

УДК 549.27 : 553.48

ЗВЯГИНЦЕВИТ — ПРИРОДНОЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПАЛЛАДИЯ, ПЛАТИНЫ, СВИНЦА И ОЛОВА¹

А. Д. ГЕНКИН, И. В. МУРАВЬЕВА, Н. В. ТРОНЕВА

Приводится описание нового рудного минерала — звягинцевита — $(Pd, Pt)_3(Pb, Sn)$. Рассматриваются его оптические и физические свойства, результаты рентгенометрического, микроспектрального и рентгено-спектрального изучения и условия образования.

В природе известны интерметаллические соединения палладия с мышьяком, сурьмой, висмутом, ртутью, оловом.

При изучении состава минералов платиновой группы из медно-никелевых руд Норильского месторождения с помощью электронного зонда впервые было обнаружено соединение палладия со свинцом (Боровский и др., 1959; Генкин, 1959), которое, однако, из-за небольшого размера выделений остается пока неисследованным. Дальнейшее изучение минералов этих руд, путем использования метода рентгенометрического и микроспектрального анализов зерен, весом в тысячные доли миллиграмма (Генкин, Королев, 1961), позволило обнаружить и более детально описать другое соединение палладия, платины, свинца и олова — $(Pd, Pt)_3(Pb, Sn)$. В честь известного исследователя металлов платиновой группы профессора Ореста Евгеньевича Звягинцева этот минерал назван звягинцевитом (zvyagintsevit).

ТАБЛИЦА 1
Результаты измерения дисперсии отражательной способности (R в %) звягинцевита

λ nm	R	λ nm	R
410	57,6	580	67,6
430	60,6	600	68,6
450	61,4	650	69,4
470	63,7	700	67,6
520	65,2	750	66,0
550	66,8		

Примечание. Измерено на установке Л. Н. Вильсова в Лаборатории минералогии ИГЕМ АН СССР.

Звягинцевит был встречен нами в полированных шлифах из пентландит-халькопиритовых и пентландит-кубанит-халькопиритовых жил Норильского месторождения, залегающих среди андезита — базальтов (рудник Заполярный) и в пикритовых габбро — долеритах (рудник Таймырский) Норильского интрузива (Годлевский, 1959).

Звягинцевит, как и другие минералы платиновой группы, с которыми он постоянно находится в сростании, часто располагается вдоль висящего зальбанды сульфидных жил (Генкин, 1959), где он образует отдельные разоблаченные выделения размером до 0,3 мм среди халькопирита и кубанита. В пентландите наблюдаются скопления зерен звягинцевита неправильной иногда скелетной формы, по периферии постоянно окружающиеся точкой каемкой ферроплатины (фиг. 1, смотри вклейку к стр. 100).

¹ Рассмотрено и рекомендовано к опубликованию Комиссией по новым минералам Всесоюзного минералогического общества 1 марта 1966 г.

Порошок минерала при извлечении из шлифа черный с металлическим блеском.

Е полированных шлифах в отраженном свете минерал обладает белым цветом с кремовым оттенком, хорошо заметным около чисто белых платиновых минералов, находящихся с ним в сростании. При наблюдении в скрещенных николях звягинцевит изотропный. Отражательная способность его (табл. 1) ниже, чем у ферроплатины.

Относительный рельеф звягинцевита заметно ниже, чем у ферроплатины. Микротвердость² составляет 316 $кг/мм^2$, в то время как микротвердость ферроплатины 363 $кг/мм^2$.

Состав звягинцевита первоначально определялся с помощью микроспектрального анализа (Генкин, Королев, 1961). Качественным анализом нескольких зерен в минерале, как главные составные части были установлены палладий и свинец. Из второстепенных элементов были обнаружены олово, платина, железо и никель. Присутствие в сростании с звягинцевитом ферроплатины и пентландита позволило предположить, что наличие платины, железа и никеля в некоторых анализах обусловлено примесью этих минералов. В связи с этим количественным микроспектральным анализом в звягинцевите определялись палладий и свинец³. В спектрах минерала и солевых остатков эталонных растворов палладия и свинца производилось фотометрирование линий палладия 3404,5 Å и линии свинца 2833 Å (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2

Результаты количественного микроспектрального анализа звягинцевита

Объект анализа	Pd — 3404,5 Å			Pb — 2833 Å			Расчет анализов					
	S_L	S_{Φ}	ρ	S_L	S_{Φ}	ρ	проба	элемент	мкг	в ес. %	атомное количество	отношение атомных кол-в
Звягинцевит, проба 1	1,80	0,69	2,44	0,53	0,31	0,49	1	Pd	1,8	61,43	1,68	3
То же, проба 2	1,44	0,73	1,20	0,47	0,34	0,27		Pb	1,13	38,56	0,54	1
Эталонный раствор 5 γ Pb, 2 γ Pd	1,90	0,75	2,60	0,95	0,34	2,05	2	Pd	0,92	60,13	0,86	2,96
То же	1,89	0,73	2,61	0,97	0,32	2,28		Pb	0,61	39,86	0,29	1
Среднее	—	—	2,60	—	—	2,16						

Примечание. S_L — плотность почернения линий; S_{Φ} — плотность почернения фона; $\rho = \frac{I_L}{I_{\Phi}}$; I_L — интенсивность линий; I_{Φ} — интенсивность фона (Генкин, Королев, 1961).

Количественный микроспектральный анализ минерала показал явное преобладание палладия над свинцом. Приближенная формула его на основании данных табл. 2 может быть представлена как Pd_3Pb .

Для уточнения состава звягинцевит исследовался электронным зондом⁴. Качественный анализ обнаружил, что помимо палладия и свинца в состав минерала входят платина и олово, а также незначительные количества меди, железа и никеля. По профилю, перпендикулярному контакту пентландита, ферроплатины и звягинцевита, записано распределение Pd, Pt, Pb и Sn (фиг. 2) со скоростью диаграммной ленты 1,25 м/сек при закреплении спектрометра на двинцах воли аналитических линий палладия (PdL_{α}), платины (PtL_{α}), свинца (PbL_{α}) и олова (SnL_{α}). На правой распределения платины (фиг. 2, а) видно отсутствие платины на

² Измерена Н. Н. Мозговой на приборе ПМТ-3. Нагрузка $\rho=50$ г, экспозиция 10 сек. Прибор тарирован по каменной соли при $\rho=5$ г, $N_{NaCl}=21$ $кг/мм^2$.

³ Линии олова оказались недостаточно интенсивными для фотометрирования.

⁴ Анализ производился на отечественном рентгеновском микроанализаторе МАР-1, в спектральной лаборатории Гиредмета под руководством Н. В. Тронева.

ТАБЛИЦА 3

Результаты определения состава звягинцевита электронным зондом

Элемент	Вс. %	Атомн. кол-ва	Элемент	Вс. %	Атомн. кол-ва
Pd	55,0±5	0,519	Cu	1,0±1	0,014
Pt	7,5±1	0,038	Fe	1,0±1	0,018
Pb	25,0±2	0,121	Ni	1,0±1	0,016
Sn	12,0±2	0,101			

по с значительно большими межплоскостными расстояниями (фиг. 3). При сравнении с рентгенограммами соединений палладия и свинца в системе Pd—Pb, изученной Г. Новотным и др. (Nowotny и др., 1946), выяв-

ТАБЛИЦА 4

Результаты рентгенометрического изучения звягинцевита

Звягинцевит			Синтетический Pd ₃ Pb		
<i>l</i>	<i>d</i> Å	<i>d</i> _{вычисл.}	<i>l</i>	<i>d</i> Å	<i>hkl</i>
			4	4,07	100
5	(2,545)		4	2,886	110
10	2,315	2,320	9	2,335	111
3	(2,204)				
8	2,011	2,009	7	2,014	200
1/2	1,791	1,797	1	1,803	210
			3	1,643	211
2	(1,565)		7	1,423	220
7	1,418	1,421	3	1,343	221
					300
3	(1,332)				
1	1,273	1,272	1	1,273	310
9	1,207	1,211	9	1,213	311
5	1,158	1,159	6	1,160	222
			4	1,112	320
			4	1,074	321
1	1,008	1,005	6	1,004	400
1	1,001				
			4	0,974	410
			1	0,945	330,441
			9	0,921	331
			9	0,897	420
			4	0,878	421
			4	0,855	332
			9	0,819	422
			4	0,804	500,430
			4	0,788	510,431

ляется большое сходство рентгенограмм звягинцевита и синтетического соединения Pd₃Pb (табл. 4). Как и у Pd₃Pb рентгенограмма звягинцевита полностью индицируется, исходя из гранцентрированной кубической ячейки типа Cu₃Al в связи с чем четные и нечетные индексы очень сильные, а смешанные (сверхструктурные линии) очень слабые. Несколько линий со смешанными индексами у звягинцевита отсутствуют, что, по-видимому, связано с большей упорядоченностью структуры минерала по сравнению с синтетическим Pd₃Pb. Размер элементарной ячейки звягинцевита — $a=4,02 \pm 0,01$ Å близок размеру ячейки синтетического Pd₃Pb — 4,021 Å.

Таким образом, изучение состава и рентгенометрических особенностей звягинцевита показывают его большое сходство с синтетическим соединением Pd₃Pb.

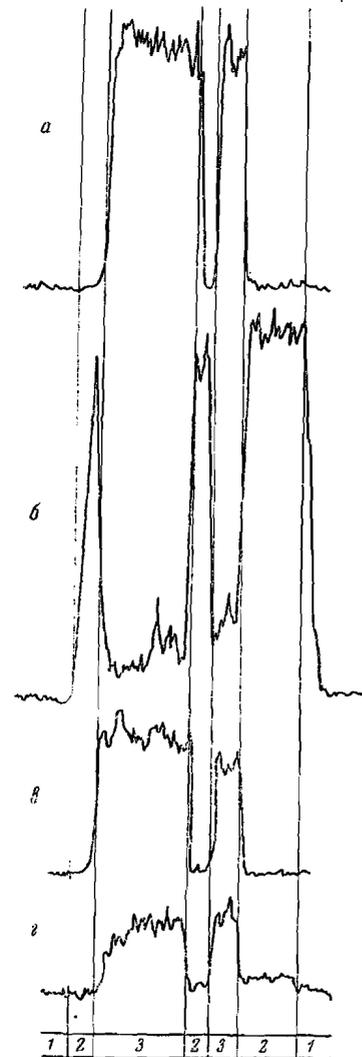
Согласно диаграмме состояния системы Pd—Pb (Nowotny и др., 1946; Хансен, Андерко, 1962) (фиг. 4) в интересующей нас богатой

участке пентландита, ее максимальное количество в ферроплатине и значительно меньшее в звягинцевите. Кривые распределения палладия, свинца и олова показывают, что эти элементы входят лишь в состав звягинцевита.

Для количественного анализа эталонами служили металлические шлифы Pd, Pt, Pb и Sn. Измерение интенсивности (скорости счета) всех аналитических линий L_α, Pd, Pt, Pb и Sn производилось при напряжении 25 и 50 кВ, зонде 2—3μ, на кристаллах слюды со счетчиком Сп-1Р, кварца {1010} со счетчиком Сп-3Р и кварца {1340} со счетчиком МСТР-4. Результаты измерения истинных концентраций с введением поправок по методике, предложенной Л. Бирксом (Birks, 1963), представлены в табл. 3. Правильность введения поправок на поглощение и возбуждение контролировалась на сплавах PdTe₂ и PdBi₂. Разброс найденных значений концентраций в зависимости от «точки» шлифа, точности измерения интенсивностей (нагар от зонда, поправки на мертвое время) и точности внесенных поправок составил в среднем 10% от определяемой величины.

Формула звягинцевита может быть представлена как (Pd_{2,33}Pt_{0,17}Cu_{0,06} · Fe_{0,08}Ni_{0,07})_{2,7}(Pb_{0,54}Sn_{0,46}) или в упрощенном виде как (Pd, Pt)₃(Pb, Sn).

На примере звягинцевита мы опять сталкиваемся со значительно более сложным составом минералов платиновой группы, представляющих собой многокомпонентные системы, по сравнению с синтетическими бинарными соединениями. Ранее было показано (Генкин, и др., 1963), что майченерит, для которого в месторождении Садбери предположен состав PdBi₂ в Мончегорском месторождении, имеет состав Pd_{0,75}Pt_{0,25}BiTe. Поскольку минералы платиновой группы обычно встречаются в сростании друг с другом, состав каждого из них в значительной мере определяется составом сростания в целом. Поэтому не удивительно, что в



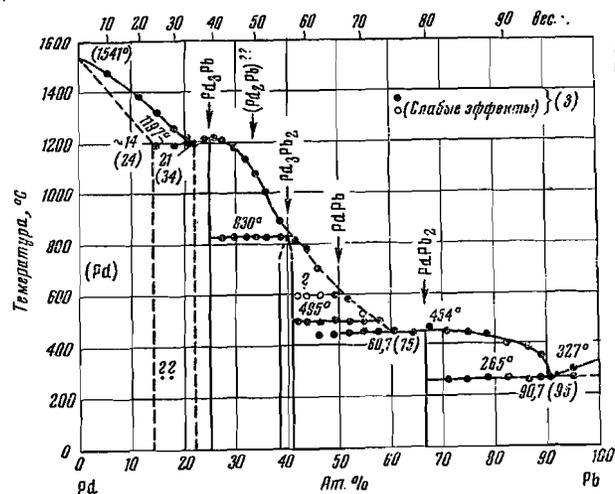
Фиг. 2. Распределение Pd (а), Pt (б), Pb (в), Sn (г) по профилю, проходящему через пентландит (1), ферроплатину (2) и звягинцевит (3)

отличие от синтетического соединения Pd₃Pb в состав звягинцевита, окружаемого каемками ферроплатины, входит платина.

Рентгенометрическое изучение звягинцевита проводилось путем съемки порошковых диаграмм⁵. Он дает простую, бедную линиями рентгенограмму, близкую по расположению линий рентгенограммам самородной платины,

⁵ Рентгенограммы снимались в Лаборатории минераграфии ИГЕМ АН СССР Г. В. Басовой в камерах РКД, $D=57,3$ мм, излучение FeK_α без фильтра.

палладием ее части при наиболее высоких температурах и небольших содержаниях свинца происходит кристаллизация твердых растворов свинца в палладию. Наиболее богатый свинцом (до 14% Pb) палладиевый твердый раствор обладает тем же структурным типом (Cu_3Au), что Pd_3Pb , но заметно меньшим размером элементарной ячейки — $a = 3,96 \text{ \AA}$. Пробы с содержанием свинца более 15% оказываются двухфазными, состоящими из твердого раствора свинца в палладию и



Фиг. 4. Диаграмма состояния системы Pd—Pb по М. Хансену, К. Андерко (1962)

Pd_3Pb . Гетерогенными являются также сплавы, содержащие свыше 26% свинца. Они состоят уже из Pd_3Pb и соединения Pd_3Pb_2 , обладающего гексагональной ячейкой типа NiAs. Размеры гомогенной области соединения Pd_3Pb детально не исследованы.

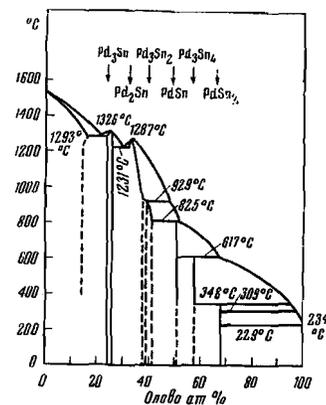
В системе Pd—Sn (Nowotny и др., 1946; Schubert и др., 1959; Knight, Rhys, 1959) в богатой палладием ее части также известны твердые растворы олова в палладию и соединения Pd_3Sn изоструктурное с Pd_3Pb и звягинцевитом. По данным Дж. Найт и Д. Риз (Knight, Rhys, 1959), содержание олова в твердом растворе может составлять до 17 атомн.%. В интервале от 17 до 24 атомн. % олова расположена область, в которой палладиевый твердый раствор сосуществует с соединением Pd_3Sn . Последнее обладает небольшой областью гомогенности (фиг. 5). Согласно приводимой этими авторами диаграмме зависимости размеров элементарной ячейки сплавов палладия и олова от содержания олова (фиг. 6), параметры чистого палладия, наиболее богатого оловом палладиевого твердого раствора и соединения Pd_3Sn составляют соответственно 3,87, 3,94 и 3,97 Å.

По данным М. Хансена и К. Андерко (1962), соединение Pt_3Sn , также относящееся к структурному типу Cu_3Au , обладает размером элементарной ячейки $a = 4,01 \text{ \AA}$.

Небольшое уменьшение параметра звягинцевита по сравнению с Pd_3Pb , как показывают приведенные выше данные, по-видимому, обусловлено комбинированным влиянием входящих в его состав палладия, платины, свинца и олова.

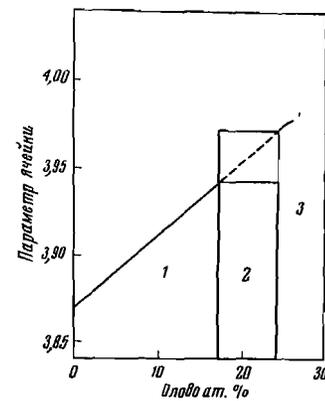
Интересно сопоставить некоторые соединения палладия и свинца с соединениями палладия с оловом и сурьмой. Данные табл. 5 показывают большое сходство кристаллохимических особенностей этих соединений.

В богатой палладием области установлены два структурных типа соединений: твердые растворы палладия и соединения A_3B с кубической ячейкой типа Cu_3Au и соединения A_3B_2 с гексагональной ячейкой типа NiAs. К последним, видимо, принадлежат природные интерметалличе-



Фиг. 5

Фиг. 5. Диаграмма состояния системы Pd—Sn по Дж. Найту, Д. Ризу (Knight, Rhys, 1959)



Фиг. 6

Фиг. 6. Размеры элементарной ячейки сплавов палладий—олово по Дж. Найту, Д. Ризу (Knight, Rhys, 1959)
1 — гранцентрированная кубическая ячейка, 2 — две фазы, обе с гранцентрированной кубической ячейкой, 3 — гранцентрированная кубическая ячейка

ские соединения палладия с оловом — стапнопалладинит и палладия с сурьмой — стибнопалладинит, пока еще очень слабо изученные. Соединение Pd_3Pb_2 со структурной типа NiAs, которое можно было бы назвать плумбопалладинитом, в природе пока не установлено.

Судя по диаграмме (фиг. 4), приводившейся нами для того, чтобы показать место звягинцевита среди других соединений палладия и свинца, температура плавления Pd_3Pb и твердых растворов палладия превышает 1200° , в то время как температура плавления пирротина наибо-

ТАБЛИЦА 5

Минералы и синтетические соединения палладия со свинцом, оловом и сурьмой

Структурный тип Cu_3Au		Структурный тип NiAs	
Синтетическое соединение	Минерал	Синтетическое соединение	Минерал
Твердый раствор палладия богатый свинцом $a = 3,96 \text{ \AA}$	Pd_3Pb $a = 4,021 \text{ \AA}$	Pd_3Pb_2 $a = 4,405$ $c = 5,704 \text{ \AA}$	Стапнопалладинит (Pd_3Sn_2 с Cu) Стибнопалладинит (Pd_3Sb)
Твердый раствор палладия богатый оловом $a = 3,94 \text{ \AA}$	Pd_3Sn $a = 3,97 \text{ \AA}$	Pd_3Sn_2 $a = 4,399$ $c = 5,666 \text{ \AA}$	
Твердый раствор сурьмы в палладию		Pd_3Sb_2 $c = 4,45$ $a = 5,83 \text{ \AA}$	

лее раннего сульфида рудных жил, составляет 1192° . Отсюда можно было бы сделать вывод о более ранней кристаллизации соединений палладия в рудах. Однако, как мы уже указывали ранее (Гепкин, 1959), наблюдения над возрастными соотношениями пирротина, пентландита, халькопирита и кубанита, слагающих рудные жилы, и минералами платиновой группы несомненно указывают на более позднюю кристаллиза-

цию последних. Об этом прежде всего свидетельствуют прожилки и метакристаллы платиновых минералов среди сульфидов. Важны также особенности парагенезиса звягинцевита и других минералов платиновой группы. Часто они находятся, например, в сростании с таким более поздним сульфидом как галенит, который встречается почти исключительно в участках развития платиновых минералов. Интересно отметить, что в ферроплатине, находящейся в сростании с звягинцевитом, свинец определен не был. Ферроплатина была обнаружена нами также в виде каемок около станнопалладинита (Генкин, Басова, 1965). Это свидетельствует о предпочтительной связи палладия со свинцом, оловом и сурьмой.

Из других соединений палладия и свинца, помимо звягинцевита и Pd_4Pb (Боровский и др., 1959, Генкин, 1959), состав и свойства которого еще требуют уточнения, в рудах можно ожидать нахождения твердых растворов свинца в палладии и Pd_3Pb_2 , а также более сложных соединений палладия и платины со свинцом, оловом, сурьмой и висмутом. Мы сталкиваемся таким образом с интересным случаем нахождения в медно-никелевых сульфидных рудах, связанных с основными и ультраосновными изверженными породами, минералов таких не свойственных им элементов как свинец, олово, сурьма и др. В процессе образования руд эти металлы, присутствовавшие в магме в ничтожно малых количествах, накапливались и в наиболее поздние моменты кристаллизовались в виде самостоятельных минералов.

Нахождение в медно-никелевых рудах Норильского месторождения интерметаллических соединений палладия со свинцом необходимо учитывать при металлургическом переделе этих руд на благородные металлы.

Полированный шлиф с звягинцевитом передан в Минералогический музей АН СССР.

ЛИТЕРАТУРА

- Боровский И. Б., Деев А. Н., Марчукова И. Д. Применение метода локального рентгено-спектрального анализа к исследованию минералов платиновой группы. Геол. рудн. месторожд., № 6, 1959.
- Генкин А. Д. Условия нахождения и особенности состава минералов платиновой группы в рудах Норильского месторождения. Геол. рудн. месторожд., № 6, 1959.
- Генкин А. Д., Королев Н. В. К методике определения небольших зерен минералов в рудах. Геол. рудн. месторожд., № 5, 1961.
- Генкин А. Д., Журавлев Н. Н., Смирнова Е. М. Мончит и котульскит, новые минералы и состав майченерита. Зап. Всес. минерал. общ., в. 1, 1963.
- Генкин А. Д., Басова Г. В. О тетрагональной ферроплатине из Норильского месторождения. Новые данные о минералах СССР. Тр. Минерал. музея, в. 16, 209, 1965.
- Годлевский М. Н. Траппы и рудоносные интрузии. Госгеолтехиздат, 1959.
- Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. Т. II. Металлургиздат, 1962.
- Birks L. S. Electron-probe microanalysis. Intersc. Publ., 1963.
- Knight J., Rhys D. The systems palladium-in dium and palladiumtin. J. Less-common metals, 1, N 4, 1959.
- Nowotny H., Schubert K., Dettinger U. Zur Kenntnis des Aufbaus und Kristallsysteme einiger Edelsysteme (Palladium—Blei, Palladium—Zinn, Iridium—Zinn, Rhodium—Zinn, Platin—Blei). Metallforschung, 4/5, S. 137, 1946.
- Schubert K., Lukas H., Meissner H., Bhan S. Zum Aufbau der Systeme Kobalt—Gallium, Palladium—Gallium, Palladium—Zinn und verwandten Legierungen. Z. Metallkunde, & 50, N. 9, 1959.

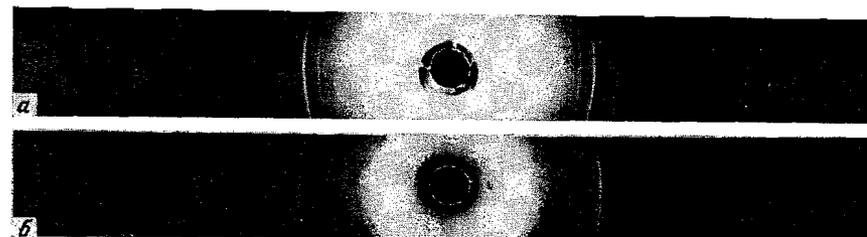
ИГЕМ АН СССР
ГИРЕДМЕТ
Москва

Поступила
2.III.1966

Вклейка к статье А. Д. Генкина и др., к странице 94



Фиг. 1 Скопление зерен звягинцевита (светло-серое), окруженных каймой ферроплатины (белое), среди пентландита (темно-серая основная масса с выкрошиваниями по спайности). Полированный шлиф. Увел. 85



Фиг. 3. Рентгенограммы звягинцевита (а) и самородной платины (б)

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 553.45 : 536.51 : 549.514.7

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КАССИТЕРИТА
В ОЛОВОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА
ПО ДАННЫМ ТЕРМОЗВУКОВОГО МЕТОДА

В. К. РЯБОВ

Исследованиями Н. П. Ермакова (1950), Ю. А. Долгова (1965), Е. Е. Костылевой (1964) и др. установлено, что содержащиеся в минералах гидротермальных месторождений газово-жидкие включения надежно могут быть использованы для определения относительных, а в некоторых случаях и истинных температур отложений минералов. Наиболее эффективными методами установления температурных условий кристаллизации минералов в настоящее время являются термозвуковой и гомогенизации. Эти два метода применялись и нами при определении относительных температур кристаллизации касситерита в оловорудных месторождениях Дальнего Востока¹.

Оловорудные месторождения на востоке нашей страны сконцентрированы в основном в пределах внешней зоны Тихоокеанского рудного пояса. Геологическая обстановка формирования месторождений в общих чертах является сходной. Почти все они проявлены в породах верхних структурных этажей и, следовательно, являются близкоповерхностными образованиями. Формирование месторождений происходило в сравнительно короткий отрезок времени от верхнего мезозоя до третичного периода. В связи с близкоповерхностными условиями образования месторождений давление в процессе кристаллизации рудных минералов не было высоким, поэтому влияние этого фактора на ход гомогенизации и растрескивания газово-жидких включений в минералах в данном случае является малоэффективным.

Касситерит как объект исследования был выбран в связи с наличием у него многих благоприятных свойств, таких как прозрачность, несовершенная спайность, средняя хрупкость, устойчивость при нагревании от химических изменений и гидролиза и пр.

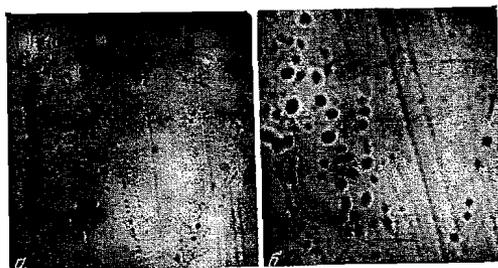
Кроме того, в каждом из месторождений касситерит образовался преимущественно в одну продуктивную стадию и, как будет показано ниже, в узких температурных интервалах. Большинство газово-жидких включений в касситерите являются первичными. Размеры их весьма незначительны (менее 0,001 мм), и только редкие включения (обычно однофазовые), приуроченные к трещинкам в минералах, достигают размеров 0,01—0,05 мм. Применение метода гомогенизации к изучению газово-жидких включений в касситерите возможно лишь при очень больших (более 600 раз) увеличениях микроскопа, но и при таких увеличениях момент гомогенизации удается зафиксировать только в единичных включениях. Поэтому наиболее приемлемым методом для определения приблизительной температуры кристаллизации касситерита нами был признан термозвуковой метод, позволяющий фиксировать в каждой пробе температуру растрескивания многих сотен газово-жидких включений.

Мономинеральные пробы касситерита для исследований отбирались в объеме 1 см³. Дробление их производилось до 0,5—0,1 мм. Изучение проб проводилось на установке, собранной по схеме Х. Скотта (Scott, 1948) с небольшими усовершенствованиями. Скорость нагрева составляла 10° в одну минуту, интервал нагрева заключен между 100 и 500°.

Одной из первых задач исследования было выявление возможной температурной зональности оруденения продуктивных стадий в пределах отдельных оловорудных месторождений. С этой целью были отобраны мономинеральные пробы касситерита из оловорудных тел четырех месторождений, относящихся к различным генетическим типам.

¹ Температуры декрепитации обычно завышены по сравнению с истинными температурами минералообразования и температурами гомогенизации газово-жидких включений (Прим. ред.).

Вклейка к статье В. К. Рябова, к стр. 102.



Фиг. 2. Газово-жидкие включения в касситерите под микроскопом. Увел. 600
а — до термозвукового анализа; б — после термозвукового анализа