

УДК 553.08:553.21/24:553.046
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4708
Шифр специальности ВАК: 1.6.10

Комплексное исследование распределения теллуро-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений Абыз и Малеевское (Республика Казахстан)

А.Н. Николаева✉, А.К. Мазуров

Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉nikolaevaanastas759@gmail.com

Аннотация. В пределах образований энзиматических и энсиалических островных дуг на территории Центрального и Восточного Казахстана насчитывается более тридцати колчеданных месторождений, обогащенных медью, свинцом, цинком, золотом, серебром и редкометальной минерализацией, являющейся до настоящего времени недостаточно изученной. **Актуальность** исследования заключается в необходимости восполнения информации о теллуро-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений, сформированных в энзиматической (месторождение Абыз) и энсиалической (месторождение Малеевское) островодужных системах, для установления пространственной связи данного типа оруденения с геодинамическими обстановками и прогнозирования потенциала их попутного извлечения из руд. **Целью** работы являлось изучение и сравнение морфологических характеристик, закономерностей распределения и условий формирования теллуро-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений, образованных в разных островодужных геодинамических обстановках. **Методы:** масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, минераграфический и минералогический анализы, сканирующая электронная микроскопия в комплексе с рентгеноспектральным микроанализом, рамановская спектроскопия, термобарогеохимические исследования. **Результаты.** Сравнение колчеданных месторождений Рудноалтайской и Чингиз-Тарбагатайской островодужных систем показало многие черты их сходства и различия. Месторождения имеют многостадийное формирование и близкий механизм рудоотложения со сходными условиями образования теллуро-висмутовой минеральной ассоциации. Установлена пространственная связь данного типа оруденения с геодинамическими обстановками: для месторождения, приуроченного к палеоокеанической структуре, наблюдается преобладание теллурического элемента, а для месторождения, сформированного на континентальном рифте – висмутового.

Ключевые слова: теллур, висмут, колчеданные месторождения, Казахстан, Рудноалтайская и Чингиз-Тарбагатайская островные дуги

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке проекта FSWW-2023-0010.

Для цитирования: Николаева А.Н., Мазуров А.К. Комплексное исследование распределения теллуро-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений Абыз и Малеевское (Республика Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 197–214. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4708

UDC 53.08:553.21/24:553.046
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4708

Comprehensive research of the distribution of tellurium-bismuth mineralization in the ores of the Abyz and Maleevskoe sulfide deposits (Republic of Kazakhstan)

A.N. Nikolaeva✉, A.K. Mazurov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉nikolaevaanastas759@gmail.com

Abstract. Within the formations of ensimatic and ensialic island arcs in the territory of Central and Northern Kazakhstan, there are more than thirty pyrite deposits enriched in copper, lead, zinc, gold, silver and rare metal mineralization, which is still insufficiently studied. **Relevance.** The need to replenish information on tellurium-bismuth mineralization in ores of sulfide deposits formed in ensimatic (Abyz deposit) and ensialic (Maleevskoe deposit) island-arc systems, to establish a spatial connection of this type of mineralization with geodynamic conditions and predict the potential for their associated extraction from ore. **Aim.** To study and compare morphological characteristics, distribution patterns and conditions for the formation of tellurium-bismuth mineralization in ores of pyrite deposits formed in different island-arc geodynamic settings. **Methods.** Inductively coupled plasma mass spectrometry, mineragraphic and mineralogical analyses, scanning electron microscopy in combination with X-ray spectral microanalysis, Raman spectroscopy, thermobarogeochemical studies. **Results.** A comparison of the pyrite deposits of the Rudno-Altai and Chingiz-Tarbagatai island arc systems showed many similarities and differences between them. The deposits have a multi-stage formation and a similar mechanism of ore deposition with similar physico-chemical conditions for the formation of tellurium-bismuth mineralization. A spatial relationship between Te-Bi mineralization and geodynamic settings was established: for deposits associated with paleoceanic structures, a predominance of the tellurium element is observed, and for continental rifts, a predominance of the bismuth element.

Keywords: tellurium, bismuth, pyrite deposits, Kazakhstan, Rudno-Altai and Chingiz-Tarbagatai island arcs

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

For citation: Nikolaeva A.N., Mazurov A.K. Features of tellurium-bismuth mineralization in ores of the Abyz and Maleevskoe purific deposits (Republic of Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 197–214. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4708

Введение

Одним из приоритетных направлений Государственной политики в области недропользования является стратегия комплексного использования руд. Для эффективной эксплуатации рудного сырья в производстве важно знать его минеральный состав и точное содержание примесей, которые в настоящее время свободно определяются современными аналитическими методами. Этот факт дает возможность оптимизации качества конечного продукта, что, в свою очередь, повышает эффективность и рентабельность производства цветных металлов.

Во многих работах по исследованию территории Казахстана [1–9] сделаны акценты на изучение и увязку особенностей металлогении месторождений с разнотипными геодинамическими обстановками. Среди прочего отмечается, что наиболее богатыми элементами-примесями являются колчеданные руды месторождений, приуроченных к палеоостроводужным геодинамическим обстановкам. В 70–90-х гг. прошлого столетия по причине отсутствия необходимого оборудования в большинстве месторождений данного типа оставались слабо изученными примесные элементы, являющиеся востребованными промышленностью и имеющие высокую рыночную стоимость. Среди данных элементов-примесей до сих пор остаются слабоизученными металлоид теллур и металл висмут.

Характерной чертой Центрально-Азиатского орогенного пояса является широкое распространение вулканических комплексов, сформировавшихся в пределах островодужных систем с различным типом фундамента. При этом значительные площа-

ди занимают образования энсиматических островных дуг, среди которых Чингиз-Тарбагатайская островодужная система, формировавшаяся на протяжении кембрия и ордовика, является наиболее крупной подобной структурой западной части Центрально-Азиатского пояса. Именно в ней сконцентрированы основные промышленные колчеданные месторождения Центрального Казахстана [9].

Формирование основных промышленных колчеданных месторождений Рудного Алтая происходило с кембрия по девон в геодинамической обстановке, соответствующей зрелым внутренним островным дугам, по металлогеническому районированию объединяющимся в региональный Рудноалтайский пояс, представляющий собой активную континентальную окраину Алтае-Саянской складчатой области [10–13].

На основании имеющихся данных целью работы является изучение и сравнение условий формирования и закономерностей распределения теллуру-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений, приуроченных к разным геодинамическим обстановкам. Для этого нами были изучены руды двух колчеданных месторождений:

- месторождения Абыз, сформированного в пределах энсиматической Чингиз-Тарбагатайской островной дуги, развивающейся на океанической коре;
- месторождения Малеевское, приуроченного к энсиалической Рудноалтайской островной дуге, заложенной на коре континентального типа (рис. 1).

Для выполнения данного исследования были поставлены три основные задачи:

- изучить особенности минерального состава колчеданных руд и дать характеристику распределению основных рудных и сопутствующих примесных элементов в рудах;
- реконструировать стадийность процесса минералообразования и определить физико-химические условия формирования теллуро-висмутовой минерализации;
- дать прогнозно-металлогеническую оценку теллур-висмут-сырьевого потенциала для колчеданных месторождений, приуроченных к островодужным палеогеодинамическим обстановкам.

Решение этих вопросов весьма важно и актуально как в научном, так и в прикладном отношении. Помимо этого, с экологической точки зрения необходимость извлечения данных элементов из

руд заключается в их токсичности и существенном вкладе в деградацию почвенного покрова [14, 15]. Несмотря на то, что экологические последствия загрязнения почв висмутом (Bi) и теллуром (Te) исследованы весьма мало, масштабы и степень загрязнения ими почв с каждым годом увеличиваются. Шлаки, образующиеся в результате плавки руд и концентратов, вместе с хвостохранилищами все чаще становятся предметом серьезных экологических споров. Единственным способом снижения их негативного воздействия на окружающую среду может быть утилизация путем комплексного извлечения из руд и дальнейшего применения в качестве товарных продуктов (сплавы, термоэлектрические материалы, узкозонные полупроводники, производство пигментов, керамики и многое другое).

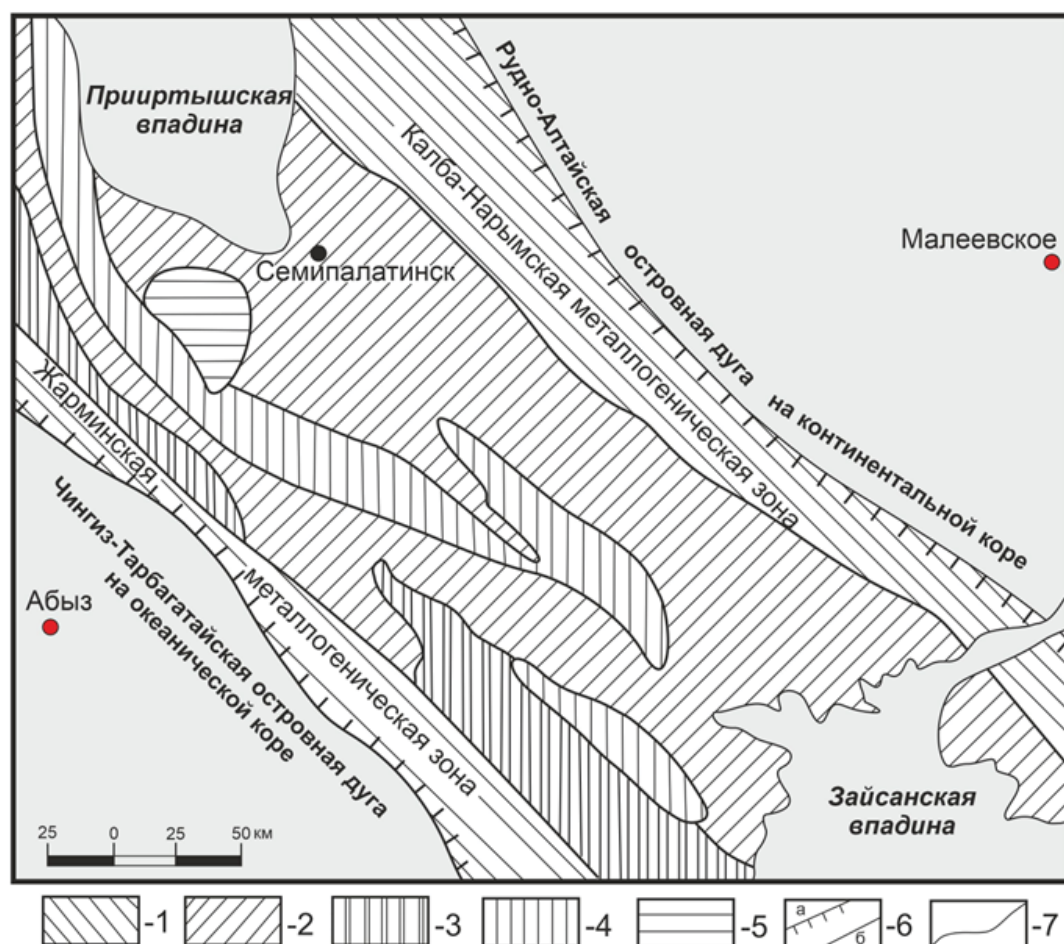


Рис. 1. Схематическое металлогеническое районирование Восточной и Центральной части Казахстана [2] с дополнениями. Условные обозначения: 1 – энсиалические блоки зоны коллизии, 2 – энсиматические блоки зоны коллизии, 3 – террейны карбоновой островной дуги, 4 – сутура коллизионной зоны, 5 – область триасового континентального магматизма, 6 – границы коллизионной зоны (а) и блоков на различном основании (б), 7 – прочие геологические границы

Fig. 1. Schematic metallogenetic zoning of the Eastern and Central parts of Kazakhstan [2] with additions. Legend: 1 – ensialic blocks of the collision zone, 2 – ensimatic blocks of the collision zone, 3 – terranes of the Carboniferous Island arc, 4 – suture of the collision zone, 5 – area of Triassic continental magmatism, 6 – boundaries of the collision zone (a) and blocks on different foundations (b), 7 – other geological boundaries

Материал и методы исследования

Для решения поставленных задач из основных рудных тел месторождений Абыз и Малеевское были отобраны и изучены бороздовые и керновые пробы в количестве 210 единиц весом от одного до трех килограммов. В ходе научной работы применялся целый комплекс исследований. На первом этапе проводилось макроскопическое описание образцов для характеристики текстурных особенностей руд. Далее с целью изучения минерального состава, морфологии, размеров и характера сростания минералов, а также структурных особенностей руд на исследовательском микроскопе отраженного света Zeiss Imager 2m были выполнены минераграфические исследования, для которых было изготовлено около 200 полированных шлифов (аншлифов). Для углубления знаний о морфологии теллуру-висмутовой минерализации и ее взаимосвязи с другими минералами было проведено изучение руд на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBU с приставкой для рентгенфлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) OXFORD X-Max 50. В процессе исследования осуществлялась съемка поверхности руд и качественное определение состава зёрен по всей площади. Особое внимание уделялось разнообразным включениям минералов Te и Bi и взаимоотношению их с другими минеральными единицами. На предмет расшифровки условий образования теллуру-висмутовой минерализации были определены термодатиметрические характеристики более 80 газово-жидких включений в жильном кварце с использованием комплекса термобарогеохимических методов. Опыты по нагреванию выполнены с помощью термокамеры THMSG-600 с программным обеспечением LinkSys-32 (Linkam). Прибор позволяет выполнить измерение фазовых переходов температур в интервале от -200 до $+600$ °C. Для определения состава газов во включениях использовался спектрометр комбинационного рассеяния с конфокальным микроскопом Thermo Scientific Raman Microscope DXR2. Для выявления примесных элементов и установления их содержания (ppm) в рудах была проведена масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре Delta V Plus (Thermo Fisher Scientific, Бремен, Германия) в Казанском (Приволжском) Государственном университете.

Геологическое строение месторождений

Месторождение Абыз находится в западной части Предчингизской зоны в области ее сочленения со структурами Токраурского синклинория, разделенными меридиональным Центрально-Казахстанским разломом. Стратифицированные образования на месторождении представлены девонскими и неогено-

выми отложениями, а также рыхлыми четвертичными образованиями [16–18]. Рудовмещающей является вулканогенно-терригенная толща девонского возраста мощностью до 975 м, сложенная разнообломочными туфами андезитов, андезитобазальтов и их лавами с прослоями песчаников и гравелитов. Субвулканические образования, развитые в юго-восточной части месторождения, представлены среднедевонскими риолитами, трахидацитами, дацитами и гранит-порфирами. Для месторождения характерна сложная система разновозрастных тектонических нарушений, которые являются оперяющими структурами долгоживущего Центрально-Казахстанского глубинного разлома. Породы на месторождении претерпели процессы динамометаморфизма, а также подверглись гидротермально-метасоматическим изменениям, которые относятся к тектогенным региональным формациям и представлены пропиловыми и березитовыми статическими устойчивыми ассоциациями. Оруденение связано с протяжённой зоной березитизации по вулканогенно-осадочным породам среднего-основного состава, а также их туфогенным производным и осадочным отложениям [17, 18].

Месторождение Малеевское располагается в Зыряновском рудном районе Лениногорско-Зыряновской подзоны Рудно-Алтайской структурно-формационной зоны [6, 19, 20]. В геологическом строении месторождения участвуют среднедевонские вулканогенно-осадочные отложения. Разрез насыщен субвулканическими согласными и секущими телами порфировых риолитов, а также силлами и дайками базитов. В западном обрамлении рудного поля развиты интрузии габброидов и гранитоидов Змеиногорского комплекса. Тектоника представлена разрывными нарушениями северо-восточного простирания, характеризующимися зонами трещиноватости. В течение длительного геологического развития породы рудного поля претерпели различные метаморфические изменения: региональный, динамометрический, контактовый и гидротермальный метаморфизм. Рудообразование пространственно приурочено к березитовой формации [19, 20]. Оруденение локализуется в отложениях, сложенных известковистыми и углеродистыми песчаниками, алевролитами и алевропелитами, содержащими многочисленные силлы диабазов, тела риолитов и их лавобрекчий.

Результаты исследования

Морфологическая характеристика Te-Bi-содержащих минералов

С целью выявления примесных элементов в рудах месторождений Малеевское и Абыз была проведена масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой.

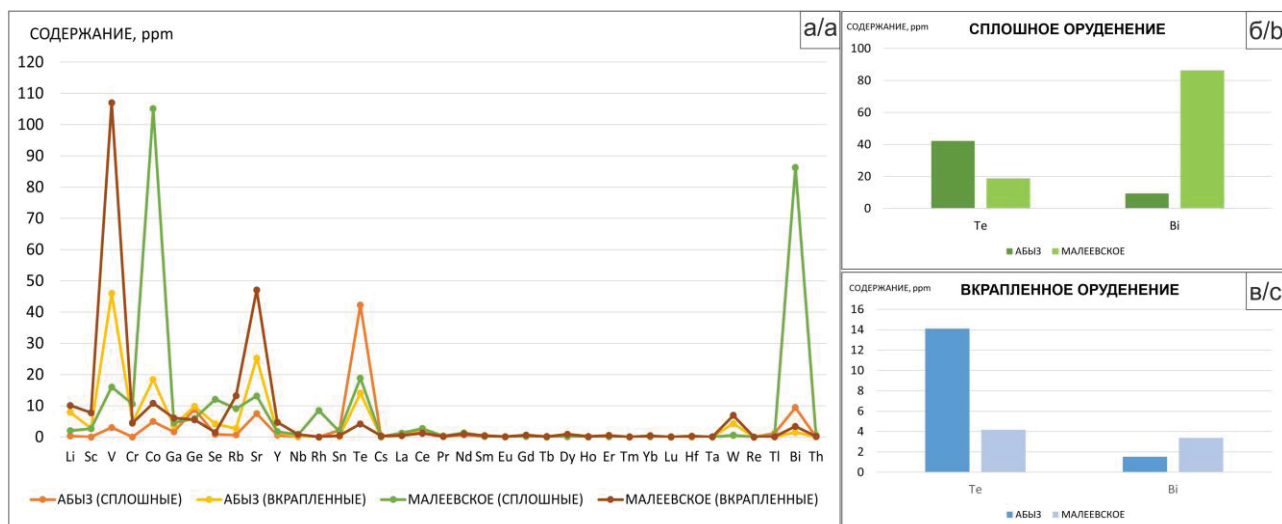


Рис. 2. а) график содержания элементов-примесей в рудах месторождений Абыз и Малеевское; б, в) сравнительные диаграммы содержания теллура и висмута в сплошных (б) и вкрапленных (в) рудах месторождений

Fig. 2. а) graph of the content of trace elements in the ores of the Abyz and Maleevskoe deposits; б, с) comparative diagrams of tellurium and bismuth content in solid (b) and disseminated (c) ores of the deposits

Анализ показал широкий спектр редких примесных элементов (рис. 2), среди которых одними из преобладающих по содержанию являются полуметалл теллур и металл висмут. При этом стоит отметить, что при сравнении содержаний данных компонентов в рудах для месторождения Абыз фиксируется преобладание Te (рис. 2, б), а для Малеевского – Bi (рис. 2, в).

Колчеданные руды месторождений Абыз (островная энсиматическая дуга) и Малеевское (островная энсиалическая дуга) имеют сходные текстурно-структурные характеристики и минеральный состав, но различаются количественными параметрами рудных минералов и элементным составом. Для месторождений наблюдаются аналогичные текстурные типы оруденения: сплошной (сливной) и вкрапленный [17].

Сплошные (сливные) руды на месторождении Абыз являются более распространенным типом оруденения и на 95–98 % сложены такими сульфидными минералами, как пирит FeS_2 , халькопирит CuFeS_2 , галенит PbS , сфалерит ZnS , спорадически тетраэдрит (минерал группы блеклых руд) $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$. В минеральном составе преобладают пирит и халькопирит, суммарно составляющие от 70 до 90 % объема рудной массы. Распределение данных минералов в руде неравномерное, при этом обычно халькопирит доминирует над пиритом. Нерудные минералы, составляющие не более 5 % объема сплошных руд, представлены кварцем и анкеритом. В качестве редких и аксессуарных минералов в сплошных рудах диагностированы арсенопирит FeAsS , рутил TiO_2 , электрум AuAg , самородное золото Au , ильменит FeTiO_3 , алтаит

PbTe , касситерит SnO_2 , теллуrowисмутит Bi_2Te_3 , кюстелит $\text{Ag}_3\text{AuTe}_2\text{S}_4$, самородная медь Cu , раклиджит $(\text{Bi, Pb})_3\text{Te}_4$, циркон ZrSiO_4 , лаутит CuAsS , ченгуодаит $\text{Ag}_9\text{FeTe}_2\text{S}_4$, гессит Ag_2Te , штютцит Ag_5Te_3 , петцит Ag_3AuTe_2 , калаверит AuTe_2 , колорадоит HgTe , монацит $(\text{Ce, La, Nd, Th})[\text{PO}_4]$ и тернемобит $(\text{Ce})-(\text{Ce, La, Nd})_2\text{Al}(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})$.

Вкрапленные руды примерно на 30–40 % сложены сульфидными и на 60–70 % – нерудными минералами. В составе сульфидов преобладают пирит и сфалерит, суммарно составляющие до 35–38 % рудной массы. В меньшем объеме в рудах данного типа диагностируются халькопирит и галенит. Нерудные минералы представлены кварцем и анкеритом, при этом в большем объеме в рудах распространены кварц. В качестве редких и аксессуарных минералов выявлены рутил TiO_2 , электрум AuAg , самородное золото Au , циркон ZrSiO_4 , теллуrowисмутит Bi_2Te_3 , раклиджит $(\text{Bi, Pb})_3\text{Te}_4$, калаверит AuTe_2 , гессит Ag_2Te , штютцит Ag_5Te_3 и монацит $(\text{Ce, La, Nd, Th})[\text{PO}_4]$.

По отношению к вмещающим породам промышленное оруденение месторождения Абыз считается эпигенетическим. Руды являются поликомпонентными и в качестве редких в них отмечаются минералы теллуrowисмутового состава: алтаит (PbTe), гессит (Ag_2Te), теллуrowисмутит (Bi_2Te_3), раклиджит $((\text{Bi, Pb})_3\text{Te}_4)$, петцит (Ag_3AuTe_2), колорадоит (HgTe). Впервые в рудах были диагностированы штютцит (Ag_5Te_3), ченгуодаит ($\text{Ag}_9\text{FeTe}_2\text{S}_4$) и калаверит (AuTe_2).

До 83 % выявленной минерализации приурочено к сплошному типу оруденения, где отмечаются такие минеральные виды, как алтаит, штютцит, гессит,

теллуrowисмутит, ченгуодаит, раклиджит, петцит, калаверит и колорадоит. Вкрапленный тип оруденения содержит в себе до 17 % диагностированных минеральных агрегатов Te-Bi состава, представленных алтаитом, гесситом, теллуrowисмутитом, раклиджитом, штютцитом и калаверитом [21, 22].

Минералы Te-Bi состава по химическому составу разделены нами на четыре системы (табл. 1). Для них выявлено многообразие форм выделения, а также общее сходство – приуроченность к сульфидным минералам.

Алтаит (PbTe), являющийся теллуридом свинца из группы галенита, – самый распространенный минерал Te-Bi минерализации. Диагностирован как в сплошном, так и во вкрапленном типе оруденения. Выявленные агрегаты отмечаются в мономи-

неральном виде, формируясь в пустотах и трещинах в пирите, халькопирите и сфалерите. Агрегаты характеризуются округлыми, овальными и каплевидными формами выделения (рис. 3, а). Также наблюдаются просечковидные формы, образовавшиеся в результате заполнения минералом трещин в минералах-хозяевах, представленных пиритом и халькопиритом. Агрегаты уплощенные, соотношение их длины и ширины составляет 15:1, при этом средняя длина составляет 10 мкм. Агрегаты овальных, каплевидных и амебообразных форм чаще всего приурочены к сфалериту, халькопириту или к контакту пирита и халькопирита. Размерность включений варьирует в пределах 1,4–18 мкм. Спорадически алтаит создает ансамбли с гесситом в зернах пирита.

Таблица 1. Общая характеристика минералов Te-Bi состава на месторождении Абыз
Table 1. General characteristics of minerals of Te-Bi composition at the Abyz deposit

Минерал Mineral	Рассчитанные усредненные формульные коэффициенты [21] Calculated average formula coefficients [21]	Минерал-хозяин Host mineral	Форма выделения Selection form	Примеси (усредненные значения) Impurities (average values)	Приуроченность к текстурно-структурному типу оруденения Confinement to the textural-structural type of mineralization
Система Pb-Bi-Te/Pb-Bi-Te system					
Алтаит Altaite	$Pb_{1.01}Te_{1.00}$	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Угловатая, неправильная, амебообразная, просечковидная Angular, irregular, amoeba-shaped, perforated	Ag (3,59 %)	Сплошной Solid
Теллуrowисмутит Tellurobismuthite	$Bi_{1.90}Te_{3.00}$	Пирит Pyrite	Угловатая, слабоизометричная со скошенными углами, овальная, каплевидная Angular, slightly isometric with beveled corners, oval, teardrop-shaped	–	Сплошной, вкрапленный Solid, interspersed
Раклиджит Raklijite	$(Bi_{2.26}, Pb_{0.75})_{3.01}Te_{4.00}$	Халькопирит, пирит, сфалерит Chalcopyrite, pyrite, sphalerite	Неправильная, слабоизометричная Irregular, weakly isometric	Ag (1,60 %) Cu (0,78 %) Fe (0,29 %)	Сплошной, вкрапленный Solid, interspersed
Система Ag-Te, Fe, S/Ag-Te, Fe, S system					
Ченгуодаит Chenguodayite	$Ag_{8.93}Fe_{0.99}Te_{1.98}S_{4.00}$	Халькопирит Chalcopyrite	Неправильная, округлая Irregular, round	–	Сплошной Solid
Гессит Gessite	$Ag_{2.01}Te_{1.00}$	Пирит, халькопирит Pyrite, chalcopyrite	Неправильная, округлая, просечковидная Irregular, round, perforated	–	Сплошной, вкрапленный Solid, interspersed
Штютцит Stuttzite	$Ag_{4.70}Te_{3.00}$	Халькопирит, пирит, кварц Chalcopyrite, pyrite, quartz	Каплевидная, округлая, просечковидная Drop-shaped, rounded, perforated	–	Сплошной, вкрапленный Solid, interspersed
Система Ag-Au-Te/Ag-Au-Te system					
Петцит Petzite	$Ag_{3.00}Au_{1.00}Te_{2.00}$	Пирит, халькопирит, кварц Pyrite, chalcopyrite, quartz	Слабоизометричная, неправильная, округлая Weakly isometric, irregular, rounded	–	Сплошной Solid
Калаверит Calaverite	$Au_{0.98}Te_{2.00}$	Пирит Pyrite	Овальная, каплевидная, округлая Oval, teardrop-shaped, round	–	Сплошной, вкрапленный Solid, interspersed
Система Hg-Te/Hg-Te system					
Колорадоит Coloradoite	$Hg_{1.00}Te_{1.00}$	Халькопирит, пирит, сфалерит Chalcopyrite, pyrite, sphalerite	Угловатая, неправильная Angular, irregular	–	Сплошной Solid

Гессит (Ag_2Te) – второй по распространенности минерал теллуру-висмутовой минерализации, обнаруженный в оруденении как сплошного, так и вкрапленного типа, при этом в первом типе отмечается большее количество агрегатов минерала. Теллурид серебра представлен в виде зернистых, неправильных, слабоокруглых агрегатов без каких-либо признаков кристаллографической огранки. Минерал сосредоточен преимущественно в трещинах и пустотах пирита (рис. 3, б) и халькопирита, спорадически заполняет интерстиции между данными сульфидами. Средний размер агрегатов варьирует в диапазоне 2–4 мкм. Зачастую гессит представлен в виде включений каплевидных форм размером до 0,5–1 мкм.

Петцит (Ag_3AuTe_2) является третьим по распространенности минералом, приуроченным исключительно к сплошному типу оруденения. В разрезе характеризуется неправильными включениями трапецевидных, прямоугольных и угловатых форм. Для теллурида наблюдается характерная черта – подчиненность к полостям с различными очертаниями. Нередко минерал заполняет интерстиции между пиритом и халькопиритом (рис. 3, в), тем самым образуя своеобразные формы выделения. Средний размер агрегатов составляет 1,45 мкм. Нередко для петцита характерно скопление зерен неправильных и округлых форм размером до 1 мкм в количестве 3–5 единиц.

Теллуровисмутит (Bi_2Te_3) является четвертым по распространенности минералом в рудах, фиксируется в оруденении сплошного и вкрапленного типов. Агрегаты образуют мономинеральные выделения в пирите (рис. 3, г). Формы их при этом достаточно разнообразные: угловатые, слабоизометричные со скошенными углами, овальные, каплевидные. Размерность теллурида висмута варьирует в диапазоне 0,5–7 мкм. Зачастую минерал образует скопления агрегатов в количестве 2–4 единиц.

Раклиджит ($(Bi,Pb)_3Te_4$) – минерал, относящийся к группе алексита, является пятым по распространенности минералом $Te-Bi$ состава. Сосредоточен как в сплошных, так и во вкрапленных рудах с преобладанием к первому типу оруденения. Агрегаты минерала заполняют микропустоты и трещины в пирите, халькопирите и сфалерите, тем самым образуя своеобразные формы выделения: от слабоизометричных до неправильных амебообразных. Практически всегда раклиджит фиксируется в виде россыпи неправильных агрегатов (рис. 3, д) в количестве от 3 до 9 единиц. Размерность зерен варьирует в диапазоне 0,11–5 мкм.

Штютцит (Ag_5Te_3) является шестым по распространенности минералом. Обнаружен в обоих типах руд с преобладанием в сплошных рудах (рис. 3, е). Агрегаты штютцита представлены не-

правильными, слабоокруглыми зернами, заключенными в трещинах и пустотах пирита и халькопирита, в единичных случаях отмечены включения неправильных агрегатов штютцита в кварце на контакте с пиритом. Для минерала не характерно скопление агрегатов, отмечаются лишь обособленные выделения размером от 0,81 до 15,79 мкм.

Калаверит ($AuTe_2$) является седьмым по распространенности минералом теллуру-висмутовой минерализации, распространен как в сплошном типе оруденения, так и во вкрапленном, с преобладанием агрегатов во втором типе. Калаверит в рудах встречается в виде агрегатов овальных, округлых и каплевидных форм. Развивается минерал исключительно по пустотным пространствам в пирите. Практически всегда халькогенид золота образует неравномерные скопления своих агрегатов (рис. 3, ж), спорадически пространственно ассоциирует с гесситом и единично с колорадоитом. Размеры агрегатов варьируют в пределах 0,25–4 мкм с преобладанием более крупных величин.

Колорадоит ($HgTe$), являющийся весьма редким минералом теллурида ртути из группы сфалерита, по распространенности представлен восьмым минералом, отмечающимся исключительно в сплошном типе оруденения. Обычно халькогенид ртути заполняет трещины и пустоты в пирите (рис. 3, з), сфалерите и халькопирите, за счет чего и образует неправильные и угловатые формы выделения. Размерность агрегатов варьирует в диапазоне 2,5–3,5 мкм. Спорадически для минерала выявлены случаи парагенетической ассоциации с калаверитом и петцитом.

Ченгуодаит ($Ag_6FeTe_2S_4$) диагностирован исключительно в сплошных рудах, не превышает 0,5 % от общего объема теллуру-висмутовой минерализации. Минерал развит исключительно в сплошных рудах, образуя неправильные микровключения размером от 2 до 9 мкм. Агрегаты зерен характеризуются неправильными иногда угловатыми формами размером от 2 до 9 мкм. Зачастую ченгуодаит заполняет трещины в халькопирите, образуя уплотненные и неправильные амебообразные агрегаты размером в среднем 5 мкм. Также для минерала характерны неравномерно вкрапленные россыпи (рис. 3, и).

Судя по обилию различных теллуридов в рудах месторождения Абыз, можно полагать, что химический потенциал теллура в гидротермальных растворах был весьма высок.

Аналогично месторождению Абыз, на месторождении Малеевское нами по текстурно-структурным особенностям выделены два типа руд.

Руды сплошного (сливного) типа, являющиеся доминирующим типом на Малеевском месторождении, на 90–95 % сложены сульфидами, где глав-

ными минералами представлены халькопирит CuFeS_2 и пирит FeS_2 , суммарно составляющие до 85 % объема рудной минерализации. Практически всегда халькопирит преобладает, но иногда отмечаются случаи, когда данные минералы находятся практически в равном соотношении. В меньшем объеме диагностированы такие сульфиды, как сфалерит ZnS , галенит PbS , тетраэдрит $(\text{Cu, Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ и арсенопирит FeAsS , спорадически проявлен молибденит MoS_2 . В качестве нерудных минералов диагностированы кварц SiO_2 , анкерит $\text{Ca}(\text{Fe, Mg, Mn})(\text{CO}_3)_2$ и барит BaSO_4 , в процентном содержании занимающие не более 5 % объема. В процессе изучения сплошных руд в качестве аксессуарных и редких минералов в них были отмечены рутил TiO_2 , самородное золото Au , электрум AuAg , ильменит FeTiO_3 , касситерит SnO_2 , циркон ZrSiO_4 , фаматинит Cu_3SbS_4 , фрейбергит $\text{Ag}_6\text{Cu}_4\text{Fe}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, гессит Ag_2Te , самородный висмут Bi , строкаит Bi_3TeS_2 , ксилингоит $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$, изоклейкит $\text{Pb}_{27}(\text{Cu, Fe})_2(\text{Sb, Bi})_{19}\text{S}_{57}$, монацит $(\text{Ce, La, Nd, Th})[\text{PO}_4]$ и рабдофан $(\text{Ce, La})\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [22–41].

Вкрапленные руды характеризуются крайне неравномерной густой вкрапленностью рудных агрегатов в нерудной массе. Обычно содержание сульфидов не превышает 45 %, в то время как нерудные минералы могут заполнять до 60 % объема руды.

Пирит со сфалеритом являются доминирующими сульфидными минералами, занимающими до 85 % объема рудной минерализации. Халькопирит, представленный второстепенным сульфидом, является цементом для пирита и сфалерита, нередко заполняет трещинки и пустоты в пирите. Зачастую в ассоциации с халькопиритом и сфалеритом встречается галенит. Спорадически в рудах присутствует тетраэдрит. Нерудные минералы представлены кварцем и анкеритом с преобладанием первого минерала. В качестве редких минералов во вкрапленных рудах выявлены барит BaSO_4 , алтаит PbTe , цервеллеит Ag_4TeS , монацит $(\text{Ce, La, Nd, Th})[\text{PO}_4]$, самородное золото Au , рутил TiO_2 , электрум AuAg , рабдофан $(\text{Ce, La})\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, плюмботеллуриит PbTeO_3 , циркон ZrSiO_4 , гессит Ag_2Te .

Оруденение на Малеевском месторождении подверглось эпигенетическим процессам. Руды характеризуются своей сложностью и поликомпонентностью. В ходе исследования установлен обширный ряд редких минералов [21, 22], приуроченных к Te-Bi минерализации: алтаит (PbTe), гессит (Ag_2Te), самородный висмут (Bi), строкаит (Bi_3TeS_2), изоклейкит ($\text{Pb}_{27}(\text{Cu, Fe})_2(\text{Sb, Bi})_{19}\text{S}_{57}$). Впервые в рудах были диагностированы цервеллеит (Ag_4TeS), ксилингоит ($\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$) и плюмботеллуриит (PbTeO_3).

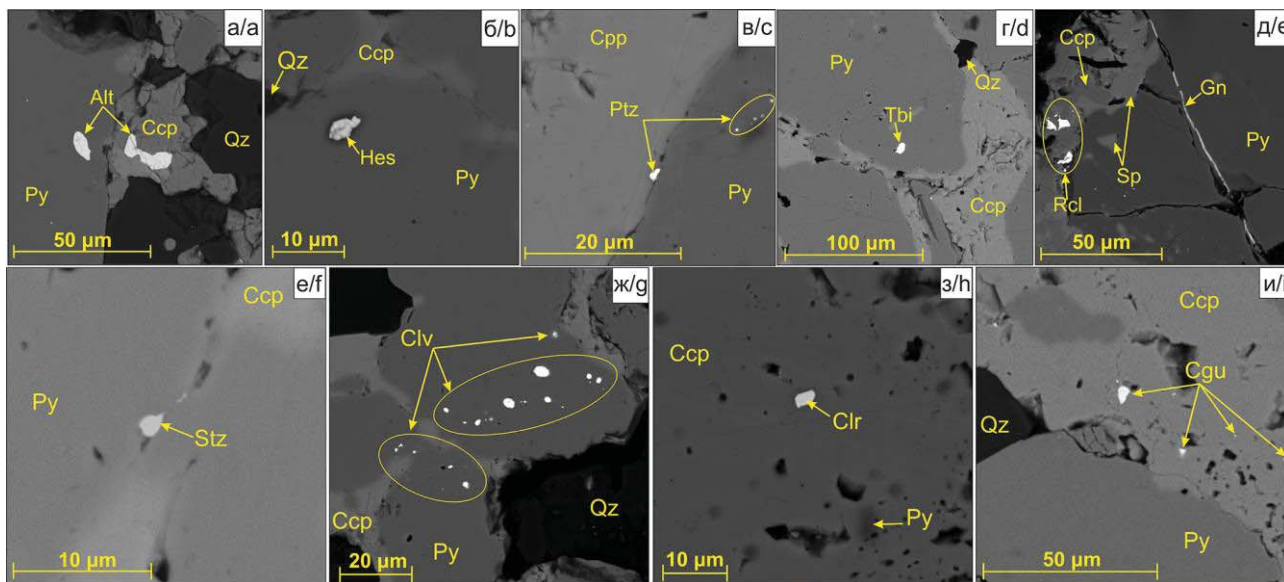


Рис. 3. Снимки со сканирующего электронного микроскопа, демонстрирующие включения алтаита (а), гессита (б), петцита (в), теллуовисмутита (г), раклиджита (д), штютцита (е), калаверита (ж), колорадоита (з), ченгуодаита (и). Условные обозначения: Py – пирит, Qz – кварц, Ccp – халькопирит, Sp – сфалерит, Gn – галенит, Alt – алтаит, Hes – гессит, Clv – калаверит, Tbi – теллуовисмутит, Rcl – раклиджит, Stz – штютцит, Cgu – ченгуодаит, Ptz – петцит, Clr – колорадоит

Fig. 3. Scanning electron microscope images showing inclusions of altaite (a), hessite (b), petzite (c), tellurobismuthite (d), raklijite (e), stuttzite (f), calaverite (g), chenguodaite (i). Legend: Py – pyrite, Qz – quartz, Ccp – chalcopyrite, Sp – sphalerite, Gn – galena, Alt – altaite, Hes – hessite, Clv – calaverite, Tbi – tellurobismuthite, Rcl – raklijite, Stz – stuttzite, Cgu – chenguodaite, Ptz – petzite, Clr – coloradoite

По распространенности минералов теллуро-висмутового состава в рудах наблюдается значительное преобладание изоклейкита ($Pb_{27}(Cu, Fe)_2(Sb, Bi)_{19}S_{57}$), далее в порядке убывания расположены самородный висмут (Bi), гессит ($AgTe_2$), алтаит ($PbTe$), сстрокаит (Bi_3TeS_2), цервеллеит (Ag_4TeS), ксилингоит ($Pb_3Bi_2S_6$) и плюмботеллуриит ($PbTeO_3$). К сплошному типу оруденения приурочено до 64 % всей Te-Bi минерализации, где диагностированы такие минеральные формы, как изоклейкит, самородный висмут, сстрокаит, гессит и ксилингоит. Практически 36 % от общего объема выявленных минеральных агрегатов теллуро-висмутового состава отмечаются во вкрапленном типе оруденения и представлены алтаитом, цервеллеитом, гесситом и плюмботеллуриитом.

Выявленные минералы разделены на три системы (табл. 2), для которых характерно многообразие форм выделения, а также общее сходство – приуроченность к сульфидным минералам.

Как было сказано ранее, самым распространенным минералом является изоклейкит ($Pb_{27}(Cu, Fe)_2(Sb, Bi)_{19}S_{57}$), диагностированный в сплошных рудах в виде неправильных агрегатов зачастую с рваными краями. В качестве обособленных выделений размером от 10 до 150 мкм, концентрирующихся в халькопирит-пиритовой массе, минерал наблюдается редко. Обычно данные агрегаты имеют четкие уплощенные контуры за счет стенок пустотных пространств (рис. 4, а). Чаще всего изоклейкит находится в парагенетической ассоциации с фрейбергитом, самородным висмутом или галенитом. Данные формы выделения приурочены обычно к сфалерит-пирит-халькопиритовой массе, а размер их не превышает 80 мкм. Наличие включений (прорастания) самородного висмута в изоклейките свидетельствует о распаде твердого вещества и срастании данных минералов [29].

Таблица 2. Общая характеристика минералов Te-Bi состава на Малеевском месторождении

Table 2. General characteristics of minerals of Te-Bi composition at the Maleevskoe deposit

Минерал Mineral	Рассчитанные усредненные формульные коэффициенты [21] Calculated average formula coefficients [21]	Минерал-хозяин Host mineral	Форма выделения Selection form	Примеси (усредненные значения) Impurities (average values)	Приуроченность к текстурно-структурному типу оруденения Confinement to the textural-structural type of mineralization
Система Ag-Pb-Te, S, O/Ag-Pb-Te, S, O system					
Алтаит Altaite	Pb _{0.97} Te _{1.00}	Халькопирит, сфалерит Chalcopyrite, sphalerite	Неправильная, угловатая Irregular, angular	Ag (3,56 %)	Вкрапленный Interspersed
Плюмботеллурит Plumbotellurite	Pb _{0.99} Te _{1.00} O _{2.82}	Рутил, пирит Rutile, pyrite	Неправильная амёбообразная Irregular, amoeba-shaped	–	Вкрапленный Interspersed
Гессит Hessite	Ag _{1.98} Te _{1.00}	Пирит Pyrite	Неправильная, округлая Irregular, round	Pb (1,28 %)	Вкрапленный, сплошной Interspersed, solid
Цервеллеит Cervellite	Ag _{4.21} Te _{1.06} S _{1.00}	Халькопирит Chalcopyrite	Неправильная, слабоизометричная, вытянутая прямоугольная Irregular, weakly isometric, elongated rectangular	Pb (1,11 %)	Вкрапленный Interspersed
Система Pb-Bi-Te, S/Pb-Bi-Te, S system					
Висмут самородный Native bismuth	Bi	Ксилингоит, изоклейкит Xilingoite, isocleukite	Ламелевидная, неправильная, эмульсионная Lamella-shaped, incorrect, emulsion	–	Сплошной/Solid
Сстрокаит Sztrokayite	Bi _{3.17} Te _{1.12} S _{2.00}	Пирит, халькопирит, анкерит Pyrite, chalcopyrite, ankerite	Проволочковидная, неправильная, угловатая Wire-like, irregular, angular	–	
Ксилингоит Xilingoite	Pb _{3.18} Bi _{2.09} S _{6.00}	Пирит, халькопирит Pyrite, chalcopyrite	Эмульсионная, неправильная Emulsion, irregular	Se (0,17 %)	
Система Pb-Bi-Sb, S, Cu, Fe/System Pb-Bi-Sb, S, Cu, Fe					
Изоклейкит Izoklakeite	(Pb _{27.14} (Cu _{1.54} , Fe _{0.49}) _{2.03} (Sb _{10.99} , Bi _{7.94}) _{18.93} S _{57.00})	Пирит, халькопирит, сфалерит Pyrite, chalcopyrite, sphalerite	Эмульсионная, неправильная Emulsion, irregular	–	Сплошной/Solid

Самородный висмут (Bi) является вторым минералом по распространенности, приурочен исключительно к сплошным рудам. Минерал отмечается в тесном парагенезисе с изоклейкиком (рис. 4, б) и ксилингоитом, образуя в нем ламелевидные и графические включения размером до 5 мкм, интерпретирующие распад твердого раствора. Данные образования (*изоклейкик±самородный висмут* или *ксилингоит±самородный висмут*) наблюдаются в пустотах пирита, арсенопирита и реже халькопирита.

Третьим минералом по распространенности является *гессит* (Ag_2Te), обнаруженный как во вкрапленных, так и в сплошных рудах. Агрегаты характеризуются неправильными, угловатыми формами, сконцентрированными в пустотах и трещинах пирита и халькопирита, а также на контакте данных сульфидов (рис. 4, в). Размер агрегатов в среднем составляет 5–10 мкм. Не раз отмечалась взаимосвязь теллурида серебра с галенитом, характеризующаяся графическими вкраплениями гессита в сульфиде.

Алтаит ($PbTe$) четвертый минерал по распространенности, диагностированный во вкрапленном типе оруденения. Сосредоточен в трещинах и пу-

стотах пирита (рис. 4, з) и халькопирита в виде неправильных, зачастую угловатых агрегатов размером 0,5–1,5 мкм. Достаточно часто устанавливается парагенетическая связь данного минерала с гесситом (Ag_2Te), что подтверждает их принадлежность к общей минеральной ассоциации.

Сстрокаит (Bi_3TeS_2) является пятым по распространенности минералом Te-Bi состава, диагностированным исключительно в сплошных рудах. Теллурид висмута развивается по пустотам в пирите, халькопирите и спорадически образует на границе кварца с анкеритом скопления включений (рис. 4, д). Более распространенные формы выделения – уплощенные проволочковидные агрегаты, образованные в результате заполнения трещин в пирите и между пиритом и халькопиритом. Данные агрегаты прерывисто заполняют пустоты, за счет чего и непродолжительны по длине – от 4 до 10 мкм. Зерна неправильных и угловатых форм обычно наблюдаются в пустотах и трещинах халькопирита или же на контакте халькопирита с кварцем, при этом зачастую отмечаются неравномерные скопления агрегатов сстрокаита в количестве 2–4 единиц. Размер агрегатов при этом варьирует в пределах 2,3–5,8 мкм.

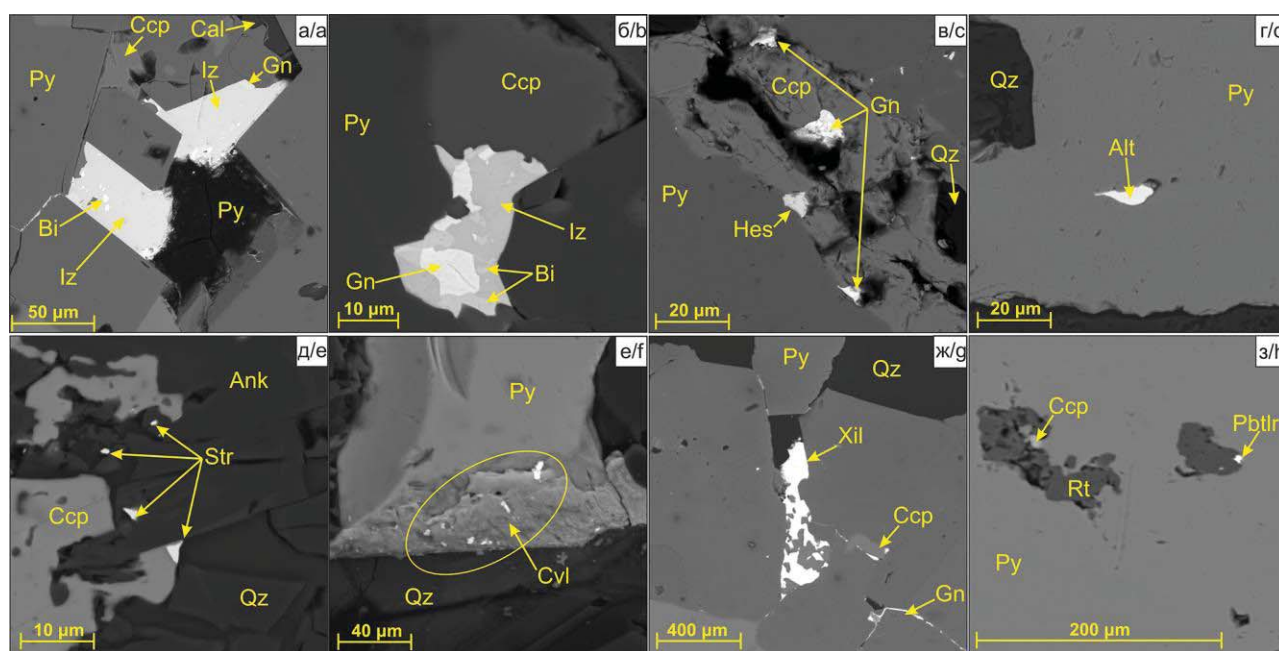


Рис. 4. Снимки со сканирующего электронного микроскопа в обратно рассеянных электронах, демонстрирующие включения в рудах изоклейкиста (а), самородного висмута (б), гессита (в), алтаита (г), сстрокаита (д), цервеллеита (е), ксилингоита (ж), плюмботеллурида (з). Условные обозначения: Py – пирит, Qz – кварц, Ank – анкерит, Ccp – халькопирит, Sp – сфалерит, Gn – галенит, Alt – алтаит, Hes – гессит, Cvl – цервеллеит, Xil – ксилингоит, Pbtlr – плюмботеллурид, Iz – изоклейкик, Bi – самородный висмут, Str – сстрокаит, Fb – фрейбергит

Fig. 4. Backscattered electron scanning electron microscope images showing inclusions in ores of izoklakeite (a), native bismuth (b), hessite (c), sztrokayite (d), cervellite (e), xilingoite (g), plumbotellurite (h). Legend: Py – pyrite, Qz – quartz, Ank – ankerite, Ccp – chalcopyrite, Sp – sphalerite, Gn – galena, Alt – altaite, Hes – hessite, Cvl – cervellite, Xil – xilingoite, Pbtlr – plumbotellurite, Iz – izoklakeite, Bi – native bismuth, Str – sztrokayite, Fb – freibergite

Цервеллеит (Ag_4TeS) является шестым по распространенности минералом. Диагностирован в рудах вкрапленного типа, где представлен агрегатами неправильных форм: вытянутыми, слабопрямоугольными, амебообразными, угловатыми. Минерал приурочен к пустотам и трещинам в пирите (рис. 4, е) и халькопирите. При этом зачастую в пирите отмечаются неравномерные скопления агрегатов данного теллурида, а в халькопирите диагностируются лишь обособленные его индивиды. Размер включений варьирует в диапазоне 1,5–3,7 мкм.

Ксилиноит ($Pb_3Bi_2S_6$) является седьмым минералом по распространенности, развит исключительно в рудах сплошного типа. Обычно сульфовисмутид свинца неравномерно заполняет трещины и пустоты в пирите и халькопирите или промежутики между данными сульфидами, образуя тем самым своеобразные неправильные формы выделения с уплощенными и зачастую занозистыми краями (рис. 4, ж). Нередко сульфид пространственно ассоциирует с самородным висмутом и фрайбергитом. Размер агрегатов составляет 35–55 мкм с преобладанием более крупных образований.

Выявленный *плюмботеллури́т* ($PbTeO_3$) представлен в виде псевдоморфоз по алтаиту. Минерал спорадически распространен во вкрапленных рудах, диагностирован в виде агрегатов неправильных форм, приуроченных к таким минералам, как рутил и пирит. В рутиле, заключенном в пирите, минерал концентрируется обычно на его периферии (рис. 4, з) в виде неправильных зерен размером до 2,6 мкм. Второй вариант отложения теллуридного минерала – заполнение пустот и трещин в пирите. В данном случае агрегаты прерывисты и обычно имеют неровные или извилистые края. Размер данных включений составляет 10–20 мкм.

Последовательность минералообразования

С целью расшифровки условий образования теллуро-висмутовой минерализации в колчеданных рудах месторождения Абыз и Малеевское особое внимание было уделено термобарогеохимическому изучению флюидных (газово-жидких) включений (ГЖВ) [22–28] в жильном кварце.

По результатам исследований распределение температур по стадиям минералообразования (табл. 3) на месторождении Абыз следующее:

- менее 110 °С – пострудная стадия (карбонат-кварцевая ассоциация);
- 113–236 °С – рудная стадия золото-серебровисмут-теллуридной ассоциации;
- 245–300 °С – рудная стадия золото-сульфидной ассоциации;
- 305–350 °С – дорудная стадия (березитовая ассоциация).

Дорудная стадия представлена березитовой ассоциацией, по минеральному составу характеризующейся кварц-серицитовыми, серицит-кварцевыми и серицит-анкерит-кварцевыми метасоматитами. В данную стадию активно отлагались такие минералы, как кварц SiO_2 I генерации, анкерит $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ I генерации, серицит $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)$ и мусковит $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)$. На завершении стадии формировался пирит FeS_2 I генерации. Температура минералообразования данной стадии находится в пределах 350–305 °С. Давление минералообразующего флюида оценивается в интервале 1150–810 бар.

В пределах *рудной стадии* выделено две ассоциации: золото-сульфидная и золото-серебровисмут-теллуридная.

В золото-сульфидную ассоциацию формировались главные рудные сульфидные минералы: пирит FeS_2 II генерации, халькопирит $CuFeS_2$, сфалерит ZnS , галенит PbS , арсенопирит $FeAsS$. На завершении формирования данной ассоциации в качестве редких и очень редких минералов образовывались лаутит $CuAsS$, электрум $AuAg$ и самородное золото Au . Среди нерудных минералов развивались кварц SiO_2 и анкерит $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ II генераций. Температура минералообразования в данную ассоциацию составляет 300–245 °С. Давление минералообразующего флюида варьирует в диапазоне 790–550 бар.

Во вторую рудную ассоциацию, непосредственно золото-серебровисмут-теллуридную, происходит позднее наложение на ранние сульфиды кюстелита $AgAu$, а также теллуро-висмутовых минералов: гессита Ag_2Te , петцита Ag_3AuTe_2 , калаверита $AuTe_2$, алтаита $PbTe$, раклиджита $(Bi,Pb)_3Te_4$, штютцита Ag_5Te_3 , колорадоита $HgTe$ и теллуrowисмутита Bi_2Te_3 . Среди нерудных минералов отмечаются кварц SiO_2 и анкерит $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ III генераций. Температура минералообразования данной ассоциации варьировалась в диапазоне 236–113 °С, а давление не превышало 550–300 бар.

Завершает процесс минералообразования *пострудная стадия*, представленная карбонат-кварцевой ассоциацией. На протяжении данной стадии происходит кристаллизация кварца SiO_2 IV генерации. В качестве просечек, прожилков и неправильных обособленных агрегатов формируется анкерит $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ IV генерации. Температура минералообразования данной стадии составляет менее 110 °С, а давление не превышает 310 бар.

Высокотемпературный гидротермальный процесс [7, 19, 20, 23–29] на Малеевском месторождении был длительным и проявился в три последовательные стадии (табл. 4): дорудную, рудную и пострудную [29].

Таблица 3. Схема последовательности минералообразования на месторождении Абыз

Table 3. Scheme of the sequence of mineral formation at the Abyz deposit

СТАДИЯ	ДОРУДНАЯ	РУДНАЯ		ПОСТРУДНАЯ
Минеральная ассоциация	Березитовая	Золото-сульфидная	Золото-серебро-висмут-теллуридная	Карбонат-кварцевая
Минералы				
КВАРЦ	I	II	III	IV
АНКЕРИТ	I	II	III	IV
СЕРИЦИТ	I	II	III	IV
МУСКОВИТ	I	II	III	IV
ПИРИТ	I	II	III	IV
АРСЕНОПИРИТ	I	II	III	IV
ХАЛЬКОПИРИТ	I	II	III	IV
СФАЛЕРИТ	I	II	III	IV
ГАЛЕНИТ	I	II	III	IV
ТЕТРАЭДРИТ	I	II	III	IV
БОРНИТ	I	II	III	IV
ПИРРОТИН	I	II	III	IV
КУБАНИТ	I	II	III	IV
ПИРАГИТ	I	II	III	IV
СТЕФАНИТ	I	II	III	IV
ЭЛЕКТРУМ	I	II	III	IV
ЛАУТИТ	I	II	III	IV
ЭНАРГИТ	I	II	III	IV
ТЕННАНТИТ	I	II	III	IV
САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО	I	II	III	IV
ПРУСТИТ	I	II	III	IV
МЕДЬ	I	II	III	IV
АЛТАИТ	I	II	III	IV
КЮСТЕЛИТ	I	II	III	IV
ПЕТИЦИТ	I	II	III	IV
КАЛАВЕРИТ	I	II	III	IV
ГЕССИТ	I	II	III	IV
ЧЕНГУОДАИТ	I	II	III	IV
ШТЮЦИТ	I	II	III	IV
РАКЛИДЖИТ	I	II	III	IV
КОЛОРАДОИТ	I	II	III	IV
ТЕЛЛУРОВИСМУТИТ	I	II	III	IV
Т °С	350...305	300...245	236...113	110...80
Давление, бар	1150...810	790...550	550...300	310...190
Соленость, мас. % экв. NaCl	7...5,5	8,5...7	10...8	5...2,7
Состав растворов	H ₂ O+NaCl	H ₂ O+NaCl+Na ₂ SO ₄	H ₂ O+NaCl+Na ₂ SO ₄	H ₂ O+NaCl
Тектонические подвижки, интенсивность их проявления	↑	↑	↑	↑
Текстуры	Сплошная, вкрапленная, прожилковая, гнездовая			
Структуры	Идио-аллю-гипидиоморфнозернистая, лепидо-гетеро-гранобластовая, коррозионная, эмульсионная, цементная, решетчатая, графическая, метаколлоидная, реликтовая, осколочная, ситовидная, пойкилитовая, структура распада твердых растворов.			

В *дорудную стадию*, представленную березитовой ассоциацией, происходит образование кварц-серицитовых, серицит-кварцевых и анкерит-серицит-кварцевых метасоматитов. На протяжении данной стадии отлагались кварц SiO₂ I генерации, анкерит Ca(Fe,Mg,Mn)(CO₃)₂ I генерации, серицит KAl₁₂[AlSi₃O₁₀](OH). На завершении стадии кристаллизовался пирит FeS₂ I генерации. По результа-

там проведенных термобарогеохимических исследований температурный диапазон минералообразования для данной стадии составляет 360–305 °С. Давление минералообразующего флюида оценивается в интервале 1000–850 бар.

Рудная стадия представлена двумя ассоциациями: золото-сульфидной и серебро-висмут-теллурид-сульфидной.

Таблица 4. Схема последовательности минералообразования на месторождении Малеевское

Table 4. Scheme of the sequence of mineral formation at the Maleevskoe deposit

СТАДИЯ	ДОРУДНАЯ	РУДНАЯ		ПОСТРУДНАЯ
Минеральная ассоциация	Березитовая	Золото-сульфидная	Серебро-висмут-теллурид-сульфидная	Кварц-карбонатная
Минералы				
КВАРЦ	I	II	III	IV
АНКЕРИТ	I	II	III	IV
СЕРИЦИТ	I			
ПИРИТ	I	II	III	
АРСЕНОПИРИТ		I	II	
ХАЛЬКОПИРИТ		I	II	
МОЛИБДЕНИТ		I	II	
СФАЛЕРИТ		I	II	
ГАЛЕНИТ		I	II	
ТЕТРАЭДРИТ		I	II	
МАРКАЗИТ		I	II	
ГУДМУНДИТ		I	II	
ДИГЕНИТ		I	II	
САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО		I	II	
ФАМАТИНИТ		I	II	
ФРАЙБЕРГИТ		I	II	
ИЗОКЛЕЙКИТ		I	II	
НИСБИТ		I	II	
КСИЛИНГОИТ		I	II	
ВИСМУТ		I	II	
ССТРОКАИТ		I	II	
ФАЗА $PbAg_2Te$		I	II	
ГЕССИТ		I	II	
АРГЕНИТ		I	II	
ПЛЮМБОТЕЛЛУРИТ		I	II	
АЛТАИТ		I	II	
ЦЕРВЕЛЛЕИТ		I	II	
Т °С	360...305	315...280	280...150	150...80
Давление, бар	1000...850	840...630	615...400	380...205
Соленость, мас. % экв. NaCl	6,6...4,5	12,4...7	16,1...13,5	6...2,1
Состав растворов	$H_2O+NaCl$	$H_2O+MgCl_2+CO_2$	$H_2O+NaCl+MgCl_2+CO_2$	$H_2O+NaCl$
Тектонические подвижки, интенсивность их проявления	↑	↑	↑	↑
Текстуры	Сплошная, вкрапленная, прожилковая, гнездовая			
Структуры	Идио-алло-гипидиоморфнозернистая, лепидо-гетеро-гранобластовая, коррозионная, эмульсионная, цементная, решетчатая, графическая, метаколлоидная, реликтовая, осколочная, ситовидная, пойкилитовая, структура распада твердых растворов.			

В золото-сульфидную ассоциацию формировались главные рудные минералы: пирит FeS_2 II генерации, арсенопирит $FeAsS$, халькопирит $CuFeS_2$, сфалерит ZnS , галенит PbS , тетраэдрит $(Cu,Fe)_{12}Sb_4S_{13}$, молибденит MoS_2 . На завершении стадии в качестве редких и очень редких минералов образовались фаматинит $Cu_3Sb_4S_4$, фрайбергит $Ag_6Cu_4Fe_2Sb_4S_{13}$, самородное золото Au . Среди нерудных минералов развивались кварц SiO_2 и анкерит $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ II генерации. Температура минералообразования в данную ассоциацию составляла 315–280 °С. Давление минералообразующего флюида равнялось 840–630 бар.

Во вторую рудную ассоциацию, непосредственно серебро-висмут-теллурид-сульфидную, кристаллизовались пирит FeS_2 , галенит PbS и халькопирит $CuFeS_2$ III генерации. Далее наблюдается образование минералов теллуру-висмутового состава, представленных строкаитом Bi_3TeS_2 , ксилингоитом $Pb_3Bi_2S_6$, изоклейкитом $(Pb_{27}(Cu,Fe)_2(Sb,Bi)_{19}S_{57})$, висмутом самородным Bi , гесситом Ag_2Te , цервеллеитом Ag_4TeS , алтаитом $PbTe$, плюмботеллуридом $PbTeO_3$. Температура минералообразования данной ассоциации варьирует в диапазоне 280–150 °С, а давление составляет 615–400 бар.

Пострудная стадия, представленная кварц-карбонатной ассоциацией, завершает минералообразование на месторождении. В преобладающем объеме на протяжении всей стадии образовывается кварц IV генерации и в ее завершении анкерит IV генерации. Температура образования пострудной стадии составляет менее 150 °С, а давление варьирует в диапазоне 380–205 бар.

Перспективы развития минерально-сырьевой базы на теллур и висмут в пределах территории Центрального и Восточного Казахстана

Для повышения эффективности отработки колчеданных месторождений на перспективу необходимо взять постоянное восполнение запасов минерального сырья. Выполненные исследования показали четкое различие металлогении колчеданных месторождений, приуроченных к палеоокеаническим и палеоконтинентальным структурам Казахстана. По полученным результатам исследования можно сделать вывод, что ресурсный фонд энсиалических и энсиматических комплексов Казахстана могут дополнить такие элементы-спутники, как полуметалл Те и металл Вi, при этом для энсиалических комплексов отмечается преобладание висмутового элемента, а для энсиматических – теллуrowого (рис. 2, б, в).

Чингиз-Тарбагатайская зона Восточного Казахстана, согласно современным геодинамическим представлениям, является фрагментом раннесреднепалеозойской активной окраины Казахстанского палеоконтинента [42]. В пределах *Чингиз-Тарбагатайской островной дуги* (рис. 1) известно более 20 колчеданных месторождений, вещественный состав которых близок с месторождением Абыз. Прежде всего это месторождения Майкаинской группы (Майкаин Малый, Большой, А, В, а также Красная Горка и Придорожное), расположенные в Баянаульском районе Павлодарской области. Месторождения данного типа состоят из сингенетичных, массивных или полумассивных сульфидных линз или пластов. Колчеданные залежи в основном сложены пиритом с подчиненным количеством медных минералов (преимущественно халькопиритом и в меньшем объеме блеклой рудой), галенита, сфалерита, арсенопирита, кварца и барита. Основные компоненты руд: медь, свинец, золото, серебро, сера пиритная, барит. Месторождения имеют низкие-средние показатели Au (0,5–2,9 г/т) и средние-высокие содержания Cu (1,3–5 г/т), что позволяет отнести их по запасам к месторождениям среднего типа [43]. Схожие вещественные параметры рудных тел месторождений Майкаинского типа с месторождением Абыз, а также приуроченность их к одноименной островной энсиматической дуге позволяют спрогнозировать в них возможность попутной добычи теллура из колчеданных руд.

В пределах *Рудно-Алтайской островной дуги* (рис. 1) выделяются колчеданные месторождения Зырянского рудного узла (Греховское, Майское, Зырянское, Богатыревское, Парыгинское, Бухтарминское и др.) аналогичные по вещественному составу с изученным месторождением Малеевское.

Формы рудных тел практически всех месторождений имеют схожие черты строения. Колчеданное оруденение на рудноалтайских месторождениях складывает стратифицированные рудные залежи пластообразной и линзовидной форм среди горизонтов терригенно-осадочных пород. Минеральный состав руд в основном представлен пиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, арсенопиритом, молибденитом и кварцем. Основные компоненты руд: медь, свинец, золото, серебро. Помимо данных компонентов присутствуют элементы-примеси, представленные кадмием, ртутью, молибденом, кобальтом, мышьяком, сурьмой, висмутом, теллуrowом, селеном и никелем [2, 5]. Часть месторождений Зырянского рудного района (Долинное, Тишинское, Зырянское) характеризуются повышенными содержаниями Au (0,5–5,0 г/т) и низкими Cu (0,1–0,6 г/т), а другая часть (Греховское, Майское, Бухтарминское и др.) наоборот – средними и высокими содержаниями Cu (1,3–5 %) и низкими-средними Au (0,4–3 %), на основании этого колчеданные месторождения данного узла по запасам относятся к среднему типу [43]. За счет аналогичных вещественных характеристик оруденения Малеевского месторождения с месторождениями Зырянского рудного района, а также приуроченности к одноименным рудному узлу и островной дуге можно прогнозировать в них потенциал попутной добычи висмута из руд.

Полученные результаты позволяют по-новому подойти к стратегии прогнозирования ресурсов минерального сырья колчеданных месторождений-аналогов Абыз и Малеевского, сформированных в подобных геодинамических обстановках на территории Казахстана. Реализация данных прогнозов будет способствовать укреплению минерально-сырьевой базы страны.

Заключение

Для месторождений выполнен сравнительный анализ вещественных комплексов рудных тел, где детально изучены условия формирования и закономерности распределения теллуrowо-висмутовой минерализации. В результате исследований было установлено, что колчеданные руды месторождений Абыз и Малеевское характеризуются довольно сложным минеральным составом, связью минералов между собой и большим набором парагенезисов. Месторождения имеют многостадийное формирование и близкий механизм рудоотложения со сходными физико-химическими условиями образования руд.

В колчеданных рудах месторождений выявлено многообразие теллуру-висмутовой минерализации. Впервые нами в рудах Малеевского месторождения выделены плумботеллурит $PbTeO_3$, цервеллеит Ag_4TeS и ксиллингоит $Pb_3Bi_2S_6$. В свою очередь, в рудах месторождения Абыз диагностированы такие ранее не известные минералы, как калаверит $AuTe_2$, ченгуодаит $Ag_9FeTe_2S_4$, раклиджит $(Bi, Pb)_3Te_4$ и штютцит Ag_5Te_3 .

Взаимоотношения между основными рудными сульфидными минералами и минералами $Te-Bi$ состава в рудах месторождений, а именно развитие их по трещинам, пустотам или на периферии суль-

фидов, указывают на то, что отложение их происходило на завершении рудной стадии. Температурные данные флюидных включений позволяют отнести руды с преобладанием Te (месторождение Абыз) к низкотемпературным, а Bi (месторождение Малеевское) – к мезотермальным.

Комплексное исследование распределения теллуру-висмутовой минерализации в колчеданных рудах также дает возможность оптимизации качества конечного продукта, что, в свою очередь, повышает эффективность и рентабельность производства цветных металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаськов И.В. Особенности развития колчеданных рудно-магматических систем в островодужных обстановках Рудного Алтая и Южного Урала // Литосфера. – 2015. – № 2. – С. 17–39.
2. Мазуров А.К. Металлогеническое районирование Казахстана // Вестник Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 4. – С. 33–39.
3. Попов В.В. Региональные палеотектонические факторы образования крупных полиметаллических месторождений Рудного Алтая // Геология рудных месторождений. – 1998. – Т. 40. – № 4. – С. 370–378.
4. Дегтярев К.Е., Рязанцев А.В. Кембрийская коллизия дуга-континент в палеозоидах Казахстана // Геотектоника. – 2007. – № 1. – С. 71–96.
5. Большой Алтай (геология и металлогения). В 3 кн. Кн. 2. Металлогения / Г.Н. Щерба, Х.А. Беспяев, Б.А. Дьячков и др. – Алматы: РИО ВАК РК, 2000. – 400 с.
6. Козлов М.С. Условия формирования Рудноалтайской металлогенической провинции // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57. – № 4. – С. 299–326.
7. Викентьев И.В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. – М.: Научный мир, 2004. – 344 с.
8. 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.
9. Древнейшие гранитоиды Чингиз-Тарбагатайской палеостроводужной системы (Восточный Казахстан): обоснование возраста и особенности состава / К.Е. Дегтярев, А.А. Третьяков, М.В. Луцицкая, Н.Л. Вахтина, Е.Б. Сальникова // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). – 2023. – № 21. – С. 69–71.
10. Нехорошев В.П. Геология Алтая. – М.: Росгеолтехиздат, 1958. – 262 с.
11. К проблеме формирования колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая / Б.А. Дьячков, М.А. Мизерная, А.П. Пяткова, А.Е. Бисатова, А.П. Мирошникова, О.Н. Кузьмина, Н.А. Зиманская, Т.А. Ойцева, З.А. Черненко // Отечественная геология. – 2021. – № 5. – С. 3–16.
12. Geological history of the Great Altai: implications for mineral exploration / B.A. Dyachkov, M.A. Mizernaya, S.V. Khromykh, A.Y. Bissatova, T.A. Oitseva, A.P. Miroshnikova, O.V. Frolova, O.N. Kuzmina, N.A. Zimanovskaya, A.P. Pyatkova, K. Zikirova, O.V. Ageyeva, Y.T. Yeskaliyev // Minerals. – 2022. – Vol. 744. – № 12 (6). – P. 1–23.
13. Дьячков Б.А., Титов Д.В., Сапаргалиев Е.М. Рудные пояса Большого Алтая и оценка их перспектив // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51. – № 3. – С. 222–238.
14. Оценка экотоксичности висмута по активности каталазы в зависимости от химического соединения и буферности почв / Л.В. Судына, С.И. Колесников, Т.В. Минникова, Т.А. Тер-Мисакянц, Е.Н. Неведомая, К.Ш. Казеев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2021. – № 2 (210). – С. 126–133.
15. Оценка экотоксичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов, содержащихся в отходах предприятий горной промышленности / Н.А. Естегнеева, С.И. Колесников, Т.В. Минникова, А.Н. Тимошенко // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5-1. – С. 73–85.
16. Минералогическая карта Казахстана / Л.А. Мирошниченко, Н.М. Жуков, Х.А. Беспяев, Б.С. Ужкенов, А.К. Мазуров, А.Л. Киселев, Ф.Г. Губайдулин, Т.М. Жаутиков, Э.С. Воцалевский, Д.А. Шлыгин, В.М. Пилифосов, Т.М. Шлыгина // Геология Казахстана. – 2001. – Т. 3–4 (371–372). – С. 73–85.
17. 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.
18. Колчеданные месторождения энзиматических островных дуг Казахстана на примере месторождения Абыз / А.К. Мазуров, М.А. Рудмин, Ш.Ж. Байболова, Т.В. Кряжева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 28–37.
19. 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.
20. 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.

21. Mineralogy Database. URL: <https://www.webmineral.com> (дата обращения 17.04.2024).
22. Николаева А.Н. Теллур и висмут в колчеданных месторождениях Казахстана // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии: XXXIV Молодежная научная школа-конференция памяти К.О. Кратца и Ф.П. Митрофанова. – СПб, 2–6 октября 2024. – СПб: Свое издательство, 2023. – С. 149–152.
23. Плечов П.Ю. Методы исследования флюидных и расплавных включений. – М.: Изд-во «КДУ», 2014. – 268 с.
24. Кормушин В.А. Метод гомогенизации газовой-жидких включений в минералах / под ред. Н.Г. Сыромятникова. – Алма-Ата: Наука, 1982. – 72 с.
25. Прокофьев В.Ю. Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов (по данным исследования флюидных включений). – Новосибирск: Наука, 2000. – 186 с.
26. Наумов В.А., Дорофеева В.А., Миронова О.Ф. Основные физико-химические параметры природных минералообразующих флюидов // Геохимия. – 2009. – № 8. – С. 825–851.
27. Manning C.E. Fluids of the lower crust: deep is different // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 2018. – Vol. 46. – P. 67–97.
28. German C.R., Von Damm K.L. Hydrothermal Processes // Treatise on Geochemistry. – 2003. – Vol. 6–9. – P. 181–222.
29. Николаева А.Н., Мазуров А.К. Теллурио-висмутовая минерализация в рудах Малеевского колчеданного месторождения (Восточный Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 233–250. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4209
30. Гусева А.И., Гусев Н.И. Висмутовое оруденение Республики Алтай: типизация и прогнозная оценка // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 3. – С. 52–57.
31. 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.
32. 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.
33. Au-Ag-Te-Rich melt inclusions in hydrothermal gold-quartz veins, Xiaolinling 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. Mineralogy and geochemistry of Cu-Rich ores from the McCreedy east Ni-Cu-PGE deposit (Sudbury, Canada): implications for the behavior of platinum group and chalcophile elements at the end of crystallization of a sulfide liquid / S.A.S. Dare, S.-J. Barnes, H.M. Prichard, P.C. Fisher // Economic Geology. – 2014. – Vol. 109. – P. 343–366.
42. Царева М.Д., Хромых С.В., Котлер П.Д. Петрография и вещественный состав щелочных интрузий Чингиз-Тарбагатайской зоны Восточного Казахстана // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXX Всероссийской молодежной конференции. – Иркутск, 16–21 мая 2023. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. – С. 297–299.
43. Рафаилович М.С. Крупнотоннажные месторождения золота и цветных металлов Казахстана и соседних регионов Центральной Азии // Известия НАН РК. Серия геологическая. – 2010. – № 6. – С. 12–30.

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. nikolaevaanas759@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: 19.05.2024

Поступила после рецензирования: 10.06.2024

Принята к публикации: 14.06.2024

REFERENCES

1. 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.)
2. Mazurov A.K. Metallogenic zoning of Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 4, pp. 33–39. (In Russ.)
3. 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.)
4. Degtyarev K.E., Ryazantsev A.V. Cambrian arc-continent collision in the paleozooids of Kazakhstan. *Geotectonics*, 2007, no. 1, pp. 71–96. (In Russ.)
5. Shcherba G.N., Bespaev Kh.A., Dyachkov B.A. and others. *Great Altai (geology and metallogeny). B. 2. Metallogeny*. Almaty, RIO VAK RK Publ., 2000. 400 p. (In Russ.)
6. 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.)
7. Vikentyev I.V. *Conditions of formation and metamorphism of pyrite ores*. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2004. 344 p. (In Russ.)
8. 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.
9. Degtyarev K.E., Tretyakov A.A., Luchitskaya M.V., Vakhtina N.L., Salnikova E.B. The oldest granitoids of the Chingiz-Tarbagatai paleo-island-arc system (Eastern Kazakhstan): justification of age and compositional features. *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent)*, 2023, no. 21, pp. 69–71. (In Russ.)
10. Nekhoroshev V.P. *Geology of Altai*. Moscow, Rosgeoltekhizdat Publ., 1958. 262 p. (In Russ.)
11. Dyachkov B.A., Mizernaya M.A., Pyatkova A.P., Bisatova A.E., Miroshnikova A.P., Kuzmina O.N., Zimanskaya N.A., Oitseva T.A., Chernenko Z. A. On the problem of the formation of pyrite-polymetallic deposits of Rudny Altai. *Domestic Geology*, 2021, no. 5, pp. 3–16. (In Russ.)
12. Dyachkov B.A., Mizernaya M.A., Khromykh S.V., Bissatova A.Y., Oitseva T.A., Miroshnikova A.P., Frolova O.V., Kuzmina O.N., Zimanovskaya N.A., Pyatkova A.P., Zikirova K., Ageyeva O.V., Yeskaliyev Y.T. Geological history of the Great Altai: implications for mineral exploration. *Minerals*, 2022, vol. 744, no. 12 (6), pp. 1–23.
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. Sudina L.V., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Ter-Misakayants T.A., Nevedaya E.N., Kazeev K.Sh. Assessment of the ecotoxicity of bismuth based on catalase activity depending on the chemical compound and soil buffering capacity. *News of universities. North Caucasus region. Natural Sciences*, 2021, no. 2 (210), pp. 126–133. (In Russ.)
15. Estegneeveva N.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N. Toxicity estimate of heavy metals, metalloids and nonmetals contained in mineral mining waste. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2023, vol. 5-1, pp. 73–85. (In Russ.)
16. Miroshnichenko L.A., Zhukov N.M., Bespaev Kh.A., Uzhkenov B.S., Mazurov A.K., Kiselev A.L., Gubaidulin F.G., Zhahtikov T.M., Votsalevsky E. S.S., Shlygin D.A., Pilifosov V.M., Shlygina T.M. Mineragenic map of Kazakhstan. *Geology of Kazakhstan*, 2001, vol. 3–4 (371–372), pp. 73–85. (In Russ.)
17. 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.)
18. Mazurov A.K., Rudmin M.A., Baibolova Sh.Zh., Kryazheva T.V. Pyrite deposits of ensimatic island arcs of Kazakhstan on the example of the Abyz deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 28–37. (In Russ.)
19. 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 Maleevskoe deposit. *Bulletin of the East Kazakhstan State Technical University named after D. Serikbaev*, 2018, no. 4 (82), pp. 32–38. (In Russ.)
20. Yudovskaya M.A. *Mineralogical and geochemical features and conditions for the formation of ores of the Maleevsky deposit in Rudny Altai*. Cand. Dis. Ust-Kamenogorsk, 1984. 209 p. (In Russ.)
21. *Mineralogy Database*. Available at: <https://www.webmineral.com> (accessed 14 April 2024).
22. Nikolaeva A.N. Tellurium and bismuth in pyrite deposits of Kazakhstan. *XXXIV Youth Scientific School-Conference in Memory of K.O. Kratz and F.P. Mitrofanov. Current problems of geology, geophysics and geoecology*. St. Petersburg, October 2–6, 2024. St. Petersburg, Own Publ. house, 2023. pp. 149–152. (In Russ.)
23. Plechov P.Yu. *Methods for studying fluid and melt inclusions*. Moscow, KDU Publ., 2014. 268 p. (In Russ.)
24. Kormushin V.A. *Method of homogenization of gas-liquid inclusions in minerals*. Alma-Ata, Nauka Publ., 1982. 72 p. (In Russ.)
25. 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.)
26. 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.)
27. Manning C.E. Fluids of the lower crust: deep is different. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2018, vol. 46, pp. 67–97.
28. German C.R., Von Damm K.L. Hydrothermal Processes. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 6–9, pp. 181–222.
29. 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. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4209
30. 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.)

31. Zhang Y., Zhen S., 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.
32. 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.
33. 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.
34. Bujtor L., Gyollai I., Szabo 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, no. 125, pp. 1–22.
35. 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.
36. 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, 305, pp. 1–18.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. Dare S.A.S., Barnes S.-J., Prichard H. M., Fisher P.C. Mineralogy and geochemistry of Cu-Rich ores from the McCreedy east Ni-Cu-PGE deposit (Sudbury, Canada): implications for the behavior of platinum group and chalcophile elements at the end of crystallization of a sulfide liquid. *Economic Geology*, 2014, vol. 109, pp. 343–366.
42. Tsareva M.D., Khromykh S.V., Kotler P.D. Petrography and material composition of alkaline intrusions of the Chingiz-Tarbagatai zone of Eastern Kazakhstan. *Structure of the lithosphere and geodynamics. Materials of the XXX All-Russian Youth Conference*. Irkutsk, May 16–21, 2023. Irkutsk, Institute of the Earth's Crust SB RAS Publ., 2023. pp. 297–299. (In Russ.)
43. Rafailovich M.S. Large-tonnage deposits of gold and non-ferrous metals in Kazakhstan and neighboring regions of Central Asia. *Izvestiya NAS RK. Geological series*, 2010, no. 6, pp. 12–30. (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: 19.05.2024

Revised: 10.06.2024

Accepted: 14.06.2024