

УДК 553.072, 553.430

В.В. Свистунов¹**ОСОБЕННОСТИ РУДНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ
УЧАСТКА СВОБОДА МАЛМЫЖСКОГО
ЗОЛОТО-МЕДНО-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Описана рудно-метасоматическая зональность участка Свобода, одного из центров минерализации Малмыжского Au-Cu порфирового месторождения. Центральную часть рудных залежей составляют кварц-серицитовые и биотит-калишпатовые метасоматиты, которые несут относительно богатую золото-медную минерализацию. Фланговые зоны рудных залежей сложены преимущественно филлизитами и пропилитами. Для этих зон характерно повышенное содержание свинца, марганца и цинка. Обнаружено наличие положительной корреляции в двух группах элементов: Mo-Cu-Au и Pb-Zn-Mn. На основе анализа вертикального изменения содержания рудных компонентов и их отношений сделано предположение о верхнерудном уровне эрозионного среза.

Ключевые слова: порфировые месторождения, рудная зональность, метасоматическая зональность, медь, золото.

Present the ore-metasomatic zonation of the Freedom area, one of the ore centers of the Malmyzh Au-Cu porphyry deposit. The central part of ore-mineralization zones composes of quartz-sericite and biotite-K-feldspar metasomatites which carry relatively rich gold-copper. Flank zones are composed mainly of phyllic and propylites. These zones are characterized by increase content of lead, manganese and zinc. A positive correlation was found in two groups of elements: Mo-Cu-Au and Pb-Zn-Mn. Based on the analysis of the vertical change in the contents of ore components and their relationships, presumably, modern erosional level takes upper-ore position.

Key words: porphyry deposits, ore zonation, metasomatic zonation, copper, gold.

Введение. Классическая модель рудно-метасоматической зональности порфировых месторождений установлена геологами в ходе многочисленных исследований по всему миру. В общем виде она включает в себя центральную часть с $\text{Cu} \pm \text{Au} \pm \text{Mo}$ оруденением, развитым в пределах относительно высокотемпературных метасоматитов (натрий-кальцевой, калиевой, хлорит-серицитовой и серицитовой зон). По периферии такого ядра, как правило, расположена относительно низкотемпературная зона пропилитов с повышенным содержанием Zn, Pb, $\text{Ag} \pm \text{Mn}$. Вблизи поверхности часто развивается область так называемых продвинутых аргиллизитов (advanced argillic). Картина рудно-метасоматической зональности в породах, выходящих на дневную поверхность, позволяет косвенно оценивать уровень эрозионного среза [Гирфанов и др., 1991; Кривцов, 1983, 1986, Lowell, Guilbert 1970; Hedenquist, 1998; Siltoe, 2010; Jago, 2014].

На территории России число месторождений этого типа, разведанных в достаточной мере для установления рудно-метасоматической зональности, на данный момент невелико [О состоянии ..., 2017]. Под этот критерий подходит Малмыжское золото-медно-порфировое месторождение, кото-

рое расположено в Хабаровском крае, с 2005 г. на нем проводятся комплексные геологоразведочные работы [Читалин и др., 2013]. Их результаты легли в основу установления картины особенностей рудно-метасоматической зональности на участке Свобода, одном из наиболее крупных и полноценно разведанных на данный момент.

Некоторые исследования типизации вторичных изменений уже проведены на Малмыжском месторождении [Буханова, 2013; Иванов и др., 2013]. Однако подробная характеристика пространственного распределения рудных компонентов и корреляции их с типами метасоматитов требует дополнения.

Геологическое строение рудного участка Свобода. Участок Свобода представляет собой толщу в разной степени ороговикованных терригенных отложений ларгасинской свиты мелового возраста. Ее прорывают штокоподобные тела двух фаз внедрения: к 1-й фазе преимущественно относятся диорит-порфиры и в меньшей степени кварцевые диорит-порфиры, к 2-й — кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры. К образованиям 2-й интрузивной фазы также относятся тела эруптивных брекчий. В центральной части

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

участка проходит крупный разлом левосдвиговой кинематики северо-восточного направления с амплитудой смещения до нескольких сотен метров. Развитие этой структуры происходило, в том числе, в пострудный этап, что объясняет резкий контакт не только геологических тел, но и разновидностей метасоматитов.

Золото-медная минерализация участка Свобода сконцентрирована в двух рудных залежах. Восточная залежь локализована в пределах штока кварцевых диорит-порфириров 1-й фазы внедрения. Центральная залежь, более крупная, приурочена к телу эруптивных брекчий и обрамляющих его кварцевых диорит-порфириров 1-й фазы (рис. 1). Рудные залежи представляют собой штокверки, развитые в пределах интенсивно метасоматически преобразованных пород. Прожилки, слагающие штокверки, имеют халькопирит±пирит-кварцевый, магнетитовый состав, с незначительным количеством молибдена, галенита, сфалерита, борнита, халькозина. Преобладающая мощность прожилков 0,3–2 см.

Материалы и методы исследований. Корреляционный анализ. Для определения взаимосвязей между содержанием изучаемых компонентов в первичных рудах (Cu, Au, As, Fe, Mn, Mo, Pb, Zn) были рассчитаны корреляционные матрицы (таблица). Для этого использованы результаты химических анализов 2350 керновых проб. Все рудные компоненты (за исключением железа) демонстрируют логнормальное распределение. В связи с этим для установления корреляционных связей по критерию Пирсона выполнены соответствующие преобразования [Дэвис; 1990; Sherlock et al., 1995].

Результаты корреляционного анализа между рудными компонентами

	Cu	Au	As	Fe	Mn	Mo	Pb	Zn
Cu		0,77	0,07	0,14	−0,06	0,34	0,16	−0,03
Au	0,77		0,13	0,27	0,00	0,19	0,22	0,02
As	0,07	0,13		0,20	0,28	0,00	0,33	0,23
Fe	0,14	0,27	0,20		0,07	−0,07	0,28	0,17
Mn	−0,06	0,00	0,28	0,07		−0,19	0,41	0,40
Mo	0,34	0,19	0,00	−0,07	−0,19		−0,02	−0,04
Pb	0,16	0,22	0,33	0,28	0,41	−0,02		0,38
Zn	−0,03	0,02	0,23	0,17	0,40	−0,04	0,38	

Наиболее высокая корреляция выявлена между содержанием меди и золота (0,77). С медью также коррелирует молибден (0,34), хотя и довольно слабо, тем не менее, три этих элемента выделены в первую корреляционную группу. Во вторую группу с относительно повышенным значением коэффициента корреляции входят свинец, цинк и марганец (0,38–0,41).

Рудно-метасоматическая зональность. Метасоматическая зональность участка Свобода в целом соответствует классической модели, описанной выше, однако имеются некоторые

особенности. 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 (филлизитовые) метасоматиты. Локально развиты серицит-хлоритовые метасоматиты. Обрамление рудного участка слагают пропилитовые метасоматиты (кварц-эпидот-хлоритовые), а также породы с умеренно проявленными окварцеванием и ороговикованием. Вблизи поверхности выделяется зона аргиллизации, а также участки интенсивно окисленных и выщелоченных пород.

Результаты исследований и их обсуждение.

Анализ распределения рудных компонентов по типам метасоматитов показал приуроченность повышенного содержания меди и золота к слагающим центральную часть рудных залежей кварц-серицитовым и калишпат-биотитовым метасоматитам. На флангах минерализованной зоны развиты преимущественно филлизиты и кварц-хлорит-серицитовые метасоматиты. В них наблюдается повышенное содержание серебра, мышьяка, свинца, цинка, марганца.

В результате анализа латеральной изменчивости содержания рудных компонентов выделены две области с повышенным содержанием меди, золота и молибдена в центральной и восточной частях рудного участка. Каждая из этих областей соответствует одной из штокверковых залежей, причем в центральной зоне (приуроченной к телу эруптивных брекчий 2-й фазы внедрения с преимущественно диорит-гранодиоритовым матриксом) наблюдаются максимальные значения содержания меди и молибдена, а в восточной (шок диорит-порфириров 1-й фазы) — относительно возрастает содержание золота. Отмечено, что локальные максимумы содержания Mo пространственно расположены в центре участков с повышенным содержанием Cu и Au.

Центральной области высокого содержания элементов первой корреляционной группы соответствует понижение значений содержания элементов второй корреляционной группы. Между центральной и восточной Mo-Au-Cu зонами, а также на их краях наблюдается повышение содержания Pb, Zn, Mn.

Описанные особенности рудно-метасоматической зональности свидетельствуют о наличии нескольких импульсов активности гидротермально-метасоматических процессов в пределах участка Свобода. Ранний импульс связан с внедрением интрузивов 1-й фазы в восточной части участка, а более поздний — с интрузиями и эруптивными брекчиями 2-й фазы. Это предположение согласуется с наличием в составе брекчий обломков диорит-порфириров 1-й фазы внедрения с ранними сульфидными прожилками. На существующую

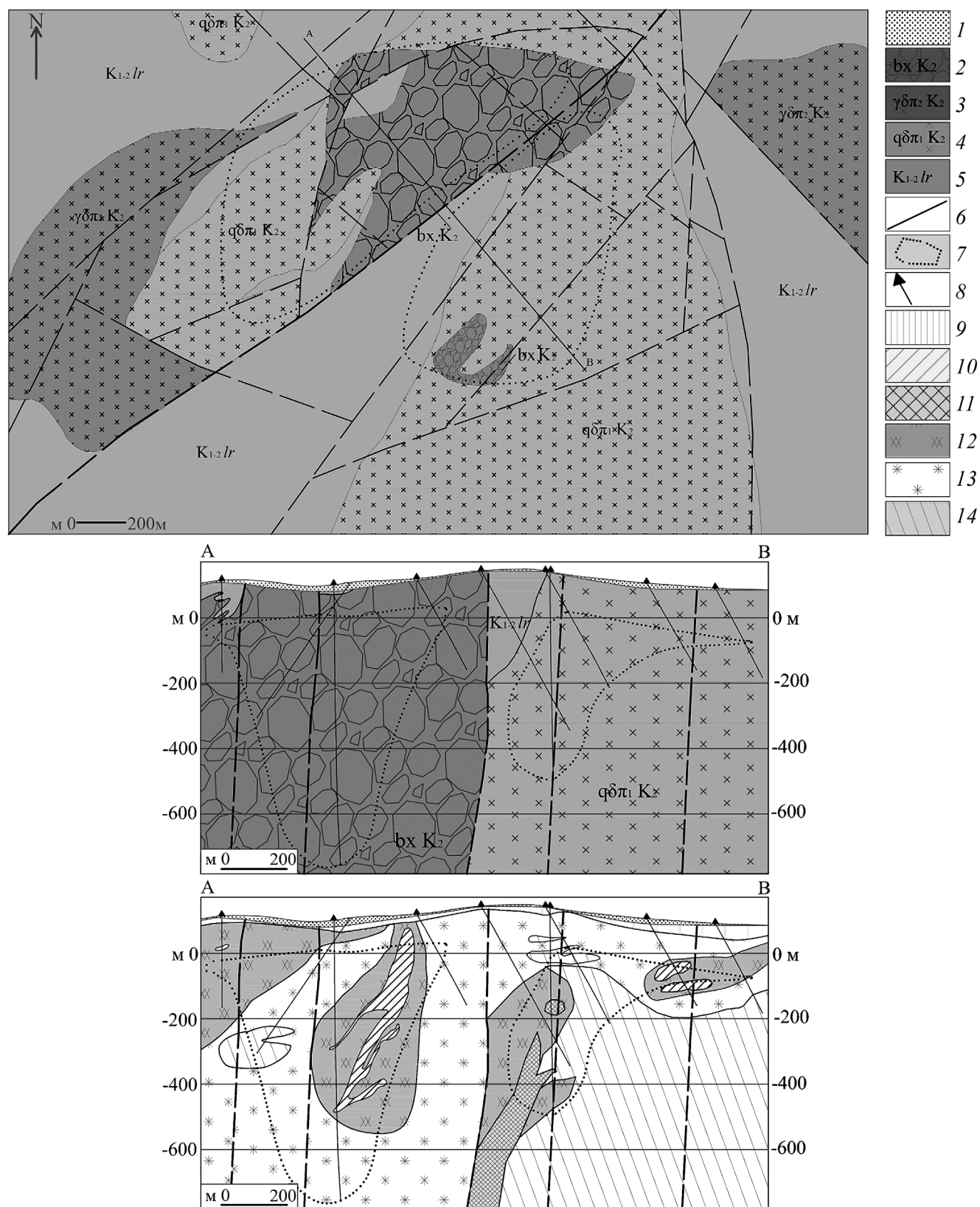


Рис. 1. Схематическая геологическая карта рудного участка Свобода Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения и разрез через центральную часть участка. Внизу отображены преобладающие типы метасоматитов, по [Игнатьев и др., 2015], с дополнениями: 1 — рыхлые четвертичные образования, 2 — эруптивные брекчии 2-й фазы внедрения; 3 — гранодиорит-порфиры 2-й фазы внедрения; 4 — кварцевые диорит-порфиры 1-й фазы внедрения; 5 — терригенные отложения ларгасинской свиты; 6 — разрывные нарушения; 7 — условный контур рудных залежей ($\text{Cu} > 0,1\%$); 8 — буровые скважины. *Метасоматиты*: 9 — аргиллизиты, 10 — калишпат-биотитовые, 11 — серицит-хлоритовые, 12 — кварц-хлорит-серицитовые, 13 — филлизитовые, 14 — окварцевание пород

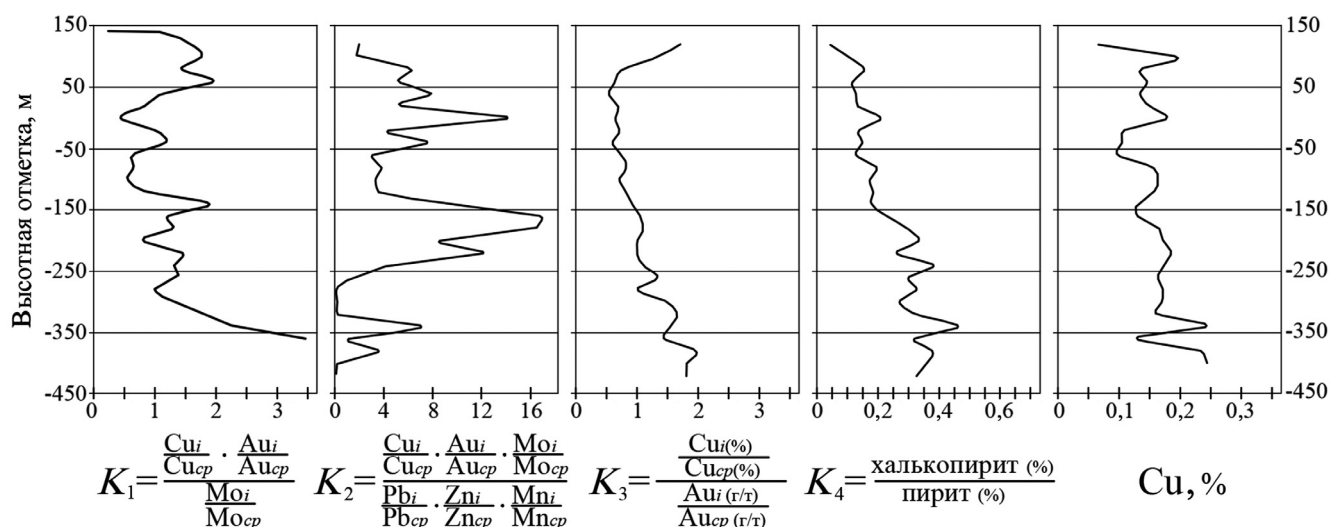


Рис. 2. Изменение значений геохимических и минералогических коэффициентов с глубиной в центральной зоне золото-медной минерализации ($Cu > 0,1\%$)

Au-Cu минерализацию восточной части наклады- валась краевая низкотемпературная Mn-Pb-Zn, связанная с более молодой центральной зоной.

Таким образом, в латеральном направлении наблюдается следующая рудная зональность (от центров рудных залежей к их перифериям): (Cu-Mo)–(Cu-Au)–(Zn+Mn)–Pb. Эти результаты хорошо согласуются с полученными значениями коэффициентов корреляции между рассматриваемыми рудными элементами.

Установленная зональность и корреляционные отношения определяются прежде всего развитыми в пределах участка Свобода рудными парагенезисами. Так, молибденит входит в состав относительно поздних кварц-халькопирит-пиритовых прожилков. Такие прожилки развиты преимущественно в центральных частях рудных залежей. Более широкое распространение имеют ранние кварц-пирит-халькопиритовые прожилки, в которых, кроме меди, концентрируется золото. Галенит и сфалерит представлены в виде единичных зерен в сульфидно-кварцевых прожилках по перифериям рудных залежей, а также незначительно в центральных их частях и отвечают поздним, относительно низкотемпературным этапам рудообразования.

В соответствии с результатами анализа латеральной изменчивости содержания рудных компонентов изучение особенностей вертикальной зональности выполнено с использованием геохимических (в том числе мультипликативных) и минералогических коэффициентов. При расчете геохимических коэффициентов учитывалось отношение содержания элементов, а минералогических — количество рудных минералов. Анализ проводился для центральных областей рудных залежей в пределах условного контура с содержанием $Cu > 0,1\%$.

Анализ изменения содержания элементов первой корреляционной группы (рис. 2, коэф-

фициент K_1) показывает, что молибден занимает верхнерудную позицию, с увеличением глубины происходит понижение его содержания относительно меди и золота. На нижних горизонтах наблюдается уменьшение значений коэффициента K_2 , это свидетельствует о том, что металлы второй корреляционной группы занимают преимущественно нижнерудную позицию.

Отношение меди к золоту с глубиной увеличивается, значение соответствующего коэффициента K_3 на отметках 40–120 м составляет в среднем 1,0, а в интервале глубины от –350 до –450 м — 1,7, это говорит о концентрации Au в верхних частях рудных залежей. Также наблюдается увеличение среднего содержания халькопирита относительно пирита (K_4) — от 0,1 на верхних горизонтах (выше 50 м) до 0,35 на глубине (–300––400 м), при среднем отношении 0,22. Заметно увеличение содержания меди на глубине, это свидетельствует о перспективах обнаружения промышленной медной минерализации на еще не вскрытых бурением горизонтах.

Закключение. На основе результатов исследований рудно-метасоматической зональности участка Свобода Малмыжского месторождения можно сделать следующие выводы:

- наиболее высокотемпературная центральная часть рудных залежей, сложенная кварц-серицитовыми и менее распространенными калиевыми метасоматитами, характеризуется наличием молибден-золото-медного оруденения. При переходе к фланговым зонам филлизитов наблюдается повышение содержания серебра, мышьяка, марганца, свинца и цинка;

- по результатам корреляционного анализа выделены две группы элементов с повышенной взаимосвязью: первая — медь, золото, молибден, вторая — свинец, цинк, марганец. Установлено, что наиболее тесная взаимосвязь наблюдается

между медью и золотом (коэффициент корреляции 0,77);

— на основе анализа распределения содержания рудных компонентов в латеральном направлении установлена следующая рудная зональность (от центров рудных залежей к их перифериям): (Cu-Mo)–(Cu-Au)–(Zn+Mn)–Pb;

— анализ вертикальной изменчивости соотношений содержания рудных компонентов в пределах центральных частей рудных залежей показывает, что относительно золото-медной минерализации молибден занимает преимущественно верхнерудную позицию, а элементы второй корреляционной группы (Pb, Zn, Mn) — нижнерудную. Установлено также, что золото концентрируется

преимущественно на верхних горизонтах рудных залежей. С глубиной наблюдается рост содержания меди, увеличение соотношения Cu/Au, а также увеличение количества халькопирита по отношению к пириту;

— характер латеральной и вертикальной зональности позволяет предположить, что на участке Свобода наблюдается верхнерудный эрозионный срез и сохраняется перспектива продолжения рудных залежей с промышленным медным ($\pm$ Au) оруденением на глубину;

— рудно-метасоматическая зональность участка Свобода в целом соответствует классической модели, составленной для Au-Cu порфировых месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Буханова Д.С. Вторичные изменения вмещающих пород медно-порфирового месторождения Малмыж, Дальний Восток России // Мат-лы XII региональной молодежной науч. конф. «Природная среда Камчатки». Петропавловск-Камчатский, 2013. С. 15–28.

Гирфанов М.М., Сергеева Н.Е., Шишаков В.Б. Рудно-метасоматическая зональность Михеевского медно-порфирового месторождения на Южном Урале // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1991. № 5. С. 75–79.

Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии / Пер. с англ. В 2-х кн. Кн. 1. М.: Недра, 1990. 319 с.

Иванов В.В., Кононов В.В., Игнатьев Е.К. Минералого-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., Мигачев И.Ф., Попов В.С. Медно-порфировые месторождения мира. М.: Недра, 1986. 303 с.

О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016–2017 годах. Государственный доклад / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации / Гл. ред. Е.А. Киселев М.: ООО «Минерал-Инфо», 2018. 370 с.

Читалин А.Ф., Ефимов А.А., Воскресенский К.И. и др. Малмыжское месторождение — новая крупная золото-

медно-порфировая система мирового класса на Сихотэ-Алине // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 3. С. 65–69.

Hedenquist J.W., Richards J. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits, Techniques in Hydrothermal Ore Deposits Geology // Soc. Econ. Geol. Short Course. Toronto, 1998. P. 235–256. DOI: <https://doi.org/10.5382/Rev.10.10>

Jago P.C., Tosdal R.M., Cooke D.R., Harris A.C. Vertical and lateral variation of mineralogy and chemistry in the Early Jurassic Mt. Milligan alkalic porphyry Au-Cu Deposit, British Columbia, Canada // Econ. Geol. 2014, Vol. 109, N 4, P. 1005–1033. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.109.4.1005>

Hedenquist J.W., Arribas A.Jr., Reynolds T.J. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines // Econ. Geol. Bull. Soc. Econ. Geol. 1998. Vol. 93, N 4, P. 373–404. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.4.373>

Ross S.L., Tosdal R.M., Lehrman N.J. et al. Origin of the McLaughlin Mine sheeted vein complex; metal zoning, fluid inclusion, and isotopic evidence // Econ. Geol. 1995. Vol. 90, N 8. P. 2156–2181. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.8.2156>

Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems // Econ. Geol. 2010. Vol. 105, N 1. P. 3–41. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>

Поступила в редакцию 04.12.2019

Поступила с доработки 26.02.2020

Принята к публикации 26.02.2020