

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Николаева Анастасия Николаевна

**ТЕЛЛУРО-ВИСМУТОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В КОЛЧЕДАННЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЯХ АБЫЗ И МАЛЕЕВСКОЕ (РЕСПУБЛИКА
КАЗАХСТАН)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.10 – Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых,
минералогия

Томск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Мазуров Алексей Карпович

доктор геолого-минералогических наук,
профессор отделения геологии Инженерной
школы природных ресурсов Национального
исследовательского Томского политехнического
университета

Официальные оппоненты:

Масленников Валерий Владимирович

доктор геолого-минералогических наук, член-
корреспондент РАН, профессор, заведующий
кафедрой «Геология» Национального
исследовательского Южно-Уральского
государственного университета

Казаченко Валентин Тимофеевич

доктор геолого-минералогических наук, главный
научный сотрудник лаборатории нелинейной
металлогении Дальневосточного Геологического
Института

Защита диссертации состоится «10» октября 2024 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.28 при ФГАОУ ВО «Национальный Исследовательский Томский Политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.28,
кандидат геолого-минералогических
наук, доцент

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and strokes.

Рудмин Максим Андреевич

Введение

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

Во многих работах по исследованию территории Казахстана сделаны акценты на изучение и увязку особенностей металлогении месторождений с разнотипными геодинамическими обстановками (Мирошниченко, 2001; Викентьев, 2004; Мазуров, 2005; Гаськов, 2015; Козлов, 2015 и др.). Среди прочего отмечается, что наиболее богатыми элементами примесей являются колчеданные месторождения, приуроченные к палеоостроводужным геодинамическим обстановкам (Мирошниченко, 2001). Колчеданные руды имеют сложный и разнообразный химический состав, включающий в себя широкий спектр примесных элементов. В 70–90-х годах 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 малоисследованными металлоид теллур и металл висмут.

Актуальность настоящего исследования обусловлена дефицитом информации о поведении и формах нахождения нетрадиционных видов полезных ископаемых в виде рассеянных металлов (-идов), таких как теллур и висмут, в рудах колчеданных месторождений Казахстана, сформированных в палеоостроводужных обстановках. Помимо это, в экологических соображениях необходимость извлечения данных элементов из руд заключается в их токсичности и существенном вкладе в деградацию почвенного покрова (Судьина и др., 2019; Естегнеева и др., 2023). Несмотря на то, что экологические последствия загрязнения почв висмутом (Bi) и теллуrom (Te) исследованы весьма мало, масштабы и степень загрязнения ими почв с каждым годом увеличиваются. Шлаки, образующиеся в результате плавки руд и концентратов, вместе с другими металлургическими отходами, такими как хвостохранилища, все чаще становятся предметом серьезных экологических споров. Одним из способов снижения негативного воздействия шлаковых отходов на окружающую среду является попутное извлечение поллютантов из руд и дальнейшее их применение в качестве товарных продуктов (сплавы, термоэлектрические материалы, узкозонные полупроводники, производство пигментов, керамики и многое другое).

Цель работы: изучение и сравнение условий формирования и закономерностей распределения теллуру-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений, приуроченных к островодужным палеогеодинамическим обстановкам, на примере месторождений Абыз и Малеевское (рисунок 1). Решение данного вопроса весьма важно и актуально как в научном, так и в прикладном отношении.

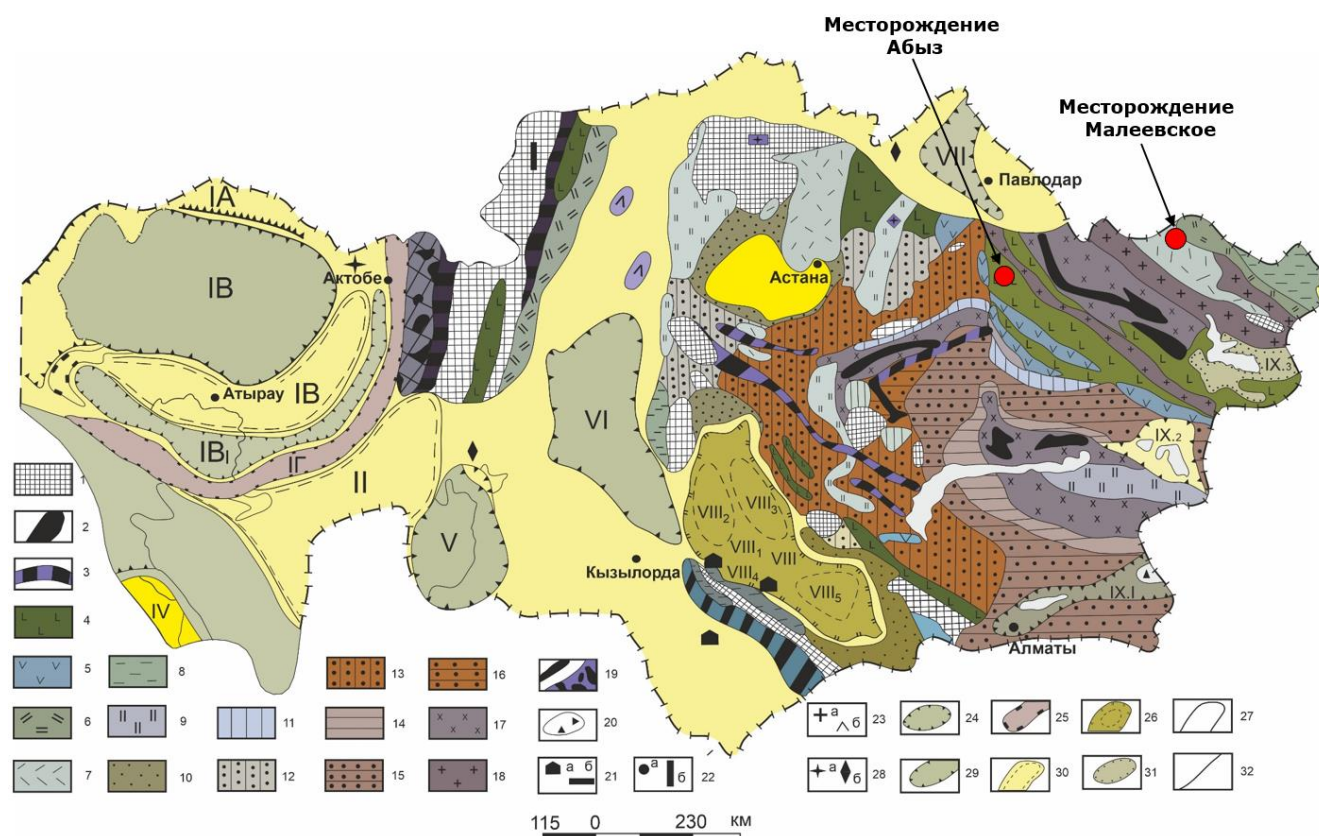


Рисунок 1 – Минерагеническая схема Казахстана (Мирошниченко и др., 2011 г. с дополнениями автора работы).
 Условные обозначения: 1-19 – металлогенические комплексы допалеозоя и палеозоя: 1 – срединных массивов – архейский кумдыкольский (алмазы); протерозойские баянский (W), карсакпайский (Fe), кургасынский (Pb, Zn, Tr), рифейский шарыкский (Pb, Zn); 2 – рифтов океанических – девонский мугоджарский (Zn, Cu), средне-верхнедевонский шулдакский (Mn, Ni), верхнедевонские чарский (Mn, Ni), косистекский (Mn, Ni); 3 – рифтов континентальных верхнедевонский атасуйский (Ba, Pb, Zn, Fe, Mn), ордовик-силурийский кызылэспетекский (Pb, Zn, Fe), триасовый мангистауский (Fe, Cu); 4 – островных дуг энсиматических ранней стадии – кембрийский бозшакольский (Au, Mo, Cu, Pb), девонские денисовский (Au, Cu, Ni), щекарабулакский (Au), ордовикский бестобинский (U); 5 – островных дуг энсиматических поздней стадии – рифейский кумустинский (Cu, Pb, Zn, Au), ордовикские торткудукский (Cu, Pb, Zn, Au), майкаинский (Cu, Pb, Zn, Au), космурунский (Cu, Pb, Zn, Au), сарытумский (Ba, Pb, Zn), шатыркольский (Au, Cu), карбоновый саурский (Mo, Cu); 6 – островных дуг энсиалических ранней стадии девонский холзунский (Pb, Zn, Mn, Fe), карбоновый валерьяновский (Fe, Mn, Pb, Zn); 7 – островных дуг энсиалических поздней стадии девонский рудноалтайский (As, Cu, Pb, Zn), ордовик-силурийский степнякский (Au); 8 – пассивных континентальных – окраин - кембрийские курумсаковский (U, Mo, V), чулактауский (Tr, P); 9 – океанического дна кембрийский касагалинский (Fe, Mn), ордовикский ишимский (Fe, Mn), девон-карбоновый карамолинский (Fe, Mn); 10 – внутри континентальных бассейнов карбон-пермский жезказганский (Pb, Zn, Cu), девонский карбоновый шусарысуйский (Cu, Pb, Zn); 11 – окраинно-континентальный вулканоспасский (Au, плутонических поясов: 11 - 13 – девонского: 11 – фронтальной зоны Cu), 12 – центральной зоны богутинский (Mo, W), хантауский (Pb, Zn), нижнеилийский (Mo, Cu), ботабурумский (Mo, U), южно-джунгарский (S), таскайнарский (Ca, F), куланкетпесский (Ca, F), 13 – тыловой зоны акбакайский (Au), самарский (Au, Mo, Cu), сырымбетский (Sn), кокшетауский (Mo, U), лосевский (Nb, Zr); 14 - 16 карбон-пермского: 14 – фронтальной зоны коунрад-актогайский (Au, Mo, Cu), 15 – центральной зоны восточно-коунрадский (Mo, W), алайгырский (Pb, Zn), балхашский (Cu, Ag, Au), каратасский (Mo, Cu), айский (Cu), 16 – тыловой зоны - акшатауский (Mo, W); 17, 18 – зон коллизий: 17 – симатических блоков карбон-триасовые бакырчик-суздальский (Au), джунгаро- балхашский (Co, Au, Mo, Cu), пермский камкорский (Cu, Ni), пермо-триасовый ирисуйский (Cu, Fe), 18 – сиалических блоков пермские калбинский (Ta, W, Sn), эпинский (TR); 19 – зон тектонизированных офиолитов ордовикский кимперсайский (Cr); 20 – угленосные бассейны Карагандинский, Экибастузский, Майкюбенский, Убаганский, Прииртышский, Шубаркольский, Илийский; 21 - 24 – рудные полезные ископаемые платформенного мезозой-кайнозойского чехла: 21 – U (a), Al (б); 22 – Au (a), Ni и Co (б); 23 – Ti (a), B (б); 24 – Sr (a), Fe (б), P (в); 25-30 – границы структурно-формационных элементов нефтегазоносных бассейнов: 25 – пассивных окраин: 1А – Северный борт Прикаспийской впадины; 1В – южный, юго-восточный и восточный склоны Астраханско-Актюбинского массива; 26 – внутриконтинентальный рифтовых систем, 16 – Центральная часть Прикаспийской впадины; III –

Мангистауская; V – Уральская; VI – Торгайская; VII – Павлодар-Прииртышская; 27 – коллизионных зон: IГ – Заволжско-Предуральская, 28 – срединных массивов: 18 – Астраханско-Актюбинского; 11 – Северо-Устьюртского; IV – Кара-Богаз-Среднекаспийского; 29 – внутриконтинентальных бассейнов: VIII – Сарышуйского: VIII.1 – Тастинское поднятие, VIII.2 – VIII.5 – прогибы: VIII.2 – Кокпансорский, VII.3 – Тасбулакский, VIII.4 – Сузак-Байкадамский, VI.5 – Мойынкумский; 30 – орогенных (межгорных) впадин: IX.1 – Илийской, IX.2 – Алакольской, IX.3 – Зайсанской; 31 – граница мезозой-кайнозойских рыхлых отложений; 32 – границы геодинамических зон

Задачи исследования:

- 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 теллуру-висмутовой минерализации;
- дать прогнозно-металлогеническую оценку теллуру-висмут-сырьевого потенциала для колчеданных месторождений, приуроченных к островодужным палеогеодинамическим обстановкам.

Научная новизна. Для месторождений выполнен сравнительный анализ вещественных комплексов рудных тел, в которых детально изучены условия формирования и закономерности распределения теллуру-висмутовой минерализации. Впервые для колчеданных руд месторождения Абыз диагностированы такие минералы как калаверит AuTe_2 , ченгуодаит $\text{Ag}_9\text{FeTe}_2\text{S}_4$, раклиджит $(\text{Bi}, \text{Pb})_3\text{Te}_4$ и штютцит Ag_5Te_3 . В колчеданных рудах месторождения Малеевское впервые обнаружены плюмботеллуриит PbTeO_3 , цервеллеит Ag_4TeS , ксилингоит $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$ и неидентифицированный минерал с обобщенной формулой PbAg_2Te . Для колчеданных месторождений Казахстана установлена пространственная связь теллуру-висмутового оруденения с геодинамическими обстановками и выполнена оценка ресурсного потенциала висмута (Bi) и теллура (Te), создающая практическую основу для развития минерально-сырьевой базы.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют по-новому подойти к стратегии прогнозирования ресурсов минерального сырья колчеданных месторождений, сформированных в геодинамических обстановках на территории Казахстана. Комплексное исследование распределения теллуру-висмутовой минерализации в колчеданных рудах также дает возможность более точного регулирования технологических процессов и оптимизации качества конечного продукта, что, несомненно, повышает рентабельность и эффективность производства цветных металлов.

Фактический материал и методы исследования. Для решения поставленных задач из основных рудных тел месторождений Абыз и Малеевское были отобраны бороздовые и керновые пробы весом от одного до трех килограммов в количестве 300 единиц. Лично диссертантом проведен комплекс исследований (в лаборатории отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского Политехнического университета) с обработкой полученных результатов. В ходе работ были выполнены петрографическое и минераграфическое описания более 60 прозрачных и 300 полированных шлифов методом оптической микроскопии, а также более 50 анализов на основные порообразующие элементы с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). Для выявления спектра примесных элементов был проведен масс-спектральный анализ с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в 40 сульфидных концентратах и 30 пробах истертых руд. В целях углубления знаний о морфологии теллуру-висмутовой минерализации и ее взаимосвязи с другими минералами было проведено изучение руд на сканирующем электронном микроскопе в сочетании с рентгенфлуоресцентным энергодисперсионным анализом (ЭДС). Для реконструкции стадийности процесса минералообразования в тридцати двуполированных пластинах выполнена термодатиметрия более 100 флюидных включений в жильном кварце в комплексе с рамановской спектроскопией. Обработка материалов проводилась с использованием компьютерных программ: CorelDRAW, ArcGIS, Aztec, Vega TC, LinkSys-32, Statistica, Surfer. Сравнительный анализ полученных данных, их интерпретация и выводы сделаны на основании обзора ранее опубликованных работ по теме исследования.

Основные защищаемые положения:

1. Колчеданные руды месторождений Абыз (островная энсиматическая дуга) и Малеевское (островная энсиалическая дуга) имеют сходные текстурно-структурные характеристики и минеральный состав, но отличаются набором теллуру-висмутовой минерализации, фиксирующейся в виде самостоятельных минералов, представленных сульфидами, оксидами, сульфосолями, теллуридами и самородными формами выделения.

2. На месторождении Абыз теллуру-висмутовая минерализация кристаллизовалась в заключительную золото-серебро-висмут-теллуридную минеральную ассоциацию рудной стадии при температурном диапазоне 236...113 °С и давлении 550...300 бар. На Малеевском месторождении наблюдается формирование минералов теллуру-висмутового состава в заключительную серебро-висмут-теллурид-сульфидную минеральную ассоциацию рудной стадии при температурном диапазоне 280...150 °С и давлении 615...400 бар.

3. Для колчеданных месторождений, сформированных в островодужных палеогеодинамических обстановках, спрогнозированы перспективы развития минерально-сырьевой базы на теллур и висмут в пределах территории Центрального и Восточного Казахстана. В рудах колчеданных месторождений, приуроченных к океанической коре, доминирует теллуридсодержащая минерализация, а в рудах колчеданных месторождений континентальной коры – висмутсодержащая.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в формулировании цели, задач и защищаемых положений диссертационной работы, самостоятельном проведении исследований, а также обработке и интерпретации полученных результатов в лаборатории отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского Политехнического университета (г. Томск).

Апробация работы и публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 работ, из которых 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК и входящих в базу данных Scopus. Результаты обсуждались на Международном симпозиуме имени академика М. А. Усова (2020, 2021, 2022, 2023, 2024 гг.), X, XI, XII Российской молодёжной научно-практической Школе «Новое в познании процессов рудообразования (2021, 2022, 2023 гг.)», X, XI международной Сибирской конференции (2022, 2024 гг.), XI Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле (2024 г.), а также на Молодежной научной школе-конференции, посвященной памяти член-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии» (2023 г.), на которой автору работы был вручен диплом за лучший доклад в секции. Часть диссертационных исследований выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW–2023–0010).

Структура работы. Общий объем диссертационной работы 182 страницы, сопровождающийся 114 рисунками, 20 таблицами и списком литературы из 133 наименований. Текст диссертации включает в себя введение, семь глав и заключение.

В первой главе «Методика исследования» описан ряд комплексных работ, выполненных с целью изучения вещественного состава руд месторождений Абыз и Малеевское.

Во второй главе представлен обзор ранее выполненных работ и охарактеризована степень изученности месторождений.

В третьей главе даны общие сведения о геологическом строении районов и рудных полей месторождений, включающие в себя стратиграфию, магматизм, тектонику, петрографическую характеристику вмещающих толщ, гидротермально-метасоматические образования и морфологию рудных тел.

Четвертая глава «Вещественный состав руд» включает в себя характеристику текстурно-структурных особенностей руд и подробное описание их минерального состава. В главе представлено частичное обоснование первого, второго и третьего положений.

Пятая глава содержит в себе результаты исследования теллуру-висмутовой минерализации в колчеданных рудах. Материалы главы охватывают обоснования первого, а также частично второго и третьего положений.

Шестая глава включает в себя данные термобарогеохимических исследований флюидных включений в жильном кварце. На основании проведенных экспериментов определен состав гидротермального флюида и его РТХ-параметры в дорудную, рудную и пострудную стадии гидротермального этапа минералообразования месторождений. Глава содержит материалы, использованные при обосновании второго положения.

Заключительная **седьмая глава** охватывает данные по установлению пространственной связи Те-Vi оруденения с геодинамическими обстановками и прогнозированию потенциала попутного извлечения теллура и висмута из руд колчеданных месторождений, сформированных в палеостроводужных обстановках, на территории Восточного и Центрального Казахстана. Глава содержит материалы, примененные при обосновании третьего защищаемого положения.

Благодарности. Автор работы искренне благодарен за помощь и поддержку в написании диссертации своему научному руководителю доктору геолого-минералогических наук, профессору А. К. Мазурову. Автор глубоко признателен сотрудникам НИ ТПУ: кандидату геолого-минералогических наук, доценту М.А. Рудмину, кандидату геолого-минералогических наук, доценту А.С. Рубану, кандидату геолого-минералогических наук, доценту Т.Ю. Якич, доктору геолого-минералогических наук, профессору В. Г. Ворошилову, кандидату геолого-минералогических наук, доценту Е.А. Синкиной, кандидату геолого-минералогических наук, доценту О.В. Савиновой за консультацию, помощь и полезные советы при создании данной работы.

Краткий геологический очерк месторождений Абыз и Малеевское

Месторождение Абыз находится в западной части Предчингизской зоны в области ее сочленения со структурами Токраурского синклинория, разделенных меридиональным Центрально-Казахстанским разломом. Стратифицированные образования на месторождении представлены девонскими и неогеновыми отложениями, а также рыхлыми четвертичными образованиями (Мазуров и др., 2021; Мазуров и др., 2021). Рудовмещающей является вулканогенно-терригенная толща девонского возраста мощностью до 975 м, сложенная разнообломочными туфами андезитов, андезито-базальтов 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 опережающими 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 пропилитовыми 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.

Месторождение Малеевское располагается в Зыряновском рудном районе Лениногорско-Зыряновской подзоны Рудно-Алтайской структурно-формационной зоны (Козлов, 2015; Пяткова и др., 2018). В геологическом строении месторождения участвуют среднедевонские вулканогенно-осадочные отложения. Разрез насыщен субвулканическими согласными и секущими телами порфировых риолитов, а также sillами и дайками базитов. В западном обрамлении рудного поля развиты интрузии габброидов и гранитоидов Змеиногорского комплекса. Тектоника представлена разрывными нарушениями северо-восточного простирания, характеризующиеся зонами трещиноватости. В течение длительного геологического развития породы рудного поля претерпели различные метаморфические изменения: региональный, динамометрический, контактовый и гидротермальный метаморфизм. Рудообразование,

пространственно приуроченное к березитовой формации, происходило двумя основными способами: гидротермально-осадочным и гидротермально-метасоматическим (Юдовская, 1984). Оруденение локализуется в отложениях, сложенных известковистыми и углеродистыми песчаниками, алевролитами и алевропелитами, содержащими многочисленные силлы диабазов, тела риолитов и их лавобрекчий.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Колчеданные руды месторождений Абыз (островная энсиматическая дуга) и Малеевское (островная энсиалическая дуга) имеют сходные текстурно-структурные характеристики и минеральный состав, но отличаются набором теллуру-висмутовой минерализации, фиксирующейся в виде самостоятельных минералов, представленных сульфидами, оксидами, сульфосолями, теллуридами и самородными формами выделения.

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. Для месторождений наблюдается два текстурных типа минерализации: сплошной (сливной) и вкрапленный.

Сплошные (сливные) руды на месторождении Абыз (рисунок 2, а) являются более распространенным типом оруденения и на 95...98 % сложены такими сульфидными минералами как пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, спорадически тетраэдрит (минерал группы блеклых руд). В минеральном составе преобладают пирит и халькопирит, суммарно составляя от 70 до 90 % объема рудной массы. Распределение этих минералов в руде неравномерное, обычно халькопирит доминирует над пиритом (рисунок 2, а). Третьим минералом по

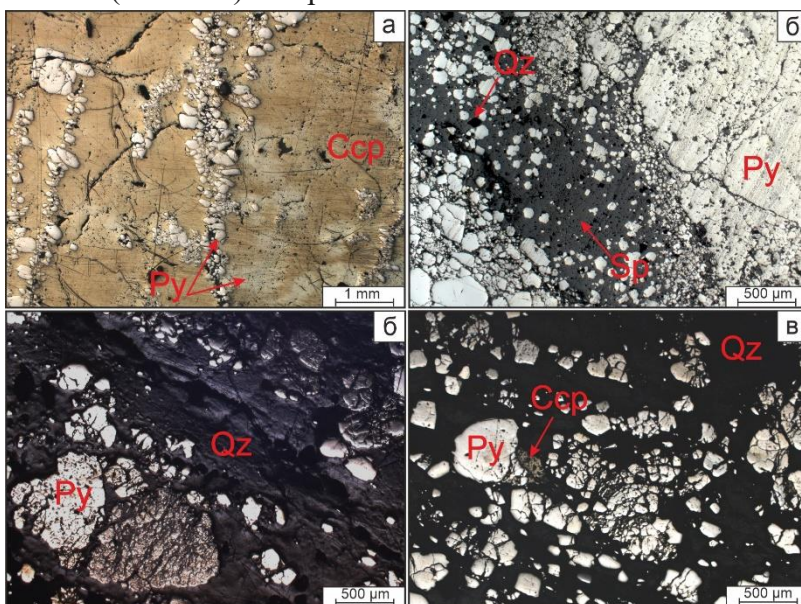


Рисунок 2 — Микрофотографии сплошных (а, б) и вкрапленных (в, г) руд месторождения Абыз

распространенности является сфалерит (рисунок 2, б). Нерудные минералы, составляющие не более 5% объема сплошных руд, представлены кварцем и анкеритом.

Вкрапленные руды (рисунок 2, б, в) характеризуются преобладанием нерудного материала над рудным: примерно на 40 % сложены сульфидными и 60 % нерудными минералами. В составе сульфидов преобладают пирит и сфалерит, суммарно составляющие до 35...38 % от общей 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 распространен первый минерал.

По отношению к вмещающим породам промышленное оруденение месторождения Абыз является эпигенетическим. Руды являются поликомпонентными, поэтому для них выделены главные, второстепенные, редкие и очень редкие минералы (таблица 1). Гипергенные руды на месторождении отработаны.

Таблица 1 – Минеральный состав первичных руд месторождения Абыз

Главные	Второстепенные	Редкие	Очень редкие
Рудные минералы			
Пирит FeS	Рутил TiO_2 Тетраэдрит	Электрум (Au, Ag)	Петцит Ag_3AuTe_2 *Калаверит $AuTe_2$

Продолжение таблицы 1

Главные	Второстепенные	Редкие	Очень редкие
Рудные минералы			
Пирит FeS Халькопирит $CuFeS$ Сфалерит PbS Галенит PbS	Рутил TiO_2 Тетраэдрит $(Cu,Fe)_{12}Sb_4S_{13}$ Арсенопирит $FeAsS$ Борнит Cu_5FeS_4	Электрум (Au, Ag) Самородное золото Au Гессит Ag_2Te Алтаит $PbTe$ Ильменит $FeTiO_3$ Касситерит SnO_2 Кубанит $CuFe_2S_3$ Теннантит $Cu_{12}As_4S_{13}$ Пирротин $Fe_{(1-x)}S_{x=0-0.17}$	Петцит Ag_3AuTe_2 *Калаверит $AuTe_2$ Кюстелит Ag Теллуrowисмутит Bi_2Te_3 *Ченгуодаит $Ag_9FeTe_2S_4$ Самородная медь Cu Лаутит $CuAsS$ *Раклиджит $(Bi, Pb)_3Te_4$ Циркон $ZrSiO_4$ Колорадоит $HgTe$ *Штютцит Ag_5Te_3 Самородный теллур ¹ Te Самородный висмут ¹ Bi Айкинит ¹ $PbCuBiS$ Прустит Ag_3AsS_3 Пираргит $(Ag_3Sb)S_3$ Стефанит Ag_5SbS_4 Энаргит Cu_3AsS_4 Магнетит Fe_3O_4 Гематит Fe_2O_3 Титанит $CaTiSiO_5$
Нерудные минералы			
Кварц SiO_2 Серицит $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ Анкерит $Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$ Хлорит $(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot (Mg,Fe)_3(OH)_6$	Барит $BaSO_4$ Альбит $Na[AlSi_3O_8]$ Эпидот $Ca_2Fe^{3+}Al_2(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$	Монацит $(La, Ce, Nd) PO_4$ Тернемобит $(Ce, La, Nd)_2Al(SiO_4)_2(OH)$ Ксенотим YPO_4	Цеолиты $Me_{2/n}OAl_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$ Угlistое вещество (кероген) Диккит $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ Каолинит $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$

Примечания:

* – *Te-Vi минералы, диагностированные впервые*¹ – *Te-Vi минералы, выявленные предшественниками, но не идентифицированные автором работы*

За счет детального исследования колчеданных руд месторождения Абыз в них выявлено присутствие минералов классов теллуридов и висмутитов, представленных алтаитом ($PbTe$), гесситом (Ag_2Te), штютцитом (Ag_5Te_3), теллуrowисмутитом (Bi_2Te_3), раклиджитом ($(Bi, Pb)_3Te_4$), ченгуодаитом ($Ag_9FeTe_2S_4$), петцитом (Ag_3AuTe_2), колорадоитом ($HgTe$) и калаверитом ($AuTe_2$). Впервые в рудах диагностированы штютцит, ченгуодаит, раклиджит и калаверит.

До 83% выявленной минерализации приурочено к сплошному типу оруденения, где отмечаются такие минеральные формы как алтаит, штютцит, гессит, теллуrowисмутит, ченгуодаит, раклиджит, петцит, калаверит и колорадоит. Вкрапленный тип оруденения содержит в себе до 17% диагностированных минеральных агрегатов *Te-Vi* состава: алтаит, гессит, теллуrowисмутит, раклиджит, штютцит и калаверит.

Для теллуrow-висмутсодержащих минералов (таблица 2) отмечается многообразие форм выделения, а также общее сходство – приуроченность к таким сульфидным минералам как пирит и халькопирит. По результатам изучения химического состава, в качестве примесей для отдельных минералов отмечаются малые содержания *Ag, Fe, Cu*.

Таблица 2 – Общая характеристика минералов *Te-Bi* состава в колчеданных рудах месторождения Абыз

Минерал	Формула	Минерал-хозяин	Матрица	Формы выделения	Примеси (усредненные значения)	Приуроченность к текстурно-структурному типу оруденению
Алтаит	$PbTe$	Пирит, халькопирит	Пирит, халькопирит	Угловатая, неправильная, амёбообразная, просечковидные	Ag (3,59%)	Сплошной
Теллуrowисмутит	Bi_2Te_3	Пирит	Халькопирит	Угловатая, слабоизометричная со скошенными углами, овальная, каплевидная	–	Сплошной, вкрапленный
Раклиджит	$(Bi, Pb)_3Te_4$	Халькопирит, пирит	Халькопирит, пирит, сфалерит	Неправильная, слабоизометричная	Ag (1,6%) Cu (0,78%) Fe (0,29%)	Сплошной, вкрапленный
Ченгуодаит	$Ag_9FeTe_2S_4$	Халькопирит	Пирит	Неправильная, округлая	–	Сплошной
Гессит	Ag_2Te	Пирит, диккит, халькопирит	Халькопирит, пирит, кварц, диккит	Неправильная, округлая, просечковидные	–	Сплошной, вкрапленный
Штютцит	Ag_5Te_3	Халькопирит, пирит, кварц	Пирит, халькопирит	Каплевидная, округлая, просечковидные	–	Сплошной, вкрапленный
Петцит	Ag_3AuTe_2	Пирит, халькопирит	Пирит, халькопирит	Слабоизометричная, неправильная, округлая	–	Сплошной
Калаверит	$AuTe_2$	Пирит	Халькопирит	Овальная, каплевидная, округлая	–	Сплошной, вкрапленный
Колорадоит	$HgTe$	Халькопирит, пирит	Пирит, халькопирит	Угловатая, неправильная	–	Сплошной

Морфология агрегатов характеризуется округлыми, неправильными, овальными, угловатыми, слабоизометричными и каплевидными формами (рисунок 3). Спорадически для таких минералов как алтаит, гессит и штютцит наблюдаются просечковидные формы выделения, образованные в результате заполнения минералом пустот и трещин в минералах-хозяевах, представленных пиритом и халькопиритом. Просечковидные агрегаты достаточно уплотненные, вследствие ограничений стенками пустот и трещин, нередко характеризуются прерывистым отложением. Соотношение длины и мощности их варьирует в диапазоне от 2:1 до 15:1, при этом средняя длина составляет 10 мкм. Контуры данных выделений обычно извилистые, за счет неровностей стенок самих трещин. В большинстве случаев неправильные агрегаты овальных, каплевидных и амёбообразных форм приурочены к халькопириту, или же к контакту пирита с халькопиритом. Размерность включений варьирует в пределах от 0,1 до 20 мкм. Нередко для таких минералов как калаверит, теллуrowисмутит и раклиджит свойственно неравномерное скопление своих неправильных агрегатов размером 0,25...0,7 мкм в количестве 3–9 единиц. По снимкам на рисунке 3 отмечается, что *Te-Bi* минералы развиваются по поверхности более ранних сульфидов (пирита и халькопирита), кристаллизуются в пустотах, трещинах и интерстициях, тем самым указывая на свое более позднее образование.

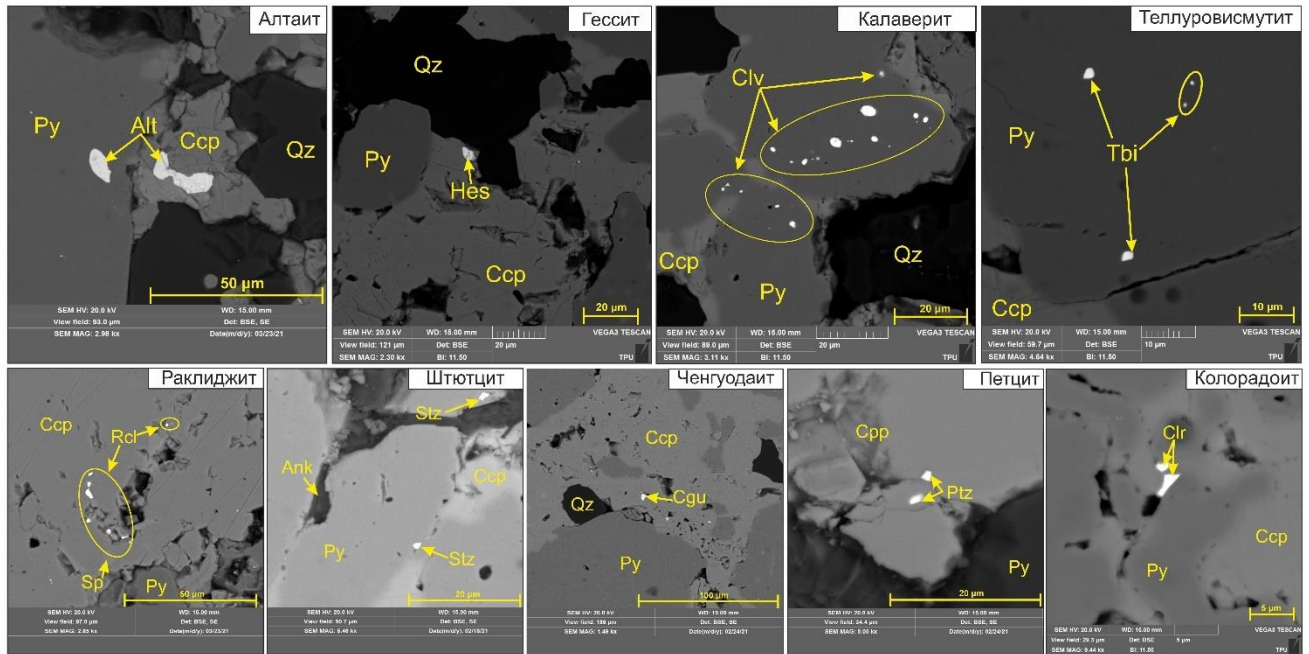


Рисунок 3 – Снимки Te-Bi минералов со сканирующего электронного микроскопа в обратно-рассеянных электронах. Py – пирит, Qz – кварц, Ank – анкерит, Ccp – халькопирит, Sp – сфалерит, Gn – галенит, Alt – алтаит, Hes – гессит, Clv – калаверит, Tbi – теллуrowисмутит, Rcl – раклиджит, Stz – штютцит, Cgu – ченгуодаит, Ptз – петцит, Clr – колорадоит

Сплошной (сливной) тип оруденения (рисунок 4, а, б) является доминирующим на **Малеевском месторождении**. В целом данные руды отличаются высоким содержанием сульфидов – до 90...95% объема от основной массы. Главной минеральной ассоциацией сульфидов является пирит± халькопирит, суммарно составляющие 70...85% от рудной минерализации. Обычно в составе сульфидов пирит и халькопирит находятся в равных соотношениях, но в нередких случаях отмечается преобладание халькопирита, который может занимать до 65...80% объема руды. Менее распространен в рудах сфалерит, спорадически встречаются галенит, блеклая руда, молибденит и арсенопирит. Распределение сульфидов в руде неравномерное. В качестве нерудных минералов диагностированы кварц и анкерит, в процентном содержании занимающие не более 5% объема сплошных руд.

Вкрапленные руды (рисунок 4, в, г) характеризуются крайне неравномерной густой вкрапленностью сульфидных агрегатов в нерудной массе, обычно содержание сульфидов составляет 40...45%, а нерудных минералов 55...60%. Пирит со сфалеритом являются доминирующими сульфидными минералами, занимающими до 85% объема рудной минерализации. Халькопирит, являющийся второстепенным сульфидом, является цементатом для пирита и сфалерита, нередко заполняет

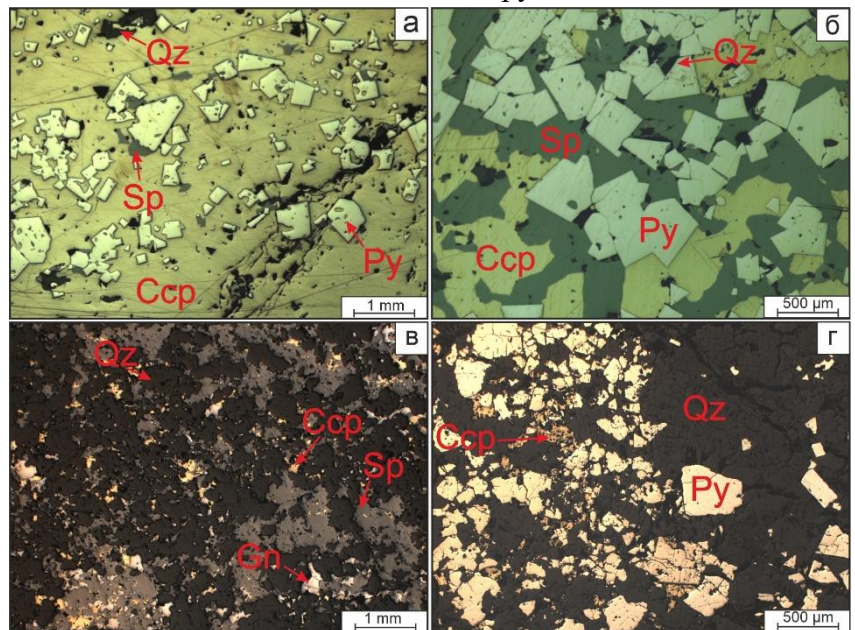


Рисунок 4 – Микрофотографии сплошных (а, б) и вкрапленных (в, г) руд Малеевского месторождения

трещинки и пустоты в пирите. Зачастую в ассоциации с халькопиритом и сфалеритом встречается галенит. Спорадически в рудах отмечается тетраэдрит. Нерудные минералы представлены кварцем и анкеритом с преобладанием первого минерала.

Оруденение месторождения Малеевское подверглось эпигенетическим процессам. 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 таблице 3.

Таблица 3 – Минеральный состав колчеданных (первичных) руд Малеевского месторождения

Главные	Второстепенные	Редкие	Очень редкие
Рудные минералы			
Пирит FeS Халькопирит $CuFeS$ Сфалерит ZnS Галенит PbS	Рутил TiO_2 Арсенопирит $FeAsS$ Молибденит MoS_2 Тетраэдрит (Cu, Fe) $_{12}Sb_4S_{13}$	Самородное золото Au Электрум $AuAg$ Гессит Ag_2Te Алтаит $PbTe$ Ильменит $FeTiO_3$ Изоклейкит ($Pb_{27}(Cu, Fe)_2(Sb, Bi)_{19}S_{57}$) Самородный висмут Bi Сстрокаит Bi_3TeS_2	Фаматинит Cu_3SbS_4 Фрейбергит $Ag_6Cu_4Fe_2Sb_4S_{13}$ Цервеллеит* Ag_4TeS Ксилингоит* $Pb_3Bi_2S_6$ Плюмботеллуриг* $PbTeO_3$ Фаза $PbAgTe^* Pb_{0.96}Ag_{1.52}Te$ Циркон $ZrSiO_4$ Марказит FeS_2 Дигенит Cu_9S_5 Магнетит Fe_3O_4 Гематит Fe_2O_3 Аргенит Ag_2S Гудмундит $FeSbS$ Бертьерит $FeSb_2S_4$ Наффилдит ¹ $Pb_2Cu(Pb, Bi)Bi_2S_7$ Хаммарит ¹ $Pb_2Cu_2Bi_4S_9$ Нисбит $NiSb_2$ Линдстремит ¹ $Cu_3Pb_3Bi_7S_{15}$ Тетрадемит ¹ Bi_2Te_2S Касситерит SnO_2
Нерудные минералы			
Кварц SiO_2 Серицит $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ Анкерит $Ca(Fe, Mg, Mn)(CO_3)_2$	Барит $BaSO_4$ Микроклин $K[AlSi_3O_8]$ Ортоклаз $KAlSi_3O_8$ Хлорит (Mg, Fe) $_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot (Mg, Fe)_3(OH)_6$ Альбит $Na[AlSi_3O_8]$	Монацит (La, Ce, Nd) PO_4 Рабдофан (Ce, La) $PO_4 \cdot H_2O$ Ксенотим YPO_4 Туит $Ca_3(PO_4)_2$	Цеолиты $Me_{2n}OAl_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$ Лимонит $FeO \cdot OH \cdot nH_2O$ Угlistое вещество (кероген)

Примечания:

* – *Te-Bi минералы, диагностированные впервые*

¹ – *Te-Bi минералы, выявленные предшественниками, но не идентифицированные автором работы*

В процессе изучения руд Малеевского месторождения установлен обширный ряд минералов, приуроченных к *Te-Bi* минерализации: алтаит ($PbTe$), гессит (Ag_2Te), цервеллеит (Ag_4TeS), самородный висмут (Bi), сстрокаит (Bi_3TeS_2), плюмботеллуриг ($PbTeO_3$), ксилингоит ($Pb_3Bi_2S_6$), изоклейкит ($Pb_{27}(Cu, Fe)_2(Sb, Bi)_{19}S_{57}$), а также неидентифицированная минеральная фаза $Pb_{0.96}Ag_{1.52}Te_{1.00}$ с обобщенной формулой $PbAg_2Te$. Впервые в рудах были диагностированы цервеллеит, ксилингоит, плюмботеллуриг и минеральная фаза $PbAg_2Te$.

По распространенности минералов теллурико-висмутового состава наблюдается значительное преобладание в рудах изоклейкита ($Pb_{27}(Cu, Fe)_2(Sb, Bi)_{19}S_{57}$), далее в порядке убывания расположены самородный висмут (Bi), гессит (Ag_2Te), алтаит ($PbTe$), сстрокаит (Bi_3TeS_2), цервеллеит (Ag_4TeS), ксилингоит ($Pb_3Bi_2S_6$), плюмботеллуриг ($PbTeO_3$) и минеральная фаза $PbAg_2Te$. До 63,6% всей минерализации приурочено к сплошному типу оруденения, где диагностированы такие минеральные формы как изоклейкит, самородный висмут, сстрокаит, гессит, ксилингоит и минеральная фаза $PbAg_2Te$. Вкрапленный тип оруденения содержит в себе

до 36,4% выявленных минералов Te-Bi состава, а именно гессит, цервеллеит, алтаит и плюмботеллурит.

Идентифицированные минералы Te-Bi состава (таблица 4) характеризуются многообразием форм их выделения, а также общим сходством – приуроченностью к сульфидным минералам. По результатам анализов химического состава минералов в качестве примесей в алтаите, гессите, цервеллеите, ксилингоите и минеральной фазе $PbAg_2Te$ зафиксированы содержания Ag, Pb и Se.

Таблица 4 – Общая характеристика минералов Te-Bi состава

Минерал	Формула	Минерал-хозяин	Матрица	Формы выделения	Примеси (усредненные значения)	Приуроченность к текстурно-структурному типу оруденению
Алтаит	$PbTe$	Халькопирит, сфалерит	Пирит	Угловатая, неправильная	Ag (3,56%)	Вкрапленный
Плюмботеллурит	$PbTeO_3$	Рутил, пирит	Пирит, кварц	Неправильная амёбообразная	–	Вкрапленный
Гессит	Ag_2Te	Пирит	Кварц, анкерит	Неправильная, округлая	Pb (1,28%)	Вкрапленный, сплошной
Цервеллеит	Ag_4TeS	Халькопирит	Пирит, анкерит	Неправильная, слабоизометричная, вытянутая прямоугольная	Pb (1,11%)	Вкрапленный
Фаза $PbAg_2Te$	$Pb_{0.96}Ag_{1.52}Te$	Пирит	Халькопирит, кварц	Неправильная, амёбообразная	Se (0,09%)	Сплошной
Висмут самородный	Bi	Изоклейкит, ксилингоит	Пирит	Ламели, неправильные эмульсионные включения	–	Сплошной
Строкаит	Bi_3TeS_2	Пирит, халькопирит	Пирит, халькопирит	Проволочковидные агрегаты, неправильные угловатые	–	Сплошной
Ксилингоит	$Pb_3Bi_2S_6$	Пирит, халькопирит	Пирит, халькопирит	Эмульсионные включения в пустотах	Se (0,17%)	Сплошной
Изоклейкит	$(Pb_{27}(Cu,Fe)_2(Sb,Bi)_{19}S_{57})$	Пирит, халькопирит	Пирит, халькопирит	Эмульсионные включения	–	Сплошной

Морфология агрегатов минералов Te-Bi состава характеризуется угловатыми, проволочковидными, овальными, неправильными формами. Для самородного висмута характерны ламелевидные и эмульсионные формы выделения в изоклейките и реже ксилингоите. Наличие включений (прорастания) самородного висмута в изоклейките свидетельствует о распаде твердого раствора. Обычно минералы развиты по трещинам и пустотам в пирите и халькопирите или же выполняют интерстиции. Размерность включений варьирует в пределах 0,1...20 мкм, в единичных случаях достигает 40 мкм. При этом для цервеллеита характерно неравномерное скопление своих агрегатов в количестве 3...7 единиц. Зачастую отмечаются парагенетические ассоциации *алтаит±гессит* и *изоклейкит±самородный висмут±ксилингоит*.

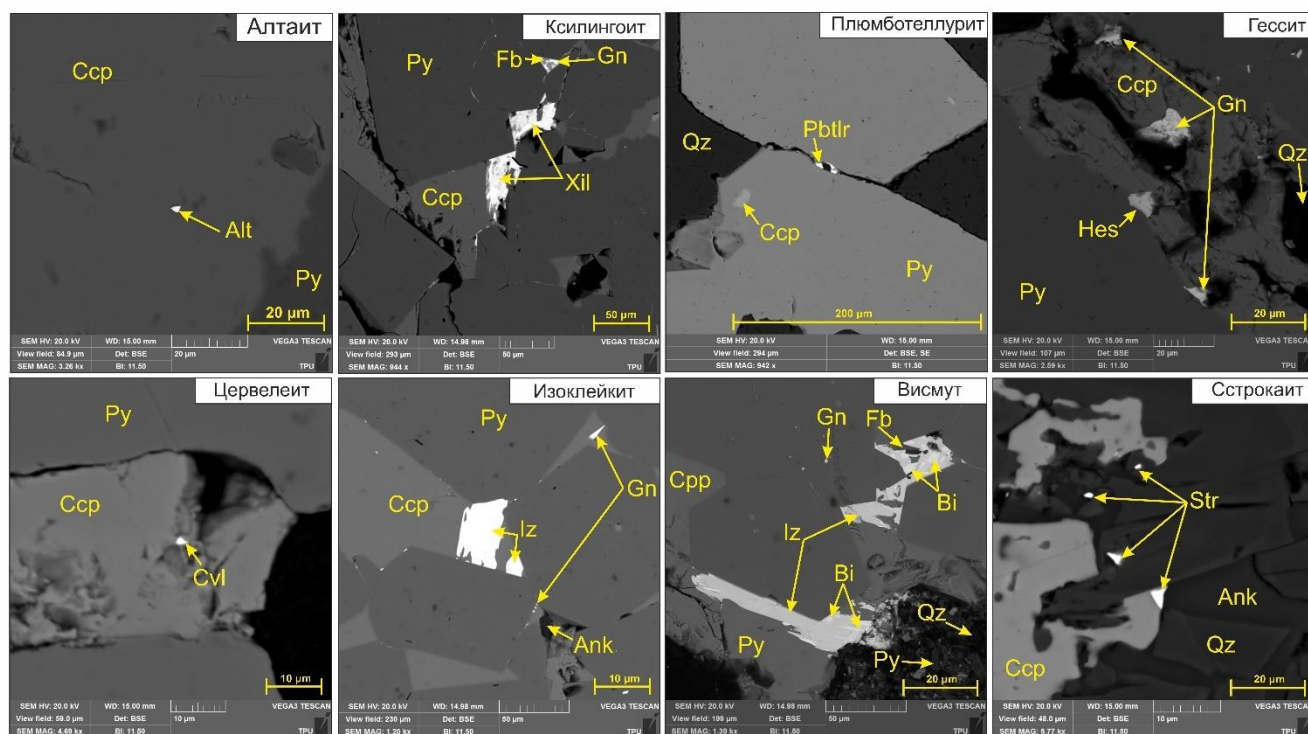


Рисунок 5 – Снимки со сканирующего электронного микроскопа в обратно-рассеянных электронах, демонстрирующие морфологию теллуру-висмутовых минералов на Малеевском месторождении. Py – пирит, Qz – кварц, Ank – анкерит, Ccp – халькопирит, Sp – сфалерит, Gn – галенит, Alt – алтаит, Hes – гессит, Cvl – цервеллеит, Xil – ксипингоит, Pbtlr – плюмботеллури́т, Iz – изоклейки́т, Bi – самородный висмут, Str – сстрокаи́т, Fb – фрейбергит

В процессе изучения руд также была обнаружена минеральная фаза, обозначенная как не идентифицированный минерал с обобщенной формулой $PbAg_2Te$, выделенная на основании предполагаемого парагенезиса фаз Pb–Te и Ag–Te. Включение минеральной фазы с видообразующей ролью Pb располагается в трещине пирита и образует вытянутое полуовальное зерно величиной 4,8 мкм в длину.

2. На месторождении Абыз теллуру-висмутная минерализация кристаллизовалась в заключительную золото-серебро-висмут-теллуридную минеральную ассоциацию рудной стадии при температурном диапазоне 236...113 °C и давлении 550...300 бар. На Малеевском месторождении наблюдается формирование минералов теллуру-висмутного состава в заключительную серебро-висмут-теллурид-сульфидную минеральную ассоциацию рудной стадии при температурном диапазоне 280...150 °C и давлении 615...400 бар.

С целью реконструкции стадийности процесса рудообразования на месторождениях и определения физико-химических условий формирования теллуру-висмутной минерализации были проведены термобарогеохимические исследования газово-жидких включений в кварце.

На первом этапе была выполнена типизация флюидных включений в кварце согласно классификации Кормушина, 1982 г.

На месторождении Абыз в жильном кварце по времени и способу образования выделены два класса включений:

- Первичные;
- Мнимовторичные.

Первичные (сингенетические) газово-жидкие включения пространственно приурочены 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 неправильную, амебообразную, полигексогональную или округлую формы, средний размер 8...10 мкм.

Мнимовторичные или первично-вторичные (субсингенетические) включения по характеру локализации подобны вторичным, то есть развиваются по залеченным трещинкам, но при этом происхождение их первичное. Размер флюидных включений данного типа составляет 0,1...0,5 мкм. По фазовым соотношениям в пластинах выявлены двухфазные (Ж H_2O + Г) включения (рисунок 6), характеризующиеся внутренней и внешней фазой. Внутренняя фаза представлена газом, а внешняя – жидким солевым раствором. Газовая фаза в данном случае имеет как монокомпонентный состав (CO_2 , CH_4 , H_2S), так и поликомпонентный (смесь двух или более газов).

Температура кристаллизации эвтектики солевой системы раствора по результатам исследований составляет около $-21,7^\circ\text{C}$, что соответствует компонентному составу $\text{NaCl}-\text{Na}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$ и фазовому составу эвтектической смеси $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O} + \text{лёд}$. Руды формировались из растворов с солёностью 7–10 мас. % NaCl -экв.

По результатам исследований ГЖВ, распределение температур по стадиям минералообразования на месторождении Абыз следующее:

- менее 110°C – пострудная стадия (карбонат-кварцевая ассоциация);
- $113...236^\circ\text{C}$ – рудная стадия золото-серебро-висмут-теллуридной ассоциации;
- $245...300^\circ\text{C}$ – рудная стадия золото-сульфидной ассоциации;
- $305...350^\circ\text{C}$ – дорудная стадия (березитовая ассоциация).

Дорудная стадия представлена березитовой ассоциацией, по минеральному составу характеризующейся кварц-серицитовыми, серицит-кварцевыми и серицит-карбонат-кварцевыми метасоматитами. В данную стадию активно отлагались такие минералы, как кварц I генерации, анкерит I генерации, серицит и мусковит. На завершении стадии формировался пирит I генерации. Температура минералообразования данной стадии находится в пределах $350...305^\circ\text{C}$. Давление минералообразующего флюида оценивается в интервале 1150...810 бар.

В пределах рудной стадии выделено две ассоциации: золото-сульфидная и золото-серебро-висмут-теллуридная.

В золото-сульфидную ассоциацию формировались главные рудные сульфидные минералы: пирит II генерации, халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит. На завершении формирования данной ассоциации в качестве редких и очень редких минералов образовывались лаутит, электрум и самородное золото. Среди нерудных минералов развивались кварц и анкерит II генераций. Температура минералообразования в данную ассоциацию составляет $300...245^\circ\text{C}$. Давление минералообразующего флюида варьирует в диапазоне 790...550 бар.

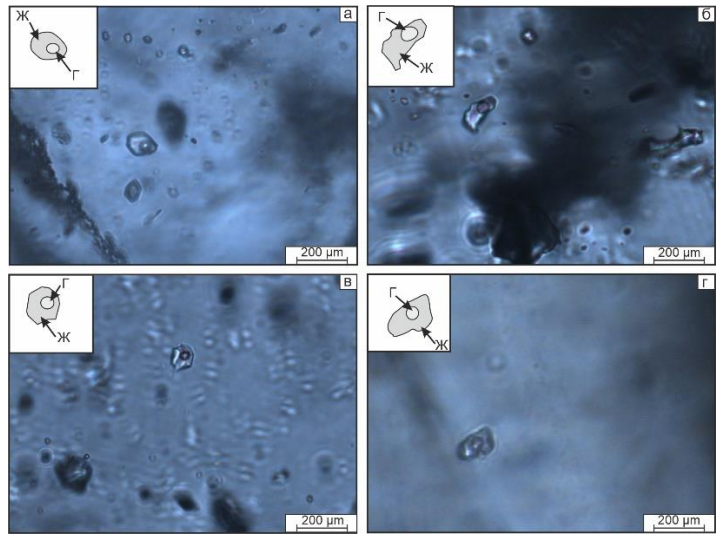


Рисунок 6 – Газово-жидкие включения в жильном кварце на месторождении Абыз. Г – газовая фаза, Ж – жидкая фаза

Во вторую рудную ассоциацию, непосредственно золото-серебро-висмут-теллуридную, происходит позднее наложение на ранние сульфиды кюстелита, а также теллуру-висмутовых минералов: гессита, петцита, калаверита, алтаита, раклиджита, штютцита, колорадоита и теллуровисмутита. Среди нерудных минералов отмечаются кварц и анкерит III генераций. Температура минералообразования данной ассоциации варьировалась в диапазоне 236...113°C, а давление не превышало 550...300 бар.

Завершает гидротермальный этап минералообразования пострудная стадия, представленная карбонат-кварцевой ассоциацией. На протяжении всей данной стадии отмечается образование кварца IV генерации. В качестве просечек, прожилков и неправильных обособленных агрегатов формируется анкерит IV генерации. Температура минералообразования данной стадии составляет менее 110°C, а давление не превышает 310 бар.

Таблица 5 – Схема последовательности минералообразования на месторождении Абыз (толщина линии обозначает интенсивность процесса отложения минерала)

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			
МУСКОВИТ	I			
ПИРИТ	I	II	III	
АРСЕНОПИРИТ		II		
ХАЛЬКОПИРИТ		II		
СФАЛЕРИТ		II		
ГАЛЕНИТ		I	II	
ТЕТРАЭДРИТ		II		
БОРНИТ		II		
ПИРРОТИН		II		
КУБАНИТ		II		
ПИРАРГИТ		II		
СТЕФАНИТ		II		
ЭЛЕКТРУМ		II		
ЛАУТИТ		II		
ЭНАРГИТ		II		
ТЕННАНТИТ		II		
САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО		II		
ПРУСТИТ		II		
МЕДЬ				
АЛТАИТ				
КЮСТЕЛИТ				
ПЕТЦИТ				
КАЛАВЕРИТ				
ГЕССИТ				
ЧЕНГУДАИТ				
ШТЮТЦИТ				
РАКЛИДЖИТ				
КОЛОРАДОИТ				
ТЕЛЛУРОВИСМУТИТ				
T °C	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-алло-гипидиоморфнозернистая, лепидо-гетеро-гранобластовая, коррозионная, эмульсионная, цементная, решетчатая, графическая, метаколлоидная, реликтовая, осколочная, ситовидная, пойкилитовая, структура распада твердых растворов.			

На месторождении Малеевское в жильном кварце по времени и способу образования выделены два класса флюидных включений: первичные и вторичные.

Первичные (сингенетические) газово-жидкие включения (рисунок 7, а), пространственно приуроченные к плоскостям граней роста кристалла кварца, локализуются обычно в виде одиночных неориентированных между собой вакуолей. Реже образуют скопления включений с беспорядочным распределением. Форма полостей обычно характеризует неправильную, полигексогональную или округлую формы со средним размером 6...9 мкм. Вторичные эпигенетические включения

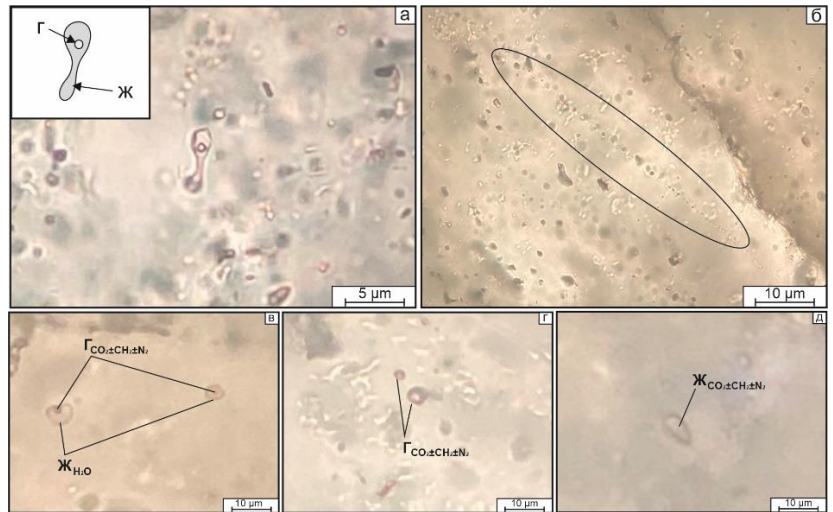


Рисунок 7 – Флюидные включения в жильном кварце на месторождении Малеевское. а – первичное газово-жидкое включение; б – вторичные включения; в – двухфазное включение; г – однофазное газовое включение; д – однофазное жидкое включение

(рисунок 7, б) развиваются по постгенетическим трещинкам или же в межзерновых пространствах агрегатов кварца. Данные мелкие включения характеризуются линейным расположением скоплений, причем при увеличении глубины резкости микроскопа отмечается приуроченность данных микровакуолей к полостям залеченных трещин. Формы их обычно неправильные или каплевидные, а размер не превышает 1 мкм. Данные включения образуют цепочковидные скопления (5...35 единиц).

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

- Преобладающие двухфазные ($\text{Ж } \text{H}_2\text{O} \pm \text{MgCl}_2 \pm \text{NaCl} + \text{Г } \text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{H}_2\text{S} \pm \text{SO}_2$) (рисунок 7, в);
- Однофазные ($\text{Г } \text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{H}_2\text{S} \pm \text{SO}_2$ и $\text{Ж } \text{H}_2\text{O} \pm \text{MgCl}_2 \pm \text{NaCl}$) (рисунок 7, г, д).

Двухфазные включения характеризуются внутренней и внешней фазой. Внутренняя фаза представлена газом, а внешняя – жидким солевым раствором. Во включениях данного типа газовая фаза характеризуется как монокомпонентным составом, представленным CO_2 , CH_4 , SO_2 , H_2S , так и смесью данных газов. О щелочном и субщелочном происхождении раствора свидетельствует небольшое присутствие CO_2 или же полное его отсутствие в первичных включениях и интенсивное содержание в рудах. 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 $-35,0^\circ\text{C}$, что соответствует компонентному составу $\text{MgCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ и фазовому составу эвтектической смеси $\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{лед}$. Таким образом, флюид имел хлоридный Mg-Na состав и соленость 7...16,1 мас. % экв. NaCl.

Температура месторождения определена методом гомогенизации и эвтектики газово-жидких включений. Высокотемпературный гидротермальный процесс был длительным и проявился в три последовательные стадии минералообразования: дорудную, рудную и пострудную (таблица 6). В *дорудную стадию*, представленную березитовой ассоциацией, отмечается образование кварц-серицитовых, серицит-кварцевых и карбонат-серицит-кварцевых метасоматитов. На протяжении данной стадии отлагались кварц генерации, анкерит I генерации, серицит. На завершении стадии кристаллизовался пирит I генерации. Температурный диапазон минералообразования для данной стадии составляет $360...305^\circ\text{C}$. Давление минералообразующего флюида оценивается в интервале 1000...850 бар. *Рудная стадия*

представлен двумя ассоциациями: золото-сульфидной и серебро-висмут-теллурид-сульфидной. В золото-сульфидную ассоциацию формировались главные рудные минералы: пирит II генерации, арсенопирит, халькопирит, сфалерит, галенит, тетраэдрит, молибденит. На завершении стадии в качестве редких и очень редких минералов образовались фаматинит, фрайбергит, самородное золото. Среди нерудных минералов развивались кварц и анкерит II генерации. Температура минералообразования в данную ассоциацию составляла 315...280°C. Давление минералообразующего флюида равнялось 840...630 бар. Во вторую рудную ассоциацию, непосредственно серебро-висмут-теллурид-сульфидную, кристаллизировались пирит, галенит и халькопирит III генерации. Далее происходит образование минералов теллуридо-висмутового состава, представленных строкаитом, ксилингоитом, изоклейкиком, висмутом самородным, гесситом, цервеллеитом, алтаитом, плюмботеллуридом и минеральной неназванной фазой $PbAg_2Te$. Температура минералообразования данной стадии составляет 280...150°C, а давление 615...400 бар. *Пострудная стадия*, представленная кварц-карбонатной ассоциацией, завершает гидротермальный этап минералообразования на месторождении. В преобладающем объеме на протяжении всей стадии кристаллизуется кварц и в ее заключении анкерит IV генерации. Температура образования пострудной стадии составляет менее 150°C. Давление варьирует в диапазоне 380...205 бар.

Таблица 6 – Схема последовательности минералообразования на месторождении Малеевское (толщина линии обозначает интенсивность процесса отложения минерала)

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
СЕРПИЦИТ	I			
ПИРИТ	I	II	III	
АРСЕНОПИРИТ		I	II	
ХАЛЬКОПИРИТ		I	II	
МОЛИБДЕНИТ				
СФАЛЕРИТ				
ГАЛЕНИТ		I	II	
ТЕТРАЭДРИТ				
МАРКАЗИТ				
ГУДМУНДИТ				
ДИГЕНИТ				
САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО				
ФАМАТИНИТ				
ФРАЙБЕРГИТ				
ИЗОКЛЕЙКИТ				
НИСБИТ				
КСИЛИНГОИТ				
ВИСМУТ				
СТРОКАИТ				
ФАЗА $PbAg_2Te$				
ГЕССИТ				
АРГЕНИТ				
ПЛУМБОТЕЛЛУРИТ				
АЛТАИТ				
ЦЕРВЕЛЛЕИТ				
T °C	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 отличие от рудообразующих минералов, минералы теллуру-висмутового состава на месторождениях Абыз и Малеевское характеризуются более низкими температурами образования. В связи с этим теллур и висмут способны накапливаться в низкотемпературных эвтектических расплавах, из которых кристаллизуются легкоплавкие теллуриды, висмутиты и сульфосоли. Также проведенные исследования показали, что формирование каждой стадии на месторождениях происходило при определенных физико-химических и термодинамических режимах: отмечена смена температур, давлений, концентраций растворенных солей, состава газов и их количества от стадии к стадии. Полученные данные позволяют отнести колчеданные руды с преобладанием Te (месторождение Абыз) к низкотемпературным, а Bi (месторождение Малеевское) – к мезотермальным (рисунок 8).

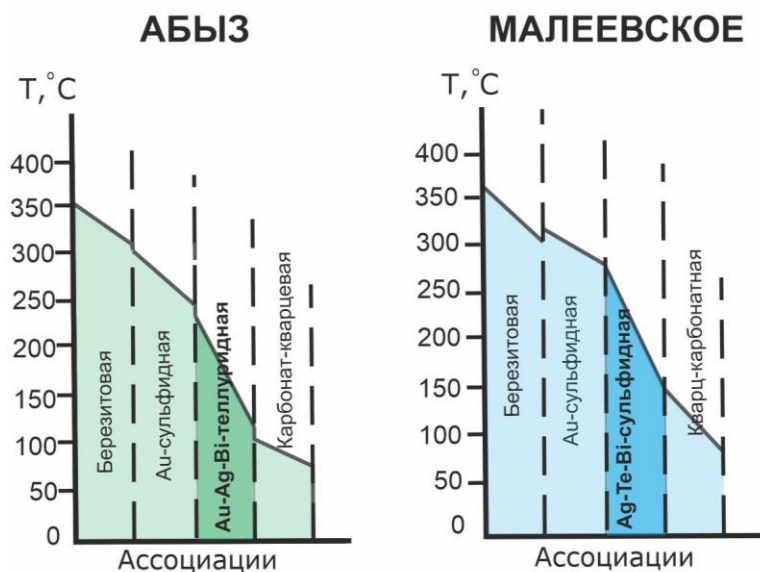


Рисунок 8 – Сравнение температурных характеристик минералообразования месторождений Абыз и Малеевское

3. Для колчеданных месторождений, сформированных в островодужных палеогеодинамических обстановках, спрогнозированы перспективы развития минерально-сырьевой базы на теллур и висмут в пределах территории Центрального и Восточного Казахстана. В рудах колчеданных месторождений, приуроченных к океанической коре, в основном доминирует теллуридсодержащая минерализация, а в рудах колчеданных месторождений континентальной коры – висмутсодержащая.

Для повышения эффективности отработки колчеданных месторождений на перспективу необходимо взять постоянное восполнение запасов минерального сырья. С позиции современной геодинамики определены условия образования и особенности развития теллуру-висмутовой минерализации в колчеданных месторождениях Казахстана, сформированных в островодужной геодинамической обстановке (рисунок 9), на примере двух месторождений:

- Малеевское, приуроченное к энциалической островной дуге;
- Абыз, образованное на энциматической островной дуге.

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 энциалических и энциматических комплексов Казахстана могут дополнить такие элементы-спутники как полуметалл Te и металл Bi (рисунок 10), при этом для энциалических комплексов отмечается преобладание висмута, а для энциматических – теллура.

Реализация данных прогнозов будет способствовать укреплению минерально-сырьевой базы Казахстана. Глубокое понимание особенностей распределения теллуру-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений, сформированных в геодинамических обстановках, может позволить улучшить комплексную разработку и использование минеральных ресурсов страны в виде мощной технической поддержки, связанной с внесением корректировок в схему обогащения руд.

В пределах Чингиз-Тарбагатайской островной дуги известно более 20 колчеданных месторождений, вещественный состав которых близок к месторождению Абыз. Прежде всего это месторождения Майкаинской группы (Малый и Большой Майкаин, Красная горка, Придорожное, Майкаин А и В), расположенной в Баянаульском районе Павлодарской области. Месторождения данного типа состоят из сингенетических, массивных или полумассивных сульфидных линз или пластов. Колчеданные залежи, в

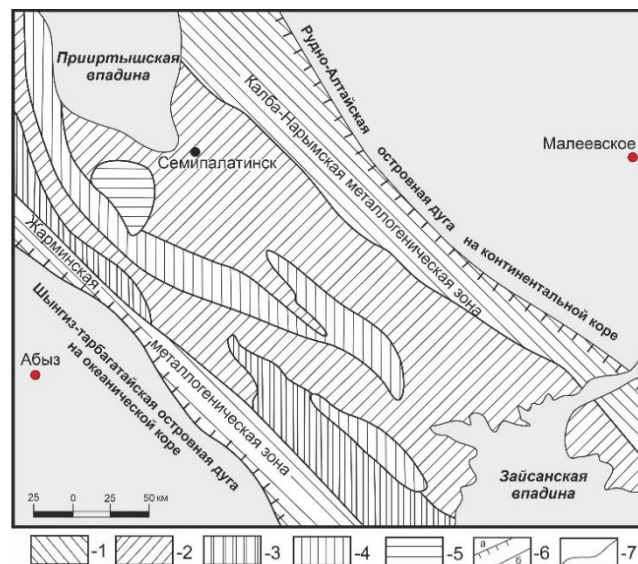


Рисунок 9 – Схематическое металлогеническое районирование Восточной и Центральной части Казахстана (Мирошниченко, Мазуров, Жуков, Жаутиков, 2005 с дополнениями автора исследования). Условные обозначения: 1 – энсалические блоки зоны коллизии, 2 – энсиматические блоки зоны коллизии, 3 – террейны карбоновой 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

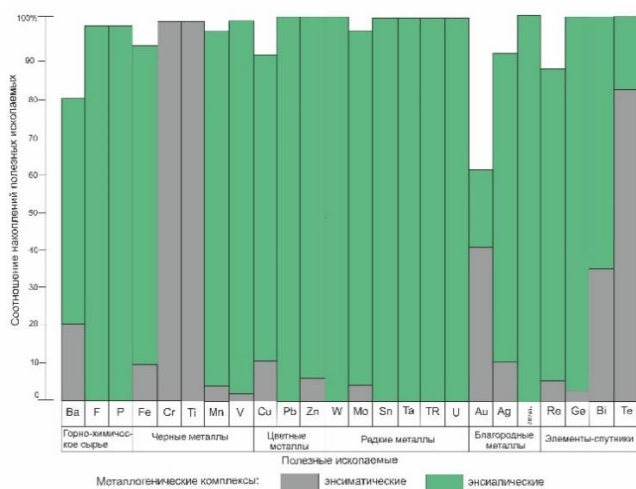


Рисунок 10 – Распределение ресурсного фонда энсалических и энсалических металлогенических комплексов Казахстана (Мазуров, 2003 с дополнениями автора исследования)

В пределах Рудно-Алтайской островной дуги выделяются колчеданные месторождения Зыряновского рудного узла (Греховское, Снегиревское, Майское, Зыряновское, Богатыревское, Парыгинское, Бухтарминское, Осочихинское, Майско-Зыряновское, Путинцевское, Заводинское) аналогичные по вещественному составу с изученным месторождением Малеевское. Оруденение в них характеризуется телами различной морфологии: жилообразными, столбообразными, контролируемыми пересечениями разломов, линзовидными и неправильной формы гнездами. Минеральный состав руд в основном представлен пиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, арсенопиритом, молибденитом и кварцем. Основные компоненты руд: золото, серебро, медь, свинец. Помимо данных компонентов присутствуют элементы-примеси,

основном сложены пиритом с подчиненным количеством медных минералов (преимущественно халькопирита и в меньшем объеме блеклой руды), галенита, сфалерита, арсенопирита, кварца и барита. Основные компоненты руд: золото, серебро, медь, свинец, сера пиритная, барит. Месторождения имеют низко-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 (Рафаилович, 2010). Схожие вещественные параметры рудных тел месторождений Майкаинского типа с месторождением Абыз, а также приуроченность их к одноименной островной энсиматической дуге, позволяют спрогнозировать для них перспективы попутной добычи теллура из колчеданных руд.

представленные кадмием, ртутью, молибденом, кобальтом, мышьяком, сурьмой, селеном и никелем (Мазуров, 2003). Часть месторождений Зырянского рудного района (Зырянское и др.) 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 содержаниями Au (0,4...3%), на основании этого колчеданные месторождения данного рудного узла по запасам относятся к среднему типу (Рафаилович, 2010). За счет аналогичных вещественных характеристик оруденения с месторождением Малеевское, приуроченности к одноименным горнорудному узлу и энсиалической островной дуге, для месторождений Зырянского рудного района можно прогнозировать потенциал попутной добычи висмута из руд.

Исходя из вышесказанного дана прогнозная оценка перспективности распространения Te-Vi минерализации в колчеданных месторождениях, сформированных в энсиматической и энсиалической дугах, где для колчеданных месторождений Рудно-Алтайской островной дуги отмечается преобладающее содержание висмута, а для колчеданных месторождений Чингиз-Тарбагатайской островной дуги – доминирование теллура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение колчеданных месторождений Рудноалтайской и Чингиз-Тарбагатайской островодужных систем показало многие черты их сходства и различия.

Систематизация и обобщение известных и новых данных о Te-Vi минерализации позволили установить их видовое разнообразие в колчеданных месторождениях, сформированных в островодужных палеосистемах на территории Казахстана. Впервые для руд месторождения Абыз диагностированы такие минералы как калаверит AuTe_2 , ченгуодаит $\text{Ag}_9\text{FeTe}_2\text{S}_4$, раклиджит $(\text{Bi}, \text{Pb})_3\text{Te}_4$ и штютцит Ag_5Te_3 . В рудах месторождения Малеевское впервые обнаружены плюмботеллурид PbTeO_3 , цервеллеит Ag_4TeS , ксилингоит $\text{Pb}_3\text{Bi}_2\text{S}_6$ и неидентифицированный минерал с обобщенной формулой PbAg_2Te . Для месторождения Абыз отмечается, что золото находится не только в виде самородного разной пробы и электрума AuAg , но и входит в состав теллуридов, представленных калаверитом AuTe_2 и петцитом Ag_3AuTe_2 . Ранее данный фактор не принимался во внимание при разработке технологической схемы, что, вероятно, могло являться одной из причин потери некоторой части золота при обогащении руд.

Месторождения имеют многостадийное формирование и близкий механизм рудоотложения. На основе термобарогеохимических исследований флюидных включений обоснованы физико-химические параметры формирования теллуру-висмутовой минерализации и реконструированы схемы последовательности минералообразования. В результате чего сделан вывод, что колчеданные руды месторождения, сформированного на энсиматической островной дуге, являются низкотемпературными, а руды месторождения, приуроченного к энсиалической островной дуге, можно считать мезотермальными: температурный диапазон образования Te-Vi минерализации для месторождения энсиалической островной дуги (280...150°C) выше, чем для месторождения энсиматической островной дуги (236...113 °C).

На территории Казахстана для колчеданных месторождений установлена пространственная связь теллуру-висмутового оруденения с геодинамическими обстановками: для месторождений, приуроченных к палеоокеаническим структурам, наблюдается преобладание теллуруового элемента, а для континентальных рифтов – висмутового. На основании полученных данных оценены перспективы на попутную добычу и извлечение теллура и висмута из колчеданных руд месторождений Майкаинской группы и Зырянского рудного узла.

Полученная информация, несомненно, имеют практическую значимость и является важным фактором укрепления минерально-сырьевой базы Казахстана.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, рекомендованных ВАК и входящих в базу данных Scopus:

1. Николаева, А.Н. Теллуру-висмутовая минерализация в рудах Малеевского колчеданного месторождения (Восточный Казахстан) / А.Н. Николаева, А.К. Мазуров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 233–250.
2. Николаева, А.Н. Комплексное исследование распределения теллуру-висмутовой минерализации в рудах колчеданных месторождений Абыз и Малеевское / А.Н. Николаева, А.К. Мазуров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – №8 (в редакции).
3. Николаева, А.Н. Золото в рудах Вернинского месторождения (Иркутская область) / А.Н. Николаева, А.К. Мазуров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С.64–74.
4. Особенности вещественного состава медной минеральной ассоциации Бараньевского эпитеермального объекта (Центральная Камчатка) / Т.Ю. Якич, Э.Р. Сарсекеева, Е.А. Синкина, А.Н. Николаева, П.Н. Максимов, Д.В. Левочская, А.В. Кутырев, П.С. Жегунов, Д.С. Буханова, М.А. Рудмин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т.333. – №12. – С. 74–87.
5. 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.

В прочих изданиях:

6. Николаева, А.Н. Метасоматическая зональность на золоторудном месторождении Вернинское / А.Н. Николаева // XXVI Международный научный симпозиум молодых ученых и студентов имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», посвященный 90-летию со дня рождения Н.М. Рассказова, 120-летию со дня рождения Л.Л. Халфина, 50-летию научных молодежных конференций имени академика М.А. Усова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2022. – Т. 1. – С. 93–96.
7. Николаева, А. Н. Tellurides in the ores of the Abyz gold-pyrite deposit (Central Kazakhstan) / А.Н. Николаева // XXVI Международный научный симпозиум молодых ученых и студентов имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», посвященный 90-летию со дня рождения Н.М. Рассказова, 120-летию со дня рождения Л.Л. Халфина, 50-летию научных молодежных конференций имени академика М.А. Усова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2022. – Т. 2. – С. 336–337.
8. Николаева, А.Н. Золото в рудах золото – колчеданного месторождения Абыз (Центральный Казахстан) / А.Н. Николаева // X Российская молодёжная научно-практическая Школа «Новое в познании процессов рудообразования». Сборник материалов [Электрон. дан.]. – М.: ИГЕМ РАН, 2021. – С. 217–218.
9. Nikolaeva, A.N. Features of gold mineralization of the abyz gold-pyrite deposit (Central Kazakhstan) / A.N. Nikolaeva // X International Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the Conference. – Novosibirsk: IPC NSU, 2022. – P. 75–76.
10. Николаева, А.Н. Минеральная форма золота в рудах месторождения Вернинское (Иркутская область) / А.Н. Николаева // XI Российская молодёжная научно-практическая Школа «Новое в познании процессов рудообразования». Сборник материалов [Электрон. дан.]. – М.: ИГЕМ РАН, 2022. – С.188–189.

11. Николаева, А.Н. Золотая минерализация в рудах Вернинского месторождения черносланцевых углеродистых толщ (Иркутская область) / А.Н. Николаева // XXVII Международный молодежный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», посвященного 160-летию со дня рождения академика В. А. Обручева и 140-летию академика М. А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы. –Томск: Изд-во ТПУ, 2022. – Т. 2. – С. 336–337.
12. Николаева, А.Н. Теллур и висмут в колчеданных месторождениях Казахстана/ А.Н. Николаева // XXXIV Молодежная научная школа-конференция, посвященная памяти член-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии» [Электронный ресурс]. – СПб: Свое издательство, 2023. – С.149–152.
13. Николаева, А.Н. Теллуру-висмутовая минерализация колчеданных месторождений Казахстана / А.Н. Николаева // XII Российская молодёжная научно-практическая Школа «Новое в познании процессов рудообразования» Сборник материалов [Электрон. дан.]. – М.: ИГЕМ РАН, 2022. – С. 149–152.
14. Николаева, А.Н. Особенности золотой минерализации колчеданного месторождения Абыз / А.Н. Николаева, А.В. Ярчук // XII Российская молодёжная научно-практическая Школа «Новое в познании процессов рудообразования». Сборник материалов [Электрон. дан.]. – М.: ИГЕМ РАН, 2023. – С.147–148.
15. Николаева, А.Н. Особенности теллуру-висмутовой минерализации в колчеданных месторождениях, приуроченных к островодужным палеосистемам (Республика Казахстан) / А.Н. Николаева // XXVIII Международный научный симпозиум молодых ученых и студентов имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», посвященный 125-летию со дня рождения академика Академии наук СССР профессора К.И.Сатпаева, 130-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР профессора Ф.Н. Шахова. Сборник материалов [Электрон. дан.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2024. – Т.2.
16. Николаева, А.Н. Комплексное исследование распределения теллуру-висмутовой минерализации в колчеданных рудах месторождений, сформированных в палеогеодинамической обстановке (Республика Казахстан) / А.Н. Николаева, А. К. Мазуров // VII Всероссийская Байкальская молодёжная научная конференция. Сборник материалов [Электрон. дан.]. – Улан-Удэ, 26–31 августа 2024 г.
17. Николаева, А.Н. Особенности вещественного состава и условия формирования Те-Ві минеральной ассоциации в колчеданных месторождениях Казахстана / А.Н. Николаева // XI Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле. Сборник материалов [Электрон. дан.]. – Новосибирск, 23–29 сентября 2024 г.