

УДК 553.08:553.21/24:553.046
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4636
Шифр специальности ВАК: 1.6.10

Теллуру-висмутовая минерализация в рудах Малеевского колчеданного месторождения (Восточный Казахстан)

А.Н. Николаева✉, А.К. Мазуров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

✉nikolaevaanastas759@gmail.com

Аннотация. Как известно, Рудный Алтай является классической провинцией колчеданных месторождений, большая часть которых сформирована в палеоостроводужных геодинамических обстановках. Колчеданные руды имеют сложный и разнообразный химический состав, включающий в себя широкий спектр примесных элементов, среди которых до сих пор остаются слабоизученными металлоид теллур и металл висмут. На основании вышеизложенного, в колчеданных рудах Малеевского месторождения, приуроченного к Зырянскому узлу Рудного Алтая, нами была исследована теллуру-висмутовая минерализация. **Актуальность** исследования обусловлена дефицитом информации о характере распределения и формах нахождения данного вида редких полезных ископаемых в рудах колчеданных месторождений Рудного Алтая. Полученные данные настоящего исследования позволят обеспечить более комплексную переработку и использование минерально-сырьевых ресурсов. **Цель:** дать характеристику вещественному составу руд; выявить особенности развития теллуру-висмутовой минерализации и определить условия ее формирования; оценить перспективы на попутную добычу и извлечение теллура с висмутом из руд колчеданных месторождений Рудного Алтая. **Объектом** исследования является теллуру-висмутовая минерализация колчеданных руд месторождения. **Методы:** петрографический, минераграфический и минералогический анализы, сканирующая электронная микроскопия в сочетании с рентгеноспектральным микроанализом и рамановская спектроскопия. **Результаты.** В рудах выявлено многообразие теллуру-висмутовой минерализации, фиксирующейся в качестве самостоятельных минералов, представленных сульфосолями, теллуридами, оксидами и самородными формами выделения. Впервые для данных руд обнаружены такие минералы, как плюмботеллурит $PbTeO_3$, цервеллеит Ag_4TeS , ксиллингоит $Pb_3Bi_2S_6$ и неидентифицированный минерал с обобщенной формулой $PbAg_2Te$. Минералы теллуру-висмутового состава по отношению к главным рудным минералам характеризуются более поздней кристаллизацией в Ag-Te-Bi-сульфидную ассоциацию рудной стадии при температуре 280...150 °С. На основании полученных данных спрогнозированы перспективы добычи теллура и висмута из руд месторождений, аналогичных по вещественному составу с Малеевским месторождением и приуроченных к одноименному Зырянскому рудному узлу.

Ключевые слова: теллур, висмут, колчеданные руды, Восточный Казахстан, Рудный Алтай, месторождение Малеевское

Благодарности: Исследования выполнены в рамках Государственного задания «Наука № FSSWW-2023-0010».

Для цитирования: Николаева А.Н., Мазуров А.К. Теллуру-висмутовая минерализация в рудах Малеевского колчеданного месторождения (Восточный Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 233–250. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4636

UDC 53.08:553.21./24:553.046
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4636

Tellurium-bismuth mineralization in ores of the Maleevskoe pyrite deposit (Eastern Kazakhstan)

A.N. Nikolaeva✉, A.K. Mazurov

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉nikolaevaanastas759@gmail.com

Abstract. As it is known, Rudny Altai is a classic province of sulfide deposits, most of which were formed in paleo-island-arc geodynamic settings. Pyrite ores have a complex and diverse chemical composition, including a wide range of impurity elements, among which the metalloid tellurium and the metal bismuth still remain poorly studied. Based on the above, we investigated tellurium-bismuth mineralization in the sulfide ores of the Maleevskoe deposit, confined to the Zyryanovsky cluster of Rudny Altai. **Relevance.** The lack of information about the nature of the distribution and forms of occurrence of this type of rare minerals in the ores of pyrite deposits of Rudny Altai. The data obtained from this study will allow for more comprehensive processing and use of mineral resources. **Aim.** To characterize the material composition of ores; identify the features of the development of tellurium-bismuth mineralization and determine the conditions for its formation; assess the prospects for associated mining and extraction of tellurium with bismuth from the ores of sulfide deposits of Rudny Altai. **Object.** Tellurium-bismuth mineralization of sulfide ores of the deposit. **Methods.** Petrographic, mineragraphic and mineralogical analyses, scanning electron microscopy in combination with X-ray microanalysis and Raman spectroscopy. **Results.** The ores revealed a variety of tellurium-bismuth mineralization, which is recorded as independent minerals, represented by sulfosalts, tellurides, oxides, and native forms of isolation. Such minerals as plumbotellurite $PbTeO_3$, cervelleite Ag_4TeS , xilingoite $Pb_3Bi_2S_6$ and an unidentified mineral with the general formula $PbAg_2Te$ were discovered for these ores. Minerals of tellurium-bismuth composition in relation to the main ore minerals are characterized by later crystallization into the Ag-Te-Bi-sulfide association of the ore stage at a temperature of 280...150°C. Based on the data obtained, the authors predicted the prospects for tellurium and bismuth extraction from ores of deposits similar in material composition to the Maleevskoe deposit and confined to the ore cluster of the same name.

Keywords: tellurium, bismuth, pyrite ores, Eastern Kazakhstan, Rudny Altai, Maleevskoe deposit

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the State assignment «Science no FSSWW-2023-0010».

For citation: Nikolaeva A.N., Mazurov A.K. Tellurium-bismuth mineralization in the ores of the Maleevskoe pyrite deposit (Eastern Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 233–250. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4636

Введение

Рудный Алтай является одной из крупнейших колчеданосных провинций мира, в казахстанской ее части обнаружены наиболее крупные месторождения меди, свинца и цинка (Ридер-Сокольное, Тишинское, Зырянское, Малеевское, Белоусовское, Николаевское, Артемовское, Орловское и др.). Огромный вклад в изучение колчеданных месторождений Алтая внесли работы В.В. Авдониной, Д.Г. Ажгирея, В.Д. Баранова, Х.А. Беспяева, Н.Л. Бубличенко, А.А. Ганженко, Д.И. Горжевского, Б.А. Дьячкова, П.Ф. Иванкина, А.К. Каюпова, О.А. Ковриго, М.С. Козлова, И.В. Крейтер, В.С. Кузбнова, Н.М. Митряевой, В.А. Наумова, В.П. Нехорошева, И.В. Покровской, Э.С. Пономарева, В.И. Старостина, В.М. Чекалина, М.А. Юдовской, Г.Н. Щербы, Г.Ф. Яковлева, И.В. Гаськова и многих других.

Строение Рудного Алтая, по последним геологическим и геофизическим данным [1–14], представлено в следующем виде (с северо-востока на юго-запад): Белоубинско-Сарымсакты-Куртинская, Змеиногорско-Зырянско-Конденунская, Алейско-Ашалинская, Прииртышская и Иртыш-Фуюнская зоны. В пределах Змеиногорско-Зырянско-Конденунской зоны выделены Синюхинская и Ревнюхинская круговые рудоносные зоны. Ревнюхинская структура отделена от Синюхинской массивами поздних гранитоидов Вышеивановского и Орловско-Черемшанского массивов. В целом структура представляет собой Ревнюхинскую брахиантиклиналь, осложненную поперечными складками второго порядка – Подорловской, Пригородной и

Зырянской. В ядре обнажены доэмские сланцы, а крылья сложены вулканогенно-терригенными толщами эмса – раннего живета, в которых сформировалось большое количество колчеданных проявлений и месторождений, образующих такие рудные поля, как Греховское, Зырянское, Малеевско-Путинцевское, Боготыревско-Осочихинское и др.

Рудная минерализация в пределах рудного Алтая проявлялась в течение докембрийского, каледонского и герцинского циклов. Промышленные колчеданно-полиметаллические месторождения (с золотом и серебром) Малеевско-Путинцевского рудного поля сформировались в герцинском цикле позднеэфельского (малеевского) стратоевровня. Большинство исследователей (Г.Н. Щерба, Б.А. Дьячков, А.М. Мысник, Н.И. Стучевский, Н.П. Майорова и др.) считают, что развитие рудных объектов происходило в островодужной обстановке, сформированной на континентальной коре [6–17].

Малеевское месторождение известно с 1840 г., но промышленное значение получило в 1979 г. в связи с обнаружением Родниковой зоны, включающей более 70 % современных запасов месторождения. В изучении месторождения принимали участие Г.Н. Щерба, Х.А. Беспяев, Б.А. Дьячков, А.М. Мысник, Н.И. Стучевский, Г.Д. Ганженко и многие другие геологи производственных и научных организаций. Однако, несмотря на длительный период изучения месторождения, теллуризовисмутовая минерализация остается слабо изученной. В целях восполнения этого пробела нами было проведено данное научное исследование.

Материалы и методы исследования

Для изучения вещественного состава руд и пород использовались керновые и бороздовые пробы массой до трех килограммов, из которых были изготовлены шлифы, аншлифы и двуполированные пластины. Петрографический анализ проводился с целью изучения минерального состава и структурных особенностей исходных и метасоматически измененных пород на поляризационном микроскопе проходящего света Olympus BX53F. Для петрографических исследований было изготовлено более 40 прозрачных шлифов. С целью характеристики текстурно-структурных особенностей и вещественного состава руд было изготовлено около 100 полированных шлифов (аншлифов). Вначале их изучение проводилось на исследовательском микроскопе отраженного света Zeiss Imager 2m. Далее в целях детального освещения морфологии теллуру-висмутовой минерализации и ее взаимосвязи с другими минералами было проведено исследование аншлифов с использованием сканирующей электронной микроскопии на приборе Tescan Vega 3 SBU с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 50, позволяющим качественно оценить состав минералов, получить изображения поверхности руд с высоким пространственным разрешением (до 30 нм) и провести полуколичественное (качественное) определение элементов от Na до U с содержанием от 0,1 до 100 мас. %. С целью расшифровки условий рудообразования на месторождении особое значение было уделено термобарогеохимическому методу изучения флюидных (газово-жидких) включений. Крио- и термометрические исследования были проведены с помощью термокамеры THMSG-600 с программным обеспечением LinkSys-32 производства Linkam. Прибор позволяет выполнить измерение фазовых переходов температуры в интервале от –200 до +600 °С.

При помощи рамановской спектроскопии изучался состав газовой фазы флюидных включений в кварце. Исследования выполнены на спектрометре комбинационного рассеяния с конфокальным микроскопом DXR2 Raman Microscope фирмы Thermo Fisher с полупроводниковым детектором и твердотельным лазером с длиной волны 785 нм и мощностью 10 мВт. Диаметр сфокусированного лазерного луча составляет 0,9 мкм.

Геологическое строение

Как было отмечено выше, Малеевское месторождение приурочено к северо-западному флангу Малеевско-Путинцевской антиклинали (рис. 1, б), осложняющей северное замыкание Ревнюшинской структуры [13–17].

Месторождение сложено туфами и туфобрекчиями ревнюшинской свиты среднего девона, кремнисто-глинистыми, углисто-глинистыми, известко-

во-глинистыми аргиллитами с прослоями и линзами мелкозернистых песчаников и рифтогенных известняков маслянской свиты среднего девона, алевролитами, аргиллитами, песчаниками хамирской свиты верхнего девона. В северо-восточной части месторождения девонские образования перекрываются аргиллитами и песчаниками быковской и порфиритоидами ларихинской свит нижнего карбона. В ядре северной части Ревнюшинской структуры залегают кварцевые и кварц-полевошпатовые порфиры Зырянского верхнедевонского комплекса. В экзоконтакте массива порфиров залегают силообразные тела альбитофигов, относящиеся к этому же комплексу. На северо-западе структура ограничивается Щербнюшенским, а в южной части Парыгинским гранитоидными массивами Змеиногорского габбро-плагитогранит-гранитового комплекса средне-позднекарбонного комплекса [11, 12]. Руды месторождения представлены тремя межпластовыми залежами: на северо-востоке – Платовской, на юго-западе – Родниковой и в центре – Малеевской. Залежи включают 21 рудное тело лентовидной формы. Протяженность рудных тел по простиранию 50...500 м, по падению 20...100 м, и мощность 1...64 м. Главными рудными компонентами являются свинец, цинк и медь. Также в рудах отмечаются золото, серебро, кадмий, висмут, индий, селен, теллур, сурьма, мышьяк.

На протяжении длительного геологического развития породы рудного поля претерпели различные метаморфические изменения: региональный, динамометрический, контактовый и гидротермальный метаморфизм. В отличие от большинства месторождений Зырянского горнорудного района, локализованных в интенсивно дислоцированных породах западных ответвлений Северо-Восточной зоны смятия, месторождение Малеевское, с запада, севера и юга прорванное гранитоидными массивами Змеиногорского комплекса, слабо затронуто динамометаморфическими процессами. Но при этом за счет становления этого самого комплекса широко проявились процессы контактового метаморфизма. Руды, метасоматиты и вмещающие породы подверглись в различной степени ороговикованию, интенсивность которого возрастает по мере приближения к контакту с гранитоидами в северо-западном направлении [18–20]. Под рудными телами за пределами гидротермально-измененных пород и внутри них сохранились также целые блоки ороговикованных кремнистых алевролитов и песчаников. Наиболее развитыми роговоиковыми минералами пород являются биотит, кордиерит, андалузит, актинолит. Мощность ороговикованных пород достигает 150...250 м. В кровле надрудных порфиров практически по всем скважинам наблюдаются зоны скарнирования.

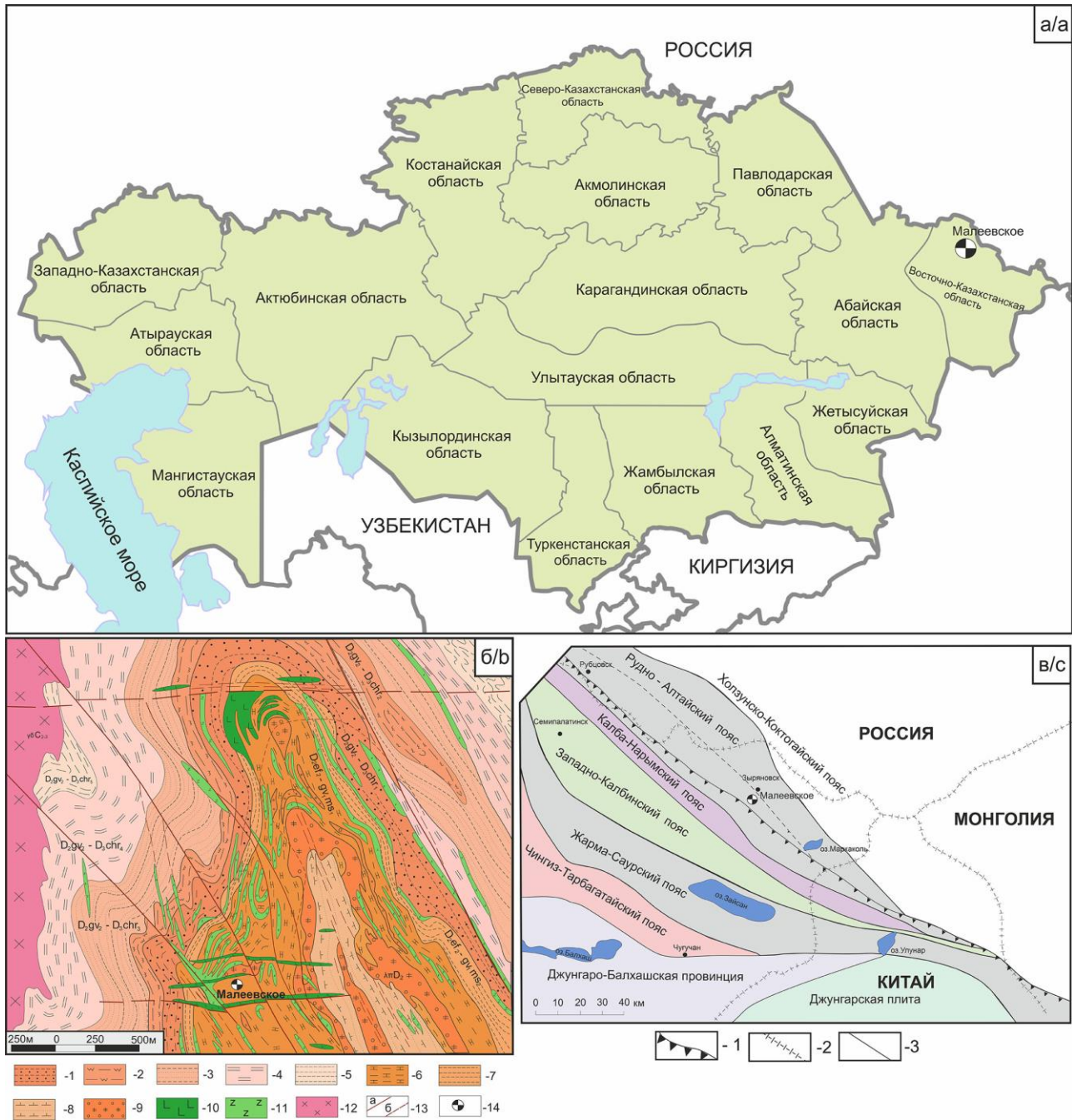


Рис. 1. а) географическое расположение месторождения; б) геологическая карта Малеевско-Путинцевского рудного поля [5]. Условные обозначения: 1–5 – Средний девон. Хамирская свита: 1 – песчаники; 2 – аргиллиты; 3 – глины, алевролиты, песчаники; 4 – глины, алевролиты; 5 – песчаники, аргиллиты; 6, 7 – Средний девон. Маслянская свита: 6 – алевролиты; 7 – известковый алевролит; 8–11 – Субвулканические среднедевонские образования: 8 – туфопесчаники; 9 – порфиры; 10 – габбро, габбро-диориты; 11 – габбро-порфиры; 12 – Интрузивные образования: плагиограниты, гранодиориты; 13 – линии разломов; 14 – месторождение Малеевское; в) схема размещения рудных поясов Большого Алтая. Условные обозначения: 1 – Иртыш-Маркакольский глубинный разлом, 2 – государственные границы, 3 – границы металлогенических поясов

Fig. 1. a) geographical location of the deposit; b) geological map of the Maleevsko-Putincevskoye ore field [5]. Legend: 1–5 – Middle Devonian. Khamir Formation: 1 – sandstones; 2 – mudstones; 3 – clays, siltstones, sandstones; 4 – clays, siltstones; 5 – sandstones, mudstones; 6, 7 – Middle Devonian. Maslyanskaya formation: 6 – siltstones; 7 – calcareous siltstone; 8–11 – Subvolcanic Middle Devonian formations: 8 – tuff sandstones; 9 – porphyry; 10 – gabbro, gabbro-diorites; 11 – gabbro-porphry; 12 – Intrusive formations: plagiogranites, granodiorites; 13 – fault line; 14 – Maleevskoe deposit; c) layout of the Great Altai ore belts. Legend: 1 – Irtysh-Markakol deep fault, 2 – external boundary, 3 – boundary of metallogenic belts

В преобладающем объеме в рудных зонах отмечаются кварциты и микрокварциты, образованные в результате метаморфизма песчаников (рис. 2, а). В пределах рудных залежей формируется парагенетическая ассоциация метаморфогенных сульфидов и сульфосолей.

Метасоматические образования широко развиты по зонам, контролируемым секущими и межслоевыми разрывными структурами. Обычно это жильобразные или штокверковые тела измененных пород, представленные пропилитами и березитоидами [18–23]. Оруденение при этом приурочено пространственно к березитоидам, относящимся к стадии выщелачивания.

Формация пропилитов (дорудных метасоматитов) представлена скрыто-мелко-тонкозернистыми

породами с присутствием такого характерного минерала для данной группы, как хлорит, и малым содержанием кальцита, кварца и пирита. Протолитами являются эффузивные породы основного и кислого состава. Для пород характерны массивные, плотные, полосчатые или пятнистые текстуры. При петрографическом описании отмечаются лепидогранобластовые микроструктуры с элементами порфиробластовой. Обычно большая часть объема пропилита характеризуется перекристаллизованной массой, сложенной кварц-хлоритовыми или кальцит-хлоритовыми агрегатами. На фоне мелкозернистой массы нередко отмечаются порфиробласты сульфида размером в диапазоне 0,1...0,5 мм, находящиеся весьма часто в ассоциации с кальцитом.

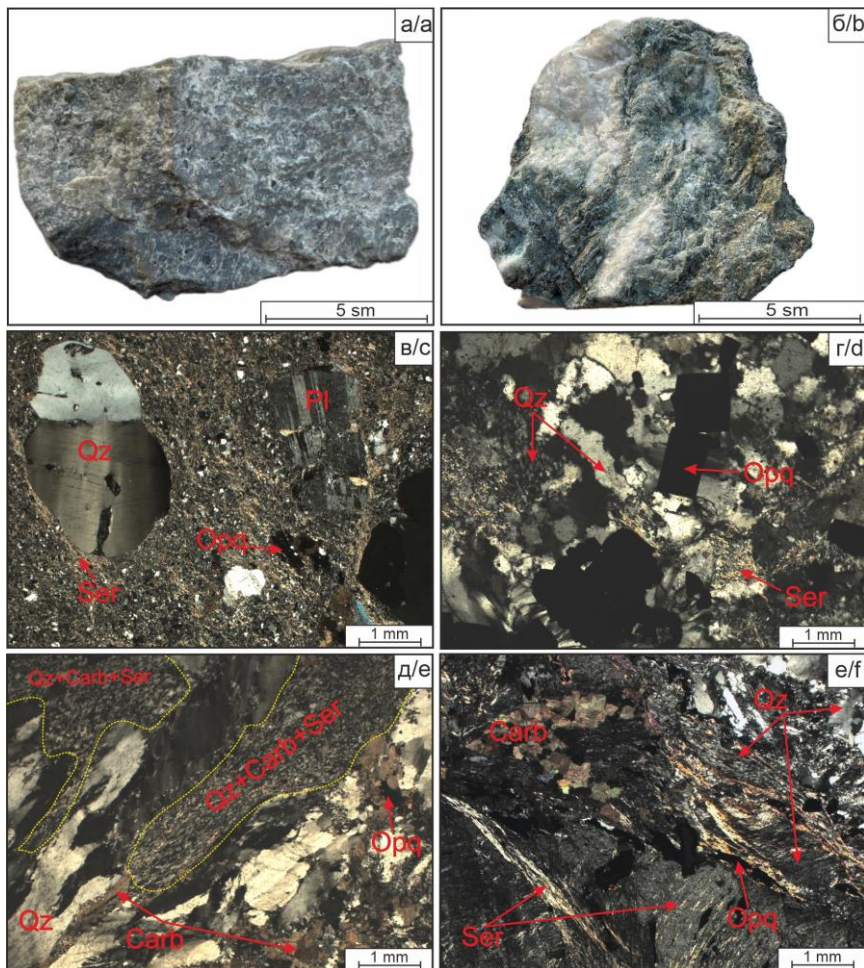


Рис. 2. а) кварцит, образованный в результате метаморфизма песчаников; б) кальцит-серицит-кварцевый метасоматит (березитоида); в–е) метасоматически-измененные породы в шлифах на поляризационном микроскопе в скрещенных николях: в) бластопорфировые включения кварца в основной массе серицит-кварцевого метасоматита по риолиту; г) обрастание изометричных зерен рудного минерала пламенивидным кварцем; д) фрагмент однонаправленных прожилков кварцевого состава с пламенивидной и гетеробластовой микроструктурой; е) зона смятия, проявленная в результате процессов регионального динамометаморфизма

Fig. 2. a) quartzite, formed as a result of sandstone metamorphism; b) calcite-sericite-quartz metasomatite (beresitoid); c–e) metasomatically altered rocks in thin sections on a polarizing microscope in crossed nicols: c) blastoporphyritic quartz inclusions in the groundmass of sericite-quartz metasomatite after rhyolite; d) fouling of isometric grains of ore mineral with flame-like quartz; e) fragment of unidirectional veinlets of quartz composition with flame-like and heteroblastic microstructure; e) shear zone, manifested as a result of processes of regional dynamometamorphism

Основными минералами группы березитоидов (предрудных метасоматитов) является кварц, серицит, кальцит, мусковит, пирит. При этом наиболее распространенным продуктом является светлая слюда (мусковит и его мелкочешуйчатая разновидность, представленная серицитом). Породы мелкозернистые, за счет неравномерного распределения кварца, пирита и серицита характеризуют пятнистую текстуру. В шлифах, помимо лепидо-граногетеробластовых микроструктур, спорадически наблюдаются гломеробластовые (срастания сульфидов в виде порфиробластов и пламенеvidных агрегатов кварца (рис. 2, в)) и бластопорфиновые (обособленные округлые порфиновые агрегаты кварца (рис. 2, г)). Рудная минерализация характеризуется изометричными зернами пирита размером в среднем 0,15 мм, создающими неоднократно гнездовые скопления. Также сульфид спорадически представлен крупными зернами размером до 25 мм. Зачастую в шлифах встречаются прожилки (рис. 2, д) и просечки кварцевого и кальцит-кварцевого состава, характеризующиеся неравномерной мощностью и линейностью (прерывистостью по длине). В прожилках кварц образует гетерогранобластовую или пламенеvidную микроструктуру. На основании разнообразия форм выделения основных минералов группы березитоидов предположено, что ее формирование протекало не в одну стадию. Также сделан вывод, что по геологическим масштабам времени предрудные метасоматиты образуются раньше руд.

Результаты исследования и их обсуждение **Текстурно-структурные особенности руд** **и их вещественный состав**

Руды Малеевского месторождения формировались под влиянием многих факторов: особенностей кристаллизации рудного вещества, седиментации, диагенеза, а также последующих процессов внедрения гидротерм (часто взрывчатого характера), последующего метасоматоза и тектонической обстановки региона. В результате чего рудные залежи характеризуются главным образом рудами сплошного (сливного) и вкрапленного типа. Верхняя граница оруденения в большинстве случаев четкая и определяется контрастностью сплошных сульфидов. В редких случаях над сплошными рудами отмечаются маломощные вкрапленные ореолы сульфидизации [5]. Основные качественные различия типов руд отмечаются в количественных соотношениях главных ценных компонентов. Главные рудные минералы месторождения представлены пиритом, сфалеритом, халькопиритом и галенитом, второстепенные – арсенопиритом, тетраэдритом, молибденитом. Часть минералов цветных металлов находится в очень тесных взаимных срастаниях друг с другом.

По текстурно-структурным особенностям колчеданные руды были разделены нами на сплошные (сливные) и вкрапленные.

Сплошной (сливной) тип руд доминирует на месторождении (рис. 3, а–д), а за счет присутствия нескольких ценных компонентов (Pb, Zn, Cu) руды данного типа являются полиметаллическими.

Данный тип руды отличается наибольшим разнообразием текстурно-структурных параметров, чем вкрапленные. Для них характерны массивная, слабослоистая, метасоматически-полосчатая и пятнистая текстуры. Массивная текстура является наиболее распространенной и характеризуется однородным строением с практически равномерным распределением в пространстве рудных минералов. Часто данная текстура сочетается с пятнистой, которая разнообразна по своим морфологическим особенностям, а также сложна по минеральному составу и деталям строения. Для рудных минералов встречаются такие структуры, как гипидио-аллотрио-идиоморфнозернистые. Микроструктуры сплошных руд характеризуются как субграфическая (тесное срастание галенита, сфалерита и халькопирита), эмульсионновидная, интерстициальная, псевдоморфная, реликтовая, обломочная, колломорфная, цементационная (цементация зерен пирита халькопиритом (рис. 3, а) и сфалеритом) и структура тесного срастания. По крупности зерен структура минеральных образований тяготеет к мелко-среднезернистой (рис. 3, б). Размеры минеральных агрегатов варьируют в диапазоне 0,01...1,65 мм, нередко отмечаются включения пирита величиной до 4 мм. Морфология зерен преимущественно изометричная, реже неправильная.

В целом сплошные руды колчеданного типа отличаются высоким содержанием сульфидов – до 90...95 % объема от основной массы (рис. 3, а–в). Распределение минералов в руде неравномерное. Главной минеральной ассоциацией сульфидов является *пирит±халькопирит*, суммарно составляющие 70...85 % объема рудной массы.

Обычно в составе сульфидов пирит и халькопирит находятся в равных количественных соотношениях, но нередко встречается преобладание халькопирита, который может занимать до 55...65 % объема руды (рис. 3, а), а иногда, наоборот, пирита. Менее распространены такие сульфиды, как галенит и сфалерит, намного реже встречаются тетраэдрит и арсенопирит.

Халькопирит обычно является «цементатом» других сульфидов и характеризует, в свою очередь, цементационную микроструктуру (рис. 3, б), часто заполняет трещины пирита, который представлен изометричными зернами кубического, пентагондодикаэдрического, реже октаэдрического габитусов. Обычно в руде встречаются неравномерные скопления зерен пирита, нередко раздробленных или трещиноватых. Зачастую наблюдается, что данные трещины

«залечивает» халькопирит (рис. 3, д). Спорадически в пирите диагностируются не только включения халькопирита, но и сфалерита, образующие, в свою очередь, псевдоморфозы. Сульфид цинка в сплошных рудах представлен тонковкрапленными ксеноморфными выделениями в халькопирите (рис. 3, в). Галенит, присутствующий в качестве мелких включений, является поздним минералом и накладывается на более ранние ассоциации сульфидов (рис. 3, в), представленные сфалеритом и халькопиритом. Нередко сульфид свинца заполняет трещины или пустоты в пирите, тем самым образуя неправильные и проволочковидные формы выделения. От общего объема рудной массы на его долю приходится 1...5%. Арсениопирит в рудах характеризуется двумя генерациями, представленными зернистыми (рис. 3, з) и эмульсионными формами выделения. Второй тип является более распространенным. Минерал находится в парагенетической ассоциации с пиритом и халькопиритом. Тетраэдрит, развивающийся обычно по пустотам и трещинам в пирите с халькопиритом (рис. 3, з), спорадически находится в парагенетической ассоциации с галенитом, образуя неправильные выделения размером до 85 мкм. Диагностированный молибденит имеет малую долю распространения в рудах, характеризуется неправильными формами выделения и развивается по пустотам в пирите с халькопиритом или же заполняет промежутки между ними.

Нерудные минералы в сплошных рудах представлены кварцем, баритом и кальцитом. Их количество не превышает 5% объема руд. Обычно преобладает кварц, представленный в виде просечек, не выдержанных по мощности, или изометричных и неправильных зерен размером от 0,05 до 0,3 мм.

При изучении руд на сканирующем электронном микроскопе в качестве редких и очень редких минералов в сплошных рудах были диагностированы: самородное золото Au, электрум AuAg, рутил TiO_2 , ильменит $FeTiO_3$, касситерит SnO_2 , циркон $ZrSiO_4$, фаматинит Cu_3SbS_4 , фрейбергит $Ag_6Cu_4Fe_2Sb_4S_{13}$, изоклейкит $(Pb_{27}(Cu,Fe)_2(Sb,Bi)_{19}S_{57})$, самородный висмут Bi, строкаит Bi_3TeS_2 , гессит Ag_2Te , ксилингоит $Pb_3Bi_2S_6$, монацит $(La, Ce, Nd) PO_4$ и рабдофан $(Ce, La) PO_4 \cdot nH_2O$.

Вкрапленные руды характеризуются преобладанием нерудного вещества над рудным: до 40...45% сложены сульфидами и до 55...60% нерудными минералами (рис. 3, е–з). Сульфидная минерализация представлена сфалеритом, пиритом, халькопиритом и галенитом. Распределение их крайне неравномерное. Среди сульфидов преобладают пирит и сфалерит, суммарно занимая до 70...85% объема рудной массы. Нерудные минералы представлены кварцем и кальцитом. Преобладающим минералом при этом является кварц (рис. 3, е), слагающий не только основную массу, но и зачастую образующий просечки и прожилки.

Для руд данного типа отмечается вкрапленная, массивная, полосчато-слоистая и пятнистая текстуры. Вкрапленная и пятнистая текстуры являются доминирующими, характеризуются неправильными и прерывистыми скоплениями рудных минералов среди массы нерудных (рис. 3, е, ж). Обычно с данными текстурами совмещается также массивная, представленная неоднородным строением, выраженный в неравномерном распределении в пространстве рудообразующих минералов. По крупности зерен структура минеральных образований размерами от 0,01 до 2 мм характеризуется мелко-среднезернистой. Преобладающие структуры в рудах неравномерно- и равномернозернистая, обломочная, а также структура дробления. Неоднократно наблюдаются вкрапленные руды с характерной катакlastической (брекчиевой) структурой, характеризующейся обломками раздробленного пиритового агрегата, сцементированного кварцем (рис. 3, е, ж) и кальцитом. Микроструктуры представлены субграфической, цементационной, решетчатой, псевдоморфной и эмульсионной.

Пирит во вкрапленных рудах представлен эвгедральными зернами кубического, пентагондодекаэдрического, реже октаэдрического габитуса. Зачастую по зернам сульфида наблюдаются следы динамометаморфизма, характеризующиеся разрушением вкрапленников и образованием систем разноориентированных трещин (рис. 3, ж). Включения пирита обнаружены как в свободном виде в кварце, так и в сростании с халькопиритом, сфалеритом и галенитом. Во втором случае обычно сфалерит и халькопирит цементируют зерна пирита или залечивают трещины и пустоты в нем. В меньшем объеме, по сравнению с пиритом, во вкрапленных рудах диагностированы халькопирит и сфалерит, представленные колломорфными и неправильными выделениями. Нередко два этих сульфида образуют парагенетическую ассоциацию (рис. 3, з), наблюдаются случаи наложения эмульсионновидного халькопирита по сфалериту и также сфалерита по халькопириту. Достаточно часто сфалерит и халькопирит образуют структуру тесного сростания (рис. 3, в). В парагенетической ассоциации с данными сульфидами в малом объеме отмечается галенит, характеризующийся ксеноморфными агрегатами. В виде единичных включений в рудах диагностирован тетраэдрит, представленный малыми по размерам и неправильными по форме включениями. При изучении руд на сканирующем электронном микроскопе в качестве редких минералов во вкрапленных рудах были диагностированы: самородное золото Au, электрум AuAg, рутил TiO_2 , циркон $ZrSiO_4$, монацит $(La, Ce, Nd) PO_4$, рабдофан $(Ce, La) PO_4 \cdot nH_2O$, гессит Ag_2Te , цервеллеит Ag_4TeS , алтаит $PbTe$, пломботеллуриит $PbTeO_3$, барит $BaSO_4$.

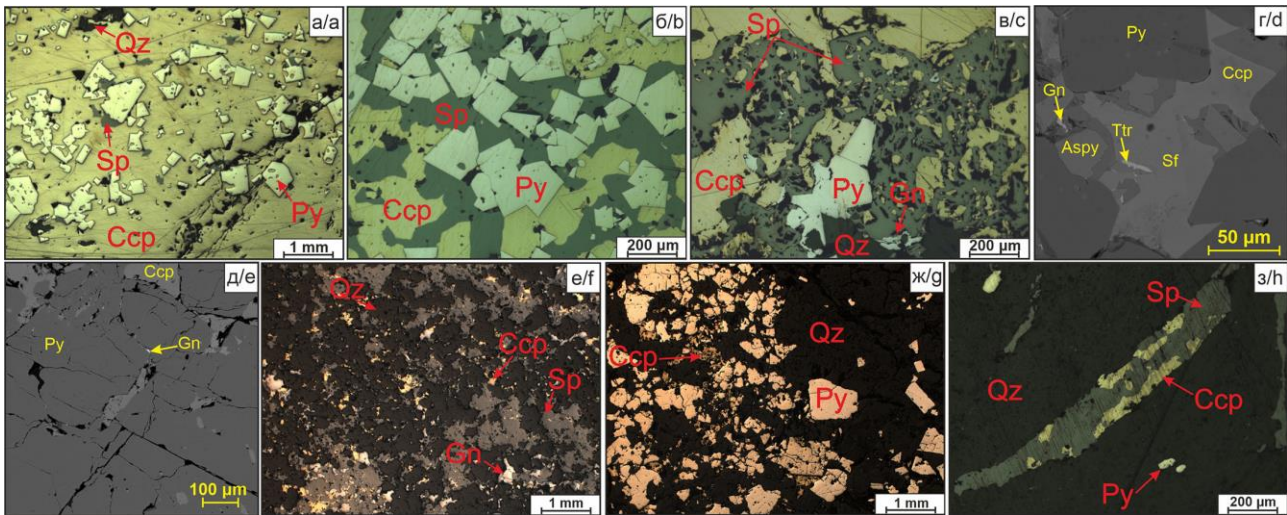


Рис. 3. а–д) микрофотографии сплошных руд: а) цементация халькопиритом зерен пирита; б) изометричные зерна пирита, сцементированные сфалерит-халькопиритовой массой; в) структура тесного срастания сфалерита и халькопирита; г) включения вытянутого зерна тетраэдрита и неправильных агрегатов арсенопирита; д) заполнение трещин в пирите халькопиритом; е–з) вкрапленные руды: е) фрагмент аншлифа, демонстрирующий преобладание нерудного материала над рудным; ж) катаклазированные зерна пирита в основной массе; з) парагенетическая ассоциация сфалерита и халькопирита

Fig. 3. a–d) microphotographs of solid ores: a) cementation of pyrite grains with chalcopyrite; b) isometric pyrite grains cemented by sphalerite-chalcopyrite mass; c) structure of close intergrowth of sphalerite and chalcopyrite; d) inclusions of elongated tetrahedrite grains and irregular arsenopyrite aggregates; e) filling of cracks in pyrite with chalcopyrite; e–h) disseminated ores: e) polished section fragment demonstrating the predominance of non-metallic material over ore material; g) cataclased pyrite grains in the groundmass; h) paragenetic association of sphalerite and chalcopyrite

Таблица 1. Минеральный состав первичных руд месторождения Малеевское

Table 1. Mineral composition of primary ores of the Maleevskoe deposit

| Главные Main | Второстепенные Minor | Редкие Rare | Очень редкие Very rare |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рудные минералы/Ore minerals | | | |
| Пирит/Pyrite FeS Халькопирит Chalcopyrite CuFeS Сфалерит/Sphalerite ZnS Галенит/Galena PbS | Рутил/Rutile TiO ₂ Арсенопирит/Arsenopyrite FeAsS Молибденит/Molybdenite MoS ₂ Тетраэдрит/Tetrahedrite (Cu, Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃ | Золото/Gold Au Электрум/Electrum AuAg Гессит/Hessite Ag ₂ Te Алтаит/Altaite PbTe Ильменит/Ilmenite FeTiO ₃ Касситерит/Cassiterite SnO ₂ Изоклейкит/Izoklakeite (Pb ₂₇ (Cu, Fe) ₂ (Sb, Bi) ₁₉ S ₅₇) Самородный висмут Native bismuth Bi Сстрокаит/Sztrokayite Bi ₃ TeS ₂ | Циркон/Zircon ZrSiO ₄ Фаматинит/Famatinite Cu ₃ SbS ₄ Фрейбергит/Freybergite Ag ₆ Cu ₄ Fe ₂ Sb ₄ S ₁₃ Цервеллеит/Cervellite* Ag ₄ TeS Ксилингоит/Xilingoite* Pb ₃ Bi ₂ S ₆ Плюмботеллуриит Plumbotellurite* PbTeO ₃ Фаза PbAg ₂ Te/PbAg ₂ Te phase* |
| Нерудные минералы/Nonmetallic minerals | | | |
| Кварц/Quartz SiO ₂ Серицит/Sericite KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ Кальцит/Calcite CaCO ₃ | Барит/Barite BaSO ₄ | Монацит/Monazite (La, Ce, Nd) PO ₄ Рабдофан/Rhabdofan (Ce, La) PO ₄ *H ₂ O | Цеолиты/Zeolites Me _{2/n} OAl ₂ O ₃ xSiO ₂ yH ₂ O Угlistое вещество (кероген) Carbonaceous matter (kerogen) |

Примечание: * – минералы, диагностированные впервые. Формулы соответствуют теоретическому составу минералов.
 Note: * – minerals diagnosed for the first time. The formulas correspond to the theoretical composition of minerals.

Оруденение Малеевского месторождения эпигенетическое, гидротермально-метасоматическое. Руды характеризуются своей сложностью и поликомпонентностью, за счет чего в них выделены главные, второстепенные, редкие и очень редкие минералы. Минеральный состав первичных (гипогенных) руд представлен в табл. 1.

Теллуру-висмутовая минерализация

В колчеданных рудах месторождения Малеевское в качестве редких и очень редких минералов (табл. 1) выявлен обширный список минералов теллуру-висмутового состава, среди которых отмечаются изоклейкит (Pb₂₇(Cu, Fe)₂(Sb, Bi)₁₉S₅₇), алтаит (PbTe), самородный висмут (Bi), гессит (Ag₂Te), сстрокаит (Bi₃TeS₂) [20, 23, 24].

Таблица 2. Усредненные формульные коэффициенты теллуру-висмутовых минералов месторождения Малеевское (где n – количество спектров, по которым было высчитано среднее значение)

Table 2. Averaged formula coefficients of tellurium-bismuth minerals from the Maleevskoe deposit (where n is the number of spectra from which the average value was calculated)

| Минерал и его теоретическая формула Mineral and its theoretical formula | n | Te | Bi | S | Cu | Fe | Sb | O | Ag | Pb |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
| Алтаит/Altaite (PbTe) | 10 | 1,00 | – | – | – | – | – | – | – | 0,97 |
| Плюмботеллурид/Plumbotellurite (PbTeO ₃) | 10 | 1,00 | – | – | – | – | – | 2,82 | – | 0,99 |
| Гессит/Hessite (Ag ₂ Te) | 10 | 1,00 | – | – | – | – | – | – | 1,98 | – |
| Цервеллеит/Cervellite (Ag ₄ TeS) | 10 | 1,06 | – | 1,00 | – | – | – | – | 4,21 | – |
| Сстрокаит/Sztrokayite (Bi ₃ TeS ₂) | 10 | 1,12 | 3,17 | 2,00 | – | – | – | – | – | – |
| Ксилингоит/Xilingoite (Pb ₃ Bi ₂ S ₆) | 10 | – | 2,09 | 6,00 | – | – | – | – | – | 3,18 |
| Изоклейкит/Izoklakeite (Pb ₂₇ (Cu,Fe) ₂ (Sb,Bi) ₁₉ S ₅₇) | 10 | – | 7,94 | 57,00 | 1,54 | 0,49 | 10,99 | – | – | 27,14 |
| Минеральная фаза/Mineral phase (Pb Ag ₂ Te) | 5 | 1,00 | – | – | – | – | – | – | 1,52 | 0,96 |

Впервые в рудах нами были обнаружены такие минералы, как цервеллеит (Ag₄TeS), плюмботеллурид (PbTeO₃), ксилингоит (Pb₃Bi₂S₆), а также неидентифицированный минерал с обобщенной минеральной формулой PbAg₂Te. В табл. 2 представлены усредненные формульные коэффициенты минералов, которые рассчитаны по химическому составу, определенному с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega3 Tescan с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 50.

До 63,6 % объема Te-Bi минерализации, представленной изоклейкитом, самородным висмутом, сстрокаитом, гесситом, ксилингоитом и минеральной фазой PbAg₂Te, приурочено к сплошному типу оруденения. Вкрапленный тип оруденения содержит в себе до 36,4 % выявленных минеральных агрегатов Te-Bi состава, представленных гесситом, цервеллеитом, алтаитом и плюмботеллуридом. Для минералов отмечается многообразие форм их выделения, а также общее сходство – приуроченность к сульфидным минералам, в преобладающем объеме к пириту и халькопириту [25–35].

Изоклейкит (Pb₂₇(Cu, Fe)₂(Sb, Bi)₁₉S₅₇) является первым по распространенности минералом Te-Bi минерализации, относится к минеральному виду сурьмяно-висмутых сульфосолей свинца с соотношениями Bi/Sb в составе близкими к единице. Концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах, мас. %: Pb – 52,76...53,36; S – 16,98...17,45; Bi – 15,13...15,93; Sb – 12,51...12,73; Cu – 0,78...1,01; Fe – 0,15...0,55 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Pb – 52,99 %, S – 17,31 %, Bi – 15,84 %, Sb – 12,69 %, Cu – 0,96 %, Fe – 0,21 %. В качестве примеси отмечаются Ag (0,9...5,85 %), Zn (до 0,4...1,44 %) и единично Se (0,77...0,98 %). Изоклейкит диагностирован в сплошных рудах в виде вытянутых агрегатов неправильных форм с соотношением длины и ширины 1,5:1 или 2:1, где длина варьирует от 15 до 150 мкм, при этом средний размер составляет 100 мкм. Обычно минерал кристаллизуется в пустотах халькопирит-

пиритовой и халькопирит-сфалерит-пиритовой массы (рис. 4, а), а также развивается в виде эмульсионных включений по тетраэдриту, при этом в последнем случае происходит распад твердого раствора. При данных обстоятельствах его агрегаты неправильных форм и уплощенные. Помимо обособленных выделений изоклейкита, отмечается его парагенезис с тетраэдритом, фрейбергитом, галенитом, а также с самородным висмутом. Ассоциация *изоклейкит+фрейбергит+галенит+тетраэдрит* встречается весьма редко. Обычно фрейбергит, галенит и изоклейкит образуют неправильные сростания размером 70...100 мкм, приуроченные к трещинам и пустотам в пирите. В тесном парагенезисе с изоклейкитом также наблюдается самородный висмут, характеризующий прорастание сульфосоли свинца [24]. В данном случае висмут представлен в виде ламелевидных включений в изоклейките, размер которого составляет 40...60 мкм.

Самородный висмут (Bi), являющийся вторым минералом по распространенности среди Te-Bi минерализации, приурочен исключительно к сплошному типу оруденения. Самородный металл сложен на 96,56...100 % Bi, в качестве примесей в редких случаях отмечаются следы Sb, достигающие в объеме 3,44 %. Так как минерал диагностирован в тесном парагенезисе с изоклейкитом, это и объясняет примесь сурьмы. Агрегаты минерала достаточно плотные, образуют ламели и неравномерные графические вкрапления (вкрапления) в изоклейките (рис. 4, б). Присутствие самородного висмута в изоклейките можно интерпретировать как распад твердого раствора. Кристаллическая структура их достаточно схожа, поэтому по сростанию данных минералов можно судить не только о распаде и замещении, но и об одновременном образовании простой временной последовательности самородного висмута и изоклейкита. Парагенетическая ассоциация упомянутых минералов приурочена к матрице пирита, арсенопирита и халькопирита. Спорадически также отмечается парагенетическая ассоциация *самородный висмут+изоклейкит+*

фрейбергит+тетраэдрит. Сконцентрированы данные образования обычно в пустотах пирита, арсенопирита, реже халькопирита или в интерстициях между данными сульфидами.

Гессит (Ag_2Te) – третий по распространенности минерал среди теллуру-висмутовой минерализации. Обнаружен в рудах как сплошного типа, так и вкрапленного, при этом в последнем наблюдается в большем объеме. Концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах, мас. %: Ag – 61,25...63,00; Te – 36,43...37,99 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Ag – 62,84 %, Te – 37,16 %. В качестве примеси спорадически отмечается Pb в объеме 0,39...0,67 %. Обычно теллурид серебра представлен зернистыми, угловатыми агрегатами неправильных форм, заключенными в пустотах и трещинах халькопирита (рис. 4, в) и пирита, иногда отмечается частичное заполнение гесситом границ данных минералов. Размер микророзерен в среднем составляет 5...9 мкм. Часто теллурид серебра находится в парагенетической ассоциации с галенитом, за счет чего наблюдаются их различные формы сростания. Как известно [26, 27], данный халькогенид обычно формируется в результате гидротермальных низкотемпературных процессов на заключительных стадиях рудообразования. Приуроченность этого минерала к контактовым зонам пирита с халькопиритом и трещинам подтверждает данное положение и свидетельствует о его поздней кристаллизации.

Алтаит ($PbTe$) является четвертым по распространенности минералом среди Te-Bi минерализации в рудах месторождения, диагностирован исключительно во вкрапленном типе оруденения. Минерал представлен теллуридом свинца из группы галенита, формирующимся в условиях гидротермального среднетемпературного процесса минералообразования в качестве позднего (послесульфидного) минерала. Концентрации главных минералообразующих элементов в алтаите изменяются в следующих пределах, мас. %: Pb – 60,23...62,18; Te – 36,03...39,44 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Pb – 61,89 %, Te – 38,11 %. Среди примесей спорадически отмечается Ag в количестве 1,39 %, а также Fe – 0,83 %. Минералами-хозяевами алтаита являются пирит (рис. 4, з) и халькопирит. При этом сам теллурид свинца обычно выполняет пустоты и микротрещины. Алтаит имеет неправильные угловатые формы зерен размером 0,5...1,5 мкм. Часто наблюдается парагенетическая связь данного минерала с гесситом (Ag_2Te), что свидетельствует о принадлежности их к общей минеральной ассоциации.

Сстрокаит (Bi_3TeS_2), сложный халькогенид висмута и теллура группы тетрадимита, является пятым по распространенности минералом среди

Te-Bi минерализации, выявленным исключительно в рудах сплошного типа. Концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах, мас. %: Pb – 75,66...77,03; Te – 14,77...16,71; S – 6,52...7,88 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Pb – 76,58 %, Te – 15,59 %, S – 7,83 %. В качестве примесей диагностирован Se в количестве 1...2,03 %, а также Cu – 1...1,43 %. Более распространенными формами выделения являются уплощенные проволочковидные, образованные в результате заполнения трещин в пирите (рис. 4, д) и халькопирите, а также промежутков между данными минералами. Данные агрегаты достаточно уплощенные за счет стенок самих трещин. Чаще всего они частично заполняют пустоты, в результате чего не продолжительны по длине – от 4 до 10 мкм. Зерна неправильных и угловатых форм выявлены в меньшем объеме и обычно диагностируются по пустотам в халькопирите или по его периферии. Размер агрегатов варьирует в пределах 2,3...5,8 мкм. Зачастую отмечаются скопления неправильных агрегатов строкаита в халькопирите и на границе халькопирита с кварцем.

Цервеллеит (Ag_4TeS) является шестым по распространенности минералом. Благороднометалльный теллурид отмечается исключительно в рудах вкрапленного типа, где имеет весьма малую распространенность. Концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах, мас. %: Ag – 71,87...73,14; Te – 21,48...22,01; S – 4,76...5,56 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Ag – 72,99 %, Te – 21,59 %; S – 5,42 %. В качестве примеси спорадически фиксируется Pb в объеме до 0,32...0,45 %. Цервеллеит представлен вытянутыми, слабопрямоугольными, амебоподобными, угловатыми зернами, приуроченными к пустотам и трещинам в пирите и халькопирите (рис. 4, е). При этом в пирите обычно отмечаются неравномерные скопления агрегатов данного минерала, а в халькопирите исключительно обособленные зерна. Размер включений варьирует в диапазоне 1,5...3,7 мкм. Приуроченность агрегатов данного минерала к пустотам и трещинам указывает на его позднюю кристаллизацию и, следовательно, приуроченность к более поздним стадиям рудообразования.

Ксилингоит ($Pb_3Bi_2S_6$) является седьмым минералом по распространенности среди Te-Bi минерализации, отмечается исключительно в сплошных рудах. Концентрации главных минералообразующих элементов сульфовисмута свинца изменяются в следующих пределах, мас. %: Pb – 50,29...51,38; Bi – 33,16...34,24; S – 14,07...15,60 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Pb – 50,46 %, Bi – 33,93 %, S – 15,62 %. В качестве при-

меси единожды диагностирован Se в объеме 0,98 %. Обычно данный минерал заполняет трещины и пустоты в пирите и халькопирите или их интерстиции (рис. 4, ж). Агрегаты его анизометричные и уплощенные. Часто минерал заполняет частично пустое пространство, тем самым имеет неровные рваные края. Размер агрегатов в среднем составляет 35...55 мкм. Спорадически отмечается парагенетическая связь ксилингоита с изоклейки-том. На основании того, что сульфовисмут свинца формировался по пустотам и трещинам сделан вывод о кристаллизации его в более позднюю стадию образования по отношению к минералам-хозяевам.

Выявленный **плюмботеллури-т (PbTeO₃)** представлен в виде псевдоморфозы по алтаиту. Минерал слабо распространен во вкрапленных рудах. Концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах, мас. %: Pb – 53,42...54,67; Te – 33,01...34,01; O – 11,05...12,51 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Pb – 54,13 %, Te – 33,33 %, O – 12,54 %. Примесей в минерале не обнаружено. Плюмботеллури-т диагностирован в виде неправильных образований, приуроченных к таким минералам, как пирит и реже рутил. В рутиле, заключенном в пирите, минерал диагностируется обычно по его периферии в виде неправильных зерен размером до 2,6 мкм. Второй вариант отложения теллуридного минерала – заполнение пустот и трещин в пирите (рис. 4, з).

рал слабо распространен во вкрапленных рудах. Концентрации главных минералообразующих элементов изменяются в следующих пределах, мас. %: Pb – 53,42...54,67; Te – 33,01...34,01; O – 11,05...12,51 при теоретическом составе минерала [25] согласно формуле: Pb – 54,13 %, Te – 33,33 %, O – 12,54 %. Примесей в минерале не обнаружено. Плюмботеллури-т диагностирован в виде неправильных образований, приуроченных к таким минералам, как пирит и реже рутил. В рутиле, заключенном в пирите, минерал диагностируется обычно по его периферии в виде неправильных зерен размером до 2,6 мкм. Второй вариант отложения теллуридного минерала – заполнение пустот и трещин в пирите (рис. 4, з).

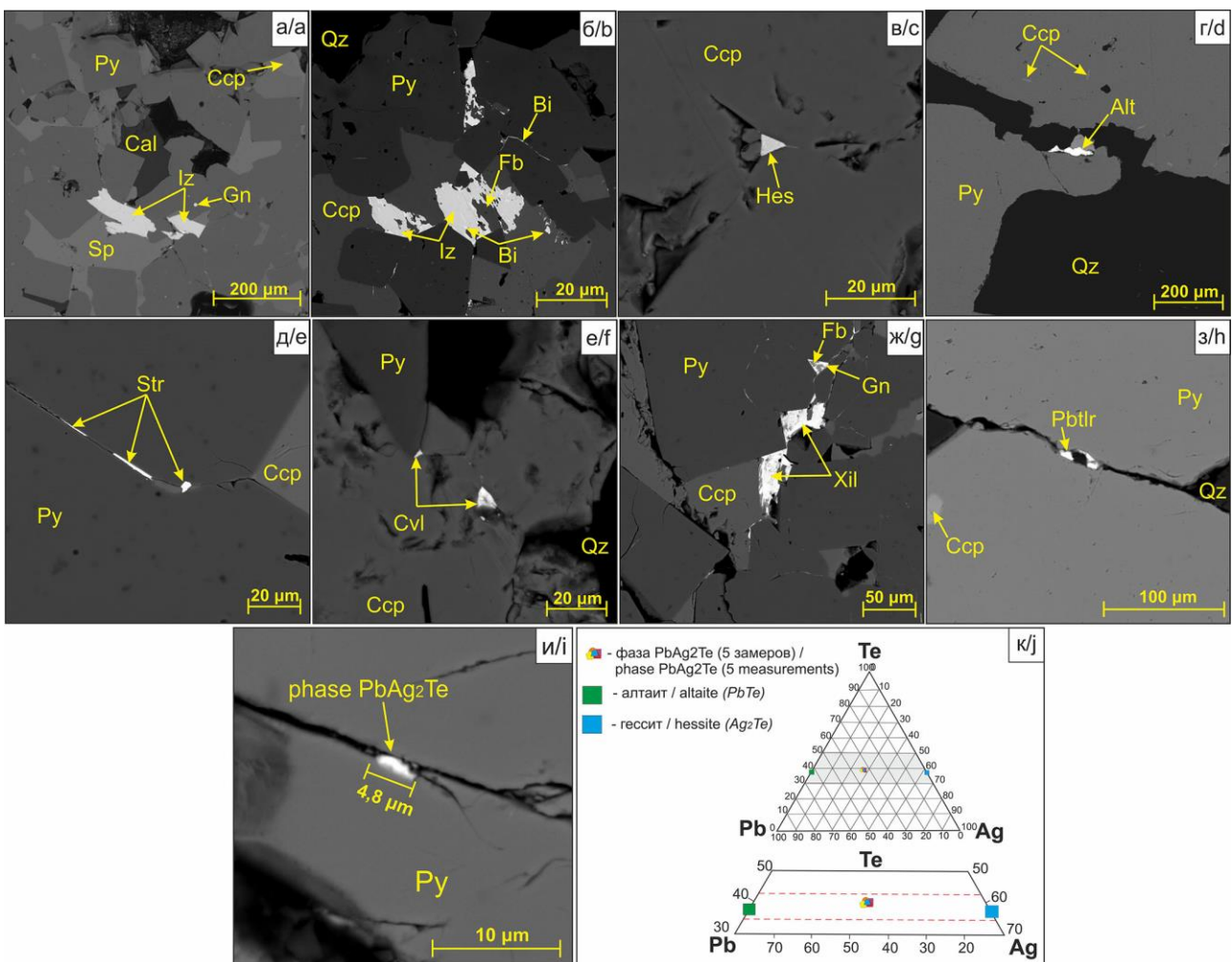


Рис. 4. Снимки руд со сканирующего электронного микроскопа в обратно-рассеянных электронах, демонстрирующие характер и размер выделений изоклейкита (а), самородного висмута (б), гессита (в), алтаита (г), сstroкайита (д), цервеллеита (е), ксилингоита (ж), плюмботеллури-та (з), неидентифицированного минерала с обобщенной формулой PbAg₂Te (и) и тройная химическая диаграмма (к), иллюстрирующая состав неназванной минеральной фазы PbAg₂Te в системе Pb-Te-Ag

Fig. 4. Images of ores from a scanning electron microscope in back-scattered electrons, demonstrating the nature of the isolation of izoklakeite (a), native bismuth (b), hessite (c), altaite (d), sztrokayite (e), cervellite (f), xilingoite (g), plumbotel- lurite (h), unidentified mineral with the general formula PbAg₂Te (i) and ternary chemical diagram (j) illustrating the composition of the unnamed mineral phase PbAg₂Te in the Pb-Te-Ag system

Агрегаты в данном случае имеют уплощенные, вытянутые и анизометричные формы. Контуры краев данных выделений обычно округлые либо извилистые за счет неровностей стенок самих трещин. По данным характеристикам можно сделать вывод, что минерал кристаллизовался позднее основных сульфидных минералов и отлагался из низкотемпературных растворов на последних стадиях рудообразования.

В процессе изучения сплошных руд было обнаружено единичное включение **неидентифицированного минерала с обобщенной формулой $PbAg_2Te$** . Концентрации главных минералообразующих элементов составили по результатам пяти замеров, мас. %: Ag – 33,54; Te – 26,02; Pb – 40,41. Включение минеральной фазы с видообразующей ролью Pb располагается в трещине пирита и образует вытянутое полуовальное зерно длиной 4,8 мкм (рис. 4, *и*). Система $PbAgTe$ выделена на основании предполагаемого парагенезиса фаз Pb–Te и Ag–Te, являющихся, по видимому, сростаниями алтаита $PbTe$ и гессита $AgTe_2$ (рис. 4, *к*). Данная минеральная фаза была обозначена нами как неидентифицированный минерал с обобщенной формулой $PbAg_2Te$ (табл. 2).

Условия образования теллуру-висмутовой минерализации

С целью реконструкции стадийности процесса рудообразования на месторождении и определения физико-химических условий формирования теллуру-висмутовой минерализации были проведены термобарогеохимические исследования газожидких включений в кварце.

По степени преобразованности Малеевское месторождение, аналогично таким месторождениями, как Ново-Лениногорское, Зырянское, Риддер-Сокольное и Николаевское, относится к слабо преобразованному типу с температурными пиками метаморфизма от 150 до 400 °С. Температурные условия изменения пород на месторождении, по результатам изучения минеральных парагенезисов И.В. Викентьевым [20], соответствуют условиям зеленосланцевой фации метаморфизма. На руды метаморфизм оказал ощутимое влияние, в результате чего они утратили метаколлоидный, тонкозернистый, колломорфный и брекчиевый облик вследствие перекристаллизации. Метаморфической ремобилизацией можно объяснить появление висмутовых минералов в рудах [20].

Опираясь на классификацию В.А. Кормушина [36], была выполнена типизация флюидных включений. По времени и способу образования выделены два класса включений [37, 38]: первичные и вторичные. Первичные (сингенетические) газожидкие включения (рис. 5, *а, в*), пространственно приуроченные к плоскостям граней роста кристалла кварца, локализуются обычно в виде одиночных

не ориентированных между собой включений. Реже образуют скопления включений с беспорядочным распределением. Форма полостей обычно характеризует неправильный, полигексогональный или округлый облики со средним размером 4...7 мкм. Вторичные (эпигенетические) включения (рис. 5, *б, з*) развиваются по постгенетическим трещинкам или в межзерновых пространствах агрегатов кварца. Данные мелкие включения характеризуются линейным расположением скоплений, причем при увеличении глубины резкости микроскопа отмечается приуроченность данных микроваколей к полостям залеченных трещин. Формы их обычно неправильные или каплевидные, а размер не превышает 1 мкм. Данные включения встречаются группами от 5 до 25 штук.

По фазовым соотношениям при комнатной температуре в пластинах выявлены два типа включений:

- преобладающие двухфазные ($Ж H_2O \pm MgCl_2 \pm NaCl + Г CO_2 \pm CH_4 \pm H_2S \pm SO_2$);
- однофазные ($Г CO_2 \pm CH_4 \pm H_2S \pm SO_2$ и $Ж H_2O \pm MgCl_2 \pm NaCl$).

Двухфазные включения характеризуются внутренней и внешней фазой. Внутренняя фаза представлена газом, а внешняя – жидким солевым раствором. Во включениях данного типа газовая фаза имеет как монокомпонентный (CO_2 , CH_4 , SO_2 , H_2S), так и поликомпонентный состав (смесь ранее перечисленных газов). О щелочном и субщелочном происхождении раствора свидетельствует небольшое присутствие CO_2 или полное его отсутствие в первичных включениях и интенсивное содержание в рудах [38, 39]. Двухфазный тип включений приурочен к первичной генерации, размер их варьирует в пределах 4...8 мкм.

Однофазные включения газового или жидкого типов имеют как светлую, так и темную окраску, а размер их не превышает 1...3 мкм. Обычно данный тип включений образует скопления в виде линейно-вытянутых цепочек, то есть относится к вторичной генерации.

По результатам исследований установлено, что температура кристаллизации эвтектики солевой системы составляет около –35,0 °С, что соответствует компонентному составу $MgCl_2-NaCl-H_2O$ и фазовому составу эвтектической смеси $MgCl_2 \cdot 12H_2O + NaCl \cdot 2H_2O + \text{лед}$. Таким образом, флюид имел хлоридный Mg-Na состав и соленость 7...16,1 мас. % экв. NaCl. Полученные данные сопоставляются с результатами, полученными в работах В.Ю. Прокофьева, М.А. Юдовской, И.В. Гаскова, Д.И. Горжевского [3, 23, 38, 39].

Давление гидротермальных растворов составляет 900...1000 атм, или 0,9...1 кбар [38]. Эти значения близки к расчетным данным по месторождению-аналогу Зырянскому [9, 23].

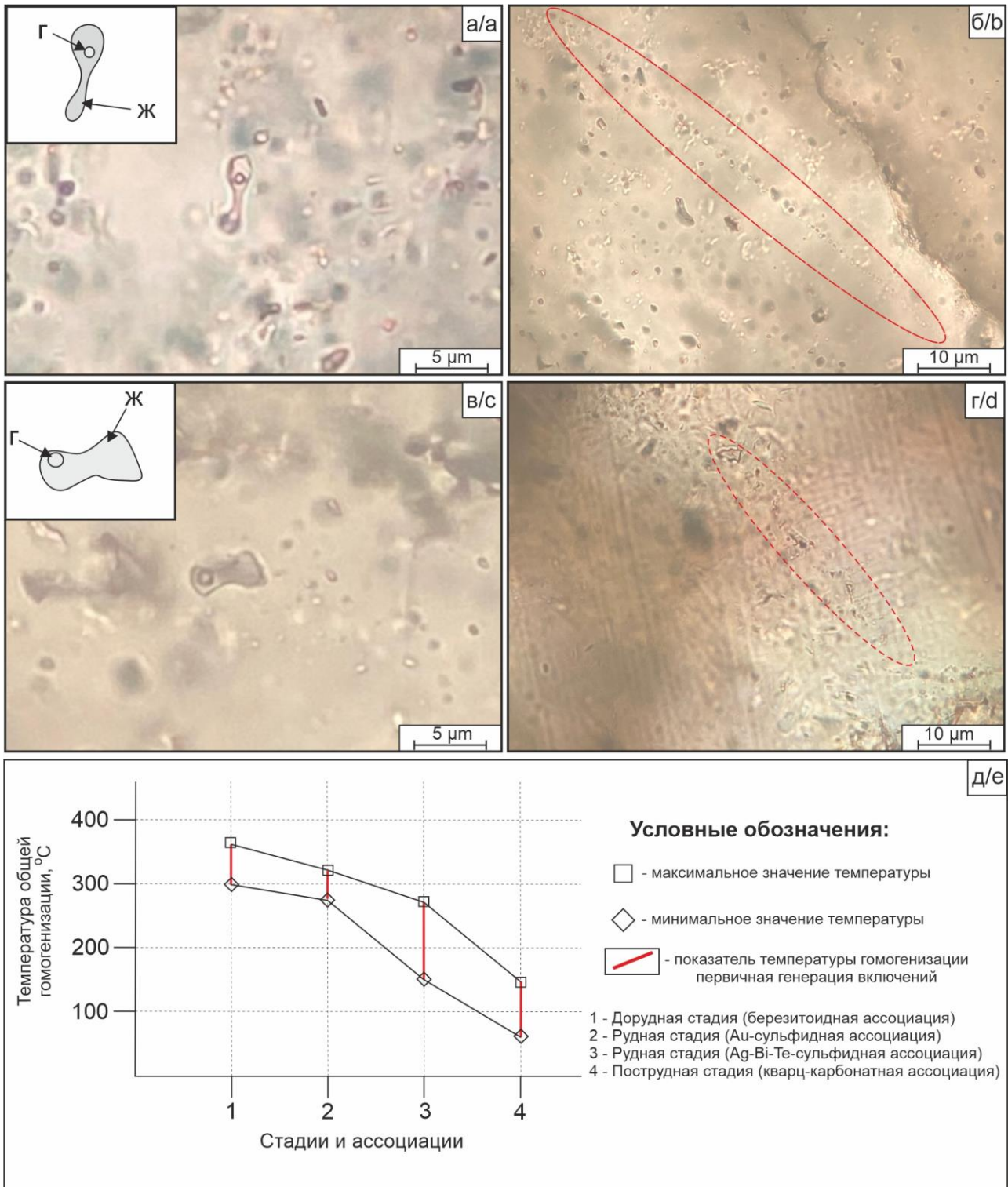


Рис. 5. а, в) двухфазное газово-жидкое включение (Г – газ, Ж – жидкость); б, г) вторичные включения; д) распределение крайних значений температур общей гомогенизации индивидуальных флюидных включений в кварце по стадиям и ассоциациям

Fig. 5. a, c) two-phase gas-liquid inclusion (Г – gas, Ж – liquid); b, d) secondary inclusions; e) distribution of extreme temperatures of general homogenization of individual fluid inclusions in quartz by stages and associations

Температура месторождения определена методом гомогенизации и эвтектики газовой-жидкой включений. Высокотемпературный гидротермальный процесс был длительным и проявился в три последовательные стадии минералобразования [40]: дорудную, рудную и пострудную (рис. 5, д).

В *дорудную стадию*, представленную березитовидной минеральной ассоциацией, происходило образование кварц-серицитовых, серицит-кварцевых и кальцит-серицит-кварцевых метасоматитов. На протяжении данной стадии отлагались кварц SiO_2 I генерации, кальцит CaCO_3 I генерации, серицит $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})$ и мусковит $\text{KA}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})$. На завершении стадии кристаллизовался пирит FeS_2 I генерации. Температурный диапазон минералообразования варьировал в рамках 360...305 °C. Давление флюида оценивается в интервале 1000...850 атм.

Рудная стадия представлена двумя минеральными ассоциациями: золото-сульфидной и серебро-висмут-теллурид-сульфидной. В золото-сульфидную ассоциацию формировались главные рудные минералы: пирит FeS_2 II генерации, арсенопирит FeAsS , халькопирит CuFeS_2 , сфалерит ZnS , галенит PbS , тетраэдрит $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$. Также кристаллизуются молибденит MoS_2 , фрайбергит $\text{Ag}_6\text{Cu}_4\text{Fe}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, фаматинит Cu_3SbS_4 и самородное золото Au . Среди нерудных минералов развиваются барит BaSO_4 , кварц SiO_2 и кальцит CaCO_3 II генерации. Температура минералообразования в данную ассоциацию составляла 315...280 °C, а давление минералообразующего флюида равнялось 840...630 атм.

Во вторую рудную ассоциацию, непосредственно *серебро-висмут-теллурид-сульфидную*, кристаллизовались пирит FeS_2 , галенит PbS и халькопирит CuFeS_2 III генерации. Сравнительно позже предполагается образование минералов теллуру-висмутного состава, представленных строкаитом Bi_3TeS_2 , ксилингоитом $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$, изоклейкитом $(\text{Pb}_{27}(\text{Cu,Fe})_2(\text{Sb,Bi})_{19}\text{S}_{57})$, висмутом самородным Bi , гесситом Ag_2Te , цервеллеитом Ag_4TeS , алтаитом PbTe , плюмботеллуридом PbTeO_3 и минеральной неназванной фазой PbAg_2Te . Среди нерудных минералов отмечаются кварц SiO_2 , кальцит CaCO_3 и барит BaSO_4 . Температура минералообразования данной ассоциации составляла 280...150 °C, а давление – 615...400 атм.

Пострудная стадия, представленная карбонат-кварцевой минеральной ассоциацией, завершает этап минералообразования на месторождении. В преобладающем объеме на протяжении всей стадии наблюдается кварц SiO_2 IV генерации, и в ее заключении формируется кальцит CaCO_3 IV генерации. Температура образования пострудной стадии составляла менее 150 °C, а давление минералообразующего флюида варьировалось в диапазоне 380...205 атм.

Заключение

Полученные результаты демонстрируют сложность и разнообразие химического состава сплошных (сливных) и вкрапленных руд Малеевского месторождения.

В процессе детального исследования колчеданных руд было выявлено многообразие теллуру-висмутовой минерализации, фиксирующейся в виде самостоятельных минералов, представленных сульфидами, оксидами, сульфосолями, теллуридами и самородными формами выделения. Данные минералы представлены алтаитом PbTe , гесситом Ag_2Te , самородным висмутом Bi , строкаитом Bi_3TeS_2 , изоклейкитом $(\text{Pb}_{27}(\text{Cu,Fe})_2(\text{Sb,Bi})_{19}\text{S}_{57})$. Впервые в рудах нами были диагностированы цервеллеит Ag_4TeS , ксилингоит $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$, плюмботеллурид PbTeO_3 и неидентифицированный минерал с обобщенной формулой PbAg_2Te . Большой объем теллуру-висмутовой минерализации сконцентрирован в рудах сплошного (сливного) типа. Для минералов отмечается многообразие форм их выделения, а также общее сходство – приуроченность к сульфидным минералам. Взаимоотношения между основными рудными сульфидными минералами и минералами Te-Bi состава в рудах, а именно развитие их по трещинам, пустотам, периферии сульфидов или промежуткам между несколькими рудными агрегатами, указывает на то, что их отложение происходило на завершающих отрезках формирования руд. По результатам исследований сделан вывод, что минералы теллуру-висмутного состава формировались в заключительную серебро-висмут-теллурид-сульфидную ассоциацию рудной стадии при температурном диапазоне 350...201 °C и давлении 615...400 атм. Обилие в рудах самородного висмута и сульфидов висмута свидетельствует о низком химическом потенциале теллура в растворах и достаточно высоком потенциале серы.

Полученные результаты позволяют по-новому подойти к стратегии прогнозирования ресурсов минерального сырья колчеданных месторождений Зырянского горнорудного района [5–13]. Схожие вещественные характеристики руд месторождений Греховское, Снегиревское, Зырянское, Богатыревское, Осочихинское, Майско-Зырянское, Путинцевское, Парыгинское, Заводинское, Буктырминское с изученными рудами месторождения Малеевское позволяют спрогнозировать в них потенциал попутной добычи теллура и висмута.

Комплексное исследование распределения теллуру-висмутовой минерализации в колчеданных рудах месторождения Малеевское также дает возможность более точного регулирования технологических процессов и оптимизации качества конечного продукта, что, в свою очередь, повышает не только эффективность, но и рентабельность производства цветных металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В.В. Региональные палеотектонические факторы образования крупных полиметаллических месторождений Рудного Алтая // Геология рудных месторождений. – 1998. – Т. 40. – № 4. – С. 370–378.
2. Контарь Е.С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история формирования, перспективы): научная монография. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. – 199 с.
3. Гаськов И.В. Особенности развития колчеданных рудно-магматических систем в островодужных обстановках Рудного Алтая и Южного Урала // Литосфера. – 2015. – № 2. – С.17–39.
4. Ложников С.С., Пантелеев С.В., Колмагорова Н.В. Практика обогащения руд Малеевского месторождения полиметаллического и медно-цинкового типа на обогатительной фабрике ЗГОК АО «Казцинк» // Известия вузов. Горный журнал. – 2005. – № 3. – С.102–105.
5. Закономерности формирования колчеданно-полиметаллических месторождений на примере месторождения Малеевское / А.П. Пяткова, М.А. Мизерная, А.П. Мирошникова, А.В. Пятков, М.П. Половко // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2018. – № 4 (82). – С. 32–38.
6. Мазуров А.К. Металлогеническое районирование Казахстана // Вестник Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 4. – С. 33–39.
7. Мазуров А.К. Геодинамические обстановки формирования металлогенических комплексов Казахстана: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 329 с.
8. Особенности геотектонического развития и рудоносности Южного Алтая (Восточный Казахстан) / Б.А. Дьячкова, А.Е. Бисатова, М.А. Мизерная, Н.А. Зимановская, Т.А. Ойцева, Б.Б. Амралинова, С.С. Айтбаева, О.Н. Кузьмина, Г.Б. Оразбекова // Геология рудных месторождений. – 2021. – Т. 63. – № 5. – С. 399–426.
9. Горжевский Д.И., Исакович И.З., Чекваидзе В.Б. Типы полиметаллических месторождений Рудного Алтая, их происхождение и методы поисков. – М.: Недра, 1977. – 197 с.
10. Попов В.В., Стучевский Н.И., Демин Ю.И. Полиметаллические месторождения Рудного Алтая / под ред. Н.И. Еремина. – М.: Изд-во ИГЕМ РАН, 1995. – 414 с.
11. Большой Алтай (геология и металлогения). В 3 кн. Кн. 1. Геологическое строение / Г.Н. Щерба, Х.А. Беспаяев, Б.А. Дьячков и др. – Алматы: РИО ВАК РК, 2000. – 400 с.
12. Большой Алтай (геология и металлогения). В 3 кн. Кн. 2. Металлогения / Г.Н. Щерба, Х.А. Беспаяев, Б.А. Дьячков и др. – Алматы: РИО ВАК РК, 2000. – 400 с.
13. Дьячков Б.А., Титов Д.В., Сапаралиев Е.М. Рудные пояса Большого Алтая и оценка их перспектив // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – № 3. – С. 222–238.
14. Козлов М.С. Условия формирования Рудноалтайской металлогенической провинции // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57. – № 4. – С. 299–326.
15. Bacteria-driven fossil ecosystems as paleoindicators of active continental margins and the role of carbonate sediment-hosted vents in geodynamic reconstructions / L. Bujtor, I. Gyollai, M. Szhabo, I. Kovacs, M. Polgari // Minerals. – 2024. – Vol. 14. – № 125. – P. 1–22.
16. Rabayrol F., Hart C.J.R. Petrogenetic and tectonic controls on magma fertility and the formation of post-subduction porphyry and epithermal mineralization along the late Cenozoic Anatolian Metallogenic Trend, Turkey // Mineralium Deposita. – 2020. – Vol. 56. – P. 279–306.
17. Космоструктурная модель Зырянского рудного района (Рудный Алтай) / Ю.С. Ананьев, А.А. Поцелуев, В.Г. Житков, В.Н. Назаров, А.С. Кузнецов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 24–31.
18. Болдырева Г.Ю. Метасоматические преобразования рудовмещающих пород зоны «Холодная» Малеевского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай): магистерская диссертация. – Томск, 2019. – 66 с.
19. Болдырева Г.Ю., Рожков В.В. Петрография вулканогенно-осадочного комплекса маслянской свиты на примере разреза зоны «Холодная» Малеевского месторождения (Восточный Казахстан) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сагпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина. – Томск, 8–12 апреля 2019. – Томск: Томск. политех. ун-т, 2019. – С. 85–86.
20. Викентьев И.В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. – М.: Научный мир, 2004. – 344 с.
21. In situ trace elements and sulfur isotopes of sulfides in the Dabaiyang Te-Au deposit, Hebei Province, China: implications for Au remobilization from pyrite / Y. Zhang, S. Zhen, D. Wang, J. Liu, J. Wang, Z. Zha, H. Bai // Ore Geology Reviews. – 2022. – Vol. 140. – P. 1–16.
22. Linear correlations of gibbs free energy of REE phosphates (monazite, xenotime, and rhabdophane) and internally consistent binary mixing properties / R. Pan, A.P. Gysi, A. Migdisov, L. Gong, P. Lu, C. Zhu // Minerals. – 2024. – Vol. 14 (305). – P. 1–18.
23. Юдовская М.А. Минералого-геохимические особенности и условия формирования руд Малеевского месторождения на Рудном Алтае: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Усть-Каменогорск, 1984. – 209 с.
24. Гусева А.И., Гусев Н.И. Висмутовое оруденение Республики Алтай: типизация и прогнозная оценка // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 3 – С. 52–57.
25. Mineralogy Database. URL: <https://www.webmineral.com> (дата обращения 15.03.2024).
26. Ahmad M., Solomon M., Walshe J.L. Mineralogical and geochemical studies of the Emperor gold telluride deposit, Fiji // Economic Geology. – 1987. – Vol. 82. – P. 345–370.
27. Au-Ag-Te-rich melt inclusions in hydrothermal gold-quartz veins, Xiaoqinling lead gold district, central China / W. Jian, J.W. Mao, B. Lehmann, N.J. Cook, G.Q. Xie, P. Liu, C. Duan, J. Alles, Z.J. Niu // Economic Geology. – 2021. – Vol. 116 (5). – P. 1239–1248.
28. Two-dimensional ferroelectricity in a single-element bismuth monolayer / J. Gou, H. Bai, X. Zhang, Y. Huang, S. Duan, A. Ariando, S. Yang, L. Chen, Y. Lu, A. Wee // Nature. – 2023. – Vol. 617. – P. 67–85.

29. The role of selenium and hydrocarbons in Au-Ag ore formation in the Rodnikovoe Low-Sulfidation (LS) epithermal deposit, Kamchatka Peninsula, Russia / N. Tolstykh, M. Shapovalova, E. Shaparenko, D. Bukhanova // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12 (1418). – P. 1–16.
30. Reversible thermochromic bismuth iodide enabled by self-adjustment / R. Wen, Y. Wang, X. Ma, Y. Yan, Q. Ma, J. Gao, H. Sun, H. Huang, Z. Gao // *Adv. Opt. Mater.* – 2023. – 11 (9). DOI: 10.1002/adom.202203148.
31. The Chah-Mesi epithermal Cu-Pb-Zn-(Ag-Au) deposit and its link to the Meiduk porphyry copper deposit, SE Iran: evidence from sulfosalt chemistry and fluid inclusions / F. Altenberger, J.G. Raith, R.J. Bakker, A. Zarasvandi // *Ore Geology Reviews*. – 2022. – Vol. 142. – 104732.
32. Warmada I.W., Lehmann B. Polymetallic sulfides and sulfosalts of the Pongkor epithermal gold-silver deposit, West Java, Indonesia // *The Canadian Mineralogist*. – 2003 – Vol. 41. – P. 185–200.
33. The role of Te(IV) and Bi(III) chloride complexes in hydrothermal mass transfer: an X-ray absorption spectroscopic study / B.E. Etschmann, W. Liu, A. Pring, P.V. Grundler, B. Tooth, S. Borg, D. Testemale, D. Brewie, J. Brugger // *Chemical Geology*. – 2016. – Vol. 425. – P. 37–51.
34. Ciobanu C.L., Cook N.J., Spry P.G. Telluride and selenide minerals in gold deposits – How and why? // *Mineralogy and Petrology*. – 2006. – Vol. 87. – P. 163–169.
35. Speciation of aqueous tellurium(IV) in hydrothermal solutions and vapors, and the role of oxidized tellurium species in Te transport and gold deposition / P.V. Grundler, J. Brugger, B.E. Etschmann, L. Helm, W. Liu, P.G. Spry, Y. Tian, D. Testemale, A. Pring // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2013. – Vol. 120. – P. 298–325.
36. Кормушин В.А. Метод гомогенизации газовой-жидких включений в минералах / под ред. Н.Г. Сыромятникова. – Алматы: Наука, 1982. – 72 с.
37. Плечов П.Ю. Методы исследования флюидных и расплавных включений. – М.: Изд-во «КДУ», 2014. – 268 с.
38. Наумов В.А., Дорофеева В.А., Миронова О.Ф. Основные физико-химические параметры природных минералообразующих флюидов // *Геохимия*. – 2009. – № 8. – С. 825–851.
39. Прокофьев В.Ю. Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов (по данным исследования флюидных включений). – Новосибирск: Наука, 2000. – 186 с.
40. Золото в рудах золото-колчеданного месторождения Абыз (Центральный Казахстан) / А.К. Мазуров, А.Н. Николаева, М.А. Рудмин, Т.Ю. Якич, А.С. Рубан, Ш.Ж. Байболова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 78–88.

Информация об авторах

Анастасия Николаевна Николаева, инженер, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nikolaevaanastas759@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-9058-5048>
Алексей Карпович Мазуров, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. akm@tpu.ru

Поступила в редакцию: 27.03.2024

Поступила после рецензирования: 12.05.2024

Принята к публикации: 14.05.2024

REFERENCES

1. Popov V.V. Regional paleotectonic factors in the formation of large polymetallic deposits of Rudny Altai. *Geology of ore deposits*, 1998, vol. 40, no. 4, pp. 370–378. (In Russ.)
2. Kontar E.S. *Geological and industrial types of deposits of copper, zinc, lead in the Urals (geological conditions of location, history of formation, prospects): scientific monograph*. Ekaterinburg, UGGU Publ., 2013. 199 p. (In Russ.)
3. Gaskov I.V. Features of the development of sulfide ore-magmatic systems in island-arc environments of Rudny Altai and Southern Urals. *Lithosphere*, 2015, no. 2, pp. 17–39. (In Russ.)
4. Lozhnikov S.S., Pantelev S.V., Kolmagorova N.V. Practice of beneficiation of ores of the Maleevskoye deposit of polymetallic and copper-zinc type at the beneficiation plant of ZGOK JSC «Kazzinc». *News of universities. Mining magazine*, 2005, no. 3, pp. 102–105. (In Russ.)
5. Pyatkova A.P., Mizernaya M.A., Miroshnikova A.P., Pyatkov A.V., Polovko M.P. Patterns of formation of pyrite-polymetallic deposits using the example of the Maleevskoye deposit. *Bulletin of the East Kazakhstan State Technical University named after D. Serikbaev*, 2018, no. 4 (82), pp. 32–38. (In Russ.)
6. Mazurov A.K. Metallogenic zoning of Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 4, pp. 33–39. (In Russ.)
7. Mazurov A.K. *Geodynamic conditions of the formation of metallogenic complexes of Kazakhstan*. Dr. Diss. Tomsk, 2003. 329 p. (In Russ.)
8. Dyachkova B.A., Bisatova A.E., Mizernaya M.A., Zimanovskaya N.A., Oitseva T.A., Amralinova B.B., Aitbaeva S.S., Kuzmina O.N., Orazbekova G.B. Features of geotectonic development and ore content of Southern Altai (Eastern Kazakhstan). *Geology of ore deposits*, 2021, vol. 63, no. 5, pp. 399–426.
9. Gorzhovsky D.I., Isakov I.Z., Chekvaidze V.B. *Types of polymetallic deposits of Rudny Altai, their origin and search methods*. Moscow, Nedra Publ., 1977. 97 p. (In Russ.)

10. Popov V.V., Stuchevsky N.I., Demin Yu.I. *Polymetallic deposits of Rudny Altai*. Moscow, IGEM RAS Publ., 1995. 414 p. (In Russ.)
11. Shcherba G.N., Bespaev Kh.A., Dyachkov B.A. *Great Altai (geology and metallogeny)*. In three books. B. 1. Geological structure. Almaty, RIO VAK RK Publ., 2000. 400 p. (In Russ.)
12. Shcherba G.N., Bespaev Kh.A., Dyachkov B.A. and others. *Great Altai (geology and metallogeny)*. In three books. B. 2. Metallogeny. Almaty, RIO VAK RK Publ., 2000. 400 p. (In Russ.)
13. Dyachkov B.A., Titov D.V., Sapargaliev E.M. Ore belts of the Greater Altai and assessment of their prospects. *Geology of ore deposits*, 2009, vol. 51, no. 3, pp. 222–238. (In Russ.)
14. Kozlov M.S. Conditions for the formation of the Rudno-Altai metallogenic province. *Geology of ore deposits*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 299–326. (In Russ.)
15. Bujtor L., Gyollai I., Szhabo M., Kovacs I., Polgari M. Bacteria-driven fossil ecosystems as paleoindicators of active continental margins and the role of carbonate sediment-hosted vents in geodynamic reconstructions. *Minerals*, 2024. vol. 14, 125. pp. 1–22.
16. Rabayrol F., Hart C.J.R. Petrogenetic and tectonic controls on magma fertility and the formation of post-subduction porphyry and epithermal mineralization along the late Cenozoic Anatolian Metallogenic Trend, Turkey. *Mineralium Deposita*, 2020. vol. 56. pp. 279–306.
17. Ananyev Yu.S., Potseluev A.A., Zhitkov V.G., Nazarov V.N., Kuznetsov A.S. Cosmostructural model of the Zyryanovsky ore district (Rudny Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 24–31. (In Russ.)
18. Boldyreva G.Yu. *Metasomatic transformations of ore-hosting rocks of the «Kholodnaya» zone of the Maleevsky pyrite-polymetallic deposit (Rudny Altai)*. Master's dissertation. Tomsk, 2019. 66 p. (In Russ.)
19. Boldyreva G.Yu., Rozhkov V.V. Petrography of the volcanogenic-sedimentary complex of the Maslya Formation using the example of a section of the «Kholodnaya» zone of the Maleevskoye field (Eastern Kazakhstan). *Problems of geology and subsoil development. Proceedings of the XXIII International Symposium named after Academician M.A. Usov students and young scientists, dedicated to the 120th anniversary of the birth of Academician K.I. Satpayev, 120th anniversary of the birth of Professor K.V. Radugina*. Tomsk, April 8–12, 2019. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2019. pp. 85–86. (In Russ.)
20. Vikentyev I.V. *Conditions of formation and metamorphism of pyrite ores*. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2004. 344 p. (In Russ.)
21. Zhang Y., S. Zhen, Wang D., Liu J., Wang J., Zha Z., Bai H. In situ trace elements and sulfur isotopes of sulfides in the Dabaiyang Te-Au deposit, Hebei Province, China: Implications for Au remobilization from pyrite. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 140, pp. 1–16.
22. Pan R., Gysi A.P., Migdisov A., Gong L., Lu P., Zhu C. Linear Correlations of Gibbs Free Energy of REE Phosphates (Monazite, Xenotime, and Rhabdophane) and Internally Consistent Binary Mixing Properties. *Minerals*, 2024, vol. 14, no. 305, pp. 1–18.
23. Yudovskaya M.A. *Mineralogical and geochemical features and conditions for the formation of ores of the Maleevsky deposit in Rudny Altai*. Cand. Diss. Ust-Kamenogorsk, 1984. 209 p. (In Russ.)
24. Guseva A.I., Gusev N.I. Bismuth mineralization of the Altai Republic: typification and predictive assessment. *Advances in modern natural science*, 2013, no. 3, pp. 52–57. (In Russ.)
25. *Mineralogy Database*. Available at: <https://www.webmineral.com> (accessed 15 March 2024).
26. Ahmad M., Solomon M., Walshe J. L. Mineralogical and geochemical studies of the Emperor gold telluride deposit, Fiji. *Economic Geology*, 1987, vol. 82, pp. 345–370.
27. Jian W., Mao J.W., Lehmann B., Cook N.J., Xie G.Q., Liu P., Duan C., Alles J., Niu Z.J. Au-Ag-Te-Rich melt inclusions in hydrothermal gold-quartz veins, Xiaolinling lead gold district, central China. *Economic Geology*, 2021, vol. 116 (5), pp. 1239–1248.
28. Gou J., Bai H., Zhang X., Huang Y., Duan S., Ariando A., Yang S., Chen L., Lu Y., Wee A. Two-dimensional ferroelectricity in a single-element bismuth monolayer. *Nature*, 2023, vol. 617, pp. 67–85.
29. Tolstykh N., Shapovalova M., Shaparenko E., Bukhanova D. The role of selenium and hydrocarbons in Au-Ag ore formation in the Rodnikovoe Low-Sulfidation (LS) epithermal deposit, Kamchatka Peninsula, Russia. *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 1418, pp. 1–16.
30. Wen R., Wang Y., Ma X., Yan Y., Ma Q., Gao J., Sun H., Huang H., Gao Z. Reversible Thermochromic Bismuth Iodide Enabled by Self-Adjustment. *Adv. Opt. Mater.*, 2023. vol. 11 (9). DOI: 10.1002/adom.202203148.
31. Altenberger F., Raith J.G., Bakker R.J., Zarasvandi A. The Chah-Mesi epithermal Cu-Pb-Zn-(Ag-Au) deposit and its link to the Meiduk porphyry copper deposit, SE Iran: evidence from sulfosalts chemistry and fluid inclusions. *Ore Geology Reviews*, 2022. vol. 142, 104732.
32. Warmada I.W., Lehmann B. Polymetallic sulfides and sulfosalts of the Pongkor epithermal gold-silver deposit, West Java, Indonesia. *The Canadian Mineralogist*, 2003, vol. 41, pp. 185–200.
33. Etschmann B.E., Liu W., Pring A., Grundler P.V., Tooth B., Borg S., Testemale D., Brewe D., Brugger J. The role of Te (IV) and Bi (III) chloride complexes in hydrothermal mass transfer: an X-ray absorption spectroscopic study. *Chemical Geology*, 2016, vol. 425, pp. 37–51.
34. Ciobanu C.L., Cook N.J., Spry P.G. Telluride and selenide minerals in gold deposits – How and why? *Mineralogy and Petrology*, 2006, vol. 87, pp. 163–169.
35. Grundler P.V., Brugger J., Etschmann B.E., Helm L., Liu W., Spry P.G., Tian Y., Testemale D., Pring A. Speciation of aqueous tellurium (IV) in hydrothermal solutions and vapors, and the role of oxidized tellurium species in Te transport and gold deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, vol. 120, pp. 298–325.
36. Kormushin V.A. *Method of homogenization of gas-liquid inclusions in minerals*. Alma-Ata, Nauka Publ., 1982. 72 p. (In Russ.)
37. Plechov P.Yu. *Methods for studying fluid and melt inclusions*. Moscow, KDU Publ., 2014. 268 p. (In Russ.)
38. Naumov V.A., Dorofeeva V.A., Mironova O.F. Basic physical and chemical parameters of natural mineral-forming fluids. *Geochemistry*, 2009, no. 8, pp. 825–851. (In Russ.)
39. Prokofiev V.Yu. *Geochemical features of ore-forming fluids of hydrothermal gold deposits of various genetic types (according to the study of fluid inclusions)*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 186 p. (In Russ.)

40. Mazurov A.K., Nikolaeva A.N., Rudmin M.A., Yakich T.Yu., Ruban A.S., Baibolova Sh.Zh. Gold in the ores of the Abyz gold-pyrite deposit (Central Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 78–88. (In Russ.)

Information about the authors

Anastasia N. Nikolaeva, Engineer, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nikolaevaanastas759@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-9058-5048>

Alexey K. Mazurov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. akm@tpu.ru

Received: 27.03.2024

Revised: 12.05.2024

Accepted: 14.05.2024