

На правах рукописи

ВАГИНА ЕКАТЕРИНА АНДРЕЕВНА

**МИНЕРАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ РУД И ГЕНЕЗИС МЕСТОРОЖДЕНИЯ
ЗОЛОТА ЧЕРТОВО КОРЫТО (ПАТОМСКОЕ НАГОРЬЕ)**

Специальность

25.00.11 – Геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2012

Работа выполнена на кафедре геологии и разведки полезных ископаемых Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Кучеренко Игорь Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Поцелуев Анатолий Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», заведующий кафедрой общей геологии и землеустройства

Гринев Олег Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», доцент кафедры палеонтологии и исторической геологии

Ведущая организация:

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск

Защита состоится 25 декабря 2012 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 212.269.07 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 656028, г. Томск, пр. Ленина 2а, стр. 5, 20-й корпус ТПУ, аудитория 504.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета (634034, г. Томск, ул. Белинского, 55).

Автореферат разослан _____ ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.07
д. г. - м. н., профессор

С.И. Арбузов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования определяется сосуществованием четырех конкурирующих между собой геолого-генетических гипотез образования золотых гидротермальных месторождений, – гранитогенной, базальтогенной, метаморфогенной и полигенной.

До сих пор не решены ключевые вопросы проблемы рудообразования – существо создающих месторождения геологических процессов, прежде всего, – условия генерации энергии, растворов, источников золота и сопровождающих его элементов.

К объектам пристального внимания исследователей, вероятно, по причине крупных и уникальных масштабов, относятся месторождения, залегающие в толщах углеродистых терригенных, карбонатно-терригенных (черных) сланцев. Для объяснения условий их образования разработаны две гипотезы – метаморфогенно-гидротермальная и полигенная. Первая предполагает экстракцию золота из вмещающих пород растворами разного происхождения, вторая – «ступенчатое» накопление металла в результате нескольких сменявших один другой во времени геологических процессов в диапазоне до 500 млн лет. К реконструкции процессов образования этих месторождений «черносланцевого типа» в последние десятилетия привлекаются две другие традиционные гипотезы – гранитогенная и базальтогенная, предложенные ранее для объяснения условий образования месторождений, залегающих в кристаллических породах – гранитоидах, ультраметаморфитах и других.

Это не снимает с повестки дня, напротив, усиливает начатое с момента возникновения в шестидесятых годах прошлого столетия метаморфогенно-гидротермальной гипотезы рудообразования противопоставление по условиям образования месторождений той и другой совокупности и актуализирует целесообразность выполнять многоплановые исследования в них в сравнительном аспекте.

Поскольку все гипотезы, как правило, разрабатывались на основе материалов, полученных в одном, обычно крупном или уникальном месторождении или в группе месторождений рудного узла или даже рудного района, существующее многообразие представлений о происхождении оруденения нельзя объяснить конвергенцией рудообразования, хотя полностью исключить ее было бы преждевременно.

Многолетняя дискуссия по проблеме без достижения положительных результатов свидетельствует о дефиците достоверных фактов, привлекаемых в обоснование каждой гипотезы, и будет, вероятно, продолжаться долго без привлечения новых фактов, способных конкретизировать и подтвердить (доказать) одну из гипотез, или, что маловероятно, разработать новую.

Месторождение Чертово Корято черносланцевого типа детально разведано и подготовлено к освоению в 2005–2007 годах. В эти же годы началось его систематическое многоплановое изучение коллективом кафедры геологии и разведки полезных ископаемых Национального исследовательского Томского политехнического университета. Автором выполнено исследование руд и условий их образования, результаты которого составляют содержание диссертации.

Цель. Разработать вещественно-генетическую модель месторождения золота Чертово Корято.

Задачи. 1) Выделить минеральные комплексы руд на основе детального текстурно-структурного анализа и изучения типоморфных свойств минералов; 2) реконструировать физико-химические и термодинамические режимы формирования минеральных комплексов по результатам изучения флюидных включений в минералах; 3) проследить эволюцию физико-химических и термодинамических режимов во времени; 4) выполнить изотопные исследования серы сульфидов, углерода карбонатов и керогена, кислорода

карбонатов для установления возможных источников элементов; 5) обобщить полученные результаты и сопоставить их с данными по другим объектам; 6) сделать выводы о генезисе месторождения.

Фактический материал. В основу работы положен каменный материал – образцы и пробы горных пород и руд, которые были отобраны при выполнении хоздоговорных исследований с ЗАО «Тонода» Ленской золоторудной компании.

Разработанные научные положения опираются на экспериментальные, аналитические исследования и литературные материалы. Автором изучено более 100 прозрачных и 350 полированных шлифов пород и руд, обработано более 1000 точечных определений физических и механических свойств рудных минералов, 90 оригинальных атомно-эмиссионных многоэлементных анализов монофракций сульфидов, более 200 точечных микронзондовых анализов рудных и нерудных минералов, 17 анализов изотопов серы сульфидов, 18 – углерода карбонатов и 2 углерода керогена, более 200 точечных термометрических исследований газовой-жидких включений в кварце методом гомогенизации и криометрии, 110 точечных определений состава газовой фазы индивидуальных включений методом Раман-спектроскопии, 26 оригинальных газовой-хроматографических анализов монофракций кварца.

При анализе полученных результатов использовались опубликованные работы, а также фондовые материалы по месторождению. Для обработки результатов и их графической презентации применялись пакеты программ: Microsoft Office, Corel Draw X4, Adobe Photoshop CS3, Microsoft PowerPoint, Flincor, Isochor.

Личный вклад автора заключался в сборе и систематизации фактического материала, в подготовке проб для проведения анализов, в самостоятельном изучении кристалломорфологии, микротвердости и термоэлектрических свойств сульфидов, состава растворов флюидных включений термометрическими методами и методом комбинационного рассеяния, определении температур и расчете давлений. Автор принимал участие в определении состава минералов и их диагностике с использованием электронного микроскопа и микронзонда. Автором проанализирован комплекс полученных данных в сравнительном аспекте и создана вещественно-генетическая модель месторождения.

Основные защищаемые положения

1. Жильно-прожилково-вкрапленные руды месторождения Чертово Кoryто сложены пятью минеральными комплексами, образованными в пульсационном режиме функционирования гидротермального процесса в рамках кварц-рутил-апатит-пирит-пирротиновой, кварц-пирит-арсенопирит-пирротиновой с золотом, кварц-пирит-арсенопиритовой с золотом, кварц-полисульфидной с золотом и кварц-карбонатной стадий. Генерации участвующих в составе комплексов одноименных минералов различаются кристалломорфологией, составами и содержаниями элементов-примесей, термоэлектрическими свойствами, микротвердостью и внутренним строением. В составе каждого минерального комплекса, как правило, отложение раннего кварца сменяется отложением сульфидов и более поздних карбонатов.

2. Образование минеральных комплексов руд происходило в условиях снижающихся от стадии к стадии температур и давлений во флюидно-породной системе в диапазоне соответственно 420...80°C и 300...40 МПа. При этом, выделение ранних зарождений кварца каждой последующей стадии осуществлялось из более (до 40°C) высокотемпературных растворов, чем поздних зарождений кварца каждой предшествующей стадии. Ранний комплекс сформирован из водных растворов с соленостью 8...6 мас. % экв. NaCl, второй – из углекислотно-водных растворов с соленостью 15...8 мас. % экв. NaCl, третий и четвертый – из газо-жидкого флюида, представленного водно-солевым раствором с соленостью 21...10 мас. % экв. NaCl с хлоридами Mg и Na и газовой смесью CO₂–CH₄–N₂, пятый – из водных растворов с соленостью 9...4,5 мас. % экв. NaCl.

3. Месторождение Чертово Корыто обнаруживает вещественно-генетическую однородность с другими мезотермальными месторождениями, локализованными в кристаллическом и черносланцевом субстрате. Вещественно-генетическая модель месторождения включает обоснование и описание состава рудно-минеральных комплексов, последовательности, термодинамических и физико-химических режимов их образования, пульсационного режима поступления металлоносных растворов, изотопного состава серы сульфидов.

Научная новизна полученных результатов.

Впервые установлена последовательность минералообразования в рудах золотого месторождения Чертово Корыто. Выделено пять рудно-минеральных комплексов, последовательно сменяющих друг друга. Диагностированы рудные и нерудные минералы, изучена эволюция их химических составов и изменение типоморфных свойств от ранних минеральных комплексов к поздним. Установлены физико-химические и термодинамические режимы образования каждого комплекса и смена их во времени.

Установлен изотопный состав серы сульфидов из каждого минерального комплекса, изотопный состав углерода керогена, рассеянного в толще пород, углерода и кислорода раннего метасоматического анкерита и позднего анкерита из кварцевых жил и прожилков. Показано изменение изотопных отношений элементов в процессе минералообразования.

Доказана геолого-вещественно-генетическая однородность месторождения с другими золоторудными месторождениями региона, локализованными в сланцевом и кристаллическом субстрате.

Практическая значимость. Полученные результаты вписываются в систему доказательств, разработанных профессором И.В. Кучеренко, петрологического, петрохимического и геохимического прогнозно-поисковых критериев золотого оруденения. Эти критерии формируют положительный прогноз и локализацию перспективных площадей в кристаллическом и/или черносланцевом, в том числе не специализированном на золото субстрате, в геологическом строении которого принимают участие преобразованные в метасоматиты биотитизированные, амфиболитизированные дайки-флюидопроводники умеренно-щелочных долеритов с повышенными против нормативных содержаниями элементов фемофильной ассоциации (P, Ti, Mg, Fe, Ca, Mn), золота и сопутствующих металлов. Контрастные аномалии фосфора и титана в околорудных березитах обеспечивают диагностику раствороподводящих разломов, в ближнем обрамлении которых, как правило, сосредоточены наиболее богатые промышленные руды.

Апробация работы и публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 5 из них в журналах, включенных в перечень ВАК. Результаты исследований были представлены в виде устных и стендовых докладов на российских и международных конференциях: II Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (г. Екатеринбург-Миасс, 2010 г.), XIV и XV Международных научных симпозиумах студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2010-2011 гг.), II Всероссийской молодежной научной конференции «Геология Забайкалья» (г. Улан-Удэ, 2012 г.), XV Всероссийской конференции по термобарогеохимии (г. Москва, 2012 г.).

Результаты исследования включены в научно-исследовательские отчеты по гранту ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». Гос. контракт № П238 от 23.04.2010 г.

Объем и структура работы. Диссертационная работа общим объемом 141 стр. состоит из введения (5 стр.), текста 7 глав (114 стр.), заключения (3 стр.) и списка литературы, включающего 191 наименование (16 стр.), содержит 31 рисунок и 31 таблицу.

Во **введении** обоснована актуальность, обозначены цель и задачи работы. Показана новизна и практическая значимость проведенных исследований и сформулированы защищаемые положения.

В **первой** главе дан аналитический обзор по проблеме образования мезотермальных золоторудных месторождений на основе литературных данных, а также приведен обзор терминов, использованных в работе.

Во **второй** главе описана методика исследований.

Третья глава составлена по материалам исследования И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилова, В.Г. Мартыненко и А.В. Верховзина. В ней показано положение объекта в структуре рудного узла и дано описание геологического строения месторождения.

Четвертая глава содержит результаты изучения минеральных комплексов руд. Детально рассмотрены химический состав и типоморфные свойства минералов. Показана последовательность выделения минералов в каждом комплексе.

В **пятой** главе приведены результаты изучения газовой-жидких включений из кварца и карбонатов, реконструированы физико-химические и термодинамические режимы формирования каждого комплекса. Приведена схема последовательности минералообразования с термобарогеохимическими характеристиками и проведен сравнительный анализ термодинамических и физико-химических условий формирования месторождения Чертово Кoryто с другими объектами.

В **шестой** главе приведены результаты изотопных исследований серы сульфидов, углерода керогена, карбонатов и кислорода карбонатов. Проведено сопоставление результатов с литературными данными по другим золотым месторождениям.

Седьмая глава посвящена анализу геологических условий формирования месторождения. Рассмотрена тектоническая позиция месторождения, связь рудообразования с магматизмом, петрохимия метасоматических пород. Сформулирована геолого-генетическая концепция образования месторождения.

В **заключении** подведены итоги исследования, перечислены основные выводы.

Благодарности. Работа выполнена под руководством доктора геолого-минералогических наук профессора И.В. Кучеренко, которому автор выражает особую благодарность. Автор признателен за содействие в исследованиях научным сотрудникам НИ ТПУ Р.Ю. Гаврилову, А.Я. Пшеничкину, Ю.Е. Зыкову, Л.П. Рихванову, А.В. Волостнову, С.С. Ильенку, Т.И. Полуэктовой, К.Л. Новоселову, Э.В. Горчакову, Т.Е. Мартыновой, Л.А. Краснощековой, Т.Ю. Черкасовой, И.В. Мартыненко, Н.Н. Мартыновой, О.А. Смоленцеву и С.М. Сваровскому. Выполнению работы способствовало сотрудничество с Институтом геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) в лице А.А. Томиленко, Н.А. Гибшер, С.З. Смирнова, А.А. Боровикова, Н.С. Карманова, В.Н. Королюка, О.П. Изох, В.А. Пономарчука, М.А. Кириллова, М. А. Рябухи и с Дальневосточным отделением Российской академии наук (г. Владивосток) в лице В.А. Веливецкой, которым автор выражает благодарность.

Геологическое строение месторождения Чертово Кoryто

Месторождение входит в состав Артемьевского золоторудного поля Кевактинского рудного узла, расположенного на севере Патомского нагорья в бассейне р. Большой Патом в 100 км к северу от крупного месторождения Сухой Лог (рис. 1). Рудная залежь локализована в толще углеродистых сланцев михайловской свиты раннепротерозойского возраста мощностью 1200 м, образующей пологую синклинальную складку широтного простирания с размахом крыльев до многих км. Толща сложена гидротермально измененными сланцами и метасоматитами березит-пропилитового профиля, в которых сосредоточена сульфидная минерализация (Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., 2008₁).

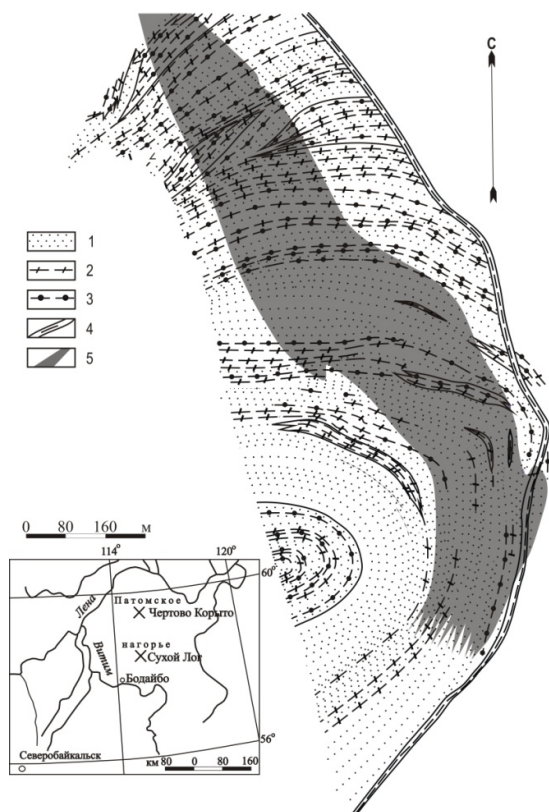


Рис. 1. – Схема геологического строения месторождения Чертово Корыто (Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., 2008₁): 1) слабо отсортированные серые до темно-серых, от тонко- до среднезернистых, неяснослойчатые грубослойчатые полевошпат-кварцевые песчаники, алевропесчаники, углеродистые и безуглеродистые; 2) слабо отсортированные темно-серые разномзернистые, от мелко- до крупнозернистых тонкослойчатые до грубослойчатых полевошпат-кварцевые алевролиты, песчанистые алевролиты, углеродистые и безуглеродистые; 3) аргиллиты серицитовые с незначительным (до 25 об. %) содержанием или отсутствием обломочной фракции песчаной и/или алевритовой размерности, углеродистые и безуглеродистые; 4) рудоконтролирующий разлом 5) область сульфидной минерализации

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Жильно-прожилково-вкрапленные руды месторождения Чертово Корыто сложены пятью минеральными комплексами, образованными в пульсационном режиме функционирования гидротермального процесса в рамках кварц-рутил-апатит-пирит-пирротиновой, кварц-пирит-арсенопирит-пирротиновой с золотом, кварц-пирит-арсенопиритовой с золотом, кварц-полисульфидной с золотом и кварц-карбонатной стадий. Генерации участвующих в составе комплексов одноименных минералов различаются кристалломорфологией, составами и содержаниями элементов-примесей, термоэлектрическими свойствами, микротвердостью и внутренним строением. В составе каждого минерального комплекса, как правило, отложение раннего кварца сменяется отложением сульфидов и более поздних карбонатов.

Минералы комплексов формируют крупнообъемный метасоматический ореол, залегающий в углеродистых терригенных сланцах, ранее регионально метаморфизованных на уровне амфибол-турмалин-мусковит-биотитового парагенезиса, отвечающего эпидот-амфиболитовой фации. Ранее установлена с участием автора горизонтальная минеральная зональность метасоматического ореола (Кучеренко и др., 2008₁). Комплекс участвует в составе фронтальной (кварц, серицит, рутил, лейкоксен, альбит, анкерит, кальцит, пирит, пирротин, хлорит, кероген, актинолит, биотит) углеродистой (кварц, ильменит, рутил, лейкоксен, апатит, серицит, альбит, эпидот, анкерит, кальцит, пирит, пирротин, хлорит, кероген), хлоритовой (кварц, ильменит, рутил, лейкоксен, апатит, серицит, альбит, эпидот, анкерит, кальцит, пирит, пирротин, хлорит), альбитовой (кварц, рутил, лейкоксен, апатит, серицит, анкерит, кальцит, пирит, пирротин, альбит) и березитовой (кварц, рутил, лейкоксен, серицит, апатит, анкерит, кальцит) зон метасоматического ореола.

В объеме **раннего** комплекса к числу наиболее ранних новообразованных минералов относится железисто-магнезиальный рипидолит (хлорит I) (рис. 2, а, б), который за-

мещает исходный биотит, образованный на этапе предшествующего регионального метаморфизма. Близко по времени с ним образован ильменит, количество которого не превышает 5...7 об. %. Ильменит представлен изометричными таблитчатыми зернами, ориентированными по сланцеватости, размером до 0,05 мм. Состав минерала: Fe – 34,37...36,41 мас. %; Ti – 31,53...31,95 мас. %; O – 30,46...31,64 мас. %. Отмечается постоянная примесь Mn – 1,21...1,33 мас. %.

Таблица 1 – Схема последовательности минералообразования в месторождении Чертово Кoryто

Минералы	Минеральные комплексы руд				
	Кварц-рутил -апатит-пирит -пирротиновый	Кварц-пирит -арсенопирит -пирротиновый с золотом	Кварц-пирит -арсенопирит -овый с золотом	Кварц -полиметал- лический с золотом	Кварц- карбонатный
Кварц	I	II	IIIa,б	IV	V
Хлорит	I	II	III		
Серицит					
Альбит					
Эпидот					
Анкерит	I	II	III	IV	
Кальцит	I	II	III	IV	V
Ильменит					
Рутил, лейкоксен					
Апатит	I			IV	
Пирит	I	II	III		
Арсенопирит		I	II		
Пирротин	I	II		III	
Халькопирит		I		III	
Сфалерит				II	
Галенит					
Золото		I	II	III	
Ульманит					
Кобальтин					
Теллуросмугит					
Самородный свинец					
Вильяминит					
Тектонические подвижки, интенсив- ность их проявления	↑				
Текстуры	Вкрапленная, прожилковая, гнездовая, брекчиевая				
Структуры	Липидогранобластовая, гранобластовая, кристаллическая, зернистая, замещения, колломорфная				
Условия образования					
Температура, °C	420...380	420...350	390...200	210...110	130...80
Давление, МПа	300...250	230...150	200...140	150...60	50...40
Соленость, мас. % экв. NaCl	8...6	15...8	21...10	16,5...8	9...4,5
Состав растворов	H ₂ O+NaCl	H ₂ O+NaCl+CO ₂	H ₂ O+NaCl+ MgCl ₂ +CO ₂ +CH ₄	H ₂ O+NaCl+ MgCl ₂ +CO ₂ +CH ₄ +N ₂	H ₂ O+NaCl

Мелкочешуйчатый серицит замещает хлорит I и исходные полевые шпаты. В сериците отмечена незначительная примесь лейкоксена и рутила, образованных в связи с высвобождением титана из биотита. Слюда относится к калиевой разновидности – мускови-

ту. Полевые шпаты, среди которых обычны кислые, редко средние плагиоклазы, в тыловых зонах интенсивно замещаются новообразованным альбитом, в углеродистой зоне – альбитом и эпидотом; последний встречается чрезвычайно редко.

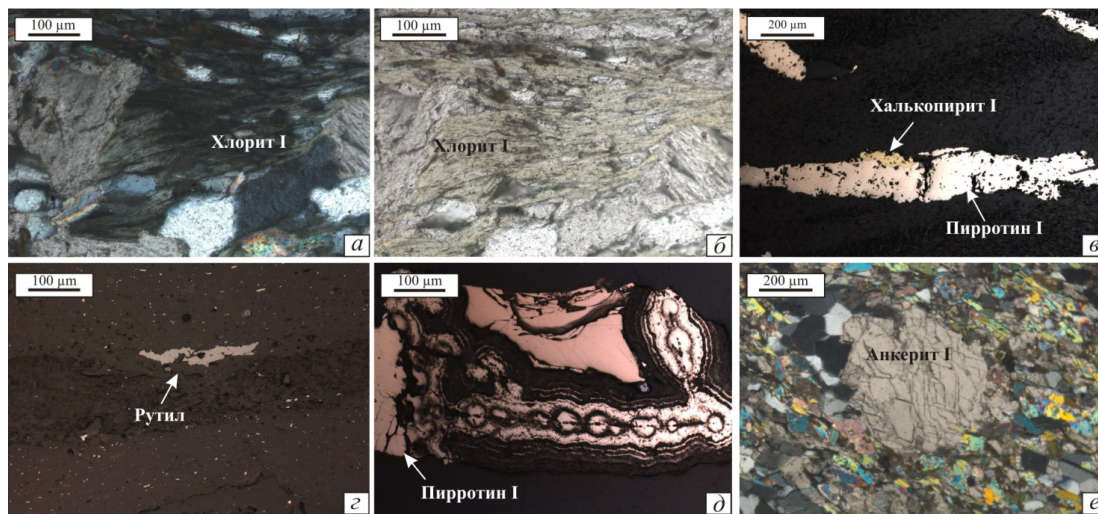


Рис. 2 – Минералы первого комплекса: а), б) чешуйчатые выделения хлорита I; в) штриховые выделения пирротина I в сростании с халькопиритом I, г) зерна рутила, рассеянные в углеродистой зоне ореола, д) колломорфные агрегаты пирита-мельниковита по пирротину I, е) ромбоэдр анкерита в метасоматите

Близко по времени с перечисленными минералами образованы рутил, лейкоксен и фтор-апатит. Рутил и лейкоксен часто развиваются псевдоморфно по табличкам ильменита, образуя скелетные формы. Титановые минералы отмечаются в углеродистой зоне в виде вытянутых форм (рис. 2, г). Состав рутила: Ti – 58,29...59,18 мас. %; O – 40,19...41,41 мас. %. Постоянно фиксируется примесь железа – 0,36...0,55 мас. %, в двух определениях диагностирован ниобий – 0,27 и 0,39 мас.%. Фтор-апатит присутствует в метасоматитах тыловых зон в виде удлинённых призматических кристаллов. В его составе отмечена примесь FeO в количестве 0,25...0,86 мас. %, MgO – 0,41...0,64 мас. % и SrO – 1,56...2,05 мас. %.

Метасоматический анкерит I в тыловых зонах образует метакристаллы в форме ромбоэдров (рис. 2, е), а в углеродистой зоне отмечается в виде небольших глазков и линзочек. Для него характерен выдержанный химический состав, но в нескольких пробах отмечена примесь SrCO₃ в количестве до 1,45 мас. %. На периферии анкеритовых агрегатов отмечаются сростки анкерита с кальцитом I без признаков коррозии и замещения, что позволяет объединить их в одну парагенетическую минеральную ассоциацию.

Метасоматического кварца I мало – в основном он образует микролинзы с вкраплением сульфидов или пламенивидные формы вокруг последних.

Наиболее ранним сульфидом является пирит I, встречающийся в углеродистой зоне в виде тонкой вкрапленности или микропрожилков, ориентированных по сланцеватости. Ему свойствен дырочный тип проводимости с абсолютными значениями от 46 до 64 мВ и среднее значение микротвердости – 1500 кгс/мм². В пирите I содержится серы от 53,48 до 53,59 мас. %, железа от 46,7 до 46,78 мас. %.

В углеродистой зоне образованы пирротин I в виде «штрихов», параллельных сланцеватости, размером от 0,1 до 5 мм. Состав минерала: Fe – 60,15...61,01 мас. %; S – 39,19...39,98 мас. %. Из примесей диагностированы медь и никель, содержание которых изменяется в пределах 0,01...0,04 мас. % и 0,12...0,23 мас. % соответственно. По пери-

ферийной части нередко развиваются колломорфные агрегаты пирита-мельниковита (рис. 2, д).

С пирротинотом I в ассоциации присутствует халькопирит I (рис. 2, в), развитый эпизодически по периферийной части крупных пирротинотных агрегатов. Границы между халькопиритом и пирротинотом плавные, ровные, что может свидетельствовать об их одновременном выделении, поэтому минералы объединены в одну парагенетическую ассоциацию – пирротинот-халькопиритовую.

Второй минеральный комплекс пространственно совмещен с первым и представлен кварцем II, хлоритом II, пиритом II, арсенопиритом I, пирротинотом II, халькопиритом II, сфалеритом I, анкеритом II и кальцитом II. В ходе формирования комплекса происходило отложение кварца II, сопровождавшееся дроблением, кристаллизацией и перекристаллизацией, что подтверждается наличием большого числа вторичных флюидных включений. Из сульфидов наиболее ранним является пирит II, который развит в толще пород в виде цепочечных скоплений кристаллов размером до 1 см, приуроченных к кварц-карбонатным прожилкам. Ему свойствен, как и пириту I, дырочный тип проводимости с абсолютными значениями от 49 до 58 мВ. Микротвердость немного выше, чем у пирита I, и составляет в среднем 1580 кгс/мм². В виде механической примеси установлено самородное золото I. Его содержание в пирите II изменяется в пределах 1,1...4,8 г/т. Состав пирита II: серы – 53,16...53,73 мас. %, железа – 46,46...46,89 мас. %.

Арсенопирит I развит в углеродистой зоне метасоматического ореола в виде метакристаллов (рис. 3, а) короткопризматической, реже удлиненно-призматической формы. В минерале обнаружена изоморфная примесь Со и Ni, наличие которой обуславливает электронный тип проводимости. Микротвердость минерала изменяется в интервале 1060...1270 кгс/мм². Состав минерала: Fe – 32,93...34,27 мас. %, S – 19,16...19,94 мас. %, As – 46,05...47,26 мас. %. С арсенопиритом I установлено самородное золото I (рис. 3, в), представленное включениями размером до 0,5 мм. Его содержание в арсенопирите I изменяется в пределах 1,2...8,0 г/т (среднее 6,3 г/т). Золото I содержит Ag и является наиболее высокопробным (886,5...922,9 ‰). Вокруг арсенопирита развиты пламенивидные выделения хлорита II, по составу относящегося, как и хлорит I, к рипидолиту, но отличающегося повышенным содержанием MgO (в среднем 14,5 мас. %) и пониженным FeO (в среднем 26,61 мас. %).

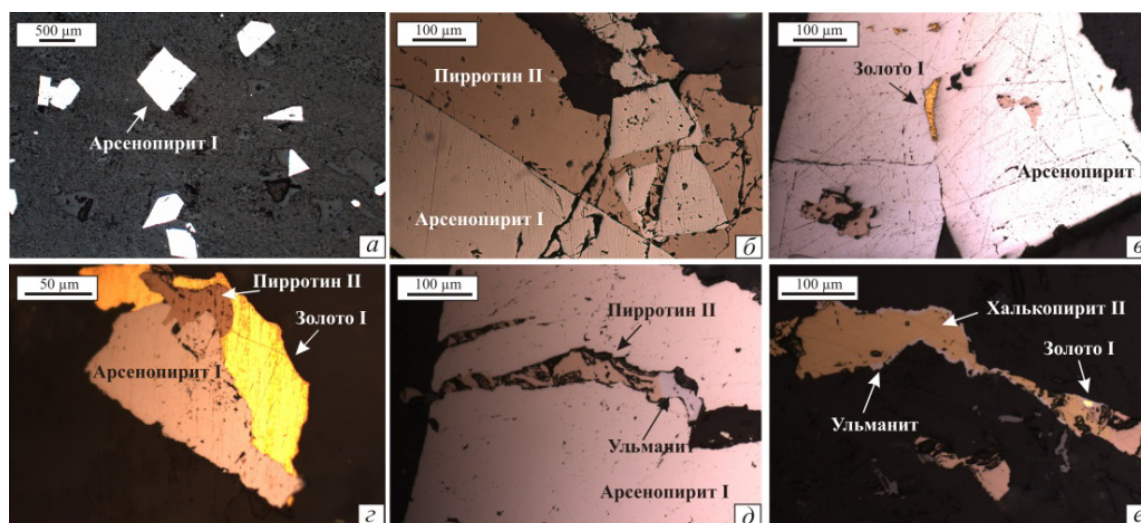


Рис. 3 – Рудная минерализация второго комплекса: а) метакристаллы арсенопирита I в углеродистом сланце, б) цементирование арсенопирита I пирротинотом II, в) золото I в арсенопирите II, г) золото I в ассоциации с арсенопиритом I и пирротинотом II, д), е) ульманит

Пирротин II представлен плотными гнездовыми скоплениями в кварц-карбонатных прожилках и является более поздним минералом по отношению к пириту II и арсенопириту I, так как цементирует их (рис. 3, б). Состав минерала: Fe – 60,23...60,73 мас. %; S – 39,01...39,61 мас. %. В качестве примесей диагностированы медь и никель, содержание которых изменяется в пределах 0,01...0,03 мас. % и 0,21...0,84 мас. % соответственно. С пирротинном II в ассоциации отмечается сфалерит I и халькопирит II, развивающиеся по периферийной части зернистых агрегатов пирротина II без признаков коррозии, что отражает близкое время их кристаллизации и дает основание объединить их в одну парагенную ассоциацию. Пирротин II иногда образует сростания с поздним золотом II. Структура взаимных границ между минералами зазубренная, что свидетельствует о их одновременном выделении. Из редких минералов диагностирован ульманит, находящийся в сростании с халькопиритом II и пирротинном II (рис. 2, д, е). Состав минерала: Sb – 57,22...58,13 мас. %; Ni – 26,37...26,77 мас. %; S – 14,35...14,93 мас. %. В качестве изоморфной примеси присутствует Bi – 1,16...1,75 мас. %.

Поздним минералом является анкерит II, образующий гнездовые выделения в кварце II, по периферийной части которых развивается кальцит III.

Продукты **третьего** минерального комплекса локализованы в центральной части рудного тела в относительно мощных кварц-карбонатных жилах и представлены кварцем III, хлоритом III, пиритом III, арсенопиритом II, золотом II, анкеритом III и кальцитом III.

Кварц III, слагающий жилы, имеет не одно зарождение, что отражено в различных цветовых и морфологических характеристиках. Наиболее ранний серый кварц III_а имеет крупнокристаллическое строение. Для него характерно наличие большого количества флюидных включений первичного и вторичного генезиса. В ассоциации с кварцем III_а отмечается более поздний светло-серый кварц III_б, имеющий мелкозернистое строение и отличающийся меньшим количеством включений.

Хлорит III развит в кварцевых жилах в форме чешуек насыщенно-зеленого цвета и соответствует железистой разности – брунsvигиту. Ранним сульфидом является пирит III, встречающийся редко и образующий кристаллические агрегаты в кварце III. Для него характерно разнообразие морфологических форм кристаллов, представленных комбинациями куба, октаэдра, тетрагонтриоктаэдра и пентагонтриоктаэдра. Сульфид обладает

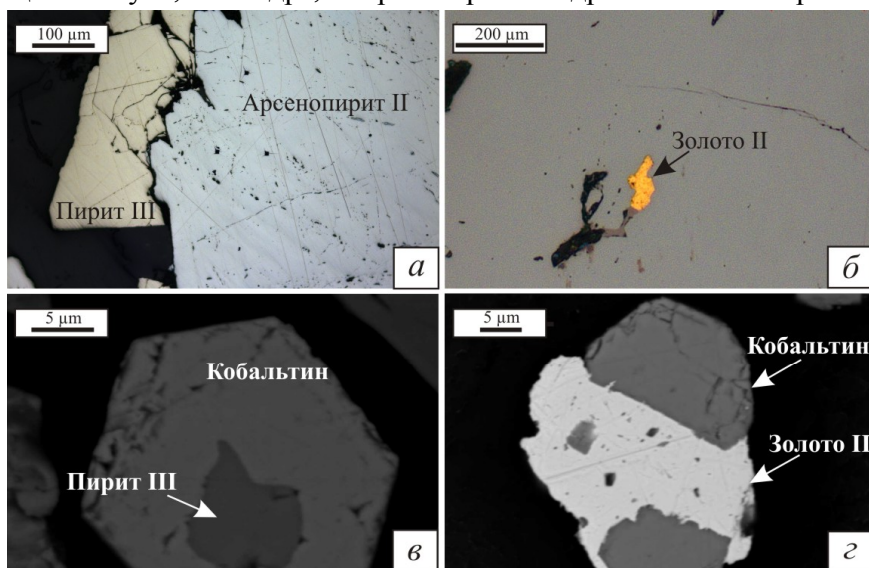


Рис. 4 – Рудная минерализация третьего комплекса: а) пирит III в ассоциации с арсенопиритом II, б) включения золота II в арсенопирите I, в) реликты пирита III в кобальтине, з) кобальтин замещается золотом II-ой генерации

смешанным типом проводимости с изменяющимися значениями термоЭДС от +25 до +67 мВ для дырочного типа проводимости и от –60 до –67 мВ для электронного. В пирите III отмечено повышенное содержание Co и Ni (Co – 150,0...205,0 г/т; Ni – 370,7...514,6 г/т). Электронный тип проводимости у пирита III дает основание полагать, что Co и Ni входят в кристаллическую решетку минерала. Подтверждением этого служит пониженная микротвер-

дость (до 1400 кгс/мм²) в сравнении с пиритом I и II и повышенные значения показателя отражения в области спектра 500...600 нм до 57...58 %. Пирит III имеет нестехиометрический состав: Fe – 46,44...46,72 мас. %, S – 52,83...53,75 мас. %. В пирите III установлено самородное золото II с содержанием 1,9...5,8 г/т (среднее значение 3,25 г/т).

Арсенопирит II (рис. 4, а, б) присутствует в виде кристаллических скоплений или крупных выделений кристаллов короткопризматического габитуса в кварцевых жилах и прожилках с характерной катакlastической структурой. Состав арсенопирита: Fe – 34,18...34,12 мас. %, S – 20,15...20,87 мас. %, As – 44,53...46,16 мас. %. Арсенопирит II более обогащен серой в сравнении с арсенопиритом I. Присутствие Co и Ni в виде изоморфных примесей дает электронный тип проводимости с изменяющимися значениями – (47...40) мВ, что немного отличается от значений у арсенопирита I. Микротвердость минерала изменяется в пределах 931...983 кгс/мм², что также отличает арсенопирит I от II. В ассоциации с сульфидом обнаружено золото II с более низкой пробностью (874,0...907,15 ‰) в сравнении с золотом I, и также содержащее примесь Ag. Оно образует механическую примесь в арсенопирите II и пирите III (рис. 4, б).

Из редких минералов диагностирован кобальтин, представленный как отдельными идиоморфными зернами кубического и псевдогексагонального облика, так и сростками с тонкими фазами других минералов (рис. 4, в, з). Состав минерала определяется вариациями содержаний: Co – 20,72...25,54 мас. %; As – 37,66...44,99 мас. %; S – 18,5...22,87 мас. %. Содержание примесей: Ni от 3,85 до 15,66 мас. %, Fe от 5,78 до 11,92 мас. %.

Анкерит III выделяется последним в рассматриваемом комплексе, заполняя пустоты в кварцевых жилах. Он образует крупные гнездовые выделения (до 5...6 см) без признаков дробления. В его составе постоянно отмечается примесь стронцианитовой молекулы (до 0,18 мол. %). По периферийным частям анкеритовых гнезд отмечается присутствие кальцита III, в котором повышено содержание SrCO₃ до 0,42 мол. % в сравнении с анкеритом III.

Четвертый минеральный комплекс пространственно совмещен с третьим. Основ-

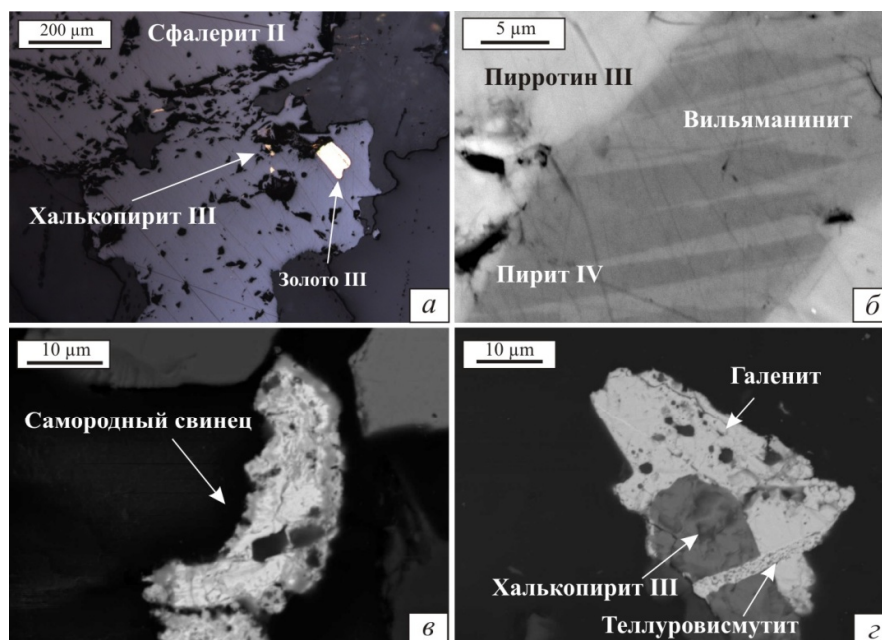


Рис. 5 – Минералы четвертого комплекса: а) механические включения золота в сфалерите II, б) срастания вильяманинита с пиритом IV, в) самородный свинец, з) позднее пластинчатое выделение теллуrowисмутита, секущего галенит и халькопирит III

ными минералами являются кварц IV, галенит, сфалерит II, пирротин III, халькопирит III, золото III, анкерит IV и кальцит IV. Кварц IV, в отличие от предыдущих генераций, светло-серый, прозрачный и содержит значительное количество первичных флюидных включений. В ассоциации с кварцем IV встречается галенит в виде гнездовых обособлений размером до 2 см. Для него характерна примесь Ag – 0,2...0,37 мас. % и Bi – 0,28...0,68 мас. %. Сфалерит II, как и

галенит, отмечается в виде гнезд размером до 2 см и образовался, вероятно, чуть раньше последнего. В качестве изоморфных примесей в нем диагностированы Fe – 6,92...7,23 мас. % и Cd – 2,99...3,26 мас. %. В виде включений в сульфидах диагностировано самородное золото III (рис. 5, а). Оно наиболее низкопробное на месторождении (786,0...790,3 ‰). Пирротин III образует обособленные от других сульфидов гнездовые выделения. В качестве примесей в нем диагностированы Cu (0,03 %) и Ni (0,02...0,11 %), содержание которых значительно ниже, чем в пирротине I и II генераций. В ассоциации с пирротинном присутствует халькопирит III, развитый по его периферийной части.

Из редких минералов обнаружены теллуровисмутит и самородный свинец, а также диагностирован вильяминит (рис. 5, б, в, г). Самородный свинец представлен тонко-размерными зернами изометричного комковатого облика с бугристо-ямчатой поверхностью, без видимых соотношений с другими минералами. Химический состав: Pb – 86,6...97,24 мас. %, S – 0,31...5,03 мас. %. Из примесей диагностировано Fe – 1,71...8,37 мас. %, в единичном случае Ti – 1,05 мас. %. Теллуровисмутит обнаружен в ассоциации с халькопиритом III и галенитом в виде тонкого пластинчатого образования. Он является более поздним минералом четвертого комплекса. Химический состав: Te – 40,03 мас. %; Bi – 56,61 мас. %; Cu – 3,35 мас. %.

Вильяминит встречается в ассоциации с пирротинном III и пиритом IV, с которым он идет в сростании, либо образует структуру распада твердого раствора (рис. 4, б). В отраженном свете имеет слегка голубоватый оттенок. Показатель отражения близок к пириту. Проявлен эффект анизотропии в зеленовато-синих тонах. Состав минерала: S – 52,47...53,01 мас. %; Fe – 45,94...47,03 мас. %. Из других элементов в одном случае определен Ni (0,26 мас. %) и дважды зафиксировано содержание Cu (0,42 и 1,33 мас. %).

Карбонаты образуют гнездовые скопления размером до 5 см. По составу они не однородны и представлены сростаниями кальцита IV и анкерита IV. Для минералов характерна примесь SrCO₃, содержание которой достигает 0,3 мас. % в кальците IV и 0,2 мас. % в анкерите IV. Анкерит IV заполняет пустоты в кварцевых жилах и часто ассоциирует с галенитом и пирротинном III.

Рудообразование завершается кристаллизацией кварц-карбонатного **пятого** минерального комплекса, представленного маломощными прожилками, секущими ранние образования. Кальцит V преобладает над полупрозрачным кварцем V-ой генерации. В минерале отсутствует примесь стронция в отличие от кальцита предыдущих генераций.

Руды месторождения Чертово Кoryто сложены пятью генерациями кварца, четырьмя – пирита, двумя – арсенопирита, тремя – пирротина, двумя – сфалерита, одной – галенита, тремя – халькопирита, тремя – золота, тремя – хлорита, четырьмя – анкерита, и пятью – кальцита (табл. 1). Из редких минералов установлены – ульманит, кобальтин, теллуровисмутит, самородный свинец и вильяминит. Генерации минералов различаются типоморфными признаками (кристалломорфологией, термоэлектрическими свойствами, микротвердостью), химическими составами, содержаниями элементов-примесей и внутренним строением.

Установлено, что минеральные комплексы руд соответствуют пяти стадиям минералообразования, которые последовательно сменяют друг друга при пульсационном режиме поступления растворов. О порционном поступлении растворов в блоки рудообразования свидетельствуют структурные соотношения комплексов и их взаимные пересечения, последовательность отложения минералов в рамках каждого комплекса, согласно которой сначала отлагался кварц, затем сульфиды и карбонаты, температурные «скачки» при отложении ранних зарождений кварцев последующего комплекса относительно поздних зарождений кварцев предшествующего комплекса (см. рис. 7), смена состава растворенных веществ, в том числе газов, при формировании каждого комплекса, при-

сутствие внутрирудных долеритовых даек-флюидопроводников, указывающих на чередование инъекций металлоносных растворов и расплавов (см. стр. 20).

2. Образование минеральных комплексов руд происходило в условиях снижающихся от стадии к стадии температур и давлений во флюидно-породной системе в диапазоне соответственно 420...80°C и 300...40 МПа. При этом, выделение ранних зарождений кварца каждой последующей стадии осуществлялось из более (до 40°C) высокотемпературных растворов, чем поздних зарождений кварца каждой предшествующей стадии. Ранний комплекс сформирован из водных растворов с соленостью 8...6 мас. % экв. NaCl, второй – из углекислотно-водных растворов с соленостью 15...8 мас. % экв. NaCl, третий и четвертый – из газо-жидкого флюида, представленного водно-солевым раствором с соленостью 21...10 мас. % экв. NaCl с хлоридами Mg и Na и газовой смесью CO₂–CH₄–N₂, пятый – из водных растворов с соленостью 9...4,5 мас. % экв. NaCl.

Раннего метасоматического кварца I мало, – в основном он образует микролинзы с вкраплением сульфидов или оторочки вокруг пирротина I и пирита I. В кварце I встречены единичные включения, представленные существенно водными образованиями поздних наложенных растворов. По единичным псевдотрихитным включениям (рис. 6, а) зафиксирована температура гомогенизации в газообразную, реже жидкую фазу, которая изменяется от 420 до 380 °C. Растворы, законсервированные во включениях, имеют невысокую соленость – 8...6 мас. % экв. NaCl. Давление минералообразующего флюида оценивается в интервале 300...250 МПа.

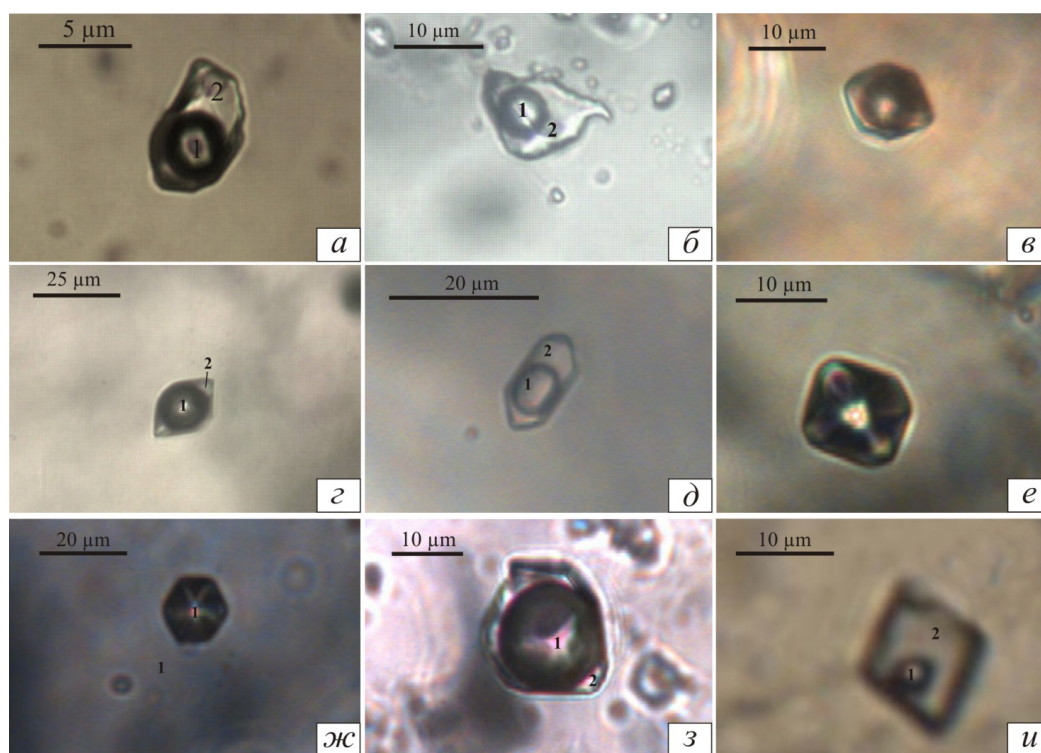


Рис. 6 – Флюидные включения в кварцах и карбонатах различных минеральных комплексов: а) псевдотрихитные включения в кварце I, б) вторичные водные включения в кварце II, в) сингенетичное углекислотно-водное включение в кварце II, г) – сингенетичные углекислотно-водные включения в кварце III, е) объемное азот-метан-углекислотное газовое включение в кварце III, ж) объемное углекислотно-метановое включение в кварце IV, имеющее четко выраженную гексагональную форму, з) сингенетичное двухфазовое углекислотно-водное включение в кварце IV, и) сингенетичное двухфазовое водное включение в кальците V (1–газовая фаза, 2–жидкая фаза)

В ходе формирования **второго** минерального комплекса происходило неоднократное отложение кварца II, сопровождавшееся дроблением, кристаллизацией и перекристаллизацией, что подтверждается наличием большого числа вторичных существенно водных флюидных включений, имеющих неправильную форму (рис. 6, б) и расположенных вдоль залеченных трещин. Сингенетичные включения встречаются редко и представлены углекислотно-водными образованиями. Соотношение углекислотной и водно-солевой фаз составляет 20:80 (рис. 6, в).

Концентрация солей изменяется в интервале 15...8 мас. % экв. NaCl. Температура эвтектики составляет $-(28...23)^\circ\text{C}$, что соответствует натриевой специализации растворов. Включения гомогенизируются преимущественно в жидкую фазу при температурах 420...365 $^\circ\text{C}$. Двухфазовые водные флюидные включения в анкерите II гомогенизируются при температурах 380...350 $^\circ\text{C}$. Давление оценено по сингенетичным углекислотно-водным и существенно водным включениям в кварце и составляет 230...150 МПа.

Кварц III, слагающий жилы, имеет не одно зарождение, что отражено в различных цветовых и морфологических характеристиках. Наиболее ранний серый кварц III_а имеет крупнокристаллическое строение с блочным типом погасания. Для него характерно наличие большого количества флюидных включений первичного и вторичного генезиса. Первичные включения представлены углекислотно-водными и азот-метан-углекислотными образованиями (рис. 6, г, д, е). Углекислотно-водные включения являются двухфазовыми (водно-солевой раствор + жидкая углекислота). Соотношение углекислотной и водно-солевой фаз во включениях меняется от 20:80 до 60:40. Нередко отмечается присутствие смеси CO₂ с CH₄ и N₂. По данным КР-анализа, состав газовой фазы включений представлен углекислотой (41,24...97,56 мол. %), метаном (0...58,76 мол. %) и азотом, который отмечен в нескольких включениях (до 9,01 мол. %).

Азот-метан-углекислотные включения при комнатной температуре являются однофазовыми и подразделяются на жидкие (сжиженный газ) и газовые включения. Среди них есть углекислотные и метановые включения с небольшим содержанием азота. Количество CO₂ изменяется в интервале 0...71,76 мол. %, CH₄ – 28,24...100 мол. %, N₂ – 0...2,83 мол. %.

Температура гомогенизации углекислотно-водных включений с преобладающим количеством жидкой фазы изменяется в интервале 390...205 $^\circ\text{C}$. Соленость растворов повышенная и составляет 16,5...10 мас. % экв. NaCl. По температурам эвтектики $-(36...28)^\circ\text{C}$ установлено, что в составе растворов присутствуют хлориды Mg и Na. В кварце III_а отмечено присутствие трехфазовых включений, содержащих водный раствор, газовый пузырек и кубический кристаллик галита. Они отнесены к псевдовторичным образованиям.

Кварц III_а насыщен вторичными включениями, которые расположены линейно в виде цепочек, приуроченных к секущим трещинам, пересекающим границы зерен.

В ассоциации с кварцем III_а отмечается более поздний светло-серый кварц III_б, имеющий мелкозернистое строение и отличающийся меньшим количеством сингенетичных включений. В нем зафиксированы в основном углекислотно-водные включения, являющиеся двухфазовыми образованиями (водно-солевой раствор + жидкая углекислота). Соотношение углекислотной и водно-солевой фаз меняется от 20:80 до 60:40. В единичных включениях отмечается присутствие смеси CO₂ с CH₄. При этом, количество CH₄ не превышает 15 мол. %. Температура гомогенизации и концентрация солей укладывается в интервал 375...210 $^\circ\text{C}$ и 21...10 мас. % экв. NaCl соответственно. По включениям рассчитано давление минералообразующего флюида, которое составило 200...140 МПа.

Различия в газовом составе флюидных включений кварца III_а и III_б подтверждается результатами газовой хроматографии. Для кварца III_а содержание CO₂ и CH₄ изменяется в интервале 80...120 мг/кг и 5...10 мг/кг соответственно, а для кварца III_б 20...70 мг/кг и

2...6 мг/кг. Общая флюидонасыщенность кварца III_а составляет в среднем 730,9 мг/кг, а кварца III_б – 430,34 мг/кг.

Двухфазные водные флюидные включения в анкерите III гомогенизируются при температурах 215...200 °С.

Кварц IV, в отличие от предыдущих генераций, светло-серый, прозрачный, слив-ной. Имеет массивное однородное сложение и содержит значительное количество первичных флюидных включений.

Сингенетичные включения представлены углекислотно-водными и существенно газовыми образованиями (рис. 6, ж, з). Углекислотно-водные включения состоят из водно-солевого раствора и жидкой углекислоты. Соотношение углекислотной и водно-солевой фаз во включениях меняется от 20:80 до 60:40. Отмечается постоянное присутствие смеси CO₂ с низкокипящими газами (CH₄ и N₂). По данным КР-анализа, состав газовой фазы включений представлен углекислотой (50,87...80,42 мол. %) и метаном (19,58...49,13 мол. %). Существенно газовые включения на 90...100 % представлены газовым пузырьком. Количество CO₂ изменяется в интервале 0...95,24 мол. %, CH₄ – 4,76...100 мол. %, N₂ – 0...24,37 мол. %.

Температура гомогенизации углекислотно-водных включений с преобладающим количеством жидкой фазы изменяется в интервале 210...110 °С. Соленость растворов составляет 16,5...8 мас. % экв. NaCl. По температурам эвтектики –(38...34) °С установлено, что в составе растворов присутствуют хлориды Mg и Na. Двухфазовые водные флюидные включения в анкерите IV гомогенизируются при температурах 130...110 °С. По включениям в кварце оценен параметр давления, который составил 150...60 МПа.

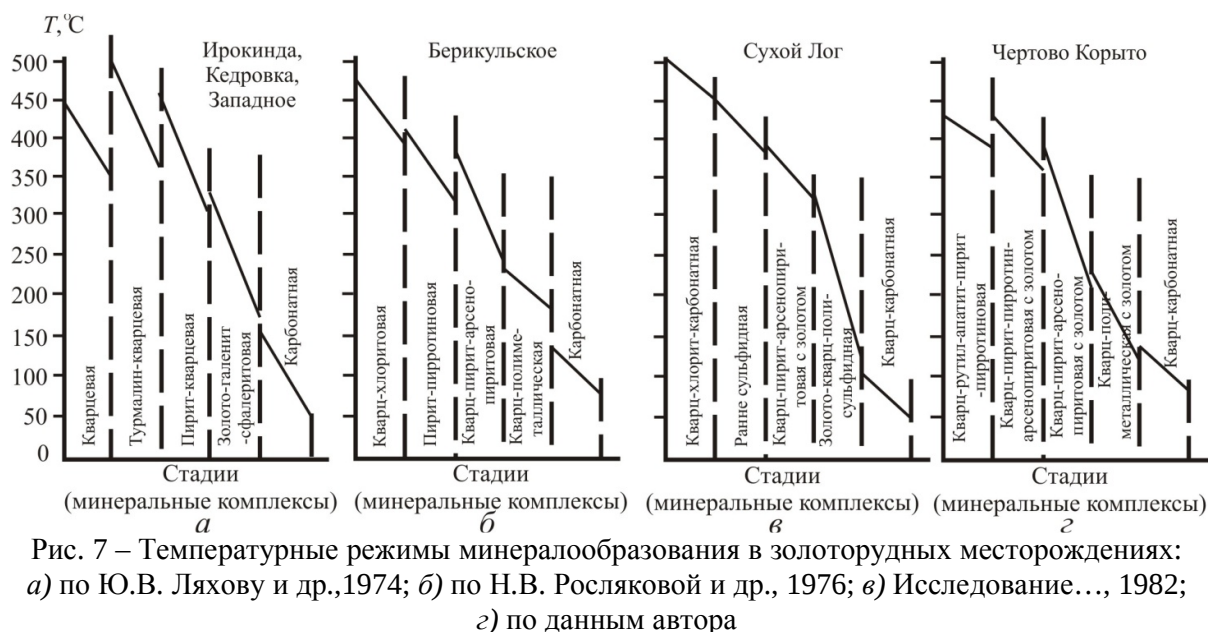
В кварце и карбонатах пятого минерального комплекса развиты сингенетичные водные включения, представленные однофазовыми водными, либо двухфазовыми образованиями (рис. 6, и). Соотношение жидкости и газа, представленного водяным паром, меняется от 20:80 до 60:40. Концентрация солей составляет 9...4,5 мас. % экв. NaCl. Включения гомогенизируются в жидкую фазу при температурах 130...80 °С. Давление не превышает 50...40 МПа.

Таким образом, проведенные исследования показали, что формирование каждого комплекса происходило при определенных физико-химических и термодинамических режимах. Отмечена смена температур, давлений, концентраций растворенных солей, состава газов и их количества от комплекса к комплексу. Выявлено, что выделение раннего кварца каждого последующего комплекса осуществлялось из более (до 40 °С) высокотемпературных растворов, чем позднего кварца каждого предшествующего комплекса (табл. 1; рис. 7, з).

3. Месторождение Чертово Кoryто обнаруживает вещественно-генетическую однородность с другими мезотермальными месторождениями, локализованными в кристаллическом и черносланцевом субстрате. Вещественно-генетическая модель месторождения включает обоснование и описание состава рудно-минеральных комплексов, последовательности, термодинамических и физико-химических режимов их образования, пульсационного режима поступления металллоносных растворов, изотопного состава серы сульфидов.

Крупнообъемный зональный метасоматический ореол месторождения Чертово Кoryто включает пять минералого-петрохимических зон – фронтальную, углеродистую, хлоритовую, альбитовую, тыловую (березитовую) (Кучеренко, 2007). По составу, структуре и зональности он обнаруживает сходство с метасоматическими ореолами других золоторудных месторождений Ленского, Северо-Забайкальского, Енисейского и других районов, образованных в различных породах, включая углеродистые сланцы, и принадлежит к сочетанию метасоматических формаций – березитовой в тыловых и пропилютовой в периферийных минералого-петрохимических зонах.

Метасоматический ореол месторождения Чертово Кoryто сложен пятью минеральными комплексами. В их состав входят генерации кварца, хлорита, рутила, апатита, пирита, арсенопирита, пирротина, сфалерита, халькопирита, галенита, золота и карбонатов, различающиеся кристалломорфологией, составами и содержаниями элементов-примесей, термоэлектрическими свойствами и внутренним строением. Вещественный состав минеральных комплексов обнаруживает сходство с составом прожилково-вкрапленных руд в углеродистых сланцах (Сухой Лог, Мурунтау, Советское, Холбинское) и золотосульфидно-кварцевых руд в ультраметаморфитах, гранитах, базальтах и других породах (Ирокинда, Дарасун, Берикуль). Руды перечисленных месторождений также сложены пятью минеральными комплексами, в которых отмечены сходные наборы важнейших по распространенности минералов руд и повторяющаяся в генерализованном виде последовательность отложения минералов в рамках комплексов, – от ранних кварцев к поздним сульфидам и далее карбонатам. Повторяются типоморфные свойства сульфидов месторождений обеих совокупностей, набор элементов примесей в них, редкие минералы висмута, кобальта, теллуриды, арсениды и другие соединения в различных сочетаниях и количественных соотношениях.



По результатам изучения флюидных включений установлено, что руды месторождения Чертово Кoryто формировались при температурах от 420 до 80 °С и давлении от 300 до 40 МПа, при активном участии углекислоты, метана, азота и обнаруживают сходство с условиями образования руд других месторождений, залегающих в сланцевом и несланцевом субстрате. В частности, установлено, что формирование золотых месторождений происходило в температурном интервале от 500 до 50°С и давлении от 430 до 40 МПа. Максимальные значения этих параметров фиксируются при образовании ранних комплексов, минимальные – при кристаллизации поздних. При этом отмечается возрастание (до 40...100 °С) температур отложения ранних зарождений кварцев каждого последующего комплекса относительно температур отложения поздних зарождений кварцев каждого предшествующего ему комплекса (рис. 7). Во всех месторождениях золото отлагалось в узком температурном интервале 280...260 – 180...160 °С из углекислотноводных флюидов, содержащих смесь азота и углеводородов. На ранних и поздних стадиях, как правило, функционировали водно-солевые растворы, почти не содержащие низки кипящих газов (CO₂, CH₄, N₂). Соленость флюидов характеризуется минимальными

значениями при образовании ранних и поздних комплексов, и повышенными, до расколов, – при кристаллизации продуктивных комплексов.

В месторождении Чертово Кoryто для пиритов различных генераций характерен незначительный разброс значений $\delta^{34}\text{S}$, изменяющийся в пределах $-0,2...+4,7\text{‰}$ со средним значением $+3,25\text{‰}$. Для арсенопиритов интервал составляет $-3,8...+1,3\text{‰}$. Пирротинам свойственны значения, изменяющиеся в пределах $+2,7...+7,1\text{‰}$. Для более позднего сульфида – галенита свойственны изотопные отношения серы ($+1,8\text{‰}$, $+2,5\text{‰}$). Все значения близки к метеоритному стандарту. Незначительный интервал колебаний изотопных отношений серы ранних и поздних сульфидов свидетельствует об однородности источника серы в процессе рудообразования. Более положительные отношения изотопов серы пирротина I ($+6,9\text{‰}$, $+7,1\text{‰}$) объясняются смешением ювенильной серы с серой осадочного генезиса или фракционированием изотопов серы в условиях ее дефицита. Полученные изотопные отношения серы сульфидов месторождения Чертово Кoryто согласуются с изотопными отношениями серы месторождений, образованных в кристаллическом (Ирокинда, Дарасун, месторождения Кузнецкого Алатау) и сланцевом (Сухой Лог, Наталка, Мурунтау) субстрате (рис. 8). Для них характерен также незначительный разброс значений $\delta^{34}\text{S}$. При этом, большая их часть укладывается в интервалы колебаний, свойственные мантии, что свидетельствует об участии в рудообразовании глубинных растворов.

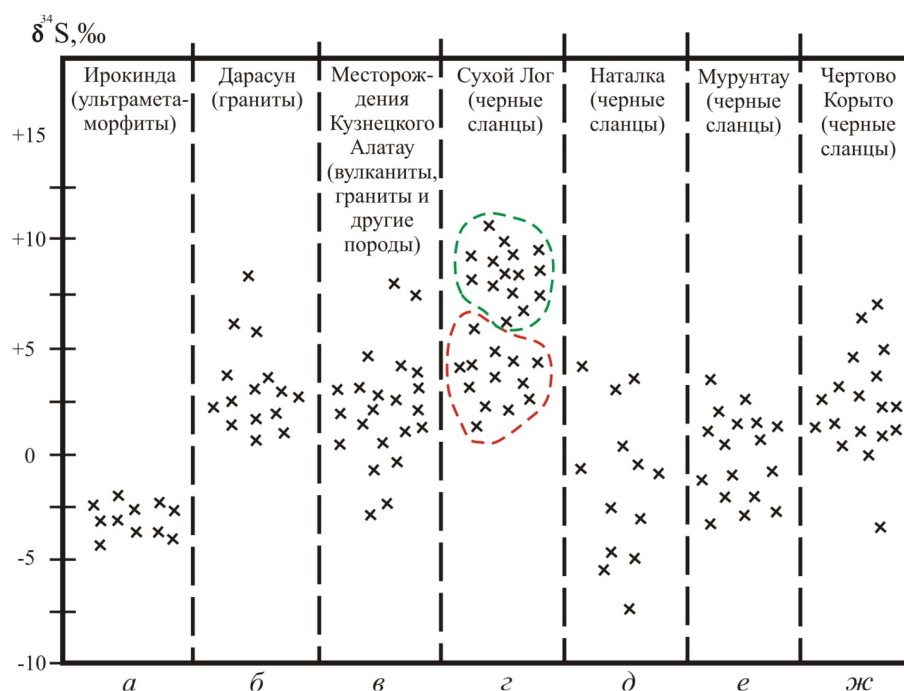


Рис. 8 – Изотопные отношения серы сульфидов из рудных зон золоторудных месторождений: а) по данным И.А. Загрузиной с соавторами, 1980; б) по данным В.Ю. Прокофьева с соавторами, 2000; в) по данным С.И. Голышева с соавторами, 1985; г) по данным И.А. Загрузиной с соавторами, 1980 (красный пунктир), А.Е. Будяка, 2009 и Т.А. Иконниковой, 2010 (зеленый пунктир); д) по данным В.И. Гончарова с соавторами, 2002; е) по данным С.Г. Кряжева, 1999; жс) по данным автора

В месторождении Чертово Кoryто изотопные отношения углерода керогена составляют $-26,2$ и $-24,6\text{‰}$. Утяжеленными значениями $\delta^{13}\text{C}$ характеризуется анкерит из березитов ($-18,5...-18,2\text{‰}$) и кварцевых жил ($-18,4...-17,4\text{‰}$). Изотопные отношения кислорода анкерита укладываются в узкий диапазон $\delta^{18}\text{O}$ ($14,2...15,1\text{‰}$).

Для других месторождений, образованных в черносланцевых толщах (Кедровское, Наталкинское, Сухой Лог, и др.), характерны также изотопно-легкие значения углерода керогена, изменяющиеся в интервале от $-14,1$ до $-28,3$ ‰ (Кучеренко, 1991; Гончаров и др., 2002; Кряжев и др., 2009; Иконникова, 2010). При этом, большая их часть попадает в интервал от -19 до -25 ‰ (рис. 9).

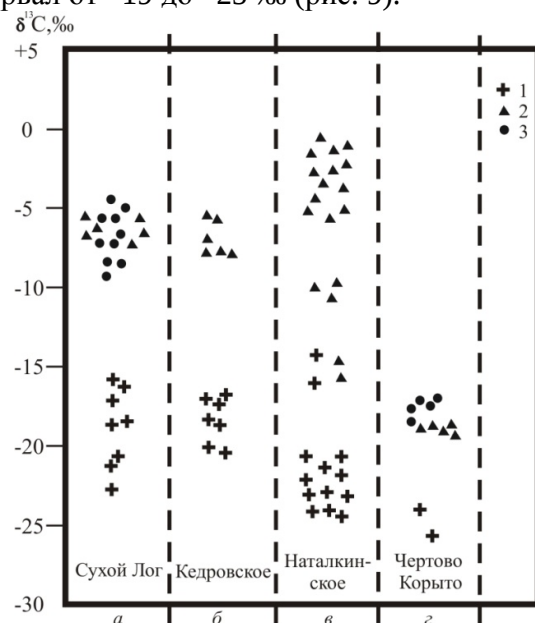


Рис. 9 – Изотопные отношения некарбонатного и карбонатного углерода в месторождениях золота, образованных в черносланцевом субстрате

1 – изотопные отношения углерода керогена; 2 – изотопные отношения углерода метасоматических карбонатов; 3 – изотопные отношения углерода карбонатов из кварцевых жил;

а) по обобщенным данным С.Г. Кряжева с соавторами, 2009 и Т.А. Иконниковой, 2010; б) по данным И.В. Кучеренко, 1991; в) по данным С.В. Ворошина с соавторами, 2000 и В.И. Гончарова с соавторами, 2002; г) по данным автора

В анкерите месторождения Чертово Корято изотопные отношения углерода соответствуют значениям, промежуточным между изотопно-легким углеродом керогена и изотопно-тяжелым мантийным углеродом. Нарастающее от керогена через ранний анкерит березитов к позднему анкериту кварцевых жил и прожилков изотопное утяжеление углерода является, вероятно, следствием смешения глубинного углерода с углеродом керогена сланцев в процессе его окисления, сопровождаемого осветлением апочерносланцевых березитов. Изотопный состав кислорода анкерита при этом обычен в гидротермальных карбонатах. В других черносланцевых месторождениях, например, в Сухом Логу карбонаты из метасоматически измененных пород и кварцевых жил имеют значения $\delta^{13}\text{C}$, изменяющиеся в интервале $-6,3 \dots -5,2$ ‰ и $-4,6 \dots -9,2$ ‰ (Иконникова, 2010), то есть близкие к метеоритному стандарту (-7 ‰) (Галимов, 1986). Отличающиеся изотопные отношения $\delta^{13}\text{C}$ карбонатов в двух соседних месторождениях черносланцевого типа, видимо, связаны с количеством поступающей в область рудообразования глубинной углекислоты. В Сухом Логу, вероятно, ее было достаточно, чтобы заменить изотопно-легкий углерод керогена до изотопно-тяжелого мантийного уровня углерода карбонатов кварцевых жил, через промежуточные значения изотопных отношений $\delta^{13}\text{C}$ метасоматических карбонатов. Подобная ситуация отмечается также и в других месторождениях черносланцевого типа, например, в Мурунтау (Кольцов и др., 1995; Кряжев, 1999).

В кварцево-жильных месторождениях, например, в Ирокинде изотопные отношения углерода карбонатов из жил и околорудных метасоматитов соответствуют мантийным и изменяются в интервале $-1,9 \dots -11,9$ ‰, при среднем значении $-6,23$ ‰, $-4,6$ ‰ и $-3,8$ ‰ в различных толщах (Загзурина и др., 1980; Кучеренко, 1991).

Геолого-вещественно-генетическая однородность также подтверждается ранее установленными контролем размещения рудной залежи глубинным разломом, участием в рудовмещающей толще черных сланцев внутрирудных преобразованных в метасоматиты, обогащенные фемофильными элементами и золотом даек-флюидопроводников долеритов, обогащением тыловых зон рудовмещающего метасоматического ореола пропилит-

березитового профиля ассоциацией фемофильных элементов (P, Ti, Mg, Fe, Ca, Mn) до уровня высококонтрастных аномалий, – фактами, доказывающими образование месторождения в ходе и результате функционирования мантийно-коровой флюидно-магматической системы на позднем базальтоидном этапе становления антидромного гранит-диорит-долеритового флюидно-магматического комплекса (Создание..., 2007; Кучеренко и др., 2008₁; Кучеренко и др., 2009).

Рудная залежь месторождения Чертово Кори́то контролируется складчато-разломной зоной – взбросо-сдвигом северо-северо-западного прости́рания (350°С) с падением сместителя (∠60°) в западном направлении (Кучеренко и др., 2008₁) и образовано по аналогии с Сухим Логом в геодинамическом режиме внутриконтинентального рифтогенеза. Складчато-разломная зона имеет связь с структурами глубинного заложения, о чем свидетельствуют изотопные отношения серы сульфидов и приведенные ниже факты.

Контроль размещения рудных тел и минерализованных зон глубинными разломами фиксируется в Бериккульском (Алабин и др., 1999), Ирокиндинском (Кучеренко, 1989), Сухоложском (Рундквист и др., 1992), Наталкинском (Гончаров и др., 2002), Советском (Ножкин и др., 2010) и других месторождениях.

В месторождении Чертово Кори́то известны дайки диоритов и гидротермально-измененных долеритов, преобразованных в метасоматиты. Последние представляют собой массивные мелко-среднезернистые породы, сохранившие реликтовую структуру и содержащие высокотемпературные новообразованные минералы, представленные роговой обманкой (до 20 об. %), биотитом (до 15 об. %), клиноцоизитом и альбитом (до 20 об. %), серицитом, рутилом и лейкоксенном (Баженов и др., 1981). Гидротермально измененные дайки долеритов насыщены прожилками кварца и содержат золото до 3 г/т. Дайки залегают среди слабо пропилитизированных черных сланцев, что подчеркивает их флюидопроводящую в горячем состоянии функцию и доказывает, согласно известному физическому эффекту (Рундквист, 1966), их способность аккумулировать в себе потоки горячих глубинных металлоносных растворов. Металлоносность растворов доказывается повышенными содержаниями золота и элементов фемофильной группы в аподолеритовых метасоматитах.

Такие долеритовые дайки – флюидопроводники известны и описаны в других участвующих в обсуждении месторождениях – Сухом Логу (Шер, 1959; Кондратенко и др., 1968), Бериккульском, Кедровском, Холбинском и других объектах (Кучеренко, 1970, 2003, 2004). Залегая среди черных сланцев, базальтов, гнейсов и других пород, они также преобразованы в метасоматиты и содержат в своем составе высокотемпературные новообразованные минералы, представленные биотитом до (50 об. %) и роговой обманкой до (15 об. %). Дайки характеризуются повышенным содержанием (до первых г/т) золота и элементов фемофильной ассоциации.

Поступление металлоносных растворов вслед за базальтовыми расплавами через промежутки времени, в течение которых дайки не успевали остыть, в сочетании с обогащением аподайковых метасоматитов фемофильными элементами свидетельствует о единстве источников базальтовых расплавов и металлоносных растворов.

Описанные в месторождениях дайки долеритов являются поздними производными антидромных магматических комплексов, ранние производные которых представлены массивами, зрелыми очагово-купольными постройками или поясами даек кислого состава и установлены во многих мезотермальных золотых месторождениях (Кучеренко, 2004).

В месторождении Чертово Кори́то зафиксированы контрастные аномалии фемофильных элементов в тыловой березитовой и смежной альбитовой зонах метасоматического ореола в ассоциации P, Ti, Mg, Fe, Mn и Ca (Кучеренко и др., 2009). Титан накапливался в форме рутила и лейкоксена, Ca, Fe, Mg и Mn – в новообразованных репидолите

и карбонатах, Р – входит в состав новообразованного апатита. О накоплении и соответственно привносе перечисленных элементов свидетельствуют выполненные ранее исследования и балансовые петрохимические расчеты. Установлен привнос извне в березитовую зону ореола сульфидной серы в количестве до 6570%, С – до 3180%, Са – до 1920%, Mg – до 690%, Fe – до 490%, Ti – до 490%, Р – до 640% и Mn – до 4600%.

Обогащенность околорудных метасоматических ореолов в ближнем обрамлении (до 1,5 км) глубинных разломов фемофильными элементами и формирование их контрастных аномалий зафиксировано в Ирокиндинском, Кедровском, Сухоложском и других месторождениях (Кучеренко, 1987; Кучеренко и др., 2012).

Приведенные факты свидетельствуют о геолого-вещественно-генетической однородности месторождения Чертово Кoryто с другими золотыми месторождениями, образованными в сланцевом и кристаллическом субстрате.

По совокупности выявленных фактов месторождение Чертово Кoryто образовано в ходе и результате функционирования мантийно-коровой флюидно-магматической системы на позднем базальтоидном этапе становления антидромного гранит-диорит-долеритового флюидно-магматического комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые выполнено комплексное исследование руд золотого месторождения Чертово Кoryто. Выделены минеральные комплексы руд, соответствующие стадиям минералообразования. В каждом комплексе детально изучен минеральный состав и по типоморфным свойствам (кристалломорфологии, термоЭДС, микротвердости, химическим составам и др.) выделены генерации рудных и нерудных минералов. По результатам изучения газово-жидких включений в кварце и карбонатах реконструированы термодинамические и физико-химические режимы образования минеральных комплексов. В частности, определены температуры, давление, а также соленость и состав растворов. Прослежена эволюция температур, давлений и состава флюидов в процессе рудообразования от ранних комплексов к поздним. Ранние комплексы образованы при температурах более 400 °С из слабосолёных растворов (8...6 мас. % экв. NaCl). Продуктивные комплексы образованы при активном участии углекислоты, метана и отчасти азота в интервале температур 350...110 °С из водно-солевых растворов, содержащих хлориды Na и Mg, с солёностью до 21 мас. % экв. NaCl. Завершился процесс рудообразования при температурах не более 80 °С. Поздние минералы кристаллизовались из слабо солёных растворов – 9...4,5 мас. % экв. NaCl. Давление в процессе изменялось от 300 до 40 МПа.

Установлено, что наиболее ранним и более поздним сульфидам свойственны близкие изотопные отношения серы, укладываемые в интервал мантийных меток. В анкерите изотопные отношения углерода соответствуют значениям, промежуточным между изотопно-легким углеродом керогена и изотопно-тяжелым мантийным углеродом.

Показано, что месторождение Чертово Кoryто обнаруживает геолого-вещественно-генетическую однородность с месторождениями, образованными в сланцевом и кристаллическом субстрате. Они обладают сходными минеральными составами руд, термодинамическими и физико-химическими условиями их образования и изотопными характеристиками. Имеют проявленную связь с магматизмом основного состава, фемофильную геохимическую специализацию тыловых зон метасоматического ореола и контролируются глубинными тектоническими структурами.

С учетом субкларковых содержаний золота в исходных черных сланцах михайловской свиты вне околорудного метасоматического ореола месторождения Чертово Кoryто и причинно-следственных связей с ним и рудами распределения золота и сопровождающих его металлов в околорудном пространстве сделан вывод, согласно которому процессы, инициировавшие его образование, связаны, как отмечалось, с функционированием мантийно-коровой флюидно-магматической системы на позднем базальтоидном этапе

становления антидромного гранит-диорит-долеритового флюидно-магматического комплекса.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Вагина Е.А.**, Рудмин М.А. Кристалломорфология и термозлетрические свойства пирита и арсенопирита золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 66–73.
2. **Вагина Е.А.** Влияние микропримесей на микротвердость арсенопирита и пирита золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 47–52.
3. **Вагина Е.А.** Изотопный состав серы сульфидов руд золотого месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) // Вестник Томского государственного университета. – 2011. – № 353. – С. 11–20.
4. **Вагина Е.А.** Изотопный состав углерода и кислорода в рудах золотого месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 360. – С. 168–172.
5. **Вагина Е.А.** Минеральные комплексы руд и генезис золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 317. – № 1. – С. 63–69.

В прочих изданиях:

6. **Вагина Е.А.**, Рудмин М.А., Петров М.В. Кристалломорфология пирита и арсенопирита в золоторудном месторождении Чертово Корято (Патомское нагорье) // Минералы: строение, свойства, методы исследования: Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции, – Екатеринбург-Миасс, УрО РАН, 23–26 марта 2010 г. – Екатеринбург – Миасс: УрО РАН, 2010. – С. 108–110.
7. **Вагина Е.А.**, Рудмин М.А. Первые данные в изучении вещественного состава руд золотого месторождения Чертово Корято по результатам электронной микроскопии // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XIV Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 65-летию Победы советского народа над фашистской Германией в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг. – Томск, НИ ТПУ, 5–9 апреля 2010 г. – Томск: Изд-во. НИ ТПУ, 2010. – т. 1. – С. 107–109.
8. **Вагина Е.А.**, Рудмин М.А., Петров М.В. Особенности кристалломорфологии и термоэлектрических свойств сульфидов руд месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XIV Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 65-летию Победы советского народа над фашистской Германией в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг. – Томск, НИ ТПУ, 5–9 апреля 2010 г. – Томск: Изд-во. НИ ТПУ, 2010 – т. 1. – С. 104–107.
9. **Вагина Е.А.**, Миллер О.А. Отражательная способность сульфидных минералов и ее особенности на примере пирита и арсенопирита // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XV Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 110-летию горно-геологического образования в Сибири – Томск, НИ ТПУ, 4–8 апреля 2011 г. – Томск: Изд-во. НИ ТПУ, 2011 – т. 1. – С. 100–102.
10. **Вагина Е.А.**, Миллер О.А., Рудмин М.А. Микротвердость минералов как источник генетической информации на примере пирита и арсенопирита // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XV Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 110-летию горно-геологического образования в Сибири – Томск, НИ ТПУ, 4–8 апреля 2011 г. – Томск: Изд-во. НИ ТПУ, 2011 – т. 1. – С. 102–104.
11. **Вагина Е.А.** Условия образования золоторудного месторождения Чертово Корято (Патомское нагорье) // Геология Забайкалья: Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной 85-летию со дня рождения чл.-кор. РАН Федора Петровича Кренделева, г. Улан-Удэ, 15–18 мая 2012 г. – Улан-Удэ: СО РАН, 2012. – С. 36–40.

12. **Вагина Е.А.** Состав флюидных включений золоторудного месторождения Чертово Копыто (Патомское нагорье) // Тезисы докладов XV Всероссийской конференции по термобарогеохимии, г. Москва, 18–20 сентября 2012 г. – М.: ИГЕМ РАН, 2012. – С. 23–25.