

Электронная версия доступна на сайте  
[www.fmm.ru/Новые данные о минералах](http://www.fmm.ru/Новые_данные_о_минералах)

Минералогический музей  
 имени А.Е. Ферсмана РАН

Новые данные о минералах, том 57, вып. 3 (2023), 81–90

**НДМ**

## Германоколусит и колусит вулканогенного колчеданно-полиметаллического месторождения Цумеб. Намибия

Спиридонов Э.М.<sup>1</sup>, Мурашко М.Н.<sup>2</sup>, Япаскерт В.О.<sup>1</sup>,  
 Куликова И.М.<sup>3</sup>, Коротаева Н.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, [ernstspiridon@gmail.com](mailto:ernstspiridon@gmail.com)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>3</sup>Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, Москва

Богатейшее вулканогенное колчеданно-полиметаллическое Ag-Zn-Cu-Pb-месторождение Цумеб – крупнейшее скопление руд и минералов Ge. По данным Г. Шнейдерхёна, Цумеб – магматогенное гидротермальное месторождение замещения. Руды Цумеба включают гипотермальную, мезотермальную и эпитеермальную минерализацию. Эпитеермальная минерализация развита по всему объему месторождения и в доломитах и углеродистых доломитах вдоль контактов залежей массивных сульфидных руд. Возникла при  $T\ 240 - < 80\ ^\circ\text{C}$ . Обильны галенит, маложелезистый Cd-сфалерит, теннантит, пирит, низкий халькозин, доломит, марказит. Распространены незональный германит и галлит, с которыми минералы группы колусита не ассоциируют. Германоколусит  $\text{Cu}_{20}(\text{Cu,Zn,Fe})_6\text{V}_2(\text{Ge,As})_6\text{S}_{32}$  и германийсодержащий колусит  $\text{Cu}_{20}(\text{Cu,Fe,Zn})_6\text{V}_2(\text{As,Ge})_6\text{S}_{32}$  распространены в рудах, заместивших морские углеродистые доломиты, обогащенные ванадием. Колусит развит в агрегатах галенита и цинкистого теннантита, ассоциирует с анатазом, халькопиритом, графитоидом, пикрофенгитом. Германоколусит развит в агрегатах галенита и теннантита, ассоциирует с анатазом, халькопиритом, графитоидом, Mg-фенгитом. По составу переход от колусита к германоколуситу непрерывный.

**Ключевые слова:** вулканогенное колчеданно-полиметаллическое месторождение Цумеб, эпитеермальная минерализация, германоколусит, германийсодержащий колусит.

Богатейшее вулканогенное колчеданно-полиметаллическое Ag-Zn-Cu-Pb-месторождение Цумеб – крупнейшее скопление руд и минералов германия (Шнейдерхён, 1958; Рамдор, 1962). Это месторождение со своеобразным геологическим строением, сложной историей формирования и необычайным разнообразием эндогенных минералов изучают начиная с 10-х годов XX века (Söhnege, 1952; Schneiderhöhn et al., 1958; Шнейдерхён, 1958; Рамдор, 1962; Geier, Otteman, 1970; Pinch, Wilson, 1977; Lombaard et al., 1986; Спиридонов и др., 1986, 1992а, 1992б; Чвилёва и др., 1985; Gebhardt, 1999; Chetty, Frimmel, 2000; Passchier et

al., 2002; Спиридонов, 2005, 2009; Спиридонов, Мурашко, 2010, и др.).

Статья посвящена сложным сульфидам ванадия, которые в рудах Цумеба установили В. Гейер и И. Оттеманн (Geier, Ottemann, 1970). Минералы группы колусита целенаправленно изучены нами в богатых этими минералами оруденелых ванадиеносных углеродистых доломитах и черных сланцах глубоких горизонтов Цумеба (сборы М.Н. Мурашко). Микронзондовые анализы минералов выполнили И.М. Куликова и В.О. Япаскерт (Jeol SM-6480 LV, совместно EDS- и WDS-спектрометры), фотографии в режиме отраженных

электронов – Н.Н. Кортаева.

## Минералы группы колусита

Колусит – сложный сульфид меди, железа, ванадия и мышьяка, в структуре которого ванадий занимает особую кристаллохимическую позицию. Колусит возникает в условиях несколько повышенного окислительного потенциала и поэтому характерен для поздней минерализации вулканогенных как эпитермальных (мало- и убогосульфидных), так и колчеданных месторождений (с массой сульфидов) (Geier, Otteman, 1970; Качаловская и др., 1975; Spiridonov et al., 1984; Чвилёва и др., 1985; Спиридонов и др., 1992а, 1992б; Miller, Geier, 1997; Yamamoto, Mitsusino, 2000; Ненашева, Паутов, 2003; Wagner, Monecke, 2005; Mitsubara, Miyawaki, 2006; Спиридонов, Мурашко, 2010). Колусит столь же характерен и для поздней минерализации плутоногенных медно-порфирировых и медно-молибден-порфирировых месторождений, которая сходна с поздней минерализацией вулканогенных месторождений; именно в рудах медно-порфирирового месторождения колусит и был открыт (Landon, Molgilner, 1933; Berman, Gonyer, 1939; Nelson, 1939; Рамдор, 1962; Levy, 1968; Юдин, 1969; Качаловская и др., 1975; Strashimirov et al., 2002; Pollard, Taylor, 2003; Sillitoe, 2011). Кроме того, по нашим данным, колусит является характерным минералом ванадиеносных осадочных пород, метаморфизованных в условиях пренит-пумпеллитовой фации, например, в прослоях углеродистых сланцев среди знаменитых белоснежных каррарских мраморов (Orlandi et al., 1981; Spiridonov et al., 1984; Spry et al., 1994; Orlandi, Griscuolo, 2009) и в углеродистых сланцах и терригенно-карбонатных породах западного склона Полярного Урала – Пайхоя (Spiridonov et al., 1984; Юшкин и др., 1986). Литература, посвященная минералам группы колусита, весьма обширна, в этой статье приведена только избранная.

В нашем обращении 1984 г. к Комиссии по новым минералам и названиям минералов ВМО АН СССР и к Международной комиссии по новым минералам IMA предлагался следующий вариант наименования минералов группы колусита (Спиридонов и др., 1986):

колусит-As  $\text{Cu}_{20}(\text{Cu,Fe,Zn})_6\text{V}_2\text{As}_6\text{S}_{32}$ ,  
 колусит-Sb  $\text{Cu}_{20}(\text{Cu,Fe,Zn})_6\text{V}_2\text{Sb}_6\text{S}_{32}$ ,  
 колусит-Sn  $\text{Cu}_{20}(\text{Cu,Fe,Zn})_6\text{V}_2\text{Sn}_6\text{S}_{32}$ ,  
 колусит-Ge  $\text{Cu}_{20}(\text{Cu,Fe,Zn})_6\text{V}_2\text{Ge}_6\text{S}_{32}$ .

Предложение было одобрено. Однако тут же последовало утверждение в качестве нового минерального вида некрасовита  $\text{Cu}_{20}(\text{Cu,Fe,Zn})_6\text{V}_2\text{Sn}_6\text{S}_{32}$  (Коваленкер и др., 1984) вместо логичного – колусита-Sn, или станноколусита. После этого пришлось для колусита-Sb дать наименование стибикоколусит (Спиридонов и др., 1992а) и для

колусита-Ge – германоколусит (Спиридонов и др., 1992б).

Установлено, что наиболее распространенный минерал рассматриваемой группы – колусит (арсеноколусит), который установлен в десятках медно-порфирировых месторождений и в десятках вулканогенных колчеданных, колчеданно-полиметаллических, эпитермальных золотых и золото-серебряных месторождениях. Германоколусит установлен в немногих вулканогенных золото-колчеданных месторождениях, характерен для метаморфизованных в условиях пренит-пумпеллитовой фации ванадиеносных осадочных пород Пай-Хоя. Сибикоколусит установлен в единичных вулканогенных колчеданных и эпитермальных золотых месторождениях с неглубоким эрозионным срезом. Некрасовит (станноколусит) развит в единичных эпитермальных золотых месторождениях.

## Месторождение Цумеб

Месторождение Цумеб – одно из богатейших сульфидных месторождений – отрабатывалось с конца XIX века и почти весь XX век, подземные выработки достигли глубины 1700 м. Из руд Цумеба получено более 90 млн т свинца, меди и цинка, значительные количества серебра, кадмия, германия, галлия, мышьяка, а также золота, селена, сурьмы, невероятное количество коллекционного, музейного материала. В 1906 г. средние содержания в рудах составили 24 мас.% Pb, 14 мас.% Cu. Средние многолетние содержания в рудах Цумеба (мас.%): Pb 17.7, Zn 8.4, Cu 8.2. На нижних горизонтах содержание цветных металлов заметно понизилось, в рудах существенно возросла доля пирита.

Месторождение Цумеб панафриканского возраста (граница венда – кембрия и до раннего кембрия) расположено возле горной цепи Отави на северо-востоке Намибии (Юго-Западная Африка), в складчатом поясе Дамаран неопротерозойского – вендского возраста. Месторождение Цумеб залегает в дислоцированных морских отложениях венда – криогения в доломитах, углеродистых доломитах, доломитизированных известняках, оолитовых и кремнистых известняках, ледниковых моренных отложениях – тиллитах и тиллоидах, углеродистых аргиллитах (до филлитов), аркозовых и иного состава алевропесчаниках, кварцито-песчаниках, разбитых множеством разломов (Söhngе, 1952; Schneiderhöhn et al., 1958; Passchier et al., 2002).

По нашим данным, состав осадочного доломита близок к теоретическому:  $(\text{Ca}_{0.994-1.007}\text{Mg}_{0.990-1.000}\text{Mn}_{0.003-0.010})_2(\text{CO}_3)_2$  ( $n = 8$ ).

Месторождение Цумеб представлено сложной формы крутопадающим лентообразным рудным телом с массой апофиз, в том числе крупных, ко-

торые секут слоистость и мелкие складки 2–3-го порядка во вмещающих доломитах (Schneiderhöhn et al., 1958), сопряжено с вулканическими телами (Söhngе, 1952) (рис. 1). Как видно, рудное тело ниже горизонта 600 м залегает почти перпендикулярно толще доломитов – пород, которые, как известно, практически не карстуются. Здесь закартированы три обособленные залежи массивных сульфидных руд с апофизами вдоль контактов различных пачек толщи доломитов.

Среди вулканических тел Цумеба – более древнее трубообразное тело взрывных брекчий трахириодацитов, более молодые рукавообразные и дайкообразные тела трахириодацитов. Вулканы интенсивно гидротермально изменены, превращены в калишпатовые кварциты – «псевдоаплиты» (Schneiderhöhn et al., 1958; Рамдор, 1962, и мн. др.), кварц-мусковитовые метасоматиты с апатитом и флогопитом. Последрудные магматические образования – это дайки, силлы и трубообразные тела долеритов и керсантитов (Söhngе, 1952).

На верхних горизонтах руды Цумеба состояли в основном из сульфидов Cu, Pb, Zn при подчиненной роли пирита, на глубоких горизонтах в рудах преобладает пирит.

По совокупности геологических и минералогических данных Цумеб – вулканогенное колчеданно-полиметаллическое месторождение, что впервые отметил П.Г. Зёнге (Söhngе, 1952), которое в определенной степени напоминает вулканогенные колчеданно-полиметаллические месторождения Алтая, Японии и иных регионов (Вулканогенные... 1978; Франклин и др., 1984; Смирнов и др., 1986; Ohmoto, 1996; Ерёмин и др., 2000; Matsubara, Miyawaki, 2006).

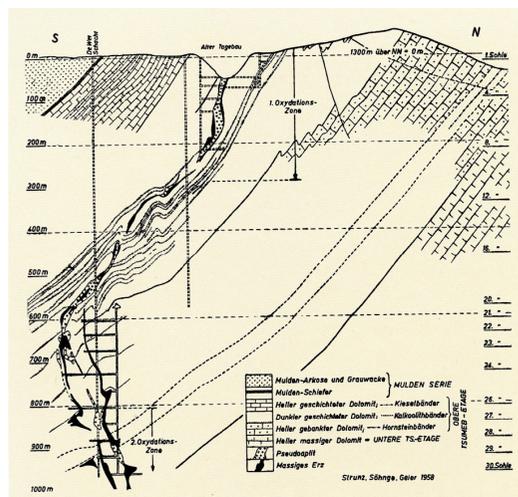


Рис. 1. Разрез верхней и средней части месторождения Цумеб по данным Г. Шнейдерхёна, П. Зёнге и Б. Гейера (Schneiderhöhn et al., 1958).



Рис. 2. Краевая часть рудного тела Цумеба на глубоких горизонтах. Сложно смятые гидротермально измененные и оруденелые (галенит, пирит, халькопирит, теннантит, халькозин, колусит) ванадиеносные углеродистые доломиты и аргиллиты. 59 × 43 мм. Колл. М.Н. Мурашко. Фото Э.М. Спиридонова.

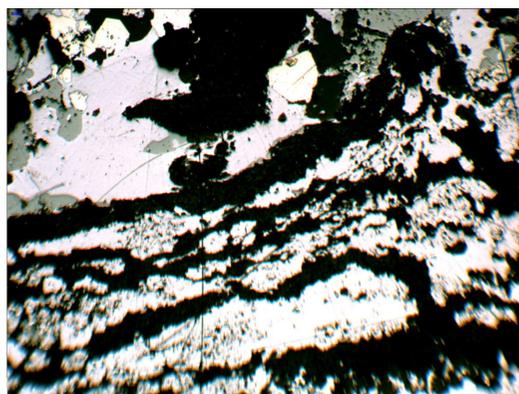


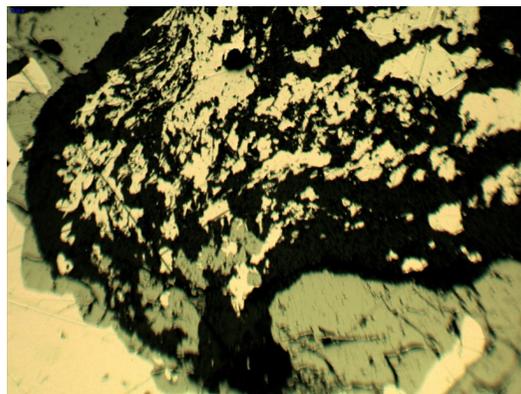
Рис. 3. Краевая часть рудного тела Цумеба на глубоких горизонтах. Сложно смятые углеродистые доломиты по-слою замещены галенитом, теннантитом и пиритом. В отраженном свете при одном никеле. Поле зрения 8 мм. Колл. М.Н. Мурашко. Фото Э.М. Спиридонова.

По Гансу Шнейдерхёну, который много лет (1914–1918 гг. и далее) проводил подземное картирование рудной залежи Цумеба и долгое время исследовал его руды, Цумеб – это магматогенное гидротермальное месторождение замещения (Шнейдерхён, 1958). Массивные сульфидные руды развиты вдоль контактов брекчий по измененным кремнекислым вулканикам трубчатых тел (в основном с убогим вкрапленным оруденением), с которыми сопряжены брекчии по окремненным и сульфидизированным доломитам, углеродистым доломитам, доломитизированным известнякам, углеродистым филлитам. Массивные сульфидные руды заместили карбонатные породы, окружаю-

щие тела брекчий, и частью сами брекчии в основном карбонатного (доломитового) состава. Руды Цумеба содержат массу реликтов замещенных доломитов, углеродистых доломитов, обрывки их складок, реликты гидротермально измененных кремнекислых вулканитов, реже иных пород (рис. 2–6).

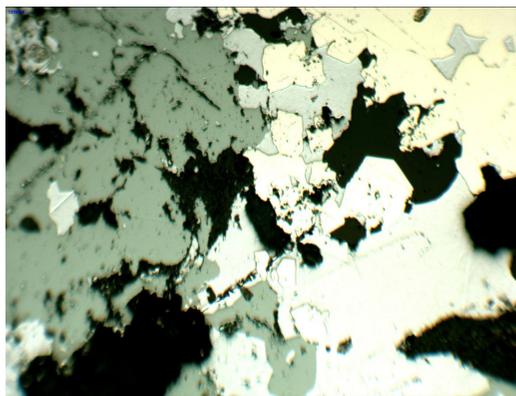
Массивные сульфидные руды верхних и средних горизонтов Цумеба на две трети состоят из галенита, сфалерита, халькозина, борнита, пирита, энаргита, халькопирита, теннантита. Жильные минералы в рудах: доломит, кварц, мусковит до пикрофенгита, апатит, кальцит, флогопит и иные. Особенностью руд Цумеба является грандиозное количество минералов Ge. Размер скоплений германита достигал многих метров в поперечнике, вес – сотен тонн (Шнейдерхён, 1958). Иные минералы Ge: реньерит, овамбоит, майкаинит, германоколусит, бриартит, цинкбриартит, бруногейерит, катамаркит, германийсодержащие галлит, сульванит, станноидит, моусонит, станнин (Sclar, Geier, 1957; Schneiderhöhn et al., 1958; Strunz et al., 1958; Рамдор, 1962; Geier, Otteman, 1970, 1972; Otteman, Nuber, 1977; Otteman et al., 1977; Pinch, Wilson, 1977; Keller, 1984; Чвилёва и др., 1985; Bernstein, 1986; Спиридонов и др., 1992а, 1992б; Gebhardt, 1999; Спиридонов, 2003; von Bezing et al., 2007).

По нашим данным (Спиридонов, 2009; Спиридонов, Мурашко, 2010), гидротермально-метасоматические руды Цумеба включают гипотермальную, мезотермальную и эпитермальную минерализации. **Гипотермальная минерализация** возникла при  $T$  до  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , включает топаз, высокий халькозин, пирит, фторапатит, калишпат, кварц, флогопит, сложные сульфиды Ge, по составу близкие к германиту, но богатые W и Mo,



**Рис. 4.** Краевая часть рудного тела Цумеба на глубоких горизонтах. Сложно смятые углеродистые аргиллиты замещены пиритом, галенитом, кварцем и теннантитом. В отраженном свете при одном никеле. Поле зрения 8 мм. Колл. М.Н. Мурашко. Фото Э.М. Спиридонова.

– овамбоит  $\text{Cu}_{20}(\text{Cu,Fe,Zn})_6\text{W}_2(\text{Ge,As})_6\text{S}_{32}$  и майкаинит  $\text{Cu}_{20}(\text{Cu,Fe,Zn})_6\text{Mo}_2(\text{Ge,As})_6\text{S}_{32}$ , а также высокотемпературный твердый раствор галлит  $\text{CuGaS}_2$  – сфалерит – высокий халькопирит – хоулиит  $\text{CdS}$ , сложные сульфиды олова: твердый раствор станнин – станноидит и иные. Распространены медистый овамбоит и W-содержащий майкаинит. **Мезотермальная минерализация** Цумеба возникла после заметной тектонизации агрегатов гипотермальной, при  $T > 250$  и до  $350\text{--}370\text{ }^{\circ}\text{C}$ , включает продукты распада ранних твердых растворов, перекристаллизации продуктов распада, новообразованные минералы. Характерно чередование парагенезов, возникших при высокой  $a\text{S}_2$  (резко преобладают): высокий халькозин, борнит, пирит,



**Рис. 5.** Краевая часть рудного тела Цумеба на глубоких горизонтах. «Объедки» углеродистых аргиллитов в агрегатах теннантита, пирита, халькопирита и галенита. В отраженном свете при одном никеле. Поле зрения 3 мм. Колл. М.Н. Мурашко. Фото Э.М. Спиридонова.



**Рис. 6.** Цумеб. Эпитермальная минерализация. Приконтактовые руды. Масса реликтов углеродистого вещества в теннантите (зеленоватый) и галените. В отраженном свете при одном никеле. Ширина поля зрения 4 мм. Колл. М.Н. Мурашко. Фото Э.М. Спиридонова.

дигенит, энаргит, люционит, фаматинит, германит, реньерит, сульванит, моусонит, станнин; при низкой  $a_{S_2}$ : пирротин, кубанит, сидерит, магнетит, анкерит, фаялит, глаукоdot; при повышенной  $f_{O_2}$ : касситерит, ферберит, гематит, маггемит; жильные: кварц, доломит, фтористый мусковит, калишпат, анкерит, сидерит, кальцит, тальк, турмалин. Несмотря на огромный размер скоплений германита в рудах Цумеба, величина отдельных его кристаллов редко более 0.2 мм, чаще менее 0.05 мм. Для мезотермальной минерализации Цумеба крайне характерно замещение W- и W-Mo-германита  $Cu_{20}(Cu,Fe,Zn)_6(Fe,W,Mo)_2(Ge,As)_6S_{32}$  реньеритом  $Cu_{10}Fe_4ZnGe_2S_{16}$  –  $Cu_{11}Fe_4GeAsS_{16}$ . Руды Цумеба тонко- и мелкокристаллические, что типично для вулканогенных месторождений. В отдельных участках рудных тел полностью заросли полости выщелачивания или возникли при тектонических раздвигах. В таких полостях давление рудоносного флюида увеличивалось до величины, превышающей литостатическое (до 1.5 кб и более), и выросли крупные кристаллы теннантита, халькозина, германита.

### Эпитермальная минерализация месторождения Цумеб

Эпитермальная минерализация развита среди брекчированных агрегатов гипотермальной и мезотермальной минерализаций по всему объему месторождения, а также вдоль контактов залежей массивных сульфидных руд с доломитами и углеродистыми доломитами. Параметры образования эпитермальной минерализации:  $T\ 240 - < 80\ ^\circ C$ , соленость растворов 6–12 мас.% экв. NaCl (Lombaard et al., 1986; Chetty, Frimmel, 2000).

**Сульфидные руды на контакте залежи сплошных руд с деформированными доломитами и углеродистыми доломитами.** Это руды с обилием пирита, галенита, халькопирита и продуктов его замещения – низкого халькозина, дигенита, борнита, теннантита; кроме того, они содержат пикрофенгит, доломит, кальцит, кварц, хлорит, марказит, графитоид, тиошпинели Ni-Cu-Co (линнеит, карролит...), арсенопирит, незональный германит, бедный W и Mo, галлит, бедный Zn и Fe, колусит, баркилит, гринокит. Большею частью сульфиды заместили доломит осадочных пород, при этом углеродистое вещество протолита сохранилось и насыщает агрегаты сульфидов и их кристаллы (рис. 3–6).

### Минералы ряда колусит – германоколусит эпитермальной минерализации Цумеба

Центральная часть месторождения Цумеб образована трубообразным телом брекчированных

трахириолитов, превращенных в калишпатовые кварциты. Эти кремнекислые породы бедны ванадием. Поэтому в рудах центральной части месторождения Цумеб практически нет минералов группы колусита. В приконтактной части трубообразной залежи массивных Ag-Pb-Zn-Cu сульфидных руд месторождения Цумеб в тех участках, где они заместили интенсивно деформированные углеродистые доломиты и углеродистые глинисто-карбонатные сланцы (рис. 3–6), руды содержат заметное количество минералов группы колусита – германийсодержащий колусит и германоколусит. Источник ванадия для них – замещенные морские углеродистые породы. Минералы группы



Рис. 7. Цумеб. Эпитермальная минерализация. Приконтактные галенитовые руды. В гнездах галенита включения анатаза, германийсодержащего колусита, пикрофенгита. Приведен состав одного из кристаллов колусита. В отраженных электронах.

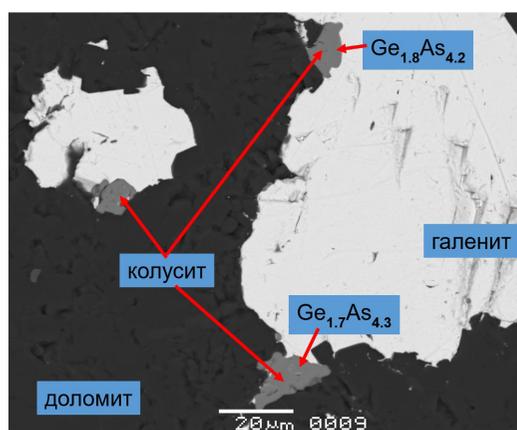
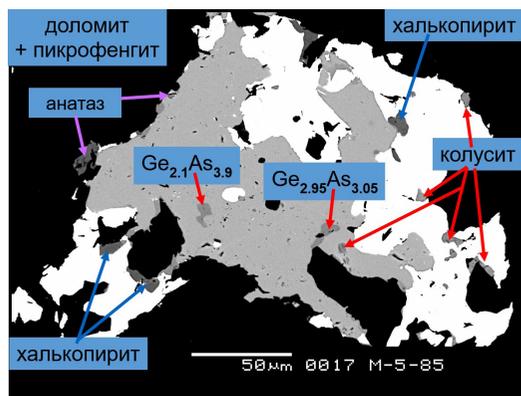


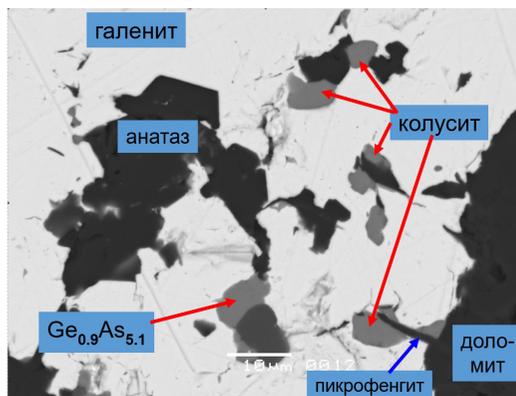
Рис. 8. Цумеб. Эпитермальная минерализация. Приконтактные галенитовые руды. В гнездах галенита включения анатаза, германийсодержащего колусита, пикрофенгита. Приведен состав двух кристаллов германийсодержащего колусита. В отраженных электронах.

колусита ассоциируют с галенитом, цинкистым теннантитом, доломитом, фенгитом, анатазом, графитоидом, кварцем, кальцитом. В ассоциации с германитом и галлитом колусит не наблюдался.

Первое зарождение колусита Цумеба – Ge-содержащий колусит – слагает небольшие, до 30 микрон, кристаллы на контакте мелких гнезд галенита и теннантита и включения в теннантите



**Рис. 9.** Цумеб. Эпитермальная минерализация. Приконтактные теннантит-галенитовые руды. В гнездах теннантита (серый) и галенита (белый) включения халькопирита, Ge-содержащего колусита, анатаза. Дан состав двух кристаллов колусита. В отраженных электронах.



**Рис. 10.** Приконтактные теннантит-галенитовые руды в углеродистых доломитах. На контактах теннантита (серый) и галенита (белый) развит германийсодержащий колусит. Приведен состав одного кристалла германийсодержащего колусита. В отраженных электронах.

**Таблица 1.** Химический состав (мас.%) германийсодержащего колусита приконтактных руд месторождения Цумеб

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7С
Cu	50.56	49.98	49.17	49.04	50.36	47.73	46.78
Fe	0.15	0.26	0.43	0.97	0.19	0.99	1.36
Zn	0.03	0.73	1.11	1.33	0.62	1.87	2.05
V	2.79	3.04	2.86	3.01	2.94	2.75	2.91
W	0.15	0.19	0.33	0.26	0.30	0.19	0.26
Mo	0.50	0.12	0.58	0.12	0.29	0.80	0.21
Ge	1.61	3.26	4.33	4.41	4.90	6.41	6.42
Ga	0.41	0.67	0.26	0.14	0.53	нпо	нпо
As	10.51	9.45	8.01	8.18	7.34	6.75	7.04
Sb	1.42	0.70	нпо	0.30	1.52	0.15	0.02
Sn	0.34	0.58	1.90	1.79	0.07	1.50	0.79
Te	нпо	нпо	нпо	0.13	нпо	нпо	нпо
S	31.21	31.44	31.22	31.48	31.90	31.55	31.12
сумма	99.68	100.42	100.20	101.16	99.17	100.69	98.96
Число атомов в формуле							
Cu	26.05	25.50	25.24	25.06	25.53	24.34	24.14
Fe	0.09	0.15	0.25	0.21	0.11	0.57	0.80
Zn	0.01	0.36	0.55	0.66	0.30	0.93	1.03
сумма	26.15	26.01	26.04	25.93	25.94	25.84	25.97
V	1.80	1.94	1.83	1.92	1.86	1.75	1.87
W	0.03	0.03	0.06	0.05	0.05	0.03	0.05
Mo	0.17	0.03	0.20	0.04	0.10	0.27	0.07
сумма	2.00	2.00	2.09	2.01	2.01	2.05	1.99
Ge	0.73	1.45	1.94	1.97	2.17	2.86	2.90
Ga	0.19	0.31	0.13	0.07	0.24	–	–
As	4.59	4.09	3.48	3.54	3.16	2.92	3.07
Sb	0.38	0.18	–	0.08	0.40	0.04	0.01
Sn	0.09	0.16	0.52	0.49	0.02	0.41	0.22
Te	–	–	–	0.03	–	–	–
сумма	5.98	6.19	6.07	6.18	5.99	6.23	6.20
S	31.87	31.80	31.80	31.88	32.06	31.88	31.84

Примечание. Электронный микроскоп Jeol SM-6480 LV, аналитик В.О. Япаскурт. Se не обнаружен, нпо – ниже предела обнаружения.

среди агрегатов доломита ( $\pm$  пикрофенгит, кварц, кальцит, анатаз) (рис. 7–11).

Данный колусит содержит заметные количества Sn (до 2 мас.%), Sb (до 1.5%), Ga (до 0.7%), беден Fe (< 1.5 мас.%). Состав германий-содержащего колусита Цумеба отвечает формуле  $\text{Cu}_{20}(\text{Cu}_{5.84-6.15}\text{Fe}_{0.09-0.80}\text{Zn}_{0.01-1.03})_{5.84-6.15}(\text{V}_{1.75-1.94}\text{Mo}_{0.03-0.27}\text{W}_{0.03-0.06})_{1.99-2.09}(\text{As}_{2.92-4.59}\text{Ge}_{0.73-2.90}\text{Sn}_{0.02-0.52}\text{Sb}_{0-0.40}\text{Ga}_{0-0.31}\text{Te}_{0-0.03})_{5.98-6.23}\text{S}_{31.8-32.06}$  (табл. 1). В отраженном свете германийсодержащий колусит Цумеба отчетливо желтый, изотропный. Судя по

тому, что ассоциирующий теннантит практически безжелезистый, этот парагенез возник при высокой  $aS_2$ .

Второе зарождение колусита Цумеба – германоколусит – слагает небольшие, до 25 микрон, кристаллы во внутренних частях мелких гнезд галенита, реже сростания с анатазом и каймы между теннантитом и галенитом среди агрегатов доломита ( $\pm$  фенгит, кварц, кальцит) в ассоциации с халькопиритом, продуктом деструкции теннантита (рис. 11–14). Изредка в кристаллах германоколусита включены мелкие выделения германий-содержащего колусита. Германоколусит несколько обогащен Fe и Zn, содержит заметные количе-

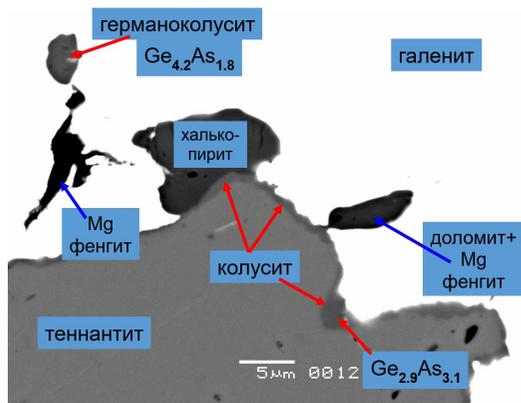


Рис. 11. Цумеб. Эпитермальное минерализация. При-контактные теннантит-галенитовые руды. В гнездах теннантита (серый) и галенита (белый) включения халькопирита, Ge-содержащего колусита, германоколусита, пикрофенгита, доломита. Колусит нередко развит вдоль контактов кристаллов халькопирита и теннантита или теннантита и галенита. Германоколусит слагает включения в галените. В отраженных электронах.

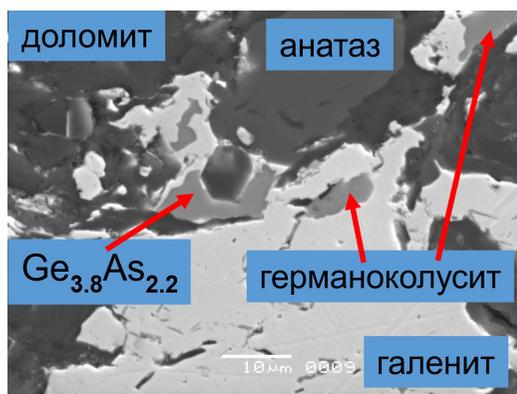


Рис. 13. Цумеб. Эпитермальное минерализация. При-контактные теннантит-галенитовые руды в доломитах. В галените включения германоколусита и анатаза. Приведен состав одного кристалла германоколусита. В отраженных электронах.

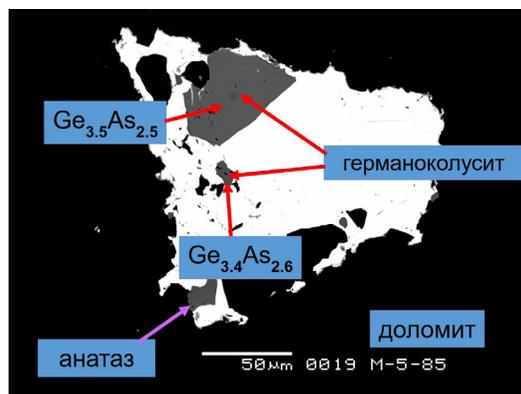


Рис. 12. Цумеб. Эпитермальное минерализация. При-контактные теннантит-галенитовые руды в доломитах. В теннантите (темно-серый) и галените (белый) включения германоколусита и анатаза. Приведен состав двух кристаллов германоколусита. В отраженных электронах.



Рис. 14. Цумеб. Эпитермальное минерализация. При-контактные теннантит-галенитовые руды в доломитах. В галените включения германоколусита. Приведен состав двух кристаллов германоколусита. В отраженных электронах.

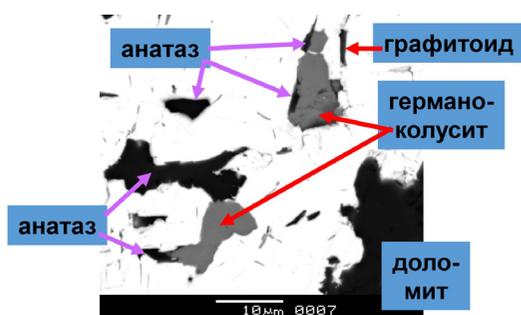


Рис. 15. Цумеб. Эпитермальна́я минерализация. Приконтактовые галенитовые руды с включениями сростаний германоколусита и анатаза, графитоида. В отраженном свете.

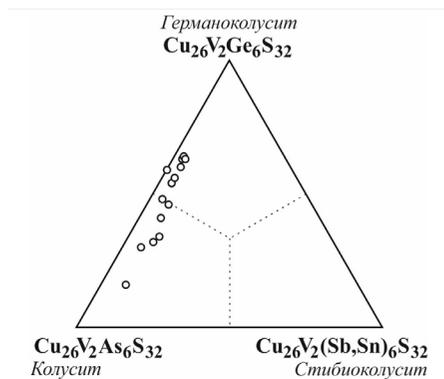


Рис. 16. Вариации состава минералов ряда колусит (арсеноколусит) – германоколусит месторождения Цумеб (данные авторов).

Таблица 2. Химический состав (мас.%) германоколусита приконтактовых руд месторождения Цумеб

Компоненты	8	9	10	11	12	13	14
Cu	46.30	47.08	46.16	46.78	46.30	47.04	47.09
Fe	2.42	2.06	2.22	1.33	1.67	1.33	1.79
Zn	1.96	1.53	1.88	2.34	2.61	2.49	1.33
V	2.96	2.77	2.54	2.77	3.06	3.10	2.65
W	0.19	0.07	0.37	0.97	0.11	0.28	0.30
Mo	0.18	0.60	0.85	0.19	0.06	нпо	0.60
Ge	7.23	7.40	7.94	8.30	8.51	8.62	8.86
Ga	0.14	0.13	0.10	нпо	нпо	нпо	0.06
As	5.90	5.65	4.95	4.81	4.76	4.61	3.81
Sb	нпо	нпо	нпо	0.07	нпо	нпо	нпо
Sn	0.92	0.89	0.98	0.89	0.86	0.81	1.22
Te	нпо	нпо	нпо	нпо	0.05	нпо	нпо
S	31.50	31.51	31.19	31.31	31.42	31.66	31.17
сумма	99.70	99.69	99.18	99.71	99.46	99.94	98.88
Число атомов в формуле							
Cu	23.65	24.08	23.82	24.06	23.70	23.96	24.33
Fe	1.41	1.20	1.30	0.78	0.97	0.77	1.05
Zn	0.97	0.76	0.94	1.17	1.30	1.23	0.67
сумма	26.03	26.04	26.06	26.01	25.97	25.96	26.05
V	1.88	1.76	1.64	1.78	1.95	1.97	1.71
W	0.03	0.01	0.06	0.17	0.02	0.05	0.05
Mo	0.06	0.20	0.29	0.07	0.02	–	0.21
сумма	1.97	1.97	1.99	2.02	1.99	2.03	1.97
Ge	3.23	3.31	3.59	3.73	3.81	3.84	4.01
Ga	0.07	0.06	0.05	–	–	–	0.03
As	2.56	2.45	2.16	2.08	2.09	1.99	1.67
Sb	–	–	–	0.02	–	–	–
Sn	0.25	0.24	0.27	0.25	0.24	0.22	0.34
Te	–	–	–	–	0.01	–	–
сумма	6.11	6.05	6.07	6.08	6.15	6.05	6.05
S	31.89	31.93	31.88	31.89	31.89	31.96	31.93

Примечание. Электронный микросонд Jeol SM-6480 LV, аналитик В.О. Япаскurt.

ства W и Mo (до 1 мас.%), беден Ga и Sb. Состав германоколусита отвечает формуле  $Cu_{20}(Cu_{3.65-4.33}Fe_{0.77-1.41}Zn_{0.67-1.30}V_{5.96-6.06}W_{1.64-1.97}Mo_{0-0.29}S_{1.97-2.03})(Ge_{3.23-4.01}As_{1.67-2.56}Sn_{0.22-0.34}Ga_{0-0.07}Sb_{0-0.02}Te_{0-0.01})_{6.05-6.15}S_{31.88-31.96}$  (табл. 2). В отраженном свете германоколусит Цумеба отчетливо желтый, изотропный; интенсивность желтой окраски заметно ниже, чем у германийсодержащего колусита.

## Обсуждение результатов

Для эпитермальна́я минерализация Цумеба типоморфны сложные сульфиды Cu-V-Ge-As – минералы ряда колусит – германоколусит, развитые в колчеданно-полиметаллических рудах, замесивших морские углеродистые доломиты, обогащенные ванадием. В колчеданных рудах Цумеба, замесивших калишпатовые кварциты и

кварц-мусковитовые метасоматиты, развитые по кремнекислым вулканитам и их брекчиям, минералов группы колусита практически нет. По составу между колуситом и германоколуситом установлен непрерывный переход.

## Благодарности

Авторы благодарны Л.А. Паутову и С.Н. Ненашевой за ряд конструктивных замечаний.

Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ кафедры минералогии геологического факультета МГУ с использованием оборудования, полученного по программе развития МГУ им. М.В. Ломоносова.

## Список литературы:

Вулканогенные колчеданно-полиметаллические месторождения (на примере Рудного Алтая) (ред. Г.Ф. Яковлев). М.: изд. МГУ. 1978. 231 с.

Ерёмин Н.И., Дергачёв А.Л., Сергеева Н.Е., Позднякова Н.В. Типы колчеданных месторождений вулканической ассоциации // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42. № 2. С. 176-188.

Качаловская В.М., Осипов Б.С., Кукоев В.А., Козлова Е.А., Басова Г.В. Колусит, арсеносульванит и сульванит месторождения Бор (Югославия). В кн.: Минералы и паранегезисы минералов эндогенных месторождений. Л.: Наука. 1975. С. 98-104.

Ненашева С.Н., Паутов Л.А. О германоколусите из Кипуши (Катанга) // Новые данные о минералах. Тр. Минерал. музея РАН им. А.Е. Ферсмана. 2003. Вып. 38. С. 41-44.

Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: ИЛ. 1962. 1132 с.

Спиридонов Э.М. Майкаиит  $Cu_{20}(Fe,Cu)_6Mo_2Ge_6S_{32}$  и овамбоит  $Cu_{20}(Fe,Cu,Zn)_6W_2Ge_6S_{32}$  - новые минералы колчеданно-полиметаллических руд // Докл. РАН. 2003. Т. 393. № 6. С. 1-4.

Спиридонов Э.М. Вулканогенные эпитегрмальные, мезотермальные, гипотермальные (ксенотермальные) месторождения золота и их минерально-геохимические особенности. В кн.: Вулканизм и геодинамика. Т. 2. Петропавловск-Камчатский. 2009. С. 814-817.

Спиридонов Э.М., Бадалов А.С., Ковачев В.В. Стибиоколусит  $Cu_{26}V_2(Sb,Sn,As)_6S_{32}$  - новый минерал // Докл. АН СССР. 1992а. Т. 324. С. 411-414.

Спиридонов Э.М., Качаловская В.М., Бадалов А.С. Разновидности колусита. О ванадиевом и ванадиево-мышьяковистом «германите» // Вестн. МГУ. Сер. геол. 1986. № 3. С. 60-69.

Спиридонов Э.М., Качаловская В.М., Ковачев В.В. Германоколусит  $Cu_{26}V_2(Ge,As)_6S_{32}$  - новый минерал // Вестн. МГУ. Геология. 1992б. № 6. С. 50-54.

Спиридонов Э.М., Мурашко М.Н. Генетическая минералогия Ge, Ga, W, Mo, V, Sn эндогенных руд колчеданно-полиметаллического месторождения Цумеб, Намибия. В кн.: Современная минералогия: от теории к практике. СПб.: 2010. С. 277-279.

Франклин Дж. М., Лайдон Дж.У., Сангстер Д.Ф. Колчеданные месторождения вулканической ассоциации. В кн.: Генезис рудных месторождений. М.: Мир. 1984. Т. 2. С. 39-252.

Чвилёва Т.Н., Безмертная М.С., Спиридонов Э.М., Агроскин А.С., Папаян Г.В., Виноградова Р.А., Лебедева С.И., Завьялов Е.Н., Филимонова А.А., Петров В.К., Пау-

тиан Л.П., Свешиникова О.Л. Справочник-определитель рудных минералов в отражённом свете. М.: Недра. 1988. 505 с.

Шнейдерхён Г. Месторождения полезных ископаемых. М.: ИЛ. 1958. 501 с.

Юдин И.М. Медное месторождение Коунрад. М.: изд. МГУ. 1969. 149 с.

Юшкин Н.П., Иванов О.К., Попов В.А. Введение в топоминералогия Урала. М.: Наука. 1986. 294 с.

Berman H., Gonyer F.A. Re-examination of colusite // Amer. Mineral. 1939. Vol. 24. P. 377-381.

Chetkovic L., Pacevski A., Tonicic T. Occurrence of Sn-bearing colusite in the ore body «T» of the Bor copper deposit, Serbia // Geology of Ore Deposits. 2013. Vol. 55. P. 298-304.

Chetty D., Frimmel H.E. The role of evaporites in the genesis of base-metal sulfide mineralization the Northern Platform of the Pan-African Damara belt, Namibia: geochemical and fluid inclusion evidence from carbonate wall rock alteration // Mineral. Deposita. 2000. Vol. 35. P. 364-376.

Dunn P.J. Rare minerals of the Kombat Mine // Mineral. Rec. 1991. Vol. 22. P. 421-425.

Gebhard G. Tsumeb, a unique mineral locality. Grossensseifen: GG Publishing. 1999. 328 s.

Geier B.H., Ottemann I. New primary vanadium-, germanium-, gallium-, and tin-minerals from the Pb-Zn-Cu deposit Tsumeb, South West Africa // Mineral. Deposita. 1970. Vol. 5. P. 29-40.

Landon R.E., Mogilnor A.H. Colusite, a new mineral of the sphalerite group // Amer. Mineral. 1933. Vol. 18. P. 528-533.

Levy C. Contribution a la mineralogie des sulfures de cuivre du type  $Cu_3XS_4$  // Mém. Bureau Recher. Géol. Miniér. 1968. Vol. 54. P. 1-178.

Lombaard A.E., Güttchel A., Innes J., Krüger T.L. The Tsumeb lead-copper-zinc-silver deposit, South West Afrika, Namibia. In: Mineral Deposits of Southern Africa. 1986. P. 1761-1787.

Matsubara S., Miyawaki R. Catalogue of Japanese Minerals. National Science Museum, Tokyo. 2006.

Miller W.J., Craig J.R. Ore minerals of the Cofer volcanogenic massive sulfide deposit, Louisa county, Virginia // Canad. Mineral. 1997. Vol. 35. P. 1465-1483.

Murdoch I. X-ray investigation of colusite, germanite, and renierite // Amer. Mineral. 1953. Vol. 38. P. 794-801.

Nelson R. Colusite - its occurrence, paragenesis and genetic significance // Amer. Mineral. 1939. Vol. 24. P. 369-376.

Orlandi P, Merlino S, Duchi G, Vezzalini G. Colusite: a new occurrence and crystal chemistry // Canad. Mineral. 1981.

Vol. 19. P. 423-427.

Orlandi P., Criscuolo A. Minerali del marmo delle Alpi Apuane (Pacini ed.). Pisa: 2009. 180 p.

Passchier C.W., Trouw R., Ribeiro A., Paciullo F. Tectonic evolution of the southern Kaoko belt, Namibia // J. African Earth Sci. 2002. Vol. 35. P. 61-75.

Pinch W.W., Wilson W.E. TSUMEB! The world's greatest mineral locality // Mineral. Record. 1977. Vol. 8. N 3. 128 p.

Pollard P., Taylor R.G. Paragenesis of the Grasberg Cu–Au deposit, Irian Jaya, Indonesia // Mineral. Deposita. 2003. Vol. 37. P. 117-136.

Schneiderhöhn H., Söhnge P.G., Geier B.H. Zur erforschungsgeschichte der erze der Tsumeb-Mine und der geologischen verhältnisse des Otaviberslands, SW-Afrika // Neues Jahrb. Mineral. Mitt. 1958. Bd. 6. S. 125-136.

Sillitoe R.H. Porphyry copper systems // Econ. Geol. 2009. Vol. 104. P. 3-41.

Söhnge P.G. The Tsumeb story, pipe-like, massive-sulphide ore body appears to fill volcanic pipe in depth // Mining World. 1952. Vol. 14. № 6. P. 22-24.

Spiridonov E.M., Chvileva T.N., Badalov A.S. Antimony-bearing colusite,  $\text{Cu}_{26}\text{V}_2\text{As}_2\text{Sb}_2\text{Sn}_2\text{S}_{32}$ , of the Kairagach deposit and on the varieties of colusite // Internal. Geol. Rev. 1984. Vol. 26. P. 534-539.

Spry P. G., Merlino S., Wang S., Zhang X., Buseck P. R. New occurrences and refined crystal chemistry of colusite, with comparisons to arsenosulvanite // Amer. Mineral. 1994. Vol. 79. P. 750-762.

Strashimirov S., Petrunov R., Kanazirski M. Porphyry-copper mineralisation in the central Srednogorie zone, Bulgaria // Mineral. Deposita 2002. Vol. 37. P. 587-598.

Wagner T., Monecke T. Germanium-bearing colusite from the Waterloo volcanic-rock-hosted massive sulfide deposit, Australia: crystal chemistry and formation of colusite-group minerals // Canad. Mineral. 2005. Vol. 43. P. 655-69.

Yamamoto M., Mitsusino C. Germanium-bearing colusite from the Yanahara mine, Japan, and its significance to ore genesis // Resource Geology. 1994. Vol. 44. P. 33-38.