

НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

УДК 549.2 (571.6)

Д. члены Л. В. РАЗИН, Н. С. РУДАШЕВСКИЙ, Л. Н. ВЯЛЬСОВ

НОВЫЕ ПРИРОДНЫЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ
АЛЮМИНИЯ, МЕДИ И ЦИНКА — ХАТЫРКИТ CuAl_2 , КУПАЛИТ CuAl
И АЛЮМИНИДЫ ЦИНКА — ИЗ ГИПЕРБАЗИТОВ
ДУНИТ-ГАРЦБУРГИТОВОЙ ФОРМАЦИИ¹

Среди природных образований впервые обнаружены соединения алюминия с медью и цинком. Они находятся в тесном сростании и представлены мелкими (размером от долей до 1.5 мм) неправильной формы, угловатыми сталью-серовато-желтыми металлическими частицами, внешне схожими с самородной платиной. Эти частицы встречены в черном шлихе, отмытом В. В. Крячко из зеленовато-синей глинистой массы элювия серпентинитов. Шлих отмыт непосредственно в полевых условиях, из обнажения коры выветривания серпентинитов небольшого массива ручья Лиственитового. Лабораторной обработке шлих не подвергался.

Массив ручья Лиственитового входит в Хатырский гипербазитовый пояс. Этот пояс, по данным В. В. Велинского (1979), образован линзовидными массивами альциногитной дунит-гарцбургитовой формации и приурочен к Хатырскому глубинному разлому в центре одноименного антиклинория Корякско-Камчатской складчатой области на северо-западе Тихоокеанского подвижного кольца. Возраст массивов гипербазитового пояса спорен и датируется от верхнего палеозоя (карбон—пермь) до верхнего мезозоя (донижнемеловой, либо нижне- или верхнемеловой). Залегают массивы в разновозрастных кремнисто-вулканогенно-осадочных толщах и прорываются интрузивами габбро-норитов, габбро и плагиигранитов.

Мы детально изучили сросток четырех выявленных новых минеральных фаз Al , Cu , Zn (рис. 1). В сростке преобладали существенно медные соединения с алюминием при резко подчиненном значении существенно цинковых соединений с алюминием.

ХАТЫРКИТ $(\text{Cu}, \text{Zn}) \text{Al}_2$

Главным по распространенности в сростке оказался минерал алюминия и меди с постоянной примесью цинка, по месту находки он назван х а т ы р к и т о м (khatyrkite). Без примеси цинка его идеализированная формула CuAl_2 . В нашем случае изучен хатырkit, цинк содержащий с общей формулой $(\text{Cu}, \text{Zn})\text{Al}_2$ (табл. 1).

Он составляет основную массу сростка, образуя здесь полигональный агрегат из довольно крупных коротко- и длиннопризматических кристаллов и кристаллитов размерами от 100×100 — 120 до 200×300 и 60×400 мкм (рис. 2). Очертания этих индивидов прямолинейно-ступенчатые (кристаллизационные) и угловато-заливчатые (корродированные). Среди полиго-

¹ Рассмотрено и рекомендовано к опубликованию Комиссией по новым минералам и названиям минералов Всесоюзного минералогического общества 27 февраля 1982 г. Утверждено Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации 2 февраля 1984 г.

нальных агрегатов наблюдаются участки дислокационного происхождения. При скрещенных николях видно, что они зажаты крупными кристал-

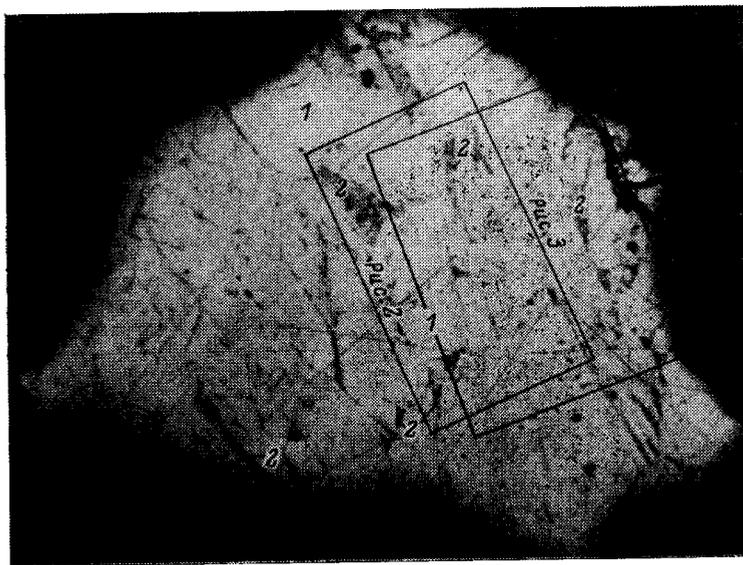


Рис. 1. Сросток цинксодержащего хатыркита (1) с купалитом цинкистым (2). Цементный полированный шлиф 10, запрессован в эпоксидной смоле (черное). Увел. 90.

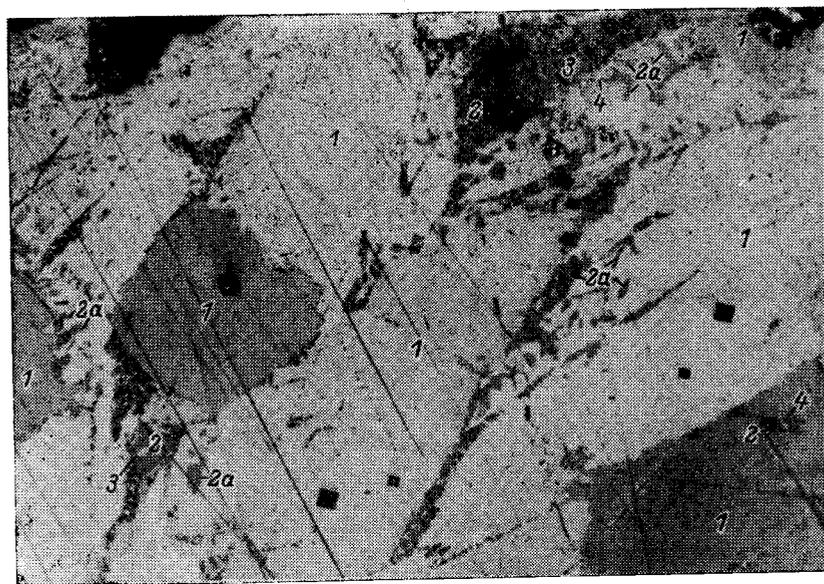


Рис. 2. Деталь центральной части рис. 1. Агрегат различно оптически ориентированных удлиненно- и короткопризматических кристаллитов и кристаллов хатыркита (1). Николи скрещены. Увел. 200.

Индивиды хатыркита по периферии замещаются мirmekитоподобными, дендритовидными и каплевидными выделениями цинкистого купалита II (2a), образующими вместе с хатырkitом субграфическую микроструктуру. К межзерновым границам хатыркита приурочены агрегативные сростки цинкистого купалита II (2) с медистыми диалюминидом цинка (3) и алюминидом цинка (4). Черные квадраты — отпечатки пирамидки при измерении твердости.

лами и кристаллитными сростками хатыркита (рис. 3). Образования дислокационных участков можно объяснить деформацией хатыркита в твердом состоянии во вмещающих его гипербазитах.

Таблица 1

Химический состав (мас. %) природных соединений системы Cu—Zn—Al

Анализ	Cu	Zn	Al	Сумма	Формула
Х а т ы р к и т ц и н к с о д е р ж а щ и й					
1	54.9	0.87	44.7	100.47	(Cu _{1.043} Zn _{0.016}) _{1.058} Al _{2.000}
2	54.3	0.94	45.5	100.74	(Cu _{1.015} Zn _{0.015}) _{1.030} Al _{2.000}
3	53.6	1.02	45.3	99.92	(Cu _{1.007} Zn _{0.018}) _{1.025} Al _{2.000}
4	54.0	1.05	45.9	100.95	(Cu _{0.998} Zn _{0.018}) _{1.017} Al _{2.000}
5	54.1	1.18	44.9	100.18	(Cu _{1.023} Zn _{0.021}) _{1.044} Al _{2.000}
6	53.9	1.28	45.1	100.28	(Cu _{1.015} Zn _{0.024}) _{1.039} Al _{2.000}
7	53.7	1.41	44.4	99.51	(Cu _{1.029} Zn _{0.024}) _{1.053} Al _{2.000}
8	53.4	1.87	44.7	99.97	(Cu _{1.015} Zn _{0.033}) _{1.043} Al _{2.000}
9	53.5	1.91	45.5	100.91	(Cu _{1.018} Zn _{0.033}) _{1.052} Al _{2.000}
Среднее	53.93±0.22	1.28±0.15	45.11±0.23	100.32	(Cu _{1.015} Zn _{0.024}) _{1.039} Al _{2.000}
К у п а л и т ц и н к и с т ы й					
10	61.7	7.66	29.3	98.66	(Cu _{0.866} Zn _{0.108}) _{1.004} Al _{1.000}
11	60.3	8.08	30.4	98.78	(Cu _{0.844} Zn _{0.109}) _{0.983} Al _{1.000}
12	61.1	8.12	30.1	99.32	(Cu _{0.862} Zn _{0.110}) _{0.972} Al _{1.000}
13	61.1	8.32	29.9	99.32	(Cu _{0.869} Zn _{0.115}) _{0.984} Al _{1.000}
14	60.8	8.42	29.9	99.12	(Cu _{0.863} Zn _{0.117}) _{0.980} Al _{1.000}
15	60.5	8.45	29.9	98.85	(Cu _{0.860} Zn _{0.117}) _{0.977} Al _{1.000}
16	60.0	8.51	30.1	98.61	(Cu _{0.847} Zn _{0.118}) _{0.965} Al _{1.000}
17	61.7	8.85	29.9	100.45	(Cu _{0.878} Zn _{0.122}) _{1.006} Al _{1.000}
18	59.9	9.35	29.6	98.85	(Cu _{0.861} Zn _{0.131}) _{0.992} Al _{1.000}
	60.79±0.45	8.42±0.23	29.9±0.1	99.11	(Cu _{0.863} Zn _{0.117}) _{0.980} Al _{1.000}
(Zn, Cu)Al ₂ (среднее по 11 анализам)					
19	8.4±1.2	50.1±1.9	41.6±1.8	100.1	(Zn _{0.99} Cu _{0.17}) _{1.16} Al _{2.00}
(Zn, Cu) ₂ Al (среднее по 5 анализам)					
20	4.84±0.47	80.12±1.21	17.36±0.40	102.32	(Zn _{1.903} Cu _{0.118}) _{2.021} Al _{1.000}

Примечание. Анализ проведен на приборе MS-46 «Камека», ускоряющее напряжение 20 кВ, ток образца 25—40 нА, диаметр зонда 1—2 мкм, эталоны — чистые металлы. Перерасчет относительных интенсивностей из концентраций выполнен методом последовательных приближений по программе ZAF на ЭВМ М-222.

Внутри полигональных индивидов хатыркита отмечены трещинки спайности по тетрагональной призме. Частицы хатыркита, выцарапанные с помощью ПМТ-3 из сростка в цементном полированном шлифе, имеют стально-серовато-желтый цвет, непрозрачные, с металлическим блеском, ковкие, немагнитные.

Твердость хатыркита средняя. 10 замеров на ПМТ-3 в различных участках образца (цементного полированного шлифа 10) дали величины твердости микровдавливания $H=511-568$ (в среднем 543) кгс/мм² при нагрузках 20 и 50 гс, что отвечает в пересчете на 15-балльную шкалу М. Хрущова величине твердости $H_0=0.675 H=5.4-5.6$ (среднее 5.5). Пять измерений с $P=100$ гс показали более низкую твердость — $H=433-474$ (среднее 451) кгс/мм² или $H_0=5.1-5.3$ (среднее 5.2).²

Отпечаток на полированной поверхности хатыркита получается квадратной формы (рис. 2, 3). При $P=50$ гс появляется выпуклость грани отпечатка, увеличивающаяся при $P=100$ гс, что свидетельствует о слабо упругих свойствах минерала. О его слабой пластичности говорит появление первых трещин вокруг отпечатка при $P=50$ гс. Эти трещины начина-

² Все измерения твердости проводились с тарировкой прибора по кристаллу NaCl при $H_{5гс}=21.2$ кгс/мм², экспозиция 15 с.

ются от углов отпечатка и являются трещинами разрыва. При $P=100$ гс отмечаются сколовые трещины со ступенчатостью граней самого отпечатка и ступенчатостью сколов в непосредственном его обрамлении.

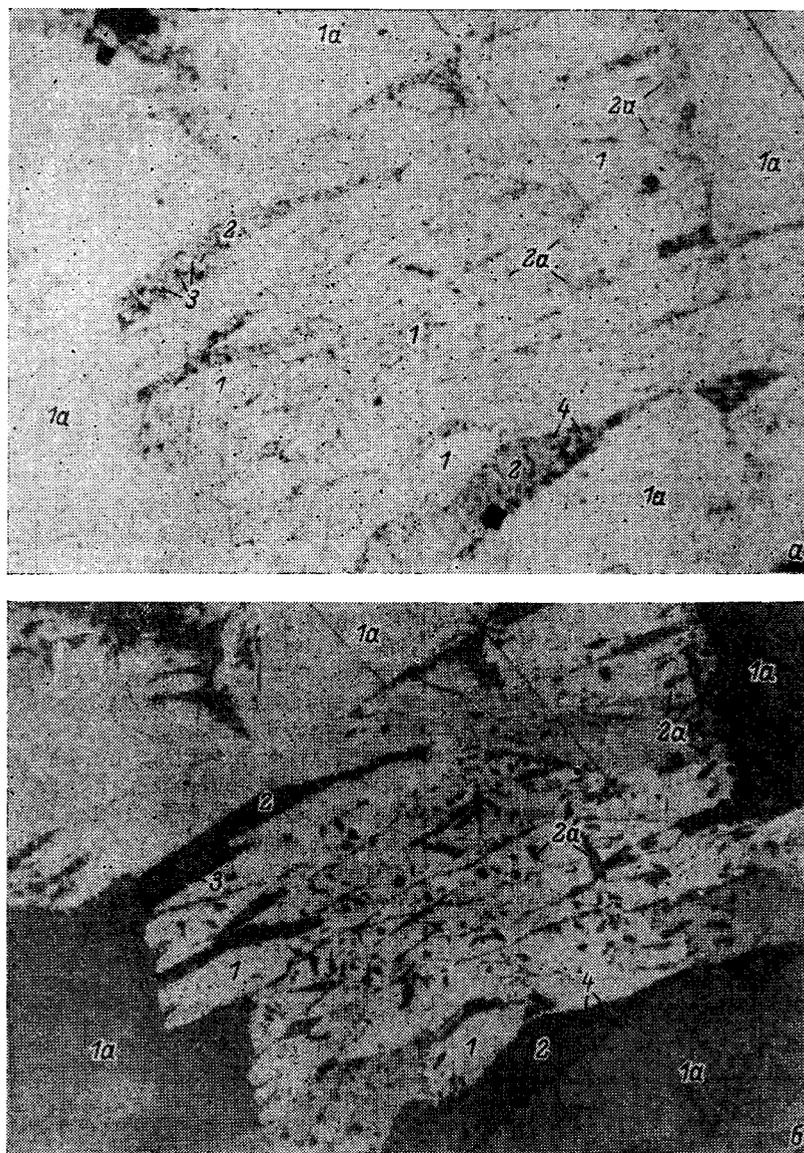


Рис. 3. Деталь рис. 1. Дислокационный участок хатыркита, состоящий из субпараллельных пластинчатых блоков, которые рассечены трещинками разрыва по спайности (1). Участок зажат между крупными кристаллами хатыркита (1а).

а — поляризованный свет, положение максимального затемнения двуотражающих хатыркита и купалита (1, 1а, 2, 2а); б — николи скрещены. По хатыркиту развит купалит I (2а), разрывные трещинки в хатырките фиксированы сростками купалита II (2) с медистым диалюминидом цинка (3) и алюминидом цинка (4). Видна разная оптическая ориентировка индивидов купалита I и II (соответственно 2а и 2). Увел. 200. Фотомикроскоп «Orton».

В согласии с выявленной слабой пластичностью хатыркита находится его хорошая полируемость.

В отраженном поляризованном свете хатыркит с отчетливо выраженным двуотражением, анизотропией. В сечениях, близких к изотропным, он имеет голубоватый цвет. В анизотропных сечениях цвет меняется от

голубого до кремовато-розового. При скрещенных николях минерал характеризуется сильными цветными эффектами анизотропии: в случае точного скрещивания — от серовато-желтых до буровато-красных, при неполном скрещивании наблюдаются зеленовато-желтые и малиново-красные тона.

Хатыркит высокоотражающий, оптически одноосный, спектры его отражения R_0 и R'_e имеют точку пересечения при 540 нм (табл. 2, рис. 4).

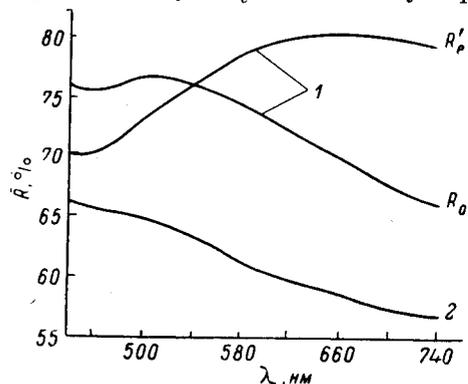


Рис. 4. Спектры отражения хатыркита (1) и купалита (2).

В области длин волн короче 540 нм оптический знак хатыркита отрицательный, при $\lambda=540$ нм оптический знак меняется на положительный. Характерно для нового минерала сильное возрастание дисперсии двуотражения с переходом от синей части спектра к красной. Максимумы на спектрах отражения хатыркита существенно смещены: 500—520 нм для R_0 и 640—680 нм для R'_e . Своеобразие оптических свойств хатыркита позволяет однозначно диагностировать его среди группы высокоотражающих минералов. При скрещенных николях и 100-кратном

увеличении четко видна блоково-мозаичная микроструктура хатыркита и гомогенное внутренне строение его индивидов (рис. 2).

Качественным рентгеноспектральным микроанализом установлено равномерное распределение алюминия, меди и цинка в индивидах хатыркита (рис. 5, 6). Количественный микроанализ 9 различных индивидов нового минерала (табл. 1) показал, что концентрация меди и алюминия в нем колеблется незначительно (Cu 53.4—54.9 мас. % и Al 44.4—45.9 %). Относительно более существенны вариации содержания цинка (0.87—1.91 %). На треугольной диаграмме Al—Cu—Zn рой точек анализов хатыркита располагается почти на стороне Cu—Al (рис. 7). Примечательно, что в общем случае количество цинка в хатырките находится в обратной зависимости от содержания в нем меди. Подобные соотношения указывают на изоморфизм меди и цинка в минерале. Химический состав различных

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты отражения хатыркита и купалита R (%) для λ (нм)

Минерал	R	440	460	480	500	520	540	560	580
Хатыркит	R_0	75.8	75.6	75.9	76.5	76.4	76.1	75.3	74.3
	R'_e	70.1	70.3	71.5	73.0	74.5	76.1	77.4	78.4
Купалит	R_m	66.8	66.1	65.3	64.5	63.7	62.9	62.1	61.3

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

Минерал	R	600	620	640	660	680	700	720	740
Хатыркит	R_0	73.2	72.0	70.7	69.5	68.5	67.5	66.5	65.9
	R'_e	79.2	79.7	79.8	79.9	79.8	79.5	79.2	78.7
Купалит	R_m	60.4	59.7	58.9	58.2	57.7	57.2	56.9	56.5

Примечание. Обр. 10, спектрофотомер «ПИОР», эталоны — Si и (W, Ti) C.

индивидов хатыркита рассчитывается на формулу, близкую к стехиометрической $(\text{Cu, Zn})\text{Al}_2$ (табл. 1, ан. 1—9).

Рентгеновское изучение хатыркита проведено методом Дебая—Шерера. На дебаеграмме его получено 25 отражений, 20 из которых отвечают α -линиям (табл. 3). Она практически идентична рентгенограмме θ -фазы CuAl_2 ; рассчитанные значения параметров тетрагональной элементарной ячейки хатыркита практически совпадают с этими константами, опреде-

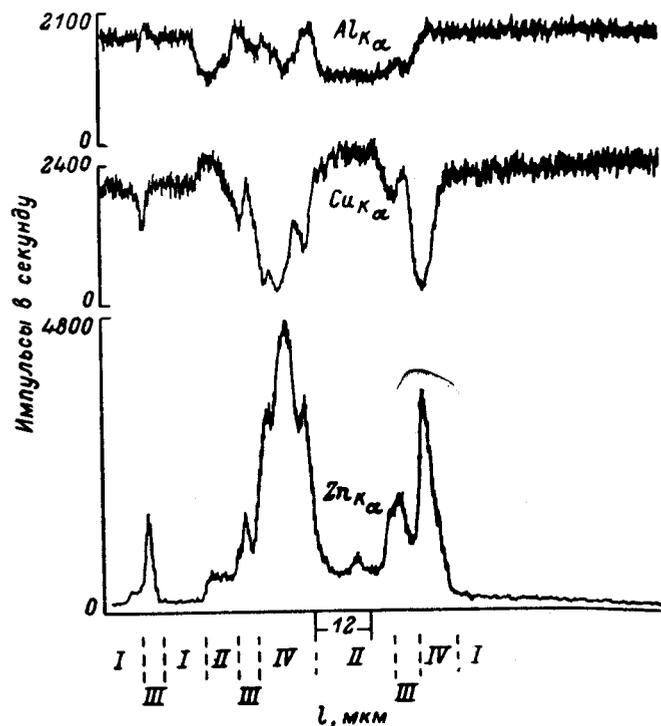


Рис. 5. Концентрационные кривые распределения Al, Cu и Zn в структуре хатыркита (I) с купалитом (II), $(\text{Zn, Cu})\text{Al}_2$ (III) и $(\text{Zn, Cu})_2\text{Al}$ (IV). Обр. 10, MS-46, «Камека».

ленными для синтетического CuAl_2 (табл. 3). По аналогии с θ -фазой новый минерал является интерметаллическим соединением с металлическим типом связи. С учетом его подобия с искусственным CuAl_2 (ASTM, 1969) для хатыркита пространственная группа $D_{4h}^{18} = J4/mct$, $Z=4$, рентгеновская плотность, рассчитанная для среднего состава (табл. 1), 4.42 г/см^3 . Искусственный CuAl_2 относится к структурному типу *C16*, структура его детально изучена (Нарои-Сабо, 1969; Бокий, 1974).

КУПАЛИТ $(\text{Cu, Zn})\text{Al}$

В тесном сростании с хатырkitом находится менее распространенный (второстепенный) минерал, названный по химическому составу **купалит** (cupalite). Он представлен двумя генерациями. Первая генерация — каплевидные, мirmekитоподобные и дендритовидные выделения размерами от 1×4 до 5×35 мкм, образующие мономинеральные скопления в хатырките, тяготеющие к границам зерен этого минерала, нередко проникают внутрь его индивидов и участвуют в сложении субграфической (псевдоэвтектоидной) микроструктуры (рис. 2, 3). Вторая генерация — округлые, зерновидные и зерна неправильной формы размерами от 1×5 до 10×20 мкм, создающие прожилковидные агрегаты, которые приурочены к ослабленным зонам матрицы — интерстициям, плоскостям разрыва и трещинкам спайности хатыркита. Зерна второй генерации обычно нахо-

дятся в сростках с субмикроскопическими алюминидами цинка и корродируют хатыркит, проникая в его массу (рис. 6, а).

Мельчайшие частицы купалита II, извлеченные с помощью ПМТ-3 из цементного полированного шлифа, под бинокулярной лупой трудно отличить от хатыркита: они непрозрачные и того же стально-желтого цвета с металлическим блеском, но обладают меньшей твердостью и пластичностью. 10 замеров твердости при $P=20$ и 50 гс дают значения $H=272-318$ (в среднем 288) кгс/мм² или по шкале М. М. Хрущева $H_0=4.4-4.6$ (среднее 4.5). Форма отпечатков на его поверхности слабо деформированная, со ступенчатыми сколами при $P=50$ гс. Сколы появляются

уже при $P=20$ гс, что свидетельствует о слабой пластичности купалита. Выделения купалита первой генерации полируются столь же хорошо, как и хатыркит. Агрегаты второй генерации, обычно тесно срастающиеся с алюминидами цинка, полируются заметно хуже.

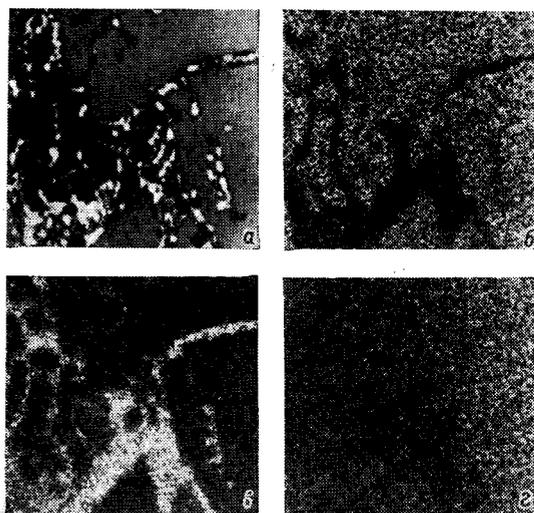


Рис. 6. Участок срастания природных интерметаллидов алюминия, меди и цинка, обр. 10, $140\times$
 $\times 140$ мкм.

а — изображение в поглощенных электронах (позитив): хатыркит — серое, цинкистый купалит — черное, алюминиды цинка — белое; б — в рентгеновских лучах: б — CuK_α , в — ZnK_α , г — AlK_α , MS-46, «Камека».

В отраженном свете купалит очень слабо двуотражающий — от светло-серого до серого, при скрещенных николях слабо анизотропный — от серого до темно-серого. Двуотражение купалита не улавливается, абсолютные значения его коэффициентов отражения ниже, чем у хатыркита (табл. 2). Примечательно, что индивиды одной генерации имеют одинаковую оптическую ориентировку, но при этом выделения купалита первой генерации чуть повернуты относительно выделений его второй генерации.

Качественное изучение химического состава выявило однородное распределение меди, алюминия и цинка в агрегатах купалита (рис. 5, 6). Количественный микроанализ 9 зерен обнаружил колебания содержания (мас. %) меди 59.9—61.7, алюминия 29.3—30.4 и цинка 7.66—9.35 (табл. 1). Обращает на себя внимание та же обратная зависимость между содержанием меди и цинка, указывающая на изоморфизм этих элементов в составе купалита. Химический состав купалита рассчитывается на формулу, близкую к стехиометрической $(\text{Cu}, \text{Zn}) \text{Al}$ (табл. 1, ан. 10—18).

Рентгеновское исследование нового минерала осуществлено методом Дебая—Шерера. Частицы купалита извлечены М. Г. Соколовой (ВИМС) из проанализированных агрегатов полированного шлифа 10 с помощью ПМТ-3. Из-за малого насыщения резинового шарика порошкограмма нового минерала получилась с малым числом ослабленных и размытых линий (табл. 4). Все они индицируются в ромбической сингонии с параметрами элементарной ячейки (Å): $a_0=6.95\pm 0.01$, $b_0=4.16\pm 0.01$, $c_0=10.04\pm 0.01$, $V_0=290.3 \text{ Å}^3$. Новый минерал по метрике решетки близок к искусственной η -фазе CuAl :³ $a_0=6.89 \text{ Å}$, $b_0=4.09 \text{ Å}$, $c_0=9.89 \text{ Å}$, $V_0=278.70 \text{ Å}^3$ $Z=10$. η -фаза, по М. Хансену и К. Андерко (1962), имеет цен-

³ Дебаграмма синтетической фазы CuAl не опубликована, пространственная группа его не установлена.

трированную ромбическую элементарную ячейку с 20 атомами и формулой $\text{Cu}_{10}\text{Al}_{10}$. Близость размеров ромбической элементарной ячейки и сходство химического состава говорят о возможном структурном подобии нового минерала и η -фазы. Рентгеновская плотность купалита, рассчитанная для его среднего химического состава (табл. 1) при $Z=10$, как для искусствен-

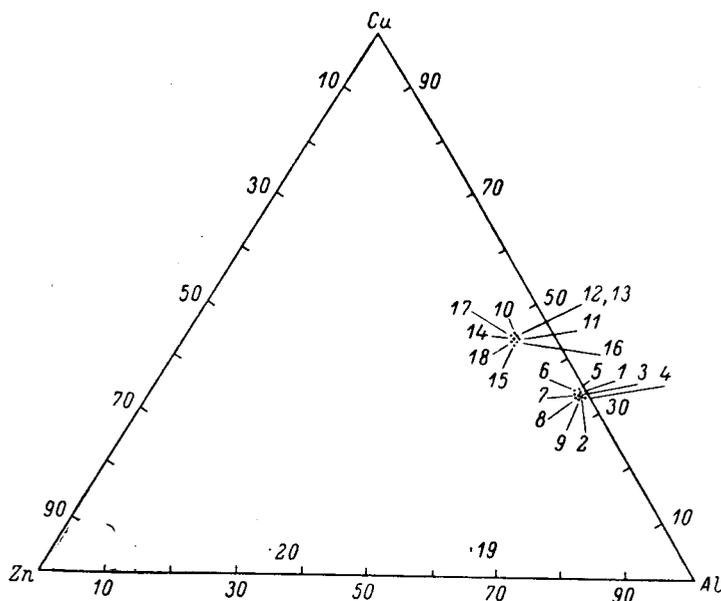


Рис. 7. Положение новых минеральных фаз на диаграмме состава тройной системы Zn—Cu—Al (ат. %).

Точки 1—9 — хатыркит, 10—18 — купалит, 19 — $(\text{Zn}, \text{Cu})\text{Al}_2$, 20 — $(\text{Zn}, \text{Cu})_2\text{Al}$, по данным табл. 1.

ного CuAl , 5.12 г/см^3 . Купалит, как и его структурный аналог, видимо, представляет собой интерметаллическое соединение с металлическим типом связи между элементами. Значительная примесь цинка позволяет отнести рассматриваемый минерал к цинкистой его химической разновидности с идеализированной формулой $(\text{Cu}, \text{Zn})\text{Al}$.

АЛЮМИНИДЫ ЦИНКА

В сростании с хатыркитом и купалитом установлены еще две новые минеральные фазы — алюминиды цинка с высокой примесью меди (рис. 7). Обе эти фазы находятся в сростании с купалитом II (рис. 2, 5). При этом чаще всего они бывают заключены в купалите или же приурочиваются к границам купалита II с хатыркитом. Весьма мелкие размеры агрегатов алюминидов цинка не позволили провести инструментальные определения их оптических и механических характеристик и извлечь материал для рентгеновских исследований. Они изучены только визуально-микроскопически и с помощью электронного зонда.

ДИАЛЮМИНИД ЦИНКА ZnAl_2

Из двух алюминидов цинка наиболее распространена бледно-серая в отраженном свете, анизотропная фаза с анизотропией в светло-серых тонах. Двуотражение у нее не выявлено; относительная отражательная способность ниже, чем у хатыркита, и выше по сравнению с купалитом. Относительный рельеф ниже этих вмещающих минералов. Обычны ее аллотриоморфные, нередко удлиненные и прожилковидные выделения в межзерновых промежутках купалита II (рис. 2, 3). Размеры их $1-5 \times 8-40 \text{ мкм}$. Изредка индивиды рассматриваемой фазы встречаются

Таблица 3

Результаты расчета рентгенограммы хатыркита цинксодержащего

Хатыркит			hkl	Синтетический CuAl ₂	(ASTM, 1969)
I	d _{эксп}	d _{выч}		I	d
10	4.27	4.29	110	5	4.29
5	3.04	3.035	200	2	3.07
7	2.372	2.373	121	5	2.37
2	2.156	2.146	220		
8	2.119	2.125	112	7	2.12
7	1.920	1.920	130	10	1.91
4	1.894	1.904	202		
1	1.613	1.613	222	1	1.61
0.5	1.500	1.510	132	1	1.51
0.5	1.405	1.409	141	1	1.41
			123	1	1.39
2	1.358	1.358	240	1	1.36
2	1.285	1.289	402	2	1.29
2	1.234	1.235	332	2	1.23
0.5	1.212	1.222	004	0.5	1.22
1	1.188	1.187	242	1	1.19
0.5	1.173	1.175	114	0.5	1.17
			204	0.5	1.13
0.5	1.101	1.098	251	0.5	1.10
			143	0.5	1.09
1	1.071	1.070	152	1	1.07
			224	0.5	1.06
0.5	1.042	1.041	350	0.5	1.04
1	1.028	1.030	134	1	1.03

Параметры элементарной ячейки, Å

$$a_0 = 6.07 \pm 0.01 \quad a_0 = 6.066$$

$$c_0 = 4.89 \pm 0.01 \quad c_0 = 4.874$$

$$V_0 = 180.15 \text{ Å}^3 \quad V_0 = 179.34 \text{ Å}^3$$

Примечание. Съемка хатыркита симметричным методом, РКД = 57.3 мм, Fe_{Kα+β}, d_{обр} ~ 0.2 мм, аналитик Г. В. Басова (ИГЕМ АН СССР). β-отражения не приведены.

Таблица 4

Результаты расчета дебаеграммы купалита

I	d _{эксп}	d _{выч}	hkl
10	5.07	5.02	002
8	4.12	4.16	010
2	3.59	3.57	110
1	2.83	2.85	202
1	2.607	2.607	013
1	2.316	2.316	300
1	2.023	2.023	310

Примечание. Съемка асимметричным методом, РКД-57.3, Fe излучение, d_{обр} = 0.1 мм, аналитики Н. И. Чернова и М. Г. Сокова (ВИМС). Значения параметров элементарной ячейки рассчитаны методом МНК по всем отражениям дебаеграммы.

в массе хатыркита. Во всех наблюдавшихся вариантах они имеют корродирующие границы как с хатыркитом, так и купалитом (рис. 6, а, в). Полируемость наиболее крупных выделений агрегатов диалюминиды цинка хорошая, а в мельчайших ее сростках с цинкистым моноалюминидом меди — посредственная.

Локальным рентгеноспектральным методом 11 отдельных зерен выявлен достаточно однородный химический состав этого минерала, в усреднен-

ном варианте отвечающий формуле, изотипной CuAl_2 с заметным нарушением стехиометрии — избыточностью в квазикатионной части (табл. 1, ан. 19). Такое подобие с хорошо изученным искусственным интерметаллическим соединением закономерно и с позиций изоморфизма цинка и меди, отмеченного выше в двух новых минералах алюминия и меди и, очевидно, существующего также в рассматриваемой фазе $(\text{Zn,Cu})\text{Al}_2$. Исходя из этого подобия, мы заключили, что данная фаза с идеализированной формулой ZnAl_2 тоже является интерметаллическим соединением в изоморфном ряду ZnAl_2 — CuAl_2 — медистой разновидностью д а л ю м и н и д а ц и н к а.

АЛЮМИНИД ЦИНКА Zn_2Al

Самые редкие и мелкие выделения в сростке соединений алюминия, меди и цинка представлены фазой, которая в отраженном свете серовато-белая, без двуотражения и с очень слабой анизотропией (от серовато-белого до светло-серого). Относительная отражательная способность ее несколько выше, чем у диалюминида цинка, а относительный рельеф чуть ниже. Это точечные и каплевидные, иногда слабо удлиненные зерна размером от 1—2 до 7—15 мкм. Они встречаются в тончайших сростаниях с хатырkitом, реже с купалитом II, в обоих случаях включены в хатырkitе (рис. 3). В этих сростках наблюдаются корродирующие взаимоотношения алюминида цинка со всеми охарактеризованными минералами (рис. 2, 5).

Качественный микронзондовый анализ выявил в составе рассматриваемой фазы обратную зависимость между концентрацией цинка и меди (рис. 5), свидетельствующую об изоморфизме их атомов. Локальным рентгеноспектральным микроанализом 5 зерен определен средний субстехиометрический состав этого медистого а л ю м и н и д а ц и н к а с общей формулой $(\text{Zn,Cu})_2\text{Al}$ (табл. 1, ан. 20); в идеализированном варианте его формула Zn_2Al .

ВЫВОДЫ

1. Впервые обнаружены природные интерметаллические соединения алюминия, меди и цинка. Они открыты в автотоморфических серпентинитах, исходное вещество которых (гарцбургиты, лерцолиты и дуниты) имеет верхнемантийное происхождение. Прежде в основных производных верхнемантийной магмы — базитовых трапловых телах Сибирской платформы — встречали (Округин и др., 1978) более простые образования той же тройной системы Zn—Cu—Al : монометалльные и биметалльные минералы — самородный цинк, соединение CuZn (β -латунь), цинковую медь (α -латунь), самородную медь и самородный алюминий.

2. Из четырех открытых минералов два существенно медных — хатырkit цинксодержащий $(\text{Cu,Zn})\text{Al}_2$ и купалит цинкистый $(\text{Cu,Zn})\text{Al}$, два других существенно цинковые — $(\text{Zn,Cu})\text{Al}_2$ и $(\text{Zn,Cu})_2\text{Al}$. Образование их шло по линии увеличивающегося концентрирования цинка в последовательности $(\text{Cu,Zn})\text{Al}_2 \rightarrow (\text{Cu,Zn})\text{Al} \rightarrow (\text{Zn,Cu})\text{Al}_2 \rightarrow (\text{Zn,Cu})_2\text{Al}$.

3. Аналогия состава и структуры хатырkitа с синтетическим CuAl_2 позволяет предположить, что близкими были и температуры их кристаллизации — около 600 °С (Юм-Розери, Рейнор, 1959). Хатырkit, по-видимому, образовался в восстановительных условиях.

4. Более поздние интерметаллиды алюминия, меди и цинка, видимо, являются диффузионно-метасоматическими образованиями по хатырkitу, ибо они приурочены в матрице хатырkitа к поверхностям раздела — интерстициям, трещинкам спайности и разрыва. Такое расположение включений по ослабленным зонам матрицы из полиметалльных сплавов характерно для явления диффузии в результате механической деформации (Мартин, Доэрти, 1978). Подтверждением предполагаемого механизма образования интерметаллических соединений цинка с медью и алюминием могут служить следы деформации в хатырkitе и подобие состава и струк-

туры цинкистого купалита и его синтетического аналога CuAl , формирующегося путем твердофазного замещения искусственного аналога хатыр-кита CuAl_2 (Хансен, Андерко, 1962).

Температуры образования природных интерметаллидов алюминия, меди и цинка, вероятно, сопоставимы с температурами появления их искусственных аналогов: для купалита, как для CuAl в промежутке 560—400 °С, а для алюминидов цинка — диапазон ниже 400 и выше 300 °С, когда в системе Zn—Al формируются фазы ZnAl_2 и Zn_2Al (Юм-Розери, Рейнор, 1959).

5. Гипергенные изменения у природных интерметаллических соединений Cu , Zn , Al не обнаружены.

6. Следует обратить внимание на то, что при исследовании шлихов протоочных проб коренных и рыхлых платиноносных пород из районов развития гипербазитовых массивов дунит-гарцбургитовой формации могут пропускаться частицы интерметаллидов алюминия и меди из-за их внешнего сходства с самородной платиной.

Детально изученный нами цементный полированный шлиф (обр. 10) со сростком 4 новых минералов передан в Горный музей Ленинградского горного института.

Литература

- Бокий Г. Б. Кристаллохимия. М.: Наука, 1971. 400 с.
Белинский В. В. Альпинотипные гипербазиты переходных зон океан—континент. Новосибирск: Наука, 1979. 264 с.
Хорнилов И. И. и др. Металлохимические свойства элементов периодической системы. М.: Наука, 1966. 360 с.
Мартин Дж., Доэрти Р. Стабильность микроструктуры металлических систем. М.: Атомиздат, 1978. 280 с.
Нарои-Сабо И. Неорганическая кристаллохимия. Будапешт: Изд-во АН Венгрии, 1969. 492 с.
Округин А. В., Олейников Б. В., Лескова Н. В. Природные сплавы цветных металлов в трапцах Сибирской платформы — новые минеральные виды. — В сб.: Бюл. науч.-технич. информ. Якутск. фил. СО АН СССР, сер. геол. и полезн. ископ. Якутии. Якутск, 1978, с. 26—29.
Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. Т. 1. М.: Metallurgizdat, 1962. 650 с.
Юм-Розери В., Рейнор Г. В. Структура металлов и сплавов. М.: Metallurgizdat, 1959. 411 с.
ASTM. Card N 2-1309. USA, New York, Committee on powder diffraction standards, 1969.

Якутский университет,
Якутск,

Всесоюзный научно-исследовательский
геологический институт (ВСЕГЕИ),
Ленинград,

Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) АН СССР,
Москва.

Поступила в редакцию
2 марта 1984 г.