

УДК 553.85

## МИНЕРАЛОГИЯ, УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И ГЕНЕЗИС АГРЕГАТОВ САМОРОДНЫХ И СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ ПОЛДНЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЕМАНТОИДА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

© 2023 г. В. В. Мурзин<sup>a</sup>, \*, Д. А. Варламов<sup>b</sup>, \*\*, Е. С. Карасева<sup>a</sup>, А. Ю. Кисин<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, ул. Академика Вонсовского, 15, Екатеринбург, 620110 Россия

<sup>b</sup>Институт экспериментальной минералогии РАН, ул. Академика Осипьяна, 4, Черноголовка, 142432 Россия

\*E-mail: murzin@igg.uran.ru

\*\*E-mail: dima@iem.ac.ru

Поступила в редакцию 21.04.2023 г.

После доработки 21.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Описаны полиминеральные агрегаты округлых форм (“желваки”), сложенные самородными и сульфидными минералами Cu, Ni, Fe, Ag и других элементов из жильных магнетит-кальцит-хризотиловых пород с ювелирным демантоидом в Коркодинском гипербазитовом массиве. Общей чертой шести выделенных типов самородно-сульфидных желваков, сложенных самородной медью, хизлевудитом, пентландитом, купритом и другими сульфидно-самородными минералами, является сфероидальная форма, что сближает их с отдельными зернами других минералов жильной массы (кальцит, магнетит и др.). В хизлевудит-пентландитовых желваках обнаружены специфические симплектиты ртутистого серебра и никелистовой меди в хизлевудите, а также аваруита – в Со-пентландите. Совпадающий набор рудных минералов во вмещающем жильную массу серпентините (самородные медь, ртутистое серебро, хизлевудит, пентландит, аваруит) и желваках из жильного материала свидетельствует об их генетической связи и сопряженности демантоидной минерализации с эволюционирующими процессами серпентинизации.

Установлено, что желваки образовались при температуре ниже 380°C в восстановительных условиях при очень низких значениях фугитивности серы ( $10^{-17}$ – $10^{-27}$  бар) и кислорода ( $10^{-30}$  бар при 200°C –  $10^{-21}$  бар при 350°C). Для хизлевудит-пентландитовых желваков такие условия сохранялись в течение всего времени их формирования, в то время как для других желваков восстановительные условия ранних парагенезисов сменялись окислительными в поздних парагенезисах, что фиксируется замещением самородной меди купритом.

Предполагается, что особенности морфологии и строения самородно-сульфидных желваков, присутствие в них симплектитовых срастаний рудных минералов связано со специфическими условиями, создающимися при декомпрессии корово-мантийной смеси, поднимающейся к поверхности в зоне разлома. Источником металлов был глубинный высокотемпературный флюид, взаимодействующий с основными и ультраосновными породами в восстановительных условиях при низком значении отношения вода–порода (W/R).

**Ключевые слова:** демантоид, самородная медь, ртутистое серебро, хизлевудит, аваруит, симплектиты, декомпрессия, корово-мантийная смесь, серпентинизация

**DOI:** 10.31857/S0016777023060060, **EDN:** IBHRUT

### ВВЕДЕНИЕ

Демантоид – самая дорогостоящая разновидность граната андрадита, что позволило У.Р. Филлипсу и А.С. Таланцеву (Phillips, Talantsev, 1996) назвать уральский демантоид “царем в семействе гранатов”. Впервые демантоид открыт и описан в золотоносных россыпях на Среднем Урале в середине 19-го века. В начале 20-го века было открыто Полдневское месторождение демантоида в ультраосновных породах, расположенное в 100 км к

югу от г. Екатеринбурга. Геологоразведочные работы на месторождении были начаты только в 90-х годах прошлого столетия и продолжаются в настоящее время.

Кроме Урала, демантоиды в серпентинитах известны в Италии, Иране, Пакистане, США, Китае, Словакии, на Кавказе и Камчатке (Adamo et al., 2009, 2015; Ahadnejad et al., 2022 и др.). Промышленно значимые месторождения демантоида из-

вестны также в скарнах Намибии и Мадагаскара (Rondeau et al., 2006).

Коренные месторождения демантоида в ультраосновных породах остаются слабоизученными, поскольку исследования обычно направлены только на сам драгоценный камень. Многие вопросы генезиса, места и условий образования демантоида остаются нерешенными, в том числе такие, как поисковые признаки и критерии. Исследования на уральских месторождениях (Полдневском и Коркодинском) показали отсутствие структурного контроля минерализованных жил с демантоидом, что сказывается на эффективности поисковых и геологоразведочных работ (Кисин и др., 2020).

Возможностью решения указанных проблем представляется наличие опытных эксплуатационных карьеров на Полдневском и Коркодинском месторождениях демантоида на Среднем Урале. В этих месторождениях демантоид локализуется в жилах выполнения в серпентинизированных породах и ассоциирует с серпентином, форстеритом, магнетитом, карбонатами, клинохлором. Жилы с этими минералами весьма распространены на месторождении, но демантоид встречается довольно редко. Характерной чертой демантоида Полдневского месторождения, как и в целом демантоида всех других месторождений Урала, является обилие в его зернах волосовидных включений типа “конский хвост”. При детальном исследовании этих “включений” они оказались полыми каналами, образованными в результате специфического роста кристаллов демантоида, механизма которого пока не ясен (Kissin et al., 2021).

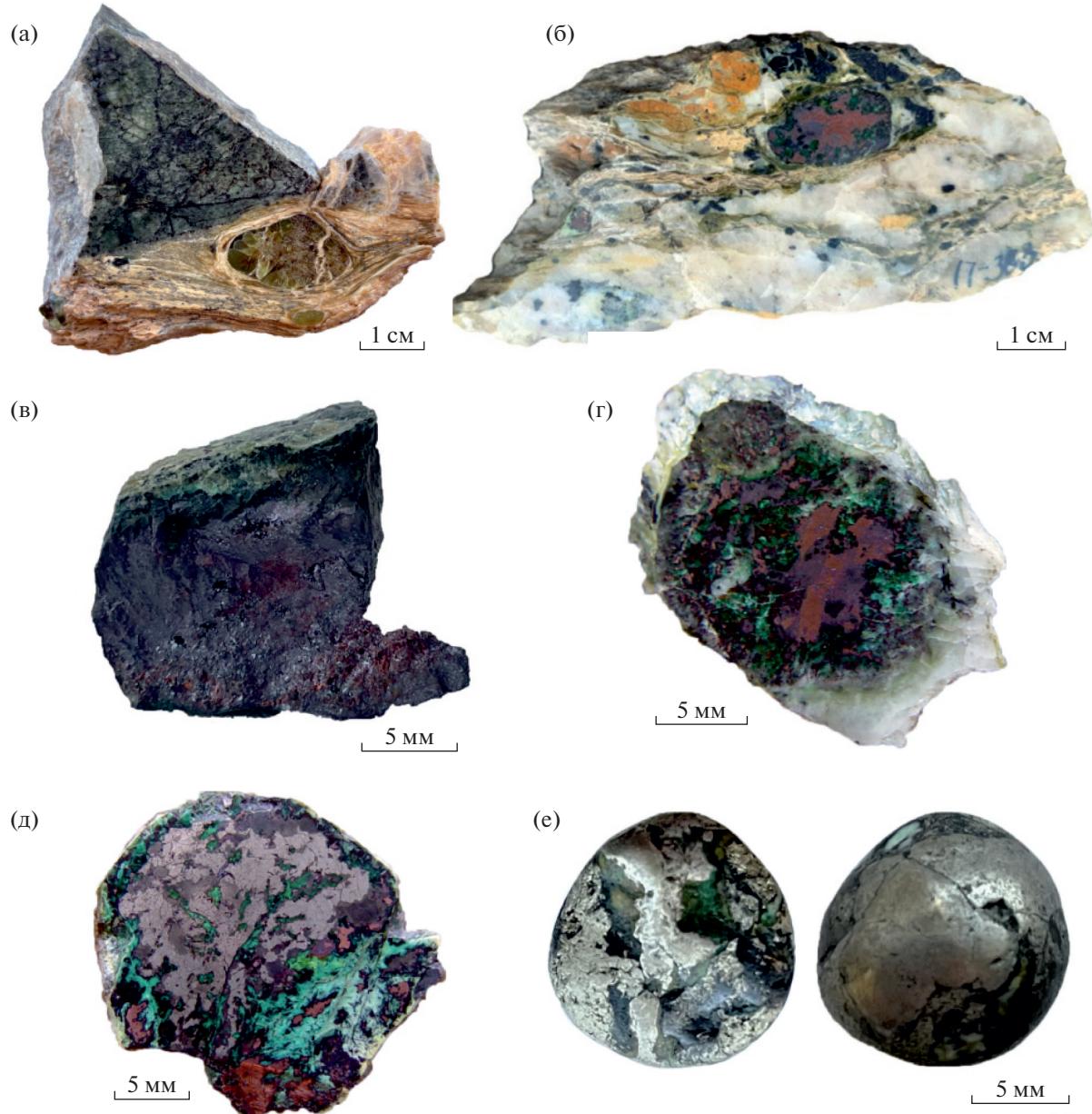
Объектом настоящего исследования стали полиминеральные агрегаты (желваки, стяжения, скопления; далее “желваки”) в жилах выполнения, сложенные самородными и сульфидными минералами меди, никеля, железа и других элементов, нередкоываемые при добывче ювелирного демантоида на Полдневском месторождении. В результате гипергенных процессов породы около желваков обычно окрашены в яркие зеленые цвета за счет образования в них карбонатов и гидрокарбонатов Cu и Ni, что на практике используется в качестве поискового признака жил с демантоидом. Исследование морфологии, строения и минерального состава желваков позволило получить новые данные о генезисе и физико-химических условиях образования как самих желваков, так и ассоциирующего с ними демантоида.

#### *Краткая характеристика Полдневского месторождения демантоида*

Полдневское месторождение демантоида приурочено к Коркодинскому гипербазитовому массиву, описание которого приводится по (Калугин-

и др., 2017). Протяженность массива около 12 км при ширине до 2 км; вытянут в север-северо-западном направлении согласно простиранию вмещающего одноименного дизьюнктивного нарушения зоны Главного Уральского разлома (ГУР). В строении массива принимают участие дуниты и клинопироксениты, реже гарцбургиты, иногда – верлиты и вебстериты. Породы серпентинизированы и тектонизированы. В ассоциации с ультрабазитами отмечены эклогитоподобные амфиболиты. Считается, что Коркодинский массив представлен пластиной толщиной 200–300 м, полого залегающей на нижнепалеозойских породах и перемещенной на запад в составе более крупного надвига. Лежачий контакт пластины падает под углом 45°–50°, а висячий – 20°–70° на восток.

Месторождение вскрыто небольшими карьераами-траншеями (протяженностью до 150 м, при ширине 3–5 м и глубиной до 20 м в интервалах с демантоидной минерализацией) и несколькими магистральными канавами протяженностью до 400 м, вскрывших в различной степени серпентинизированные дуниты и клинопироксениты. На месторождении выявлено 7 крупных (до 200 м протяженностью, при ширине 0.5–4.5 м) и около 20 небольших субмеридиональных линейных зон повышенной трещиноватости (зоны разуплотнения). В плане они сближенные, кулисообразные, слабоизвилистые, субпараллельные; падение субвертикальное, ±30°. Зоны разуплотнения обычно представлены многочисленными, различно ориентированными жилами выполнения декомпрессионных трещин, с околовильной серпентинизацией вмещающих пород (дунитов и клинопироксенитов). Жилы выполнения сложены минералами серпентина (антигорит, клинохризотил, лизардит) и кальцитом. Мощность измеряется первыми сантиметрами и редко достигает 10–20 см. Структура жил волокнистая, грубоволокнистая, шестоватая, столбчатая, с линейностью, ориентированной под углом к границам с вмещающими породами. Обычно присутствуют кристаллы магнетита, вытянутые согласно линейности. Только к единичным жилам приурочена минерализация демантоида. Форма жил линзовидная; по простиранию прослеживаются на 1.5–2.5 м, при мощности 2–3 см, редко до 10–15 см и крутом падении. По простиранию жил проводники (трещины, прожилки) отсутствуют, по падению они прослежены выработками на глубину до 20 м, со смещением в ту или иную сторону (рудные столбы). Минеральный состав жил с демантоидом не отличается от жил без демантоида. В жилах демантоид распределен неравномерно и образует гнездообразные скопления. По результатам полевых исследований выяснено, что минерализация демантоида не имеет структурного контроля, встречается и за пределами зон разуплотнения и, по сути, слагает рудные столбы



**Фиг. 1.** Морфология и строение желваков демантOIDа (а) и самородно-сульфидных (б) в серпентин-кальцитовой породе и извлеченных из породы желваков III (в), IV (г), V (д) и VI (е) типов.

(Кисин и др., 2020; Карасева и др., 2021). Особенno наглядно это проявленo на Коркодинском месторождении, в 7 км к югу, где зоны разуплотнения отсутствуют и жилы с демантOIDной минерализацией одиночные, не связанные между собой и прослеживаются только по падению. Это обстоятельство сильно осложняет про- ведение геологоразведочных и добычных работ.

ДемантOID имеет округлую форму и радиально-секториальное строение. Такую же форму имеют и изученные нами рудные желваки, а также некоторые зерна карбонатов и магнетита (фиг. 1а, б). Минералы серпентина (клинохризотил, лизардит, ан-

тигорит), вмещающие демантOID, представлены вытянутыми, волокнистыми или шестоватыми агрегатами, ориентированными согласно вектору раскрытия вмещающих трещин растяжения. Зерна минералов в минерализованных зонах обычно не деформированы и несут признаки роста в условиях всестороннего растяжения и декомпрессии (Карасева и др., 2021).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы рудных желваков для исследований предоставлены геологами ООО Корпорация

“Маяк”, выполнившими геологоразведочные работы на Полдневском месторождении демантоида. Всего исследовано более 10 образцов рудных желваков, размерами от 5 мм до 5 см, в т. ч. в полированных шлифах и аншлифах. Минеральный состав желваков и химический состав слагающих их минералов предварительно изучался методами оптической микроскопии, затем – растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа.

Электронно-зондовый микроанализ, включающий получение изображений исследуемых объектов во вторичных (secondary) и отраженных (обратно-рассеянных, back-scattered) электронах, а также рентгеноспектральный локальный микроанализ, выполнялся в ИЭМ РАН на цифровом электронном сканирующем микроскопе Tescan VEGA-II XMU с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 и спектрометром с волновой дисперсией Oxford INCA Wave 700. Расчеты результатов рентгеноспектрального микроанализа выполнялись с помощью программы INCA Energy 300. Исследования выполнялись при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе поглощенных электронов на образцах – от 150 до 400 пикоампер (в зависимости от микрорельефа, структуры и состава образца). Размер электронного зонда на поверхности образца составлял 157–180 нм. Аналитические линии и стандарты:  $\text{FeK}_\alpha$ ,  $\text{CoK}_\alpha$ ,  $\text{NiK}_\alpha$ ,  $\text{CuK}_\alpha$ ,  $\text{ZnK}_\alpha$ ,  $\text{MnK}_\alpha$ ,  $\text{TiK}_\alpha$ ,  $\text{AgL}_\alpha$ ,  $\text{AuM}_\alpha$  (металлы);  $\text{SK}_\alpha$  ( $\text{FeS}_2$  синт.);  $\text{HgM}_\alpha$  ( $\text{HgTe}$  синт.);  $\text{OK}_\alpha$  ( $\text{SiO}_2$ ). Кислород рассчитывался, как правило, по стехиометрии, для проверки (при варьирующей валентности – гематит, куприт) использовалось прямое измерение кислорода.

## ТИПЫ РУДНЫХ ЖЕЛВАКОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

По особенностям строения и минерального состава желваков выделены шесть типов (табл. 1). Желваки всех типов приурочены к жильному материалу. Первые два типа имеют микроскопические размеры, округлую или овальную форму и строение, характерное для жеод, т.е. с полостью в центральной части и радиальными микротрецинами, отходящими от полости к поверхности зерен. Размер их обычно не превышает 1–2 мм. Остальные типы желваков более крупные (от 2–3 до первых сантиметров) и характеризуются разнообразием форм: от округлой до линзовидной (фиг. 1в–е).

### *Микрожеоды магнетита (I тип)*

Обнаружены в жильной массе, сложенной хризотилом, карбонатом, магнетитом, демантоидом и другими минералами. Полости в микрожеодах выполнены кальцитом, насыщенным угловатыми

включениями самородной меди и халькозина (фиг. 2а, б). Краевая часть полости, примыкающая к магнетиту, сложена самородной медью и небольшим количеством халькозина и Fe–Mg карбоната, проникающими и в радиальные микротрецины в магнетите.

### *Микрожеоды брусита (II тип)*

Обнаружены в серпентин-бруситовых прожилках тонкопластинчатого строения, рассекающих серпентинит, примыкающий к жилам с демантоидом. В центральной части полостей находится самородная медь в срастании с кальцитом, которые также выполняют радиальные микротрецины в брусите (фиг. 2в). В виде мелких включений (иногда ограненных) в самородной меди присутствуют халькозин и Cu-хизлевудит. Выделения самородной меди замещаются в краевых частях купритом (фиг. 2г).

### *Желваки гематита с самородной медью и купритом (III тип)*

Желваки этого типа, как и все другие, встречаются в жилах с демантоидной минерализацией; сложены тонкозернистыми карбонат-гематитовыми блоками, скементированными самородной медью (фиг. 3а). Самородная медь местами рассекает кальцит-гематитовый агрегат в виде микропрожилков. Тонкозернистая масса представлена смесью кристаллов гематита, заключенных в карбонате (кальцит, Fe–Cu карбонат), и ксеноморфных мелких выделений самородной меди, халькозина, куприта (фиг. 3б). Куприт образуется по меди, начиная с краевых частей ее выделений и развиваясь внутрь (фиг. 3в). В виде мелких включений в самородной меди присутствуют Hg-серебро, пентландит (Со до 2 мас. %: Си до 8 мас. %), куприт (фиг. 3г), а также борнитовый твердый раствор. Развиты вторичные Cu–Fe и Cu–Ni карбонаты и гидрокарбонаты меди, в том числе малахит.

### *Желваки куприта с самородной медью (IV тип)*

Центральная часть желваков этого типа выполнена самородной медью с активно развивающимися по ней купритом и вторичными оксидными (гематит, тенорит), карбонатными (малахит, азурит) и силикатными (хризоколла) преимущественно медными минералами, формирующими оболочки желваков (фиг. 4а). В отдельных желваках куприт преобладает, а реликтовые выделения самородной меди в нем развиты незначительно.

В виде включений в куприте присутствуют халькозин, а также отдельные кристаллы или цепочки зерен угловатых форм медьсодержащего серебра (фиг. 4б). Купритовая масса содержит

**Таблица 1.** Типы “желваков” Польдневского месторождения демантоида

Типы желваков (№ образцов)	Основные минералы	Аксессорные минералы	Ассоциации и парагенезисы минералов в желваке
I. Микрохеоды магнетита (1808-1)	Магнетит, карбонаты (кальцит и др.), самородная медь	Халькозин	Магнетит → халькозин + самородная медь → кальцит + Fe–Mg-карбонат
II. Микрохеоды бруссита (1808-1)	Брусит, кальцит, самородная медь, куприт	Халькозин, Cu-хизлевудит	Брусит → кальцит + самородная медь + халькозин + медистый хизлевудит $(\text{Cu}, \text{Ni})_3\text{S}_2$ → куприт
III. Желваки гематита с самородной медью и купритом (1811)	Кальцит, гематит, самородная медь	Халькозин, Cu–Co-пентландит, Cu–Fe–S борнитовый твердый раствор, Hg-серебро	Гематит + кальцит + халькозин → → самородная медь + Cu–Co-пентландит + борнитовый твердый раствор (Cu–Fe–S) + Hg-серебро → куприт → → малахит (карбонаты меди)
IV. Желваки куприта с самородной медью (Р-305, 309)	Куприт, самородная медь	Халькозин, медистое серебро	Самородная медь → куприт + (?) халькозин + медистое серебро → гематит + + тенорит → малахит, азурит, хризоколла
V. Желваки хизлевудита с Co-пентландитом и самородной медью (Р-306)	Хизлевудит, Co-пентландит, самородная медь	Ртутистое серебро, никелистая и золотистая медь	Хизлевудит I + Co-пентландит I + + самородная медь → медистый хизлевудит II $(\text{Ni}, \text{Cu})_3\text{S}_2$ + пентландит II + куприт + ртутистое серебро + + никелистая медь + золотистая медь → малахит (карбонаты меди)
VI. Желваки хизлевудита и Co-пентландита с симплектитами (Р-320)	Хизлевудит, Co-пентландит, аварийт	Ртутистое серебро, никелистая медь, обогащенный медью хизлевудит	Хизлевудит + никелистая медь (симплектитовые вrostки) + ртутистое серебро (симплектиты в хизлевудите) → Co-пентландит + аварийт (симплектитовые вrostки и каймы) + медистый аварийт (по никелистой меди) + серебро → кальцит и Cu–Ni карбонаты

Примечание. Номера образцов соответствуют номерам проб в таблицах химического состава минералов.

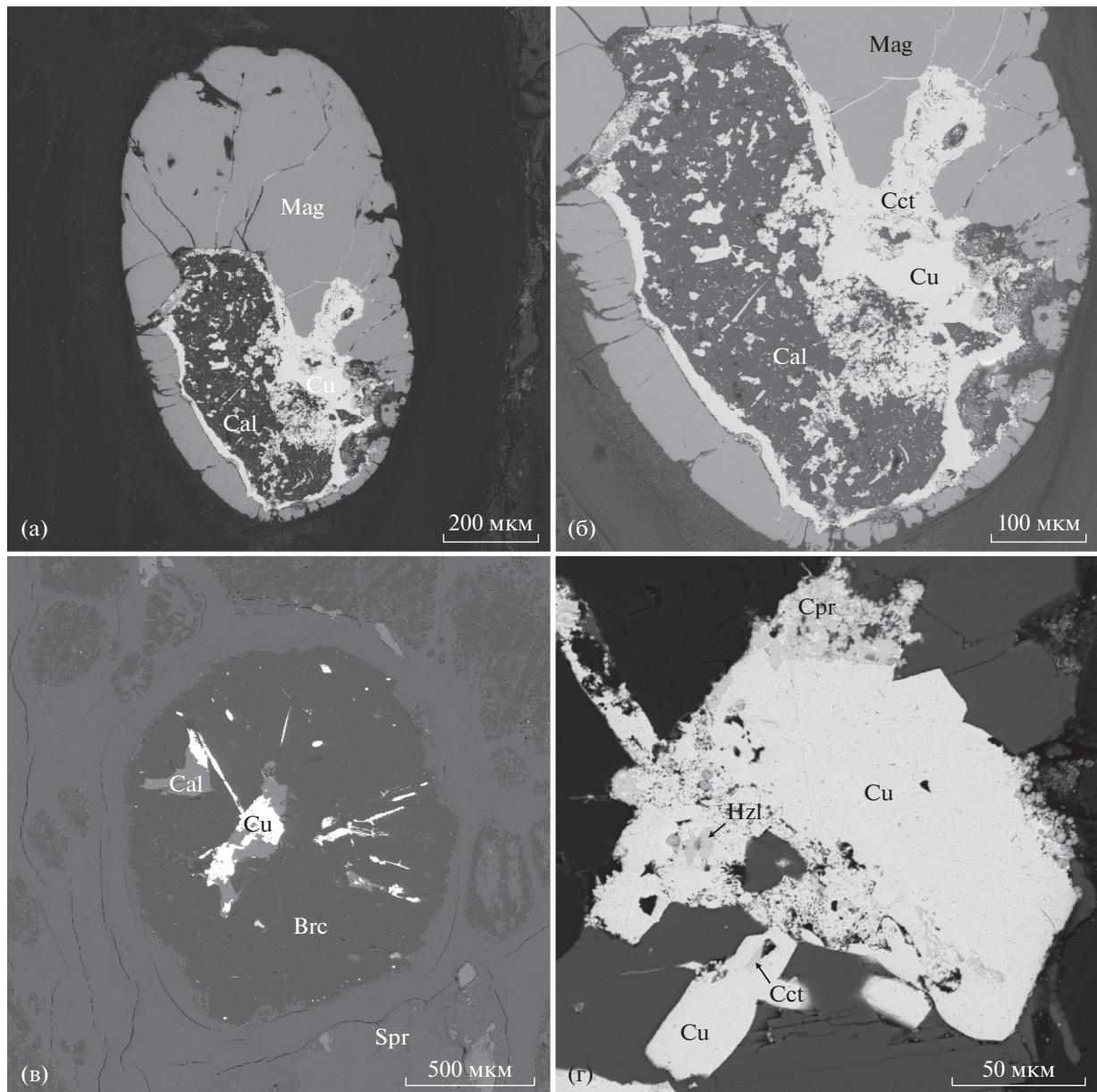
микрополости или разбита трещинами, стенки которых инкрустированы кристаллами куприта (фиг. 4в), а сами полости выполнены вторичными карбонатами меди (малахитом) и Fe–Cu–Mg силикатами, замещающими куприт (фиг. 4г).

#### *Желваки хизлевудита с Co-пентландитом и самородной медью (V тип)*

Преобладающие рудные минералы желваков V типа представлены хизлевудитом и Co-пентландитом раннего и позднего парагенезисов. Крупные зерна этих сульфидов раннего парагенезиса монолитны. Характерная черта раннего хизлевудита I – наличие в некоторых его участках тонких пластинок, отвечающих медистому хизлевудиту  $(\text{Ni}, \text{Cu})_3\text{S}_2$  (фиг. 5а; фиг. 6б). Такие участки сходны с решетчатой структурой распада твердого раствора, а фазы с широким изоморфизмом Cu и Ni предложено называть “полуторными” (Маке-

ев и др., 1992). Ранние хизлевудит I и Co-пентландит I местами насыщены субграфическими симплектитовыми образованиями, представленными полостями, образованными при выщелачивании неизвестного минерала и затем заполненными вторичными Cu–Ni карбонатами (фиг. 5б). Составы Co-пентландита I в хизлевудите с симплектитами и без симплектитов не различаются.

К позднему парагенезису хизлевудита II и пентландита II относятся тонкозернистые агрегаты этих минералов, приуроченные к краевым частям желвака, а также к гнездово-прожилковым выделениям Mg–Ni–Cu карбонатов в хизлевудите I раннего парагенезиса (фиг. 5в). Хизлевудит в этих агрегатах представлен густой вкрапленностью в пентландите (фиг. 5г). По химическому составу хизлевудит II – медистый, отвечающий со-

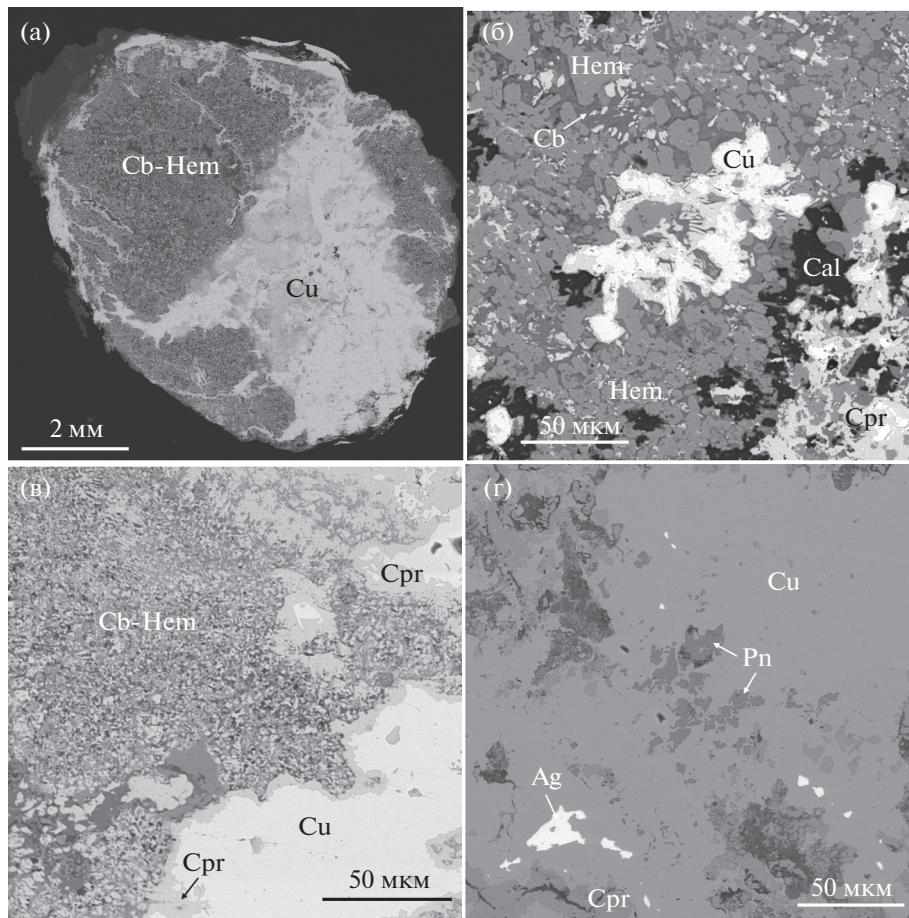


**Фиг. 2.** Строение и минералы микрояеод I (а, б) и II (в, г) типов; а, б – округлое выделение магнетита (Mag) с полостью, выполненной кальцитом (Cal) и самородной медью (Cu); б – деталь “а”, в краевой части полости локализуются мелкие зерна халькозина (Cct); в – микрояеода брусиата (Brc) с самородной медью (Cu) и кальцитом (Cal) из серпентин (Spr)-бруситового прожилка в антигоритовом серпентините; г – деталь “в”, выделение меди содержит вrostки халькозина (Cct), Cu-хизлевудита (Hzl), а в краевых частях – куприта (Cpr). (Здесь и далее изображение микрофото приведено в BSE, если не оговорено другое).

ставам пластинчатых “полуторных фаз” в его раннем парагенезисе.

Крупные зерна самородной меди в желваках V типа отнесены к раннему парагенезису. Они приурочены к краевым частям желваков и локализуются, как правило, в нерудных минералах. Для таких зерен меди характерно замещение их купритом, а также беспримесный химический состав.

Аксессорные минералы в желваках V типа – ртутьстое серебро, никелистая и золотистая медь обычно ассоциируют с купритом и относятся к более позднему парагенезису минералов по отношению к сульфидам. Минералы этого парагенезиса заполняют трещиноватые участки и межзерновое пространство сульфидных агрегатов (фиг. 6а). На эти же участки накладываются наиболее поздние гипергенные минералы, прежде всего Cu–Ni карбонаты.



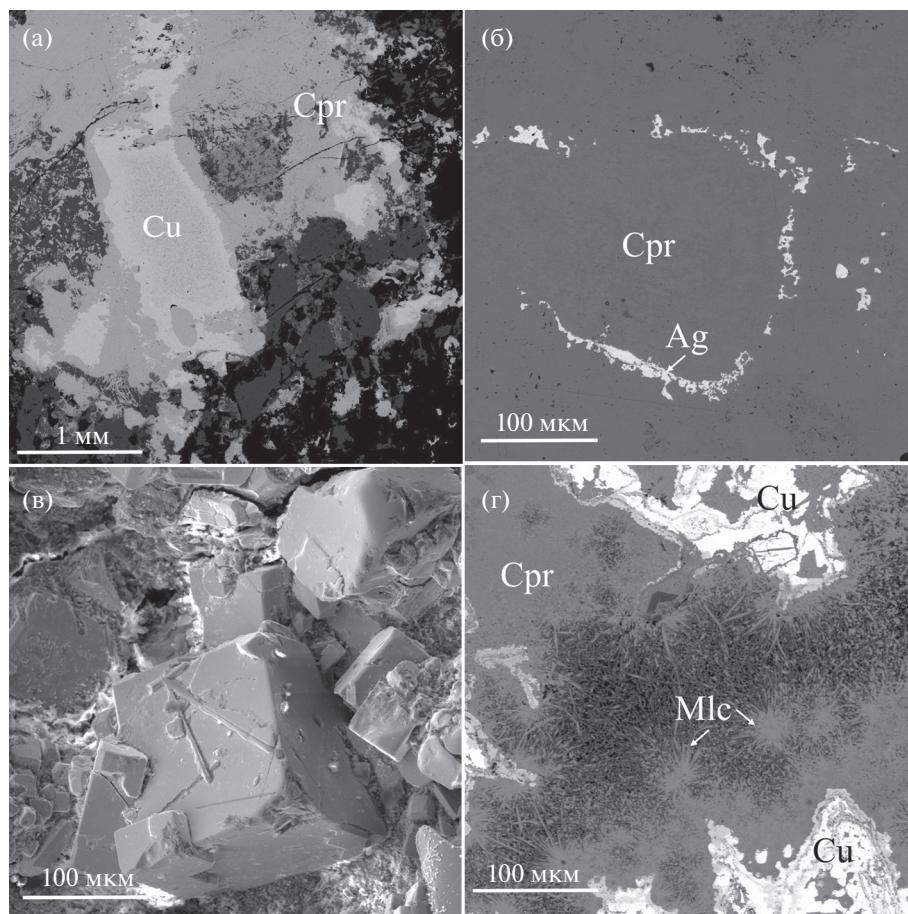
**Фиг. 3.** Строение желваков III типа и слагающие их минералы: а – блоки тонкозернистого агрегата карбонат-гематитового состава (Cb-Hem), сцепментированные самородной медью (Cu); б – агрегат кальцита (Cal), Fe-Cu карбоната (Cb) и гематита (Hem), насыщенного мелкими включениями самородной меди (Cu) и куприта (Cpr); в – развитие куприта (Cpr) по самородной меди (Cu), заключенной в карбонат-гематитовом агрегате (Cb-Hem); г – угловые включения Cu-Co-пентландита (Pn), куприта (Cpr) и ртутистого серебра (Ag) в крупном выделении самородной меди (Cu).

Зерна ртутистого серебра имеют неправильные интерстициальные формы и размеры до 200 мкм. Они могут быть заключены как в хизлевудите, так и Со-пентландите (см. фиг. 5б), однако часто цепочки зерен серебра приурочены к контактам этих минералов, иногда в секущих их прожилковидных зонах совместно с Cu–Ni карбонатами (фиг. 6а). В некоторых зернах серебра обнаруживается негомогенность, обусловленная большими вариациями содержаний ртути. Фазы с умеренными содержаниями ртути слагают центральную часть зерен. В расслоенной кайме присутствуют фазы с наиболее высоким содержанием ртути (26.7 мас. % Hg) и краевой фазы, не содержащей ртуть (фиг. 6б).

Медь позднего парагенезиса, в отличие от беспримесной меди раннего парагенезиса, является никелистой (4–8 мас. % Ni). Ее выделения заключены в купrite (фиг. 6в) и иногда вместе с купритом и Cu–Ni карбонатами выполняют центральную часть зональных прожилков, секущих хизлевудит (см. фиг. 6а). В прожилке анало-

гичного состава встречены единичные зерна меди с высоким содержанием не только никеля (2.68–4.95 мас. % Ni, 4 анализа), но и золота (15–17.8 мас. % Au, 4 анализа).

Никелисто-золотистая медь слагает центральную часть весьма специфических зональных зерен (фиг. 6г). Краевая их часть сложена чередующимися концентрическими зонами золотосодержащего куприта и Au–Ni–Cu кислородсодержащих фаз, предположительно карбонатных. Контакты карбонатных (?) фаз как с никелисто-золотистой медью, так и с золотосодержащим купритом, сильно извилистые (коррозионные), что может трактоваться как замещение карбонатами куприта, который в свою очередь замещает никелисто-золотистую медь. Химический состав золотосодержащих минеральных фаз приведен в табл. 2. В купrite, замещающем золотистую медь, наблюдается значительный разброс содержаний примеси золота (от 0.15 до 12.45 мас. %), который еще более существенен в Cu–Ni карбонатах (6.29–23.25 мас. %).



**Фиг. 4.** Строение желваков IV типа и слагающие их минералы: а – выделения самородной меди (Cu), замещающейся купритом (Cpr) в обрамлении агрегата зерен кальцита и вторичных малахита, тенорита, гематита и других минералов; б – цепочки зерен медистого серебра (Ag) в куприте (Cpr); в – кубические кристаллы куприта в прожилке вторичных медных минералов (изображение дано в режиме SE); г – замещение куприта (Cpr) агрегатом игольчатого малахита (Mlc) и Fe–Cu–Mg силикатов, в куприте присутствуют реликты самородной меди (Cu) мелочайших частиц.

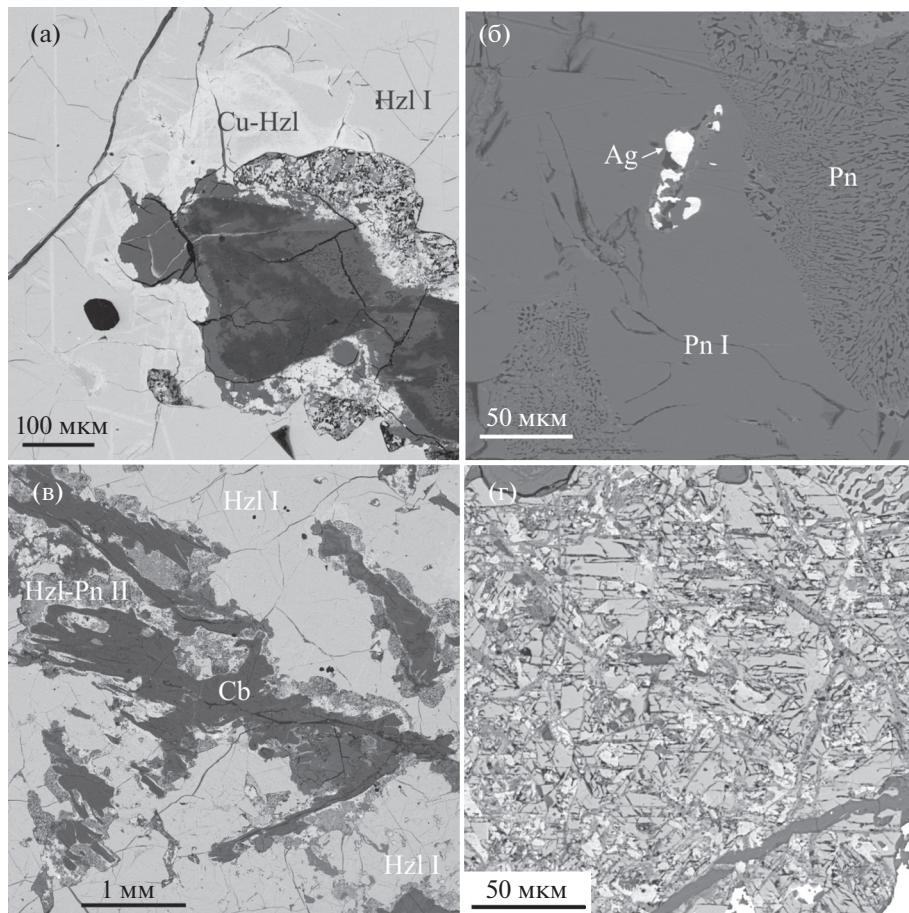
Учитывая данный факт, а также то, что вхождение золота в куприт или карбонат ранее не фиксировалось, мы полагаем, что золото в оксидной и карбонатной фазах присутствует в виде собственных мельчайших частиц, размером значительно меньше электронного микрозонда.

#### Желваки хизлевудита и Со-пентландита с симплектитами (VI тип)

Желвак этого типа встречен в единственном числе. Он имеет форму выпуклого кабошона размером 1 см: одна сторона представлена полусферой, другая неровная (см. фиг. 1e). В поперечном и продольном срезах установлено, что желвак сложен блоками субграфического (симплектитового) агрегата хизлевудита и никелистой меди. В краевых частях блоков в направлении к их контактам наблюдается укрупнение зерен этого агрегата, а сам контакт трассируется полостями, выполнеными вторичными гипергенными минералами

(фиг. 7а). В хизлевудитовой матричной фазе местами присутствуют тонкие пластинчатые выделения медистого хизлевудита (“полуторной фазы”), аналогичные вышеописанным в желваках IV типа, а также небольшие участки, сложенные симплектитовыми срастаниями хизлевудита и ртутистого серебра (фиг. 7б).

К приконтактовым частям блоков приурочены агрегаты зерен Со-пентландита с тонкими симплектитовыми вrostками аваруита и сопряженные с ним пустоты, выполненные кальцитом и вторичными Cu–Ni карбонатами (см. фиг. 7а). Со-пентландит-аваруитовый агрегат развивается по хизлевудиту с симплектитовыми вростками никелистой меди. Симплектиты никелистой меди при этом замещаются медистым аваруитом (фиг. 7в). Среди пентландит-аваруитовых симплектитов обнаружено овальное полиминеральное включение, сложенное ртутистым серебром с заключенными в нем кристалликами никелистой меди, медистым аваруитом и карбонатом (фиг. 7г).



**Фиг. 5.** Строение и минералы желваков IV типа: а – пластинки медистого хизлевудита (полуторная фаза) (Cu-HzI) в раннем хизлевудите (HzI I); б – участки раннего пентландита (PnI) монолитного и субграфического строения (Pn), в монолитном пентландите заключены зерна ртутистого серебра (Ag); в – тонкозернистый агрегат поздних хизлевудита и пентландита (HzI-Pn II), приуроченного к прожилковым выделениям Mg–Ni–Cu карбонатов (Cb) в раннем хизлевудите I (HzI I); г – тонкозернистый агрегат поздних хизлевудита (серый) и пентландита (белый).

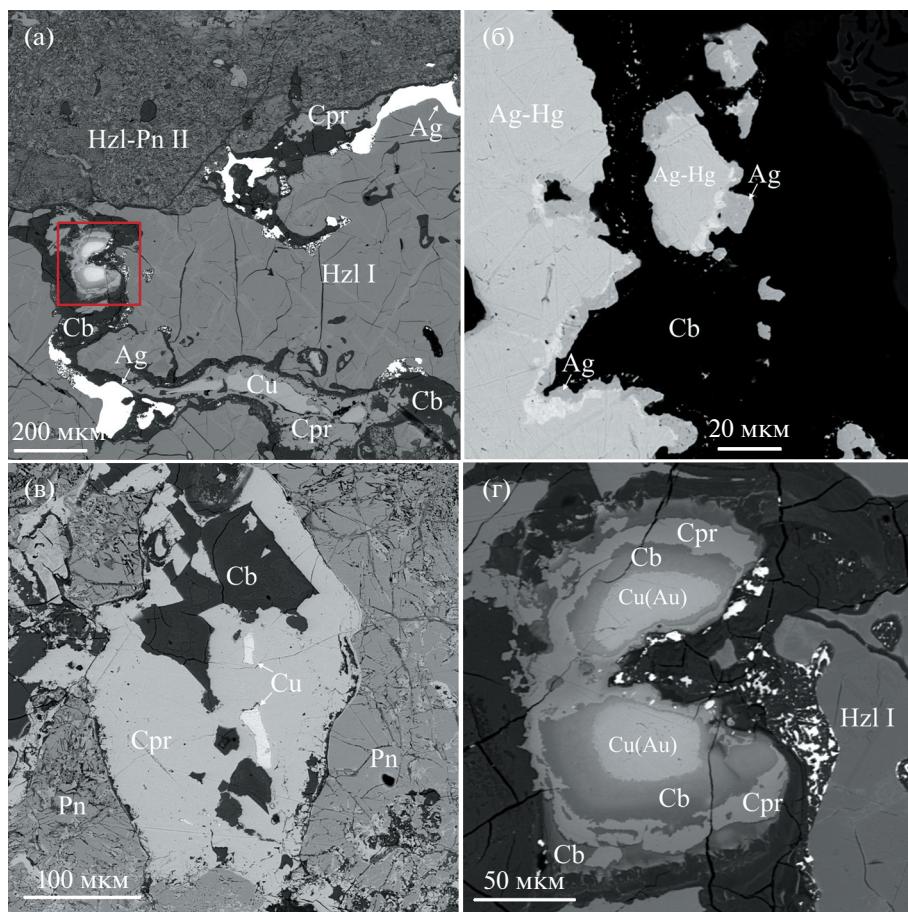
В краевой части желвака присутствует также блок хизлевудита монолитного строения. В этом блоке локализуются угловатые включения низкортутистого серебра (5–6 мас. % Hg), участками в составе симплектитовых срастаний с хизлевудитом (фиг. 7д). В монолитном хизлевудите присутствуют также редкие округлые выделения, сложенные Со-пентландитом с эмульсионной субграфической вкрапленностью аваруита (симплектитами) (фиг. 7е). Эти выделения обрастают каймой аваруита или пентландит-аваруитовыми шестоватыми агрегатами. Химический состав хизлевудита с симплектитами никелистой меди и монолитного близок к стехиометрическому с суммарными содержаниями примесей Fe, Со и Си не превышающими 1 мас. %.

#### Особенности химического состава рудных минералов, слагающих желваки

**Хизлевудит.** Встречен и изучен в желваках II, V и VI типов. По химическому составу в желваках

выделены две разновидности хизлевудита – собственно никелевый и медистый. Собственно никелевый хизлевудит слагает участки различного строения – монолитного, с симплектитами никелистой меди, с симплектитами ртутистого серебра, в виде мелких линзочек в Со-пентландите. В целом для хизлевудита в участках различного строения характерны относительно низкие содержания примесных элементов (Fe, Со, Cu), не превышающие суммарно 1 мас. % (табл. 3, ан. 1-22). В то же время хизлевудит в Со-пентландите относительно других составов обогащен железом (2.2–2.5 мас. % Fe), а хизлевудит с симплектитами никелистой меди несколько обогащен медью (0.4–0.8 мас. % Cu). Вариации отношения металлы–серы (Me : S, ат. %) в хизлевудите, по результатам приведенных в табл. 3 анализов, находятся в диапазоне 1.46–1.54, лишь немного отклоняясь от стехиометрического значения 1.5.

Медистый хизлевудит в желваках II, V и VI типов, отнесенный нами к полуторным фазам



**Фиг. 6.** Ртутистое серебро, никелистая и никелисто-золотистая медь в желваке V типа: а – зона контакта раннего хизлевудита (Hzl I) с пластинками полуторной фазы (Cu–Pn) и позднего тонкозернистого хизлевудит-пентландитового агрегата (Hzl-Pn II). В зоне контакта, а также в секущем хизлевудите I карбонатном (Cb) прожилке локализуются зерна самородного серебра (Ag), никелистой и золотистой меди (Cu), куприта (Cpr); б – зональные выделения ртутистого серебра (Ag), заключенные в Ni–Cu карбонате (Cb), повышение интенсивности окраски соответствует увеличению содержаний ртути в Ag–Hg сплаве; в – вростки никелистой меди (Cu) и Ni–Cu карбонатов (Cb) в куприте (Cpr), заключенном в массе Со-пентландита (Pn); г – деталь “а”, зональные зерна никелисто-золотистой меди Cu(Au), замещающейся “золотосодержащими” купритом (Cpr) и карбонатом (Cb). Зерна меди заключены в Ni–Cu карбонате (черное) с рассеянными в нем частицами ртутистого серебра (белое).

( $\text{Ni}, \text{Cu}$ )<sub>3</sub>S<sub>2</sub>, слагает тонкие пластинки в обычном матричном хизлевудите ранних парагенезисов или образует вкрапленность в Со-пентландите позднего парагенезиса в желваке VI типа. Включение аналогичного состава встречено также в самородной меди микроЖелвака II типа в бруслите. В медистом хизлевудите фиксируется широкий изоморфизм никеля (31.9–59.5 мас. % Ni) и меди (14.1–39.5 мас. % Cu) (табл. 3, ан. 23–34). Для включений медистого хизлевудита в Со-пентландите характерны более высокие содержания примесей Fe и Co (2.5–3.8 мас. % Fe, 0.3–0.7 мас. % Co), чем в пластинках в обычном хизлевудите (до 0.9 мас. % Fe, до 0.2 мас. % Co). Вариации значений (Me : S, ат. %) в медистом хизлевудите шире (1.37–1.69), чем в обычном.

**Пентландит ( $\text{Fe}, \text{Ni}$ )<sub>9</sub>S<sub>8</sub>.** Присутствует в желваках III, V и VI типов. Во всех типах желваков этот

минерал характеризуется повышенными содержаниями примесей Co (до 20.5 мас. %), являясь промежуточным членом изоморфного ряда его с кобальтпентландитом  $\text{Co}_9\text{S}_8$  (табл. 4). Менее значима в пентландите примесь Cu (обычно менее 1 мас. %, до 8 мас. %), при этом корреляция меди с другими элементами в составе пентландита отчетливо не проявлена.

Низкие содержания кобальта (1.4–2.1 мас. % Co), уступающего в количественном отношении примеси меди (2.9–8 мас. % Cu), характерны для пентландита в парагенезисе с самородными медью и Hg-серебром в желваках III типа (табл. 4, ан. 1–3). Другая особенность этого пентландита – преобладание примеси железа над никелем ( $\text{Ni}/\text{Fe} = 0.56$ –0.59), что отличает его от этого минерала в желваках других типов ( $\text{Ni}/\text{Fe} = 1.00$ –1.38).

**Таблица 2.** Химический состав золотосодержащих минеральных фаз из позднего парагенезиса желвака V типа, мас. %

№ обр./№ ан.	O	Ni	Cu	Ag	Au	Hg	Total
(Cu.Au.Ni) твердый раствор							
P-306/109	H.o.	2.84	78.91	0.00	17.52	0.95	100.22
P-306/110	H.o.	4.95	81.15	0.25	14.99	0.00	101.34
P-306/111	H.o.	2.68	80.49	0.04	17.78	0.43	101.42
P-306/112	H.o.	3.46	79.87	0.31	15.22	0.81	99.67
Куприт							
P-306/117	8.87	1.15	77.23	H.o.	11.12	H.o.	98.37
P-306/118	9.93	1.87	83.55	0.33	4.98	H.o.	100.66
P-306/119	9.33	1.44	76.82	1.15	7.70	H.o.	96.44
P-306/120	10.32	1.29	85.97	0.19	0.76	H.o.	98.53
P-306/121	9.60	2.07	82.93	0.65	4.40	H.o.	99.65
P-306/148	7.73	2.89	84.03	H.o.	4.54	H.o.	99.19
P-306/149	6.81	1.33	80.59	H.o.	9.75	H.o.	98.48
P-306/154	7.23	1.52	74.75	1.41	12.45	H.o.	97.36
P-306/158	9.39	1.24	88.51	H.o.	0.15	H.o.	99.29
Cu–Ni-карбонат							
P-306/113	16.20	8.98	44.12	2.23	22.05	H.o.	93.58
P-306/114	20.45	14.14	34.63	2.05	18.05	H.o.	89.32
P-306/115	20.63	12.76	34.83	1.74	15.96	H.o.	85.92
P-306/116	21.80	1.78	55.54	1.81	13.79	H.o.	94.72
P-306/122	24.21	18.00	30.82	5.66	9.99	5.15	93.83
P-306/123	19.60	14.29	28.00	6.60	23.25	4.41	96.15
P-306/124	24.96	18.44	29.45	5.34	10.86	3.39	92.44
P-306/125	27.83	20.47	28.12	3.56	6.75	4.02	90.75
P-306/150	13.99	9.40	41.83	2.80	22.87	H.o.	90.89
P-306/151	15.84	15.19	32.17	1.92	18.47	H.o.	83.59
P-306/152	17.46	1.75	51.37	2.16	14.46	H.o.	87.20
P-306/156	23.17	21.47	30.58	3.10	6.29	1.56	86.17
P-306/157	19.16	18.65	29.11	5.73	11.24	3.20	87.09

Примечание. H.o. – элемент не определялся.

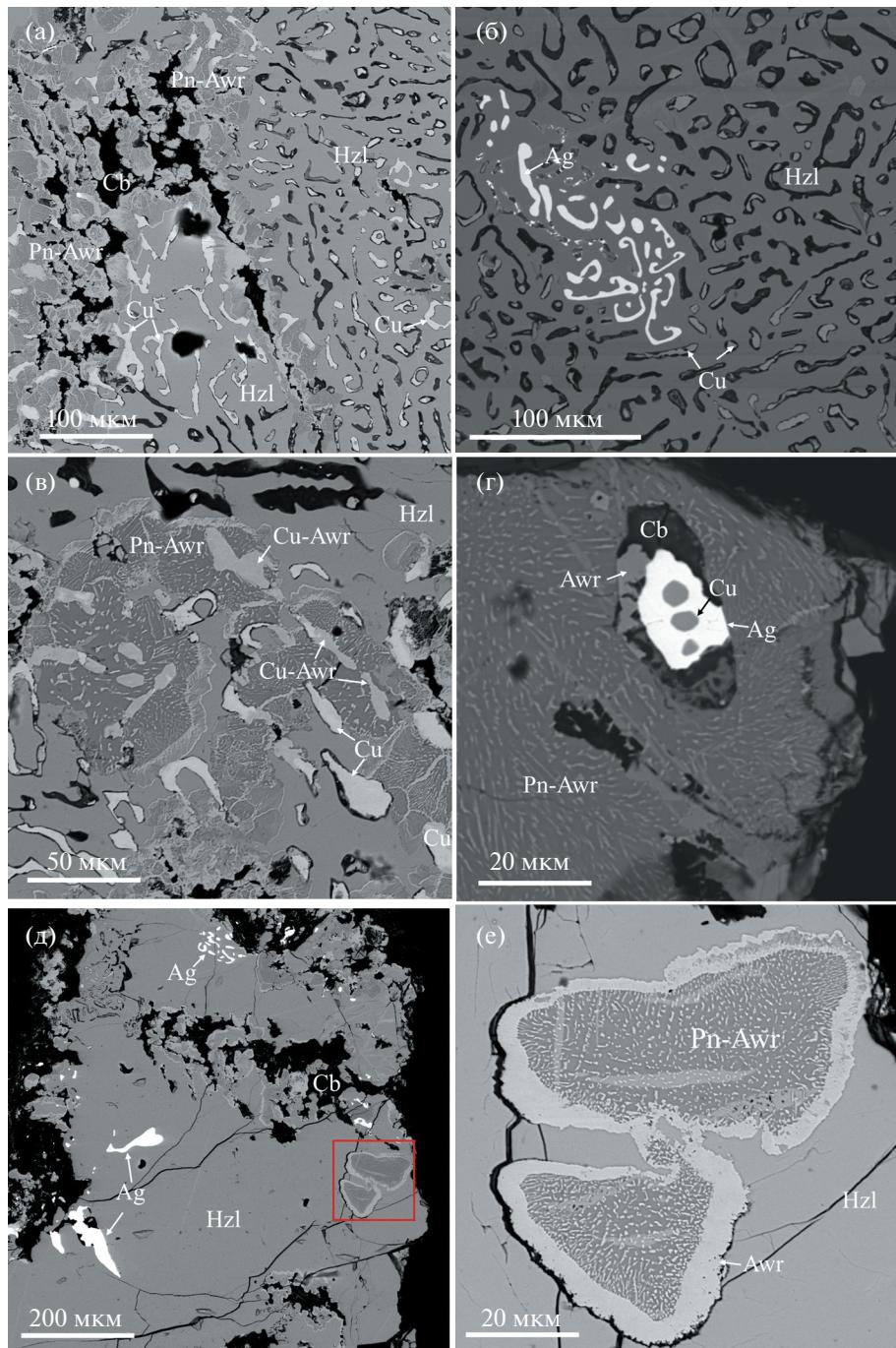
Значительно более богат кобальтом пентландит в желваках V типа (табл. 4, ан. 4–23). Содержание кобальта в раннем пентландите (Pn I) в парагенезисе с медистым хизлевудитом и самородной медью составляет 4–15 мас. % Co, а в позднем пентландите (Pn II) в парагенезисе с медистым хизлевудитом 4.4–5.1 мас. % Co.

Наиболее обогащен кобальтом пентландит в парагенезисе с аваруитом в VI типе желваков (12.3–19.4 мас. % Co), который, напротив, содержит не более 0.8 мас. % Cu (табл. 4, ан. 24–31).

**Самородная медь.** Присутствует во всех типах желваков. В желваках I–IV типов она чиста по составу и лишь в отдельных анализах в ней фиксируются примеси Fe, Ni, Co в количествах, не превышающих 0.5 мас. %. Наибольшее число разновид-

ностей самородной меди встречено в желваках V типа. Здесь в составе раннего парагенезиса хизлевудита и пентландита присутствует беспримесная медь, а более позднем парагенезисе медистого хизлевудита, пентландита и куприта присутствует никелистая медь (4–8 мас. % Ni) (табл. 5), а также никелисто-золотистая (2.7–5 мас. % Ni, 15–17.8 мас. % Au) (см. табл. 2). В желваке VI типа симплектиты никелистой меди в парагенезисе с хизлевудитом еще более богаты никелем (5.6–21.2 мас. % Ni) и содержат до 2 мас. % Fe.

**Аваруит.** Химический состав аваруита, присутствующего в желваках VI типа, близок к составу интерметаллического соединения  $\text{Ni}_3\text{Fe}$  ( $\text{Ni}/\text{Fe} = 3$ ) (табл. 6). Наблюдающиеся отклонения от стехиометрического соотношения Fe и Ni, в том числе связанные с присутствием в составе этого минерала



**Фиг. 7.** Строение и минералы желваков VI типа: а – зона укрупненной симплектитовой графики хизлевудита (Hzl)-никелистая медь (Cu) и примыкающие к ней линейные зоны тонкозернистых Со-пентландит-аваруитовых (Pn-Awr) симплектитов, сопряженные с пустотами, выполненные кальцитом и Cu-Ni карбонатами (Cb); б – зона тонкой симплектитовой графики двух составов: хизлевудит (Hzl)-никелистая медь (Cu – серое) и хизлевудит-ртутьистое серебро (Ag – светлое); в – зерна Со-пентландита с тончайшими субграфическими вrostkami аваруита (Pn-Awr) в хизлевудите (Hzl). Хизлевудит содержит симплектитовые вrostkami никелистистой меди (Cu), местами замещенные медистым аваруитом (Cu-Awr); г – полиминеральный сросток серебра (Ag) с включениями в нем кристаллов никелистистой меди (Cu), медистого аваруита (Awr) и карбоната (Cb), заключенные в Со-пентландит-аваруитовой симплектитовой массе (Pn-Awr); д – хизлевудит (Hzl) с вrostkami самородного серебра (Ag) и двумя округлыми выделениями тонкого агрегата Со-пентландита и аваруита (см. “е”); е – деталь “д”, блоки Со-пентландита с вкрапленностью аваруита (Pn-Awr) в хизлевудите (Hzl). Блоки имеют кайму, сложенную аваруитом (Awr) или тонкопластинчатым пентландит-аваруитовым агрегатом шестоватого строения.

**Таблица 3.** Химический состав хизлевудита из желваков различных типов, мас. %

№ п.п.	№ обр./ № ан.	Тип желвака	Ni	Fe	Co	Cu	S	Сумма	Me : S, ат. %
Хизлевудит монолитного строения									
1	P-320/2	VI	72.31	0.53	0.00	0.00	26.63	99.47	1.49
2	P-320/54	VI	72.92	0.29	0.00	0.00	26.04	99.25	1.54
3	P-320/43	VI	73.21	0.00	0.00	0.42	26.54	100.17	1.50
4	P-320/44	VI	73.35	0.00	0.14	0.06	26.70	100.25	1.51
5	P-320/45	VI	71.76	0.11	0.30	0.10	26.07	98.34	1.50
Линзочки хизлевудита в пентландите									
6	P-320/sp. 6	VI	70.10	2.40	0.67	0.00	25.91	99.08	1.54
7	P-320/sp. 7	VI	70.04	2.54	0.63	0.00	25.95	99.16	1.54
8	P-320/sp. 5	VI	68.80	2.19	0.86	0.05	25.97	97.87	1.51
Хизлевудит с симплектитами никелистой меди									
9	P-320/19	VI	72.37	0.14	0.00	0.44	26.85	99.8	1.48
10	P-320/61	VI	72.34	0.07	0.03	0.44	26.37	99.25	1.51
11	P-320/27	VI	71.10	0.52	0.27	0.77	25.96	98.62	1.53
Хизлевудит с симплектитами серебра									
12	P-320/59	VI	72.09	0.00	0.17	0.00	25.77	98.03	1.53
13	P-320/sp. 1	VI	71.81	0.28	0.17	0.00	26.58	98.84	1.48
14	P-320/1	VI	72.37	0.13	0.16	0.00	26.51	99.17	1.50
Хизлевудит с решеткой полуторной фазы									
15	P-306/3	V	72.23	0.08	0.46	0.73	26.56	100.06	1.51
16	P-306/5	V	71.79	0.10	0.25	0.09	26.36	98.59	1.50
17	P-306/22	V	73.24	0.18	0.00	0.45	26.39	100.26	1.53
18	P-306/25	V	70.82	0.40	0.00	0.81	26.48	98.51	1.48
19	P-306/75	V	72.84	0.51	0.05	0.13	26.49	100.02	1.52
20	P-306/79	V	72.00	0.51	0.00	0.32	27.22	100.05	1.46
21	P-306/104	V	72.72	0.19	0.00	0.58	26.79	100.28	1.50
22	P-306/105	V	71.53	0.06	0.04	0.06	26.03	97.72	1.50
Пластинки медистого хизлевудита в матричном									
23	P-320/60	VI	50.36	0.33	0.15	24.74	23.80	99.38	1.69
24	P-306/4	V	38.13	0.16	0.00	36.62	24.88	99.79	1.58
25	P-306/66	V	44.49	0.27	0.13	29.00	26.29	100.18	1.49
26	P-306/69	V	36.14	0.37	0.00	39.15	24.93	100.59	1.59
27	P-306/77	V	52.92	0.94	0.00	20.65	26.60	101.11	1.50
28	P-306/80	V	49.15	0.12	0.04	26.54	24.17	100.02	1.67
29	P-306/93	V	59.52	0.15	0.17	14.06	26.15	100.05	1.52
Включения медистого хизлевудита в Co-пентландите									
30	P-306/128	V	36.88	2.51	0.48	34.28	25.91	100.06	1.51
31	P-306/129	V	31.94	2.62	0.30	39.45	25.55	99.86	1.53
32	P-306/130	V	47.98	3.27	0.67	19.85	28.02	99.79	1.37
33	P-306/29	V	38.02	3.79	0.71	27.82	27.01	97.35	1.38
Включение медистого хизлевудита в самородной меди									
34	1808-1/51	II	40.30	0.19	0.08	33.73	25.49	99.79	1.54

**Таблица 4.** Химический состав пентландита в желваках различных типов, мас. %

№ п.п.	№ обр./ан.	Тип желвака	Ni	Fe	Co	Cu	S	Сумма	Me : S, ат. %	Ni/Fe, ат. %
1	1811/sp.13	III	23.89	38.59	2.09	2.91	31.57	99.05	1.20	0.59
2	1811/sp.14	III	23.26	39.27	2.07	3.21	32.00	99.81	1.19	0.56
3	1811/sp.50	III	25.53	32.26	1.38	7.99	31.39	98.55	1.19	0.75
4	P-306/1	V	28.73	22.94	14.72	0.47	32.86	99.72	1.13	1.19
5	P-306/2	V	30.16	24.34	12.12	0.91	32.06	99.59	1.17	1.18
6	P-306/18	V	29.64	26.60	9.76	0.82	32.88	99.70	1.13	1.06
7	P-306/20	V	30.35	28.33	6.68	0.74	32.75	98.85	1.12	1.02
8	P-306/24	V	26.10	20.11	20.52	0.60	32.51	99.84	1.15	1.23
9	P-306/30	V	30.91	26.87	7.62	1.41	32.24	99.05	1.15	1.09
10	P-306/31	V	29.66	27.13	9.24	0.44	32.58	99.05	1.14	1.04
11	P-306/38	V	28.60	25.16	11.57	0.61	32.05	97.99	1.14	1.08
12	P-306/39	V	28.31	24.63	12.73	0.98	32.37	99.02	1.14	1.09
13	P-306/46	V	29.74	22.54	13.41	1.32	32.63	99.64	1.14	1.25
14	P-306/50	V	28.43	27.13	10.35	1.57	32.25	99.73	1.16	1.00
15	P-306/63	V	35.73	26.60	4.00	1.48	31.65	99.46	1.19	1.28
16	P-306/65	V	30.95	27.34	8.11	0.67	33.13	100.20	1.13	1.08
17	P-306/71	V	32.90	26.62	6.22	1.48	32.54	99.76	1.15	1.18
18	P-306/72	V	30.88	27.54	6.79	2.72	32.39	100.32	1.17	1.07
19	P-306/73	V	33.79	27.07	5.98	0.82	32.41	100.07	1.16	1.19
20	P-306/74	V	33.33	27.87	5.26	1.17	33.11	100.74	1.14	1.14
21	P-306/86	V	33.11	26.51	0.83	6.12	33.03	99.60	1.12	1.19
22	P-306/126	V	32.30	28.48	4.40	1.24	31.78	98.20	1.16	1.08
23	P-306/127	V	32.66	28.07	5.09	3.69	31.06	100.57	1.24	1.11
24	P-320/6	VI	27.81	23.11	18.13	0.00	30.73	30.73	1.25	1.14
25	P-320/29	VI	29.86	26.41	12.30	0.00	31.58	31.58	1.21	1.08
26	P-320/33	VI	28.82	21.88	16.13	0.84	31.63	32.47	1.19	1.25
27	P-320/40	VI	29.09	21.90	16.23	0.02	31.47	31.49	1.19	1.26
28	P-320/48	VI	25.83	21.98	18.61	0.02	31.25	31.27	1.18	1.12
29	P-320/50	VI	27.33	21.72	17.61	0.68	30.73	31.41	1.21	1.20
30	P-320/57	VI	28.42	24.42	14.26	0.24	32.31	32.55	1.16	1.11
31	P-320/62	VI	25.33	22.40	19.41	0.25	31.71	31.96	1.18	1.08

Примечание. Анализы 1–3 – в парагенезисе с самородной медью; ан. 4–21 – Pn I в парагенезисе с медиистым хизлевудитом и самородной медью; ан. 22, 23 – Pn II в парагенезисе с медиистым хизлевудитом; ан. 24–31 – в парагенезисе с аваруитом.

примесей Cu и Co, объясняются наличием достаточно широкой области гомогенности твердых растворов на основе соединения  $\text{Ni}_3\text{Fe}$ , достигающей 20 ат. % при 300°C (Диаграммы состояния..., 1986).

Выделены две разновидности аваруита, различающиеся по содержанию меди. Низкие содержания меди (до 1.2 мас. % Cu) характерны для симплектитовых вростков аваруита в пентландите, а также аваруита, обрастающего вокруг зерен пентландита. Вторая разновидность относится к медиистому аваруиту (1.6–10.4 мас. % Cu), замещающему симплектитовые вростки никелистой меди в хизлевудите (табл. 6).

**Cu–Fe сульфиды.** В виде самостоятельных включений или срастаний с пентландитом в самородной меди в желваке III типа встречены Fe–Cu–S фазы, отвечающие по составу борнитовому твердому раствору. По отношению к составу собственно борнита  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$  (10 ат. % Fe) твердые растворы обогащены железом, содержание которого достигает 16.4 ат. % (табл. 7, ан. 10, 11). В них зафиксирована примесь Ag (до 0.3 мас. %).

Сульфиды меди, представленные фазами Cu–S, близкими по составу к халькоzinу  $\text{Cu}_2\text{S}$  ( $\text{Cu}/\text{S} = 1.95–2.07$ ), присутствуют в различных парагенезисах в желваках I–IV типов. Его мел-

**Таблица 5.** Химический состав самородной меди в желваках V и VI типов

№ п.п.	№ обр./№ ан.	Cu	Fe	Co	Ni	Сумма
1	P-306/10	99.86	0.01	0.00	0.00	99.87
2	P-306/12	100.4	0.01	0.00	0.00	100.05
3	P-306/132	99.74	0.00	0.04	0.00	99.78
4	P-306/27	91.41	0.15	0.00	8.04	99.60
5	P-306/40	95.11	0.22	0.01	3.98	99.32
6	P-306/95	96.04	0.00	0.00	5.36	101.40
7	P-320/9	93.70	0.02	0.03	6.10	99.85
8	P-320/16	85.67	1.97	0.38	11.16	99.18
9	P-320/21	93.80	0.57	0.07	5.63	100.07
10	P-320/26	93.66	0.91	0.21	5.83	100.61
11	P-320/38	78.63	0.56	0.52	18.63	98.34
12	P-320/64	77.94	0.40	0.00	21.22	99.56
13	P-320/67	92.19	0.12	0.15	7.58	100.04

Примечание. Ан. 1–3 – в раннем парагенезисе с хизлевудитом и пентландитом в желваках V типа; ан. 4–6 – в позднем парагенезисе с медистым хизлевудитом, пентландитом и купритом в желваках V типа; ан. 7–13 – симплектиты никелистой меди в хизлевудите в желваках VI типа.

**Таблица 6.** Химический состав аваруита из желвака VI типа, мас. %

№ ан.	№ обр./№ ан.	Cu	Fe	Co	Ni	Сумма	Ni/Fe, ат. %
1	P-320/3	0.42	23.99	0.46	73.30	98.17	3.15
2	P-320/4	0.62	24.23	1.20	72.78	98.83	2.91
3	P-320/11	1.20	22.88	1.95	73.30	99.33	2.86
4	P-320/13	0.37	24.19	1.02	72.67	98.25	3.05
5	P-320/17	0.97	23.70	1.51	72.59	98.77	2.86
6	P-320/46	0.33	23.44	1.01	74.49	99.27	2.91
7	P-320/49	0.44	24.52	1.09	74.43	100.48	3.02
8	P-320/63	0.84	22.94	1.06	75.85	100.69	2.89
9	P-320/23	10.35	19.37	0.41	70.28	100.41	3.45
10	P-320/24	3.79	18.23	1.10	75.78	98.90	3.95
11	P-320/25	1.57	23.01	1.87	71.53	97.98	2.96
12	P-320/39	5.04	21.12	1.14	70.13	97.43	3.16
13	P-320/55	5.02	23.79	1.99	69.53	100.33	2.78

Примечание. Ан. 1–8 – каймы и симплектитовые вrostки аваруита в пентландите; ан. 9–13 – выделения аваруита, замещающего симплектитовые вrostки никелистой меди в хизлевудите.

кие включения, заключенные преимущественно в самородной меди и куприте, не различаются набором примесей (табл. 7, ан. 1–9). Для халькозина характерна примесь серебра, хотя в концентрациях не выше 0.4 мас. %.

**Самородное серебро.** Обычный минерал, присутствующий в желваках III–VI типов. Практически всегда содержит примесные элементы в высоких концентрациях. По наборам примесей выделяются несколько основных химических разновидностей самородного серебра – Ag–Cu, Ag–Hg, Ag–Hg–Cu

и Ag–Hg–Ni (табл. 8). Примесь золота в самородном серебре надежно не установлена.

Каждому типу желваков присуща своя химическая разновидность самородного серебра. Так, медистое серебро (Ag–Cu), содержащее 3–6.5 мас. % меди, присутствует преимущественно в IV типе желваков. Здесь его кристаллы и частицы угловатых форм заключены в куприте.

Ртутьсто-медистое серебро (Ag–Hg–Cu) характерно для желваков III типа и присутствует в отдельных зернах в желваках III и V типов. Вариации содержаний примесных компонентов зна-

Таблица 7. Химический состав сульфидов меди в желваках различных типов, мас. %

№ ан.	№ обр., ан.	Тип желвака	Cu	Fe	Co	Ni	Ag	S	Total	Cu/S, ат. %	Парагенезис
1	1808-1/37	I	78.15	1.76	0.05	0.00	H.o.	19.64	99.60	2.01	Cu + Cct
2	1808-1/40	I	80.60	0.44	0.13	0.00	H.o.	20.46	101.63	1.99	Cu + Cct
3	1808-1/41	I	78.03	0.96	0.35	0.29	H.o.	19.86	99.49	1.98	Cu + Cct
4	1808-1/50	II	78.51	0.00	0.15	0.00	H.o.	19.85	98.51	2.00	Cu + Cct + Cu-HzI
5	P-309/9	IV	79.92	0.33	0.00	0.15	0.22	19.34	99.96	2.07	Cpr
6	P-309/11	IV	79.71	0.07	0.00	0.14	0.11	19.87	99.90	2.02	Cpr
7	P-309/18	IV	79.63	0.05	0.00	0.17	0.15	20.61	100.61	1.95	Cpr
8	P-309/27	IV	79.92	0.00	0.03	0.05	0.34	20.26	100.60	1.99	Cpr
9	P-309/36	IV	79.06	0.00	0.03	0.00	0.00	20.38	99.47	1.95	Cpr
10	1811/sp. 52	III	59.66	13.82	0.00	0.00	0.28	25.60	99.36	1.18	Cu+Pn +Bn(ss)
11	1811/sp. 49	III	52.72	18.30	0.12	0.00	0.11	26.65	97.90	1.00	Cu+Pn +Bn(ss)

Примечание. Ан.1–9 – халькозин, ан. 10,11 – борнитовый твердый раствор. “-” – элемент не измерялся. Минералы: Cu – самородная медь, Cct – халькозин, HzI – хизлевудит, Cpr – куприт, Pn – пентландит, Bn – борнит. H.o. – элемент не определялся.

чительны (1.5–14.8 мас. % Hg, 2.6–8.6 мас. % Cu). Зерна этой разновидности серебра локализуются в самородной меди.

Для V типа желваков характерно ртутистое серебро (Ag–Hg), содержащее медь в количестве менее 1 мас. %. Зерна самородного серебра в этом типе желваков негомогенны по соотношениям компонентов и характеризуются наиболее высокими содержаниями ртути, варьирующими от 12.8 до 36 мас. %. Негомогенность выделений самородного серебра описана выше. Принадлежность их к позднему гнездово-прожилковому оксидно-сульфидному парагенезису, обусловила их локализацию на контактах с различными минералами – хизлевудитом, пентландитом, купритом и наиболее поздними карбонатами. Негомогенность некоторых зерен ртутистого серебра в желваках V типа (см. фиг. 6б), когда наиболее ртутистые фазы слагают центральные их части, а кайма может не содержать ртуть совсем, может быть обусловлена выносом ртути в гипергенных условиях, подобно образованию высокопробных кайм на зернах самородного золота (Мурзин, Малюгин, 1987).

В желваках VI типа самородное серебро имеет две позиции – в симплектитовых срастаниях с хизлевудитом и в виде угловатых включений в хизлевудите, часто в срастаниях с аваруитом, Cu–Ni карбонатами. Основная особенность самородного серебра в желваках VI типа – принадлежность его к ртутисто-никелистистой (Ag–Hg–Ni) разновидности. Содержания ртути в этой разновидности варьируют от 3.5 до 9 мас. %, а никеля от 0.7 до 2.5 мас. % (см. табл. 8).

Состав самородного серебра в различных типах желваков на диаграмме Ag–Hg–Cu (фиг. 8) показывает, что в видовом отношении лишь наиболее

богатые ртутью фазы в желваках V типа по составу соответствуют таким минералам, как евгенит  $\text{Ag}_9\text{Hg}_2$  и луаньхэйт  $\text{Ag}_3\text{Hg}$ . Остальные фазы принадлежат серебро-ртутным твердым растворам. Согласно диаграмме состояния в системе Ag–Hg, растворимость Hg в Ag в твердом состоянии при температуре 276°C и ниже достигает 37.3 ат. % (Диаграммы состояния..., 1986).

**Куприт.** По отношению к самородной меди и медно-никелевым сульфидам куприт является более поздним, обычно развиваюсь по ним. В желваках IV типа куприт слагает основную их массу, замещаясь теноритом  $\text{CuO}$ . Куприт, присутствующий в желваках II–V типов, имеет состав, близкий к стехиометрическому  $\text{Cu}_2\text{O}$ , и лишь в некоторых анализах фиксируются примеси Fe и Ni в количествах, не превышающих первые десятые доли процента. Исключение составляет куприт, замещающий никелисто-золотистую медь в желваке V типа. Как было показано выше, в таком купrite, так же, как и в замещающих куприт карбонатах, фиксируются высокие содержания золота – до 23.25 мас. % (см. табл. 2). Мы полагаем, что золото не входит в кристаллическую решетку этих минералов и присутствует в виде собственных мельчайших частиц, образованных в процессах минеральных замещений.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

*Роль серпентинизации в образовании демантоидной и сульфидно-самородной минерализации*

Установленные настоящим исследованием рудные минералы обычно связываются с процессами серпентинизации ультраосновных пород (Рамдор, 1967). На Полдневском месторождении минерализация с демантоидом вмешается аподу-

**Таблица 8.** Химический состав самородного серебра в различных типах желваков и его химические разновидности

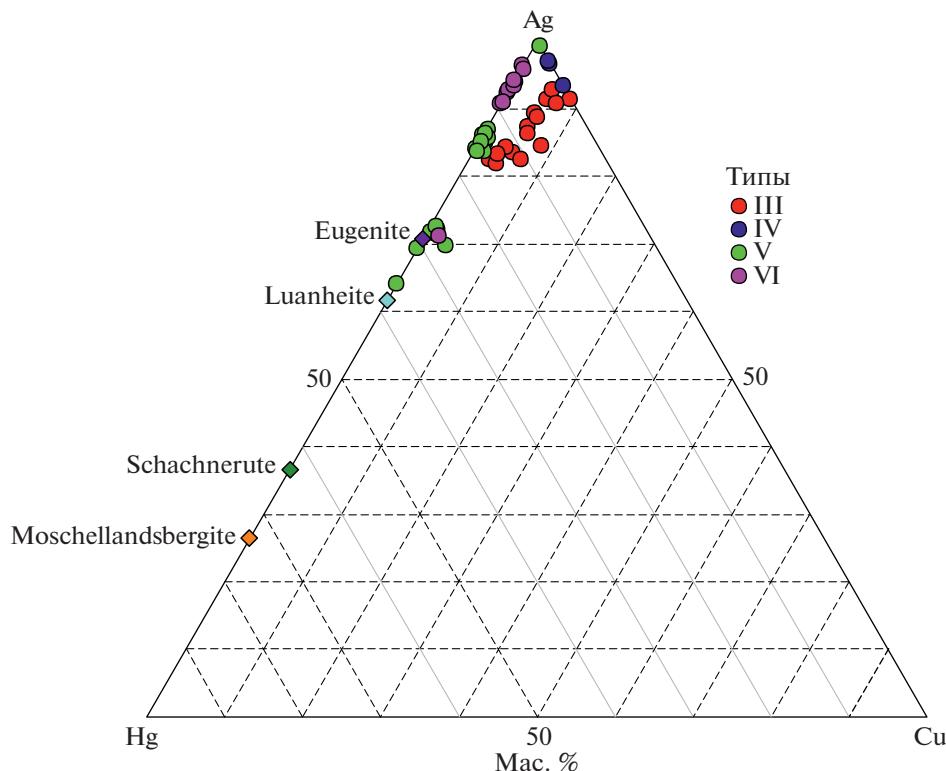
№ обр./№ ан.	Тип желвака	Ag	Hg	Cu	Ni	Сумма	Химическая разновидность
1811/sp.3	III	86.55	7.48	5.06	H.o.	99.09	Ag–Hg–Cu
1811/sp.4	III	85.02	7.19	8.32	H.o.	100.53	Ag–Hg–Cu
1811/sp.5	III	87.05	8.09	5.62	H.o.	100.76	Ag–Hg–Cu
1811/sp.8	III	82.98	14.65	2.82	H.o.	100.45	Ag–Hg–Cu
1811/sp.9	III	82.52	14.75	2.65	H.o.	99.92	Ag–Hg–Cu
1811/sp.10	III	82.40	11.21	5.12	H.o.	98.73	Ag–Hg–Cu
1811/sp.20	III	91.15	2.95	5.69	H.o.	99.79	Ag–Hg–Cu
1811/sp.21	III	89.20	5.56	5.66	H.o.	100.42	Ag–Hg–Cu
1811/sp.34	III	82.44	14.44	3.91	H.o.	100.79	Ag–Hg–Cu
1811/sp.35	III	91.49	1.57	5.58	H.o.	98.64	Ag–Hg–Cu
1811/sp.41	III	89.20	1.94	7.04	H.o.	98.18	Ag–Hg–Cu
1811/sp.44	III	81.43	10.58	6.68	H.o.	98.69	Ag–Hg–Cu
1811/sp.40	III	90.79	0.00	8.63	H.o.	99.42	Ag–Cu
P-309/10	IV	90.76	0.00	6.51	0.00	97.27	Ag–Cu
P-309/16	IV	95.91	0.00	3.35	0.25	99.51	Ag–Cu
P-309/35	IV	96.57	0.00	2.94	0.19	99.70	Ag–Cu
P-306/10	V	84.54	13.73	0.00	0.00	98.27	Ag–Hg
P-306/11	V	86.98	12.75	0.21	0.58	100.52	Ag–Hg
P-306/13	V	71.61	27.53	0.91	0.00	100.05	Ag–Hg
P-306/16	V	84.28	13.93	0.87	0.85	99.93	Ag–Hg
P-306/17	V	71.57	27.70	0.46	0.44	100.17	Ag–Hg
P-306/37	V	64.38	35.96	0.00	0.00	100.34	Ag–Hg
P-306/55	V	84.49	13.23	0.85	0.00	98.57	Ag–Hg
P-306/56	V	84.97	13.22	0.18	0.00	98.37	Ag–Hg
P-306/58	V	72.87	26.76	0.72	0.00	100.35	Ag–Hg
P-306/59	V	98.83	0.01	0.80	0.78	100.42	Ag–Hg
P-306/102	V	83.85	15.86	0.50	0.00	100.21	Ag–Hg
P-306/107	V	69.26	26.56	3.42	1.32	100.56	Ag–Hg–Cu–Ni
P-306/91	V	83.71	14.93	1.40	0.00	100.04	Ag–Hg–Cu
P-306/15	V	71.60	26.39	1.13	0.88	100.00	Ag–Hg–Cu
P-320/7	VI	91.73	7.54	0.10	0.71	100.08	Ag–Hg–Ni
P-320/8	VI	90.77	6.98	0.00	1.69	99.44	Ag–Hg–Ni
P-320/18	VI	89.21	9.12	0.00	1.01	99.34	Ag–Hg–Ni
P-320/65	VI	91.94	3.49	0.00	2.35	97.78	Ag–Hg–Ni
P-320/66	VI	91.42	5.52	0.21	2.51	99.66	Ag–Hg–Ni
P-320/52	VI	92.27	6.12	0.48	0.73	99.60	Ag–Hg–Ni
P-320/31	VI	89.54	8.72	0.13	0.83	99.22	Ag–Hg–Ni
P-320/37	VI	93.05	3.60	0.36	1.57	98.58	Ag–Hg–Ni
P-320/51	VI	92.44	5.62	0.00	1.35	99.41	Ag–Hg–Ni

Н.о. – элемент не определялся.

нитовыми антигоритовыми серпентинитами, в которых участками сохранены более ранние продукты петельчатой серпентинизации (Карасева и др., 2021). В породе обычна рассеянная вкрапленность Mn–Zn-содержащего хромшпинелида, замещающегося хроммагнетитом, хромсодержащим хлоритом и магнетитом (фиг. 9а).

Антигоритовый серпентинит разбит сетью карбонатных (кальцит, пироаурит), хризотиловых и серпентин–бруситовых прожилков, к которым приурочены скопления укрупненных зерен

магнетита. К карбонатным прожилкам иногда приурочены наиболее крупные зерна самородной меди (до 0.5 мм). Карбонатизация серпентинита проявлены также в массе серпентинита вблизи зон с демантOIDом. В карбонатизированном серпентините обнаружены выделения хизлевудита размерами до 0.1 мм, в том числе содержащими включения брейтгауптита (NiSb) и ртутистого серебра (фиг. 9б), а также полиминеральные срастания хизлевудита, Со–пентландита и авару-



**Фиг. 8.** Состав самородного серебра в желваках различных типов на диаграмме Ag—Hg—Cu.

ита (фиг. 9в). Хизлевудит активно замещается миллеритом.

В магнетите, замещающем хромшпинелид, зафиксированы мелкие вrostки Со-пентландита, хизлевудита и самородной меди, а в самом хромшпинелиде в срастании с хроммагнетитом и хлоритом — самородной меди (фиг. 9г). К укрупненному магнетиту приурочены мелкие (5–10 мкм) включения борнита, самородной меди и миллерита.

Из приведенных наблюдений по минералогии серпентинитов, вмещающих минерализованные демантOIDом жилы, следует, что дунит подвергся сначала ранней петельчатой, затем поздней антигоритовой серпентинизации и, наконец, карбонатизации в массе породы, с появлением магнетит-антигоритовых, хризотиловых, брусит-серпентиновых и карбонатных прожилков.

Железо из оливина при ранней серпентинизации фиксируется в виде вкрапленности пылевидного магнетита, который при развитии более поздних антигорита, хризотила и кальцита перераспределяется в агрегаты укрупненных зерен. Аксессорный хромшпинелид при серпентинизации активно замещается хроммагнетитом, хромсодержащим хлоритом и магнетитом. С серпентинизацией связано появление в породе Со-содержащего пентландита, хизлевудита, а также самородных минералов меди, серебра и аваруита, а в свободном микротрешинном пространстве — кальцита,

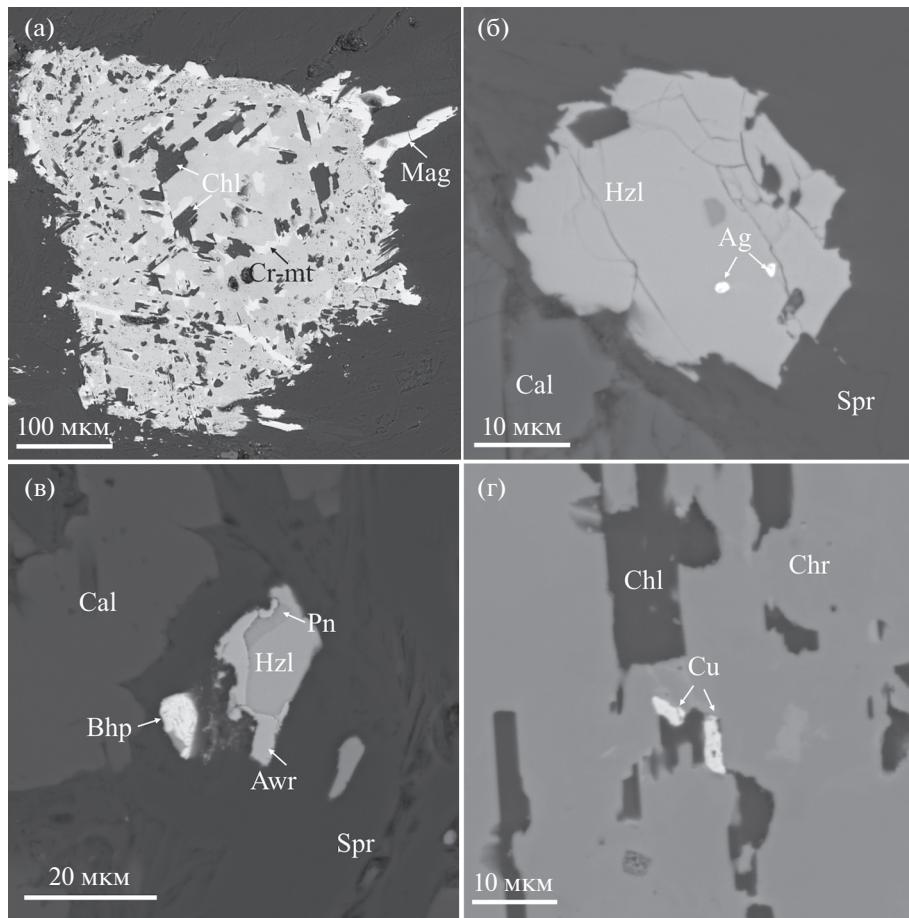
укрупненного магнетита, сульфидов меди и никеля, самородной меди.

Совпадающий в целом набор рудных минералов в серпентините и изученных нами сульфидно-самородных желваках из жильного материала свидетельствует об их генетической связи и сопряженности демантOIDной минерализации в целом с эволюционирующими процессами серпентинизации.

#### Физико-химические условия образования желваков

Наиболее важными температурными реперами для изученных нами парагенезисов желваков и серпентинитов являются точки устойчивости стехиометрических хизлевудита ниже 556°C и миллерита NiS ниже 379°C (Воган, Крейг, 1981), а также устойчивость соединения Ni<sub>3</sub>Fe (аваруит) и твердого раствора на его основе ниже 493°C (Диаграммы состояния..., 1986).

Миллерит не характерен для желваков всех типов, в то время как в антигоритовом серпентините он активно замещает хизлевудит. Ассоциация антигорита с Со-пентландитом и хизлевудитом, таким образом, образовалась в серпентинитах при температуре выше 380°C, а для более поздних прожилковых ассоциаций с хризотилом, бруситом, кальцитом, укрупненным магнетитом и самородной медью эта температура является верхним пределом. Очевидно также, что самородно-суль-



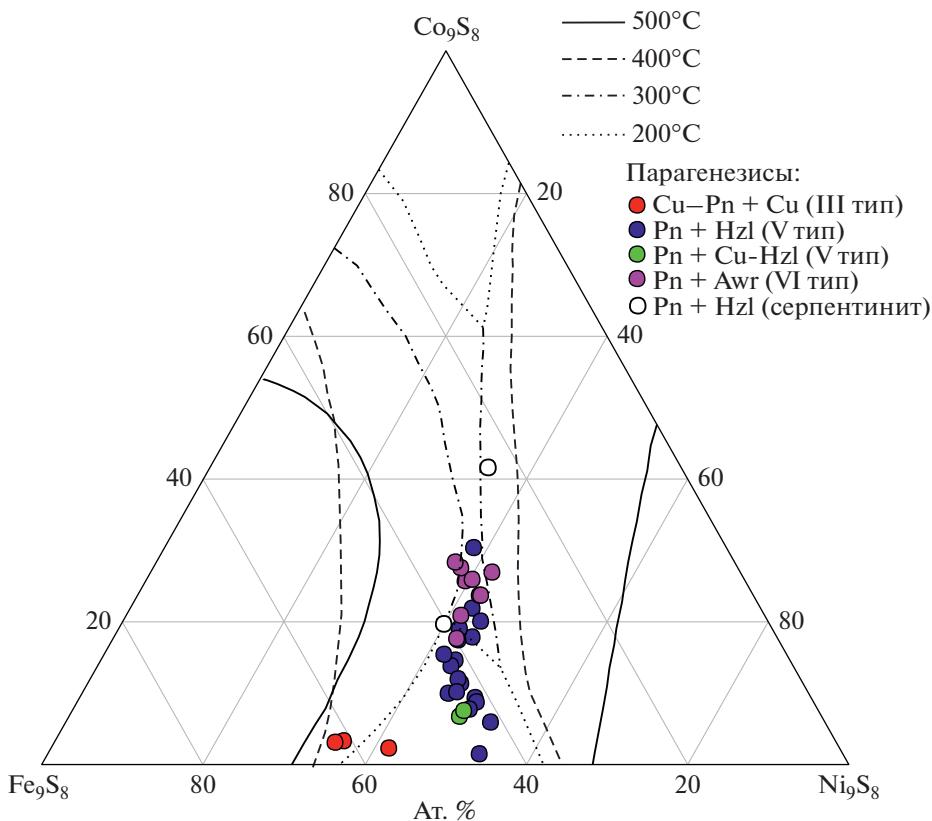
**Фиг. 9.** Минералы антигоритового серпентинита: а – зональное зерно хромшпинелида, замещенного хроммагнетитом (Cr-mt), хромсодержащим хлоритом (Chl) и магнетитом (Mag) в серпентините; б – зерно хизлевудита (Hzl) с включениями ртутистого серебра (Ag) в кальцит (Cal)-серпентиновой (Spr) массе; в – зерно брейгауптита (Bhp) и полиминеральное срастание хизлевудита (Hzl), пентландита (Pn) и аваруита (Awr) в кальцит (Cal)-серпентиновой (Spr) массе; г – зерно на самородной меди (Cu) в срастании с хромсодержащим хлоритом (Chl) в хромшпинелиде (Chr).

фидные парагенезисы желваков отлагались тоже ниже 380°C.

Присутствие в составе пентландита значительных содержаний кобальта позволяет провести оценки температурных условий отложения парагенезисов с этим минералом по данным экспериментальных исследований в системе  $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{Ni}_9\text{S}_8-\text{Fe}_9\text{S}_8$  (фиг. 10). Анализ положения точек состава пентландита в самородно-сульфидных парагенезисах желваков III, V и VI типов на диаграмме устойчивости твердых растворов системы  $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{Ni}_9\text{S}_8-\text{Fe}_9\text{S}_8$  показывает, что отложение парагенезисов с пентландитом происходило при температуре ниже 400°C. В температурном диапазоне 200–300°C располагаются точки состава пентландита в парагенезисе с аваруитом в желваке VI типа. Более широкий диапазон характерен для пентландита в V типе желваков – ранняя его генерация (PnI) в парагенезисе с хизлевудитом и самородной медью начинает отлагаться при 300°C и продолжается ниже 200°C, а поздняя генерация (PnII) в парагенезисе с меди-

стым хизлевудитом в краевых частях желвака соответствует температурному полю ниже 200°C. В нижней части диаграммы на фиг. 10 обосновываются точки состава включений медистого пентландита в самородной меди из желваков III типа. Эти пентландиты имеют наиболее низкую величину  $\text{Fe}/\text{Ni}$  (ат. %) = 0.56–0.75 по отношению к остальным ( $\text{Fe}/\text{Ni} = 1.0$ –1.28), что указывает на образование пентландита желваков III типа при более высокой фугитивности серы, чем в желваках других типов (Kaneda, 1986).

Факт присутствия во всех типах желваков самородных металлов (самородных меди и серебра, аваруита) свидетельствует о формировании желваков в восстановительных условиях при очень низких значениях фугитивности серы и кислорода. В желваках VI типа такие условия сохранялись в течение всего времени их формирования, в то время как при образовании желваков I–V типов восстановительные условия ранних парагенезисов сменялись более окислительными в поздних, для которых характерно отложение куприта и за-



**Фиг. 10.** Поля устойчивости пентландитового твердого раствора при различных температурах на диаграмме  $\text{Co}_9\text{S}_8-\text{Ni}_9\text{S}_8-\text{Fe}_9\text{S}_8$  (Kaneda, 1986) и состав Co-пентландита из различных парагенезисов в серпентините и желваках III, V и VI типов.

мещение им самородной меди. Границы значения фугитивности кислорода в реакции оксидации меди находятся в диапазоне  $10^{-30}$  бар при  $200^\circ\text{C}-10^{-21}$  бар при  $350^\circ\text{C}$  (Schwarzenbach et al., 2014). Самородная медь устойчива при более низких значениях этой величины, а куприт, наоборот, при более высоких.

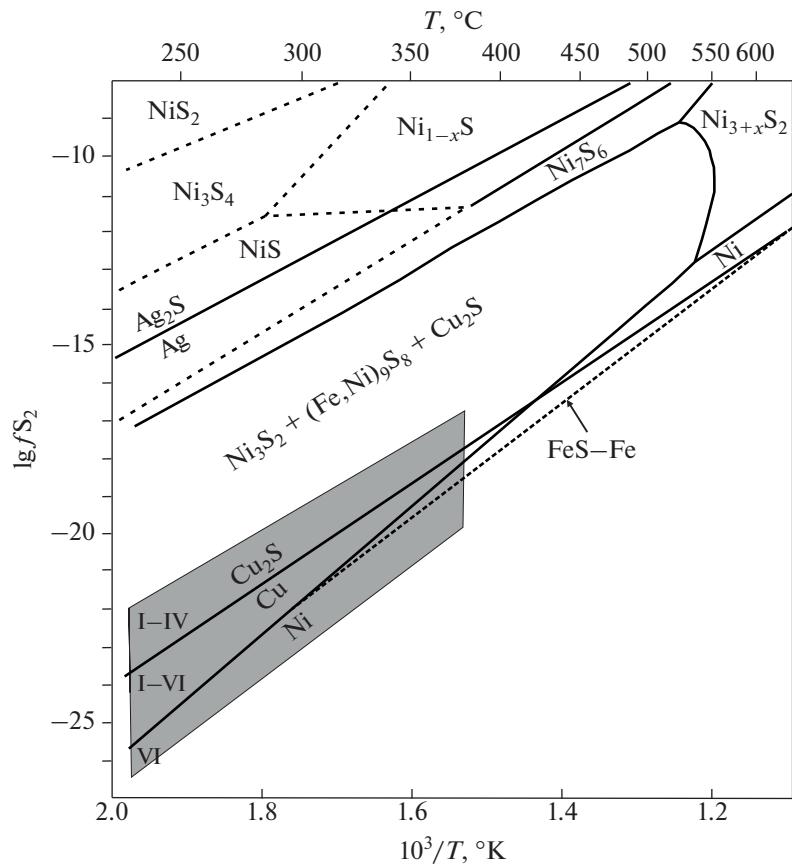
Оценка значений фугитивности серы при образовании желваков может быть дана на основе реакций сульфидизации самородных и сульфидных минералов в желваках (фиг. 11). Как следует из анализа диаграммы  $T-\text{S}_2$ , значения фугитивности серы для температур образования желваков ниже  $350^\circ\text{C}$  были в пределах  $10^{-17}-10^{-27}$  бар в поле между буферными реакциями сульфидизации меди и никеля. Различия в фугитивности серы при образовании желваков различных типов не значительны и определяются следующими наблюдениями: самородная медь присутствует в желваках всех типов, халькозин присутствует в желваках I-IV типов, а аварийт — только в желваках VI типа. Положение линий буферной реакции  $\text{Ag}/\text{Ag}_2\text{S}$  на диаграмме на фиг. 11 значительно выше линий реакций сульфидизации меди и никеля, что объясняет устойчивость серебра в само-

родной форме в парагенезисах, характерных для желваков III-VI типов.

Установлено также, что главными факторами кристаллизации аварийт-сульфидной ассоциации, подобной выявленной в VI типе желваков, являются не только низкая фугитивность кислорода, но и низкое отношение вода/порода при гидратации перидотитов (Базылев, 2000). Такое сочетание факторов реализуется в обстановке гидратации офиолитовых перидотитов при пониженной температуре ( $T$  ниже  $200^\circ\text{C}$ ,  $\text{W/R} < 0.2$ ), в то время как при высоком отношении вода/порода ( $\text{W/R} > 300$ ), характерном для серпентинизации океанических перидотитов, аварийт образуется при более высокой температуре  $450-570^\circ\text{C}$  (Lorand, 1985; Базылев, 2000).

#### Симплектитовые срастания в желваках и условия их образования

В нашем исследовании в желваках VI типа обнаружены специфические симплектиты ртутистого серебра и никелистовой меди в хизлевудите, а также аварийта в Со-пентландите. Анализ литературных данных показал, что симплектиты как взаимные прорастания минералов с характерным, чаще всего червеобразным, рисунком описываются



**Фиг. 11.** Условия образования самородно-сульфидных желваков I–VI типов (серое поле) на диаграмме температура ( $T$ ) – фугитивность серы ( $\lg f\text{S}_2$ ). Реакции сульфидизации даны по (Бартон, Скиннер, 1970).

часто. Они встречаются в магматических, метаморфических и метасоматических породах. Соответственно, и генезис симплектитов может быть различным. В магматических породах это обычно эвтектическая кристаллизация расплавов. В метаморфических породах симплектиты часто связываются с перекристаллизацией и минеральными твердофазными реакциями, обусловленными резким изменением  $PT$ -параметров. В метасоматических процессах, в которых участвует водный флюид, симплектитовые срастания могут возникать при реакционном взаимодействии двух контактирующих минералов с участием воды (гидратации). Однако во всех случаях движущей силой образования симплектитов являются резкие изменения  $PT$ -параметров процессов минералообразования, в том числе обусловленные декомпрессией и разуплотнением пород (Сибилев, 2010; Асеева и др., 2014; Кабанова, 2016; Degi et al., 2010 и др.).

Для базит-гипербазитовых пород характерны симплектиты с участием рудных минералов – магнетит-хромит-диопсидовые (Хисина, Лоренц, 2015), ортопироксен-магнетитовые (Efimov, Malitch, 2012), амфибол-магнетитовые, антигорит-магнетитовые (Пыстин и др., 2011; Murzin et al., 2022).

Симплектиты, сложенные самородными и сульфидными минералами, описываются значительно реже (Попов и др., 2013; Пушкарев и др., 2003, 2007). Близкие к изученным нами в желваке VI типа синтаксические срастания аварита с пентландитом в парагенезисе с никелисткой медью встречены в серпентините Уфалейского района на Южном Урале (Попов и др., 2013). К сожалению, в данной работе составы этих минералов не приводятся.

Симплектитовые срастания пентландита и хизлевудита с самородной медью описаны также в миароловых пегматитах Нижнетагильского дунит-клинопироксенитового массива в Платиноносном поясе Урала (Пушкарев и др., 2003, 2007). В этих пегматитах симплектиты приурочены к миароловой полости, заполненной серпентином, андрадитом, хлоритом, стекловатыми микросферулами оксидных и силикатно-оксидных фаз, а также гнездами, сложенными магнетитом, сульфидами никеля (пентландит, хизлевудит, миллерит) и самородными медью, железом, никелем и аваритом. Судя по приведенным в (Пушкарев и др., 2003) анализам, самородная медь является никелистой (до 5.5 мас. % Cu) и родистой (до 2.2 мас. % Rh), хизлевудит содержит 1.2–1.7 мас. %

Cu, а пентландит не содержит кобальт. Образование миароловых полостей происходит на заключительных стадиях твердо-пластичных деформаций дунитов в области декомпрессионной разгрузки и заполнения остаточным расплавом и флюидом (Пушкарев и др., 2007).

### *Генезис самородно-сульфидных “желваков”*

Образование самородно-сульфидных агрегатов мы рассматриваем в рамках модели формирования Коркодинского массива и демантоидной минерализации в нем в процессе подъема корово-мантийной смеси во время позднепалеозойской Уральской коллизии (Кисин и др., 2020). Под корово-мантийной смесью здесь понимаются перемешанные фрагменты нижней коры, погруженной на глубину 60–70 км (испытавшей высокобарический метаморфизм), и верхней мантии, внедренные в зону Главного Уральского Разлома. Подъем корово-мантийной смеси сопровождался декомпрессией, разуплотнением, отделением глубинного флюида, автометаморфизмом и автометасоматозом. Синхронно возникающие при декомпрессии трещины растяжения заполнялись жильным материалом, в том числе с гнездами демантоида и самородно-сульфидными желваками при разгрузке глубинного флюида на глубоких горизонтах и, возможно, с участием метеорного флюида на верхних горизонтах. Предположения о формировании демантоидной минерализации при коллизионных процессах подтверждают и результаты прямого U-Pb LA-ICP-MS датирования демантоида на образцах с крайне низким содержанием U, давшего для Коркодинского месторождения  $343 \pm 4$  млн лет, а для Полдневского —  $292 \pm 1$  млн лет (Sorokina et al., 2023).

В предложенной модели источником меди, никеля и серебра был глубинный высокотемпературный гидротермальный раствор, взаимодействующий с основными и ультраосновными породами в высоко восстановительных условиях при низком значении отношения вода—порода (W/R). Механизм формирования рудоносного флюида в модели подъема корово-мантийной смеси обоснован результатами физико-химического моделирования образования золотоносных родингитов Карабашского массива на Южном Урале (Murzin et al., 2018). Подобные условия рассматривались также для серпентинизированных перidotитов из офиолитов Санта-Элена в Коста-Рике (Schwarzenbach et al., 2014), которые содержат ассоциацию самородных Cu, Fe, Ni и их сульфидов, аналогичную описанной выше в желваках из жильной демантоидной минерализации.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Общей чертой выделенных типов самородно-сульфидных желваков, сложенных самородной медью, хизлевудитом, пентландитом, купритом и

другими минералами, является сфероидальная форма и радиально-секториальное строение, что сближает их с отдельными зернами других минералов жильной массы (кальцит, магнетит и др.). В хизлевудит-пентландитовых желваках VI типа обнаружены специфические симплектиты ртутистого серебра и никелистой меди в хизлевудите, а также аваруита в Со-пентландите. Особенности морфологии и строения самородно-сульфидных желваков, а также присутствие в них симплектитовых срастаний связано со специфическими условиями, создающимися при декомпрессии корово-мантийной смеси, поднимающейся к поверхности.

2. Совпадающий набор рудных минералов в серпентините (самородные медь, ртутистое серебро, хизлевудит, пентландит, аваруит) и сульфидно-самородных желваках из жильного материала свидетельствует об их генетической связи и сопряженности демантоидной минерализации в целом с эволюционирующими процессами серпентинизации.

3. Формирование самородно-сульфидных парагенезисов в желваках происходило при температуре ниже 380°C в восстановительных условиях при очень низких значениях фугитивности серы ( $10^{-17}$ – $10^{-27}$  бар) и кислорода ( $10^{-30}$  бар при 200°C– $10^{-21}$  бар при 350°C). В желваках VI типа такие условия сохранялись в течение всего времени их формирования, в то время как при образовании желваков I–V типов восстановительные условия ранних парагенезисов сменялись более окислительными в поздних, для которых характерно заимещение самородной меди купритом.

4. Источником Cu, Ni и Ag был глубинный высокотемпературный гидротермальный раствор, взаимодействующий с основными и ультраосновными породами в восстановительных условиях при низком значении отношения вода—порода.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны С.Г. Селезневу и другим геологам ООО “Корпорация Маяк” за содействие в получении образцов для исследований.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИГиГ УрО РАН (№ Гос. учета НИОКТР 123011800011-2) и темы НИР ИЭМ РАН (FMUF-2022-0003).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Асеева А.В., Высоцкий С.В., Карабцов А.А., Александров И.А., Чувашова И.С. Трансформация гранатовых мегакристов под воздействием щелочных базальтовых магм // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 2. С. 53–63.

Базылев Б. А. Развитие аваруит-содержащей минеральной ассоциации в перidotитах из зоны разлома 15°20' (Атлантический океан) как одно из проявлений океанического метаморфизма // Российский журн. наук о земле. 2000. Т. 2. № 3. С. 279–293.

- Бартон П.Б., Скиннер Б.Дж.** Устойчивость сульфидных минералов // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир, 1970. С. 211–285.
- Воган Д., Крейг Дж.** Химия сульфидных минералов. Москва: Мир, 1981.
- Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. Справочник. Банных О.А., Будберг П.Б., Алисова С.П. и др. Москва: Металлургия, 1986.
- Кабанова Л.Я.** Симплектиты как показатели декомпрессионных условий образования // Наука ЮУрГУ: матер. 68-й науч. конф. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2016. С. 275–283.
- Калугина Р.Д., Конанев В.Ф., Стороженко Е.В. и др.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200000. Издание второе. Серия Среднеуральская. Лист О-41-ХХV. Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГБУ “ВСЕГЕИ”, 2017.
- Карасева Е.С., Кисин А.Ю., Мурzin В.В.** Полдневское месторождение демантOIDа (Средний Урал): Геология и минералогия // Литосфера. 2021. № 5. С. 681–696. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-683-698>
- Кисин А.Ю., Мурzin В.В., Карасева Е.С., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Селезнев С.Г., Озорнин Д.А.** Проблемы структурного контроля демантOIDной минерализации на Полдневском месторождении // Известия УГГУ. 2020. Вып. 2(58). С. 64–73. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-2-64-73>
- Макеев А.Б.** Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала: Наука. СПб.: Наука, 1992.
- Мурzin В.В., Малюгин А.А.** Типоморфизм золота зоны гипергенеза (на примере Урала). Свердловск: УНЦАН СССР, 1987.
- Попов В.А., Колисниченко С.В., Блинов И.А.** Никелистая медь и накаурит из голубой жилы в ультрамафитах (Верхнеуфалейский район, Южный Урал) // Четырнадцатые Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В.О. Полякова. Миасс: Институт минералогии УрО РАН, 2013. С. 13–24.
- Пушкирев Е.В., Аникина Е.В., Гарути Дж., Заккарини Ф.** Родистая самородная медь из миароловых дунитов Нижнетагильского массива // Вестник Уральского отделения РМО № 2. Екатеринбург: УГГА, 2003. С. 78–82.
- Пушкирев Е.В., Аникина Е.В., Гарути Дж., Заккарини Ф.** Хром-платиновое оруденение Нижнетагильского типа на Урале: Структурно-вещественная характеристика и проблема генезиса // Литосфера. 2007. № 3. С. 28–65.
- Пыстин А.М., Потапов И.Л., Пыстиня Ю.И., Генералов В.И., Онищенко С.А., Филиппов В.Н., Шлома А.А., Терешко В.В.** Малосульфидное платинометальное оруденение на Полярном Урале. Екатеринбург: УрО РАН, 2011.
- Рамдор П.** О широко распространенном парагенезисе рудных минералов, возникающих при серпентинизации // Геология руд. месторождений. 1967. № 2. С. 32–43.
- Сибелев О.С.** Декомпрессионные симплектиты в апоэклогитах Гридинской зоны меланжа (Беломорский подвижный пояс) // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2010. Т. 13. С. 66–72.
- Хисина Н.Р., Лоренц К.А.** Дегидрогенизация как механизм образования ориентированных шпинель-пироксеновых симплектитов и магнетит-гематитовых включений в оливинах земного и внеземного происхождения // Петрология. 2015. Т. 23. № 2. С. 195–208. <https://doi.org/10.7868/S0869590315020065>
- Adamo I., Bocchio R., Diella V., Pavese A., Vignola P., Prospieri L., Palanza V.** Demantoid from Val Malenco, Italy: Review and update // Gems and Gemology. 2009. V. 45. P. 280–287. <https://doi.org/10.5741/gems.45.4.280>
- Adamо I., Bocchio R., Diella V., Caucia F., Schmetzer K.** Demantoid from Balochistan, Pakistan: Gemmological and Mineralogical Characterization // J. Gemmol. 2015. V. 34. P. 428–433. <https://doi.org/10.15506/JoG.2014.34.4.344>
- Ahadnejad V., Krzemnicki M.S., Hirt A.M.** Demantoid from Kerman Province, South-east Iran: A Mineralogical and Gemmological Overview // The J. Gemmology. 2022. V. 38. № 4. P. 329–347. <https://doi.org/10.15506/JoG.2022.38.4.329>
- Degi J., Abart R., Torok K., Wirth R., Rhede D. et al.** Symplectite formation during decompression induced garnet breakdown in lower crustal mafic granulite xenoliths: mechanisms and rates // Contrib. Mineral. Petrol. 2010. № 159. P. 293–314.
- Efimov A.A., Malitch K.N.** Magnetite-orthopyroxene symplectites in gabbros of the Urals: a structural track of olivine oxidation // Geology of Ore Deposits. 2012. V. 54. № 7. P. 531–539.
- Phillips W.R., Talantsev A.S.** Russian demantoid, czar of the garnet family // Gems and Gemology. 1996. V. 32. № 2. P. 100–111. <https://doi.org/10.5741/gems.32.2.100>
- Kaneda H., Takenouchi S., Shol T.** Stability of pentlandite in the Fe–Ni–Co–S system // Mineralium Deposita. 1986. V. 21. P. 169–180.
- Kissin A.Y., Murzin V.V., Karaseva E.S.** “Horsetail” Inclusions in the Ural Demantoids: Growth Formations // Minerals. 2021. V. 11. № 8. P. 825. <https://doi.org/10.3390/min11080825>
- Lorand J.P.** The behaviour of the upper mantle sulfide component during the incipient alteration of “Alpine”-type peridotites as illustrated by the Beni Bousera (Northern Morocco) and Ronda (Southern Spain) ultramafic bodies // Tschermaks Min. Petr. Mitt. 1985. V. 34. P. 183–209.
- Murzin V.V., Chudnenko K.V., Palyanova G.A., Varlamov D.A., Naumov E.A., Pirajno F.** Physicochemical model of formation of Cu–Ag–Au–Hg solid solutions and intermetallic alloys in the rodingites of the Zolotaya Gora gold deposit (Urals, Russia) // Ore Geol. Rev. 2018. V. 93. P. 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.018>
- Murzin V., Palyanova G., Mayorova T., Beliaeva T.** The Gold–Palladium Ozernoe Occurrence (Polar Urals, Russia): Mineralogy, Conditions of Formation, Sources of Ore Matter and Fluid // Minerals. 2022. V. 12, 765. <https://doi.org/10.3390/min12060765>
- Rondeau B., Fritsch E., Mocquet B., Lulyac Y.** Ambanja (Madagascar) – New source of gem demantoid garnet // InColor. 2009. V. 11. P. 16–20.
- Schwarzenbach E.M., Gazel E., Caddick M.J.** Hydrothermal processes in partially serpentinized peridotites from Costa Rica: evidence from native copper and complex sulfide assemblages // Contrib. Mineral. Petrol. 2014. V. 168:1079.
- Sorokina E.S., Albert R., Botcharnikov R.E., Popov M.P., Häger T., Hofmeister W., Gerdes A.** Origin of Uralian andradite (var. demantoid): Constraints from in situ U-Pb LA-ICP-MS dating and trace element analysis // Lithos. 2023. V. 444–445. 1070. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107091>