

## Особенности состава и условия образования крупного самородка меди из Тайметского месторождения (Горная Шория, Россия)

Ф. П. Леснов, В. Н. Королюк,  
А. В. Вишнеvский, Н. М. Подгорных

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН,  
г. Новосибирск

felix@igm.nsc.ru  
camebax@igm.nsc.ru  
vishnevsky@igm.nsc.ru  
nmpodgornykh@yandex.ru

### Аннотация

Изложены результаты исследования крупного самородка меди из Тайметского месторождения (Горная Шория, Россия). Месторождение расположено в Южной Сибири в плохо обнаженной местности и локализовано среди базальтов, трахибазальтов и пирокластических отложений нижнекембрийской усть-анзасской свиты, в которых широко распространены пористые и раздробленные участки. Самородок хранится в Центральном Сибирском геологическом музее (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, музейный № 1-2/30). При массе около 700 кг его максимальные размеры составляют 0,25×0,65×1,4 м. Изучение состава двух фрагментов самородка выполнено с помощью электронно-зондового микроанализатора JEOL JXA-8230 с волновыми спектрометрами, растрового электронного микроскопа TESCAN Mira 3 с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-Max 50 и рамановского спектрометра Horiba Lb HR800. Результаты исследования показали достаточно однородное распределение меди при ее среднем содержании более 99 мас. %. Из числа элементов-примесей отмечаются Si, Fe, Mn, S, Hg, Sr, Ga и Ag. Среди них наибольшее содержание у серебра – в среднем 0,050 мас. %. В образцах выявлены разноразмерные (5–200 мкм, реже до 1 мм) микровключения идиоморфных кристаллов кварца и датолита, ксеноморфные выделения кальцита и калиевого полевого шпата, а также субмикроскопические зерна ртутистого серебра. Обнаружены мелкие полости, частично или полностью заполненные кварцем и кальцитом вместе с подчиненными им купритом, хризokolлой и малахитом. Предполагается, что перенос меди осуществлялся в процессе инфильтрации очень бедных серой восстановленных гидротермальных растворов в составе комплексов с лигандами преимущественно углеводов и уголекислоты с последующим их распадом и формированием самородка меди.

### Ключевые слова:

медь, крупный самородок, геохимия, минералогия, Тайметское месторождение, Горная Шория, Россия

## Composition characteristics and formation conditions of a large copper nugget from the Taymet deposit (Gornaya Shoria, Russia)

F. P. Lesnov, V. N. Korolyuk,  
A. V. Vishnevsky, N. M. Podgornykh

Institute of Geology and Mineralogy named after V. S. Sobolev of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

felix@igm.nsc.ru  
camebax@igm.nsc.ru  
vishnevsky@igm.nsc.ru  
nmpodgornykh@yandex.ru

### Abstract

The paper contains the study results of a large copper nugget from the Taymet deposit (Gornaya Shoria, Russia). The deposit is situated in Southern Siberia in a poorly bare terrain and is located among basalts, trachybasalts and pyroclastic deposits of the Lower Cambrian Ust-Anzas Formation, in which porous and fragmented areas are widespread. The nugget is kept in the Central Siberian Geological Museum (Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, museum № 1-2/30). With the weight of about 700 kg, its maximum dimensions are 0.25×0.65×1.4 m. The composition of two fragments of the nugget was studied using the JEOL JXA-8230 electron probe microanalyzer with wave spectrometers, TESCAN Mira 3 scanning electron microscope with Oxford X-Max 50 energy dispersive spectrometer and the Horiba Lb HR800 Raman spectrometer. By the obtained results, copper is evenly distributed with its average content of more than 99 wt. %. The impurity elements are Si, Fe, Mn, S, Hg, Sr, Ga and Ag. Among them, silver content has the maximum value of about 0.050 wt. %. The samples are revealed for different-size (5–200 μm, seldom up to 1 mm) microinclusions of euhedral crystals of quartz and datolite, xenomorphic segregations of calcite and potassium feldspar, as well as submicroscopic grains of mercuric silver. There are small cavities partially or completely filled with quartz and calcite, along with their subordinate cuprite, chrysocolla and malachite. The transfer of copper is assumed to be carried out during the infiltration of reduced hydrothermal solutions, which are very poor in sulfur, in the composition of complexes with ligands predominantly of hydrocarbons and carbon dioxide, followed by their decomposition and the formation of a copper nugget.

### Keywords:

copper, large nugget, geochemistry, mineralogy, Taymet deposit, Gornaya Shoria, Russia

## Введение

Самородная медь в природе чаще всего встречается в виде рассеянной мелкой вкрапленности, пластинок и небольших дендритов. Значительно реже она представлена обособлениями (самородками) весом от первых килограммов до нескольких тонн, содержание меди в которых обычно превышает 90 мас. %. Проявления вкрапленности и крупных обособлений самородной меди известны во многих магматических провинциях Мира. Они также встречаются в некоторых регионах Сибири, в том числе в Кузнецком Алатау, Северо-Минусинской и Южно-Минусинской впадинах.

Одним из известных районов находок самородков меди в России является Тайметское месторождение, расположенное в Горной Шории на водоразделе ре

к Таймет и Пызас и относящееся к медно-эпидотовой формации. Первое сообщение об обнаружении крупного самородка меди на этом месторождении появилось в 1931 г. Месторождение находится в плохо обнаженной местности и локализовано в образованиях усть-анзасской свиты нижнего кембрия, представленных пористыми и часто раздробленными оливиновыми и безоливиновыми базальтами, меланобазальтами, трахибазальтами и пирокластическими отложениями. Оруденение контролируется миндалекаменными зонами в кровле базальтовых потоков, горизонтами обломочных пород и послонными трещинами. Медная минерализация представлена рассеянной вкрапленностью, прожилками, жилами и редко встречающимися самородками различного размера. В зоне окисления рудных тел выявлены такие минералы, как куприт, малахит, азурит, халькозин, брошантит, хризоколла [1].

Наиболее крупный самородок меди массой 3,3 т из этого месторождения был обнаружен и доставлен геологом В. Ф. Коновальцевым в г. Сталинск (ныне Новокузнецк) в 1959 г. (рис. 1). По результатам химического анализа содержание меди в пробах, отобранных из этого самородка, составило от 53 до 97 мас. %. Методом спектрального анализа в нем обнаружены элементы-примеси Hg, Zn, Mn, Ba, Sr, Ni, Co, Ga, Be [2].

В начале 90-х гг. XX в. на Тайметском месторождении студентами-геологами из минералогического общества «Кристалл» при Новосибирском государственном университете в слабо обнаженной местности был обнаружен еще один крупный самородок меди. В 2009 г. под руководством Н. М. Подгорных его доставили в Центральный Сибирский геологический музей при Институте геологии и минералогии СО РАН. Самородок имел ноздреватую поверхность и был по-

крыт пленкой окисления. При массе порядка 700 кг его размеры составили 0,25×0,65×1,4 м (рис. 2).

В работе представлены результаты исследования геохимии и минералогии этого самородка меди с помощью современных аналитических методов. На основе полученных данных предполагается, что самородок образовался в процессе инфильтрации восстановленных и крайне бедных серой медьсодержащих постагматических гидротермальных растворов в крупную полость в базальтах.



Рисунок 1. Самородок меди из Тайметского месторождения весом 3,3 т, находящийся в экспозиции Кемеровского филиала Территориального фонда геологической информации по Сибирскому федеральному округу (г. Новокузнецк). Фото из открытого источника.

Figure 1. The copper nugget from the Taymet deposit weighing 3.3 tons, on the exposition at the Kemerovo Branch of the Territorial Fund of Geological Information for the Siberian Federal District (Novokuznetsk). Photo from an open source.



Рисунок 2. Крупный самородок меди из Тайметского месторождения массой около 700 кг. Слева – на месте его обнаружения, справа – в экспозиции Центрального Сибирского геологического музея при Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск).

Figure 2. The large copper nugget from the Taymet deposit weighing about 700 kg. Left photo was taken at the place where it was found, right – on exposition at the Central Siberian Geological Museum at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (Novosibirsk).



## Материалы и методы

Отбор материала для изучения самородка меди (СМ) из Тайметского месторождения, хранящегося в Центральном Сибирском геологическом музее (музейный № I-2/30), проводили следующим образом. Из двух удаленных друг от друга участков самородка с глубины около 1 см от его поверхности были отрезаны фрагменты массой в несколько граммов каждый. С целью сопоставления таким же способом отобран фрагмент из хранящегося в этом же музее образца генетически родственного самородка меди из широко известной меденосной провинции на п-ове Кивино (штат Мичиган, США) (музейный № I-2/11). Эти три фрагмента СМ вмонтировали в эпоксидную шашку-препарат (рис. 3) для изучения их состава с помощью электронно-зондового микроанализатора JEOL JXA-8230, растрового электронного микроскопа TESCAN Mira 3 с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-Max 50 и рамановского спектрометра Horiba Lb HR800 в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). Определение концентрации меди, а также элементов-примесей, содержание которых предположительно могло быть в пределах возможностей микроанализатора JEOL JXA-8230, выполняли в автоматическом режиме путем сканирования вдоль линий с шагом 0,1 мм, т. е. без визуального контроля позиций точек анализа. Поэтому часть анализов пришлось на места с разного рода дефектами, что приводило к искажению содержания определяемых элементов. Для исключения этих погрешностей из массива аналитических данных была выполнена их разбраковка

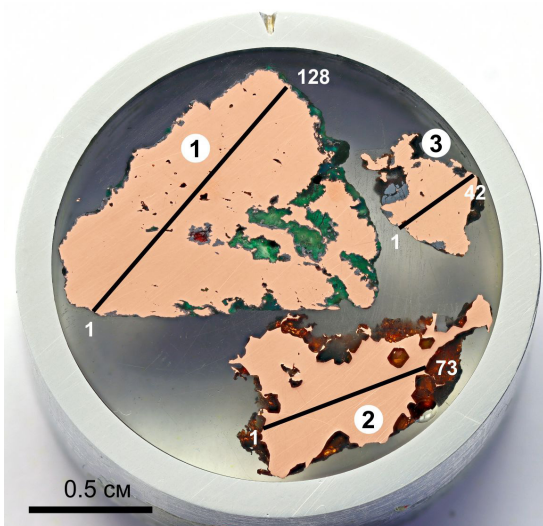


Рисунок 3. Шашка-препарат с фрагментами самородной меди. 1 и 2 – фрагменты самородка из Тайметского месторождения (музейный № I-2/30); 3 – фрагмент самородка из месторождения на п-ове Кивино (музейный № I-2/11). Черными линиями указаны направления сканирования с шагом 0,1 мм. Цифры рядом с ними указывают на положение первых и последних точек измерения.  
Figure 3. The checker-preparation with fragments of native copper. Symbols: 1 and 2 – fragments of a nugget from the Taymet deposit (museum № I-2/30); 3 – fragment of a nugget from a deposit on the Keweenaw Peninsula (museum № I-2/11). Black lines indicate scanning directions in 0.1 mm increments. The numbers next to them indicate the position of the first and last measurement points.

с использованием статистического  $\gamma$ -критерия [3]. Кроме этого, в 20 произвольно выбранных визуально бездефектных точках в фрагментах СМ было выполнено определение содержания Ag и Au. Минеральную принадлежность обнаруженных в образцах меди фаз устанавливали по результатам анализов, выполненных на разных участках их поверхности. Для подтверждения правильности диагностики водосодержащих минералов и датолита привлекался метод рамановской спектроскопии. Для получения спектров использовали прибор Horiba Labram HR800 в ИГМ СО РАН, оборудованный 532 nm Nd:YAG лазером и микроскопом Olympus BX41. Перед началом измерений была выполнена калибровка по кремниевому стандарту ( $520,5 \pm 1 \text{ см}^{-1}$ ). Для идентификации минералов применяли базу данных проекта RRUFF (<https://rruff.info/>) и опубликованные результаты в научной литературе. Корректировку позиции базовой линии проводили с помощью ПО Opus.

## Результаты и их обсуждение

Откорректированные с использованием статистического  $\gamma$ -критерия аналитические данные показали, что

Таблица 1

Результаты электронно-зондового микроанализа фрагментов самородков меди из Тайметского месторождения и месторождения полуострова Кивино, мас. %

Table 1

Results of the electron probe microanalysis of fragments of copper nuggets from the Taymet and the Keweenaw Peninsula deposits, wt. %

Параметры	Cu	Si	Fe	Mn	S	Sr	Hg	Ga	Ag
Месторождение Тайметское, обр. 1									
	$m=128$								$n=20$
$\bar{c}$	99,72	0,012	0,004	0,003	0,010	0,004	0,011	0,005	0,047
$S$	0,52	0,020	0,001	0,001	0,006	0,005	0,011	0,006	0,007
$min$	98,40	0,001	0,001	0,001	0,002	н. п.	н. п.	н. п.	0,032
$max$	100,79	0,024	0,012	0,008	0,051	0,019	0,044	0,022	0,054
Месторождение Тайметское, обр. 2									
	$m=73$								$n=20$
$\bar{c}$	99,85	0,019	0,006	0,003	0,013	0,003	0,009	0,004	0,053
$S$	0,70	0,065	0,008	0,001	0,013	0,004	0,011	0,006	0,004
$min$	98,43	0,003	0,002	н. п.	0,003	н. п.	н. п.	н. п.	0,044
$max$	100,96	0,577	0,071	0,006	0,087	0,019	0,060	0,026	0,061
Месторождение полуострова Кивино									
	$m=42$								$n=20$
$\bar{c}$	99,78	0,013	0,005	0,002	0,012	0,003	0,009	0,004	0,067
$S$	0,62	0,008	0,001	0,001	0,006	0,005	0,010	0,005	0,011
$min$	98,70	0,0103	0,002	н. п.	0,005	н. п.	н. п.	н. п.	0,033
$max$	100,89	0,038	0,007	0,004	0,029	0,016	0,036	0,016	0,076

Условные обозначения.  $\bar{c}$ ,  $S$  – среднее значение и стандартное отклонение содержания элемента соответственно;  $min$  и  $max$  – минимальные и максимальные значения;  $m$  – количество точек измерения вдоль профилей (за исключением ошибочных результатов);  $n$  – число определений концентрации серебра в произвольно выбранных точках измерения; н. п. – содержание элемента ниже предела обнаружения.

Keys:  $\bar{c}$ ,  $S$  – average value and standard deviation of element's content, respectively;  $min$  and  $max$  – minimum and maximum values;  $m$  – number of measurement points along profiles (excluding error results);  $n$  – number of silver concentration determinations at randomly selected measurement points; н.п. – element's content is below the detection limit.

в СМ из Тайметского месторождения и месторождения п-ва Кивино среднее содержание Cu превысило 99 мас. %, и в этом отношении самородки значимо не различаются (табл. 1). Помимо Cu фрагменты СМ анализировали на ряд элементов-примесей: Si (10), S (10), Mn (10), Fe (10), Co (20), Ni (30), Zn (30), Ga (20), As (30), Sr (30), Ba (30), Ag (70), Au (300), Hg (90) и Pb (30). В скобках указаны пределы обнаружения элементов в г/т, обеспечиваемые с доверительной вероятностью 68,3 % для методики электронно-зондового микроанализа, использованной в работе. Из приведенного перечня элементов только содержание Si, S, Mn, Fe, Sr, Ga, Ag и Hg в отдельных точках измерения незначительно превышало пределы их обнаружения. В СМ из обоих месторождений наибольшая концентрация установлена для Ag, содержание которого в образце из Тайметского месторождения оказалось меньше, чем в СМ из месторождения п-ова Кивино. Сравнение этих средних значений по статистическому t-критерию показало, что они значимо различаются с вероятностью 95 %. Исходя из результатов определений, можно констатировать, что для настолько низкого содержания большинства элементов-примесей чувствительность электронно-зондового микроанализа недостаточна для получения достоверных данных.

В фрагментах СМ из Тайметского месторождения непосредственно в меди были выявлены разноразмерные (5–200 мкм, реже до 1 мм) включения идиоморфных кристаллов кварца и датолита, а также ксеноморфные выделения кальцита и калиевого полевого шпата (рис. 4, табл. 2). Первоначально датолит был идентифицирован по соотношению определяемых компонентов (Ca, Si), а также по присутствию в рентгеновском спектре характеристической линии бора. Его количественное содержание определить не представлялось возможным. Поэтому минеральная принадлежность фазы к датолиту была подтверждена по его рамановскому спектру.

Во фрагменте СМ из месторождения п-ова Кивино обнаружены единичные зерна кварца, калиевого полевого шпата, эпидота, округлые выделения халькозина, нередко ассоциирующего с мелкими (1–5 мкм) ксеноморфными зернами ртутистого серебра.

Кроме того, в СМ из обоих месторождений присутствуют различные по размеру и форме мелкие полости, частично или полностью заполненные разными минералами (рис. 3, 5 а). Минеральное заполнение полостей в самородке из Тайметского месторождения часто состоит из нескольких зон. Анализы, выполненные

с помощью энергодисперсионного спектрометра растрового микроскопа, показали, что зоны шириной от 10–20 до 200–300 мкм, непосредственно прилегающие к меди, представлены купритом, в ассоциации с которым нередко наблюдаются мелкие (обычно <2 мкм) ксеноморфные выделения ртутистого серебра (4–9 мас. % Hg). За ними по направлению к центру полостей расположена зона, шириной от десятков мкм до первых мм, сложенная зеленовато-синей хризоколлой – водосодержащим силикатом меди и тонкозернистым хризоколла-малахитовым агрегатом (рис. 3, 5 б, с, d). Центральная часть полостей сложена преимущественно малахитом и кальцитом, причем последний часто заполняет подавляющую долю их объема (рис. 5 d). Кроме того, агрегат вторичных медных минералов, в основном состоящий из хризоколлы и малахита, локализован в трещинах спайности в крупных зернах кальцита и по диагональным направлениям относительно сети трещин спайности (рис. 5 d).

В полостях достаточно широко представлены кварц, калиевый полевой шпат и альбит, слагающие отдельные зерна и гнезда в кальците или агрегатах эпигенетических

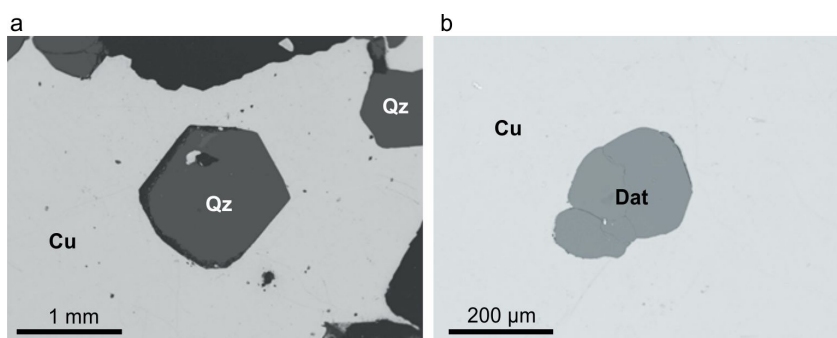


Рисунок 4. Микровключения идиоморфных кристаллов кварца (а) и датолита (б) в самородной меди Тайметского месторождения.

Figure 4. Microinclusions of quartz (a) and datolite (b) crystals in native copper from the Taymet deposit.

Химический состав кальцита, датолита, калиевого полевого шпата и эпидота из включений в самородной меди из Тайметского месторождения, мас. %

Chemical composition of calcite, datolite, potassium feldspar and epidote from inclusions in native copper from the Taymet deposit, wt. %

№ зерна	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сумма
Кальцит												
Cu-1.1	0,16	н.п.	0,04	55,69	н.п.	0,08	0,09	н.п.	н.п.	н.п.	0,03	56,09
Cu-1.2	0,11	0,04	0,05	59,04	н.п.	0,13	0,03	0,03	0,05	0,01	0,03	59,51
Cu-1.3	0,03	0,02	0,01	56,85	н.п.	0,01	н.п.	0,05	н.п.	н.п.	0,04	57,00
Cu-1.4	0,13	н.п.	0,03	52,54	н.п.	0,01	0,03	0,02	н.п.	0,02	0,09	52,87
Датолит												
Cu-1.4	38,33	н.п.	0,09	33,56	0,01	0,02	н.п.	0,01	0,01	0,01	0,04	72,06
Cu-1.9	37,74	0,01	0,08	33,88	0,01	0,01	0,02	н.п.	0,01	н.п.	0,01	71,69
Калиевый полевой шпат												
Cu-1.5	64,29	0,07	17,24	н.п.	0,04	0,01	0,01	0,21	16,42	0,01	н.п.	98,29

Примечание. Зерна минералов от Cu-1.1 до Cu-1.9 – из месторождения Тайметское. Концентрация H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> и V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не определялась.

Условное обозначение. Здесь и в табл. 3: н.п. – содержание компонента ниже предела обнаружения. Note. Mineral grains from Cu-1.1 to Cu-1.9 are from the Taymet deposit. The concentrations of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are not determined.

Key here and in Table 3: н.п. – component's content is below the detection limit.

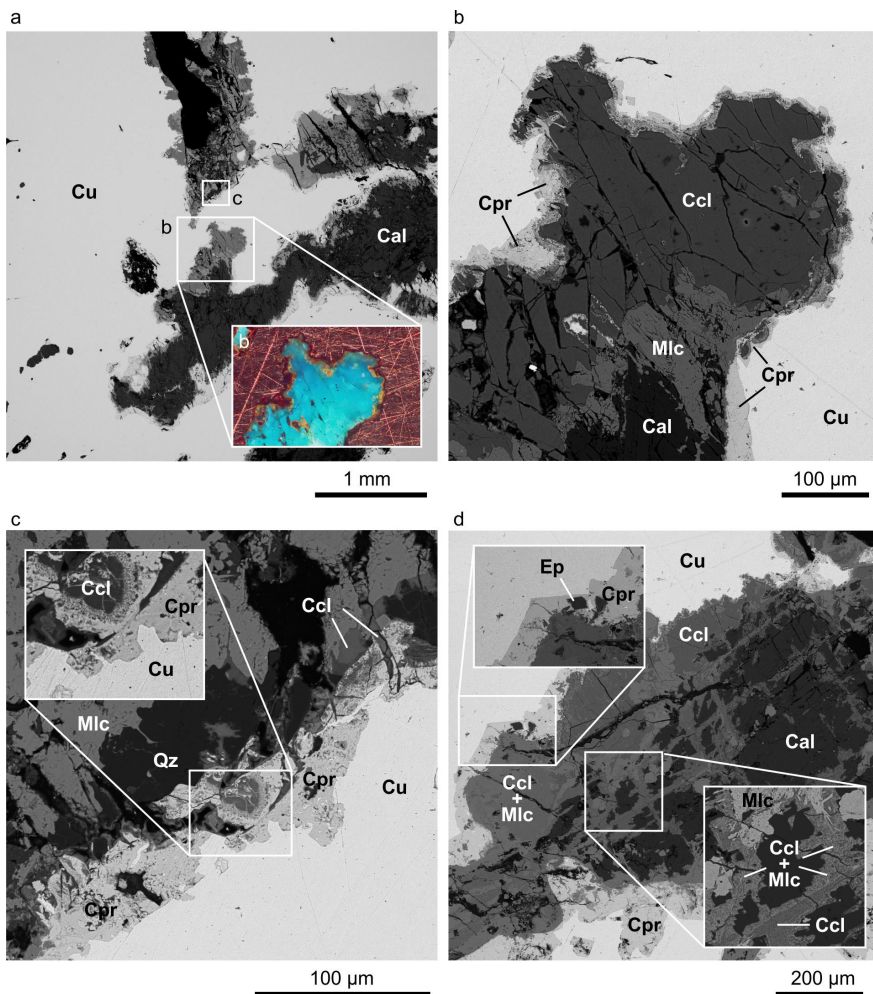


Рисунок 5. Строение и минеральный состав полостей в самородной меди из Тайметского месторождения.

Условные обозначения. Cal – кальцит; Ccl – хризоколла; Cpr – куприт; Cu – медь самородная; Ep – эпидот; Mlc – малахит; Qz – кварц. Изображения получены в обратно рассеянных электронах.

Figure 5. Structure and mineral composition of cavities in native copper from the Taymet deposit.

Keys: Cal – calcite; Ccl – chrysocolla; Cpr – cuprite; Cu – native copper; Ep – epidote; Mlc – malachite; Qz – quartz. SEM BSE images.

Таблица 3  
Химический состав минералов из полостей в самородной меди из Тайметского месторождения, мас. %

Table 3  
Chemical composition of minerals from cavities in native copper from the Taymet deposit, wt. %

№ зерна	Минерал	SiO <sub>2</sub>	FeO	MgO	CaO	CuO	Сумма
4-51	Малахит	0,5	н.п.	н.п.	н.п.	70,3	70,8
2-30	То же	н.п.	н.п.	н.п.	0,2	69,8	70,0
2-27	Хризоколла	35,4	н.п.	н.п.	0,3	50,6	86,3
5-55	То же	36,1	н.п.	н.п.	0,4	50,3	86,8
4-39	Бисбиит (?)	42,5	0,6	8,9	0,3	36,1	88,4

Примечание. Анализы выполнены с помощью энергодисперсионного спектрометра Oxford X-Max 50 на растровом электронном микроскопе Tescan Mira 3.

Note. Analyses were performed using the Oxford X-Max 50 energy dispersive spectrometer and the Tescan Mira 3 scanning electron microscope.

медных минералов, причем расположение этих скоплений приурочено преимущественно к периферии полостей (рис. 5 с). Подобную позицию занимают и выделения эпидота с датолитом, образующие гроздьевидные скопления

ксеноморфных зерен, располагающиеся, главным образом, в зоне развития куприта, т. е. на участках, непосредственно примыкающих к самородной меди. В единичных случаях встречается халькозин, содержащий до 0,5 мас. % Ag, а также минерал, близкий по составу к хризоколле или сходному с ней силикату меди (например, планшеиту), но содержащий больше SiO<sub>2</sub> и до 10 мас. % MgO (табл. 3). В литературе минерал похожего состава иногда называют бисбиитом [4], однако в списке минералов, утвержденных Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциацией, он не значится.

В центральной части крупного фрагмента меди из Тайметского месторождения обнаружена незаполненная силикатами и карбонатами полость диаметром 2–3 мм, по своим морфологическим особенностям идентичная заполненным полостям (см. рис. 3, фрагмент 1). Ее стенки инкрустированы пористым микрозернистым и иногда микродрузовым агрегатом куприта с редкими зернами ртутистого серебра. По-видимому, эта полость была изолирована от поступления новых порций раствора на этапе массового образования силикатов и карбонатов меди и кальция в других полостях.

Для подтверждения идентификации бор- и водосодержащих минералов была проведена съемка их рамановских спектров, которые за счет относительно крупного размера зерен и хорошей фокусировки лазерного пучка получились практически без вклада спектральных линий вмещающих или соседствующих фаз. В спектре датолита (рис. 6) присутствуют основные линии 164 и 693 см<sup>-1</sup>, 3499 см<sup>-1</sup> (ОН-группа), а также ряд более слабых – в диапазоне 900–1200 см<sup>-1</sup>, с точностью до ±1 см<sup>-1</sup>, отвечающие модам колебаний BO, CaO и SiO в соответствующем окружении в структуре датолита [5]. Линии, полученные для хризоколлы, менее четкие и менее интенсивные, основные из них – 205–217, 335, 401–407, 482–501 и 681 см<sup>-1</sup> (рис. 6). Кроме того, присутствует линия колебаний ОН-группы с частотой 3629 см<sup>-1</sup>. Положение указанных спектральных линий в целом соответствует имеющимся для хризоколлы в базе RRUFF и данным из работы [6].

По современным представлениям, гидротермальные растворы мантийного, метаморфического и иного гене-



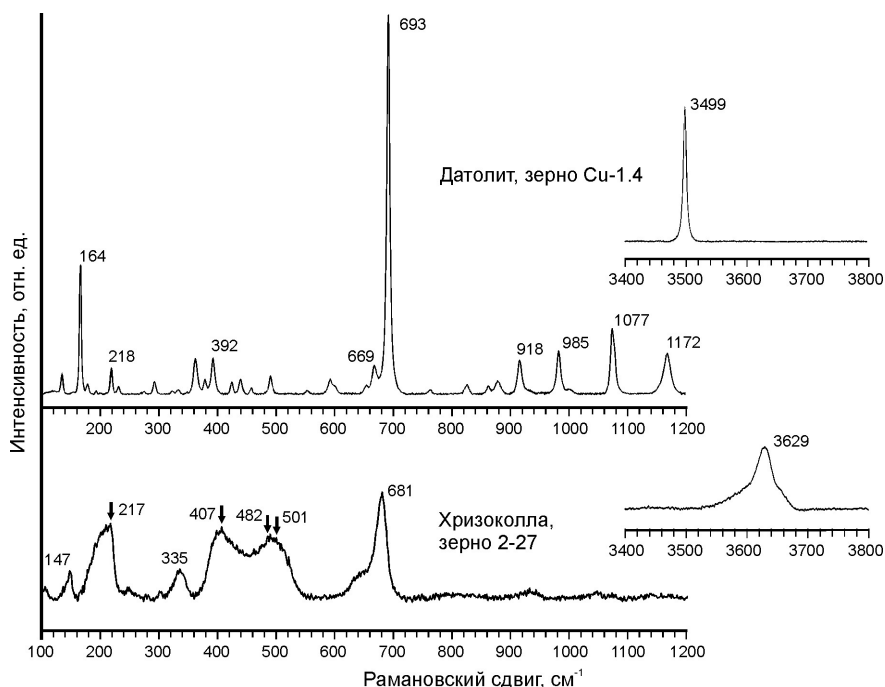


Рисунок 6. Рамановские спектры датолита из включения в самородной меди Тайметского месторождения и хризоколлы, заполняющей полости.  
Figure 6. Raman spectra of datolite from inclusion in native copper of the Taymet deposit and chrysocolla from cavities.

зиса переносят химические элементы в форме ионов, которые посредством ионно-ковалентных связей образуют комплексы с лигандами углеводородов, углекислоты, хлоридов и других соединений. Если удельный вес комплекса окажется ниже удельного веса элемента, то его способность к миграции будет выше, чем у отдельного атома. На геохимических барьерах, т. е. при смене *P-T* условий, окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных потенциалов происходит распад этих комплексов и отложение переносимых ими веществ. Некоторые исследователи полагают, что в большинстве случаев медь транспортируется гидротермальными растворами в составе *Cu*-хлоридных и *Cu*-сульфидных комплексов [7–9], и что при низкой фугитивности серы и кислорода она осаждается именно в самородной форме. В частности, относительно месторождения меди на п-ве Кивино (США) названные авторы полагают, что оно сформировалось в результате восстановления меди из сульфидов слабощелочными метаморфогенными гидротермами во время их инфильтрации сквозь сульфидсодержащие базальты. При этом основным переносчиком меди считается ее хлоридный комплекс. По оценкам названных выше исследователей, восстановление, перенос и отложение меди происходило в температурном интервале 300–500 °С.

При изучении фрагментов самородной меди из Тайметского месторождения не обнаружены сульфиды или сульфаты меди, что может косвенно указывать на низкое содержание серы в питающем гидротермальном растворе. Дополнительно к этому факту результаты исследования хромато-масс-спектрометрическим методом отдельного фрагмента этого самородка, визуально не содержащего какие-либо включения, показали присутствие в нем разнообразных летучих соединений, среди которых су-

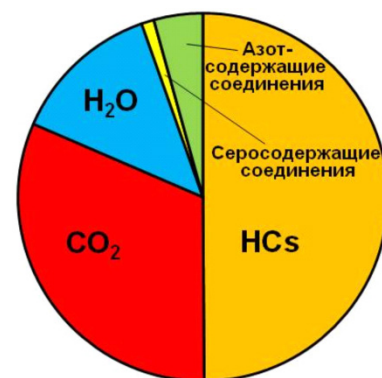
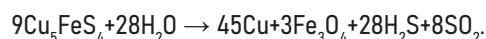
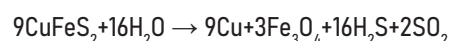


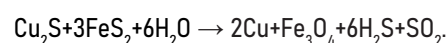
Рисунок 7. Относительное содержание углеводородов (HCs), углекислоты (CO<sub>2</sub>), воды (H<sub>2</sub>O) и азот- и серосодержащих соединений из флюидных включений в самородке меди из Тайметского месторождения [10].  
Figure 7. Relative content of hydrocarbons (HCs), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), water (H<sub>2</sub>O) and nitrogen- and sulfur-containing compounds from fluid inclusions in a copper nugget from the Taymet deposit, according to [10].

щественно преобладали углеводороды и углекислота [10; рис. 7]. Результаты исследований позволяют смоделировать процесс восстановления и переноса меди, который в общем согласуется со сложившимися взглядами на механизмы формирования ее самородков [7–9].

По нашим представлениям, возможен следующий процесс восстановления, переноса и отложения меди в самородном виде. В его основе рассматривается взаимодействие между гидротермальным раствором и медьсодержащими сульфидами из пород, сквозь которые он просачивался. Например, для борнита и халькопирита реакции восстановления меди с присутствующей в растворе водой с последующим удалением из системы сероводорода и сернистого газа на геохимическом барьере могут выглядеть следующим образом:



В качестве продукта этих реакций образуется оксид железа, поскольку у последнего сродство к кислороду значительно выше, чем у меди. При этом удаление сероводорода и сернистого газа должно привести к снижению фугитивности серы и кислорода в системе. Восстановление меди из ее безжелезистых сульфидных фаз, допустим, из халькозина, ассоциирующего с пиритом, может произойти по реакции:



Касаясь возможных условий образования самородка меди из Тайметского месторождения, отметим, что в этом

случае восстановленная медь, вероятно, транспортировалась в составе комплексных соединений с углеводородами, углекислотой и в меньшей степени с другими летучими компонентами, присутствующими в составе гидротермальных растворов не выясненного нами происхождения, и отлагалась в полости в базальте.

Вопрос о времени образования куприта и других эпигенетических минералов меди, обнаруженных в породах самородка, остается дискуссионным. С одной стороны, эти минералы могли образоваться в результате воздействия поздних порций раствора, генетически связанного с формированием самородка. С другой – такая минерализация могла быть обусловлена просачиванием окисленных приповерхностных растворов, значительно оторванных по времени от основного минералообразующего процесса. Свидетельством этому может служить отложение хризоколлы и малахита по трещинам спайности, и, вероятно, деформационным двойниковым швам в кристаллах кальцита (см. рис. 5 d), а также присутствие редких их прожилок в куприте. Однако последний факт и наличие незаполненных карбонатами полостей, инкрустированных купритом, предполагают более раннее формирование куприта по отношению к прочим эпигенетическим минералам меди. Дополнительным аргументом в пользу такого сценария могут быть как полигональность выделений куприта в самородной меди, так и структуры его замещения хризоколлой (рис. 5 с). Образование мелких включений ртутистого серебра в купритовых оторочках связано либо с его высвобождением из самородной меди в процессе окисления, либо с кристаллизацией непосредственно из раствора. Однако постоянное присутствие в выделениях серебра значительных концентраций ртути не нашло явного отражения в составе самородной меди, концентрация ртути в которой в среднем составляет 0,01 мас. %.

## Выводы

1. В самородке из Тайметского месторождения среднее содержание меди превышает 99 мас. %. Среди элементов-примесей в меди по содержанию преобладает серебро, средняя концентрация которого равна 0,050 мас. %.

2. В меди самородка обнаружены разрозненные включения кварца, датолита, кальцита, калиевого полевого шпата. В самородке также присутствуют мелкие полости, частично или полостью заполненные кварцем, кальцитом и подчиненными им купритом с мелкими включениями ртутистого серебра, хризоколлой, малахитом и, возможно, другими фазами.

3. Самородок меди образовался в процессе инфильтрации очень бедных серой восстановленных гидротермальных растворов, содержавших летучие компоненты, в крупную полость в базальтах. В составе последних существенную роль играли углеводороды, в комплексах с лигандами которых транспортировалась медь.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Источники

1. Объяснительная записка к Государственной геологической карте масштаба 1 : 1 000 000. Лист N-45 / под ред. Г. А. Бабина. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской картографической фабрики ВСЕГЕИ, 2007. – 404 с.
2. Синяков, В. И. Крупная плита самородной меди из Горной Шории / В. И. Синяков, Т. А. Чичкова // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1961. – Ч. 90, № 3. – С. 282–283.
3. Смагунова, А. Н. Методы математической статистики в аналитической химии: учебное пособие / В. И. Синяков, О. М. Карпукова. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2012. – 352 с.
4. Laurent, Y. Nouvelles données sur la bisbeeite / Y. Laurent, R. Pierrot // Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie. – 1962. – 85. – P. 177–180.
5. Frost, R. L. Thermal analysis and vibrational spectroscopic characterization of the boro silicate mineral datolite –  $\text{CaBSiO}_4(\text{OH})$  / R. L. Frost, Y. Xi, R. Scholz [et al.] // Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2013. – 115. – P. 376–381.
6. Frost, R. L. Is chrysocolite ( $\text{CuAl}_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) related to serpentine  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ? – A vibrational spectroscopic study / R. L. Frost, Y. Xi // Vibrational Spectroscopy. – 2013. – 64. – P. 33–38.
7. White, W. S. The native-copper deposits of northern Michigan / W. S. White // In: Ore Deposits of the United States, 1933–1967 (Graton Sales Volume); Ridge, J.D., Ed.; American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers: New York, NY, USA. – 1968. – P. 303–325.
8. Bornhorst, T. Copper isotope constraints on the genesis of the Keweenaw Peninsula native copper district, Michigan, USA / T. Bornhorst, R. Mathur // Minerals. – 2017. – 7. – P. 185.
9. Schmidt, C. Copper complexation and solubility in high-temperature hydrothermal fluids: A combined study by Raman, X-ray fluorescence, and X-ray absorption spectroscopies and ab initio molecular dynamics simulations / C. Schmidt, A. Watenphul, S. Jahn [et al.] // Chemical Geology. – 2018. – 494. – P. 69–79.
10. Томиленко, А. А. Геохимия летучих компонентов в крупном штуфе самородной меди из Тайметского месторождения (Горная Шория) / А. А. Томиленко, Ф. П. Леснов, В. Н. Королук // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал. – Новосибирск: Изд-во ИГМ СО РАН, 2023. – С. 189–191.

## References

1. Obyasnitelnaya zapiska k Gosudarstvennoj geologicheskoy karte masshtaba 1:1 000 000. List N-45 [Explanatory note to the State Geological Map at a scale of 1:1,000,000. Sheet N-45]. – SPb: Publishing House of the Saint-Petersburg Cartographic Factory VSEGEI, 2007. – 404 p.
2. Sinyakov, V. I. Krupnaya plita samorodnoj medi iz Gornoy Shorii [Large slab of native copper from Gornaya Shoria] / V. I. Sinyakov, T. A. Chichkova // Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Union

- Mineralogical Society]. – 1961. – Part 90, № 3. – P. 282–283.
3. Smagunova, A. N. Metody matematicheskoy statistiki v analiticheskoy himii. Uchebnoe posobie [Methods of mathematical statistics in analytical chemistry: Tutorial] / A. N. Smagunova, O. M. Karpukova. – Rostov-on-Don: Phoenix Publishing House, 2012. – 352 p.
  4. Laurent, Y. Nouvelles données sur la bisbeeite / Y. Laurent, R. Pierrot // Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie. – 1962. – 85. – P. 177–180.
  5. Frost, R. L. Thermal analysis and vibrational spectroscopic characterization of the boro silicate mineral datolite –  $\text{CaBSiO}_4(\text{OH})$  / R. L. Frost, Y. Xi, R. Scholz [et al.] // Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2013. – 115. – P. 376–381.
  6. Frost, R. L. Is chrysocolla  $(\text{CuAl})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  related to serpertiniite  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ? – A vibrational spectroscopic study / R. L. Frost, Y. Xi // Vibrational Spectroscopy. – 2013. – 64. – P. 33–38.
  7. White, W. S. The native-copper deposits of northern Michigan / W. S. White // In: Ore Deposits of the United States, 1933–1967 (Graton Sales Volume); Ridge, J.D., Ed.; American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers: New York, NY, USA. – 1968. – P. 303–325.
  8. Bornhorst, T. Copper isotope constraints on the genesis of the Keweenaw Peninsula native copper district, Michigan, USA / T. Bornhorst, R. Mathur // Minerals. – 2017. – 7. – P. 185.
  9. Schmidt, C. Copper complexation and solubility in high-temperature hydrothermal fluids: A combined study by Raman, X-ray fluorescence, and X-ray absorption spectroscopies and ab initio molecular dynamics simulations / C. Schmidt, A. Watenphul, S. Jahn [et al.] // Chemical Geology. – 2018. – 494. – P. 69–79.
  10. Tomilenko, A. A. Geohimiya letuchih komponentov v krupnom shtufe samorodnoj medi iz Tajmetskogo mestorozhdeniya (Gornaya Shoriya) [Geochemistry of volatile components in a large ore of native copper from the Taymet deposit (Gornaya Shoria)] / A. A. Tomilenko, F. P. Lesnov, V. N. Korolyuk [et al.] // Ultramafit-mafitovye kompleksy: geologiya, stroenie, rudnyj potencial [Ultramafite-Mafite Complexes: Geology, Structure, Ore Potential]. – Novosibirsk: IGM SB RAS, 2023. – P. 189–191.

#### Благодарность (госзадание):

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН (№ 0330-2018-0023; № 220414001-59-3; № FWZN-2022-0027).

#### Acknowledgements (state task)

The work was performed within the frames of the state tasks of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (№ FWZN-2022-0037; № FWZN-2022-0032; № FWZN-2022-0027).

#### Информация об авторах:

**Леснов Феликс Петрович** – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН (630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-кт академика В. А. Коптюга, д. 3; e-mail: lesnovfp@list.ru).

**Королюк Владимир Николаевич** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН (630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-кт академика В. А. Коптюга, д. 3; e-mail: camebax@igm.nsc.ru).

**Вишневский Андрей Владиславович** – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий Центральным Сибирским геологическим музеем Института геологии и минералогии СО РАН (630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-кт академика В. А. Коптюга, д. 3; e-mail: vishnevsky@igm.nsc.ru).

**Подгорных Николай Михеевич** – кандидат геолого-минералогических наук Института геологии и минералогии СО РАН (630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-кт академика В. А. Коптюга, д. 3; e-mail: nmpodgornykh@yandex.ru).

#### About the authors:

**Felix P. Lesnov** – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Leading Researcher at the V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk, 630090 Russian Federation; e-mail: felix@igm.nsc.ru).

**Vladimir N. Korolyuk** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk, 630090 Russian Federation; e-mail: camebax@igm.nsc.ru).



**Andrei V. Vishnevsky** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk, 630090 Russian Federation; e-mail: vishnevsky@igm.nsc.ru).

**Nikolai M. Podgornykh** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk, 630090 Russian Federation; e-mail: nmpodgornykh@yandex.ru).

**Для цитирования:**

Леснов, Ф. П. Особенности состава и условия образования крупного самородка меди из Тайметского месторождения (Горная Шория, Россия) / Ф. П. Леснов, В. Н. Королюк, А. В. Вишнеvский [и др.] // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 78–86.

**For citation:**

Lesnov, F. P. Osobennosti sostava i usloviya obrazovaniya krupnogo samorodka medi iz Tajmetskogo mestorozhdeniya (Gornaya Shoria, Rossiya) [Composition characteristics and formation conditions of a large copper nugget from the Taymet deposit (Gornaya Shoria, Russia)] / F. P. Lesnov, V. N. Korolyuk, A. V. Vishnevsky [et al.] // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2025. – № 3 (79). – P. 78–86.

Дата поступления статьи: 17.10.2024

Прошла рецензирование: 06.11.2024

Принято решение о публикации: 01.04.2025

Received: 17.10.2024

Reviewed: 06.11.2024

Accepted: 01.04.2025