

УДК 553.435

ТЕЛЛУРИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ОБЛОМОЧНЫХ РУДАХ МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЮБИЛЕЙНОЕ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2019 г. А. С. Целуйко^{1,2,*}, В. В. Масленников^{1,2}, Н. Р. Аюпова^{1,2}, С. П. Масленникова¹, Л. В. Данюшевский³

¹Институт Минералогии УрО РАН

Россия, 456317, Челябинская обл., Миасс, Ильменский гос. заповедник

²Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе

Россия, 456300, Челябинская обл., Миасс, ул. 8 Июля, 10

³CODES, Университет Тасмании, Хобарт, Австралия

*E-mail: celyukoa@rambler.ru

Поступила в редакцию 10.05.2017 г.

После доработки 10.10.2018 г.

Принята к публикации 11.10.2018 г.

В сульфидных брекчиях и турбидитах слабо метаморфизованного Юбилейного медноколчеданного месторождения, установлены многочисленные теллуриды, представленные гесситом, колорадоитом, алтаитом, волынскимитом, штютцитом, петцитом, калаверитом, а также фазами непрерывной серии теллурувисмутит → раклиджит. Выделено три генерации теллуридов: 1) реликтовые гидротермальные теллуриды в обломках халькопиритовых и сфалеритовых крустификаций труб палеокурильщиков, богатых халькопиритом; 2) эпигенетические теллуриды в псевдоморфном и прожилковом халькопирите в рудокластах колломорфного и зернистого пирита; 3) эпигенетические теллуриды в конкрециях пирита. Эпигенетические теллуриды чаще всего встречаются в алевропесчаных сульфидных турбидитах пирит-халькопиритового состава. Гораздо реже реликтовые и эпигенетические теллуриды встречаются в сульфидных турбидитах и гравелитах, состоящих из фрагментов пирит-сфалеритовых и сфалерит-пиритовых труб палеокурильщиков, а также из обломков донных гидротермальных корок, сложенных колломорфными и тонкозернистыми разновидностями пирита. Пере-слаивающиеся с сульфидными турбидитами кремнистые алевропелиты содержат конкреции пирита, периферийные части которых содержат вкрапленность разнообразных эпигенетических теллуридов. Предполагается, что источником теллура для формирования эпигенетических теллуридов служили растворяющиеся обломки колломорфного пирита и гидротермального халькопирита пирит-халькопиритовых труб палеокурильщиков. Главными концентраторами теллура в обломочных рудах являются псевдоморфный халькопирит, наследующий высокие содержания Te, Bi, Au, Ag, Co, Ni, As от замещаемого колломорфного пирита, а также разновидности зернистого пирита, содержащие микровключения теллурувисмутита (Bi, Te), петцита (Au, Ag, Te), алтаита (Pb, Te), колорадоита и гессита (Ag, Te).

Ключевые слова: теллуриды, турбидиты, трубы палеокурильщиков, ЛА-ИСП-МС, колчеданные руды, Урал.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016-777061239-71>

ВВЕДЕНИЕ

Минералы теллура обнаружены в рудах многих колчеданных месторождений Урала (Шадлун, 1942; Пшеничный, 1974; Муталов, 1977; Юшко-Захарова и др., 1978; Исмагилов, 1986; Викентьев, 2004; Белогуб и др., 2010; Молошаг, 2011; Аюпова и др., 2017; Vikentyev, 2006), Рудного Алтая (Еремин, 1983, Дергачев и др., 1986; Пак, Дергачев, 1993), Канады (Thorpe, Harris, 1973; Brueckner *et al.*, 2016) и Австралии (Hassan, Roberts, 2017). Теллуриды, встречающиеся в прожилково-вкрапленных рудах колчеданных залежей (Шадлун,

1961, Молошаг и др., 2002; Молошаг, 2011; Vikentyev, 2016), обычно считаются эпигенетическими. Под эпигенетическими минералами авторы статьи понимают новообразованные минералы, возникшие после формирования какого-либо осадка или осадочной породы (Геологический словарь, 1973). Формирование эпигенетических минералов начинается на этапах диа- и катагенеза и продолжается в процессе метаморфизма. Появление теллуридов связывают как с процессами регионального метаморфизма, так и с гидротермальными преобразованиями руд (Еремин, 1983; Молошаг, 2011; Vikentyev, 2006; Vikentyev *et al.*, 2017). Тел-

луриды, обнаруженные на участках контактового метаморфизма рудных залежей, рассматриваются как результат частичного плавления (Молошаг и др., 2002; Белогуб и др., 2010). Эпигенетическая группа теллуридов в рудах колчеданных месторождений Урала является доминирующей.

Однако в современных колчеданосных гидротермальных системах широко распространены гидротермальные теллуриды. Теллуриды висмута обнаружены в кварц-сульфидных жилах кальдеры Миоджиншо (Myojinsho) в троге Окинава (Iizasa *et al.*, 1992). Теллуриды висмута или свинца встречаются в сульфидных постройках черных курильщиков, формирующихся на осадочном чехле океанических рифтов (Богданов и др., 2006; Goodfellow, Blase, 1988; Zierenberg *et al.*, 1993). Обильные выделения гидротермальных теллуридов висмута, серебра и золота встречены в трубах черных курильщиков, формирующихся в кальдере вулкана Бразерс Тонга-Кермадекской дуги (Verkenbosch *et al.*, 2012) и в серых курильщиках бассейна Пакманус (Maslennikov *et al.*, 2017). Гораздо реже минералы теллура находят в сульфидных отложениях гидротермальных полей, сформированных на серпентинитах (поля Рейнбоу, Логачев, Ашадзе) или на базальтах в ассоциации серпентинитами (поле Семенов) (Леин и др., 2003; Мелекесцева и др., 2010; Torokhov *et al.*, 2002; Fouquet *et al.*, 2010; Firstova *et al.*, 2016). Первичная гидротермальная природа теллуридов, занимающих закономерное положение в зональности труб мезозойских и палеозойских курильщиков, обоснована в ряде работ (Масленникова, Масленников, 2007; Maslennikov *et al.*, 2013; Revan *et al.*, 2014).

Таким образом, в настоящее время нет единой точки зрения на происхождение теллуридной минерализации. Обзор опубликованных данных и полученные нами последние данные по минералогии рудных фаций наводят на мысль о полигенности теллуридов в рудах колчеданных месторождений. Назрела необходимость выделения двух типов теллуридной минерализации в рудах колчеданных месторождений, установлении характерных черт каждой генетической группы теллуридов. Ключом для понимания проблемы может послужить сравнение теллуридной минерализации в непретерпевших палеокурильщиках и преобразованных обломочных сульфидных отложениях, обогащенных теллуридами.

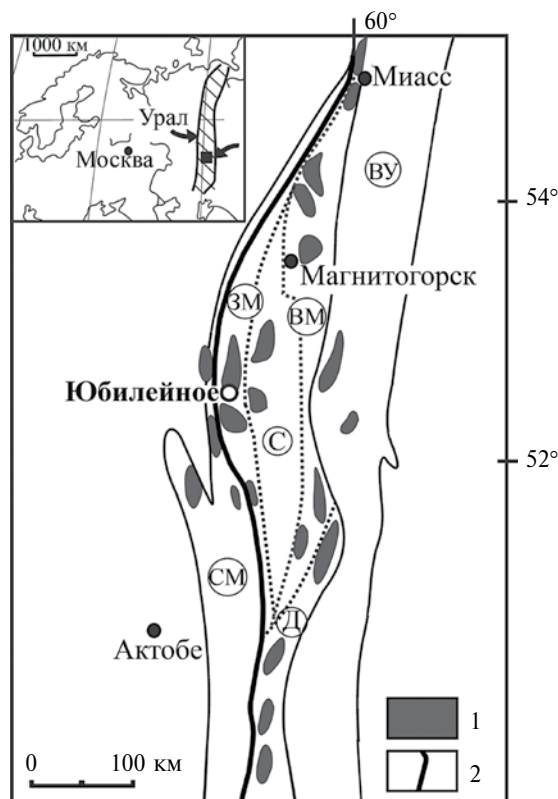
Наиболее подходящим объектом для исследований является слабометаморфизованное Юбилейное месторождение, вулканогенные породы которого претерпели пренит-пумпелиитовые изменения при температурах не превышающих 150–300 °С (Vikentyev *et al.*, 2017). На месторождении обнаружены фрагменты труб палеокурильщиков хорошей сохранности и в разной степени преобразованные слои сульфидных турбидитов и

кремнистых алевропелитов с пиритовыми конкрециями. В некоторых трубах палеокурильщиков, в сульфидных турбидитах и пиритовых конкрециях встречаются многочисленные и разнообразные теллуриды, в других — они отсутствуют. В госсанитах — продуктах субмаринного окисления колчеданных руд обнаружены редкие включения гессита в новообразованном халькопирите (Ауурова *et al.*, 2018).

В связи с этим основные задачи данного исследования следующие: 1) выявить различные генерации теллуридов; 2) на основе сравнения содержания микроэлементов в сульфидах объяснить причины наличия теллуровой минерализации в одних сульфидных слоях и ее отсутствия в других.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Юбилейное медноколчеданное месторождение расположено в Бурибайском рудном районе на Южном Урале в пределах силуро-девонской За-



Фиг. 1. Позиция Юбилейного медноколчеданного месторождения на схеме размещения колчеданосных районов в палеогеодинамических зонах Южного Урала (по Масленников, 1999 с упрощениями).

1 — колчеданосные районы, 2 — Главный Уральский разлом. Палеогеодинамические зоны: ВУ — Восточно-Магнитогорская дуга, ЗМ — Западно-Магнитогорская дуга, ВУ — Восточно-Уральское поднятие, С — Сибайский междуговой бассейн, Д — Домбаровский задуговой бассейн, СМ — Сакмарское окраинное море.

падно-Магнитогорской палеовулканической зоны (фиг. 1) (Медноколчеданные..., 1988). Месторождение относится к уральскому типу "У-1", который характеризуется преобладанием меди над цинком ($Cu \geq Zn$) (Серавкин, 2013). Колчеданные руды Юбилейного месторождения локализованы в породах баймак-бурибайского комплекса, соответствующего раннедевонскому начальному циклу островодужного вулканизма (D_{1e_2b-br}). Рудоносный комплекс состоит из трех толщ (фиг. 2): 1) натриевые базальты умеренно-щелочной серии; 2) марианит-бонинитовая серия с толеитовым уклоном (II); 3) кислые породы, базальты, андезибазальты, андезиты известково-щелочной серии (III) (Косарев и др., 2014). Стратиграфически выше залегают верхнетаналыкская (D_{1vtn}) и ирендкская (D_{1-2ir}) свиты (IV).

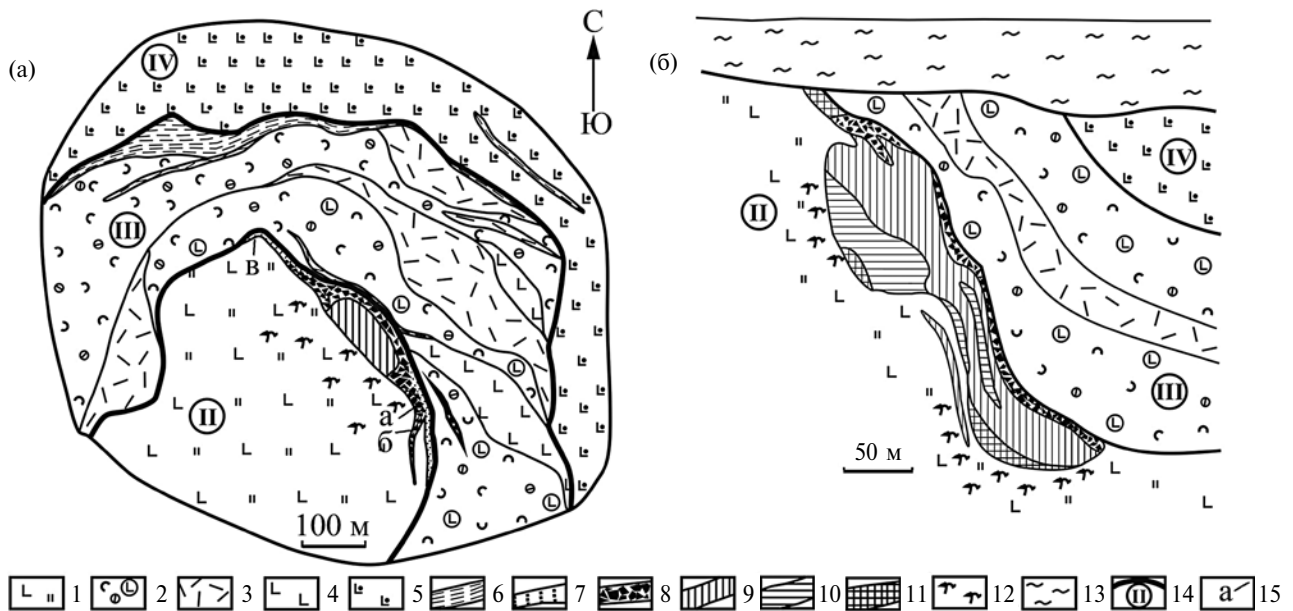
На месторождении установлено шесть рудных залежей, где преобладают массивные и брекчиевидные руды, состоящие из пирита, халькопирита и сфалерита. Редкими минералами в рудах являются марказит, пирротин, арсенопирит, галенит, а также блеклые руды, борнит, магнетит, гематит, барит, электрум, самородное золото, аргентит, алтаит, гессит, энаргит, бурнонит, германит (Медноколчеданные ..., 1988; Викентьев, 2011).

В настоящее время завершена отработка Третьего рудного тела, ведется отработка карьерным

способом Второго и шахтным способом Четвертого рудных тел. Нами изучено Второе рудное тело, залегающее на базальтах и перекрытое лавокластитами основного и кислого составов (см. фиг. 2).

Второе рудное тело имеет линзовидную форму размером в плане 536 x 95 м. Простираение рудного тела $310^\circ-320^\circ$, падение северо-восточное под углами $50^\circ-55^\circ$. Среднее содержание меди в медноколчеданных рудах составляет 2.78%, цинка 0.28%, в серноколчеданных рудах 0.08 и 0.05% соответственно (Воробьев и др., 1973ф). Содержания теллура в различных промышленных сортах руд варьируют от 1 г/т до 200 г/т, составляя в среднем 20.4 г/т (Воробьев и др., 1973ф).

Центральная часть залежи сложена массивными пиритовыми и халькопирит-пиритовыми рудами. В кровле рудного тела сохраняются колломорфные карбонатно-пиритовые руды с многочисленными фрагментами пиритизированных трубчатых червей. Ближе к флангам рудного тела массивные руды сменяются рудокластитами, среди которых выделены грубообломочные (элювиальные и коллювиальные) брекчии, гравийно-песчаные и алевропесчаные сульфидные турбидиты. В кровле сульфидных турбидитов и брекчий залегают вулканомиктовые отложения и гематит-кварц-карбонатные породы, переслаивающиеся с рудными слоями.



Фиг. 2. Схема геологического строения карьера Юбилейного месторождения (а) и схематический геологический разрез Второго рудного тела (с использованием материалов Воробьев и др., 1973ф) (б).

1 – хлорит-серицит-кварцевые метасоматиты по базальтам; 2 – гиалолоавокластиты и лавокластиты кислых и основных пород; 3 – дациты и риолиты; 4 – базальты афировые; 5 – андезибазальты миндалекаменные; 6 – кремнистые породы, яшмы и вулканомиктовые песчаники; 7 – сульфидные турбидиты; 8 – сульфидные брекчии; 9 – сплошные халькопирит-пиритовые руды; 10 – сплошные и вкрапленные сфалерит-халькопирит-пиритовые руды; 11 – сплошные пиритовые руды; 12 – подрудный штокверк; 13 – рыхлые отложения, 14 – границы толщ и их номер, 15 – точки нахождения изученных литологических колонок.

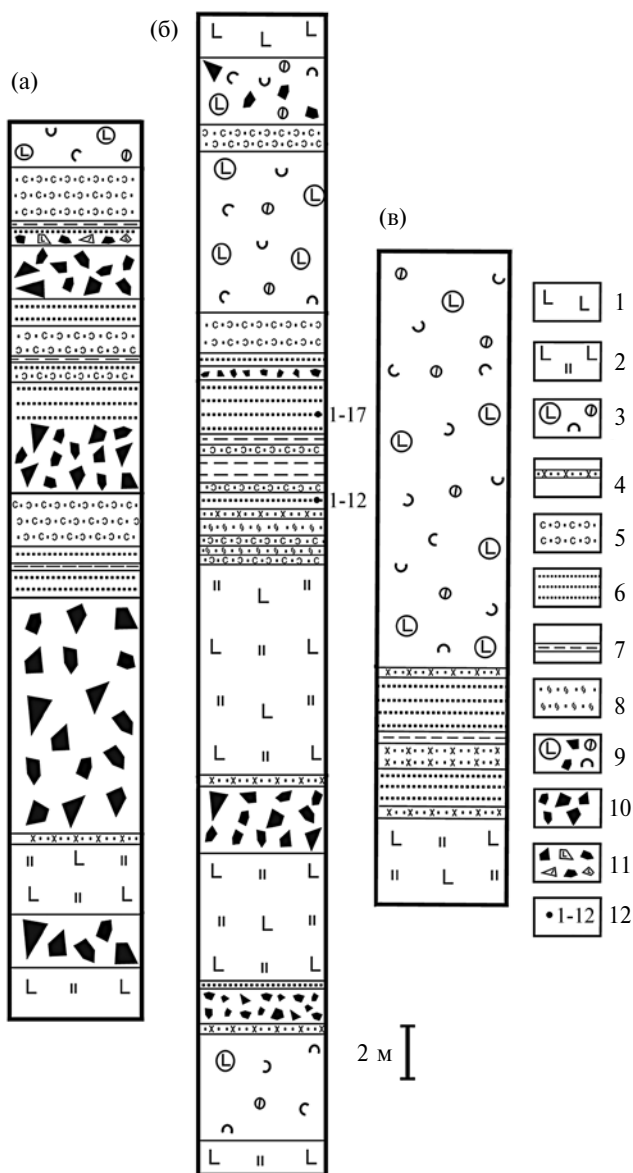
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследований использовался материал, отобранный в ходе полевых работ на Юбилейном месторождении. Оптические исследования руд проводились на микроскопе Olympus BX51 с цифровой приставкой Olympus DP 12. Для выявления внутреннего строения сульфидов применялось травление концентрированной HNO_3 и раствором $\text{HCl} + \text{HNO}_3$.

Химический состав минералов изучен с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (ИМин УрО РАН, аналитик И.А. Блинов), растрового электронного микроскопа РЭММА-202М (ИМин УрО РАН, аналитик В.А. Котляров) и рентгеновского микроанализатора JEOL JXA 733, оснащенного волновой приставкой (ИМин УрО РАН, аналитик Ю.Д. Крайнев). Пределы обнаружения содержаний химических элементов для всех приборов не превышают 0.2 мас.%. Воспроизводимость определений составляет от 1 до 15 относ.%. Содержания Au, Ag в валовых пробах определены атомно-абсорбционным анализом на приборе PerkinElmer 3110 (аналитик М.Н. Маляренко), содержания Cu, Zn, S, Te, Bi, Pb, Se – ИСП-МС анализом водных растворов на масс-спектрометре ICP-MS Agilent 7700x в Институте минералогии УрО РАН (аналитики К.А. Филиппова, М.А. Свиридова).

Содержания элементов-примесей в сульфидах получены методом лазерной масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ЛА-ИСП-МС) в университете Тасмании (г. Хобарт, Австралия, аналитики В.В. Масленников, С.П. Масленникова). Всего методом ЛА-ИСП-МС изучено 14 образцов колчеданных руд, отобранных из различных частей Второго рудного тела в 2011–2014 гг. Анализы выполнены с помощью лазерного микропробоотборника New Wave 213, соединенного с масс-спектрометром Agilent 7500cs. Диаметр лазерного пучка составлял 40–60 мкм, частота – 5 Гц, энергия на поверхности образца 4–5 Дж/см². Время анализа составляло 100 с, из которых 30 с занимало измерение фона. Для калибровки использовались стандарты MASS-1, NIST, GSD, STDGL и др., представляющие собой смесь литий-боратного стекла и сульфидов. Подробно методика ЛА-ИСП-МС анализов описана в работе (Danyushevsky *et al.*, 2011).

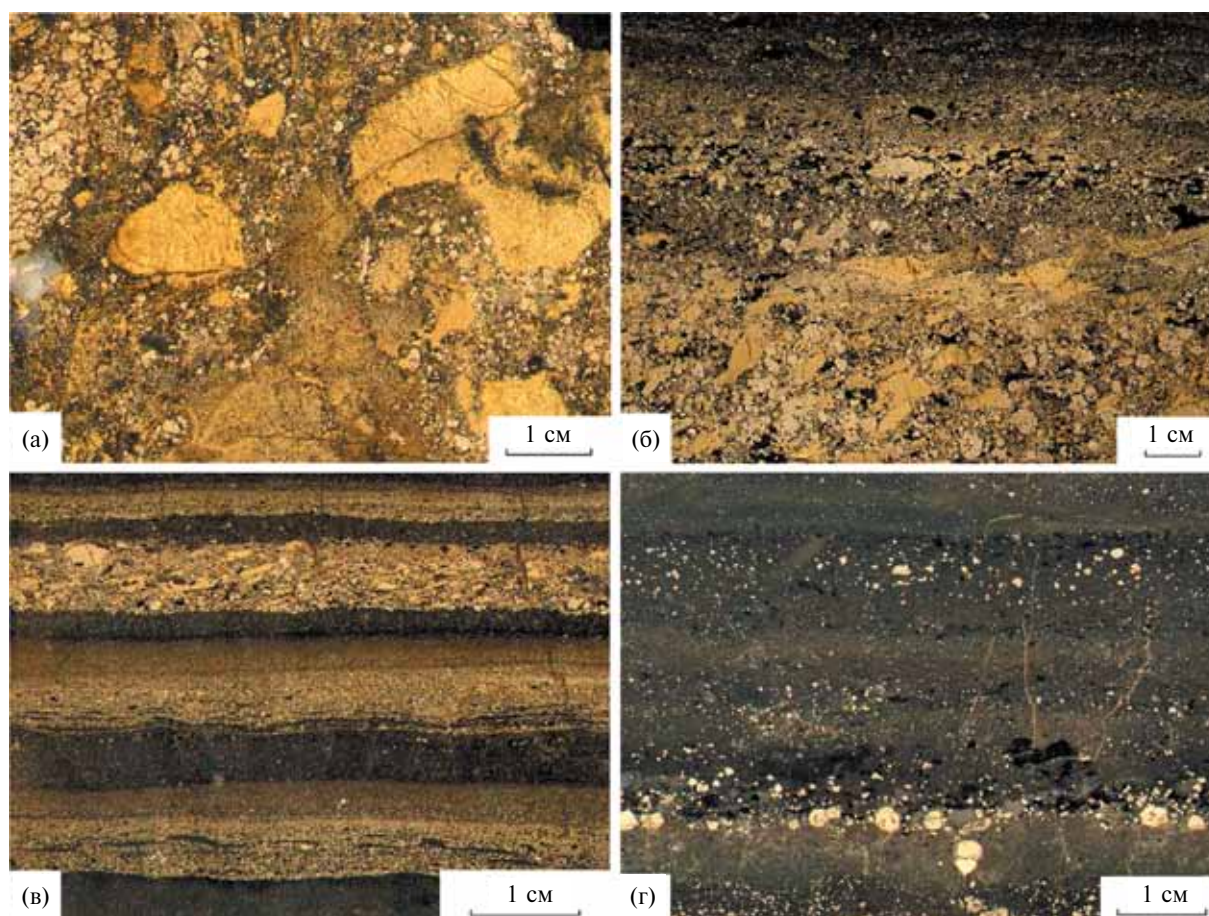
Геохимическое микрокартирование конкреций и метакристаллов пирита выполнено методом ЛА-ИСП-МС на масс-спектрометре Agilent 7700x, оборудованном приставкой для лазерной абляции New Wave Research UP-213 в Институте минералогии УрО РАН (аналитик Д.А. Артемьев). Микрокарты распределения элементов-примесей по-



Фиг. 3. Литологические колонки на юго-восточном (а, б) и северо-западном (в) флангах Второго рудного тела Юбилейного месторождения.

1 – базальты; 2 – хлорит-серицит-кварцевые метасоматиты по базальтам; 3 – гиало- и лавокластиты смешанного состава; 4 – хлоритолиты; 5 – вулканомиктовые песчаники; 6 – мелкообломочные сульфидные турбидиты; 7 – кремнистые пелитолиты; 8 – гиалокластиты; 9 – вулканокластиты смешанного состава с глыбами колчеданных руд, содержащие фрагменты труб палеокурьшиков и гидротермальных корок; 10 – сульфидные брекчии; 11 – лавокластиты с одиночными обломками колчеданных руд; 12 – точки отбора образцов 1–12 и 1–17.

лучены путем последовательного линейного прожигания поверхности препарата лазерным пучком диаметром 12–30 мкм со скоростью 10–15 мкм/с, с энергией 3–4 Дж/см² и частотой 7 Гц (Артемьев и др., 2017). Для градуировки и расчета использовались международные стандарты: прессованный



Фиг. 4. Обломочные руды Юбилейного месторождения.

а – сульфидная брекчия с халькопиритовыми обломками (светло-серое) пирит-халькопиритовых палеокурильщиков; б – халькопирит-пиритовые гравийно-песчаные турбидиты с прогрессивной сортировкой обломочного материала, переходящие в хлорит-кварцевый слой (черное); в – алевропесчаные пирит-халькопиритовые турбидиты, переслаивающиеся с хлорит-кварцевыми слоями (черное); г – послойная вкрапленность пирита (светло-серое) в кремнистом алевропелите с фрагментами хлоритизированных гиалокластов (черное).

сульфид USGS MASS-1 и стекло USGS GSD-1g. Несущие газы – He 0.6 л/мин и Ar 0.95 л/мин. Расчет проводился в программе Iolite с использованием ^{57}Fe в качестве внутреннего стандарта.

РАЗНОВИДНОСТИ РУДОКЛАСТИТОВ

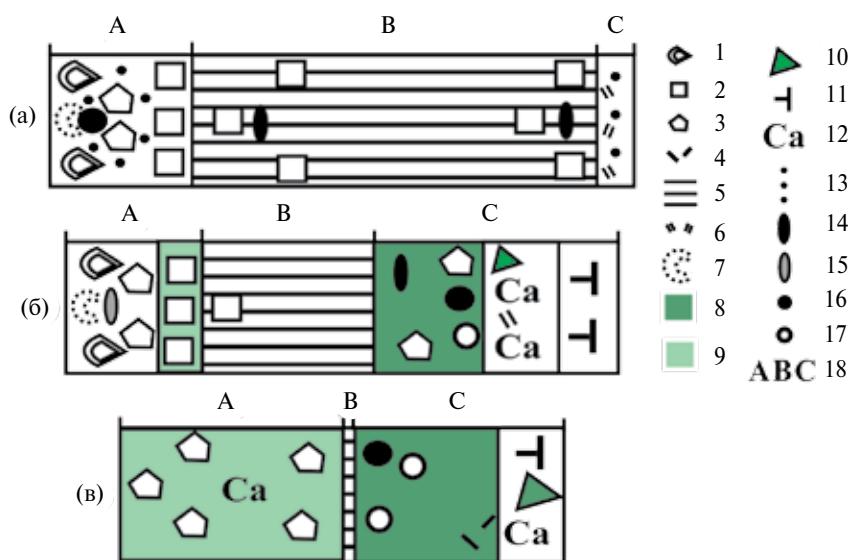
На месторождении выделяются несколько разновидностей обломочных сульфидных отложений (рудокластитов) среди которых выделены: 1) сульфидные брекчии; 2) сульфидные турбидиты; 3) кремнистые алевропелиты с сульфидной минерализацией.

Наиболее мощные пласты и линзы рудокластитов (общая мощность до 30 м) встречаются на юго-восточном фланге рудной залежи, где выделяются три ритмопачки, каждая из которых начинается с сульфидных брекчий. Сульфидные брекчии перекрываются сульфидными турбидитами, содержащими тонкие прослои кремнистых алевропелитов и хлорит-кварцевых пород (фиг. 3а, б).

Разрез каждой ритмопачки завершается слоем вулканомиктовых песчаников (гиалокластитовых тефроидов). На северо-западном фланге Второго рудного тела мощность сульфидно-осадочных слоев намного меньше (фиг. 3в).

Сульфидные брекчии

Сульфидные брекчии состоят из угловатых, часто растрескавшихся рудокластов пиритового, халькопирит-пиритового, пирит-халькопиритового и сфалерит-пирит-халькопиритового состава размером до 4–5 см. Цементирующей массой служит мелкообломочный сульфидный материал, карбонаты, кварц и хлорит. Нерудная составляющая представлена вулканокластами дацитов и базальтов. Среди рудокластов встречаются фрагменты массивных зернистых и колломорфных медноколчеданных руд, обломки пиритовых диффузоров, биоморфных руд и гидротермальных труб палеокурильщиков (фиг. 4а).



Фиг. 5. Схемы зональности пирит-халькопиритовых (а), сфалерит-пирит-халькопиритовых (б) и халькопирит-пирит-сфалеритовых (в) труб палеокурильщиков Юбилейного месторождения.

1 – почковидный колломорфный и тонкозернистый пирит-1; 2 – эвгедральный пирит-3; 3 – суб- и ангедральный пирит-2; 4 – псевдоморфозы пирита по пирротину; 5 – друзовый кристификационный халькопирит-1; 6 – субгедральные зерна халькопирита-1; 7 – псевдоморфозы халькопирита-2 по колломорфному пириту-1; 8 – почковидный и друзовый сфалерит-1; 9 – агрегаты ангедрального сфалерита-1; 10 – вкрапленность сфалерита-1; 11 – тальк; 12 – кальцит; 13 – кварц; 14 – теллуриды гидротермального происхождения; 15 – эпигенетические теллуриды, связанные с псевдоморфным халькопиритом-2; 16 – самородное золото и электрум; 17 – галенит и блеклые руды; 18 – зоны палеокурильщиков: А – оболочка; В – внутренняя стенка; С – осевой канал.

Зональные гидротермальные трубы палеокурильщиков пирит-халькопиритового, сфалерит-пирит-халькопиритового и халькопирит-пирит-сфалеритового состава формируют как крупные фрагменты хорошей сохранности, так и мелкие осколки халькопиритовой и сфалеритовой инкрустации. Палеокурильщики различного минерального состава обладают различными чертами своего внутреннего строения. Оболочки труб палеокурильщиков пирит-халькопиритового и сфалерит-пирит-халькопиритового состава сложены почковидными и дендритовидными агрегатами колломорфного и тонкозернистого пирита (фиг. 5а, б). Внутренняя стенка палеокурильщиков инкрустирована крупнозернистыми агрегатами гидротермального халькопирита, часто с мелкими включениями теллуридов. Осевая часть канала труб заполнена халькопиритом, сфалеритом, субгедральным пиритом, а также кварцем, тальком или кальцитом (см. фиг. 5а, б). В палеокурильщиках халькопирит-пирит-сфалеритового состава сфалерит доминирует как в оболочке, так и кристификации каналов (фиг. 5в). Внутренняя стенка и осевой канал состоят из сфалерита, содержащего вкрапленность и прожилки халькопирита, блеклых руд, галенита, самородного золота и электрума. Граница между стенкой и осевым каналом трубы маркирована тонким слоем (до 0.5 мм) халькопиритовой кристификации.

Биоморфные руды (сульфидные биолититы), представленные скоплениями оруденелых трубчатых червей в халькопирит-кальцит-пиритовых диффузорных линзах, также могут формировать рудокласты обломочных руд. Стенки трубок сложены фрамбоидальным, тонкозернистым и колломорфным пиритом, а центральная часть заполнена карбонатом, кварцем или халькопиритом. Размер трубок в продольном сечении достигает 10 мм, в поперечном – 1–3 мм (Целуйко и др., 2017).

Переходным звеном между сульфидными брекчиями и тонкослоистыми мелкообломочными рудами служат *гравийно-песчаные турбидиты* (фиг. 4б). Для гравийно-песчаных отложений характерны типичные для турбидитов градационная сортировка обломочного материала и специфические механоглифы (знаки нагрузки) в подошве рудных слоев. Обломки тонкозернистого и колломорфного пирита частично или полностью замещены халькопиритом. Изредка встречаются обломки друзового халькопирита и сфалерита, представляющие собой фрагменты кристификации каналов труб палеокурильщиков. Нерудные обломки представлены хлоритизированными гиллокластами кислого и основного составов. Источником обломочного материала для гравийно-песчаных пиритовых и сфалерит-пиритовых турбидитов служили диффузоры и пористые диф-

фузорные корки, а также сфалерит-пиритовые трубы, содержавшие незначительное количество халькопирита.

Сульфидные турбидиты

Алевропесчаные сульфидные турбидиты нередко чередуются с хлорит-кварцевыми прослоями и сульфидсодержащими кремнистыми алевропелитами (фиг. 4в). В некоторых слоях сохранены мелкие (до 2 мм) фрагменты пиритовых, пирит-халькопиритовых и сфалерит-халькопирит-пиритовых зернистых руд, присутствуют обломки хлоритизированных гиалокластов. Степень преобразования рудокластов гораздо выше, чем в сульфидных брекчиях и в сульфидных гравийно-песчаных турбидитах. В тонких слоях большое количество позднего субгедрального пирита, выросшего на реликтовые рудокласты, а также псевдоморфного халькопирита, заместившего обломки колломорфного и зернистого пирита. Трещины в обломках зернистого и в осколках кристаллов пирита заполнены халькопиритом в ассоциации с теллуридами и самородным золотом. Наряду с прожилками, теллуриды встречаются в виде микровключений в кристаллах пирита. Гораздо реже встречаются послойные сегрегации сфалерита. В некоторых слоях встречаются прожилки позднего халькопирита, подчеркивающие косое, почти согласное, направление микротрещин кливажа. Существенно пиритовые турбидиты сложены обломками тонко- и мелкозернистых пиритовых агрегатов, кристаллами и агрегатами позднего пирита. Фрагменты колломорфного и фрамбоидального пирита встречаются крайне редко.

Кремнистые алевропелиты

Сульфидсодержащие серо-зеленые, темно-серые и красновато-серые слои кремнистых алевропелитов встречены на флангах Второй рудной залежи, где они переслаиваются с сульфидными турбидитами и гиалокластитовыми тефроидами. Предполагается, что они содержали примесь исходного рудокластического материала, полностью превращенного в эпигенетические сульфиды. В кремнистых алевропелитах рассеяны округлые пиритовые конкреции диаметром до 5 мм, а также вкрапленники эвгедральных метакристаллов пирита (фиг. 4г). Ядра конкреций сложены мелкозернистым пиритом, содержащим нерудные микровключения. В ядрах встречены прожилки кристаллически-зернистого ангедрального и субгедрального пирита в ассоциации с халькопиритом, пирротинном, сфалеритом, галенитом, самородным золотом и теллуридами. Этот же пирит образует каймы вокруг мелкозернистых ядер конкреций и, очевидно, является аналогом большинства вкрапленников эвгедральных метакристаллов пирита.

МИНЕРАЛЫ ОБЛОМОЧНЫХ РУД

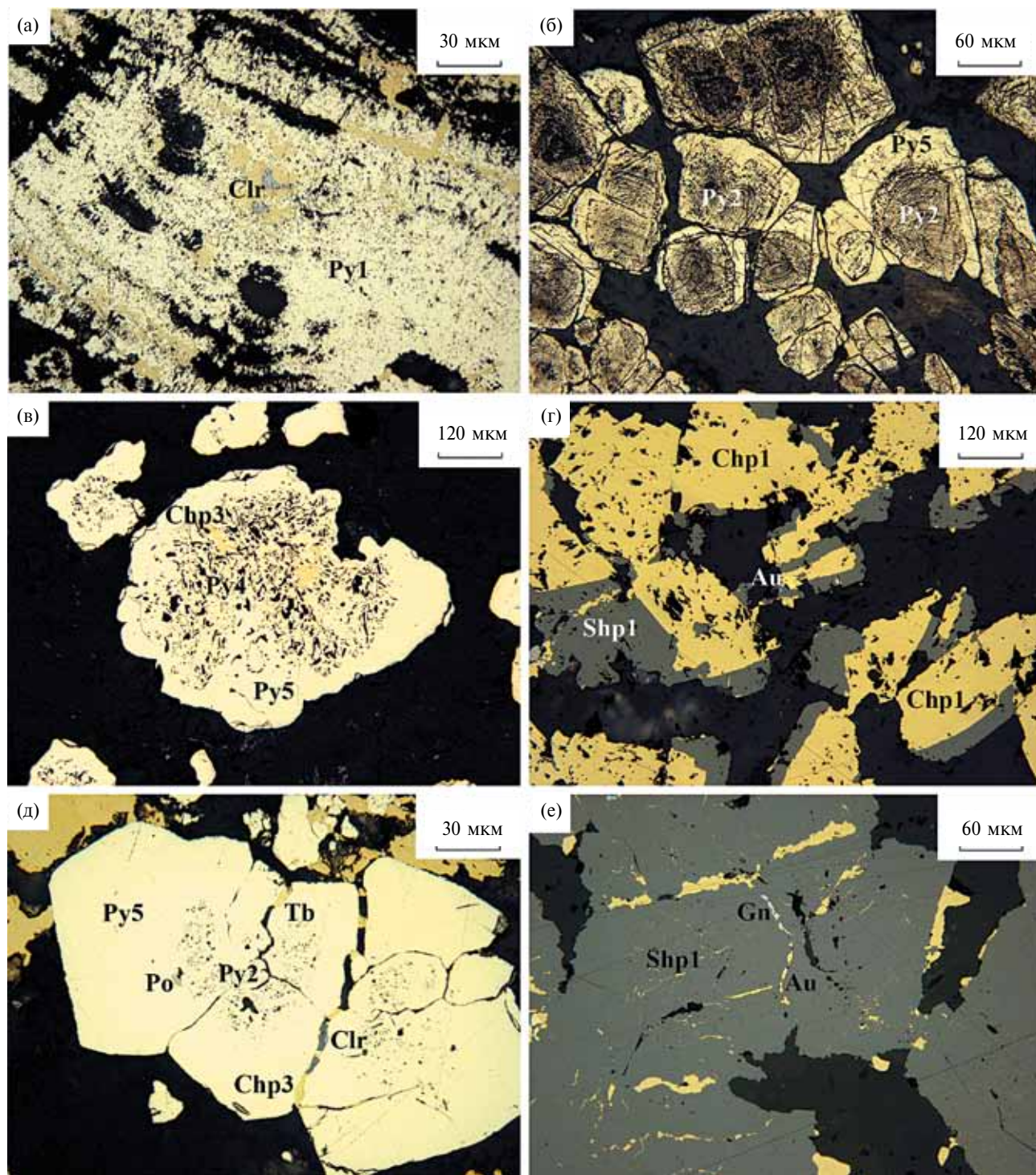
В обломочных рудах Второго рудного тела Юбилейного месторождения главными минералами являются пирит, халькопирит и сфалерит. Второстепенные и редкие минералы представлены галенитом, блеклыми рудами, пирротинном, борнитом, самородным золотом и разнообразными теллуридами. Из нерудных минералов наиболее распространены кварц, хлорит, кальцит, тальк и апатит.

Пирит представлен следующими разновидностями: колломорфным пиритом-1, зональными кристаллами пирита-2, незональными кристаллами пирита-3, мелкозернистым конкреционным пиритом-4, незональным субгедральным пиритом-5, а также их срастаниями.

Колломорфный пирит-1 (Py1) встречается в виде обломков в сульфидных брекчиях, гравийно-песчаных и алевропесчаных пиритовых и сфалерит-халькопирит-пиритовых турбидитах и представляет собой фрагменты оболочек сульфидных гидротермальных труб палеокурильщиков, диффузоров и биоморфных руд. Пирит-1 образует почковидные, натечные и дендритовидные образования, часто перекристаллизованные в зернистые агрегаты. Реликты колломорфного пирита-1 зачастую обнаруживаются в ядрах зерен пирита-2. Большинство обломков пирита-1 обросли каймой субгедрального пирита-5 или замещены халькопиритом-2. В сульфидных брекчиях на участках замещения фрагментов колломорфного пирита-1 халькопиритом-2 локализуются выделения самородного золота, теллуровисмутита и колорадоита (фиг. 6а). Полные псевдоморфозы халькопирита-2 по пириту-1 иногда содержат включения блеклых руд и галенита.

Пирит-2 (Py2) представлен субгедральными и ангедральными пористыми кристаллами с грубой зональностью роста, выявленной после травления в концентрированной HNO_3 . Часто зональность пирита-2 подчеркивается реликтовыми ядрами почковидного пирита-1 (фиг. 6б). Пирит-2 составляет внутренние части оболочек труб палеокурильщиков и участвует в строении крустификации их осевых каналов. Обломки массивного мелкозернистого пирита-2 встречаются во всех разновидностях обломочных руд.

Во внутренних частях оболочек труб эвгедральные кристаллы **пирита-3** (Py3) формировались за счет перекристаллизации колломорфного и субгедрального пирита фильтрующимися высокотемпературными гидротермальными растворами. Пирит-3, так же как и метакристаллы пирита-5, не показывает отчетливой зональности роста. Отличить его от метакристаллов пирита-5 можно лишь по ассоциации с другими гидротермальными разновидностями сульфидов. Пирит-3 доминирует в массивных колчеданных рудах.



Фиг. 6. Разновидности минералов в сульфидных брекчиях и турбидитах Юбилейного месторождения.

а – включения колорадоита (Clr) в частично халькопиритизированном обломке пирита-1 (Py1); б – зональные зерна смеси пирита-2,5: ядра из пирита-2 (Py2) с реликтами почковидного строения, обрастают незональным пиритом-5 (Py5); в – зональная конкреция пирита с ядром, выполненным микрозернистым пиритом-4 (Py4) и каймой субгедрального пирита-5 (Py5) с вкрапленностью халькопирита-3 (Chp3); г – кристаллы халькопирита-1 (Chp1) с включением самородного золота (Au) и каймой сфалерита-1 (Sph1); д – смесь пирита-2,5 (Py2, Py5) с прожилками халькопирита-3 (Chp3), содержащими включения теллурувисмутита (Tb) и колорадоита (Clr); е – включения галенита (Gn) и самородного золота (Au) в крупнозернистом агрегате сфалерита-1 (Sph1).

Фото а–е – изображения в отраженном свете. Черное – нерудные минералы. Фото б – протравлено в HNO₃ конц.

Пирит-4 (Py4) образует ядра конкреций, встречающихся в кремнистых алевропелитах (фиг. 6в). Этот пирит имеет микрозернистое строение и характеризуется многочисленными микровключениями кварца, хлорита, плагиоклаза и гидрослюд. В сульфидных турбидитах пирит-4, наблюдается гораздо реже. Скорее всего, он почти полностью замещен пиритом-5.

Пирит-5 (Py5) в сульфидных турбидитах встречается в виде субгедральных кристаллов, нарощих на рудокласты пирита-2. В кремнистых алевропелитах он образует каймы вокруг конкреций и частично замещает последние, а также рассеян в виде метакристаллов (см. фиг. 6в). Характерной чертой пирита-5, отличающей его от пирита-2, является отсутствие грубой зональности роста. После травления концентрированной HNO_3 в субгедральном пирите-5 выявляется лишь прерывистая тонкая зональность. В ядрах метакристаллов пирита-5, встречающихся в сульфидных турбидитах, изредка обнаруживаются пойкилиты халькопирита, сфалерита, пирротина и теллуридов. В ядрах метакристаллов пирита-5, распространенных в кремнистых алевропелитах, присутствуют, в основном, микровключения нерудных минералов.

Однако в большинстве случаев в обломочных рудах содержатся многочисленные реликты пирита-2 в пирите-5 (см. фиг. 6б). При проведении ЛА-ИСП-МС анализа с диаметром пучка 35 мкм разделить их не представляется возможным. В связи с этим, такие сростания мы в дальнейшем будем называть “пирит-2+5”.

Халькопирит представлен друзовым гидротермальным халькопиритом-1, псевдоморфным халькопиритом-2, прожилковым халькопиритом-3, ассоциирующим с конкрециями пирита-4 и метакристаллами пирита-5, а также динамометаморфическим халькопиритом-4, наследующим микротрещины кливажа.

Халькопирит-1 (Chp1) представлен в кластогенных рудах обломками крустификаций каналов труб палеокурильщиков. Характерными чертами этого халькопирита являются агрегаты, состоящие из крупных копьевидных сростков кристаллов, ориентированных в одном направлении, а также субгедральные кристаллы обросшие сфалеритом (фиг. 6г). Зональность кристаллов иногда подчеркивается эпитаксиальными слоями сфалерита. В межзерновых интерстициях друзового халькопирита-1 заключены эвгедральные пирит-3 и сфалерит-1, содержащий вкрапленность галенита, блеклых руд, гессита, колорадоита, теллуровисмутита и самородного золота.

Псевдоморфный микро- и тонкозернистый *халькопирит-2* (Chp2) частично замещает не только колломорфные, но кристаллически-зернистые пиритовые рудокласты, цементируя ре-

ликтовые кристаллы пирита-2. После травления в “царской водке” такой халькопирит показывает тонкозернистое строение с микробугорчатой поверхностью. На участках замещения колломорфного пирита в халькопирите-2 встречаются теллуриды (колорадоит, гессит, теллуровисмутит) и самородное золото.

Прожилки *халькопирита-3* (Chp3) в ассоциации с пиритом-5 обычно замещают и цементируют зерна пирита-2, как правило, в виде прожилков (фиг. 6д). В отличие от халькопирита-2 после травления в халькопирите-3 выявляется мелкозернистое строение. Халькопирит-3 формирует мелкие прожилки и вкрапленность в конкрециях и метакристаллах пирита-4 и пирита-5 в ассоциации с пирротинном, сфалеритом, галенитом, петцитом, гесситом, теллуровисмутитом, колорадоитом и алтаитом.

Халькопирит-4 (Chp4) характеризуется крупнозернистым строением и формирует прожилки, развитые по субсогласным трещинам кливажа в сульфидных слоях мелкообломочных турбидитов. В зернах халькопирита-4 после травления в концентрированной HNO_3 выявляются полисинтетические двойники. Халькопирит-4, как правило, не содержит включений самородного золота и теллуридов.

Сфалерит представлен гидротермальным сфалеритом-1 и мелкозернистым сегрегационным сфалеритом-2.

Сфалерит-1 (Sph1) представлен фрагментами крупнозернистых почковидных, радиально-лучистых и друзовых агрегатов сфалерита в сульфидных брекчиях (фиг. 6е). Таким сфалеритом запечатаны каналы гидротермальных труб, частично сложены оболочками и внутренние стенки. Для сфалерита-1 характерны многочисленные включения халькопирита, пирита, галенита, блеклых руд, самородного золота и теллуридов. Характерной особенностью сфалерита-1 является наличие тонкой равномерно распределенной вкрапленности халькопирита. В сульфидных турбидитах сфалерит-1 почти полностью растворен или превращен в агрегаты сфалерита-2.

Сфалерит-2 (Sph2) образует линзовидные прослои, сгустки и обломковидные обособления в сфалерит-халькопирит-пиритовых турбидитах. Агрегаты сфалерита-2 состоят из множества мелких полисинтетических двойников.

Минералы группы *блеклых руд*, представленные теннантитом, теннантит-тетраэдритом и тетраэдрит-теннантитом, встречаются во фрагментах труб палеокурильщиков сульфидных брекчий (Масленников и др., 2015). Блеклые руды ассоциируют со сфалеритом, галенитом и самородным золотом. Широко распространены блеклые руды в борнитсодержащих сульфидных брекчиях. Минералы группы блеклых руд не характерны

для мелкообломочных сульфидных турбидитов, но обнаружены в сростании с халькопиритом в кремнистых алевропелитах.

Галенит (Gn) встречается в трубах палеокурильщиков в ассоциации с халькопиритом-1, сфалеритом-1, блеклыми рудами и самородным золотом. Включения галенита, наряду с самородным золотом и теллуридами, встречаются в пирите-2,5 в сульфидных турбидитах и кремнистых алевропелитах.

Пирротин (Po) обнаружен исключительно в ассоциации с пиритом-5 как в сульфидных турбидитах, так и пиритовых конкрециях, где образует мелкие включения размером 10–20 мкм.

Борнит (Bn) иногда образует цементирующую массу в сульфидных брекчиях или реже встречается в виде тонких прожилков в халькопирите мелкообломочных турбидитов.

Самородное золото и электрум (Au) в обломочных рудах часто находятся в тесной ассоциации с минералами теллура. Самородное золото средней пробыности (780–855 ‰) обнаружено в пирите-1 обломков пирит-халькопиритовых палеокурильщиков и смеси пирита-2,5 алевропесчаных турбидитов. Самородное золото в сфалерите-1 из обломков сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиков характеризуется меньшей пробыностью (750–780 ‰). В обломках тальксодержащих сфалерит-пирит-халькопиритовых труб можно обнаружить включения электрума, содержащего до 5.3 мас.% ртути и 46.1 мас.% серебра.

Минералы теллура

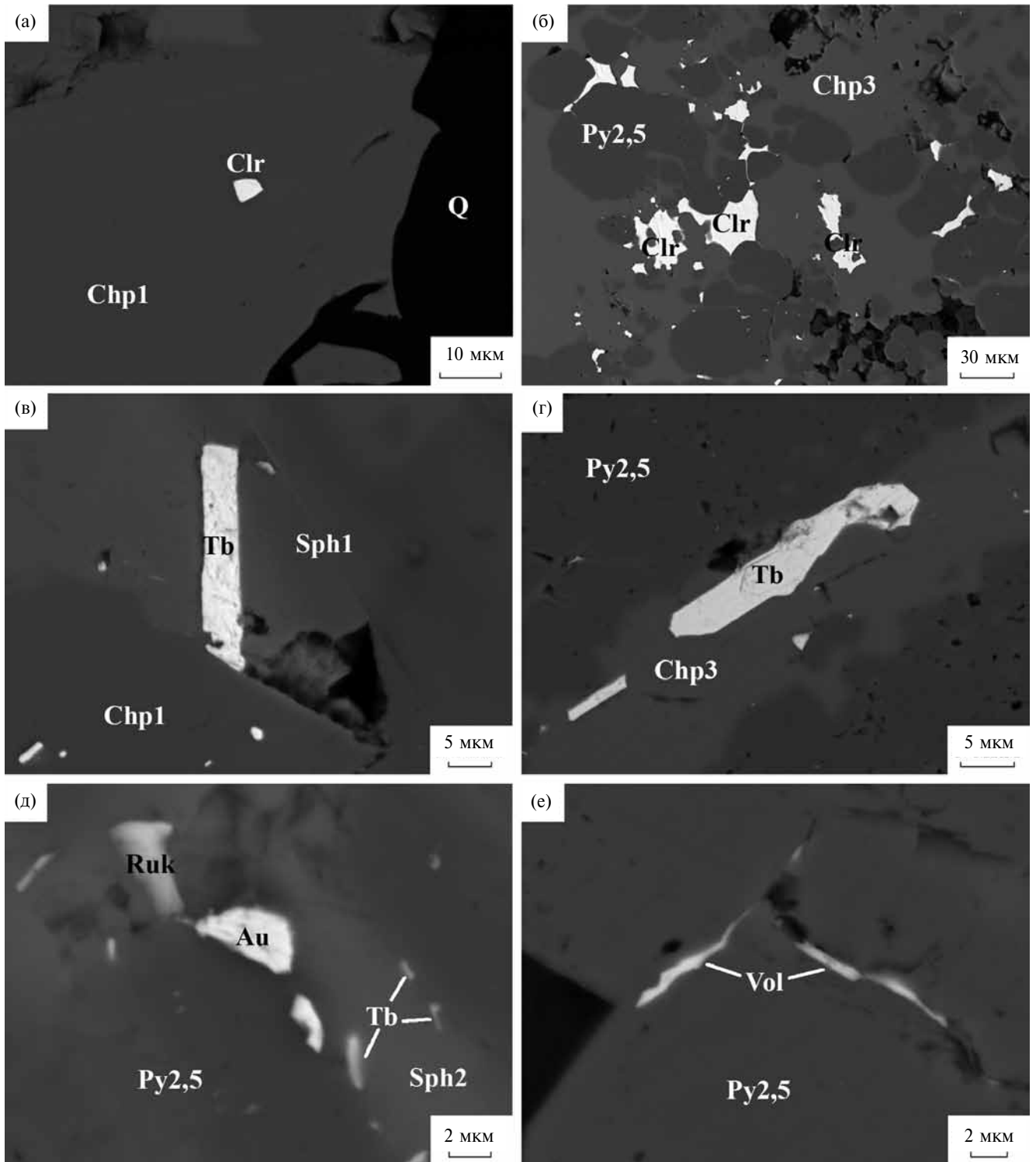
Первичные гидротермальные теллуриды распространены в осколках гидротермального халькопирита и сфалерита пирит-халькопиритовых и сфалерит-пирит-халькопиритовых труб палеокурильщиков. Включения теллуридов также связаны с прожилками халькопирита-2 и сфалерита-2 в агрегатах пирита-2+5 алевропесчаных турбидитов и конкрециями пирита-4+5 кремнистых алевропелитов.

Гессит Ag_2Te ассоциирует с самородным золотом, колорадоитом и другими теллуридами в халькопирит-пиритовых алевропесчаных турбидитах. Во фрагментах тальк-халькопирит-карбонат-пирит-сфалеритовых гидротермальных труб палеокурильщиков гессит иногда встречается в сфалерите-1. Гораздо реже включения гессита можно обнаружить в интерстициях кристаллов халькопирита-1. В сульфидных брекчиях и сульфидных турбидитах выделения гессита обнаружены на границе замещения колломорфного пирита-1 халькопиритом-2, а также в прожилках халькопирита-3 в ассоциации с пиритом-2+5. В кремнистых алевропелитах зерна гессита в ассоциации с петцитом, самородным золотом

и колорадоитом локализуются в краевых частях конкреций, сложенных пиритом-5. Гессит иногда содержит до 1.0 мас.% Au (табл. 1).

Колорадоит $HgTe$ является одним из самых распространенных теллуридов в брекчиях и мелкообломочных турбидитах. В обломках труб палеокурильщиков колорадоит-1 вместе с теллуровисмутитом, самородным золотом и гесситом образует включения в друзовом халькопирите-1 и сфалерите-1 размером до 10 мкм (фиг. 7а). Колорадоит-2 более поздней генерации распространен в прожилках и гнездах псевдоморфного халькопирита-2 в агрегатах тонкозернистого и крупнозернистого пирита (фиг. 7б). В мелкообломочных турбидитах колорадоит формирует включения в зернах и агрегатах пирита-2+5. В прожилках халькопирита-3 и сфалерита-2 из растрескавшихся кристаллов пирита-2, преобразованного в пирит-5, эпигенетический колорадоит обнаруживается вместе с другими теллуридами, самородным золотом и галенитом. Выделения халькопирита-3 в хлорит-кварцевых прослоях часто содержат колорадоит, ассоциирующий со сфалеритом-2, алтаитом, петцитом, теллуридами висмута и самородным золотом. Колорадоит-3 в кремнистых алевропелитах встречается в кайме субгедрального пирита-5 в ассоциации с другими теллуридами и самородным золотом. Химический состав колорадоита соответствует теоретическому (см. табл. 1).

Серия промежуточных твердых растворов (ПТР – $Pb-Bi-Te$) *теллуровисмутит* (Bi_2Te_3) – *раклиджит* ($PbBi_2Te_4$) широко представлена в рудах Второго рудного тела Юбилейного месторождения. Кристаллы теллуровисмутита-1 размером 5–15 мкм встречаются в халькопирите-1 и сфалерите-1 фрагментов труб палеокурильщиков (фиг. 7в). Теллуровисмутит-2 и -3 встречается в ассоциации с колорадоитом в псевдоморфном халькопирите-2 и в прожилках халькопирит-3 в ассоциации с пиритом-2+5 (фиг. 7г). Содержания Pb в теллуровисмутите достигают 2.4–6.5 мас.%. Минеральные индивиды ПТР, сходные по содержаниям Pb (13–17 мас.%) с раклиджитом ($PbBi_2Te_4$), образуют микровключения в пирите-2+5 и прожилках халькопирита-3 в мелкообломочных сульфидных турбидитах и в хлорит-кварцевых прослоях (фиг. 7д). В хлорит-кварцевых прослоях вместе с волинскимитом и алтаитом раклиджит формирует включения в халькопирите-3. В некоторых ПТР определены повышенные содержания Se (2.1–2.3 мас.%). В этих же ПТР обнаружены повышенные содержания Ag (до 1.7 мас.%) (см. табл. 1). Теллуровисмутит-3 образует тонкие пластинки в конкрециях и метакристаллах пирита-5, рассеянных в кремнистых алевропелитах. ПТР Юбилейного месторождения по составу близки к раклиджиту Маукского



Фиг. 7. Минералы теллура обломочных руд Юбилейного месторождения.

а – включение колорадоита (Clr) в гидротермальном халькопирите-1 (Chp1) фрагмента палеокурильщика; б – колорадоит (Clr) в агрегате халькопирита-2 (Chp2), цементирующего зерна пирита-2,3 (Py2,3) в мелкообломочном турбидите; в – теллуровисмутит (Tb) на контакте халькопирита-1 (Chp1) и сфалерита-1 (Sph1) обломка трубы палеокурильщика; г – включения теллуровисмутита (Tb) в прожилке псевдоморфного халькопирита-2 (Chp2) в обломке пирита-2,3 (Py2,3) сульфидной брекчии; д – включения золота (Au) и раклиджита (Ruk) в прожилке сфалерита-2 (Sph2) в мелкообломочном турбидите; е – волынскит (Vol) в агрегате зерен пирита-2,3 (Py2,3) в мелкообломочном турбидите. Фото а–е – изображения в обратно-рассеянных электронах. Черное – нерудные минералы.

месторождения и минералам серии теллуровисмутит–раклиджит Валенторского месторождения (фиг. 8) (Сафина и др., 2015; Maslennikov *et al.*, 2013₂).

Алтаит PbTe приурочен к агрегатам халькопирита-3 в хлорит-кварцевых прослоях мелко-обломочных турбидитов. Алтаит образует сростки с колорадоитом, раклиджитом, волынскимитом и штюцтитом. Размеры сростков не превышают

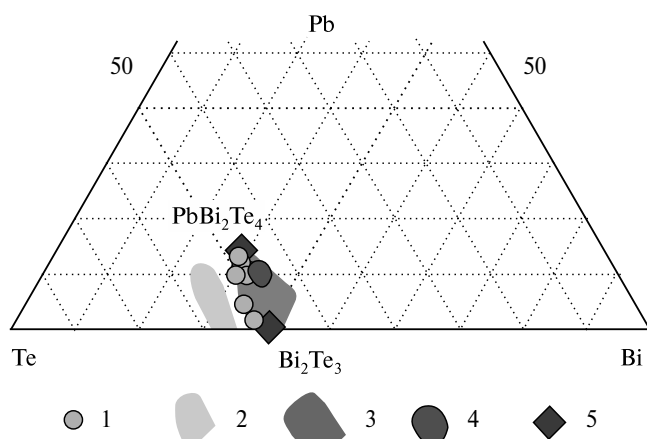
10–20 мкм. В ассоциации с селенсодержащим галенитом алтаит содержит до 1.2 мас.% Se (см. табл. 1). В кремнистых алевропелитах алтаит встречается вместе с петцитом в пиритовых конкрециях в ассоциации с пиритом-5.

Волынскимит AgBiTe₂ формирует пластинчатые зерна размером 5–10 мкм в пирите-2+5 в сульфидных слоях и в халькопирите-3 хлорит-кварцевых слоев сульфидных турбидитов (фиг. 7е).

Таблица 1. Химический состав минералов теллура обломочных руд Юбилейного месторождения (мас.%)

№ п/п	Te	Ag	Hg	Bi	Se	Pb	Au	Сумма	Кристаллохимическая формула
1	37.10	62.90	—	—	—	—	—	100.00	Ag _{2.01} Te _{1.00}
2	38.04	61.96	—	—	—	—	—	100.00	Ag _{1.93} Te _{1.00}
3	36.92	63.08	—	—	—	—	—	100.00	Ag _{2.02} Te _{1.00}
4	36.93	62.63	—	—	—	—	0.38	99.94	Ag _{2.01} Au _{0.01} Te _{1.00}
5	39.48	60.01	—	—	—	—	1.04	100.53	Ag _{1.8} Au _{0.01} Te _{1.00}
6	37.44	62.62	—	—	—	—	—	100.06	Ag _{1.98} Te _{1.00}
7	41.16	—	58.84	—	—	—	—	100.00	Hg _{0.9} Te _{1.00}
13	37.63	—	61.22	—	—	—	—	98.85	Hg _{1.03} Te _{1.00}
14	36.55	—	62.31	—	—	—	—	98.86	Hg _{1.08} Te _{1.00}
15	37.7	—	61.32	—	—	—	—	99.02	Hg _{1.03} Te _{1.00}
16	39.07	—	60.14	—	—	—	—	99.21	Hg _{0.98} Te _{1.00}
17	38.74	—	59.82	—	—	—	—	98.56	Hg _{0.98} Te _{1.00}
18	38.72	—	62.32	—	—	—	—	101.04	Hg _{1.02} Te _{1.00}
19	45.53	3.34	—	48.82	2.31	—	—	100.00	(Ag _{0.26} Bi _{1.94}) _{2.2} (Te _{2.75} Se _{0.25}) _{3.00}
20	48.94	—	—	48.54	—	2.52	—	100.00	(Pb _{0.09} Bi _{1.81}) _{1.9} Te _{3.00}
21	49.02	—	—	44.55	—	6.43	—	100.00	(Pb _{0.24} Bi _{1.66}) _{1.9} Te _{3.00}
22	47.27	—	—	39.44	—	13.29	—	100.00	Pb _{0.69} Bi _{2.03} Te _{4.00}
23	45.55	—	—	37.5	—	16.95	—	100.00	Pb _{0.91} Bi _{2.01} Te _{4.00}
24	43.99	1.57	—	36.97	2.10	15.37	—	100.00	Pb _{0.86} Ag _{0.16} Bi _{2.05} Te _{3.9} Se _{0.1}
25	45	—	—	41.49	—	13.5	—	100.00	Pb _{0.74} Bi _{2.25} Te _{4.00}
26	44.73	1.67	—	38.69	—	14.91	—	100.00	Pb _{0.82} Ag _{0.18} Bi _{2.11} Te _{4.00}
27	36.65	—	—	—	1.18	62.17	—	100.00	Pb _{1.04} Te _{0.95} Se _{0.05}
28	39.75	—	—	—	—	60.25	—	100.00	Pb _{0.93} Te _{1.00}
29	39.84	—	—	—	1.17	58.99	—	100.00	Pb _{0.91} Te _{0.96} Se _{0.04}
30	39.87	—	—	—	—	60.13	—	100.00	Pb _{0.93} Te _{1.00}
31	34.96	3.17	—	—	—	58.96	2.9	100.00	Pb _{1.05} Au _{0.05} Ag _{0.1} Te _{1.00}
32	46.56	18.86	—	34.59	—	—	—	100.00	Ag _{0.95} Bi _{0.9} Te _{2.00}
33	45.28	19.51	—	35.22	—	—	—	100.00	Ag _{1.01} Bi _{0.94} Te _{2.00}
34	35.08	42.08	—	—	—	—	22.84	100.00	Au _{0.84} Ag _{2.84} Te ₂
35	33.31	41.93	—	—	—	—	24.76	100.00	Au _{0.96} Ag _{2.98} Te ₂
36	35.41	41.64	—	—	—	—	22.95	100.00	Au _{0.84} Ag _{2.78} Te ₂
37	59.4	—	—	—	—	—	40.6	100.00	Au _{0.88} Te _{2.00}
38	44.77	55.23	—	—	—	—	—	100.00	Ag _{4.38} Te _{3.00}

Примечание. Формулы гессита (1–6) рассчитаны на 1 атом теллура; колорадоита (7–18) — на 1 атом теллура; теллуровисмутита (19–21) — на сумму теллура и селена равную 3; раклиджита (22–26) — на сумму теллура и селена равную 4; алтаита (№ 27–31) — на сумму теллура и селена равную 1; волынскита (32–33) — на 2 атома теллура; петцита (34–36) — на 2 атома теллура; калаверита (37) — на 2 атома теллура; штюцита (38) — на 3 атома теллура. Прочерк — элемент не обнаружен. Аналитики И.А. Блинов, В.А. Котляров и Ю.Д. Крайнев (ИМин УрО РАН).



Фиг. 8. Треугольная диаграмма состава промежуточных твердых растворов теллуровисмутит (Bi_2Te_3) – раклиджит (PbBi_2Te_4) (ат.%).

1 – теллуровисмутит – раклиджит обломочных руд Юбилейного месторождения; 2 – Pb-теллуровисмутит месторождения Яман-Касы (Maslennikov *et al.*, 2013₂); 3 – теллуровисмутит и раклиджит Валенторского месторождения (Maslennikov *et al.*, 2013₂); 4 – раклиджит (PbBi_2Te_4) Маукского месторождения (Сафина и др., 2015); 5 – точки стехиометрических составов минералов.

Волынскит ассоциирует с раклиджитом, алтаитом и колорадоитом. Химический состав волынскита близок к теоретическому (см. табл. 1).

Петцит AuAg_3Te_2 образует мелкие включения размером до 10–20 мкм в пирите-2+5 и халькопирите-3 в ассоциации с другими теллуридами в сульфидных и хлорит-кварцевых слоях мелко-обломочных турбидитов. Широкое распространение петцит получил в конкрециях и метакристаллах пирита-5. Химический состав петцита близок к теоретическому (см. табл. 1).

Штюццит $\text{Ag}_{5-x}\text{Te}_3$ и *калаверит* AuTe_2 встречаются крайне редко в виде микронных зерен в сульфидных и хлорит-кварцевых слоях мелко-обломочных турбидитов в ассоциации с другими теллуридами (см. табл. 1).

Таким образом, значительная часть находок гидротермальных теллуридов приурочена к фрагментам пирит-халькопиритовых и сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиков. В обломках труб включения гидротермальных теллуридов обнаружены в халькопирите-1 и сфалерите-1 (фиг. 9а, б). Сульфидные брекчии и сульфидные турбидиты содержат как гидротермальные, так и эпигенетические теллуриды. Последние связаны с псевдоморфным халькопиритом-2 и с прожилками халькопирита-3 в ассоциации с пиритом-2+5 (фиг. 9в, г). В пиритовых конкрециях эпигенетические теллуриды ассоциируют с пиритом-5, прожилками халькопирита-3, пирротина и сфалерита-2 (фиг. 9д, е). Наибольшее распространение эпигенетические теллуриды получили в пи-

рите-2+5 пирит-халькопиритовых алевропесчаных турбидитов и конкрециях пирита-4+5 кремнистых алевропелитов. Менее разнообразная теллуридная минерализация обнаружена в их сфалерит-халькопирит-пиритовых разновидностях турбидитов. Теллуриды практически отсутствуют в пирит-сфалеритовых гравелитах и пиритовых алевропесчаных турбидитах.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕЛЛУРА И ДРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОБЛОМОЧНЫХ РУДАХ

Для выявления источников вещества, необходимого для формирования эпигенетических теллуридов, методом ЛА-ИСП-МС изучено распределение концентраций теллура и других микроэлементов в разновидностях сульфидов, слагающих палеокурильщики, сульфидные биолититы, сульфидные турбидиты и кремнистые алевропелиты.

Элементы-примеси в минералах массивных руд

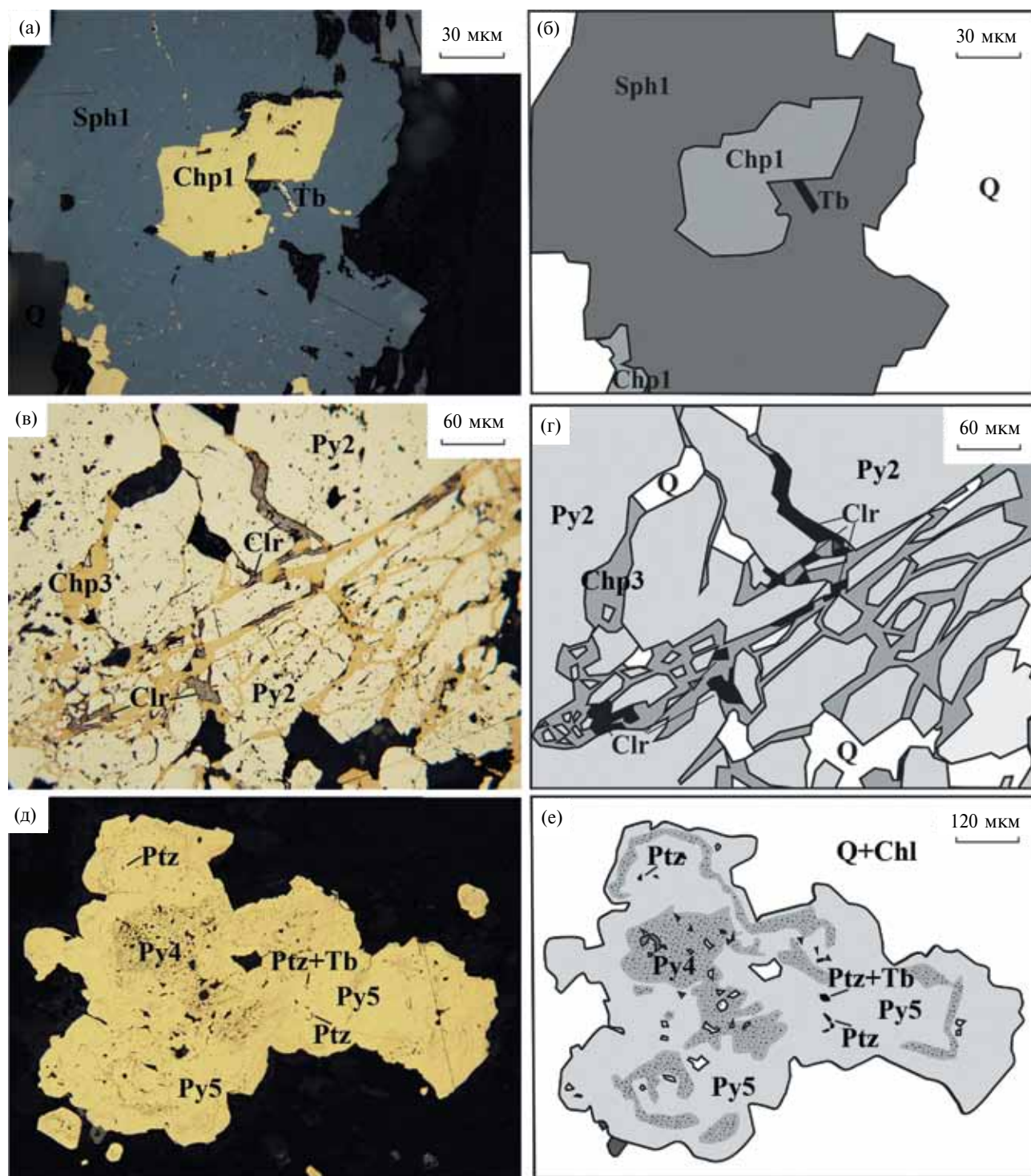
Массивные пирит-халькопиритовые, сфалерит-халькопирит-пиритовые и халькопирит-пиритовые руды слагают центральную часть Второй залежи. Руды сложены агрегатами субгедрального и ангедрального незонального пирита-3, цементированными халькопиритом-1. Угловатые и удлиненные включения самородного золота, колорадоита, теллуровисмутита, алтаита и теллуровисмутита обнаруживаются в пирите и халькопиритовом цементе.

Пирит-3 массивных руд отличается значительными вариациями содержаний Te (8.4–614 г/т), Au (0.05–34.4 г/т) Ag (0.2–376 г/т) при умеренных концентрациях Bi (1.0–36.1 г/т). Низкие содержания Pb (0.3–524 г/т) связаны с редкими включениями галенита (табл. 2). Халькопирит-1 цемента массивных руд по сравнению с пиритом-3 содержит на порядок меньше Te (5.3–28.1 г/т), Au (0.01–0.2 г/т), Ag (0.2–9.8 г/т) и других элементов-примесей.

Элементы-примеси в минералах труб палеокурильщиков

Запечатанные трубы палеокурильщиков различной степени сохранности обнаружены в положении *in situ* в кровле массивных халькопирит-пиритовых и сфалерит-халькопирит-пиритовых руд ядра Второй рудной залежи и в виде фрагментов в составе сульфидных брекчий (Целуйко и др., 2017; Maslennikov *et al.*, 2013₁).

Колломорфный пирит-1 (Py1) труб палеокурильщиков характеризуется повышенными концентрациями элементов-примесей, в том числе и значительными вариациями содержаний теллура (2.4–408 г/т). Средние содержания теллура



Фиг. 9. Особенности сростаний минералов теллура и сульфидов в рудах Юбилейного месторождения. а, б – включение пластинки гидротермального теллуровисмутита (Тб) на контакте халькопирита-1 (Chp1) и сфалерита-1 (Sph1) фрагмента трубы палеокурильщика; в, г – выделения новообразованного колорадоита (Clr) в прожилках псевдоморфного халькопирита-2, развивающегося по агрегату мелкозернистого пирита-2,3 (Py2,3); д, е – вкрапленность петцита (Ptz) в сростании с теллуровисмутитом (Тб) в конкреции пирита-4-Д (Py4-Д) и пирита-4-М (Py4-М). а, в, д – изображения в отраженном свете, б, г, е – схематические зарисовки.

Таблица 2. Содержание элементов-примесей в сульфидах массивных пирит-халькопиритовых руд Юбилейного месторождения по данным ЛА-ИСП-МС (г/т)

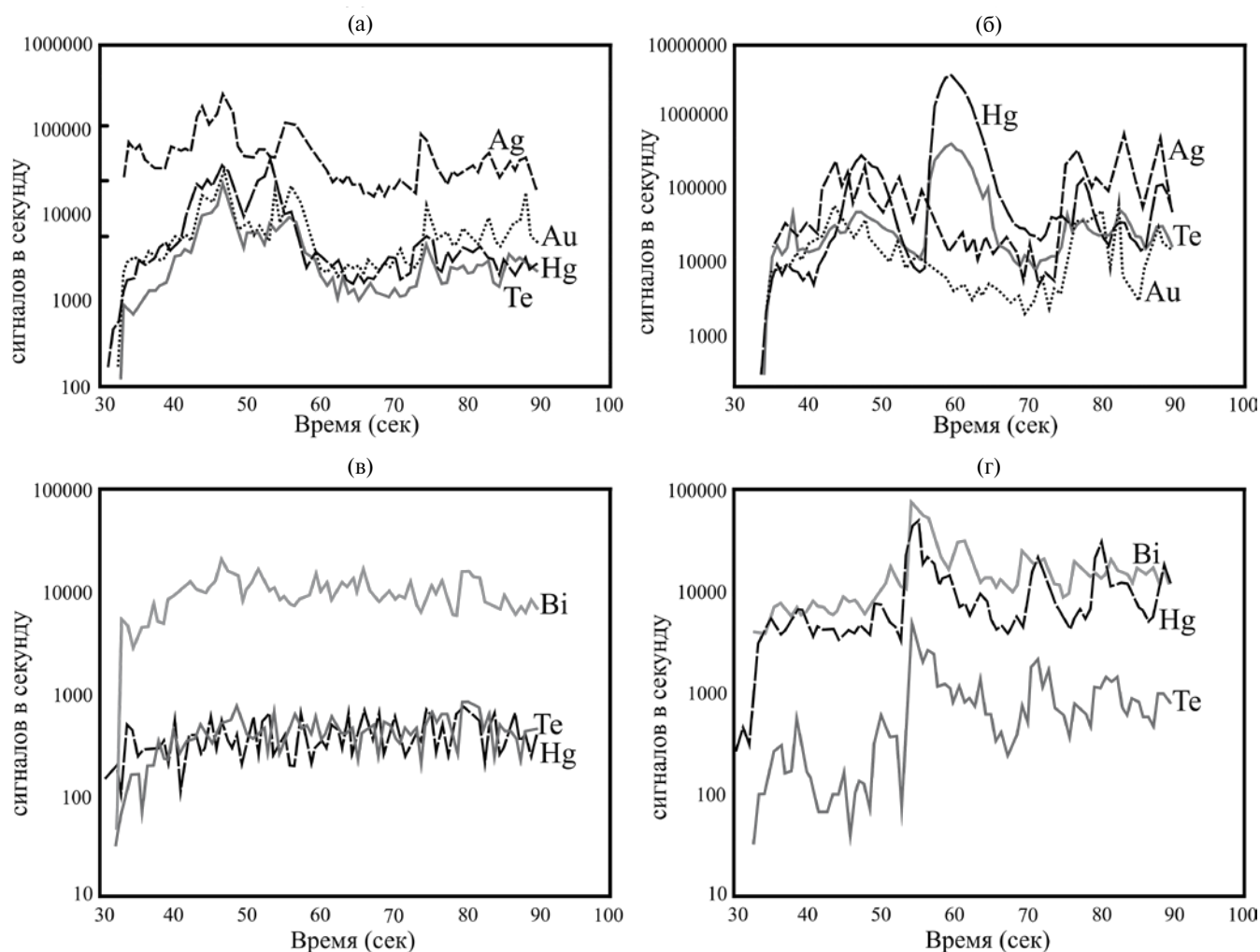
Минерал		Te	Bi	Au	Ag	Pb	Co	Ni	As	Se
Py3 (n = 18)	ср	158	14.6	6.3	35.9	99.9	40.7	10.9	327	157
	со	(159)	(12.1)	(9.7)	(86.6)	(169)	(51.4)	(11.4)	(666)	(38.0)
Chp1 (n = 12)	ср	13.0	7.5	0.1	3.1	26.2	0.04	0.1	0.4	174
	со	(8.1)	(3.4)	(0.06)	(3.0)	(13.1)	(0.1)	(0.3)	(0.4)	(41.7)

Примечание. Условные обозначения минералов см. в тексте. ср – среднее содержание, со – стандартное отклонение, n = 12 – количество анализов. Аналитики В.В. Масленников, С.П. Масленникова (ИМин УрО РАН).

в пирите-1 закономерно снижаются в ряду от пирит-халькопиритовых (105.2 г/т) к сфалерит-пирит-халькопиритовым (73.5 г/т) и халькопирит-пирит-сфалеритовым (38.3 г/т) трубам (табл. 3). Напротив, концентрации Au, Ag, Ni, As и Se в пирите-1 аналогичны для всех минеральных разновидностей палеокурильщиков. Судя по трендам импульсов ЛА-ИСП-МС, содержащим совместные

пики Te, Hg, Bi и Ag, теллур в пирите-1 находится преимущественно в виде микровключений теллуридов (фиг. 10а).

На бинарных диаграммах заметна прямая зависимость между концентрациями теллура в колломорфном пирите-1 и кобальта (фиг. 11а), висмута (фиг. 11б), серебра (фиг. 11в), селена (фиг. 11г). Существенные различия в обломках пирит-халь-



Фиг. 10. Тренды индивидуальных спектров ЛА-ИСП-МС с линиями Te, Bi, Hg, Au и Ag для колломорфного пирита-1 (а), пирита-2+5 (б), гидротермального халькопирита-1 (в) и псевдоморфного халькопирита-2 (г) Юбилейного месторождения.

копиритовых и сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиков наблюдаются только по содержаниям кобальта, в то же время халькопирит-пирит-сфалеритовые трубы образуют на диаграммах обособленную группу с низкими концентрациями Co, Bi и Se. В трубах пирит-халькопиритовых и сфалерит-пирит-халькопиритовых курильщиков, отмечается слабая отрицательная корреляция ($r = -0.4$ и -0.05) содержаний Te и Se (см. фиг. 11г).

Для пирита-2 (Py2) обломков труб палеокурильщиков характерны широкие вариации содержания Te (0.005–679 г/т) и других элементов-примесей (Bi, Au, Ag), связанных с включениями теллуридов (см. табл. 3). В среднем, зональный пирит-2 гидротермальных труб содержит меньше, по сравнению с пиритом-1, теллура и сопутствующих ему элементов-примесей (см. табл. 3). В пирите-2 фрагментов пирит-халькопиритовых и сфалерит-пирит-халькопиритовых труб отмечаются

широкие вариации содержаний Te (0.005–679 г/т) и Bi (0.001–170 г/т), обусловленные включениями теллуридов. Зернистый пирит-2 обломков халькопирит-пирит-сфалеритовых труб характеризуется низкими концентрациями Te (до 17 г/т) и крайне низкими Bi (до 0.25 г/т) на фоне повышенных содержаний Au (до 146 г/т) и Ag (до 591 г/т).

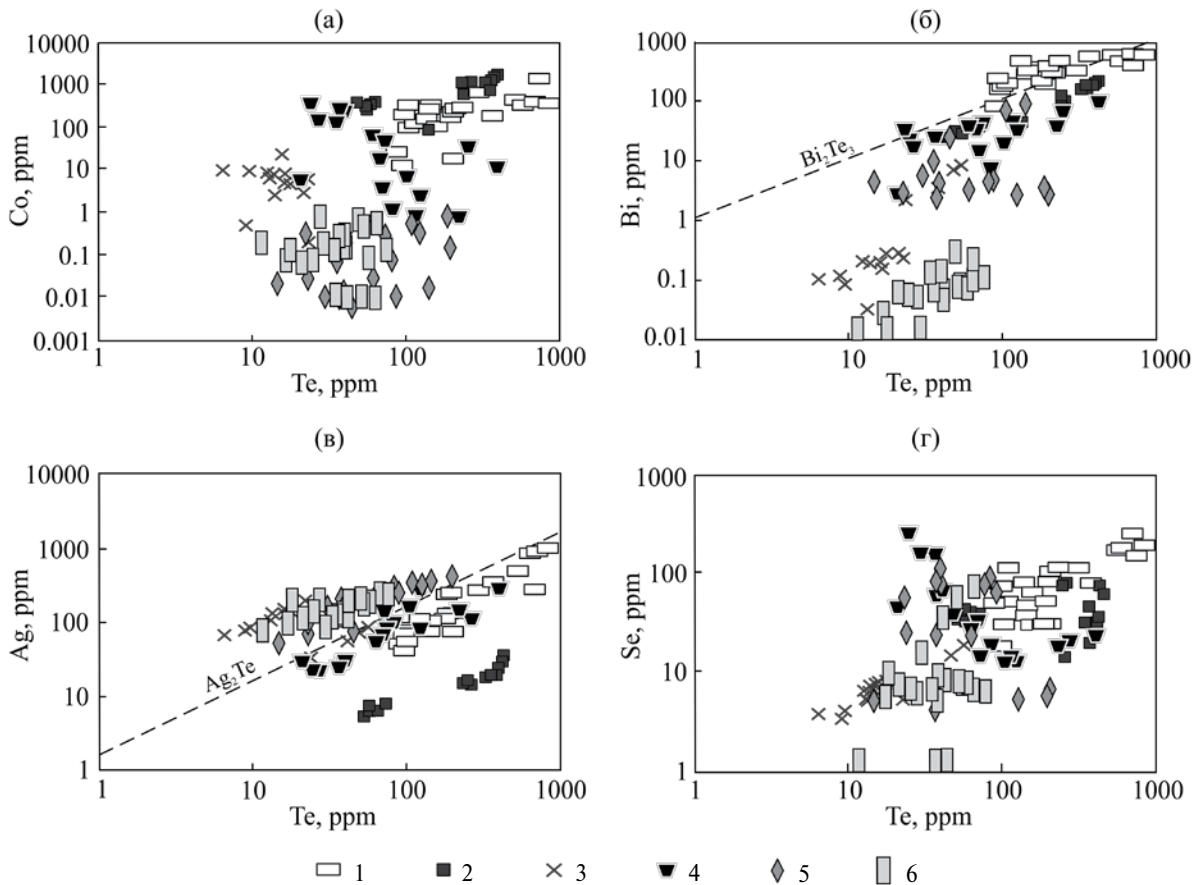
Незональный пирит-3 (Py3) палеокурильщиков обладает меньшими по сравнению с пиритом-2 концентрациями Te (0.01–191 г/т) и Bi (0.001–98.9 г/т). В противовес этому концентрации Au (0.9–92.5 г/т), Ag (2.6–989 г/т) и Se (1.0–531 г/т), наоборот, несколько возрастают. В ряду от пирит-халькопиритовых к халькопирит-пирит-сфалеритовым палеокурильщикам снижаются содержания Te, Bi, Co, Se и возрастают концентрации Au, Ag, Pb, As (см. табл. 3).

На фиг. 12 заметно, что содержания элементов-примесей в пирите-3 палеокурильщиков раз-

Таблица 3. Содержание элементов-примесей в сульфидах труб палеокурильщиков Юбилейного месторождения по данным ЛА-ИСП-МС (г/т)

№	Минерал		Te	Bi	Au	Ag	Pb	Co	Ni	As	Se
1	Py1 (n = 17)	ср	105.2	36.2	8.5	100.6	455	78.5	34.9	521	58.5
		со	(103.1)	(24.4)	(6.8)	(87.5)	(267)	(109)	(20.2)	(245)	(74.0)
2	Py2 (n = 21)	ср	84.3	26.0	17.0	112	636	11.5	9.3	813	29.9
		со	(126)	(44.2)	(19.3)	(253)	(1161)	(16.0)	(9.0)	(712)	(30.0)
3	Py3 (n = 16)	ср	47.7	19.1	20.5	20.8	326	290	22.8	1846	262
		со	(60.1)	(22.9)	(18.2)	(19.0)	(352)	(200)	(28.1)	(1168)	(177)
4	Chp1 (n = 38)	ср	11.7	5.5	0.6	8.2	14.7	2.0	0.4	4.0	429
		со	(24.9)	(9.5)	(0.6)	(8.2)	(10.5)	(7.6)	(1.3)	(9.8)	(241)
5	Py1 (n = 19)	ср	73.5	19.0	7.2	209	12447	0.2	27.2	917	68.7
		со	(55.6)	(25.0)	(7.5)	(117)	(17634)	(0.2)	(17.7)	(531)	(92.9)
6	Py2 (n = 38)	ср	60.5	11.0	18.1	87.4	1691	0.1	9.5	2465	14.5
		со	(139)	(14.7)	(23.3)	(117)	(2075)	(0.2)	(12.1)	(3111)	(11.8)
7	Py3 (n = 9)	ср	41.4	5.5	21.8	46.9	4573	0.6	15.9	2399	84.2
		со	(56.3)	(6.5)	(23.8)	(40.2)	(6668)	(1.5)	(15.1)	(2867)	(28.1)
8	Chp1 (n = 41)	ср	20.2	1.0	0.4	59.0	66.8	0.01	0.1	2.9	112
		со	(46.6)	(2.0)	(0.4)	(69.0)	(292)	(0.01)	(0.2)	(2.7)	(61.8)
9	Sph1 (n = 19)	ср	12.5	4.1	9.9	277	2172	0.001	0.05	568	24.6
		со	(10.8)	(4.5)	(15.9)	(263)	(3360)	(0.01)	(0.1)	(590)	(18.9)
10	Py1 (n = 45)	ср	22.0	0.6	62.9	365	9074	0.5	36.4	1924	10.9
		со	(21.3)	(0.9)	(87.5)	(385)	(11021)	(1.0)	(33.2)	(1430)	(13.4)
11	Py2 (n = 30)	ср	2.9	0.04	33.9	169	2414	0.1	16.9	3666	4.4
		со	(3.7)	(0.1)	(40.6)	(173)	(2653)	(0.1)	(16.2)	(3226)	(3.3)
12	Py3 (n = 20)	ср	4.7	2.1	21.3	276	2499	0.1	7.5	2373	14.3
		со	(5.1)	(2.7)	(29.3)	(314)	(1789)	(0.2)	(5.9)	(3728)	(16.4)
13	Chp1 (n = 29)	ср	0.6	0.04	0.2	13.3	18.1	0.1	0.1	2.9	19.9
		со	(0.5)	(0.1)	(0.2)	(9.7)	(19.6)	(0.2)	(0.3)	(9.0)	(6.5)
14	Sph1 (n = 65)	ср	4.6	0.06	5.5	158	453	0.01	0.3	69.4	15.8
		со	(7.6)	(0.1)	(29.7)	(228)	(1651)	(0.02)	(1.2)	(280)	(7.5)

Примечание. В таблице указаны минеральные типы палеогидротермальных труб: пирит-халькопиритовый (1–4), сфалерит-пирит-халькопиритовый (5–9), халькопирит-пирит-сфалерит (10–14). Условные обозначения минералов см. в тексте. ср – среднее содержание, со – стандартное отклонение, n = 20 – количество анализов. Аналитики В.В. Масленников, С.П. Масленникова (ИМин УрО РАН).



Фиг. 11. Диаграммы содержаний Co–Te (а), Bi–Te (б), Ag–Te (в) и Au–Te (г) в колломорфном пирите-1 по данным ЛА-ИСП-МС анализов (г/т).

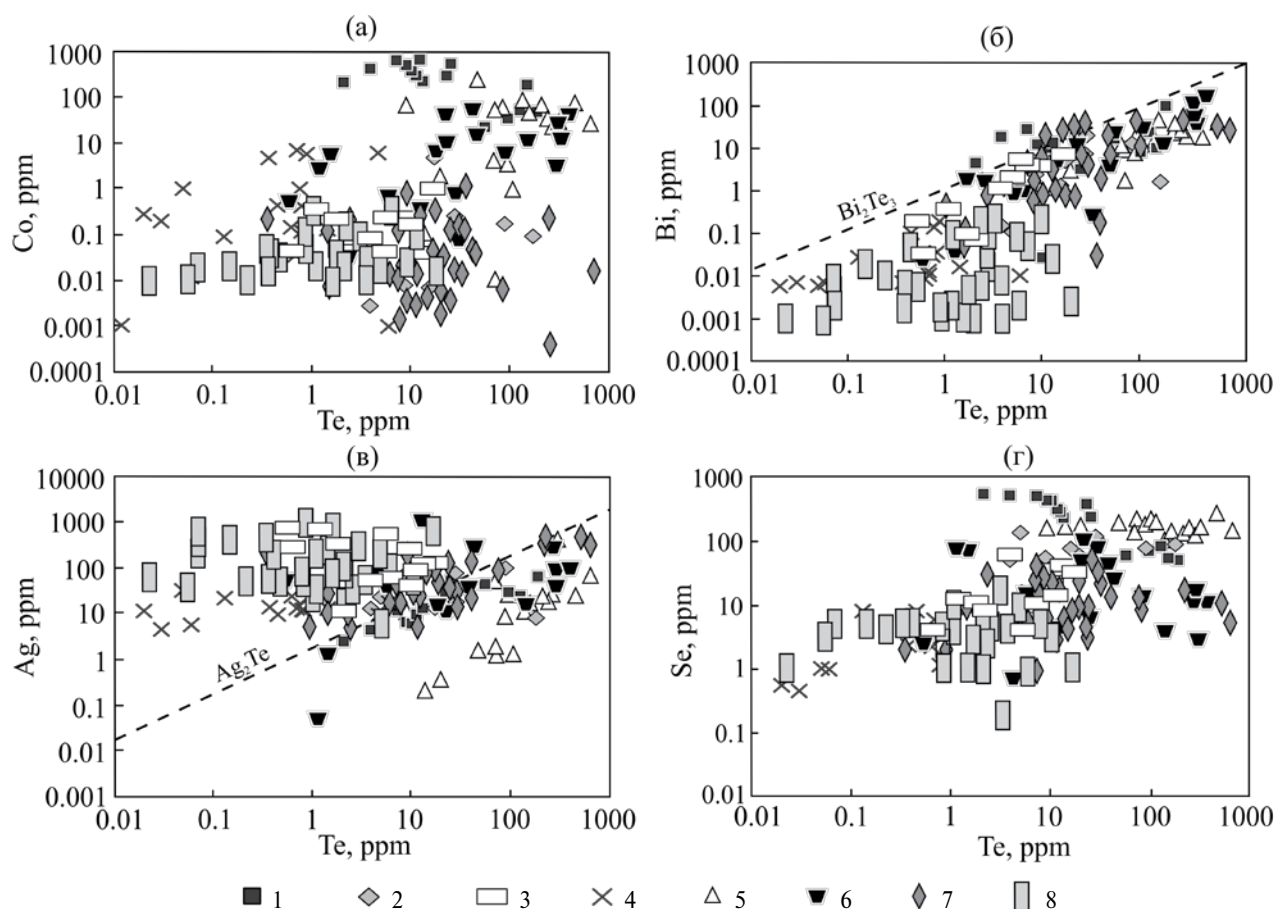
1 – пирит-1 сфалерит-халькопирит-пиритовых турбидитов; 2 – пирит-1 пиритовых турбидитов; 3 – пирит-1 биоморфных руд; 4 – пирит-1 пирит-халькопиритовых палеокурильщиков; 5 – пирит-1 сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиков; 6 – пирит-1 халькопирит-пирит-сфалеритовых палеокурильщиков.

личного состава обычно аналогичны концентрациям в пирите-2. Несколько выше содержания Co и Se в пирите-3 относительно пирита-2 в трубах пирит-халькопиритовых палеокурильщиков. Пирит-3 массивных халькопирит-пиритовых руд по концентрациям элементов-примесей близок к пириту-3 пирит-халькопиритовых палеокурильщиков, несколько уступая по содержаниям Co (см. фиг. 12). Концентрации теллура в пирите-3 труб палеокурильщиков уступают аналогичному пириту массивных сульфидных руд.

Гидротермальный халькопирит-1 (Chp1) фрагментов палеокурильщиков характеризуется более низкими, по сравнению с разновидностями пирита, концентрациями большинства элементов-примесей (см. табл. 3). Наиболее обогащен теллуром гидротермальный халькопирит-1 пирит-халькопиритовых и сфалерит-пирит-халькопиритовых труб (0.4–186 г/т). В халькопирит-пирит-сфалеритовых гидротермальных трубах установлены минимальные содержания теллура (до 1.8 г/т). Средние содержания Te, Bi, Ag в халькопирите-1, по сравне-

нию с пиритом различных минеральных типов палеокурильщиков, незначительно снижаются, при этом на один-два порядка падают концентрации Au, Pb, Co, Ni и As (см. табл. 3).

На бинарных диаграммах концентраций элементов-примесей для халькопирита-1 биоморфных руд и обломков труб сфалерит-пирит-халькопиритовых курильщиков характерны минимальные содержания теллура, висмута, серебра, золота и селена (фиг. 13). Устойчивая корреляция между концентрациями Bi и Te наблюдается для халькопирита-1 пирит-халькопиритовых ($r = 0.98$) и сфалерит-пирит-халькопиритовых ($r = 0.71$) палеокурильщиков (фиг. 13а). В халькопирите-1 обломков пирит-халькопиритовых труб основная часть серебра связана с гесситом, а в халькопирите-1 фрагментов сфалерит-пирит-халькопиритовых и халькопирит-пирит-сфалеритовых палеокурильщиков преобладают, вероятно, включения самородного золота и электрума (фиг. 13б, в). Значимая корреляция между селеном и теллуром в гидротермальном халькопирите, по-видимому,



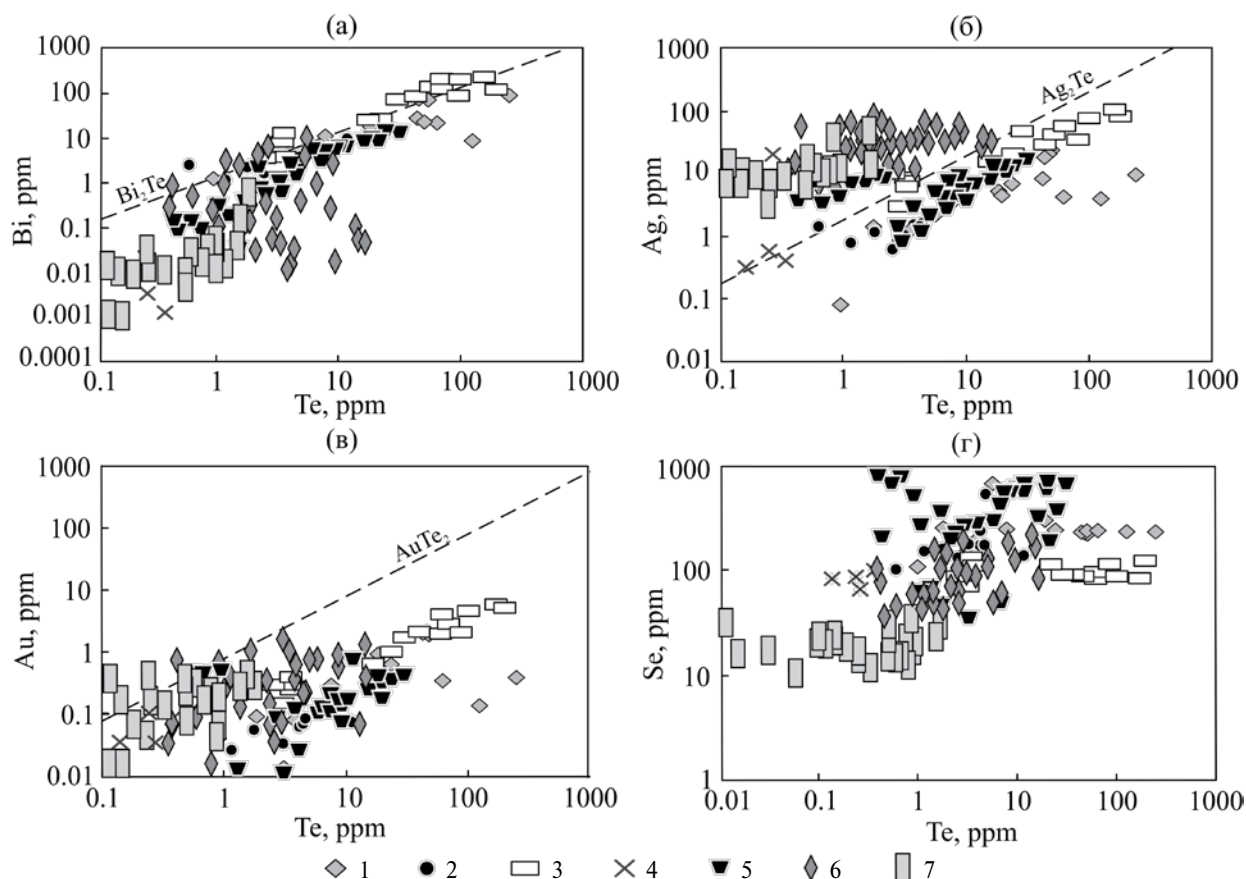
Фиг. 12. Диаграммы содержаний Co–Te (а), Bi–Te (б), Ag–Te (в) и Au–Te (г) в пирите-2 и пирите-3 по данным ЛА-ИСП-МС анализов (г/т).

1 – пирит-3 пирит-халькопиритовых палеокурильщиков; 2 – пирит-3 сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиков; 3 – пирит-3 халькопирит-пирит-сфалеритовых палеокурильщиков; 4 – пирит-2 биолититов; 5 – пирит-3 массивных халькопирит-пиритовых руд; 6 – пирит-2 пирит-халькопиритовых палеокурильщиков; 7 – пирит-2 сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиков; 8 – пирит-2 халькопирит-пирит-сфалеритовых палеокурильщиков.

Таблица 4. Содержание элементов-примесей в сульфидах биолититов Юбилейного месторождения по данным ЛА-ИСП-МС (г/т)

Минерал		Te	Bi	Au	Ag	Pb	Co	Ni	As	Se
Py1 (n = 20)	ср	19.8	1.2	11.42	113	4266	4.7	43.5	812	4.5
	со	(12.9)	(20.4)	(5.1)	(39.4)	(3123)	(5.5)	(23.2)	(276)	(3.5)
Py-1fram (n = 9)	ср	34.3	3.7	2.7	60.7	1043	0.1	45.3	290	11.3
	со	(8.8)	(2.8)	(0.7)	(18.2)	(206)	(0.3)	(20.8)	(87.3)	(1.7)
Py2 (n = 18)	ср	1.0	0.1	1.1	14.0	915	1.5	10.3	124	9.4
	со	(1.6)	(0.3)	(0.6)	(7.6)	(682)	(2.4)	(18.0)	(124)	(21.5)
Chp1 (n = 4)	ср	0.3	0.1	0.07	6.2	14.8	0.01	0.05	4.2	82.3
	со	(0.1)	(0.01)	(0.03)	(11.5)	(26.6)	(0.01)	(0.08)	(6.8)	(13.8)
Sph1 (n = 3)	ср	0.3	0.02	0.1	47.2	151	0.002	0.02	16.1	24.5
	со	(0.1)	(0.01)	(0.02)	(38.5)	(180)	(0.002)	(0.005)	(20.5)	(24.8)

Примечание. Условные обозначения минералов см. в тексте. ср – среднее содержание, со – стандартное отклонение, n = 9 – количество анализов. Аналитики В.В. Масленников, С.П. Масленникова (ИМин УрО РАН).



Фиг. 13. Диаграммы содержаний Bi–Te (а), Ag–Te (б), Au–Te (в), Se–Te (г) в халькопирите по данным ЛА-ИСП-МС анализов (г/т).

1 – халькопирит-2 пирит-халькопиритовых турбидитов; 2 – халькопирит-4 пирит-халькопиритовых турбидитов; 3 – халькопирит-2 сфалерит-халькопирит-пиритовых турбидитов; 4 – халькопирит-1 биолититов; 5 – халькопирит-1 пирит-халькопиритовых палеокурильщиков; 6 – халькопирит-1 сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиков; 7 – халькопирит-1 халькопирит-пирит-сфалеритовых палеокурильщиков.

отсутствует (фиг. 13г). Относительно ровные тренды импульсов ЛА-ИСП-МС, характерные для халькопирита-1, могут свидетельствовать о возможной изоморфной примеси теллура (фиг. 10в).

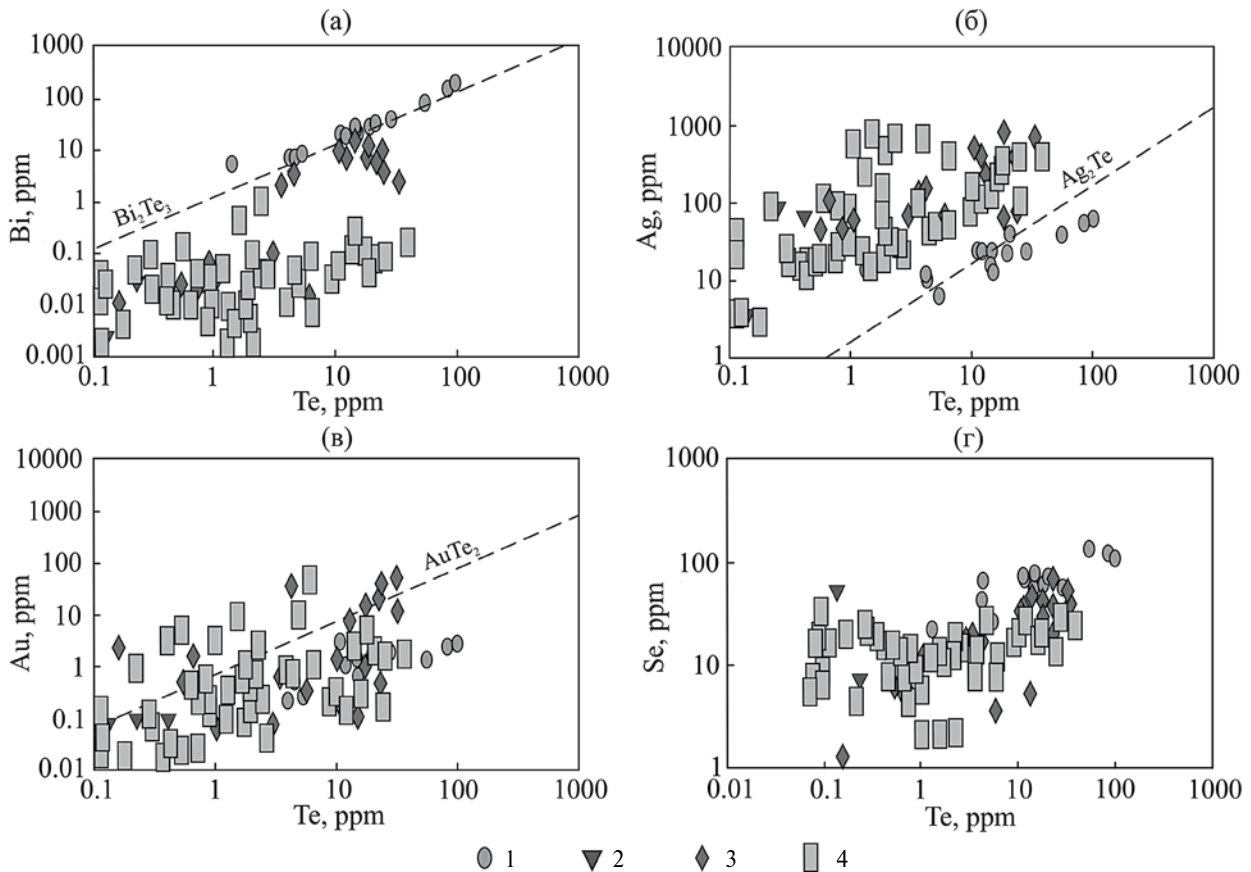
Сфалерит-1 (Shp1) фрагментов гидротермальных труб содержит сопоставимые с халькопиритом-1 содержания элементов-примесей (см. табл. 3). Сфалерит-1 обломков сфалерит-пирит-халькопиритовых труб отличается широким интервалом содержаний для Ag (41–845 г/т), Au (0.07–52.5 г/т) и узким для Te (0.2–33.6 г/т) и Bi (0.01–14.9 г/т). Похожая ситуация характерна для сфалерита-1 халькопирит-пирит-сфалеритовых палеокурильщиков, где на фоне невысоких концентраций Te (0.1–37.2 г/т) и Bi (0.01–0.27 г/т), отмечаются широкие колебания содержаний Ag (3–828.7 г/т).

Сфалерит-1 сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиков по сравнению со сфалеритом-1 халькопирит-пирит-сфалеритовых труб в большей степени обогащен висмутом (фиг. 14а). Повышенные концентрации серебра и золота

в сфалерите-1, вероятно, связаны с присутствием самородного золота и электрума (фиг. 14б, в). Положительная корреляция содержаний селена и теллура ($r = 0.74$) характерна для сфалерита-1 сфалерит-пирит-халькопиритовых труб палеокурильщиков (фиг. 14г).

*Элементы-примеси
в минералах сульфидных биолититов*

Содержания Te (6.4–55.2 г/т), Bi (0.02–8.5 г/т), Co (0.2–9.7 г/т), Se (3.5–18.5 г/т) в пирите-1 (Py1) биолититов немного ниже, чем в трубах пирит-халькопиритовых и сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиков (табл. 4). В то же время концентрации Au (1.9–18.9 г/т), Ag (34.5–191 г/т) и Pb (595–15600 г/т) находятся на одном уровне с пиритом-1 палеокурильщиков и превосходят сосуществующий фрамбоидальный и зернистый пирит-2 биоморфных руд. На фиг. 11 заметно, что пирит-1 биолититов уступает по содержаниям Te и Bi пириту-1 палеокурильщиков, но обладает аналогичными концентрациями Co, Ag, Se.



Фиг. 14. Диаграммы содержаний Bi–Te (а), Ag–Te (б), Au–Te (в), Se–Te (г) в сфалерите по данным ЛА-ИСП-МС анализов (г/т).

1 – сфалерит-2 сфалерит-халькопирит-пиритовых турбидитов; 2 – сфалерит-1 биолититов; 3 – сфалерит-1 сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиков; 4 – сфалерит-1 халькопирит-пирит-сфалеритовых палеокурильщиков.

Фрамбоидальный пирит (Py1fram) биолититов характеризуется умеренными содержаниями Te (20.0–45.0 г/т), Ag (169–417 г/т) и Pb (753–1375 г/т) при низких концентрациях Co (0.01–1.0 г/т) и Bi (0.01–9.0 г/т).

Субгедральный и ангедральный пирит-2 (Py2) уступает по содержаниям элементов-примесей и в особенности Te (0.02–6.0 г/т), колломорфному и фрамбоидальному пириту. По содержаниям Te, Bi, Se пирит-2 биолититов аналогичен пириту-2 и пириту-3 халькопирит-пирит-сфалеритовых курильщиков, превосходя их по концентрациям Co (см. фиг. 12)

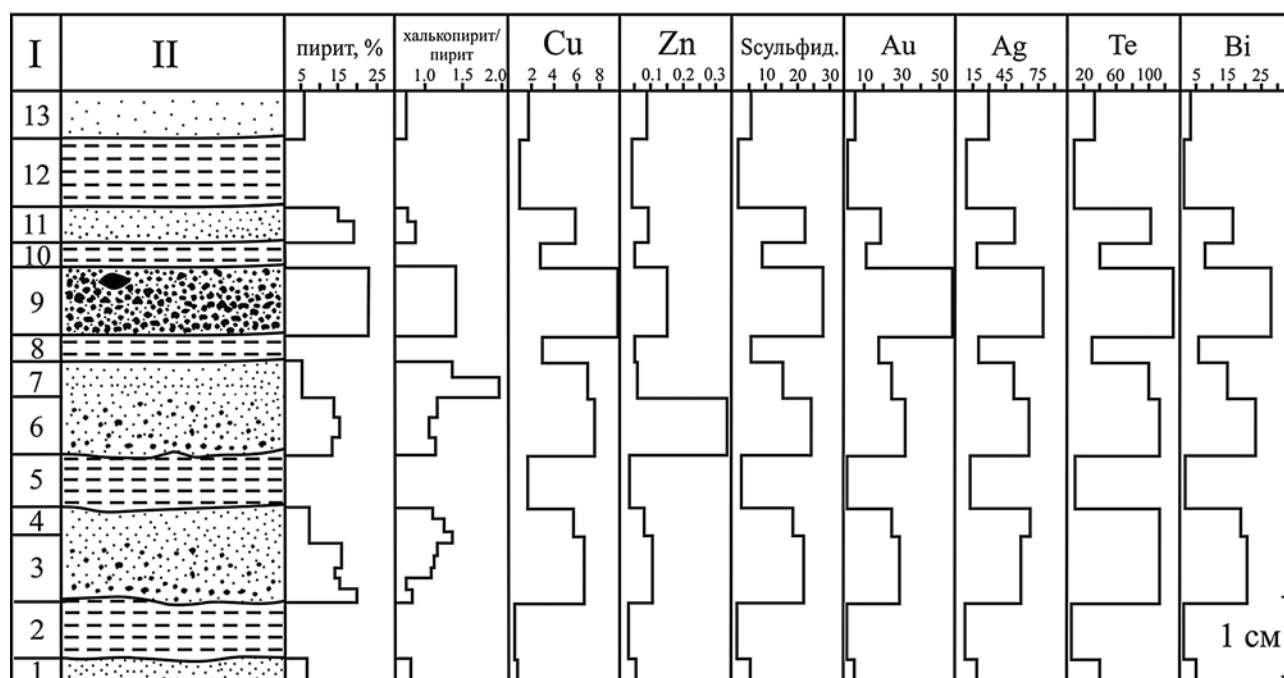
Гидротермальные разновидности халькопирита-1 (Chr1) и сфалерита-1 (Sph1) полостей сульфидных трубок отличаются крайне низкими концентрациями Te, Bi, Au и других элементов-примесей. Точки содержаний Te, Bi, Au в халькопирите-1 и сфалерите-1 биолититов совпадают с областью значений гидротермальных сульфидов халькопирит-пирит-сфалеритовых палеокурильщиков (см. фиг. 13, 14). В то же время халькопирит-1 биолититов концентрирует несколько больше Se (см. фиг. 13).

Элементы-примеси в сульфидных турбидитах

Методом ИСП-МС и атомно-абсорбционным анализом определены содержания теллура и других элементов в отдельных слоях мелкообломочных турбидитов (табл. 5).

Для сравнения использованы данные по двум образцам: халькопирит-пиритовому слою с градиционной текстурой (обр. 1-12) и образцу пирит-халькопиритового турбидита без сортировки сульфидного материала (обр. 1-17) (см. фиг. 3). Сульфидные слои образца 1-17 переслаиваются с хлорит-кварцевыми слоями, содержащими обособления халькопирита-3 с включениями теллуридов (см. фиг. 4в).

Алевропесчаные сульфидные турбидиты, где наблюдается интенсивное замещение пирита халькопиритом, отличаются значительным обогащением медью (Cu до 10.1%). Редкие фрагменты и прожилки сфалерита обеспечили низкие концентрации цинка (Zn до 1.0%). Мелкообломочные сульфидные слои мощностью 1–2 см в кровле сменяются тонкообломочными разностями с увеличением количества нерудной составля-



Фиг. 15. Литограмма теллуридсодержащего пирит-халькопиритового турбидита (обр. 1–17). Юго-восточный фланг Второй рудной залежи Юбилейного месторождения.

I – количество линий подсчета; II – литология. Содержание пирита в отн.%. Содержание Cu, Zn, S сульфид. – в мас.%, остальные – в г/т. Подсчет сульфидных минералов проведен с помощью линейного метода (Юшко, 1966). Аналитики М.Н. Маляренко, К.А. Филиппова, М.А. Свиридова (ИМин УрО РАН).

ющей. Относительное количество халькопирита возрастает к кровле слоя (фиг. 15). Максимумы концентраций Te совпадают с максимальными содержаниями Cu, Au, Ag и Bi (см. фиг. 15). В пирит-халькопиритовых слоях мелкообломочных турбидитов (обр. 17) содержание теллура достигает максимума в 132 г/т, в отсортированных сульфидных слоях (обр. 12) уменьшается до 73.4 г/т и достигает минимума в хлорит-кварце-

вых прослоях образца 17 (6.19 г/т). В изученных сульфидных слоях турбидитов образцов 12 и 17 наблюдаются повышенные содержания Au, Ag, Bi и Pb (см. табл. 5), свидетельствующие о наличии микровключений самородного золота, теллуридов и галенита.

Прямые зависимости между содержаниями меди и теллура (фиг. 16а), свинца и теллура (фиг. 16б), серебра и золота с теллуrom

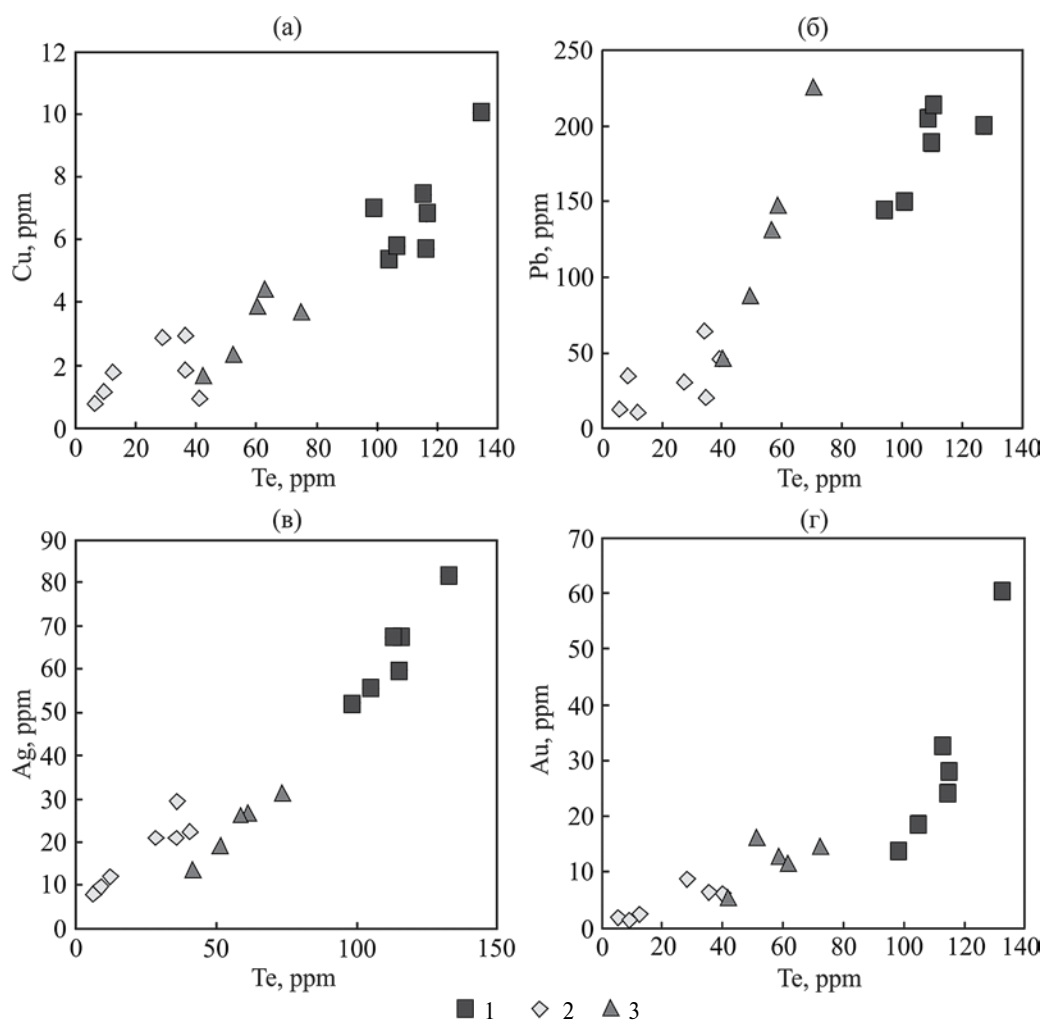
Таблица 5. Содержания элементов-примесей в рудных и нерудных слоях сульфидных турбидитов (обр. 17, 12)

Номера слоев	Cu	Zn	S _{сульфид.}	Au	Ag	Te	Bi	Pb	Se
	мас. %			г/т					
17-1	0.94	0.06	5.44	6.00	22.50	40.59	4.88	45.20	30.44
2	0.76	0.03	1.65	2.32	7.83	6.19	1.20	12.22	12.04
3	6.85	0.11	22.74	28.02	59.70	114.71	21.23	203.87	86.95
4	5.72	0.08	18.27	24.30	67.50	114.27	18.99	180.45	88.01
5	1.78	0.03	2.38	2.30	12.00	12.15	1.64	10.47	16.45
6	7.41	0.34	24.27	32.63	67.50	113.03	23.19	195.99	101.61
7	7.01	0.06	15.23	13.88	52.10	98.03	14.52	138.05	87.69
8	2.90	0.05	6.12	8.58	21.00	28.52	5.49	28.78	31.41
9	10.06	0.15	27.03	60.35	81.50	132.44	27.52	191.67	113.50
10	2.95	0.05	8.48	6.28	21.00	35.71	6.91	61.80	43.72
11	5.81	0.09	22.28	18.62	55.60	104.82	16.81	143.17	84.40
12	1.12	0.04	1.85	1.64	9.83	9.03	1.15	33.19	15.76

Таблица 5. Окончание

Номера слоек	Cu	Zn	S _{сульфид.}	Au	Ag	Te	Bi	Pb	Se
	мас. %			г/т					
13	1.84	0.08	5.63	6.34	29.50	35.87	3.32	19.34	38.02
12-1	1.67	1.02	16.35	5.25	13.6	41.7	7.34	44.0	37.4
12-2	3.64	0.51	33.19	14.3	31.3	73.4	15.1	216	76.4
12-3	4.41	0.08	28.78	11.4	26.6	61.3	12.4	141	75.1
12-4	3.84	0.07	32.81	13.3	26.3	58.7	10.5	126	74.3
12-5	2.31	0.07	30.54	16.2	19.1	51.2	8.12	83.3	50.3
1-11	0.08	0.01	31.1	0.5	5.7	79.5	11.4	13.7	34.0
1-13	0.02	0.04	11.4	15.8	34.3	81.0	4.8	88.3	17.6

Примечание. Обр. 17 – мелкообломочный сульфидный турбидит, представленный чередованием халькопирит-пиритовых (3–4, 6–7, 9, 11) и кварц-хлоритовых (1–2, 5, 8, 10, 12–13) слоев мощностью до 1.5 см. Обр. 12 – халькопирит-пиритовый песчаник с градиционной текстурой. Обр. 11 и 13 – пиритовые конкреции в кремнистом алевропелите. Аналитики М.Н. Маляренко, К.А. Филиппова, М.А. Свиридова (ИМин УрО РАН).



Фиг. 16. Бинарные диаграммы содержаний Cu–Te (а), Pb–Te (б), Ag–Te (в), Au–Te (г) в мелкообломочных сульфидных турбидитах.

1 – пирит-халькопиритовые слои (обр. 1-17), 2 – кварц-хлоритовые слои с редкими сульфидами (обр. 1-17), 3 – халькопирит-пиритовый слой (обр. 1-12). Данные ИСП-МС анализов.

Таблица 6. Содержание элементов-примесей в сульфидах мелкообломочных сульфидных турбидитов Юбилейного месторождения по данным ЛА-ИСП-МС (г/т)

№	Минерал		Te	Bi	Au	Ag	Pb	Co	Ni	As	Se
1	Py1 (n = 6)	ср	85.5	24.1	4.1	47.3	558	212	17.3	1023	40.3
		со	(60.8)	(5.8)	(1.6)	(20.1)	(207)	(269)	(19.7)	(678)	(24.8)
2	Py2 (n = 9)	ср	8.2	3.0	1.5	13.0	133	9.2	10.2	541	11.4
		со	(8.3)	(2.7)	(0.8)	(5.1)	(77.0)	(7.3)	(5.1)	(395)	(15.3)
3	Py5 (n = 9)	ср	34.9	15.7	1.4	3.9	55.5	77.7	14.6	956	58.3
		со	(54.4)	(24.4)	(1.7)	(4.7)	(53.5)	(95.7)	(17.9)	(1328)	(53.9)
4	Chp3 (n = 17)	ср	0.8	0.2	0.3	3.3	14.4	0.07	0.3	4.0	73.1
		со	(0.5)	(0.2)	(0.3)	(1.8)	(8.8)	(0.2)	(1.0)	(8.6)	(31.6)
5	Sph2 (n = 10)	ср	1.8	0.2	0.2	50.7	178	0.03	0.1	63.7	37.2
		со	(1.2)	(0.2)	(0.3)	(94.0)	245	(0.03)	(0.2)	(95.0)	(22.4)
6	Py1 (n = 16)	ср	245	114	4.2	21.5	217	873	118	854	42.4
		со	(150)	(70.5)	(2.5)	(18.7)	(209)	(569)	(69.5)	(444)	(19.0)
7	Py2 (n = 11)	ср	47.2	10.2	2.0	6.4	179	345	23.3	615	73.0
		со	(45.7)	(10.1)	(1.0)	(7.6)	(190)	(540)	(33.7)	(379)	(98.3)
8	Py5 (n = 7)	ср	30.2	5.3	0.8	1.5	50.9	994	3.1	1554	184
		со	(34.3)	(9.4)	(0.8)	(1.1)	(105)	(1355)	(3.4)	(2832)	(250)
9	Py1 (n = 23)	ср	278	342	11.3	263	707	298	109.7	562	90.7
		со	(225)	(157)	(12.2)	(296)	(188)	(285)	(66.6)	(374)	(59.4)
10	Py2 (n = 5)	ср	39.4	30.5	3.5	28.5	303	18.6	21.2	555	21.9
		со	(44.9)	(36.2)	(4.4)	(34.8)	(282)	(28.4)	(24.2)	(834)	(34.3)
11	Py5 (n = 20)	ср	256	109	14.0	341	342	499	24.4	1206	155
		со	(560)	(234)	(38.7)	(1074)	(311)	(494)	(33.3)	(1823)	(214)
12	Chp2 (n = 16)	ср	53.4	100	2.2	39.9	471	155	28.9	152	109.4
		со	(57.4)	(92.1)	(2.0)	(33.2)	(390)	(217)	(29.4)	(190)	(39.2)
13	Sph2 (n = 15)	ср	25.8	46.0	1.5	25.9	287	49.7	7.5	167	72.2
		со	(29.4)	(58.9)	(0.9)	(16.5)	(166)	(104)	(11.8)	(275)	(32.1)
14	Py2 (n = 12)	ср	376	68.5	38.3	177	840	86.3	36.9	2522	45.1
		со	(468)	(85.2)	(51.9)	(175)	(782)	(97.4)	(31.8)	(2448)	(40.1)
15	Py5 (n = 29)	ср	264	103	15.2	90.1	230	117	54.7	351	190
		со	(518)	(431)	(47.4)	(199)	(657)	(116)	(103)	(363)	(80.8)
16	Chp2 (n = 38)	ср	36.6	18.4	0.7	11.9	69.8	4.1	1.8	27.9	227
		со	(72.3)	(25.3)	(1.0)	(29.9)	(107.6)	(11.1)	(6.3)	(76)	(84.6)
17	Chp4 (n = 10)	ср	3.9	3.4	0.08	1.4	8.8	0.02	0.04	1.0	195
		со	(3.0)	(2.6)	(0.03)	(0.6)	(3.6)	(0.02)	(0.03)	(0.9)	(122)

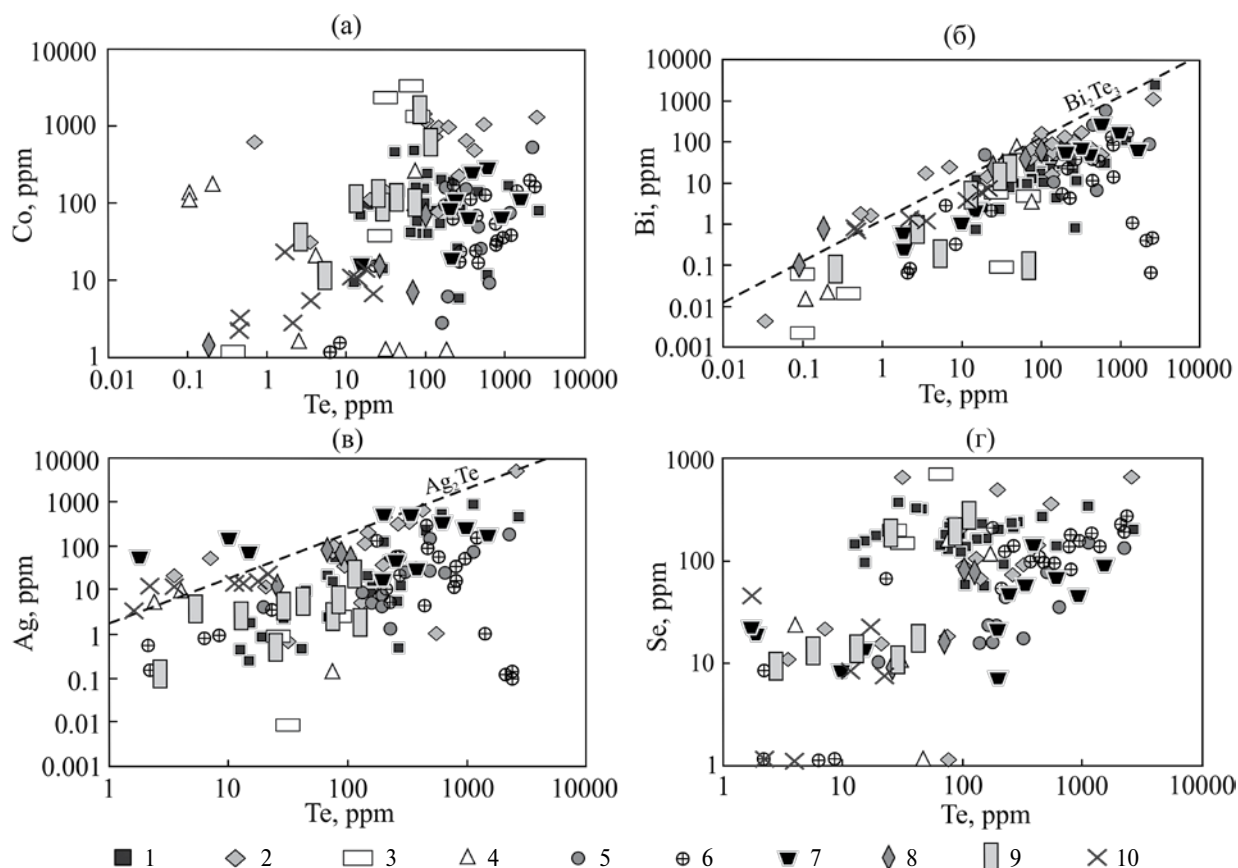
Примечание. В таблице указаны минеральные типы мелкообломочных отложений: сфалерит-пиритовый гравелит (1–5), пиритовые (6–8), сфалерит-халькопирит-пиритовые (9–13) и пирит-халькопиритовые (14–17) алевропесчаные турбидиты. Условные обозначения минералов см. в тексте. ср – среднее содержание, со – стандартное отклонение, n = 9 – количество анализов. Аналитики В.В. Масленников, С.П. Масленникова (ИМин УрО РАН).

(фиг. 16в, г) наблюдаются для пирит-халькопиритовых и хлорит-кварцевых слоев сульфидных турбидитов.

Колломорфный и тонкозернистый пирит-1 (Py1) сульфидных турбидитов отличается более широки-ми, по сравнению с пиритом-1 палеокурильщи-ков, вариациями содержаний Te (49.3–826.1 г/т). Пирит-1 пиритовых и сфалерит-халькопирит-пиритовых мелкообломочных турбидитов содержит, в среднем, в несколько раз больше теллура, чем аналогичный пирит из обломков гидротермаль-

ных труб (табл. 6). При этом пиритовые мелкообломочные отложения характеризуются низкими содержаниями Au, Ag, Pb и Bi – типичными эле-ментами теллуридной ассоциации.

На бинарных диаграммах заметно, что в пи-рите-1 мелкообломочных турбидитов, по сравне-нию с аналогичным пиритом палеокурильщи-ков, выше содержания кобальта, висмута и сопоста-вимые концентрации селена (см. фиг. 11). В пи-рите-1 сфалерит-халькопирит-пиритовых тур-бидитов преобладает теллуровисмутит и гессит,



Фиг. 17. Диаграммы содержаний Co–Te (а), Bi–Te (б), Ag–Te (в) и Au–Te (г) в пирите-2 и пирите-5 сульфидных турбидитов по данным ЛА-ИСП-МС анализов (г/г).

1 – пирит-5 пирит-халькопиритовых алевропесчаных турбидитов; 2 – пирит-5 сфалерит-халькопирит-пиритовых алевропесчаных турбидитов; 3 – пирит-5 пиритовых алевропесчаных турбидитов; 4 – пирит-5 пирит-сфалеритовых гравийно-песчаных турбидитов; 5 – пирит-4 кремнистых алевропелитов; 6 – пирит-5 кремнистых алевропелитов; 7 – пирит-2 пирит-халькопиритовых алевропесчаных турбидитов; 8 – пирит-2 сфалерит-халькопирит-пиритовых алевропесчаных турбидитов; 9 – пирит-2 пиритовых алевропесчаных турбидитов; 10 – пирит-2 пирит-сфалеритовых гравийно-песчаных турбидитов.

в то время как соотношение Te к Bi и Te к Ag в пиритовых турбидитах и трубах палеокурильщиков указывает на наличие других теллуридов. Положительная корреляция Se и Te ($r = 0.86$) характерна для колломорфного пирита-1 сфалерит-халькопирит-пиритовых турбидитов (см. фиг. 11).

Пирит-2 (Py₂) мелкообломочных отложений отличается более широким, по сравнению с пиритом-2 гидротермальных труб, диапазоном вариаций содержаний теллура (0.1–1555 г/т). Относительно низкие концентрации Te (до 126.9 г/т), Bi (до 27.1 г/т), Au (до 3.2 г/т), Ag (до 24.9 г/т) характерны для пиритовых разновидностей турбидитов. Более высокие содержания Te (0.1–102 г/т), Bi (0.1–88.6 г/т), Au (0.6–11.1 г/т), Ag (0.7–81.0 г/т) характерны для сфалерит-халькопирит-пиритовых турбидитов (см. табл. 6). Максимальными концентрациями Te (1.7–1555 г/т) и других элементов-примесей обладает пирит-2 пирит-халькопиритовых алевропесчаных отложе-

ний. В пирите-2 пирит-сфалеритовых гравелитов содержания Te (0.4–22.2 г/т), Bi (0.2–7.8 г/т), Au (0.8–3.2 г/т), Ag (3.3–23.3 г/т) минимальны.

В субгедральном пирите-5 (Py₅), обрастающем ядра пирита-2, отмечаются крайне широкие вариации концентраций Te (0.03–2688 г/т) и Bi (0.04–2342 г/т). В мелкообломочных отложениях сфалерит-халькопирит-пиритового и пирит-халькопиритового состава наблюдается некоторое увеличение содержаний Bi, Au, Ag, Co и Se в пирите-5 относительно пирита-2 (см. табл. 6). В пирите-5 пиритового мелкообломочного турбидита по сравнению с пиритом-2 возрастают концентрации As (до 7960 г/т), Se (до 704 г/т) и Co (до 3295 г/т), но понижаются содержания Te, Bi, Au и Ag.

Фигуративные точки содержаний пирита-2 и пирита-5 различных минеральных типов сульфидных турбидитов на диаграммах содержаний Co–Te, Bi–Te, Ag–Te и Se–Te расположены в от-

носительной близости друг от друга (фиг. 17). Вместе с тем для разновидностей пирита-5 характерны повышенные концентрации Co и Se по сравнению с пиритом-2. Заметно существенное обеднение пирита пирит-сфалеритовых гравелитов относительно пирита алевропесчаных турбидитов по содержаниям Te, Co и Se (см. фиг. 17). Концентрации Te, Ag, Bi в пирите-4 и пирите-5 кремнистых алевропелитов аналогичны пириту-5 пирит-халькопиритовых турбидитов (см. фиг. 17). Тренды спектров LA-ICP-MS анализов смеси пирита-2+5 отличаются преимущественно резкими амплитудами Te, Au, Ag и Hg указывающими на преобладание микровключений теллуридов (фиг. 10б).

Для псевдоморфного халькопирита-2 (Chp2) характерны не только высокие концентрации Te, Bi, Au, Ag, – элементов золото-теллуридной ассоциации, но и значительные содержания Co, Ni, As, наследуемых от замещаемого пирита (см. табл. 6). Халькопирит-2 халькопирит-пиритовых мелкообломочных турбидитов в сростках со смесью пирита-2,5 содержит значительное количество включений теллуридов и обладает повышенными концентрациями Te (до 388.0 г/т) и Bi (до 94.8 г/т). Псевдоморфный халькопирит-2 сфалерит-халькопирит-пиритовых турбидитов отличается широкими вариациями содержаний Te (2.8–190.6 г/т) и Bi (2.8–279.5 г/т). Поздний халькопирит-4 (Chp4) трещин кливажа обеднен большинством элементов-примесей, в том числе и теллуrom, содержания которого в нем достигают 3.94 г/т (см. табл. 6).

На бинарных диаграммах концентраций элементов-примесей для псевдоморфного халькопирита-2 характерна устойчивая корреляция теллура с висмутом, вероятно, связанная с микровключениями теллуrowисмутита (см. фиг. 13). Как в халькопирите-1 пирит-халькопиритовых труб, так и в халькопирите-2 мелкообломочных турбиди-

тов основная часть серебра связана с гесситом (фиг. 13б). Ввиду незначительных вариаций селена в псевдоморфном халькопирите-2 значимая корреляция между селеном и теллуrom отсутствует (фиг. 13г). Тренды спектров LA-ICP-MS анализов халькопирита-2 отличаются преимущественно резкими амплитудами Te, Hg и Bi указывающими на преобладание микровключений теллуридов в этих минералах (фиг. 10г).

Сегрегационный сфалерит-2 (Sph-2) мелкообломочных сфалерит-халькопирит-пиритовых турбидитов отличается от сфалерита-1 повышенными средними содержаниями большинства элементов-примесей Te (25.8 г/т) и Bi (46 г/т) (см. табл. 6). Устойчивая корреляция между содержаниями висмута и теллура, отмечаемая в сфалерите-2 сфалерит-халькопирит-пиритовых турбидитов обусловлена включениями теллуrowисмутита, а примесь серебра, вероятно, связана с гесситом (см. фиг. 14). Для содержаний селена и теллура сфалерита-2 наблюдается устойчивая положительная корреляция (см. фиг. 14г).

*Элементы-примеси
в кремнистых алевропелитах*

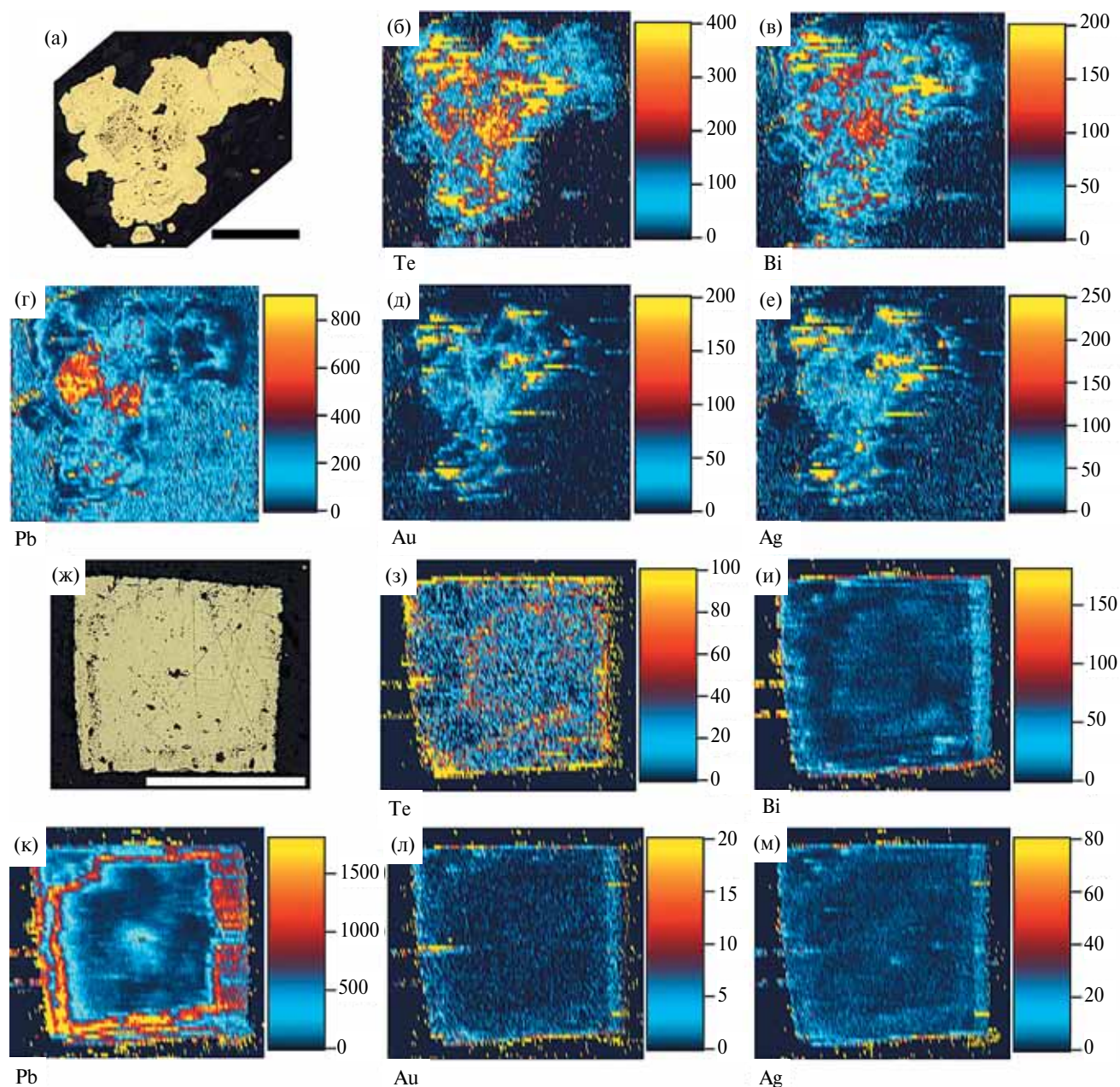
Методом ИСП-МС и атомно-абсорбционным анализом определены содержания элементов-примесей в обогащенных конкрециях и метакристаллами пирита прослоях кремнистых алевропелитов. Концентрации теллура в двух пробах 1-11 и 1-13 составляют 79.5 и 81.0 г/т соответственно. Содержания висмута, золота и других элементов в кремнистых алевропелитах выше, чем в хлорит-кварцевых, но ниже чем в сульфидных слоях мелкообломочных турбидитов (см. табл. 5).

По нескольким конкрециям и метакристаллам пирита-4+5 проведено геохимическое микрокартирование методом LA-ИСП-МС. Повышенные концентрации теллура приурочены к микрозер-

Таблица 7. Содержание элементов-примесей в пирите кремнистых алевропелитов Юбилейного месторождения по данным LA-ИСП-МС (г/т)

Минерал		Te	Bi	Au	Ag	Pb	Co	Ni
Py4 (n = 12)	cp	519	126	15.5	42.3	624	101	48.9
	co	(619)	(165)	(20.3)	(60.7)	(319)	(146)	(43.1)
Py5 (n = 25)	cp	15.2	712	117	143	692	28.8	14.7
	co	(19.7)	(1792)	(71.8)	(205)	(1364)	(43.4)	(25.3)
Минерал		As	Se	Mg	Si	Mn	Ti	V
Py4 (n = 12)	cp	1057	57.6	2365	7614	344	234	71.6
	co	(1038)	(54.9)	(2487)	(6143)	(201)	(172)	(47.6)
Py5 (n = 25)	cp	663	37.6	14.1	40.8	63.4	64.8	13.2
	co	(718)	(48.7)	(20.7)	(66.0)	(81.5)	(62.8)	(30.4)

Примечание. Условные обозначения минералов см. в тексте. cp – среднее содержание, co – стандартное отклонение, n = 12 – количество анализов. Аналитики В.В. Масленников, С.П. Масленникова (ИМин УрО РАН).



Фиг. 18. Геохимические микрокарты распределения химических элементов в конкреции (а–е) и метакристалле (ж–м) пирита.

а, ж – микрофотографии; б–е, з–м – геохимические микрокарты распределения химических элементов по данным ЛА-ИСП-МС анализа. Шкала отражает содержание химического элемента (г/т). Длина линий на фото а, ж – 0,5 мм.

нистому пириту-4 ядра конкреций, как и примеси Pb, Bi, Au и Ag (фиг. 18а–е). В других случаях теллур равномерно распределен в срезе конкреции: небольшие пятна с повышенными содержаниями находятся как в центральной, так и в периферийной части. В срезах метакристаллов пирита зона повышенных содержаний теллура располагается в краевой части, сложенной субгидральным пиритом-5 (фиг. 18ж, з). В других метакристаллах область высоких концентраций теллура приурочена к ядру микрозернистого пи-

рита-4. Для метакристаллов пирита характерна пространственная корреляция Te с концентрациями Pb и Bi, связанная, вероятно, с галенит-теллуридной ассоциацией (фиг. 18и–м).

Пирит-4 (Py₄) кремнистых алевропелитов обогащен большинством халько- и литофильных элементов, в том числе и теллуром (табл. 7). Микрозернистый пирит-4 крайне неоднороден по содержанию Te (19,9–1129 г/т), Bi (6,8–604 г/т), Au (0,7–63,2 г/т), Ag (1,4–182 г/т) и других элементов-примесей.

Субгедральный пирит-5 (Py₅) периферийных зон конкреций и кристаллов близок по содержанию ряда химических элементов к микрозернистому пириту-4 (см. табл. 7). Пирит-5, содержащий включения самородного золота и теллуридов, обладает высокими концентрациями Te (2.3–2376 г/т) и Ag (0.1–288 г/т) при довольно низких содержаниях Pb (0.1–337 г/т).

Большинство фигуративных точек концентраций Te, Co, Bi пирита-4 и пирита-5 кремнистых алевропелитов расположены в области значений пирита-2 и пирита-5 пирит-халькопиритовых турбидитов (см. фиг. 17). По содержаниям элементов-примесей разновидности пирита кремнистых алевропелитов превосходят пирит пиритовых и сфалерит-халькопирит-пиритовых турбидитов. Однако, как и пирит сульфидных турбидитов, пирит-4 и пирит-5 отличаются крайне широкими вариациями концентраций Te, Bi, Ag и Se, связанными с неравномерным распределением микровключений теллуридов и самородного золота.

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АССОЦИАЦИИ

Методом максимального корреляционного пути по выборке анализов ЛА-ИСП-МС (Смирнов, 1981) для сульфидов мелкообломочных турбидитов, фрагментов труб палеокурильщиков и

кремнистых алевропелитов определены общие минералого-геохимические ассоциации элементов-примесей (табл. 8).

Для пирита-1 труб палеокурильщиков характерна геохимическая ассоциация, связывающая элементы самородного золота и теллуридов в одну группу (см. табл. 8). Отдельную ассоциацию образуют селен и кобальт, к которым в случае с пиритом-1 присоединяется свинец. Никель и мышьяк не образуют значимых связей с какими-либо элементами. Колломорфный пирит-1 сульфидных турбидитов характеризуется наличием устойчивых пар Bi с Pb, а также Co с Ni. Пространственная корреляция золото-петцит-гесситовой ассоциации с галенит-теллурувисмутитовой отражена в значимых связях между (Bi-Pb) и (Ag-Se-Te-Au). Тесная корреляция между парами Au и Ag, Bi и Te характерна для пирита-2 сульфидных палеокурильщиков и алевропесчаных турбидитов, очевидно, связанная с вкрапленностью самородного золота и теллуридов висмута. Для пирита-3 палеокурильщиков характерны золото-серебряная (As-Au-Ag) и теллурувисмутитовая (Bi-Te) ассоциации (см. табл. 8). Геохимические связи пирита-4 отражают золото-теллуридный парагенезис (Au-Ag-Bi-Te), изоморфные примеси в пирите (Co-Ni) и обогащение микрозернистого ядра галенитом и литогенными компонентами (Mg-Ti-Pb-Mn). Пирит-5 сульфидных турбидитов харак-

Таблица 8. Ассоциации химических элементов в сульфидах кластогенных руд Юбилейного месторождения

Минерал	Генетические типы руд	Ассоциация элементов-примесей
Колломорфный пирит-1	Обломки труб палеокурильщиков	(Pb-Se-Co) — (Bi-Te-Ag-Au) — As-Ni
	Мелкообломочные турбидиты	(Bi-Pb) — (Ag-Se-Te-Au) — As — (Co-Ni)
Зернистый зональный пирит-2	Обломки труб палеокурильщиков	(Au-Ag-As) — (Pb-Ni) — (Co-Bi-Te) — Se
	Сульфидные турбидиты	(Au-Ag-Bi-Te-Ni) — (Se-Co) — As — Pb
Зернистый незональный пирит-3	Обломки труб палеокурильщиков	(Se-Co) — (Bi-Te) — Ni — Pb — (As-Au-Ag) — Ni
Микрозернистый пирит-4	Кремнистые алевропелиты	(Au-Ag-Bi-Te) — (Co-Ni) — (Mg-Ti-Pb-Mn) — V — As — Si — Se
Субгедральный пирит-5	Сульфидные турбидиты	(Bi-Te-Ag-Au) — (Se-Co) — As — Pb — Ni
	Кремнистые алевропелиты	(Mn-Mg-Si) — (Pb-Ti-Bi-V) — (Ag-Au) — (Se-Te-Co) — Ni — As
Гидротермальный халькопирит-1	Обломки труб палеокурильщиков	(Bi-Te-Se) — (Co-Ni-As) — Pb — (Ag-Au)
Псевдоморфный халькопирит-2	Сульфидные турбидиты	(Ag-Au-Bi-Pb) — (Ni-Co-As-Te) — Se
Динометаморфический халькопирит-4	Сульфидные турбидиты	(Bi-Pb-Te-Ag) — Co-Au — (Se-As) — Ni
Гидротермальный сфалерит-1	Обломки труб палеокурильщиков	(Pb-As) — (Ag-Au) — (Bi-Se-Te) — Co-Ni
Сегрегационный сфалерит-2	Сульфидные турбидиты	(Bi-Te-Ag) — (Ni-Se-As-Co) — (Au-Pb)

Примечание. В скобки заключены ассоциации элементов-примесей с повышенными по сравнению с соседними в ряду коэффициентами корреляции. Разделение одним штрихом означает значимые связи, двумя штрихами — отсутствие значимых связей.

теризуется сильными корреляционными связями между элементами изоморфной примеси (Se-Co) и золото-теллуридной ассоциации (Bi-Te-Ag-Au). Ассоциации, характерные для пирита-5 кремнистых алевропелитов, связаны с включениями алюмосиликатов (Mn-Mg-Si), рутила и галенита (Pb-Ti-Bi-V), самородного золота (Ag-Au) и изоморфными примесями (Co-Te-Se).

Ассоциации, свойственные для гидротермального халькопирита-1 общей выборки труб палеокурильщиков, показывают пространственное разобщение включений пирита (Co-Ni-As), самородного золота (Ag-Au) и теллуридов (Bi-Te-Se). Для псевдоморфного халькопирита-2 сульфидных турбидитов характерна связь теллура с элементами, свойственными для пирита (Ni-Co-As-Te). Отдельную ассоциацию (Ag-Au-Bi-Pb) образуют элементы, характерные для самородного золота и галенита. Во многом аналогичные халькопириту-2 ассоциации характерны и для прожилков динамометаморфического халькопирита-4 (см. табл. 8).

В гидротермальном сфалерите-1 выделяются три отдельные ассоциации: элементы золото-серебряной группы (Ag-Au), элементы минералов теллура (Bi-Se-Te) и галенит-блекловорудную ассоциацию (Pb-As). В сфалерите-2 сульфидных турбидитов отдельные ассоциации образуют элементы, свойственные для пирита и блеклых руд (Ni-Se-As-Co), теллуридов (Bi-Te-Ag), самородного золота и галенита (Au-Pb).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В сульфидных минералах колчеданных месторождений теллур может присутствовать в следующих формах: 1) микровключений минералов теллура, 2) нановключений теллуридов в сульфидах, 3) изоморфного замещения S^{2-} на Te^{2-} в кристаллической решетке сульфидов при высоких температурах ($> 350\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Huston *et al.*, 1995; Maslennikov *et al.*, 2009; Deditius *et al.*, 2011; Wohlegemuth-Ueberwasser *et al.*, 2015). Значимые коэффициенты корреляции теллура с Bi, Ag и Au говорят в пользу преобладания минеральных форм Te в большинстве сульфидов Юбилейного месторождения.

В сульфидных брекчиях Юбилейного месторождения, так же как и на многих колчеданных месторождениях Урала и других регионов (Масленников и др., 2010; Revan *et al.*, 2013; Oudin, Constantinou, 1984; Shimazaki, Horikoshi E., 1990) встречаются хорошо сохранившиеся фрагменты крустификаций и оболочек труб палеокурильщиков. Фрагменты богатых халькопиритом палеокурильщиков содержат одну первичную и две эпигенетические разновидности теллуридов. Первая разновидность встречается исключительно

но в крустификационных агрегатах сфалерита-1 и халькопирита-1 в виде микровключений или наростов на межзерновые поверхности. Наибольшее количество теллуридов концентрируется вдоль внешней и внутренней границ халькопиритовой крустификации в ассоциации со сфалеритом-1 и пиритом-2. Крупнозернистые агрегаты халькопирита-1, локализующиеся в средней части слоя крустификации, обеднены теллуридами. Такое закономерное положение в зональности труб может свидетельствовать в пользу синхронного гидротермального роста зерен сульфидов и теллуридов в среднетемпературных (около $250\text{ }^{\circ}\text{C}$) условиях (Масленникова, Масленников, 2007; Maslennikov *et al.*, 2009, 2013). Аналогичную позицию занимают гидротермальные теллуриды в трубах серых курильщиков поля Пакманус (Maslennikov *et al.*, 2017).

Вторая и третья генерации эпигенетических теллуридов представлены псевдоморфной и прожилковой разновидностями, ассоциирующими с псевдоморфным халькопиритом-2 и прожилковым халькопиритом-3, соответственно. Псевдоморфный халькопирит-2 замещает колломорфный пирит-1 оболочек труб, который, как правило, обогащен теллуrom. На фронте замещений появляются ангдральные выделения теллуридов (чаще всего колорадоит и гессит). Обычно такое замещение колломорфного пирита халькопиритом-2 обосновывается как диагенетическое (Сафина, Масленников, 2007). Однако на неметаморфизованных месторождениях (например, таких как Яман-Касы) подобные псевдоморфозы не содержат поздних теллуридов (Сафина, Масленников, 2009). Более поздние прожилки халькопирита и теллуридов, ассоциирующие с незначительными, иногда растрескавшимися кристаллами пирита в палеокурильщиках Юбилейного месторождения, распределены закономерно. В курильщиках неметаморфизованных месторождений такие прожилки не встречаются (Масленникова, Масленников, 2007). На некоторых слабо метаморфизованных месторождениях, таких как Молодежное на Южном Урале, прожилки теллуридов встречаются в оболочках труб и, вероятно, являются эпигенетическими (Масленников и др., 2015). Следует заметить, что халькопирит-пирит-сфалеритовые палеокурильщики и биоморфные диффузорные линзы, в которых мало халькопирита, практически не содержат теллуридов.

На Юбилейном месторождении так же, как и на других колчеданных месторождениях Урала, наблюдается увеличение степени преобразования рудокластитов по мере уменьшения крупности обломочного материала (Масленников, 2006; Сафина, Масленников, 2009). Хотя постседиментационные преобразования мелкообломочных отложений проявлены в различной степени, однако

в некоторых слоях доминируют эпигенетические разновидности халькопирита-2 и -3. Например, наиболее сильным преобразованием подвержены пирит-халькопиритовые алевропесчаные турбидиты, где широко развит псевдоморфный халькопирит-2, отсутствуют реликтовые обломки колломорфного пирита-1, гидротермально-го халькопирита-1 и сфалерита-1. В пиритовых зернах пирит-халькопиритовых турбидитов доминируют прожилки халькопирита-3, содержащие теллуриды. Прожилки халькопирита-3 образовались уже после всех разновидностей пирита, включая поздний незоональный пирит-5. Слои пирит-халькопиритовых турбидитов иногда содержат субсогласные прожилки халькопирита-4, в которых теллуриды не встречаются. Этот халькопирит обеднен теллуром и соответствующими микроэлементами. Вероятно, такие прожилки наследуют трещинки кливажа, сформированные на самой низкой стадии зеленокаменного метаморфизма. В целом, существенным отличием сульфидных турбидитов от гидротермальных труб является большое разнообразие минералов теллура. К преобладающим в сульфидных брекчиях и трубах палеокурильщиков микровключениям колорадоита, теллурувисмутита и гессита в пирит-халькопиритовых турбидитах добавляются раклиджит, вольтскит, петцит, алтаит, единичные включения штюцита и калаверита.

Пиритовые конкреции (пирит-4 и-5) и, в меньшей степени, метакристаллы пирита-5, встречающиеся в кремнистых алевропелитах, так же как и обломочные руды, содержат вкрапленность разнообразных теллуридов. Минералы теллура, представленные петцитом, теллурувисмутитом, гесситом, колорадоитом и алтаитом, обнаружены в кайме пирита-5 вместе с самородным золотом и прожилками халькопирита-3, пирротина, сфалерита, галенита. Предполагается, что диагенетическая стадия формирования микрозернистых пиритовых конкреций, сменила стадию гальмиролиза растворения мелких сульфидных рудокластов, вещество которых и послужило для дальнейшего роста пиритовых конкреций (Масленников и др., 2017). В постдиагенетическую стадию конкреции пирита-4, обрастали и замещались пиритом-5, иногда в ассоциации с халькопиритом-3, содержащим теллуриды. Известно, что поздние генерации теллуридов формировались при перекристаллизации руд на стадии метаморфизма в связи с очищением сульфидов от теллура и других элементов-примесей (Викентьев, 2015). Действительно, пирит-5 обеднен теллуром и другими микроэлементами, характерными для теллуридов, за исключением участков, где локализуются включения и прожилки теллуридов.

Как было показано, теллуриды встречаются не во всех сульфидных турбидитах. Предполага-

ется, что это зависит от концентраций теллура и соответствующих микропримесей в сульфидах исходных рудокластов. Одним из важнейших источников теллура в колчеданных рудах могут быть обломки колломорфного пирита-1 – сульфида, наименее устойчивого в морской воде по сравнению с кристаллическими разновидностями пирита (Белогуб, Маляренко, 2006). В наибольшей степени теллуром обогащен колломорфный пирит-1 пирит-халькопиритовых и сфалерит-пирит-халькопиритовых палеокурильщиков, и в меньшей – пирит-1 халькопирит-пирит-сфалеритовых труб. Меньше содержания теллура в пирите-2 – основном минерале рудокластов. Пирит-1 сульфидных биолититов содержит минимальные количества теллура и прочих элементов-примесей. Биоморфные рудокласты, очевидно, являются наименее вероятным источником теллура.

Халькопирит-1 массивных руд аккумулирует в себе значительное количество примеси теллура и мог выступать его потенциальным источником для мелкообломочных отложений. Корреляция Te и Se, характерная для гидротермального халькопирита-1 и сфалерита-1, может свидетельствовать о замещении серы на селен, приводящем к расширению элементарной ячейки и способствующем к вхождению анионов Te в структуру минерала (Урусов, 1987). Содержания теллура в гидротермальном халькопирите-1 уменьшаются в ряду палеокурильщиков от пирит-халькопиритовых разновидностей к халькопирит-пирит-сфалеритовым по мере уменьшения в них относительных содержаний халькопирита и, вероятно, в связи с уменьшением температуры минералообразования.

Псевдоморфный халькопирит-2 сульфидных турбидитов наследует значительные количества как Te, Bi, Au, Ag, так и Co, Ni, As от замещаемого пирита. Высокие концентрации и вариации содержаний теллура, по-видимому, характерны для халькопирита-3, но ввиду мелкого размера выделений анализы ЛА-ИСП-МС по нему не были получены. Появление халькопирита-3, вероятно, фиксирует время максимальных содержаний теллура и прочих элементов в поровых растворах сульфидных турбидитов. Теллуриды в большом количестве отлагались в прожилках халькопирита-3, в халькопиритовом цементе сульфидных турбидитов, часто в ассоциации со сфалеритом-2. Наличие минералов теллура в сегрегационном сфалерите-2 отражено в повышенных, по сравнению с гидротермальным сфалеритом-1, содержаниях теллура и других элементов-примесей. В наиболее позднем халькопирите-4 кварц-халькопиритовых прожилков определены низкие концентрации всех химических элементов, в том числе и теллура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В кластогенных рудах слабометаморфизованного Юбилейного медноколчеданного месторождения выделяются две главных генерации теллуридов – гидротермальная и эпигенетическая. Первая генерация закономерно локализуется в обломках халькопирит-сфалеритовых крустификаций труб палеокурильщиков, богатых халькопиритом. Вторая генерация связана в основном с псевдоморфными и прожилковыми разновидностями халькопирита в рудокластах пирита и в пиритовых конкрециях. Формирование этого халькопирита и эпигенетических теллуридов предшествует стадии динамометаморфизма. В самом позднем динамометаморфическом прожилковом халькопирите теллуриды не встречаются.

2. Не все слои сульфидных турбидитов содержат теллуриды. Предполагается, что источником эпигенетических теллуридов в основном служили рудокласты высоко-среднетемпературных халькопирит-пиритовых массивных руд, труб палеокурильщиков, колломорфный пирит и крустификационный халькопирит которых обогащены теллуридом и соответствующими микроэлементами. Эпигенетические теллуриды чаще всего встречаются в тонкообломочных сильно преобразованных сульфидных турбидитах. Гораздо реже теллуриды встречаются в сульфидных турбидитах, состоящих из фрагментов низкотемпературных пирит-сфалеритовых и сфалерит-пиритовых труб палеокурильщиков, а также из обломков донных гидротермальных корок, сложенных колломорфными и тонкозернистыми разновидностями пирита. Наименее вероятным источником для формирования эпигенетических теллуридов могли служить продукты разрушения сульфидных биолитов, обедненных теллуридом и другими микроэлементами.

3. Предполагается, что источником теллура для формирования эпигенетических теллуридов служили растворяющиеся обломки колломорфного пирита и гидротермального халькопирита пирит-халькопиритовых труб палеокурильщиков. Главными концентраторами теллура в обломочных рудах являются псевдоморфный халькопирит, nasledующий высокие содержания элементов-примесей от замещаемого колломорфного пирита, а также разновидности зернистого пирита, содержащие микровключения теллуридов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят геологов ООО "Башкирская медь" А.Е. Федодеева и М.С. Хасанова за содействие в проведении полевых работ, а также И.А. Блинова, В.А. Котлярова и Ю.Д. Крайнева за выполнение аналитических работ. Авторы

выражают глубокую благодарность рецензенту Плотинской О.Ю. за подробные комментарии и ценные рекомендации, позволившие значительно улучшить рукопись. Полевые работы и минералогические исследования проведены в рамках государственной бюджетной темы Института минералогии УрО РАН. Выполнение ЛА-ИСП-МС анализов и микрокартирование конкреций пирита поддержано грантом РФФИ № 17-05-00854.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемьев Д.А., Масленников В.В., Филиппова К.А.* Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией в минералого-геохимических исследованиях Института минералогии УрО РАН // *Металлогения древних и современных океанов*—2017. Миасс: ИМинУрО РАН, 2017. С. 201–206.
- Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Котляров В.А., Масленникова С.П., Данюшевский Л.В., Ларж Р.* Минералы селена и индия в зоне субмаринного гипергенеза колчеданной залежи Молодежного медно-цинково-колчеданного месторождения, Южный Урал // *ДАН*. 2017. Т. 473, № 2. С. 190–194.
- Белогуб Е.В., Маляренко М.Н.* Экспериментальное изучение влияния структурных особенностей колчеданных руд на кинетику их окисления // *Минералогия техногенеза*—2006. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. С. 224–230.
- Белогуб Е.В., Молошаг В.П., Новоселов К.А., Котляров В.А.* Самородный висмут, цумоит и свинцовистый цумоит из Тарньерского медно-цинково-колчеданного месторождения (Северный Урал) // *Записки РМО*. 2010. Ч. 139, Вып. 6. С. 82–93.
- Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевиц А.М., Гурвич Е.Г.* Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Наука, 2006. 527 с.
- Викентьев И.В.* Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. М.: Научный Мир, 2004. 344 с.
- Викентьев И.В.* Невидимое и микроскопическое золото в пирите: методы исследования и новые данные для колчеданных руд Урала // *Геология руд. месторождений*. 2015. Т. 57. № 4. С. 267–298.
- Викентьев И.В., Саенко А.Г., Карелина Е.В. и др.* Минералогические особенности руд медноколчеданного месторождения Юбилейное (Ю. Урал) // *Вестник РУДН. Инженерные исследования*. 2011. № 1. С. 84–89.
- Геологический словарь. М.: Недра, 1978. 456 с.
- Дергачев А.Л., Сергеева Н.Е., Филицина Т.А.* О рудокластитах на Николаевском колчеданно-полиметаллическом месторождении на рудном Алтае // *Геология руд. месторождений*. 1986. № 1. С. 89–95.
- Еремин Н.И.* Дифференциация вулканогенного сульфидного оруденения. М.: МГУ, 1983. 256 с.
- Еремин Н.И., Сергеева Н.Е., Дергачев А.Л.* Типоморфизм редких минералов колчеданных руд и их геохимический тренд // *Вестник МГУ. Серия 4. Геология*. 2007. № 2. С. 40–48.
- Исмагилов М.И.* Зональность распределения селена и теллура в пирротинсодержащих колчеданных залежах

- Южного Урала // Минералогия и геохимия и генезис полезных ископаемых Южного Урала / под ред. Гаррис М.А. и др. Уфа: БФАН СССР, 1986. С. 50–59.
- Косарев А.М., Серавкин И.Б., Холоднов В.В.* Геодинамические и петролого-геохимические аспекты зональности Магнитогорской колчеданоносной мегазоны на Южном Урале // Литосфера. 2014. № 2. С. 3–25.
- Леин А.Ю., Черкашев Г.А., Ульянов А.А. и др.* Минералогия и геохимия сульфидных руд полей Логачев-2 и Рейнбоу: черты сходства и различия // Геохимия. 2003. № 3. С. 304–328.
- Масленников В.В.* Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданоносных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс: Геотур, 1999. 348 с.
- Масленников В.В.* Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМинУрО РАН, 2006. 384 с.
- Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Артемьев Д.А., Целуйко А.С.* Микротопохимия марказит-пиритовой конкреции в иллит-гематитовых госсанитах медно-цинково-колчеданного месторождения Лаханос (Понтиды, Турция) по данным ЛА-ИСП-МС // Минералогия. 2017. № 3. С. 48–70.
- Масленников В.В., Леин А.Ю., Масленникова С.П., Богданов Ю.А.* Фанерозойские черные “курильщики” как индикаторы состава рудовмещающих комплексов // Литосфера. 2010. № 3. С. 153–162.
- Масленников В.В., Масленникова С.П., Третьяков Г.А. и др.* Блеклые руды в палеозойских “курильщиках” из колчеданных месторождений Урала и Рудного Алтая // Минералогия. 2015. № 4. С. 53–78.
- Масленникова С.П., Масленников В.В.* Сульфидные трубы палеозойских “черных курильщиков” (на примере Урала). Екатеринбург – Миасс: УрО РАН, 2007. 312 с.
- Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение / под ред. В.А. Прокин, Ф.П. Буслаев, М.И. Исмагилов и др. Свердловск: УрО РАН, 1988. 241 с.
- Мелекесцева И.Ю., Котляров В.А., Иванов В.Н. и др.* Руды нового гидротермального сульфидного узла Семенов (13°31' с.ш.), Срединно-Атлантический хребет // Литосфера. 2010. № 2. С. 47–61.
- Молошаг В.П.* Теллуридная минерализация колчеданных месторождений Урала: новые данные // Литосфера. 2011. № 6. С. 91–102.
- Молошаг В.П., Грабежьев А.И., Гуляева Т.Я.* Условия образования теллуридов в колчеданных и медно-золото-порфириновых месторождений Урала // Записки РМО. 2002. Ч. 131, Вып. 5. С. 40–54.
- Муталов М.Г.* О распределении селена и теллура в рудовмещающих сульфидах некоторых месторождений Узельгинского рудного поля // Геохимия. 1977. С. 748–755.
- Пшеничный Г.Н.* Селен и теллур в рудах и минералах Октябрьского медноколчеданного месторождения на Южном Урале // Минералогия, геохимия, метаморфизм и полезные ископаемые Башкирского Зауралья. Уфа: БФАН, 1974. С. 69–74.
- Сафина Н.П., Масленников В.В.* Состав и продукты придонного преобразования обломочных сульфидных отложений в рудных залежах Яман-Касинского и Сафьяновского колчеданных месторождений (Урал) // Литосфера. 2007. № 2. С. 130–140.
- Сафина Н.П., Масленников В.В.* Рудокластиты колчеданных месторождений Яман-Касы и Сафьяновское (Урал). Миасс: УрО РАН, 2009. 260 с.
- Сафина Н.П., Масленников В.В., Масленникова С.П. и др.* Полосчатые сульфидно-магнетитовые руды Мауского медноколчеданного месторождения (Средний Урал): состав и генезис // Геология руд. месторождений. 2015. Т. 57, № 3. С. 221–238.
- Серавкин И.Б.* Корреляция состава руд и рудовмещающих пород в вулканогенных колчеданных месторождениях (на примере Южного Урала) // Геология руд. месторождений. 2013. Т. 55, № 3. С. 238–258.
- Смирнов В.И.* Корреляционные методы при парагенетическом анализе. М.: Недра, 1981. 174 с.
- Урусов В.С.* Теоретическая кристаллохимия. М.: МГУ, 1987. 275 с.
- Шадлун Т.Н.* О колломорфных структурах руд месторождения Яман-Касы на Южном Урале // Записки ВМО. 1942. Ч. 71, № 3/4. С. 151–159.
- Шадлун Т.Н.* Теллуридовисмутит из колчеданной руды Учалинского месторождения (Южный Урал) // Записки ВМО. 1961. Ч. 90, № 3. С. 294–296.
- Целуйко А.С., Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П.* Минеральные и текстурно-структурные особенности рудных фаций Юбилейного медно-колчеданного месторождения (Южный Урал) // Известия вузов. Геология и разведка. 2017. № 4. С. 50–56.
- Юшко С.А.* Методы лабораторного исследования руд. М.: Недра, 1966. 320 с.
- Юшко-Захарова О.Е., Иванов В.В., Воробьева М.С. и др.* Геохимия селена, теллура, висмута в медно-цинково-колчеданных месторождениях Урала и некоторые вопросы колчеданного рудообразования // Геохимия. 1978. № 9. С. 1368–1378.
- Ayupova N.R., Melekestseva I. Yu., Maslennikov V.V. et al.* Uranium accumulation in modern and ancient Fe-oxide sediments: Examples from the Ashadze-2 hydrothermal sulfide field (Mid-Atlantic Ridge) and Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals, Russia) // Sedimentary Geology. 2018. Vol. 367. P. 164–174.
- Berkenbosch H.A., de Ronde C.E.J., Gemmel J.B. et al.* Mineralogy and formation of black smoker chimneys from Brothers submarine volcano, Kermadec arc. // Econ. Geol. 2012. Vol. 107. P. 1613–1633.
- Brueckner S.M., Piercey S.J., Pilote J.L. et al.* Mineralogy and mineral chemistry of the metamorphosed and precious metal-bearing Ming deposit, Canada // Ore Geol. Rev. 2016. Vol. 72. P. 914–939.
- Danyushevsky L., Robinson P., Gilbert S. et al.* Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: Standard development and consideration of matrix effect // Geochim. Explor. Environm. Anal. 2011. Vol. 11. P. 51–60.
- Deditius A.P., Utsunomiya S., Reich M. et al.* Trace metal nanoparticles in pyrite // Ore Geol. Rev. 2011. Vol. 42. P. 32–46.
- Firstova A., Stepanova T., Cherkashov G. et al.* Composition and formation of gabbro-peridotite hosted seafloor massive sulfide deposits from the Ashadze-1 hydrothermal field, Mid-Atlantic ridge // Minerals. 2016. Vol. 6, № 19. P. 1–20.

- Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J. et al.* Geodiversity of hydrothermal processes along the Mid-Atlantic Ridge and ultramafic-hosted mineralization: a new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposit // *Geophysical Monograph Series*. 2010. Vol. 188. P. 321–367.
- Goodfellow W.D., Blaise B.* Sulfide formation and hydrothermal alteration of hemipelagic sediment in Middle Valley, northern Juan de Fuca Ridge // *Canad. Mineral.* 1988. Vol. 26. P. 675–696.
- Hassan L.Y., Roberts M.P.* Tellurides associated with volcanogenic massive sulfide (VMS) mineralization at Yuinmery and Austin, Western Australia // *Ore Geol. Rev.* 2017. Vol. 80. P. 352–362.
- Huston D.L., Sie S.H., Sutter G.F. et al.* Trace elements in sulfide minerals from Eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits. Part I, proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II. Selenium levels in pyrite comparison with δS_{34} values and implication for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems // *Econ. Geol.* 1995. Vol. 90. P. 1167–1196.
- Iizasa K., Yuasa M., Yokota S.* Mineralogy and geochemistry of volcanogenic sulfides from the Myojinsho submarine caldera, the Shichito-Iwojima Ridge, Izu Ogasavara Arc, north-western Pacific // *Marine Geology*. 1992. Vol. 108. P. 39–58.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V.* Study of trace element zonation in vent chimneys from Silurian Yaman-Kasy VHMS (the Southern Urals, Russia) using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS) // *Econ. Geol.* 2009. Vol. 104, № 8. P. 1111–1141.
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Maslennikova S.P. et al.* Mineral and chemical peculiarities of vent chimneys from the Yubileynoye VMS deposit at the Early Devonian basalt-boninite basement of West Magnitogorsk arc, the Southern Urals, Russia // *Proceedings of the 12 SGA Biennial Meeting*. Uppsala, 2013₁. Vol. 4. P. 1512–1515.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R. et al.* Tellurium-bearing minerals in zoned sulfide chimneys from Cu-Zn massive sulfide deposits of the Urals, Russia // *Mineral. and Petrol.* 2013₂. Vol. 107. P. 67–99.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., et al.* Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: mineral and trace element comparison with modern black, gray and clear smokers // *Ore Geol. Rev.* 2017. Vol. 85. P. 64–106.
- Oudin E., Constantinou G.* Black smoker chimney fragments in Cyprus sulfide deposits // *Nature*, 1984. Vol. 308. P. 349–353.
- Revan M.K., Genc Y., Maslennikov V.V. et al.* Original findings on the ore-bearing facies of volcanogenic massive sulphide deposits in the eastern Black Sea region (NE Turkey) // *Bulletin of MTA*. 2013. Vol. 147. P. 73–89.
- Shimazaki H., Horikoshi E.* Black ore chimney from the Hanaoka Kuroko deposits, Japan // *Mining Geology*, 1990. Vol. 40, № 5. P. 313–321.
- Thorpe R.I., Harris D.C.* Mattagamite and tellurantimony, two new telluride minerals from Mattagami Lake Mine, Matagami area, Quebec // *Canad. Mineral.* 1973. Vol. 12. P. 55–60.
- Torokhov M.P., Cherkashev G.A., Stepanova T.V., Zhirnov E.A.* Uranium, its minerals and paragenesis in massive sulfides of the Logachev-2, MAR ore field // *InterRidge News*. 2002. Vol. 11. P. 32–33.
- Wohlegemuth-Ueberwasser C.C., Vijoer F., Petersen S., Vorster C.* Distribution and solubility limits of trace elements in hydrothermal black smoker sulfides: An in-situ LA-ICP-MS study // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2015. Vol. 159. P. 19–41.
- Vikentyev I.V.* Precious metal and telluride mineralogy of large volcanic-hosted sulfide deposit in the Urals // *Mineral. and Petrol.* 2006. Vol. 87. P. 305–326.
- Vikentyev I.V.* Selenium, tellurium and precious metal mineralogy in Uchalinsk copper-zinc-pyritic district, the Urals // *IOP Conf. Series: materials science and engineering*. 2016. Vol. 123. P. 1–6.
- Vikentyev I.V., Belogub E.V., Novoselov K.A., Molo-shag V.P.* Metamorphism of volcanogenic massive sulphide deposits in the Urals. *Ore geology* // *Ore Geol. Rev.* 2017. Vol. 85. P. 30–63.
- Zierenberg R.A., Kostj R.A., Morton J.L., Bouse R.M.* Genesis of massive sulfide deposit on a sediment-covered spreading center, Escanaba trough, Southern Gorda Ridge // *Econ. Geol.* 1993. Vol. 88. P. 67–81.

Tellurium-Bearing Minerals in Clastic ores of Yubileynoe Massive Sulfide Deposit (South Urals)

A.S. Tseluyko^{1,2,*}, V.V. Maslennikov^{1,2}, N.R. Ayupova^{1,2}, S.P. Maslennikova¹, L.V. Danyushevsky³

¹*Institute of Mineralogy, Urals Branch of RAS
Russia, 456317, Miass, Chelyabinsk district, Ilmen State reserve*

²*South Urals State University, Miass branch,
Russia, 456300, Miass, Chelyabinsk district ул. 8 Июля, 10*

³*Centre for Deposit and Exploration Studies, University of Tasmania, Hobart, Australia
E-mail: celyukoa@rambler.ru

received May 10, 2017; revised October 10, 2018; accepted October 11, 2018

At the well preserved Yubileynoe VMS deposit (South Urals), sulfide breccias and turbidites contain abundant tellurides represented by hessite, coloradoite, altaite, volynskite, stutzite, petzite, calaverite as well as phases of intermediate solid solution tellurobismuthite – rucklidgeite. There is three generation of

tellurides were highlighted: 1) primary hydrothermal tellurides in the fragments of chalcopyrite and sphalerite of chalcopyrite-rich black smoker chimneys; 2) authigenic tellurides in pseudomorphic chalcopyrite and veins of chalcopyrite after fragments of colloform and granular pyrite; 3) authigenic tellurides in pyrite nodules. Authigenic tellurides are widespread in pyrite-chalcopyrite turbidites. In sulfide turbidites and gravelites with fragments of sphalerite-pyrite, pyrite-sphalerite paleosmoker chimneys and clasts of colloform and fine-grained seafloor hydrothermal crusts, primary hydrothermal and authigenic tellurides are less common. Siliceous siltstones intercalated with sulfide turbidites contain pyrite nodules, which peripheral parts contain inclusions of epigenetic tellurides. It is assumed that the source of tellurium for authigenic tellurides were fragments of colloform pyrite and hydrothermal chalcopyrite of pyrite-chalcopyrite chimneys, which dissolved during post-sedimentation processes. The main concentrators of tellurium in clastic ores are pseudomorphic chalcopyrite, which inherits high contents of Te, Bi, Au, Ag, Co, Ni, As from the substituted colloform pyrite, and varieties of granular pyrite, containing microinclusions of tellurobismuthite (Bi, Te), petzite (Au, Ag, Te), altaite (Pb, Te), coloradoite and hessite (Ag, Te).

Keywords: tellurides, turbidites, chimneys of paleosmokers, LA-ICP-MS, massive sulfide ores, the Urals.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016-777061239-71>