain Arizona // Economic Geology. 1980. V. 75. № 6. P. 876–893.
- Burnham C.W.* Magmas and hydrothermal fluids // Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits / Edited by H.L. Barnes. Published by New York John Wiley & Sons Interscience Publication, 1979. P. 71–136.
- Campos E., Touret J.L.R., Nikogosian I. et al.* Overheated, Cu-bearing magmas in the Zaldívar porphyry-Cu deposit, Northern Chile. Geodynamic consequences // Tectonophysics. 2002. V. 345. № 1. P. 229–251.
- Candela P.A., Piccoli P.M.* Model ore-metal partitioning from melts into vapor and vapor/brine mixtures // Magmas, Fluids, and Ore Deposits. 1995. V. 23. P. 101–127.
- Cathles L.M.* An analysis of the cooling of intrusives by groundwater convection which includes boiling // Economic Geology. 1977. V. 72. № 5. P. 804–826.
- Cline J.S., Bodnar R.J.* Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical Calc-Alkaline melt? // JGR. 1991. V. 96. № B5. P. 8113–8126.
- Corbett G.J., Leach T.M.* Southwest Pacific Rim Gold-Copper systems: Structure, Alteration and Mineralization // Special Pub. Society of Economic Geology Ins. № 6. 1998. 237 p.
- Driesner T., Heinrich C.A.* The System H<sub>2</sub>O-NaCl. I. Correlations for molar volume, enthalpy, and isobaric heat capacity from 0 to 1000 degrees C, 1 to 5000 bar, and 0 to 1 X-NaCl // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2007. V. 71. № 20. P. 4902–4919.
- Eastoe C.J.* A fluid inclusion study of the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea // Economic Geology. 1978. V. 73. № 5. P. 721–748.
- Eastoe C.J.* The physics and chemistry of the hydrothermal system in the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea // Economic Geology. 1982. V. 77. № 1. P. 127–153.
- Eastoe C.J., Eadington P.J.* High-temperature fluid inclusions and the role of the biotite granodiorite in mineralization at the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea // Economic Geology. 1986. V. 81. № 2. P. 478–483.
- Eugster H.P.* Granites and hydrothermal ore deposits: A geo-chemical framework // Mineralogical Magazine. 1985. V. 49. № 350. P. 7–23.
- Gustafson L.B.* Porphyry copper deposits and calcalkaline volcanism // The Earth: Its origin, structure and evolution / Edited by Mc M.W. Elhenny. Academic Press, 1979. P. 427–468.
- Hedenquist J.W., Lowenstern J.B.* The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits // Nature. 1994. V. 370. № 6490. P. 519–527.
- Hedenquist J.W., Richards J.P.* The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits // Reviews in Economic Geology. 1998. V. 10. P. 235–256.
- Heinrich C.A., Halter W., Landtwing M.R. et al.* The formation of economic porphyry copper (-gold) deposits: constraints from microanalysis of fluid and melt inclusions // Special publication — Geological society of London. 2005. V. 248. 247 p.
- Henley R.W., McNabb A.* Magmatic vapor plumes and ground-water interaction in porphyry copper emplacement // Economic Geology. 1978. V. 73. № 1. P. 1–20.
- Kamenetsky V.S., Wolfe R.C., Eggins S.M. et al.* Volatile exsolution at the Dinkidi Cu-Au porphyry deposit, Philippines: A melt-inclusion record of the initial ore-forming process // Geology. 1999. V. 27. № 8. P. 691–694.
- Kodera P., Heinrich C.A., Wälle M. et al.* Magmatic salt melt and vapor: Extreme fluids forming porphyry gold deposits in shallow subvolcanic settings // Geology. 2014. V. 42. № 6. P. 495–498.
- 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 Planetary Science Letters. 2005. V. 235. № 1. P. 229–243.

- Li J.X., Li G.M., Qin K.Z. et al.* High-temperature magmatic fluid exsolved from magma at the Duobuza porphyry copper-gold deposit, Northern Tibet // *Geofluids*. 2011. V. 11. № 2. P. 134–143.
- Moore W.J., Nash J.T.* Alteration and fluid inclusion studies of the Porphyry Copper ore body at Bingham, Utah // *Economic Geology*. 1974. V. 69. № 5. P. 631–645.
- Nash J.T., Cunningham C.G.* Fluid inclusions studies of the porphyry copper deposit at Bagdad, Arizona // *U.S. Geological Survey Journal of Research*. 1974. V. 2. P. 31–34.
- Nash J.T., Theodore T.G.* Ore fluids in the porphyry copper deposit at Copper Canyon, Nevada // *Economic Geology*. 1971. V. 66. № 3. P. 385–399.
- Norton D.L.* Fluid and heat transport phenomena typical of copper-bearing pluton environments // *Advances in geology of porphyry copper deposits of southwestern North America*. University of Arizona Press, Tucson. 1982. P. 59–72.
- Proffett J.M.* Geology of the Bajo de la Alumbrera porphyry copper-gold deposit, Argentina // *Economic Geology*. 2003. V. 98. № 8. P. 1535–1574.
- Reynolds T.J., Beane R.E.* Evolution of hydrothermal fluid characteristics at the Santa Rita, New Mexico, porphyry copper deposit // *Economic Geology*. 1985. V. 80. № 5. P. 1328–1347.
- Richards J.P.* Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins // *Ore Geology Reviews*. 2011. V. 40. № 1. P. 1–26.
- Roedder E.* Fluid inclusion studies on the Porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana and Climax, Colorado // *Economic Geology*. 1971. V. 66. № 1. P. 98–118.
- Roedder E.* Fluid inclusions // *Reviews in Mineralogy / Edited by P.H. Ribbe*. Washington, DC: Mineralogical Society of America, 1984. V. 12. P. 79–108.
- Roedder E.* Fluid inclusion evidence for immiscibility in magmatic differentiation // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1992. V. 56. № 1. P. 5–20.
- Roedder E., Coombs D.S.* Immiscibility in granitic melts, indicated by fluid inclusions in ejected granitic blocks from Ascension Island // *Journal of Petrology*. 1967. V. 8. № 3. P. 417–451.
- Schiffries C.M.* Liquid-absent aqueous fluid inclusions and phase equilibria in the system  $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$  // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990. V. 54. № 3. P. 611–619.
- Shen P., Shen Y.C., Wang J.B. et al.* Methane-rich fluid evolution of the Baogutu porphyry Cu-Mo-Au deposit, Xinjiang, NW China // *Chemical Geology*. 2010. V. 275. № 1. P. 78–98.
- Sillitoe R.H.* Porphyry copper systems // *Economic Geology*. 2010. V. 105. № 1. P. 3–41.
- Sillitoe R.H.* Copper Provinces // *SEG Special Publication 16 / Edited by J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus*. 2012. P. 1–18.
- Sinclair W.D.* Porphyry deposits // *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication № 5*. 2007. P. 223–243.
- Sterner S.M., Hall D.L., Bodnar R.J.* Synthetic fluid inclusions: V. Solubility relations in the system  $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$  under vapor-saturated conditions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1988. V. 52. № 5. P. 989–1005.
- Thomas R., Webster J.D., Heinrich W.* Melt inclusions in pegmatite quartz: Complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids at low pressure // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2000. V. 139. № 4. P. 394–401.
- Titley S.R., Bean R.E.* Porphyry copper deposits: Part I. Geologic settings, petrology, and tectonogenesis // *Economic Geology*. 75th Anniversary Volume. 1981. P. 214–235.
- Ulrich T., Gunther D., Heinrich C.A.* The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*. 2002. V. 97. № 8. P. 1888–1920.
- Williams-Jones A.E., Heinrich C.A.* Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits // *Economic Geology*. 2005. V. 100. № 7. P. 1287–1312.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ  
**THE FORMATION OF MALMYZHSKOYE Au-Cu-PORPHYRY DEPOSIT,  
Khabarovsk Krai (BASED ON THE STUDY OF FLUID INCLUSIONS)**

**D.S. Bukhanova<sup>1</sup>, P.Yu. Plechov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006;*

<sup>2</sup> *Moscow State University, Moscow, 119992*

The paper presents the results of study of fluid inclusions from quartz lodes and veinlets crossing the ore body in different parts of the Central district of the Malmyzhskoye gold-copper porphyry deposit (Khabarovsk Krai). The authors revealed the staging of deposit formation. Specific chemical and P-T conditions are proposed for different stages. The Raman spectroscopy methods and electron microprobe analysis were used to determine the composition of the multiphase fluid inclusions. These fluid inclusions indicate that the deposit begins to form from the Fe-Ca-Na-K-(Cl-S-C-O-H) melt, which coexists with low density water vapor at a high temperature of about 800-900°C. The porphyry ores in the deposit were formed under the post-magmatic hydrothermal conditions between depths of 1-2 km over a temperature range of 580 to 330°C.

*Keywords: Malmyzhskoye Cu-Au-porphyry deposit genesis, fluid inclusions.*