

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.43 : 553.086 (571.52)

«Скрытая» минералого-геохимическая зональность месторождения Кызык-Чадр (Республика Тыва) по данным лазерного микроанализа сульфидов

Старостин И. А.

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия

Аннотация. В рамках изучения вещественного состава медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр определены состав и распределение элементов-микропримесей в рудообразующих сульфидных минералах в объёме рудовмещающего пространства. Исследования выполнены методом масс-спектрометрического анализа с лазерной абляцией анализируемого материала. Выявлены устойчиво повторяющиеся качественные и количественные элементы «скрытой» минералого-геохимической зональности, выражающиеся в вариациях концентрации элементов-микропримесей и их соотношений в пиритах и халькопиритах в объёме рудоносного штокверка месторождения.

Обнаруженные тенденции коррелируются с установленной направленностью и концентрическим характером минералогической рудно-метасоматической зональности месторождения.

Ключевые слова: Месторождение Кызык-Чадр, рудно-метасоматическая и «скрытая» минералого-геохимическая зональность, масс-спектрометрия с лазерной абляцией, пирит, халькопирит, элементы-микропримеси.

Для цитирования: Старостин И. А. «Скрытая» минералого-геохимическая зональность месторождения Кызык-Чадр (Республика Тыва) по данным лазерного микроанализа сульфидов. Руды и металлы. 2024. № 1. С. 78–102. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10005.

“Hidden” mineralogical-geochemical zonality revealed by the laser microanalysis of sulfides at the Kyzyk-Chadr deposit, Republic of Tyva

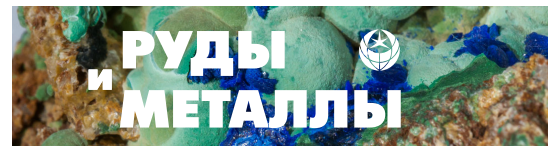
Starostin I. A.

FSBI “Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals”, Moscow, Russia

Annotation. A comprehensive study of the Kyzyk-Chadr porphyry copper deposit included determination of the composition and spatial distribution of trace elements in ore-forming sulfide minerals over the ore-hosting rock volume. The study was carried out using the mass spectrometric analysis with laser ablation of the analyzed material. Steady qualitative and quantitative elements of a “hidden” mineralogical and geochemical zonality have been identified, that are expressed in variations in the concentration of trace elements and their ratios in pyrites and chalcopyrites over the volume of the ore-bearing porphyry copper stockwork. The identified regularities correlate with the established centrifugal vector and concentric pattern of the mineralogical ore-metasomatic zonality of the ore deposit.

Key words: Kyzyk-Chadr deposit, ore-metasomatic and “hidden” mineralogical-geochemical zonality, laser ablation mass spectrometry, pyrite, chalcopyrite, trace elements.

For citation: Starostin I. A. “Hidden” mineralogical-geochemical zonality revealed by the laser microanalysis of sulfides at the Kyzyk-Chadr deposit, Republic of Tyva. Ores and metals, 2024, № 1, pp. 78–102. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10005.



Введение. Минералого-геохимические методы, основанные на типоморфизме минералов-индикаторов, активно используются при прогнозировании и поисках золоторудных месторождений как в России, так и во всём мире [2–7, 9, 10, 14, 16]. Применительно к месторождениям медно-порфирового семейства эти методы развиваются преимущественно в работах зарубежных исследователей [11–13, 15–18, 21, 22]. Существенный прорыв в данном направлении связан с внедрением в практику работ метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерным отбором анализируемого вещества (LA-ICP-MS) [4, 5, 19, 20, 22]. Данный метод обеспечил возможность анализа индикаторных элементов-примесей в индивидуальных зёрнах индикаторных минералов (эпидот, хлорит, магнетит, циркон и др.). В результате возникло отдельное направление поисковой минералогии, включающее выявление типоморфных признаков минералов-индикаторов медно-порфировых систем (PIMS) и использование минералого-геохимической зональности в целях прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений в этих системах (PVFTS) [12].

Перспективность применяемого подхода, доказанная на практике, обусловила необходимость его развития и в нашей стране. В рамках данного подраздела Госзадания проводятся экспериментальные минералого-геохимические исследования, включающие апробацию методик микроанализа, их совершенствование и адаптацию к обстановкам локализации медно-порфировых объектов на территории Российской Федерации.

Большая часть опубликованных к настоящему времени исследований методом LA-ICP-MS содержит данные о составе сульфидов различных золоторудных, полиметаллических колчеданных и других типов месторождений, тогда как информация по медно-порфировым месторождениям весьма ограничена. В связи с этим необходимо проведение специализированных экспериментальных исследований сульфидной минерализации на эталонных месторождениях данного типа. Пирит и халькопирит – главные минералы медно-порфировых

месторождений. Особенности состава примесей в этих минералах могут служить ключевыми показателями принадлежности сульфидов к различным зонам медно-порфировых систем.

В качестве объекта для выполнения опытно-методических работ по применению метода LA-ICP-MS в целях выявления типоморфных особенностей продуктивных медно-порфировых систем и их «скрытой» минералого-геохимической зональности выбрано предварительно оценённое золото-молибден-медно-порфировое рудопроявление (потенциальное месторождение) Кызык-Чадр. Оно детально изучено в ходе поисковых работ, выполненных с участием ФГБУ «ЦНИГРИ», и может рассматриваться в качестве эталонного при поисках и оценке аналогичных объектов в данном регионе [1, 8].

Для проведения лабораторно-аналитических исследований была составлена коллекция из 100 образцов, отобранных из руд и окколорудных пород этого месторождения.

Краткая характеристика геологического строения и рудно-метасоматической зональности медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр. Месторождение Кызык-Чадр располагается в наиболее интенсивно дислоцированной осевой части зоны субширотного глубинного разлома, сопровождаемого серией оперяющих тектонических нарушений различного порядка, выраженных зонами трещиноватости, катаклаза, милонитизации, расщепления, брекчирования [1]. Месторождение сложено преимущественно среднезернистыми гранитами кызыкчадрского комплекса, прорванными сложнопостроенным порфировым интрузивом, его апофизами и дайками. В краевой части порфирового интрузива присутствуют разрозненные тела приконтактовых взрывчатых брекчий, что предполагает относительно малый эрозионный срез рудно-магматической системы объекта. В экзо- и эндоконтактах порфирового интрузива развит конформный ему рудоносный штокверк с прожилково-вкрапленной рудной минерализацией, сопровождающейся зонально построенным ореолом гидротермально-метасоматических изменений [1].

Минерализованная зона месторождения Кызык-Чадр, включающая потенциально-промышленные рудные тела, представляет собой крутопадающую линейную штокверковую зону размером $(1700 \times 100) - (300 \times (300 - 500))$ м, приуроченную к пластинообразному порфировому интрузиву (рис. 1). Её особенность – интенсивная тектоническая проработка оруденных пород (катаклаз, милонитизация). Лишь в отдельных блоках сохраняются структурно-текстурные признаки, позволяющие идентифицировать породы главных и порфировых фаз кызыкчадрского комплекса. Штокверковое медно-молибденовое оруденение и сопровождающие его кварц-полевошпатовые и кварц-серицит-хлоритовые метасоматиты прослежены бурением на глубину до 500 м, в ряде случаев без признаков выклинивания. Характерны комплексные медно-молибденовые с золотом руды со сравнительно невысоким средним содержанием меди (первые-десятые доли процента) и молибдена (тысячные-сотые доли процента).

Зональность метасоматических изменений в пределах участка месторождения заключается в смене от центра к периферии следующих генерализованных метасоматических зон: калиевой, филлизитовой и пропилитовой (с внутренней и внешней подзонами) (рис. 2) [1, 11, 21].

Метасоматиты месторождения интенсивно пиритизированы. Кварцевые, реже кварц-карбонатные ветвящиеся прожилки часто образуют зоны интенсивного окварцевания мощностью 2,5–20 м. Прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация представлена пиритом, халькопиритом, молибденитом, в подчинённых количествах присутствуют блёклые руды, борнит, халькозин, галенит, сфалерит, магнетит, редко – субмикроскопические выделения самородного золота. По мере удаления от контакта порфирового тела интенсивность рудной минерализации резко снижается.

Основные тенденции строения рудно-магматической системы месторождения, включая морфологию порфирового интрузива, основные элементы генерализованной зональности ме-

тасоматических изменений и закономерного зонального распределения рудного вещества (рудно-минералого-геохимической зональности) отчётливо проявлены на продольном и поперечных разрезах (рис. 3, см. рис. 2). В продольном сечении, как и в поперечных, намечаются элементы концентрической метасоматической зональности с локализацией редуцированной калиевой зоны в центральной части комплексного рудно-метасоматического ореола рудопроявления. Калиевая зона облекается внутренней пропилитовой зоной, сменяющейся на флангах интенсивно проявленной филлизитовой зоной. Как видно из рисунка, общая морфология метасоматического ореола и его отдельных зон вполне конформны пластинообразным телам кулисно построенного порфирового интрузива и его апофиз.

Морфология зон рудной минерализации различного состава также вполне конформна морфологии порфирового интрузива и зон метасоматических изменений. Редуцированная халькопиритовая ассоциация с реликтами магнетита в её краевых частях сменяется с удалением от предполагаемого центра системы «базовой» пирит-халькопиритовой ассоциацией и затем пиритовой ассоциацией пиритового ореола. Полиметаллическая (галенит-сфалеритовая) ассоциация закономерно локализуется в узких крутопадающих линейных зонах, очевидно, контролируемых разрывными нарушениями. К ним же приурочены и локально проявленные участки развития блёклорудной минерализации.

Основные элементы строения месторождения Кызык-Чадр в целом отвечают типовой модели медно-порфировых месторождений, однако для него отмечается ряд особенностей морфологии рудных тел и вещественного состава: лентовидная в плане и поперечном сечении форма минерализованной зоны, редуцированное распространение калиевой зоны практически без реликтов вторичного биотита, резкое преобладание филлизитовых изменений. Эти особенности могут быть обусловлены формированием оруденения в пределах долгоживущей разломной зоны, экранирующим эффек-

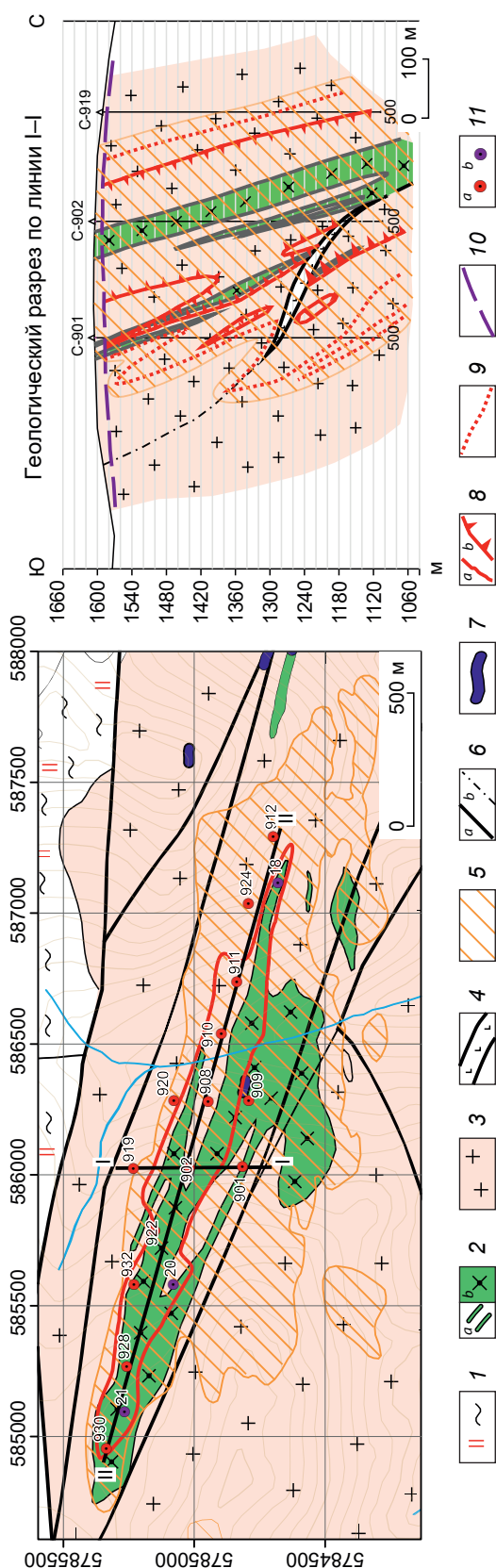
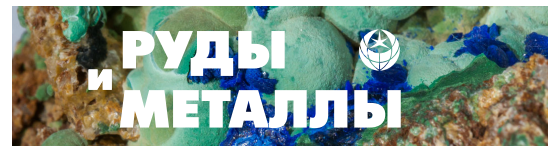


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Кызык-Чадр (по Р. Т. Уссар, 1978 г.; И. А. Бабкин и др., 2019 г.; А. В. Андреев и др., 2021 г. ([1]), с изменениями и дополнениями):

1 – туматтайгинская свита (C_1t): метаморфизованные вулканогенно-осадочные отложения, нерасчленённые, ороговикованные; кызык-чадрский габбро-диорит-гранодиорит-гранитный комплекс ($C_{2-3}kz$): 2 – кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры, кварцевые порфиры, нерасчленённые (a – отдельные дайки, b – порфировый интрузив, образованный близженными телами порфировых пород различного состава); 3 – среднезернистые граниты, кварцевые диориты, мелко-среднезернистые гранодиориты, нерасчленённые; 4 – дайки среднего и основного составов, пострудные; 5 – зоны развития интенсивных гидротермально-метасоматических изменений и сульфидной минерализации; 6 – разрывные нарушения; a – на плане, b – на разрезе; 7 – (золото-сульфидно)-кварцевые жилы; 8 – контур штокерского меднорудного тела по бортовому содержанию Cu 0,2 %: a – на плане, b – на разрезе; 9 – контур первичного ореола рассеяния меди по содержанию Cu 0,05 %; 10 – граница приповерхностной зоны выщелачивания; 11 – скважины, пройденные: a – в 2017–2019 гг., b – в 1976–1977 гг.

Fig. 1. Schematic geological map of the Kyzzyk-Chadr deposit (modified after R. T. Ussar, 1978; I. A. Babkin et al., 2019; A. V. Andreev et al., 2021 [1]):

1 – Tumattai Formation (C_1t): metamorphosed volcanosedimentary deposits, undivided, hornified, Kyzykchadr Suite ($C_{2-3}kz$) of the gabbro-diorite-granodiorite-granite association: 2 – quartz diorite porphyries, granodiorite porphyries, quartz porphyries, undivided (a – individual dikes, b – porphyry intrusion made up of contiguous bodies of porphyry rocks of various compositions); 3 – medium-grained granites, quartz diorites, fine-medium-grained granodiorites, undivided; 4 – dykes of intermediate and basic composition, post-ore; 5 – zones of intense hydrothermal metasomatic alterations and sulfide mineralization; 6 – faults: a – on the plan, b – on the section; 7 – (gold-sulfide)-quartz veins; 8 – outline of a copper stockwork ore body at a cut-off grade of Cu 0.2 %: a – on the plan, b – on the section; 9 – outlines of the primary Cu dispersion halo at the Cu concentration of 0.05 %; 10 – boundary of the near-surface leaching zone; 11 – boreholes drilled: a – in 2017–2019, b – in 1976–1977

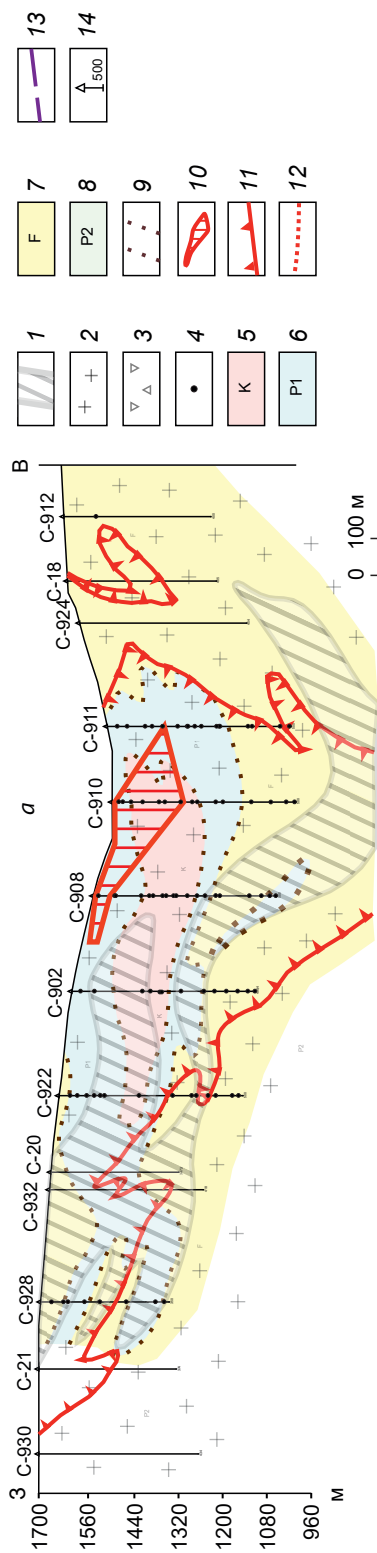


Рис. 2. Модель метасоматической зональности месторождения Кызык-Чадр: (а – вертикальное продольное сечение, б – поперечный разрез по буровому профилю 909-908-920):

1 – рудоносный порфировый интрузив (кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры); 2 – граниты среднеринные, часто катаклазированные; 3 – брекчии (вероятно, тектонического происхождения); 4 – точки отбора проб для LA-ISP-MS анализа; генерализованные зоны гидротермально-метасоматических изменений: 5 – калиевая (основные минералы Q, Kfsp, второстепенные Chl, Ab), 6 – внутренняя пропилитовая (осн. Q, Chl, Ab, второстеп. Kfsp, Ser, Cc), 7 – филлизитовая (осн. Ser, Q, Chl, второстеп. Ab, Cc), 8 – внешняя пропилитовая (осн. Chl, Ep, Cc, второстеп. Ser, Q, Ab); 9 – границы метасоматических зон; прогнозируемые контуры: 10 – меднорудного тела по C_{Cu} 0,4 % (богатые руды), 11 – меднорудного тела по C_{Cu} 0,2 % (рядовые руды), 12 – распространения медной минерализации по C_{Cu} 0,05 %; 13 – граница приповерхностной зоны выщелачивания; 14 – скважины, пройденные АО «Сибирское ПГО» в 2017–2019 гг. и их глубина, м; Q – кварц, Chl – хлорит, Kfsp – калишпат, Ep – эпидот, Ab – альбит, Ser – серицит, Cc – кальцит

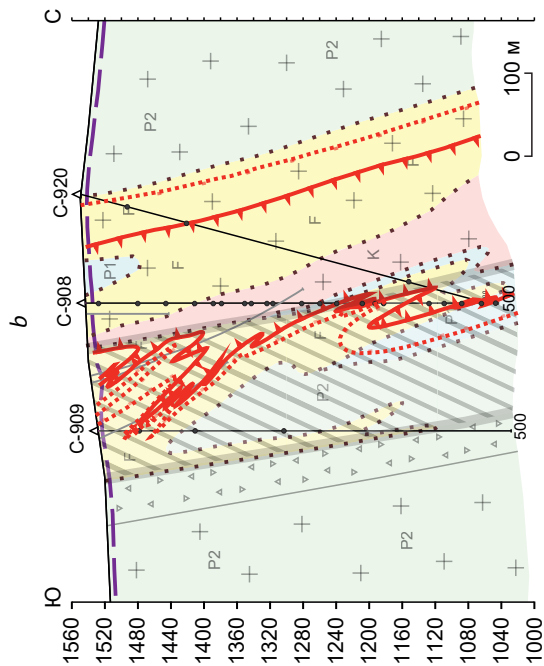


Fig. 2. Model of the metasomatic zonality of the Kyzyl-Chadr deposit: a – vertical longitudinal section, b – transverse section along the drilling profile 909-908-920:

1 – ore-bearing porphyry intrusion (quartz diorite porphyries, granodiorite porphyries); 2 – medium-grained granites, often cataclastic; 3 – breccias (probably of tectonic origin); 4 – location of samples subjected to the LA-ISP-MS analysis; generalized zones of hydrothermal-metasomatic alterations: 5 – potassic (main Ser, Q, Kfsp; minor secondary minerals, Chl, Ab), 6 – inner propylitic (main Q, Chl, Ab; minor Kfsp, Ser, Cc), 7 – phyllic (main Ser, Q, Chl; minor Ab, Cc), 8 – outer propylitic (main Chl, Ep, Cc; minor Ser, Q, Ab); 9 – boundaries of the metasomatic zones; 10 – outlines of the forecasted copper ore body at a cutoff grade of 0.4 % Cu (rich ore), 11 – outlines of the forecasted copper ore body at a cutoff grade of 0.2 % Cu (ordinary ores), 12 – outlines of the forecasted copper mineralization zone at the Cu concentration of 0.05 %; 13 – boundary of the near-surface leaching zone; 14 – boreholes drilled by AO Sibirskoe PGO in 2017–2019 and their depth, m; Q – quartz, Chl – chlorite, Kfsp – potassium feldspar, Ep – epidote, Ab – albite, Ser – sericite, Cc – calcite

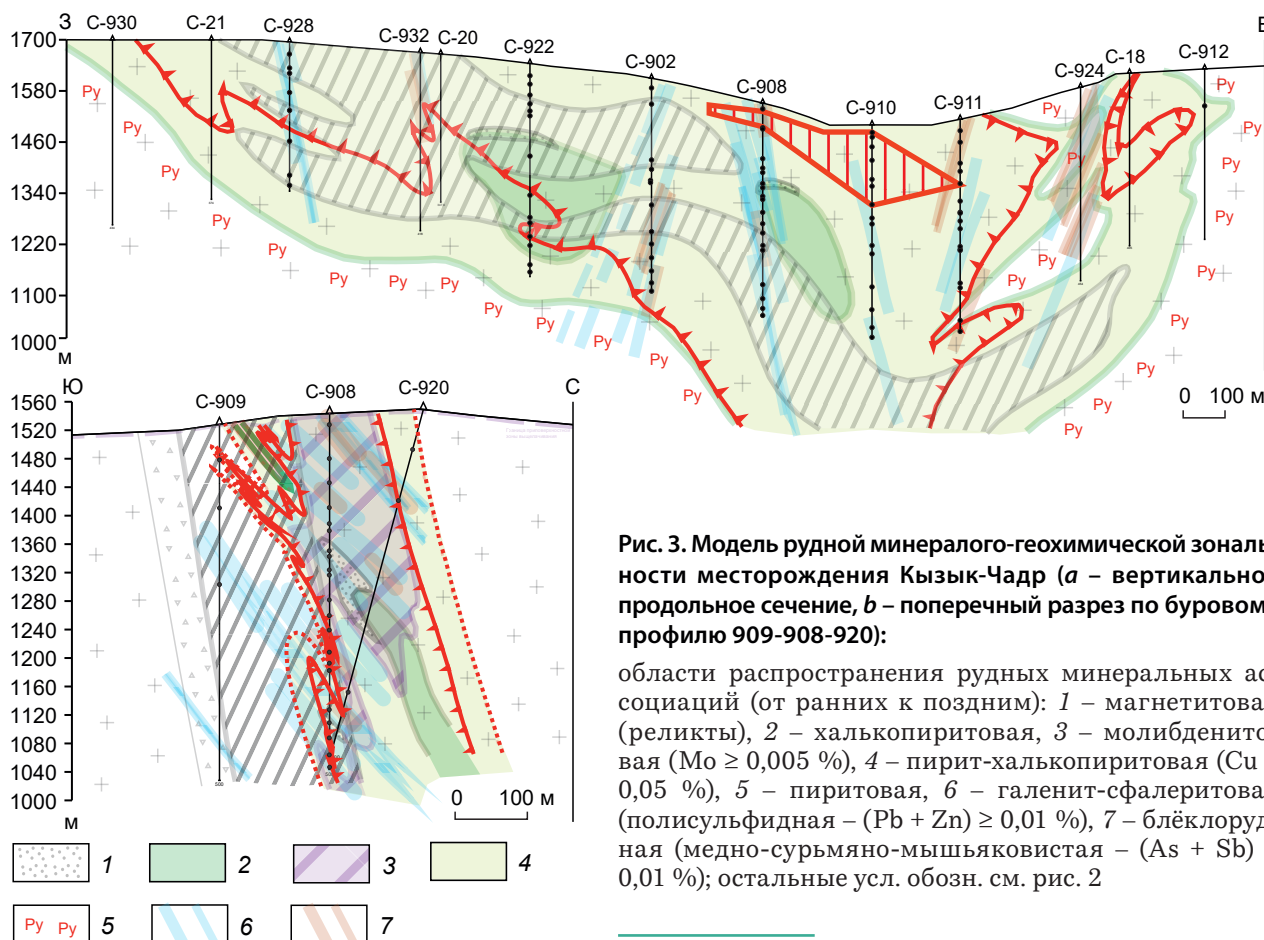
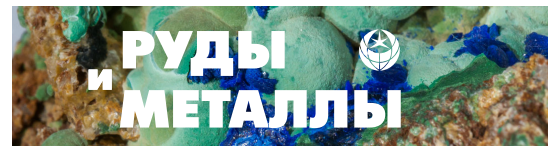


Рис. 3. Модель рудной минералого-геохимической зональности месторождения Кызык-Чадр (*a* – вертикальное продольное сечение, *b* – поперечный разрез по буровому профилю 909-908-920):

области распространения рудных минеральных ассоциаций (от ранних к поздним): 1 – магнетитовая (реликты), 2 – халькопиритовая, 3 – молибденитовая ($\text{Mo} \geq 0,005 \%$), 4 – пирит-халькопиритовая ($\text{Cu} \geq 0,05 \%$), 5 – пиритовая, 6 – галенит-сфалеритовая (полисульфидная – $(\text{Pb} + \text{Zn}) \geq 0,01 \%$), 7 – блёклорудная (медно-сурьмяно-мышьяковистая – $(\text{As} + \text{Sb}) \geq 0,01 \%$); остальные усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 3. Model of the ore mineralogical-geochemical zonation of the Kyzыk-Chadr deposit: *a* – vertical longitudinal section, *b* – cross section along the drilling profile 909-908-920:

zones of ore mineral assemblages (from early to late): 1 – magnetite (relicts), 2 – chalcopyrite, 3 – molybdenite ($\text{Mo} \geq 0.005 \%$), 4 – pyrite-chalcopyrite ($\text{Cu} \geq 0.05 \%$), 5 – pyrite, 6 – galena-sphalerite (polysulfide – $(\text{Pb} + \text{Zn}) \geq 0.01 \%$), 7 – gray ore (copper-antimony-arsenic – $(\text{As} + \text{Sb}) \geq 0.01 \%$); for other designations, see fig. 2

том вмещающей интрузив метаморфизованной толщи, преимущественно кислым составом вмещающих оруденение интрузивных пород.

Методы изучения вещественного состава сульфидных минералов медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр. Изучение вещественного состава сульфидных минералов месторождения Кызык-Чадр проводилось в несколько этапов.

На первом этапе определялись минеральные ассоциации и при помощи оптического микроскопа в отражённом свете изучались аншлифы для описания текстур сульфидов и минеральных микровключений в них.

На втором этапе проводилось изучение образцов методами рентгеноспектрального микроанализа (EPMA) и сканирующей электронной микроскопии (SEM). На этой стадии был уточнён состав микровключений в сульфидных минералах и количественно оценены основные и второстепенные элементы сульфидов.

Результаты исследований первого и второго этапов представлены в предыдущих информационных геологических отчётах по опытно-методическим работам.

На третьем этапе выполнен анализ вещественного состава сульфидных минералов

(главным образом пирита и халькопирита как основных минералов данной группы в изучаемых образцах) методом LA-ICP-MS в целях количественной оценки содержаний микроэлементов.

Проанализирован следующий набор изотопов: ^{33}S , ^{57}Fe , ^{59}Co , ^{60}Ni , ^{65}Cu , ^{66}Zn , ^{75}As , ^{77}Se , ^{95}Mo , ^{101}Ru , ^{103}Rh , ^{105}Pd , ^{107}Ag , ^{108}Pd , ^{185}Re , ^{189}Os , ^{191}Ir , ^{197}Au , ^{208}Pb и ^{209}Bi . Для измерений был использован квадрупольный масс-спектрометр Thermo XSeries 2 и лазерная приставка New Wave Research UP-213.

Параметры лазера: Nd:YAG, длина волны излучения 213 нм, энергия пучка (fluence) 4,5–6,5 Дж/см², частота повторения импульсов 15Hz, диаметр пятна абляции – 40–60 мкм, несущий газ – He, скорость потока 0,65 л/мин, при абляции профилем скорость 7 мкм/с. Время анализа: 30 с (background, холостой ход) + время анализа (в случае точки 60 с, профиль – длина/скорость) + 30 с (промывка).

Параметры масс-спектрометра: RFPower 1250 Вт, рабочий газ Ar, скорость несущего потока 0,95 л/мин, плазмообразующий поток Ar 15 л/мин, охлаждающий поток Ar 0,9 л/мин. Калибровка масс-спектрометра осуществлялась на калибровочных мультиэлементных растворах.

Для градуировки и расчёта использовались международные стандарты: прессованный сульфид USGSMAS-1 [3] и UQAC-FeS1 (UQAC, Chicoutimi, Canada) прессованный порошок природного сульфида, легированный микроэлементами. Расчёт проводился в программе Iolite с использованием ^{57}Fe в качестве внутреннего стандарта [3].

Для анализа выбирался диаметр лазерного пучка, позволяющий максимально избежать загрязнения пробы вмещающей матрицей, но в то же время получить максимально возможное количество вещества.

Применённая в рамках опытно-методических работ методика изучения вещественного состава является классической для данного типа исследований [3, 19], однако для медно-порфириковых месторождений Алтае-Саянской складчатой области такое детальное изучение

вещественного состава сульфидов проводилось впервые.

В ходе выполнения аналитических исследований отобранных образцов методом LA-ICP-MS получены данные по распределению микропримесей перечисленных выше элементов-примесей в зёрнах минерала-хозяина вдоль выбранных микропрофилей лазерного прожига (рис. 4). Для всех образцов рассчитаны также средние значения концентрации каждого элемента-примеси, выполнена статистическая обработка полученных результатов.

Результаты исследований. По итогам выполненных лабораторно-аналитических работ методом LA-ICP-MS получен массив аналитических данных, включающий концентрации элементов-микропримесей в сульфидах (пирит и халькопирит) основных распространённых на месторождении Кызык-Чадр рудных минеральных ассоциаций.

Предварительная обработка полученных результатов позволила выявить основные черты и особенности вариаций количественного состава (геохимического спектра) элементов-микропримесей в изученных рудообразующих сульфидах разных минеральных ассоциаций для месторождения в целом, а также наметить основные тенденции «скрытой» минералогическо-геохимической зональности распределения микропримесей в сульфидных минералах месторождения Кызык-Чадр, т. е. количественных вариаций микропримесного компонента в составе сульфидов в объёме рудного и окорудного пространства месторождения (рудно-магматической системы).

Первое направление соответствует по подходам и решаемым задачам методу PIMS с определением типоморфных особенностей наиболее продуктивных минеральных ассоциаций в целях разбраковки новых рудопроявлений. Второе направление в целом отвечает методу PVFTS с векторным подходом к локальному прогнозированию наиболее продуктивных зон рудно-магматических систем.

Вариации состава элементов-микропримесей в сульфидных минералах основных рудных минеральных ассоциаций месторождения

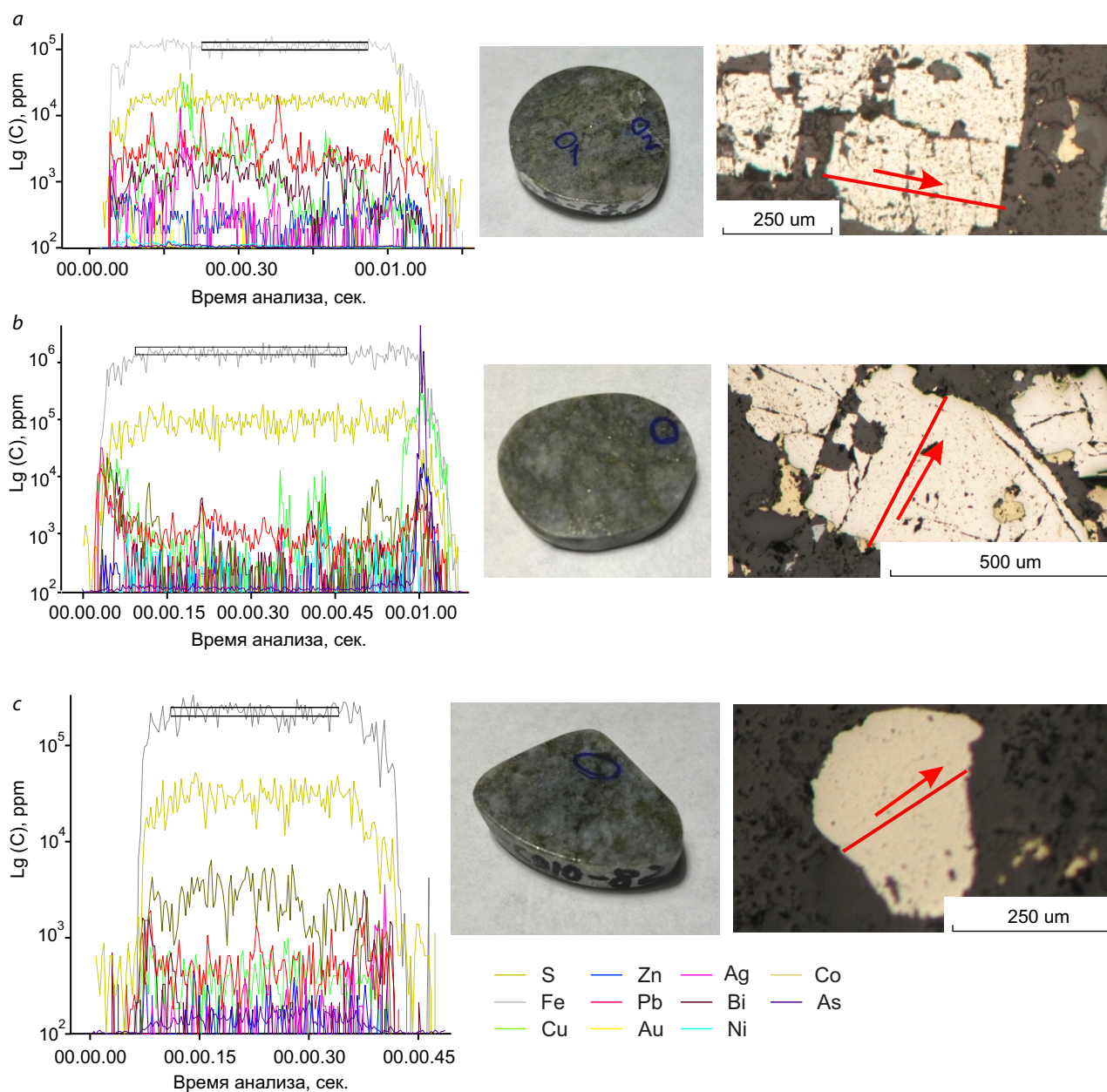


Рис. 4. Анализ микропримесей в пирите методом LA-ICP-MS [3] в образцах: а – КЧ-908-57,6, б – КЧ-902-369, с – КЧ-910-230:

слева – распределение микропримесей по профилю через кристаллически-зональный пирит (прямоугольник – участок для расчёта содержания микропримесей), справа – изучаемый профиль через зерно пирита (стрелка показывает направление прожига)

Fig. 4. Analysis of trace elements impurities in pyrite using LA-ICP-MS technique: а – КЧ-908-57,6, б – КЧ-902-369, с – КЧ-910-230:

on the left, distribution of microimpurities along the profile through crystalline-zoned pyrite (rectangle is the area for calculating the content of microimpurities); on the right, the profile studied through a pyrite grain (the arrow shows the burning direction)

Кызык-Чадр по данным LA-ICP-MS. На основе выполненной предварительной статистической обработки первичных данных составлены диаграммы, отражающие вариации содержаний микроэлементов в пиритах и халькопиритах (диаграммы размаха) по данным LA-ICP-MS (рис. 5).

Дальнейшая статистическая обработка аналитических данных как по всему массиву, так и по отдельно выделенным рудным минеральным ассоциациям позволила выявить ряд типоморфных геохимических особенностей микропримесного состава этих минеральных ассоциаций месторождения Кызык-Чадр. Полученные результаты отражены в таблицах 1 и 2 и на составленных по ним круговых диаграммах (рис. 6, рис. 7).

В *пиритах* месторождения отмечается высокое содержание таких микроэлементов, как Co (до 4000 ppm) и Cu (> 2000 ppm). В исследуемых образцах присутствует Ni (до 2000 ppm). Практически во всех образцах были обнаружены Zn, As, Se, Ag, Pb и Bi, в отдельных случаях зафиксированы содержания Au и Mo, близкие к минимальному порогу обнаружения для применяемого метода.

Для некоторых рудных минеральных ассоциаций предварительно (с учётом ограниченной изученной выборки) намечены закономерности в распределении отдельных элементов. Так, для халькопиритовой ассоциации характерны пириты с повышенным содержанием (в ppm) Co (до 4000), Ni (до 1000) и Se (до 380). Для блёклорудно-галенит-сфалеритовой и пирит-халькопирит-молибденитовой ассоциаций наблюдается похожая картина в распределении микроэлементов.

Кроме того, среди пиритов данных минеральных ассоциаций фиксируются образцы с содержаниями Au (до 6 ppm в пирит-халькопирит-молибденитовой), а также достаточно высокие содержания Ag (100 ppm и более) и Pb (более 1000 ppm).

Для пирит-магнетитовой ассоциации характерны наиболее низкие значения содержаний микроэлементов в пиритах. Исключение составляет Bi (до 19 ppm). Однако данные зна-

чения не выделяются среди пиритов других минеральных ассоциаций.

Для ряда элементов (Zn, Bi и др.) изменения в распределении содержаний в зависимости от рудных минеральных ассоциаций не наблюдаются.

В *халькопиритах* месторождения в целом по сравнению с пиритами отмечаются намного более низкие содержания Co (не более 300 ppm), а Mo, наоборот, присутствует в значительно больших количествах (до 16 ppm).

Как и в случае с пиритами, для халькопиритов пирит-магнетитовой ассоциации характерны наименьшие значения содержаний элементов-примесей в целом, что позволяет сделать вывод о том, что сульфидные минералы, относящиеся к пирит-магнетитовой ассоциации, являются наиболее «чистыми» с точки зрения содержаний элементов-примесей (микроэлементов).

По сравнению с пиритами в халькопиритах отмечаются более высокие содержания серебра и цинка (до 8000 и 250 ppm соответственно). При этом для халькопиритов характерны повышенные значения содержания микроэлементов в целом именно для образцов, относящихся к блёклорудно-галенит-сфалеритовой, а не халькопиритовой, ассоциации, как в случае с пиритами. Халькопириты халькопиритовой ассоциации, наоборот, характеризуются относительно небольшими значениями содержаний микроэлементов, немного превышая по данному показателю халькопириты пирит-магнетитовой ассоциации.

Содержание золота в халькопиритах значительно ниже, чем в пиритах. Большинство исследуемых образцов характеризовалось околонулевыми значениями содержания данного элемента. Максимальное значение содержания золота составило 2 ppm (пирит-халькопирит-молибденитовая ассоциация).

Элементы «скрытой» минералого-геохимической зональности распределения микропримесей в сульфидных минералах месторождения Кызык-Чадр. Особое внимание при проведении исследований в отчётный период было уделено изучению закономерностей про-

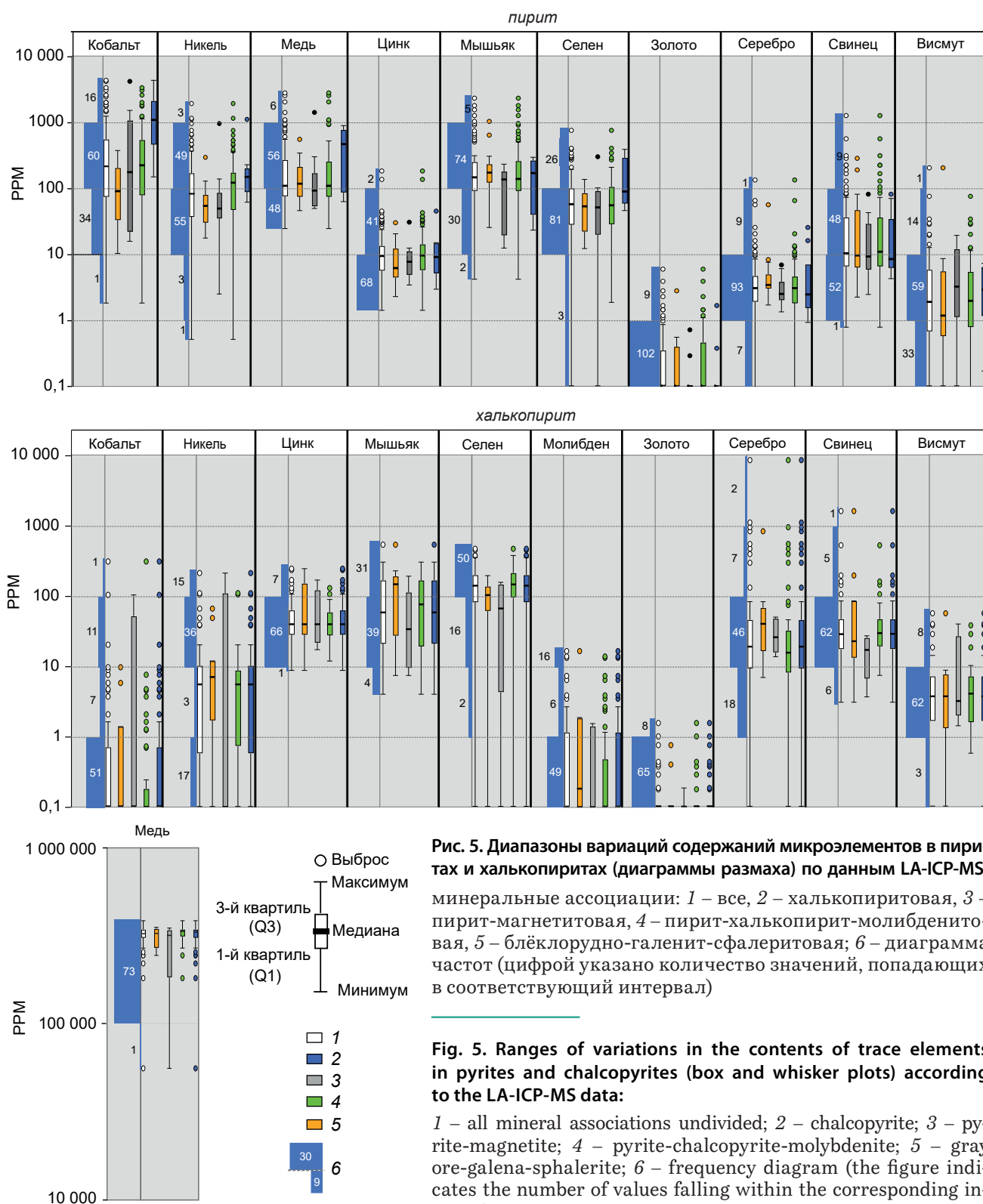
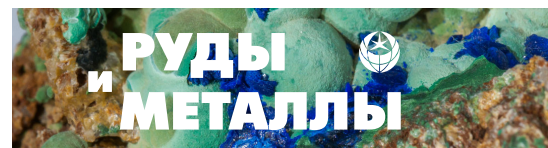


Рис. 5. Диапазоны вариаций содержаний микроэлементов в пиритах и халькопиритах (диаграммы размаха) по данным LA-ICP-MS: минеральные ассоциации: 1 – все, 2 – халькопиритовая, 3 – пирит-магнетитовая, 4 – пирит-халькопирит-молибденитовая, 5 – блёклорудно-галенит-сфалеритовая; 6 – диаграмма частот (цифрой указано количество значений, попадающих в соответствующий интервал)

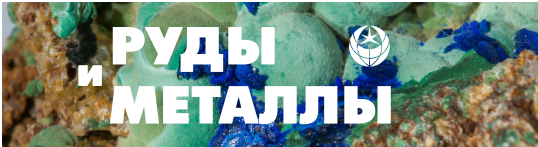
Fig. 5. Ranges of variations in the contents of trace elements in pyrites and chalcopyrites (box and whisker plots) according to the LA-ICP-MS data:

1 – all mineral associations undivided; 2 – chalcopyrite; 3 – pyrite-magnetite; 4 – pyrite-chalcopyrite-molybdenite; 5 – gray ore-galenite-sphalerite; 6 – frequency diagram (the figure indicates the number of values falling within the corresponding interval)

Табл. 1. Сводные статистические данные о распределении содержаний элементов-примесей (ppm) в пиритах основных рудных минеральных ассоциаций месторождения Кызык-Чадр по данным LA-ICP-MS

Table 1. Summary statistical data on the distribution of trace element contents (in ppm) in pyrites of the main ore mineral assemblages of the Kyzyk-Chadr deposit according to LA-ICP-MS data

Элемент	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Au	Pb	Bi
<i>Все ассоциации</i>												
Число замеров	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
Число замеров с Q1 по Q3	56	55	56	55	47	56	55	55	57	55	50	48
Среднее арифметическое, ppm	549 626	529	171	1512	14	246	88	3	6	0	48	7
Медиана, ppm	543 720	213	82	108	9	144	56	0	3	0	10	2
Q1, ppm	510 270	73	40	76	6	91	28	0	2	0	7	1
Q3, ppm	582 360	543	167	262	13	245	98	0	5	0	34	6
min, ppm	396 000	2	1	24	1	4	0	0	0	0	1	0
max, ppm	819 260	4324	1922	137 700	181	2284	741	190	132	6	1242	200
<i>Блёклорудно-галенит-сфалеритовая</i>												
Число замеров	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Число замеров с Q1 по Q3	8	8	8	8	8	8	8	8	9	8	7	4
Среднее арифметическое, ppm	522 389	128	70	166	9	240	55	4	7	0	45	15
Медиана, ppm	523 890	89	54	117	6	170	52	0	3	0	9	1
Q1, ppm	503 302	43	33	84	5	125	24	0	3	0	7	1
Q3, ppm	534 980	182	75	175	10	210	73	0	5	0	41	5
min, ppm	472 330	10	17	46	2	25	12	0	2	0	2	0
max, ppm	609 040	368	293	544	30	1012	135	69	55	3	280	200
<i>Пирит-магнетитовая</i>												
Число замеров	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Число замеров с Q1 по Q3	4	4	4	4	5	4	4	4	5	4	4	5
Среднее арифметическое, ppm	577 422	741	142	232	10	116	71	0	3	0	20	6
Медиана, ppm	547 530	174	49	90	8	135	50	0	2	0	9	3
Q1, ppm	517 465	35	36	55	6	39	22	0	2	0	7	1
Q3, ppm	609 809	783	67	120	11	158	82	0	3	0	21	11
min, ppm	451 720	16	2	49	3	12	0	0	1	0	2	0
max, ppm	819 260	4124	947	1394	30	228	297	0	7	1	80	19
<i>Пирит-халькопирит-молибденитовая</i>												
Число замеров	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Число замеров с Q1 по Q3	38	37	37	37	35	38	37	37	34	37	34	27
Среднее арифметическое, ppm	547 005	471	189	2112	16	277	89	3	6	0	55	5
Медиана, ppm	548 020	221	121	108	9	136	54	0	3	0	11	2



Окончание таблицы 1

Элемент	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Au	Pb	Bi
Q1, ppm	507 840	80	47	76	6	91	28	0	2	0	7	1
Q3, ppm	582 360	522	171	246	14	257	100	0	5	0	34	5
min, ppm	396 000	2	1	24	1	4	2	0	0	0	1	0
max, ppm	670 220	3335	1922	137 700	181	2284	741	190	132	6	1242	74
Халькопиритовая												
Число замеров	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Число замеров с Q1 по Q3	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	5
Среднее арифметическое, ppm	585 062	1395	228	448	12	159	148	0	6	0	22	3
Медиана, ppm	581 440	1082	146	464	9	166	88	0	2	0	8	3
Q1, ppm	543 277	577	98	115	6	58	66	0	2	0	7	1
Q3, ppm	633 728	1844	183	737	14	246	238	0	4	0	20	6
min, ppm	494 500	148	61	62	3	23	45	0	1	0	4	0
max, ppm	674 907	4324	1090	879	45	293	380	2	25	2	80	7

Табл. 2. Сводные статистические данные о распределении содержаний элементов-примесей (ppm) в халькопиритах основных рудных минеральных ассоциаций месторождения Кызык-Чадр по данным LA-ICP-MS

Table 2. Summary statistical data on the distribution of trace element contents (ppm) in chalcopyrites of the main ore mineral assemblages of the Kyzyk-Chadr deposit according to LA-ICP-MS data

Элемент	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Au	Pb	Bi
Все ассоциации												
Число замеров	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74
Число замеров с Q1 по Q3	36	10	40	36	36	37	36	6	36	36	37	32
Среднее арифметическое, ppm	497 164	7	13	319 484	53	100	146	1	195	0	65	6
Медиана, ppm	480 000	0	5	331 200	39	58	138	0	19	0	28	4
Q1, ppm	432 900	0	1	311 100	28	22	84	0	10	0	17	2
Q3, ppm	556 283	1	10	343 752	61	163	192	1	44	0	44	7
max, ppm	785 400	304	210	386 100	243	531	459	16	8370	2	1590	55
min, ppm	325 552	0	0	55 800	9	4	0	0	0	0	3	0
Блёклорудно-галенит-сфалеритовая												
Число замеров	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Число замеров с Q1 по Q3	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	5	6
Среднее арифметическое, ppm	435 714	2	14	311 784	83	141	96	2	107	0	189	8
Медиана, ppm	435 000	0	7	327 000	39	144	102	0	40	0	22	4
Q1, ppm	407 251	0	3	280 620	31	28	63	0	17	0	14	1
Q3, ppm	459 600	1	10	343 671	117	183	129	2	64	0	82	7

Окончание таблицы 2

Элемент	S	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Au	Pb	Bi
max, ppm	558 000	10	66	352 948	243	531	190	16	816	1	1590	55
min, ppm	325 552	0	0	243 900	9	7	0	0	7	0	3	0
<i>Пирит-магнетитовая</i>												
Число замеров	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Число замеров с Q1 по Q3	3	3	3	3	2	1	3	2	2	2	2	2
Среднее арифметическое, ppm	447 900	20	43	273 120	64	55	73	1	30	0	16	12
Медиана, ppm	390 000	0	0	318 900	39	33	66	0	25	0	17	3
Q1, ppm	388 500	0	0	309 000	26	12	8	0	17	0	10	3
Q3, ppm	519 000	0	7	332 400	71	36	138	1	46	0	23	14
max, ppm	600 000	102	210	349 500	165	186	153	2	49	0	27	39
min, ppm	342 000	0	0	55 800	17	7	0	0	14	0	4	1
<i>Пирит-халькопирит-молибденитовая</i>												
Число замеров	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
Число замеров с Q1 по Q3	25	25	25	25	22	24	24	24	23	24	25	21
Среднее арифметическое, ppm	499 439	7	10	325 924	46	100	154	1	241	0	47	6
Медиана, ppm	480 000	0	5	336 000	39	74	144	0	15	0	29	4
Q1, ppm	434 700	0	1	312 300	28	20	96	0	8	0	19	2
Q3, ppm	555 000	0	8	343 936	57	163	204	0	29	0	42	7
max, ppm	687 000	304	108	386 100	128	300	459	14	8370	2	516	37
min, ppm	380 117	0	0	181 830	12	4	0	0	0	0	7	1
<i>Халькопиритовая</i>												
Число замеров	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Число замеров с Q1 по Q3	5	3	4	5	4	4	5	4	4	4	4	4
Среднее арифметическое, ppm	587 250	3	12	319 593	51	76	203	0	143	0	35	4
Медиана, ppm	585 000	0	5	327 030	38	37	210	0	27	0	42	3
Q1, ppm	534 600	0	1	319 800	34	31	90	0	8	0	24	2
Q3, ppm	620 400	1	11	339 240	66	96	281	1	36	0	44	5
max, ppm	785 400	20	39	363 000	117	270	446	2	1086	0	52	12
min, ppm	486 000	0	0	220 500	18	11	0	0	3	0	13	2

странственного распределения примесей (микроэлементов) в пиритах и халькопиритах месторождения в целях выявления элементов «скрытой» минералого-геохимической зональности. Обработка пространственных данных, интерполяция значений и оформление про-

изводились с использованием программного обеспечения Surfer. С помощью этой программы отстраивалось распределение концентраций элементов-микропримесей в пиритах и халькопиритах, а также их соотношений в вертикальных сечениях вдоль продольного разре-

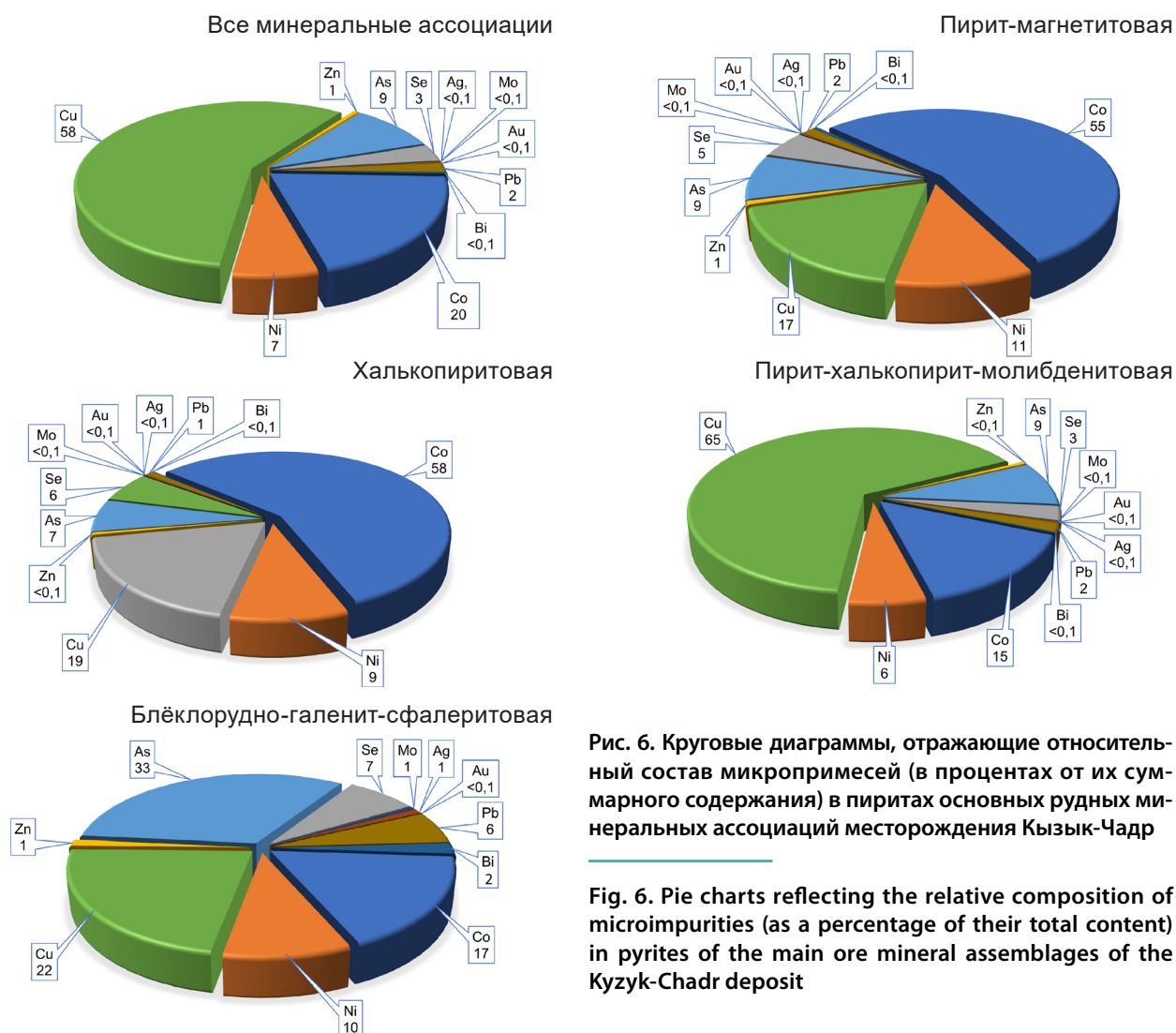
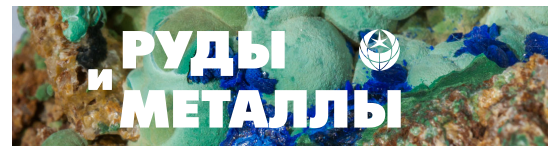


Рис. 6. Круговые диаграммы, отражающие относительный состав микропримесей (в процентах от их суммарного содержания) в пиритах основных рудных минеральных ассоциаций месторождения Кызык-Чадр

Fig. 6. Pie charts reflecting the relative composition of microimpurities (as a percentage of their total content) in pyrites of the main ore mineral assemblages of the Kyzyl-Chadr deposit

за через месторождение. Графическое отображение результатов проведённых аналитических работ представлено на разрезах (рис. 8–11).

Интерполяция данных на разрезах производилась в автоматическом режиме путём построения цифровых моделей (grid) геостатистическим методом кригинга (kriging). Размер ячеек создаваемых моделей определялся исходя из параметров исходной сети скважин (половина межскважинного расстояния). Для продольного разреза данная величина составила 100 м при среднем расстоянии между скважинами 200 м. Размер ячейки по вертикали – 20 м (усреднённое расстояние половины интервала между образцами). Таким образом, размеры ячеек цифровой модели, являющейся

основой для продольного разреза, составил 100×20 м, для поперечного – 50×20 м.

Также при выполнении интерполяции были использованы параметры анизотропии исходя из представлений об элементах залегания прогнозируемой минерализованной зоны и порфиорового интрузива. Так, угол анизотропии составил 100° для поперечного и 140° для продольного разрезов. Параметр соотношения (ratio) принимался равным пяти в обоих случаях. При выполнении интерполяции применялась процедура логарифмирования для корректного построения разрезов с большим разбросом значений переменных (содержаний микроэлементов в сульфидных минералах – пиритах и халькопиритах).

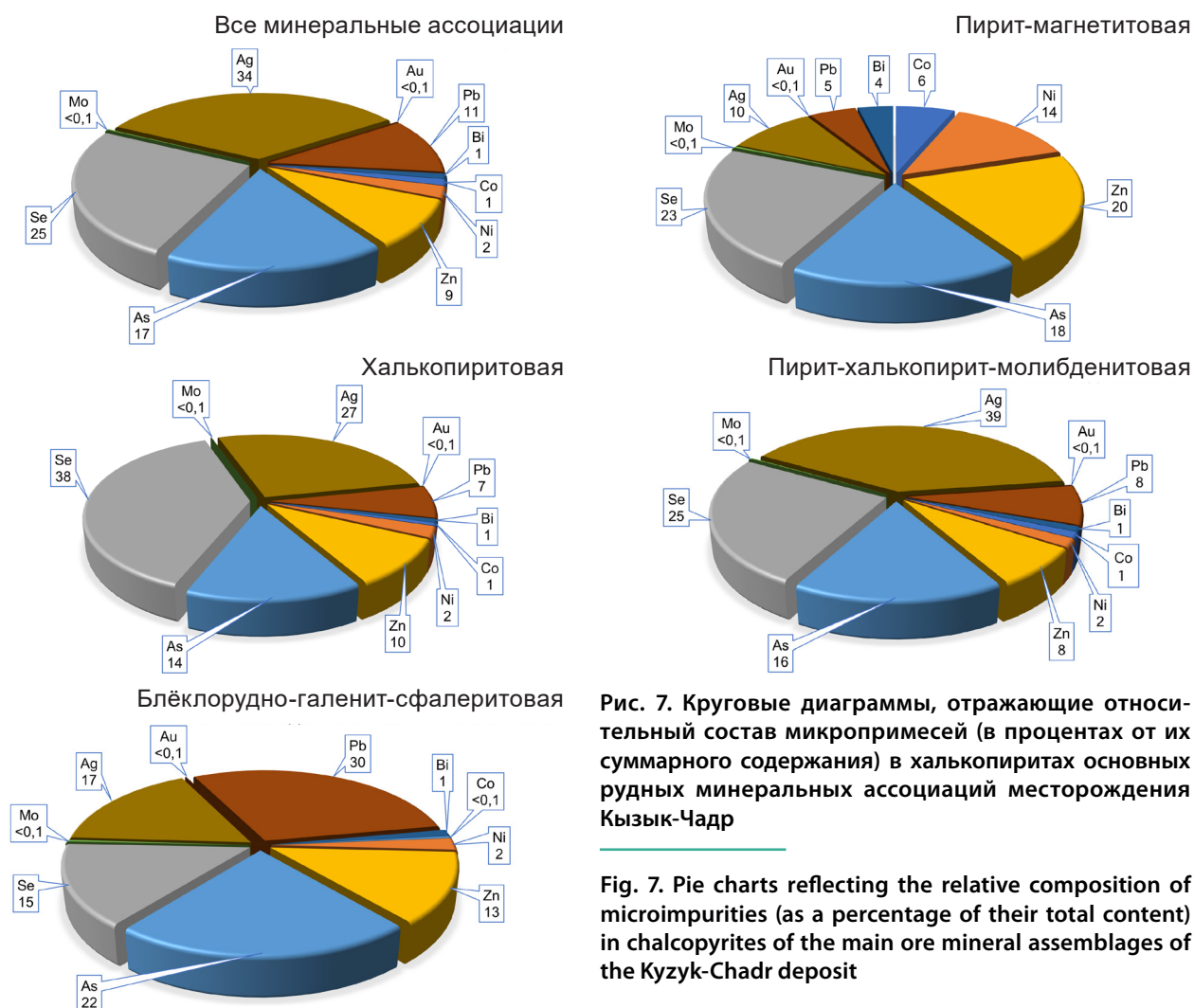


Рис. 7. Круговые диаграммы, отражающие относительный состав микропримесей (в процентах от их суммарного содержания) в халькопиритах основных рудных минеральных ассоциаций месторождения Кызык-Чадр

Fig. 7. Pie charts reflecting the relative composition of microimpurities (as a percentage of their total content) in chalcopyrites of the main ore mineral assemblages of the Kyzyl-Chadr deposit

Пространственное распределение элементов-примесей в пиритах месторождения Кызык-Чадр. Одним из наиболее распространённых и информативных микроэлементов в пирите рудных месторождений является кобальт [2, 19, 21]. В целом для пиритов месторождения Кызык-Чадр характерно увеличение содержания Co в пиритах (до 1000 и более ppm) на глубоких горизонтах и флангах рудных тел, преимущественно в эндоконтактовых частях порфирового интрузива (см. рис. 8). Относительное увеличение Co (от 50 до 200 ppm), заметное на продольном разрезе в осевой части рудного тела, также связано с приконтактовой зоной апофизы порфирового интрузива (за плоскостью разреза). Наименьшими зна-

чениями содержаний Co характеризуются пириты, относящиеся к блёклорудно-галенит-сфалеритовой минеральной ассоциации (менее 100 ppm).

Максимальные значения содержаний никеля в пиритах месторождения Кызык-Чадр (до 1000 ppm и более) тяготеют к флангам и подрудным частям рудных тел, преимущественно в экзоконтактах порфировых интрузивов (см. рис. 8). Фоновые значения содержания никеля в пирите составляют 100–300 ppm.

Картина распределения содержаний меди в пиритах отличается высокой контрастностью. Максимумы (до 800–1000 ppm) фиксируются преимущественно в осевых частях рудного тела и локализируются в экзоконтактах апофиз

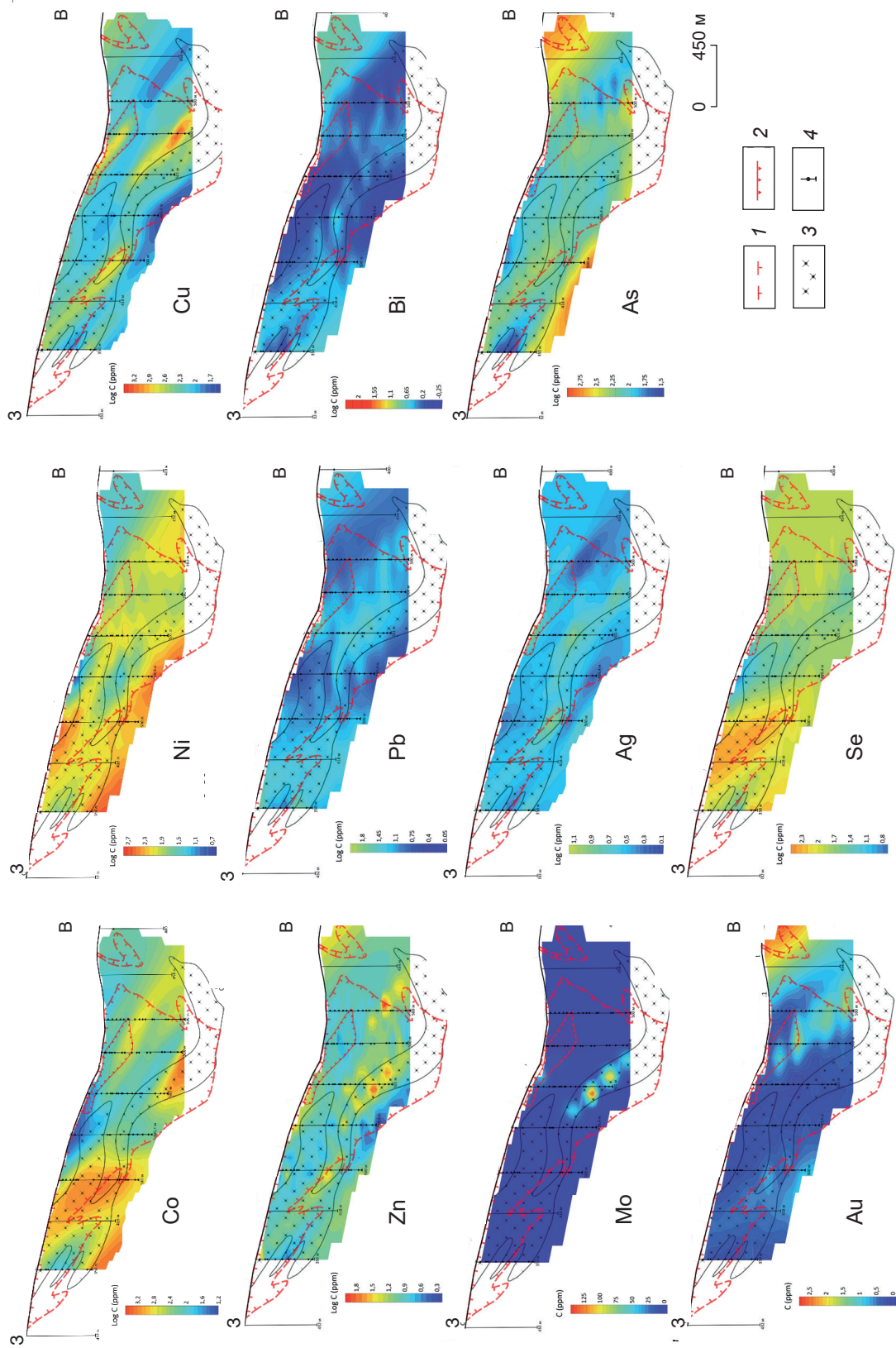
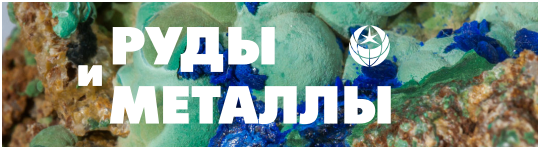


Рис. 8. Продольный разрез с элементами «скрытой» минералого-геохимической зональности в пиритах месторождения Кызык-Чадр: прогнозируемый по итогам ГР 2016–2018 гг. контур меднорудного тела: 1 – по $C_{\text{борт. Cu 0,2 \%}}$, 2 – по $C_{\text{борт. Cu 0,4 \%}}$; 3 – рудный порфировый интрузив; 4 – скважины и точки отбора проб

Fig. 8. Longitudinal section with elements of “hidden” mineralogical–geochemical zonation in pyrites of the Kyzzyk-Chadr deposit: forecasted copper ore body established by the 2016–2018 exploration project: 1 – at a cut-off grade of 0.2 % Cu, 2 – at a cut-off grade of 0.4 % Cu; 3 – ore-bearing porphyry intrusion; 4 – boreholes with sampling points

порфирового интрузива. Максимумы обрамляются зонами минимумов (менее 100 ppm), что обуславливает полицентрический рисунок зональности этого параметра в продольном сечении месторождения (см. рис. 8). Максимальные содержания меди отмечаются в пиритах халькопиритовой и блёклорудно-галенит-сфалеритовой минеральных ассоциаций, в то время как для пиритов молибденит-пирит-халькопиритовой ассоциации часто характерны низкие и минимальные концентрации меди.

На месторождении Кызык-Чадр пириты с повышенными концентрациями цинка (до 130 ppm) тяготеют к флангам рудного тела и эндоконтактам порфирового интрузива. Минимальные содержания цинка (менее 10 ppm) отмечаются в пиритах подрудной зоны (см. рис. 8).

Распределение свинца в пиритах характеризуется в целом низкими концентрациями и малой контрастностью, изредка превышая 100 ppm на фоне 10–50 ppm. Зональность по свинцу в пиритах близка зональности по цинку. Такие образцы, как правило, приурочены к эндоконтактовой зоне порфирового интрузива и флангам рудного тела (см. рис. 8).

Для висмута картина распределения примесей в пирите практически повторяет картину распределения свинца при содержаниях до 10 ppm (см. рис. 8). Чёткая связь между содержаниями висмута и принадлежностью пиритов к определённым минеральным ассоциациям в пределах изучаемого месторождения не фиксируется.

Для молибдена характерно преобладание очень низких значений содержаний в пирите (менее 1 ppm). Максимумы содержаний фиксируются в единичных пробах, отобранных на глубоких горизонтах порфирового интрузива, и составляют 1–5 ppm. Также отмечается увеличение содержания молибдена в пирите в пределах наиболее богатой части прогнозируемого рудного тела (до 0,5 ppm) (см. рис. 8).

Для серебра в пирите характерно увеличение содержаний (до 50 и более ppm, в отдельных пробах до 100 ppm при фоновых концентрациях 2–3 ppm) в осевой части рудного

тела, всячем экзоконтакте порфирового интрузива (см. рис. 8). Повышение концентрации серебра в пирите в рудном теле говорит о возможном наличии положительной корреляционной связи между данным элементом и медью, что ранее было выявлено и описано для медно-порфирового месторождения Рио-Бланко [13].

Содержание золота в пиритах весьма низкое (менее 2 ppm). Лишь в отдельных образцах пирита фиксируются значения более 2 ppm. Относительное повышение концентраций отмечается в пределах крутопадающих зон в западной и восточной частях продольного разреза, которые тяготеют к участкам увеличения мощности рудного тела (см. рис. 8). Возможно, эти зоны маркируют долгоживущие рудоподводящие зоны.

Для мышьяка типичны максимумы содержаний (500–1000 ppm) в подрудной зоне и периферических сателлитных рудных телах. Относительно повышенные концентрации мышьяка в пиритах (до 500 ppm на фоне 100–200 ppm) также характерны для флангов рудного тела (см. рис. 8).

Для селена характерны максимумы содержаний в пиритах (200–300 ppm, в отдельных пробах более 700 ppm при фоновых 20–50 ppm) в западной и восточной частях рудной зоны, в участках увеличения мощности рудного тела (см. рис. 8). Такое распределение напоминает тенденцию распределения примеси золота в пиритах месторождения.

При проведении опытно-методических работ помимо изучения пространственного распределения содержаний отдельных элементов-примесей в пирите было также проанализировано пространственное распределение отношений содержаний некоторых микроэлементов в пирите [12].

Пространственное распределение отношения Co/Ni в пиритах маркирует своими максимумами (значения более 10) порфировый интрузив (см. рис. 9). Максимальные значения отношения Ag/Co приурочены к центральной, наиболее богатой части рудного тела, в том числе к обогащённой медью зоне окисления (см. рис. 9). Максимумы отношения Co/Cu в

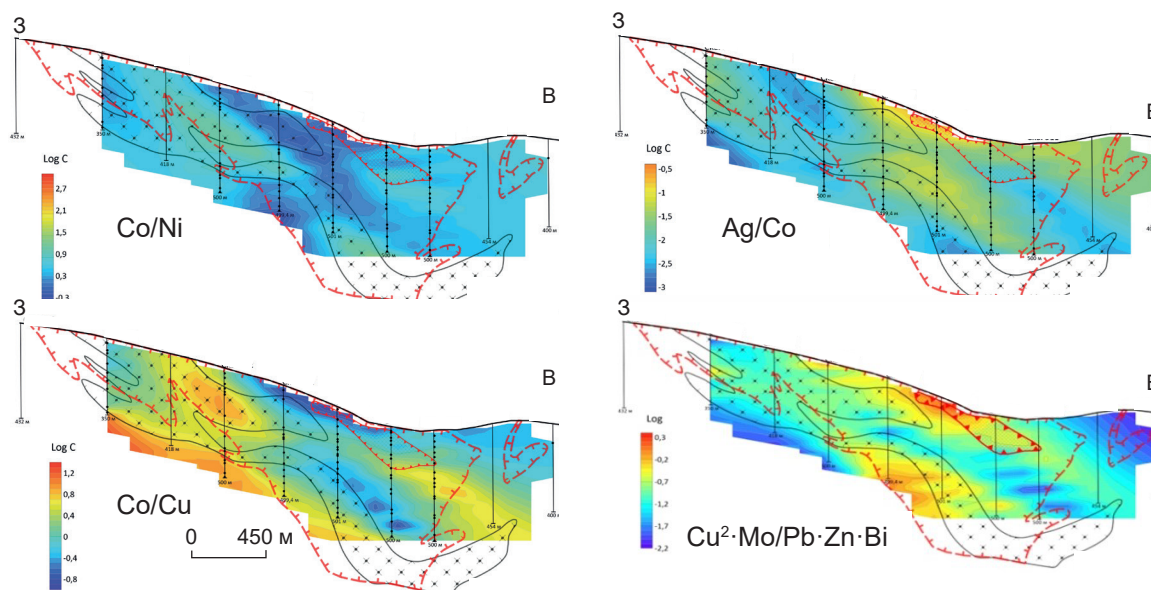
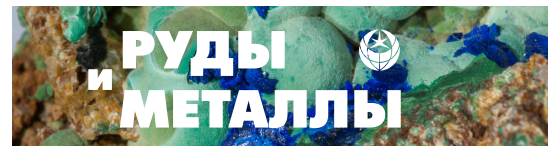


Рис. 9. Продольный разрез с элементами «скрытой» минералогическо-геохимической зональности пространственного распределения отношений содержаний некоторых микроэлементов в пиритах месторождения Кызык-Чадр: усл. обозн. см. рис. 8

Fig. 9. Longitudinal section along the Kyzzyk-Chadr deposit with elements of the “hidden” mineralogical-geochemical zonality in spatial distribution of the ratios of some trace elements in pyrites:

For legend, see fig. 8

пиритах отчётливо тяготеют к фланговым и подрудным зонам месторождения (см. рис. 9). Максимумы соотношения $\text{Cu}^2\cdot\text{Mo}/\text{Pb}\cdot\text{Zn}\cdot\text{Bi}$ (составляющие порядка 1000, единичные до 10 000) в пиритах, так же, как и Ag/Co , приурочены к наиболее обогащённой медью зоне окисления и, вероятно, маркируют предполагаемое, не вскрытое скважинами оруденение на глубине.

Таким образом, можно заключить, что вариации содержания микроэлементов в пиритах связаны с положением в пространстве главных элементов геологического строения месторождения – морфологией порфирового интрузива и его контактов и контурами рудных тел (определёнными по содержанию Cu 0,2 %) и их обогащённых участков (по содержанию Cu 0,5 %).

Порфировый интрузив маркируется максимумами концентраций в пирите Se , Bi , Zn , Mo , а также отношений Co/Ni . Для краевых частей порфирового интрузива характерны максимумы содержаний в пиритах Ag , Co , Cu ,

Zn . Для наиболее богатой части рудного тела типично увеличение содержания в пиритах Ag , Cu , Co , а также увеличение значений отношения Ag/Co . Для окисленных частей минерализованной зоны свойственны повышенные содержания в пиритах Bi и Zn . За пределами прогнозируемой минерализованной зоны максимальное содержание в пирите имеют As и Ni , отношение Co/Cu . Максимумы примесей Au в пиритах тяготеют к участкам увеличения мощности рудного тела и, возможно, маркируют долгоживущие рудоподводящие каналы.

Пространственное распределение элементов-примесей в халькопиритах месторождения Кызык-Чадр. Характер пространственного распределения концентраций элементов-примесей в халькопиритах месторождения Кызык-Чадр значительно отличается от установленного для пиритов.

Распределение концентраций кобальта в халькопиритах довольно контрастно, максимумы (10–20 ppm) тяготеют к эндо- и экзокон-

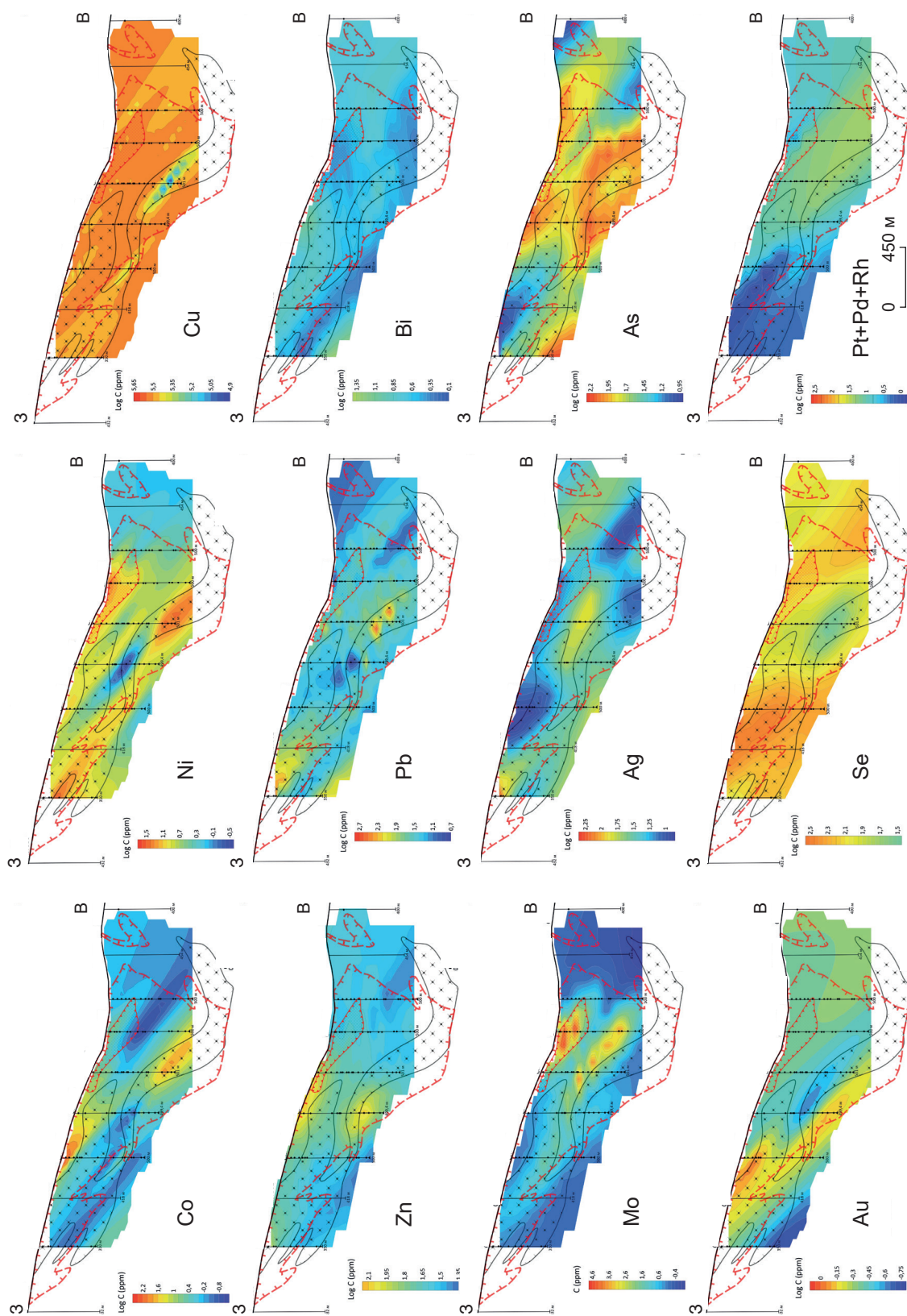
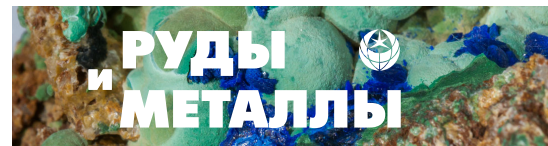


Рис. 10. Продольный разрез с элементами «скрытой» минералого-геохимической зональности в пиритах месторождения Кызык-Чад: усл. обозн. см. рис. 8

Fig. 10. Longitudinal section along the Kyzyl-Chadr deposit with elements of the “hidden” mineralogical-geochemical zonation in pyrites: For legend, see fig. 8



тактам порфирового интрузива на среднем рудном уровне (см. рис. 10).

Высокие содержания *никеля* в халькопиритах (до 100 ppm) распространены весьма широко в пределах рудного тела и рудоносного порфирового интрузива (см. рис. 10). Низкие концентрации фиксируются на флангах, в подрудной и осевой зонах рудного тела.

Для концентрации *меди* в халькопиритах удалось выявить образцы с пониженными относительно фоновому (350 000 ppm) значениями (до 300 000 ppm). Такие образцы отобраны из средних и глубоких частей порфирового интрузива (см. рис. 10), которые также характеризуются повышенными содержаниями Co, Ni, Pb и ряда других микроэлементов.

Цинк в халькопиритах характеризуется приуроченностью максимумов (50–100 ppm) к центральным (окисленным?) и нижнерудным частям рудного тела (см. рис. 10).

Картина распределения содержаний *свинца* в халькопиритах в значительной степени отличается от распределения содержаний цинка. Так, практически все максимумы содержаний свинца в халькопиритах (100 и более ppm) приурочены к порфировому интрузиву. Отдельные ураганные содержания превышают 1000 ppm. Такие зоны с экстремально высокими содержаниями свинца в халькопирите соответствуют участкам порфирового интрузива со сниженными значениями содержаний меди в халькопиритах. Фоновые значения содержания свинца в пределах месторождения составляют 25–50 ppm (см. рис. 10).

Висмут в халькопиритах в пределах всего месторождения распределён относительно равномерно. Значения выше 10 ppm на фоне 3–5 ppm отмечаются преимущественно на флангах рудного тела (см. рис. 10).

Максимумы содержаний *молибдена* в халькопиритах отчётливо приурочены к двум зонам: верхнему контакту порфирового интрузива (до 13 ppm) и наиболее богатой части прогнозируемого рудного тела (до 16 ppm). В других частях месторождения молибден распределён в халькопирите весьма равномерно и отличается пониженными значениями (менее 1 ppm) (см. рис. 10).

Для *серебра* в халькопиритах характерна приуроченность максимумов (до 1000 ppm и более) к центральной, фланговым и подрудной частям рудного тела (см. рис. 10). Фоновые значения содержаний серебра в халькопиритах составляют, как правило, менее 20 ppm.

Золото в халькопиритах распределено весьма неравномерно. Максимумы содержаний (до 1 ppm) приурочены к крутопадающей зоне в западной части рудного тела, в участке градиентного увеличения его мощности (см. рис. 10). В пределах большей части месторождения значения содержаний золота в халькопиритах весьма малы, как правило, ниже предела обнаружения (0,1 ppm и менее). Стоит отметить, что для многих месторождений медно-порфирового семейства золото приурочено именно к халькопиритам [22].

Максимумы содержаний *мышьяка* в халькопиритах соответствуют эндо-экзоконтактовым частям порфирового интрузива (верхний и нижний контакты). Значения содержаний мышьяка здесь достигают 100–200, в единичных пробах до 500 ppm. Фоновые содержания мышьяка меньше 100 ppm (см. рис. 10).

Распределение *селена* в халькопиритах в пределах месторождения Кызык-Чандр напоминает распределение селена и золота в пиритах этого месторождения. Максимумы (200–300 ppm) тяготеют к западной и восточной частям месторождения (в продольном разрезе), к участкам увеличения мощности рудного тела. В центральной части месторождения, которая также маркировалась повышенными содержаниями свинца в халькопирите, значения содержаний селена в халькопиритах снижены и составляет менее 100, местами менее 10 ppm. Наиболее отчётливо зона сниженных значений содержаний селена в халькопиритах в пределах порфирового интрузива прослеживается на поперечном разрезе (см. рис. 10).

В ходе выполнения данного исследования были также зафиксированы *элементы платиновой группы* в халькопиритах: платина, палладий и родий (см. рис. 10). В большинстве изученных образцов содержания данных элементов в халькопиритах ниже предела обнаружения либо приближены к нему. Од-

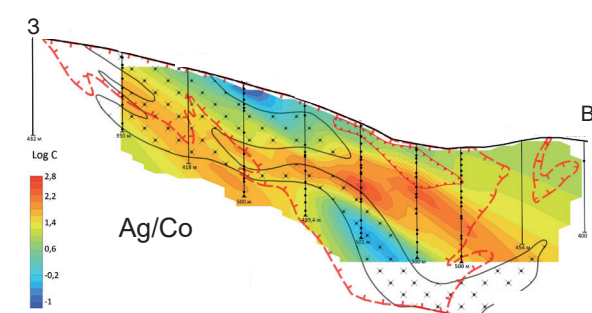
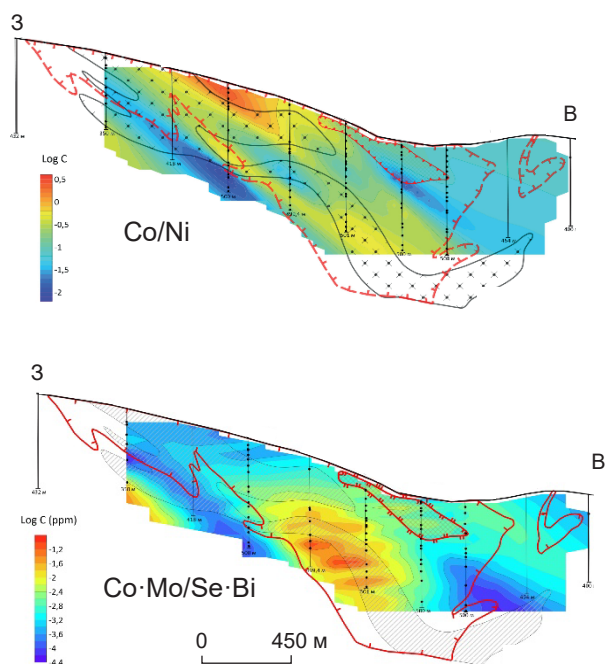


Рис. 11. Продольный разрез с элементами «скрытой» минералого-геохимической зональности пространственного распределения отношений содержаний некоторых микроэлементов в халькопиритах месторождения Кызык-Чадр:

усл. обозн. см. рис. 8

Fig. 11. Longitudinal section along the Kyzyl-Chadr deposit with elements of the “hidden” mineralogical-geochemical zonality in spatial distribution of the ratios of some trace elements in chalcopyrites:

For legend, see fig. 8

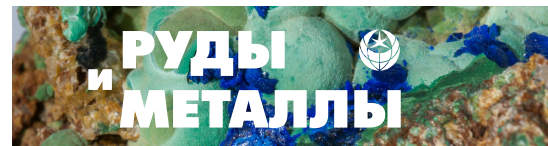
нако выделяется отдельная зона в центральной части прогнозируемого рудного тела, где значения суммы содержаний элементов платиновой группы в халькопиритах составляют до 10 ppm. Также в отдельных образцах халькопирита отмечены ураганные содержания родия (1230 ppm) и палладия (480 ppm). Среди трёх перечисленных элементов платиновой группы наиболее распространён в халькопиритах именно родий. Платина и палладий зафиксированы лишь в единичных образцах. Образцы халькопирита с элементами платиновой группы относятся к пирит-халькопирит-молибденитовой и халькопиритовой минеральной ассоциации. Стоит также отметить, что в пиритах месторождения Кызык-Чадр в ходе проведения опытно-методических работ металлы платиновой группы встречены не были, однако для многих молибден-медно-порфировых месторождений характерно наличие металлов платиновой группы именно в пиритах, при этом прослеживается корреляция между содержанием кобальта и данных элементов. Для халькопиритов наличие металлов платиновой группы не столь характерно, однако на некоторых месторождениях

(Рио-Бланко в Чили, Кальмакыр в Узбекистане [18]) они были ранее обнаружены именно в халькопиритах, при этом отмечалась приуроченность металлов платиновой группы к зоне калиевых изменений [13].

Так же, как и в случае с пиритами, для халькопиритов были проанализированы пространственные распределения *отношений содержаний* элементов-микропримесей. Изучались отношения Co/Ni, Ag/Co и Co·Mo/Se·Bi.

Максимумы значений отношения содержаний Co/Ni в халькопиритах (до 0,5) соответствуют верхнему контакту порфирового интрузива в зоне окисления. Также повышенными значениями данного отношения (до 0,3) характеризуется порфировый интрузив в целом. Фоновые значения отношения содержаний Co/Ni в халькопиритах, как правило, менее 0,1 (см. рис. 11).

Максимумы значений отношения содержаний Ag/Co в халькопиритах соответствуют центральной части прогнозируемого рудного тела и локализуются за пределами порфирового интрузива и зоны окисления (см. рис. 11). Значения отношения Ag/Co в халькопиритах здесь составляют 10 и более, в отдельных слу-



чаях более 100, фоновые значения Ag/Co в халькопиритах менее 10. Также на поперечном разрезе прослеживается некоторая приуроченность максимумов значений Ag/Co в халькопиритах к зоне контакта порфирового интрузива.

Значения отношения $Co/Mo/Se/Bi$ изменяются в диапазоне от 0 до 0,2, при этом максимумы (0,15 до 0,2) соответствуют центральной части прогнозируемого рудного тела за пределами зоны окисления в центральной части продольного разреза (см. рис. 10). Зоны минимальных значений данного отношения прослеживаются за пределами прогнозируемого рудного тела.

Таким образом, для халькопиритов, как и для пиритов, по содержанию микроэлементов устанавливается чередование зон с максимальными и минимальными значениями содержания микроэлементов-примесей и их отношений, связанное с положением в пространстве главных элементов строения месторождения – порфирового интрузива и его контактов и контурами рудных тел.

Так, для порфирового интрузива характерны максимальные значения содержаний в халькопиритах Au , Pb , Ni , Co , Bi , минимальные – Cu и Se . Для наиболее богатой части рудного тела максимальные значения содержаний в халькопиритах характерны для Mo , Cu , Zn , No . Для контактов порфирового интрузива типичны повышенные значения содержаний As , Mo , Ag , Ni и элементов платиновой группы, а также отношений Ag/Co и Co/Ni . В отдельных частях зоны окисления фиксируются повышенные значения содержаний Co , Ag , Zn и отношения Co/Ni . Элементом, повышенные содержания которого отмечены за пределами контура прогнозируемого рудного тела, является Ag .

Заключение. В рамках изучения вещественного состава медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр определены состав и распределение элементов-микропримесей в рудообразующих сульфидных минералах в объёме рудовмещающего пространства.

Статистический и геологический анализ данных опытно-методических минералого-гео-

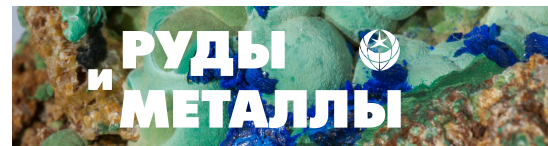
химических исследований позволил выявить ряд типоморфных геохимических особенностей различающихся по продуктивности рудных минеральных ассоциаций месторождения и наметить устойчиво повторяющиеся качественные и количественные элементы «скрытой» минералого-геохимической зональности, выражающиеся в вариациях концентрации элементов-микропримесей и их соотношений в пиритах и халькопиритах в объёме рудоносного штокверка месторождения. В пиритах центральной части штокверка фиксируются относительно высокие концентрации примесей Cu , Mo и Ag ; в центре и особенно на флангах отмечаются слабо повышенные концентрации Bi , Pb и Zn и более контрастные максимумы Co ; фланги и подрудные зоны маркируются высокими концентрациями примесей Ni , Se и As в пиритах. Соответственно, в пиритах месторождения от центра к периферии рудоносного штокверка отчётливо снижается величина отношения Ag/Co и увеличивается Co/Cu . В халькопиритах в центральных частях отмечаются повышенные примеси Mo , Co и Zn , в центре и на флангах – Ni , As , Pb и Ag , далее к флангам – Se и Bi . В центральной части зафиксировано повышение концентраций примеси по сумме платиноидов (Pt , Pd , Rh), а на флангах – Au в халькопиритах.

Выявленные тенденции коррелируются с установленной направленностью и концентрическим характером минералогической рудно-метасоматической зональности рудопроявления и могут объясняться вариациями PT -условий в объёме формирующейся медно-порфировой рудно-магматической системы.

Выявленная схема «скрытой» минералого-геохимической зональности может быть интегрирована в актуализированный вариант геолого-поисковой модели оруденения медно-порфирового типа Кызыкчадрского рудного поля и Тувино-Монгольского ВПП в целом. Установленные тенденции могут использоваться при предварительном оконтуривании рудоносных штокверков, оценке уровня эрозионного среза оруденения и прогнозировании позиции наиболее богатых частей рудных тел на стадии поисковых работ.

Список литературы

1. Андреев А. В., Гирфанов М. М., Старостин И. А., Авилова О. В., Кряжев С. Г., Юрмазов Д. Н., Бабкин И. А., Семёнов М. И. Геологическое строение, рудно-метасоматическая и минералого-геохимическая зональность золотосодержащего молибден-медно-порфирового месторождения Кызык-Чадр, Республика Тыва // Руды и металлы. – 2021. – № 1. – С. 57–76.
2. Безмен Н. И., Еремин Н. И., Наразаули И. Г., Позднякова Н. В., Сергеева Н. Е. Пирит-халькопиритовый геотермометр: распределение кобальта // Геохимия. – 1978. – № 3. – С. 344–389.
3. Викентьев И. В., Абрамова В. Д., Иванова Ю. Н., Тюкова Е. Э., Ковальчук Е. В., Бортников Н. С. Микропримеси в пирите золото-порфирового месторождения Петропавловское (Полярный Урал) по данным LA-ICP-MS // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 470, № 3. – С. 326–330.
4. Дрогобужская С. В., Баянова Т. Б., Новиков А. И., Нерадовский Ю. Н., Субботин В. В., Савченко Е. Э. LA-ICP-MS анализ бадделита, циркона и сульфидов из пород комплексных месторождений Фенноскандинавского щита в пределах Арктического региона // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2019. – № 16. – С. 165–169.
5. Масленников В. В., Масленникова С. П., Целуйко А. С., Гладков А. Г. Метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS) для выявления типохимизма сульфидов колчеданных месторождений // Материалы V Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы, строение, свойства, методы исследования». – Екатеринбург, 2013. – С. 128–130.
6. Сазонов А. М., Пальянова Г. А., Журавкова Т. В., Сильянов С. А. Состав пирротина как индикатор условий минералообразования на золоторудном месторождении Советское (Енисейский край, Россия) // Геология и геофизика. – 2019. – № 7. – С. 934–954.
7. Сидорова Н. В., Викентьев И. В., Абрамова В. Д., Ковальчук Е. В. Золото и другие элементы-примеси в пирите Березовского месторождения (Средний Урал) // Литосфера. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 327–336.
8. Старостин И. А., Авилова О. В., Андреев А. А., Гирфанов М. М. Рудно-метасоматическая зональность рудопроявления Кызык-Чадр (Республика Тыва) // Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». – М.: ЦНИГРИ, 2019. – С. 200.
9. Ярцев Е. И. Колчеданно-полиметаллическое оруденение в метаморфизованных вулканогенных толщах Южного Урала (на примере Джусинского месторождения). – Казань: Бук, 2018. – 170 с.
10. Ярцев Е. И., Викентьев И. В., Еремин Н. И. Изотопный состав и особенности геохимии руд Джусинского колчеданно-полиметаллического месторождения (Южный Урал) // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2019. – № 4. – С. 78–83.
11. Berger B. R., Ayuso R. A., Wynn J. C., Seal R. R. Preliminary Model of Porphyry Copper Deposits. – U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2008.
12. Cook N. J., Ciobanu C. L., Danyushevsky L. V., Gilbert S. Minor and trace elements in bornite and associated Cu-(Fe)-sulfides: A LA-ICP-MS study Bornite mineral chemistry // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2011. – V. 75, I. 21, 1. – P. 6473–6496.
13. Crespo J., Reich M., Barra F., Verdugo J. J., Martínez C. Critical metal particles in ore sulfides from the Río Blanco porphyry Cu-Mo deposit, Chile // Minerals. – 2018. – № 8. – P. 519.
14. Danyushevsky L., Robinson P., Gilbert S., Norman M., Large R., McGoldrick P., Shelley M. Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: Standard development and consideration of matrix effects // Geochemistry Exploration Environment Analysis. – 2011. – V. 11. – P. 51–60.
15. Kusebauch C., Oelze M., Gleeson S. A. Partitioning of arsenic between hydrothermal fluid and pyrite during experimental siderite replacement // Chemical Geology. – 2018. – V. 500. – P. 136–147.
16. Maslennikov V., Maslennikova S., Aupova N., Tseluyko A., Large R., Danyushevsky L., Yatimov U. High-Tech Elements in Minerals of Massive Sulfide Deposits: LA-ICP-MS Data // 14th International Congress on Applied Mineralogy (ICAM-2019), SPEES, 2019. – P. 107–110.
17. Maslennikov V. V., Large R. R. Editorial for Special Issue «Pyrite Varieties and LA-ICP-MS Geochemistry in Ore Genesis and Exploration» // Minerals. – 2021. – № 11. – P. 131.
18. Pašava J., Vymazalova A., Kosler J., Koneev R., Jukov A. V., Khalmatov R. A. Platinum-group elements in ores from the Kalmakyr porphyry Cu-Au-Mo deposit, Uzbekistan: Bulk geochemical and laser ablation ICP-MS data // Mineralium Deposita. – 2010. – № 45. – P. 411–418.



19. Raič S., Molnár F., Cook N., O'Brien H., Lahaye Y. Application of lithogeochemical and pyrite trace element data for the determination of vectors to ore in the Raja Au-Co prospect, northern Finland // *Solid Earth*. – 2021. – V. 13, № 2. – P. 271–299.
 20. Reich M., Deditius A., Chrysosoulis S., Li J., Ma C., Parada M. A., Barra F., Mittermayr F. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2013. – № 104. – P. 42–62.
 21. Rivas Romero C., Reich M., Barra F., Gregory D., Pichott S. The Relation between Trace Element Composition of Cu-(Fe) Sulfides and Hydrothermal Alteration in a Porphyry Copper Deposit: Insights from the Chuquicamata Underground Mine, Chile // *Minerals*. – 2021. – № 11 (7): 671. – P. 29.
 22. Zwahlen C., Cioldi S., Wagner T., Rey R., Heinrich C. The porphyry Cu-(Mo-Au) deposit at Altar (Argentina): Tracing gold distribution by vein mapping and LA-ICP-MS mineral analysis // *Economic Geology*. – 2014. – № 109. – P. 1341–1358.
- ## References
1. Andreev A. V., Girfanov M. M., Starostin I. A., Avilova O. V., Krjazhev S. G., Jurmazov D. N., Babkin I. A., Semjonov M. I. Geologicheskoe stroenie, rudno-metasomaticheskaja i mineralogo-geohimicheskaja zonal'nost' zolotosoderzhashhego molibden-mednoporfirovogo mestorozhdenija Kyz'yk-Chadr, Respublika Tyva [Geological structure, ore-metasomatic and mineralogical-geochemical zoning of Au-Mo-Cu porphyry Kyz'yk-Chadr deposit, Tyva Republic], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2021, No 1, pp. 57–76. (In Russ.).
 2. Bezmen N. I., Eremin N. I., Narazauli I. G., Pozdnjakova N. V., Sergeeva N. E. Pirit-hal'kopiritovyj geotermometr: raspredelenie kobal'ta [Pyrite-chalcocopyrite geothermometer: cobalt distribution], *Geohimija* [Geochemistry International], 1978, No 3, pp. 344–389. (In Russ.).
 3. Vikent'ev I. V., Abramova V. D., Ivanova Ju. N., Tjukova E. Je., Koval'chuk E. V., Bortnikov N. S. Mikroprimesi v piritе zoloto-porfirovogo mestorozhdenija Petropavlovskoe (Poljarnyj Ural) po dannym LA-ICP-MS [Trace elements in pyrite from the Petropavlovsk gold-porphyry deposit (Polar Urals): results of LA-ICP-MS analysis], *Doklady akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2016, V. 470, No 3, pp. 326–330. (In Russ.).
 4. Drogobuzhskaja S. V., Bajanova T. B., Novikov A. I., Neradovskij Ju. N., Subbotin V. V., Savchenko E. Je. LA-ICP-MS analiz baddeleyita, cirkona i sul'fidov iz porod kompleksnyh mestorozhdenij Fennoskandinavskogo shhita v predelakh Arkticheskogo regiona [LA-ICP-MS analysis of baddeleyite, zircon and sulfides from rocks of complex deposits of the Fennoscandinavian Shield within the Arctic region], *Trudy Fersmanovskoj nauchnoj sessii GI KNC RAN* [Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KNC RAS], 2019, No 16, pp. 165–169.
 5. Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Celujko A. S., Gladkov A. G. Metod mass-spektrometrii s induktivno svjazannoj plazmoj i lazernoj ablaciej (LA-ICP-MS) dlja vyjavenija tipohimizma sul'fidov kolchedannyh mestorozhdenij [Method of mass spectrometry with inductively coupled plasma and laser ablation (LA-ICP-MS) to identify the typochemistry of sulfides of pyrite deposits], *Materialy V Vserossijskoj molodjozhnoj nauchnoj konferencii "Mineraly, stroenie, svojstva, metody issledovanija"* [Proceedings of the V All-Russian Youth Scientific Conference "Minerals, structure, properties, methods of research"], Ekaterinburg, 2013, pp. 128–130.
 6. Sazonov A. M., Pal'janova G. A., Zhuravkova T. V., Sil'janov S. A. Sostav pirrotina kak indikator uslovij mineraloobrazovanija na zolotorudnom mestorozhdenii Sovetskoe (Enisejskij krjazh, Rossiya) [Composition of pyrrhotite as an indicator of gold ore formation conditions at the Sovetskoe deposit (Yenisei ridge, Russia)], *Geologija i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2019, No 7, pp. 934–954. (In Russ.).
 7. Sidorova N. V., Vikent'ev I. V., Abramova V. D., Koval'chuk E. V. Zoloto i drugie jelementy-primesi v piritе Berezovskogo mestorozhdenija (Srednij Ural) [Gold and other impurity elements in pyrite from the Berezovskoe deposit in the Middle Urals], *Litosfera* [Lithosphere], 2019, V. 19, No 2, pp. 327–336. (In Russ.).
 8. Starostin I. A., Avilova O. V., Andreev A. A., Girfanov M. M. Rudno-metasomaticheskaja zonal'nost' rudoprojavenija Kyz'yk-Chadr (Respublika Tyva) [Ore-metasomatic zonality of the Kyz'yk-Chadr ore occurrence (Tyva Republic)], *Sbornik tezisov dokladov IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov, ocenki mestorozhdenij almazov, blagorodnyh i cvetnyh metallov"* [Collection of abstracts of the IX International Scientific and Practical Conference "Scientific and Methodological Basis of Forecasting, Prospecting, Evaluation of Diamond,

- Noble and Nonferrous Metals Deposits*"], Moscow, TsNIGRI, 2019, pp. 200.
9. Jarcev E. I. Kolchedanno-polimetallichesкое orudenenie v metamorfizovannykh vulkanogennykh tolshhah Juzhnogo Urala (na primere Dzhusinskogo mestorozhdeniya) [Pyrite-polymetallic mineralization in metamorphosed volcanogenic strata of the Southern Urals (on the example of the Dzhusinsky deposit)], Kazan', Buk Publ., 2018, 170 p.
 10. Jarcev E. I., Vikent'ev I. V., Eremin N. I. Izotopnyj sostav i osobennosti geohimii rud Dzhusinskogo kolchedanno-polimetallichesкого mestorozhdeniya (Juzhnyj Ural) [Isotopic composition and geochemistry features of the ores of the Dzhusinsky pyrite-polymetallic deposit (South Urals)], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya* [Moscow University Bulletin. Series 4. Geology], 2019, No 4, pp. 78–83. (In Russ.).
 11. Berger B. R., Ayuso R. A., Wynn J. C., Seal R. R. Preliminary Model of Porphyry Copper Deposits, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2008.
 12. Cook N. J., Ciobanu C. L., Danyushevsky L. V., Gilbert S. Minor and trace elements in bornite and associated Cu-(Fe)-sulfides: A LA-ICP-MS study Bornite mineral chemistry, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, V. 75, I. 21, 1, pp. 6473–6496.
 13. Crespo J., Reich M., Barra F., Verdugo J. J., Martínez C. Critical metal particles in ore sulfides from the Río Blanco porphyry Cu-Mo deposit, Chile, *Minerals*, 2018, No 8, pp. 519.
 14. Danyushevsky L., Robinson P., Gilbert S., Norman M., Large R., McGoldrick P., Shelley M. Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: Standard development and consideration of matrix effects, *Geochemistry Exploration Environment Analysis*, 2011, V. 11, pp. 51–60.
 15. Kusebauch C., Oelze M., Gleeson S. A. Partitioning of arsenic between hydrothermal fluid and pyrite during experimental siderite replacement, *Chemical Geology*, 2018, V. 500, pp. 136–147.
 16. Maslennikov V., Maslennikova S., Aupova N., Tseluyko A., Large R., Danyushevsky L., Yatimov U. High-Tech Elements in Minerals of Massive Sulfide Deposits: LA-ICP-MS Data, *14th International Congress on Applied Mineralogy (ICAM-2019), SPEES*, 2019, pp. 107–110.
 17. Maslennikov V. V., Large R. R. Editorial for Special Issue "Pyrite Varieties and LA-ICP-MS Geochemistry in Ore Genesis and Exploration", *Minerals*, 2021, No 11, pp. 131.
 18. Pašava J., Vymazalova A., Kosler J., Koneev R., Jukov A. V., Khalmatov R. A. Platinum-group elements in ores from the Kalmakyr porphyry Cu-Au-Mo deposit, Uzbekistan: Bulk geochemical and laser ablation ICP-MS data, *Mineralium Deposita*, 2010, No 45, pp. 411–418.
 19. Raič S., Molnár F., Cook N., O'Brien H., Lahaye Y. Application of lithogeochemical and pyrite trace element data for the determination of vectors to ore in the Raja Au-Co prospect, northern Finland, *Solid Earth*, 2021, V. 13, No 2, pp. 271–299.
 20. Reich M., Deditius A., Chrysosoulis S., Li J., Ma C., Parada M. A., Barra F., Mittermayr F. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, No 104, pp. 42–62.
 21. Rivas Romero C., Reich M., Barra F., Gregory D., Pichott S. The Relation between Trace Element Composition of Cu-(Fe) Sulfides and Hydrothermal Alteration in a Porphyry Copper Deposit: Insights from the Chuquicamata Underground Mine, Chile, *Minerals*, 2021, No 11 (7): 671, p. 29.
 22. Zwahlen C., Cioldi S., Wagner T., Rey R., Heinrich C. The porphyry Cu-(Mo-Au) deposit at Altar (Argentina): Tracing gold distribution by vein mapping and LA-ICP-MS mineral analysis, *Economic Geology*, 2014, No 109, pp. 1341–1358.

Старостин Иван Александрович (starostin@tsnigri.ru)

ведущий инженер

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия