

УДК 553.072, 553.430

В.В. Свистунов¹, В.Ю. Прокофьев²

СОСТАВ РУДООБРАЗУЮЩЕГО ФЛЮИДА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РУД МАЛМЫЖСКОГО АU-CU-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ РУДНОГО УЧАСТКА СВОБОДА (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК, РОССИЯ)

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 119017, Москва, Ж-17, Старомонетный пер., 35*

*Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1
Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, RAS, 119017, Moscow, Staromonety lane, 35*

Исследованы флюидные включения в кварце из промышленных руд участка Свобода — одного из главных промышленных участков Au-Cu-порфировой минерализации Малмыжского месторождения. Установлен преимущественно хлоридный состав флюида, формировавшего промышленную золото-медную минерализацию месторождения. Дана оценка основных физико-химических параметров рудообразующего флюида: температура 250–530 °С, концентрация солей 0,8–48,0 масс. %-экв. NaCl, давление 15–62 МПа. На основе расчетов значений давления рудообразующего флюида сделаны выводы о глубине формирования рудной минерализации в диапазоне 1,5–2,4 км и восходящем перемещении рудовмещающего блока на 900 м в процессе рудоотложения. Полученные данные можно использовать при проведении поисковых и разведочных работ на Au-Cu-порфировых объектах.

Ключевые слова: порфировые месторождения, золото, медь, флюидные включения, температура, концентрация солей, давление, глубина.

Fluid inclusions in quartz from one of the Au-Cu mineralization centers of the Malmyzh porphyry deposit's — Freedom are studied. Established the chloride-predominant composition of fluid, that was formed Au-Cu mineralization of deposit. The main physical and chemistry characteristics of ore-forming fluid: temperature — 250–530 °C, salts concentration — 0,8–48,0 wt% NaCl eq., pressure — 15–62 MPa. Based on calculations of ore-formed fluids pressure concluded what ore formed on depth 1,5–2,4 km. The ore-bearing block moved up to 900 m during the ore-formation time. The results of study can be used in prospecting and exploration of gold-copper porphyry deposits.

Key words: porphyry deposits, gold, copper, fluid inclusions, temperature, salinity, pressure, depth.

Введение. Малмыжское Au-Cu-порфировое месторождение расположено на территории Хабаровского края. Оно относится к категории крупных месторождений и содержит более 5 млн т меди и 278 т золота [Читалин и др., 2013, Малмыжское месторождение [Электр. ресурс]]. Геологоразведочные работы на нем проводятся в течение последних 15 лет, в скором времени планируется начало его эксплуатации. В связи с большими перспективами обнаружения аналогичных месторождений золото-порфирового типа на территории Сихотэ-Алиня и смежных областей актуально всестороннее изучение геологических особенностей формирования промышленной минерализации Малмыжского месторождения, в том числе параметров мине-

ралообразующего флюида. Ключ для понимания природы рудоформирующих процессов — исследование флюидных включений, что подтверждено многочисленными публикациями российских и зарубежных геологов [Roedder, 1971; Landtwing, 2005; Николаев и др., 2016].

Отметим, что для Малмыжского месторождения уже проводились исследования флюидных включений [Буханова, Плечов, 2017; Soloviev et al., 2019]. Однако авторы этих публикаций изучали минералообразующие флюиды процесса в целом, включая предрудные метасоматиты и дорудные магматические ассоциации. Наши исследования имели целью установить параметры и состав флюида, формирующего промышленные руды с

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, аспирант; *e-mail:* vasilysvistunov@mail.ru

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, зав. лабораторией геохимии, гл. науч. с., докт. геол.-минер. н.; *e-mail:* sophs@mail.ru

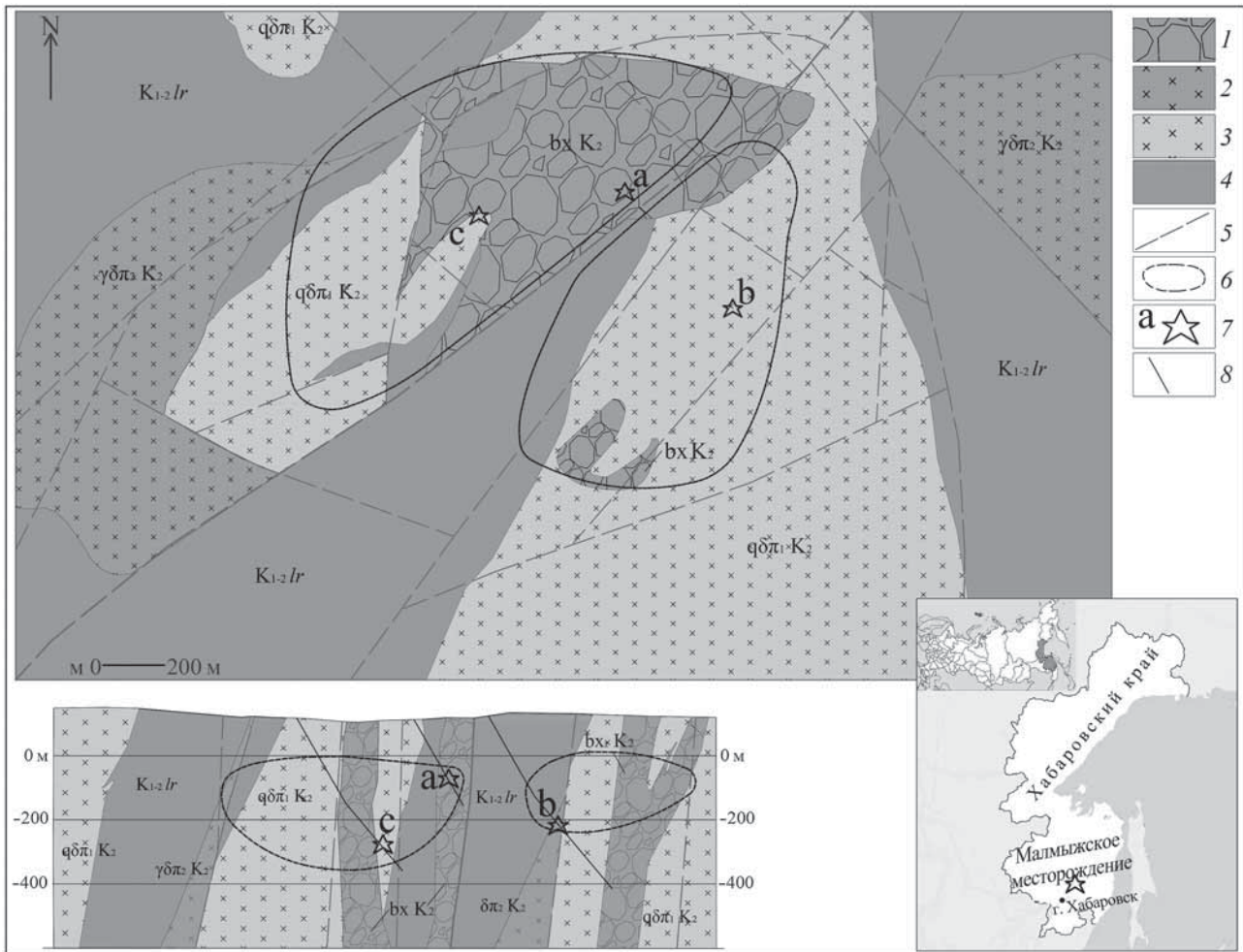


Рис. 1. Схематическая геологическая карта и разрез рудного участка Свобода Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения: 1 — эруптивные брекчии 2-й фазы внедрения (бхК₂); 2 — гранодиорит-порфиры 2-й фазы внедрения (γδπ₂К₂); 3 — кварцевые диорит-порфиры и диорит-порфиры 1-й фазы внедрения (қдπ₁К₂, δπ₁К₂); 4 — терригенные отложения ларгасинской свиты (К₁₋₂lr); 5 — разрывные нарушения; 6 — условный контур рудных залежей (Cu > 0,1%); 7 — места отбора проб для исследования флюидных включений, 8 — скважины

минералами золота и меди, чтобы установить граничные параметры формирования промышленной минерализации месторождения.

Авторы статьи исходят из позиции, что геологическое строение Малмыжского месторождения позволяет рассматривать каждый центр порфировой минерализации (рудный участок) как относительно изолированный рудный объект, характеризующийся своими геохимическими особенностями. В качестве объекта исследований был выбран один из наиболее крупных рудных центров месторождения — участок Свобода.

Геологическое строение рудного участка Свобода. Участок Свобода сложен терригенными отложениями ларгасинской свиты мелового возраста (рис. 1), в разной степени подвергшимися ороговикованию из-за внедрения штокоподобных магматических тел мелового возраста. Тела представлены двумя фазами внедрения: к 1-й фазе относятся диорит-порфиры и кварцевые диорит-порфиры, ко 2-й — кварцевые диорит-порфиры и гранодиорит-порфиры, также ко

второй интрузивной фазе относятся тела эруптивных (гидротермально-магматических) брекчий. В центральной части участка проходит крупный разлом левосдвиговой (или взбросо-сдвиговой) кинематики северо-восточного направления с амплитудой смещения до нескольких сотен метров.

Метасоматическая зональность участка Свобода в целом соответствует классической зональности медно-порфировых месторождений [Свистунов, 2020; Lowell, Guilbert, 1970; Кривцов, 1983, 1986]. Калишпат-биотитовые метасоматиты слагают небольшие ядра размером несколько десятков — несколько сотен метров, их обрамляют мощные (сотни метров) и наиболее распространенные кварц-хлорит-серицитовые и пирит-кварц-серицитовые (филизитовые) метасоматиты. Эти типы метасоматитов вмещают значительную часть рудных залежей. Локально развиты серицит-хлоритовые метасоматиты. В обрамлении рудных залежей представлены пропилитовые метасоматиты (кварц-эпидот-хлоритовые), также проявлены окварцевание и ороговикование.

Минералы	Стадии минералообразования		
	Дорудная	Продуктивная	Пострудная
Кварц	—————	—————	—————
Калиевый полевой шпат	—————		
Серицит		—————	
Хлорит		—————	
Карбонаты			—————
Магнетит	—————		
Пирит			—————
Халькопирит		—————	
Борнит		—————	
Сфалерит		—————	
Галенит		—————	
Молибденит	—————		
Самородное золото		—————	
Теллуриды			—————
Селениды			—————
Сульфосоли			—————
Блеклые руды			—————

Рис. 2. Схематическая последовательность образования рудных минералов, по [Буханова, 2017; Иванов и др., 2013; Soloviev et al., 2019]

Золото-медная минерализация участка Свобода характеризуется прожилково-вкрапленной текстурой. Она сконцентрирована в пределах двух рудных залежей. Восточная залежь локализована в пределах штока кварцевых диорит-порфиритов 1-й фазы внедрения. Центральная залежь, более крупная, приурочена к телу гидротермально-магматических брекчий и обрамляющих его кварцевых диорит-порфиритов 1-й фазы.

Главные рудные минералы сульфидно-кварцевых прожилков представлены халькопиритом, пиритом, магнетитом. Второстепенное значение имеют молибденит, галенит, сфалерит, борнит, халькозин, рутил, ильменит. К редким относятся самородное золото, минералы висмута и теллура, селениды, сульфосоли, блеклые руды и др. [Буханова, 2017]. Схематическая последовательность образования наиболее распространенных рудных минералов приведена на рис. 2.

Материалы и методы исследований. Из керна разведочных скважин в пределах рудных интервалов с промышленным содержанием меди ($>0,1\%$) и золота (0,1–0,3 ppm) отобраны образцы, содержащие рудные прожилки с халькопиритом среди рудовмещающих пород в пределах участка Свобода. Для исследования флюидных включений из кварцевых прожилков изготовлены пластинки толщиной 0,3–0,5 мм, отполированные с обеих сторон. Всего изготовлено 8 пластинок, 3 из которых содержали пригодные для исследований флюидные включения размером 20 мкм и более. Каждому из изученных образцов присвоен условный номер (а, б, в). Фотографии образцов приведены на рис. 3.

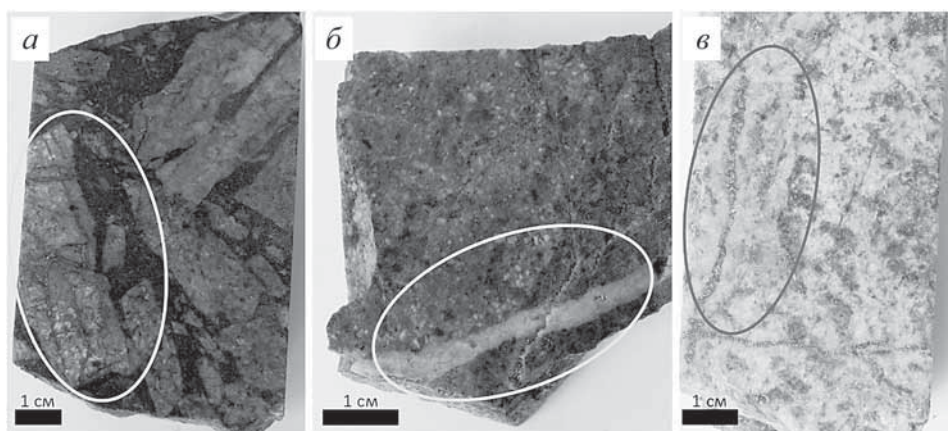
Образец а отобран из центральной рудной залежи с глубины 121,5 м и представлен эруптивными брекчиями, содержащими обломки кварц-серицитовых метасоматитов, сцементированных кварц-серицит-хлоритовым цементом. В цементе имеются многочисленные халькопирит-пирит-кварцевые прожилки. Содержание сульфидов в прожилках составляет в среднем 10–20%.

Образец б отобран в пределах восточной рудной залежи с глубины 312,6 м. Он представляет собой умеренно измененные (серицит-хлоритовый метасоматоз) диорит-порфириты, содержащие кварц-сульфидные прожилки. Пластинка для исследований изготовлена из кварцевого прожилка, содержащего единичные зерна пирита (1–2%).

Образец в отобран из центральной рудной залежи с глубины 400,5 м. Он сложен интенсивно измененными (пирит-хлорит-кварц-серицитовые изменения) кварцевыми диорит-порфиритами с минерализованными кварц-сульфидными прожилками. Пластинка для исследований изготовлена из халькопирит-пирит-кварцевого прожилка (доля сульфидов 30–35%, они расположены преимущественно вдоль осевой линии). По зальбандам прожилка развит достаточно широкий ореол калиевого полевого шпата. Такие прожилки составляют преобладающую долю золото-медных руд на участке Свобода.

Микротермометрическое изучение индивидуальных включений проведены в лаборатории геохимии ИГЕМ РАН с использованием измерительного комплекса, состоящего из камеры THMSG 600 фирмы «Linkam» (Англия), установленном на микроскопе «Olimpus BX51» (Япония), видеокамеры

Рис. 3. Фото образцов с изученными флюидными включениями, овалами показаны участки изготовления пластин



и управляющего компьютера. Химический состав флюида, захваченного во включениях, был оценен по результатам измерения фазовых переходов и превращений, происходивших при нагревании и охлаждении препаратов. Точность измерений температуры составляет $\pm 0,2$ °C в интервале от -20 до $+20$ °C и понижается при более высоких и низких значениях температуры. Состав солей, преобладающих в водных растворах флюидных включений, оценивали по результатам измерения температуры плавления эвтектики [Борисенко, 1977]. Суммарную концентрацию солей в двухфазовых флюидных включениях устанавливали по температуре плавления льда, а в многофазовых — по температуре растворения кристалла NaCl на основе экспериментальных данных для системы NaCl–H₂O [Bodnar, Vityk, 1994; Driesner, Heinrich, 2007]. Давление флюида рассчитывали для ассоциаций флюидных включений гетерогенного флюида как давление водяного пара при температуре их захвата. Оценка концентрации солей, плотности и давления флюида проводилась с использованием программы FLINCOR [Brown, 1989].

Результаты исследований и их обсуждение.

Флюидные включения обнаружены в кварце с сульфидной минерализацией. Среди них выделено три основных типа (рис. 4): 1) многофазные включения хлоридных рассолов, содержащие газовый пузырек, водный раствор, один или несколько изотропных кристаллов, пластинчатый гематит красного цвета и непрозрачный рудный минерал (халькопирит или магнетит); 2) существенно газовые включения, содержащие малоплотный газ с небольшой каймой водного раствора; 3) двухфазовые газозо-жидкие включения водно-солевых растворов, содержащие водный раствор и газовый пузырек.

Среди изученных флюидных включений в соответствии с известными критериями [Реддер, 1987] выделены первичные, первично-вторичные и вторичные флюидные включения. К первичным отнесены флюидные включения, равномерно распределенные в объеме минерала-хозяина либо приуроченные к зонам его роста. Вторичными считались включения, приуроченные к трещинам,

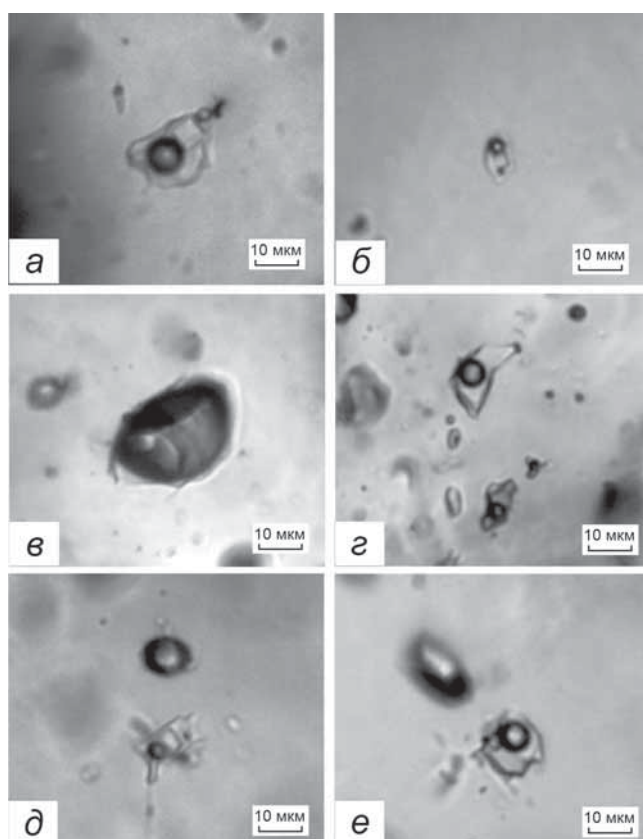


Рис. 4. Типы флюидных включений в кварце минерализованных прожилков рудного участка Свобода: *а, б* — многофазовые включения (тип 1) высокотемпературных хлоридных рассолов, содержащие водный раствор, газ, кубические кристаллы хлоридов и рудные минералы (халькопирит?, гематит); *в* — газовые включения (тип 2), *г* — двухфазовое газозо-жидкое флюидное включение водно-солевого флюида (тип 3); *д, е* — ассоциации флюидных включений (*д* — газовые включения типа 2, сингенетичные многофазовым включениям типа 1, *е* — газовые включения типа 2, сингенетичные двухфазовым флюидным включениям типа 3). Масштаб 10 мкм

секущим минерал-хозяин, первично-вторичные флюидные включения — к трещинам, не достигающим внешних границ кристаллов и зерен, а по фазовому наполнению аналогичным первичным включениям.

Для термо- и криометрических исследований выбирали прежде всего группы флюидных включений с одинаковым фазовым соотношением,

равномерно распределенные по объему отдельных зерен кварца и отнесенные нами к первичным включениям. Однако для первично-вторичных и вторичных включений также получены параметры фазовых переходов. Отметим, что флюидные включения 1- и 3-го типов наиболее распространены и встречены во всех изученных образцах. А флюидные включения 2-го типа встречаются в целом реже и отсутствуют в образце *a*. Существенно газовые флюидные включения (тип 2) часто сингенетичны флюидным включениям хлоридных рассолов типа 1 (рис. 4, *д*) или флюидным включениям водно-солевых флюидов типа 3 (рис. 4, *е*). Такие ассоциации флюидных включений захвачены из гетерогенного флюида (на линии двухфазового равновесия), поэтому их можно использовать для оценки давления флюида.

Данные микротермометрических исследований более 100 индивидуальных флюидных включений в кварце приведены в таблице и на рис. 5.

Рудообразующий флюид содержал хлориды Na, Ca и K. Об этом свидетельствуют хлоридные эвтектики растворов включений (от -41 до -22 °C). В многофазовых включениях (тип 1) установлен дочерний галит, который диагностирован по близости показателя преломления кубического дочернего кристалла к кварцу, а также по переходу его в гидрогалит при замораживании раствора включений (обратный переход в галит происходит в интервале от $+0,0$ до $+0,5$ °C). Поэтому для оценки концентрации солей во флюиде включений мы можем использовать экспериментальные данные системы $H_2O-NaCl$.

Параметры фазовых переходов во флюидных включениях в кварце разных образцов несколько различаются.

Образец *a*. Первичные многофазовые включения хлоридных рассолов типа 1 в кварце гомогенизируются в жидкость при температуре $355-429$ °C, а концентрация солей во флюиде изменяется от

Результаты микротермометрических исследований индивидуальных флюидных включений в кварце рудного участка Свобода

Образец	Глубина отбора	Тип включения*	<i>n</i>	<i>T</i> гомогенизации, °C	<i>T</i> эвтектики, °C	<i>T</i> плавления льда (NaCl), °C	Концентрация солей масс.-%-экв. NaCl	Плотность, г/см ³	Давление, МПа
Центральная залежь									
<i>a</i>	121,2	1 П	5	429	н.о.	(405)	48,0	1,07	—
		1 П	4	417	н.о.	(251)	34,7	0,94	—
		1 П	3	355	н.о.	(326)	40,3	1,03	—
		3 П	3	441	-41	-8,5	12,3	0,60	—
		3 П	3	340	-30	-7,9	11,6	0,79	—
		3 П-В	4	305	-34	-0,5	0,8	0,69	—
		3 П-В	3	294	-29	-2,3	3,8	0,76	—
		3 В	3	234	-29	-1	1,7	0,83	—
<i>e</i>	400,5	1 П	8	530	н.о.	(336)	41,1	0,89	—
		1 П	3	473	н.о.	(345)	41,9	0,95	—
		1 П	7	409	н.о.	(332)	40,8	1,01	—
		1 П	3	310	н.о.	(298)	38	1,08	—
		1 П	3	227	н.о.	(272)	36,1	1,14	—
		2 П	3	422	-28	-1,3	2,1	н.о.	33
		2 П	8	349	-22	-2,0	3,3	н.о.	15
		3 П	5	392	-32	-11,4	15,4	0,88	—
		3 П	4	321	-31	-8,3	12,1	0,85	—
		3 П	3	321	-36	-4,2	6,7	0,75	—
		3 П-В	3	306	-30	-3,6	5,8	0,76	—
3 П-В	3	296	-30	-1,5	2,5	0,74	—		
Восточная залежь									
<i>b</i>	312,6	1 П	7	240	н.о.	(311)	39,0	1,16	—
		2 П	3	450	-27	-0,6	0,8	н.о.	62
		3 П	6	472	-28	-10,5	14,5	0,58	—
		3 П	5	439	-36	-6,2	9,5	0,53	—
		3 В	3	245	-27	-0,6	1,0	0,81	—
		3 В	4	235	-26	-0,7	1,2	0,83	—
		3 В	3	226	-32	-19,6	22,1	1,00	—

Примечания. * П — первичные, П-В — первично-вторичные, В — вторичные. Тип флюидных включений по фазовому составу: 1 — многофазовые хлоридных рассолов, 2 — газовые, 3 — двухфазовые газовой-жидкие; н.о. — не определено.

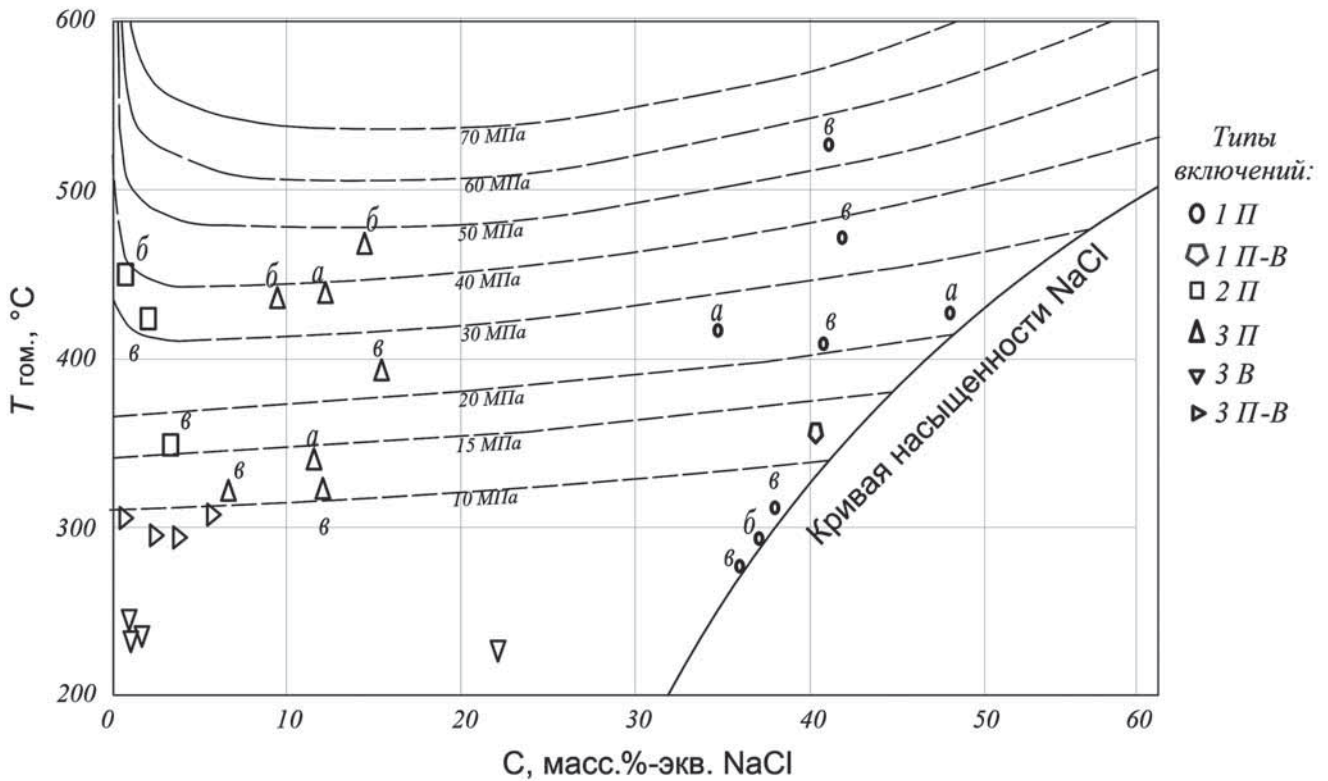


Рис. 5. Диаграмма температура гомогенизации (°С) — концентрация солей (масс.%-экв. NaCl) для флюидных включений рудного участка Свобода: а, б — номера образцов. Изобарические кривые даны в соответствии с [Landtwing et al., 2010; Driesner, Heinrich, 2007]

34,7 до 48,0 масс.%-экв. NaCl. Плотность флюида 0,94–1,07 г/см³.

Первичные двухфазовые флюидные включения типа 3 в кварце гомогенизируются в жидкость при температуре 294–305 °С. Концентрация солей в них составляет 11,6–12,3 масс.%-экв. NaCl. Плотность флюида варьирует от 0,60 до 0,79 г/см³.

Первично-вторичные двухфазовые флюидные включения типа 3 в кварце гомогенизируются в жидкость при температуре 340–441 °С. Концентрация солей в них составляет 0,8–3,8 масс.%-экв. NaCl. Плотность флюида изменяется от 0,69 до 0,76 г/см³.

Вторичные двухфазовые флюидные включения типа 3 в кварце гомогенизируются в жидкость при температуре 234 °С. Концентрация солей в них составляет 1,7 масс.%-экв. NaCl. Плотность флюида составляет 0,83 г/см³.

Образец б. *Первичные многофазовые включения хлоридных рассолов типа 1* в кварце гомогенизируются в жидкость при температуре 311 °С, а концентрация солей во флюиде составляет 39,0 масс.%-экв. NaCl. Плотность флюида 1,16 г/см³.

Первичные газовые флюидные включения типа 2 в кварце гомогенизируются в газ при 450 °С. Концентрация солей в них составляет 0,8 масс.%-экв. NaCl. Глубокое охлаждение газовых включений до температуры –180 °С не выявило конденсацию каких-либо фаз, что свидетельствует о заполнении

газовых включений только малоплотным водяным паром. Давление насыщенного пара воды составляет 62 МПа при температуре гомогенизации 450 °С.

Первичные двухфазовые флюидные включения типа 3 в кварце гомогенизируются в жидкость при температуре 439–472 °С. Концентрация солей в них составляет 9,5–14,5 масс.% экв. NaCl. Плотность флюида изменяется от 0,53 до 0,58 г/см³.

Вторичные двухфазовые флюидные включения типа 3 в кварце гомогенизируются в жидкость при температуре 226–245 °С. Концентрация солей в них составляет 1,0–22,1 масс.%-экв. NaCl. Плотность флюида 0,81–1,00 г/см³.

Образец в. *Первичные многофазовые включения хлоридных рассолов типа 1* в кварце гомогенизируются в жидкость при значениях температуры 272–530 °С, а концентрация солей во флюиде — 36,1–41,9 масс.%-экв. NaCl. Плотность флюида 0,89–1,14 г/см³.

Первичные газовые флюидные включения типа 2 в кварце гомогенизируются в газ при 349–422 °С. Концентрация солей в них составляет 2,1–3,3 масс.%-экв. NaCl. Глубокое охлаждение газовых включений до температуры –180 °С не выявило конденсацию каких-либо фаз, что свидетельствует о заполнении газовых включений только малоплотным водяным паром. Давление насыщенного пара воды составляет 15–33 МПа при температуре 349–422 °С.

Первичные двухфазовые флюидные включения типа 3 в кварце гомогенизируются в жидкость при 321–392 °С. Концентрация солей в них изменяется от 6,7 до 15,4 масс.%-экв. NaCl. Плотность флюида — от 0,75 до 0,88 г/см³.

Первично-вторичные двухфазовые флюидные включения типа 3 в кварце гомогенизируются в жидкость при температуре 296–306 °С. Концентрация солей в них составляет 2,5–5,8 масс.%-экв. NaCl. Плотность флюида 0,74–0,76 г/см³.

Таким образом, на основе приведенных выше данных можно оценить параметры формирования промышленных руд месторождения Малмыжское: температура 294–530 °С, концентрация солей 0,8–48,0 масс.%-экв. NaCl, давление 15–62 МПа (рис. 5). Отметим, что наиболее высокие значения температуры (530 °С) обнаружены в образце, отобранном наиболее глубоко. Это согласуется с наличием магматического очага на глубине, служившего источником рудообразующих флюидов. Величины концентрации солей во флюиде и давления флюида обнаруживают более сложную зависимость от глубины отбора образца и зависят от многих факторов.

В работе [Буханова, Плечов, 2017] для флюида рудно-магматической системы Малмыжского месторождения приведены другие параметры: температура 100–1000 °С, концентрация солей 4–80 масс.%-экв. NaCl, давление 5–83 МПа. В кварце порфировых ассоциаций обнаружены также включения магматического расплава с температурой гомогенизации >1140 °С и давлением 80–100 МПа. Мы полагаем, что более широкий интервал параметров минералообразующего флюида в указанной работе связан с тем, что в круг исследования авторов попал не только кварц продуктивных ассоциаций, но и дорудный кварц магматического этапа, прерудный кварц метасоматитов и пострудный кварц поздних минеральных ассоциаций. Наши данные имеют более узкий диапазон и дают информацию о параметрах формирования промышленной золото-медной минерализации месторождения.

Это согласуется с данными статьи [Soloviev et al., 2019], в которой для флюида, формировавшего калиевые метасоматиты Малмыжского месторождения, приводится соленость 57–78 масс.%-экв. NaCl, температура более 535 °С и давление 40–60 МПа. Однако для золото-медных ассоциаций в этой работе приводятся более низкие величины температуры (250–380 °С). Такое различие можно объяснить тем, что в работе [Soloviev et al., 2019] приведены результаты исследования проб, отобранных на меньшей глубине. Поэтому нижнюю

температурную границу формирования промышленных руд можно считать равной 250 °С.

В то же время мы не можем согласиться с объяснением вариаций значений давления флюида только в связи с открытием и закрытием трещин, что приводило к изменению давления от литостатического к гидростатическому, как это сделано в работе [Soloviev et al., 2019], так как нами установлен более широкий интервал вариации давления, чем в этой публикации (15–62 МПа), поэтому такого объяснения недостаточно. Отношение максимальной величины давления (62 МПа) к его минимальной величине (15 МПа) составляет 4,1, что заметно больше соотношения величин литостатического и гидростатического давления. Такое соотношение значений давления обычно объясняют восходящим перемещением рудовмещающего блока в процессе рудоотложения [Прокофьев, Пэк, 2015]. Поэтому в соответствии с нашими данными о флюидном давлении (15–62 МПа) можно оценить палеоглубину формирования руд месторождения от 1,5 до 2,4 км при восходящем перемещении области рудоотложения в период формирования промышленных руд на величину около 900 м.

Таким образом, наши исследования позволили получить граничные параметры формирования промышленных золото-медных руд участка Свобода Малмыжского порфирового месторождения. Изучение флюидных включений других участков месторождения позволит в значительной степени расширить представления об условиях рудообразования. Эта информация может быть использована при проведении поисковых и разведочных работ на минерализацию данного типа в регионе Сихотэ-Алиня.

Выводы. 1. Установлен преимущественно хлоридный состав флюида, формировавшего промышленную Au-Cu минерализацию месторождения.

2. Дана оценка основных физико-химических параметров рудообразующего флюида: температура 250–530 °С, концентрация солей 0,8–48,0 масс.%-экв. NaCl, давление 15–62 МПа.

3. На основе расчетов значений давления флюида сделаны выводы о глубине формирования рудной минерализации в диапазоне 1,5–2,4 км и восходящем перемещении рудовмещающего блока на 900 м в процессе рудоотложения.

4. Полученные данные надо учитывать при проведении поисковых и разведочных работ на минерализацию Au-Cu-порфирового типа в регионе Сихотэ-Алиня.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-17-00184).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенко А.С.* Изучение солевого состава газожидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Буханова Д.С.* Минералогические особенности руд золото-меднопорфирового месторождения Малмыжское, Нижнее Приамурье // Мат-лы юбилейного съезда Российского минералогического общества «200 лет РМО», СПб. Т. 2. СПб., 2017. С. 193–194.
- Буханова Д.С., Плечов П.Ю.* Условия формирования Au-Cu-порфирового месторождения Малмыжское (по данным исследования флюидных включений) // Вест. КРАУНЦ. 2017. Т. 34, № 2. С. 61–71.
- Иванов В.В., Кононов В.В., Игнатьев Е.К.* Минералогическо-геохимические особенности рудной минерализации в метасоматитах золото-медного рудного поля Малмыж (Нижнее Приамурье) // Мат-лы Всеросс. Конф. VIII Косыгинские чтения «Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии». Владивосток, 2013. С. 258–261.
- Кривцов А.И.* Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. М.: Недра, 1983. 256 с.
- Кривцов А.И., Мизгачев И.Ф., Попов В.С.* Медно-порфировые месторождения мира. М.: Недра, 1986. 303 с.
- Малмыжское месторождение [Электр. ресурс]. 2020. URL: <http://amurminerals.ru> (дата обращения: 01.05.2020).
- Николаев Ю.Н., Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю.* и др. Au-Ag минерализация порфирово-эпитермальных систем Баимской зоны (Западная Чукотка, Россия) // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 4. С. 319–345. DOI: 10.7868/S0016777016040055
- Прокофьев В.Ю., Пэк А.А.* Проблемы оценки глубины формирования гидротермальных месторождений по данным о давлении минералообразующих флюидов // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 1. С. 3–24.
- Реддер Э.* Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987.
- Свистунов В.В.* Особенности рудно-метасоматической зональности участка Свобода Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2020. № 4. С. 76–80.
- Читалин А.Ф., Ефимов А.А., Воскресенский К.И.* и др. Малмыж — новая крупная золото-медно-порфировая система мирового класса на Сихотэ-Алине // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 3. С. 65–69.
- Atkinson A.B.* A model for the PTX properties of H₂O-NaCl. M.Sc.Thesis. Virginia Tech. Institute and State University, 2002. P. 126.
- Bodnar R.J., Vityk M.O.* Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Siena, Pontignano, 1994. P. 117–130.
- Brown P.* FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Amer. Mineral. 1989. Vol. 74. P. 1390–1393.
- Driesner, T., Heinrich C.A.* The system H₂O-NaCl. Pt. I: Correlation formulae for phase relations in temperature-pressure-composition space from 0° to 1000 °C, 0 to 5000 bars, and 0 to 1 X-NaCl // Geochim. et Cosmochim. Acta, 2007. Vol. 71. P. 4880–4901.
- Landtwing M.R., Furrer C., Pettke T., et al.* The Bingham canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit. III. Zoned copper-gold ore deposition by magmatic vapor expansion // Econ. Geol. 2010. Vol. 105. P. 91–118.
- Landtwing M.R., Pettke T., Redmond P.B.* 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 D.J., Guilbert J.M.* Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits // Econ. Geol. 1970. Vol. 65, N 4. P. 373–408.
- Roedder E.* Fluid inclusions studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado // Econ. Geol. 1971. Vol. 66, P. 98–120.
- Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S.* et al. The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and fluid inclusion characteristics // Ore Geol. Rev. 2019. Vol. 113. P. 1–27.

Поступила в редакцию 12.05.2020

Поступила с доработки 30.06.2020

Принята к публикации 30.06.2020