НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

УДК 549 : 22

© Д. чл. М. И. НОВГОРОДОВА,* М. Е. ГЕНЕРАЛОВ,** Н. В. ТРУБКИН**

НОВЫЙ ИЗОМОРФНЫЙ РЯД TaC–NbC И НОВЫЙ МИНЕРАЛ – НИОБОКАРБИД[1] ИЗ ПЛАТИНОНОСНЫХ РОССЫПЕЙ УРАЛА

M. I. NOVGORODOVA, M. E. GENERALOV, N. V. TRUBKIN.

THE NEW TaC-NbC ISOMORPHIC ROW AND NIOBOCARBIDE – A NEW MINERAL FROM PLATINUM PLACERS OF THE URALS

The study was carried out with materials from the original P. Walther's collection gathered at the beginning of the XX-th century in Nizhnetagilsky district at the Middle Urals. Several mineral phases have been detected as constituents of this material. 1) Carbides of Ta and Nb with wide variations of their composition along the $(Ta_{0,95}Nb_{0,05})C$ – $(Nb_{0,80}Ta_{0,20})C$ isomorphic row. According to the CNMMN IMA recommendations, two minerals may be discerned there: tantalcarbide and niobocarbide, and the last one is the newly discovered mineral approved by the CNMMN of IMA. These Ta-Nb carbides have the cubic structure and contain minor Fe, Sn, Mn and Ti admixtures; their crystals have complex growth fabric. 2) Native metals and alloys presented as inclusions and intergrowths in the Ta-Nb carbides. There are among them native gold, α-Fe, nickel, Fe-Ta-Nb and Fe-Sn alloys. 3) Microlite and complex Mn–Ta–Nb (with Al, Si, Zr, Hf) oxides with a simpsonite–like structure. 4) Apatite, Ti-magnetite, dolomite, zircon, wustite, serpentine and graphite – as rare inclusions in carbides. The general conclusion of the study assumes that the Ta-Nb mineralisation is related, as the PGE one, to zonal dunite-clinopyroxenite massifs of the Urals.

ВВЕДЕНИЕ

В 1909 г. в журнале „Nature" появилась статья П. Вальтера, в которой сообщалось об открытии самородного тантала в шлиховом платиновом концентрате из уральских россыпей (Walther, 1909). Несколько позже было опубликовано сообщение В. Джона о самородном тантале из россыпей Алтая (John, 1910). В 60-х годах К. Фрондел после дополнительного исследования материала из коллекции Вальтера пришел к выводу о том, что этот минерал является карбидом тантала, в котором впервые были диагностированы включения самородных золота и рутения (Frondel, 1962). Эти сведения с тех пор помещаются во всех справочниках и учебниках по минералогии, сопровождаясь примечаниями о том, что минерал недостоверен и, возможно, является результатом техногенного загрязнения. Хотя в начале века на Среднем Урале отсутствовали заводы по переработке платины, а тем

* *Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана, 117071, Москва, Ленинский пр., д. 18, корп. 2.*
** *Институт геологии рудных месторождений, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, 109017, Москва, Старомонетный пер., 35.*

[1] Рассмотрено и рекомендовано к опубликованию Комиссией по новым минералам и названиям минералов Всероссийского минералогического общества РАН 7 июня 1995 г. Утверждено Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации 22 декабря 1995 г.

более редкометальных руд, и источник загрязнения оказывался весьма проблематичным, мнения о техногенном происхождении карбида тантала придерживалась большая часть минералогов, опираясь на высказывание Гольдшмидта о недопустимости геохимической ассоциации золота, платины и тантала (Goldshhmidt, 1927).

Благодаря любезности проф. Ж. Едваба из Свободного Университета (Брюссель, Бельгия) небольшое количество порошковидного материала „карбида тантала" из коллекции П. Вальтера (закупленное в начале века фирмой Krantz), было передано в ИГЕМ РАН, а впоследствии в Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана и Геологический музей им. В. И. Вернадского.

Полученный материал был исследован с помощью оптического, микрозондового, рентгеноструктурного, электронно-микроскопического методов.

КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

С момента открытия в России платиноносных россыпей (с 20-х годов XIX в.) и до первой мировой войны на долю России приходилось 92–95 % от мирового объема добычи платины. После того как в 1867 г. была отменена существовавшая до тех пор государственная монополия на продажу и аффинаж сырой платины, обработка ее была монополизирована в Европе несколькими крупными фирмами. Наиболее влиятельная из них английская фирма „Johnson, Matte and C°" держала под своим контролем российский рынок платины примерно до начала 1900-х годов (Федоренко, 1985). Основными районами добычи были в то время Нижнетагильский и Исовский горные округа, а наиболее крупным местом добычи – Авроринский прииск, расположенный вблизи г. Соловьевой, к юго-западу от г. Нижний Тагил (рис. 1). Помимо Авроринского прииска значительные количества россыпной платины поступали из Баранчинского района, ограниченного к северу правым притоком р. Баранчи – р. Актай. Как справедливо предполагал Ж. Едваб (устное сообщение, 1991), указания В. Джона на присутствие карбида тантала в платиновых концентратах из Алтая ошибочны. По-видимому, могли быть перепутаны или неверно прочтены близкие по английскому написанию слова Altai и Actai. Это соображение тем более справедливо, что на Алтае не известны промышленные россыпи и коренные месторождения платины, разрабатывавшиеся в начале века.

Отсюда вероятно, что платиновый концентрат, объединяющий партии шлиховой платины, добывавшейся из россыпей в начале XX века, поступал из приисков, расположенных в Баранчинском (60° 07′ с. ш., 59° 39′ в. ш.) и Нижнетагильском (59° 51′ с. ш., 59° 32′ в. ш.) районах восточного склона среднего Урала.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАТИНОНОСНЫХ БАЗИТ-УЛЬТРАБАЗИТОВЫХ МАССИВОВ

В указанных районах располагается ряд дунит-клинопироксенит-габбровых массивов платиноносного пояса Урала, служивших коренными источниками для россыпной платины (рис. 1). В западной полосе платиноносного пояса известны Нижнетагильский массив (г. Соловьева, бывший Авроринский прииск) и ряд мелких массивов в междуречье р. Баранчи и ее правого притока р. Актай, в восточном поясе – Тагильский и Баранчинский массивы, объединяемые в единый Тагило-Баранчинский массив.

Массивы, простирающиеся в субмеридиональном направлении размещаются на стыке двух крупных структур: Центральноуральского поднятия на западе и

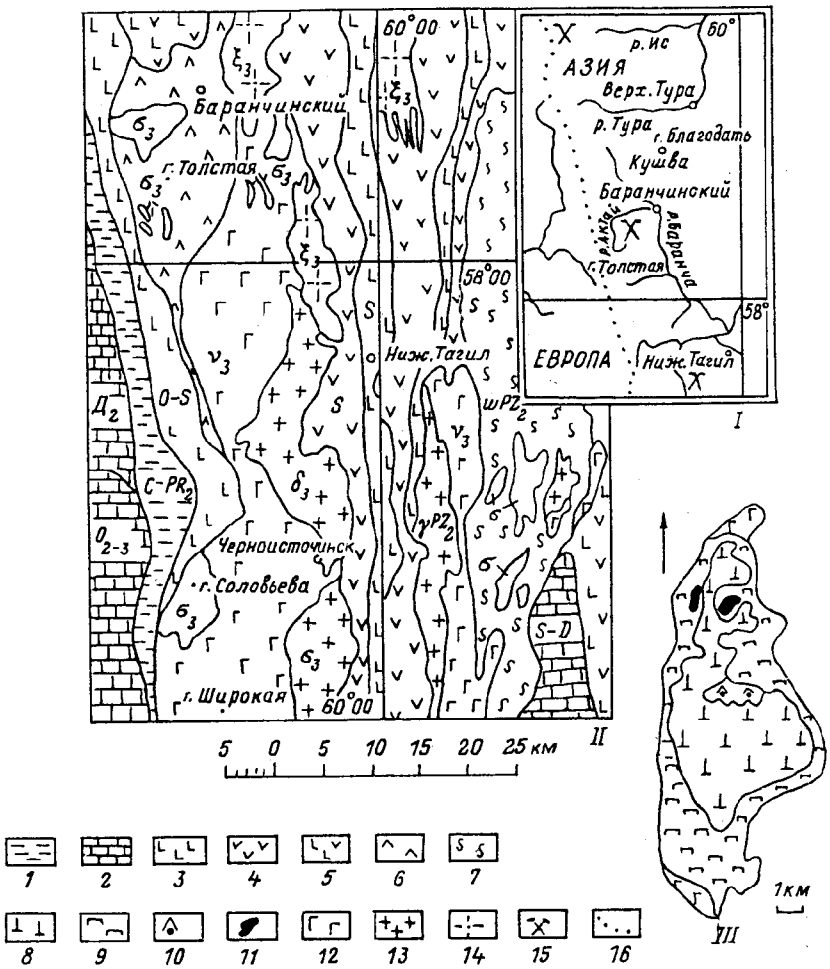

Рис. 1. Географическое положение районов добычи россыпной платины в начале века (I); схематические геологические карты Нижнетагильского и Баранчинского районов (II) и Нижнетагильского дунит-клинопироксенит-габбрового массива по Г. Б. Ферштатеру и Е. В. Пушкареву (1992) – (III).

1 – кристаллические сланцы C–PR$_2$; *2* – карбонатные породы, мраморы, карбонатные и филлитовые сланцы O$_{2-3}$ и D$_{2gv}$; *3* – диабазы, базальты, долериты, базальтовые порфириты, туфы, амфиболиты и зеленые сланцы O–S; *4* – трахитовые и трахилипаритовые порфиры, S; *5* – эффузивы смешанного состава, S; *6* – амфиболиты и роговообманковые гранато-глаукофановые сланцы; *7* – серпентиниты, ω PZ$_2$; *8* – дуниты, σ$_3$ S–D; *9* – пироксениты и горнблендиты, σ$_3$ S–D; *10* – оливиновые пироксениты; *11* – тылаиты; *12* – габбро, ν$_3$ S–D; *13* – гранитоиды, γ PZ$_2$; *14* – щелочные граниты и сиениты, ξ$_3$ S–D; *15* – районы добычи россыпной платины; *16* – линия современного водораздела Уральского хребта.

Fig. 1. Situational map of districts with platinum placer mines at the beginning of the XX-th century (I); geologic sketch maps of Nizhnetagilsky and Baranchinsky districts (II) and Nizhnetagilsky dunite-clinopyroxenite-gabbroid massif (III). (After G. B. Ferstadter and E. V. Pushkarev, 1992).

Тагильского погружения (трога) на востоке, контролируясь Главным Уральским глубинным разломом. Вмещающие породы представлены дислоцированными вулканогенными (преимущественно, толеитовыми базальтами) и вулканогенноосадочными образованиями ордовика, раннего силура и девона. Базальтоиды превращены в амфиболиты, интенсивно дислоцированные и мигматизированные с многочисленными телами и жилами плагиогранито-гнейсов (Геологическое..., 1981).

Платиноносные базит-ультрабазитовые массивы характеризуются концентрически-зональным строением с дунитовым ядром, окаймляемым малоглиноземистыми оливиновыми клинопироксенитами. На контакте между ними иногда встречаются маломощные зоны верлитов. Периферические части представлены магнетитсодержащими клинопироксенитами, часто серпентинизированными.

По мнению Г. Б. Ферштатера и Е. В. Пушкарева (1992), обнаруживших в составе пироксенитов (тылаитов) Нижнетагильского массива ортоклазо-нефелиновые симплектитовые сростки (псевдолейцит), тылаиты представляют собой магматические породы, являясь гипабиссальной фацией оливиновых клинопироксенитов. Отмечается присутствие в тылаитах апатита, магнетита (TiO_2 2–3 %, Cr_2O_3 1 %), для ортоклазо-нефелиновых симплектитов – высокие содержания Sr (3500–4000 г/т).

Калиевые габброиды в их жильной фации известны в Баранчинском (Кузнецов, 1950) и Тагильском массивах. Ассоциация ранних калиевых габброидов распространена во многих платиноносных базит-ультрабазитовых массивах. Они сопровождаются, с одной стороны, дунитами и клинопироксенитами, с другой стороны, дают гранитоидные и сиенитоидные ассоциации. Согласно А. Н. Заварицкому (1961 г.) имеется характерная связь щелочных габброидных пород через нефелиновые монцониты с нефелиновыми и полевошпатовыми сиенитами. Для Баранчинского массива Е. А. Кузнецовым (1950) описаны шонкиниты и сиенит-пегматиты.

Повышенная щелочность габброидов, ассоциирующих с платиноносными дунитами и клинопироксенитами, высокие содержания Fe, Ti, P и Sr в тылаитах, концентрически-зональное строение массивов, по мнению Г. Б. Ферштатера и Е. В. Пушкарева (1992), является следствием формирования всего дунит-клинопироксенит-габбрового комплекса в условиях субплатформенного режима, установившегося на Урале в позднем ордовике перед заложением Тагильского трога с островодужным геодинамическим режимом. Наиболее ярким проявлением магматизма общеуральской эпохи стабилизации в ордовике является формирование миаскитов и связанных с ними карбонатитов (Левин, Роненсон, 1980), которые имеют Rb/Sr возраст 440–460 млн лет (Кононова и др., 1979). С щелочным комплексом связана Ta-Nb и редкоземельная минерализация, однако, при широком ее распространении на юге в щелочных пегматитах Ильменских и Вишневых гор, на севере, в связи с калиевыми габброидами и более поздними нефелиновыми сиенитами она не известна.

В строении Тагильского и других рассматриваемых массивов участвуют анортозит-гранитоидные серии пород, образующие инъекционные мигматиты, дайки, пегматитовые жилы, и участвующие в составе магматического цемента интрузивных брекчий габброидов (Эвгеосинклинальные..., 1984). Редкометалльные гранитные пегматиты с Ta-Nb минерализацией здесь не известны.

Безусловно, коренным источником россыпей, содержащих минералы платиноидов, являются дуниты, верлиты, оливиновые пироксениты с хромитовым, хроммагнетитовым и малотитанистым магнетитовым оруденением. Платиновая минерализация в них представлена, в основном, железистой платиной (изоферроплатиной) с примесью иридия, осмия, родия и рутения (Юшкин и др., 1986). Самородное золото поступало в россыпи из коренных проявлений золото-кварцевой минерализации, типичной для Урала. Повышенная щелочность дериватов дунит-клинопироксенит-габбровых массивов дает основание предполагать связь с ними тантало-ниобиевой минерализации.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучавшийся порошковидный материал представлен мелкими кристаллами, сростками кристаллов и их обломками размером 0.05–0.15 мм. Большая часть зерен характеризуется бронзово- и соломенно-желтым цветом, ярким металлическим блеском и в целом напоминает зерна неокисленного пирита. Здесь же встречено несколько уплощенных частиц самородного золота. При исследовании изготовленных из такого материала полированных шлифов в оптическом микроскопе и последующих микрозондовых исследованиях минеральных фаз в составе данного материала были обнаружены:

1) карбиды тантала и ниобия с широкими вариациями Ta/Nb отношения, вплоть до составов с преобладанием Nb над Ta;

2) самородные металлы и интерметаллические соединения, среди которых установлены самородные золото, α-железо с разнообразными примесями, в том числе с Cr и Pt, никель, интерметаллические соединения железа, тантала и ниобия, железа и олова, графит;

3) тантало-ниобаты: микролит и сложные оксиды Mn, Ta, Nb, (Al, Si, Zr, Hf) со структурой симпсонита;

4) единичные включения в карбиде тантала и ниобия, диагностированные с помощью электронной микроскопии: апатит, титансодержащий магнетит, доломит, кальцит, циркон, серпентин, шарики иоцита.

КАРБИДЫ ТАНТАЛА И НИОБИЯ

Поскольку Ta-Nb карбиды характеризуются широкими вариациями содержаний Ta и Nb, в соответствии с рекомендациями Международной КНМ в качестве минеральных видов выделяются карбиды, обогащенные Ta (TaC > 50 ат.%) – минерал танталкарбид, упоминаемый в справочниках по минералогии, но малоизученный, и карбиды, богатые ниобием (NbC > 50 ат.%) – новый минерал ниобокарбид (niobocarbide) – (Семенов, 1991).

Макроскопически танталкарбид и ниобокарбид неотличимы друг от друга. Оба минерала встречаются в сростках друг с другом и в отдельных зернах в виде кристаллов и обособлений округлой или неправильной формы. Размер зерен до 0.2 мм. Обломочная форма некоторых зерен, вероятно связана с их механическими повреждениями в россыпи. Обнаружено включение обломка Ta-Nb карбида в зерне самородного золота тонкопластинчатого строения (рис. 2). Кристаллы имеют кубический, октаэдрический, вытянутый ромбододекаэдрический габитус, иногда образуют скелетные формы (рис. 3). Макроскопически они обладают бронзово- или соломенно-желтым цветом, металлическим блеском, излом раковистый, спайности нет.

В отраженном свете цвет танталкарбида белый, кремовато-белый, ниобокарбида – светло-кремовый до розовато-кремового. Оба минерала оптически изотропны, двуотражение и внутренние рефлексы отсутствуют.

Для зерна танталкарбида, содержащего (мас.%) Ta 69.98 %, Nb 21.56 % измеренные показатели отражения (λ, нм; *R*, %): (400) 27.8, (420) 31.3, (440) 34.9, (460) 40.0, (480) 42.3, (500) 42.8, (520) 45.5, (540) 47.9, (560) 49.0, (580) 51.0, (600) 54.0, (620) 54.7, (640) 55.3, (660) 55.9, (680) 56.0, (700) 56.4. Измеренные показатели отражения ниобокарбида для зерна, содержащего (мас.%) Ta 54.11 %, Nb 35.89 (λ, нм.; *R*, %): (400) 24.0, (420) 26.2, (440) 28.6, (460) 31.8, (480) 33.9, (500) 34.4, (520) 36.2, (540) 38.5, (560) 41.0, (580) 45.1, (600) 48.2, (620) 49.4, (640) 51.5, (660) 52.8, (680) 53.6, (700) 54.8, (спектрометрическая установка ВИМСа, эталон – Si, съемка Д. К. Щербачева – рис. 4).

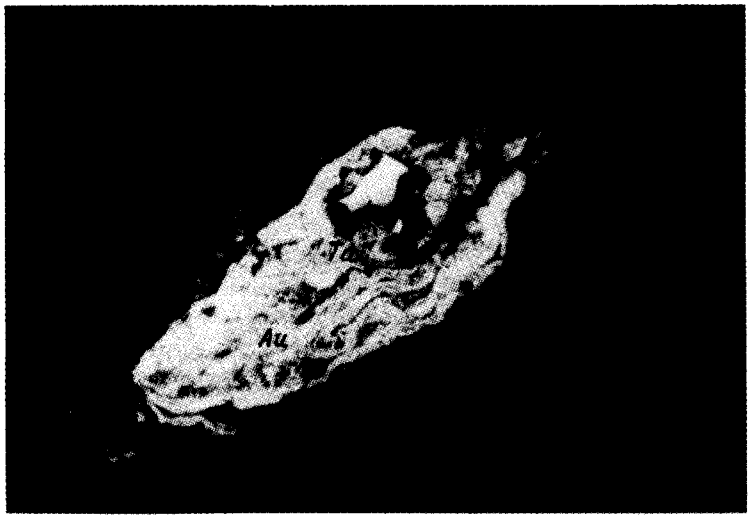

Рис. 2. Обломок кристалла танталкарбида (TaC) в россыпном золоте (Au). Полированный шлиф, увел. 400.

Fig. 2. Tantalcarbide crystal fragment in a grain of the placer gold. Polished section, ×400.

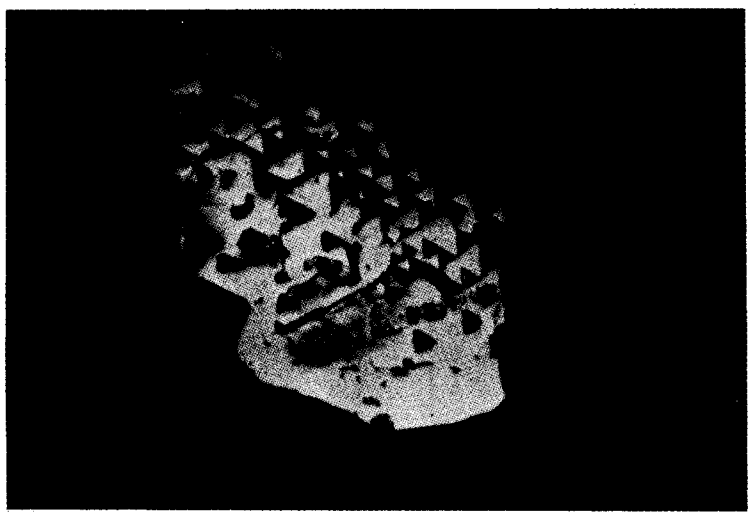

Рис. 3. Скелетный кристалл танталкарбида. Полированный шлиф, увел. 400.

Fig. 3. Skeletal tantalcarbide crystal. Polished section, ×400.

Твердость микровдавливания этих карбидов, измеренная на ПМТ-3, составляет соответственно: 1700–1900 кгс/мм² (среднее из 10 измерений 1800 кгс/мм², $P = 50$ г) и 1850–1900 кгс/мм² (среднее из 4 измерений 1870 кгс/мм², $P = 100$ г). Для зерен с разными соотношениями в составе Ta и Nb заметных различий в твердости не отмечено. Форма отпечатков изометричная, уже при нагрузке 50 г появляются трещины, что свидетельствует о хрупкости минералов.

В составе танталкарбида по данным микрозондового анализа определены

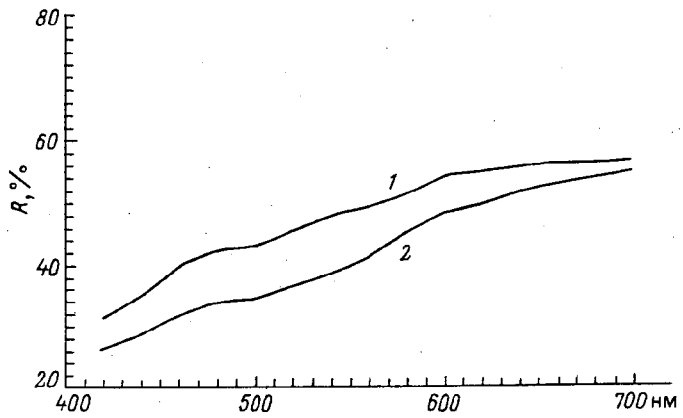

Рис. 4. Кривые дисперсии отражения танталкарбида (*1*) и ниобокарбида (*2*).

Fig. 4. Reflection spectra of tantalcarbide (*1*) and niobocarbide (*2*).

Таблица 1

Химический состав танталкарбида (мас.%)

Chemical composition of tantalcarbide, mas.%

Зерно	№ зерна и зон в нем	Ta	Nb	Дефицит суммы	$C_{теор.}$
1	0–1	84.85	9.65	5.42	6.84
2	14–1	88.00	2.50	9.50	6.13
3	1–1	76.08	17.03	6.78	7.21
4	2–1	78.96	14.24	6.75	7.05
5	3–1	76.71	16.80	6.48	7.23
6	4–1	72.89	19.46	7.29	7.32
7	5–1	75.93	15.57	8.41	7.02
8	6–1	76.78	16.02	7.14	7.14
9	7–1	76.80	16.74	6.42	7.23
10	8–1	76.80	16.87	5.82	7.25
11	5–2	72.37	17.98	9.54	7.10
12	7–2	71.47	20.62	7.53	7.42
13	9–2	71.32	22.34	6.03	7.59
14	10–1	69.98	21.56	8.37	7.40
15	11–2	70.04	21,84	8.04	7.44
16	12–1	65.62	25.92	8.39	7.67
17	5–2	67.68	22.57	9.59	7.38
18	5–3	75.88	15.83	8.20	7.05
19	8–2	59.72	30.51	9.71	7.88
20	11–3	59.70	30.05	10.21	7.82
21	13–1	61.24	29.74	8.94	7.92

Кристаллохимические формулы ($C_{теор}$):

ан. 2 – $(Ta_{0.95}Mb_{0.05})C$, ан. 8 – $(Ta_{0.71}Nb_{0.29})C$,

ан. 12 – $(Ta_{0.64}Mb_{0.36})C$, ан. 21 – $(Ta_{0.51}Nb_{0.49})C$.

Примечание. Примеси (мас.%): Fe (0.00–0.34), Sn (0.00–0.06), Mn (0.00–0.06), в ан. 19 – 0.08 Ti; не обнаружены O, Cr, Ni, Pt; присутствие углерода подтверждено качественно. Аналитик В. А. Батырев, микрозонд Camebax-microbeam, 20 кВ, эталоны – чистые металлы, аналитические линии Ta_{M_α}, Nb_{L_α}. Анализируемые зоны в зернах: 1 – центральная часть, 2 – промежуточные, 3 – периферические.

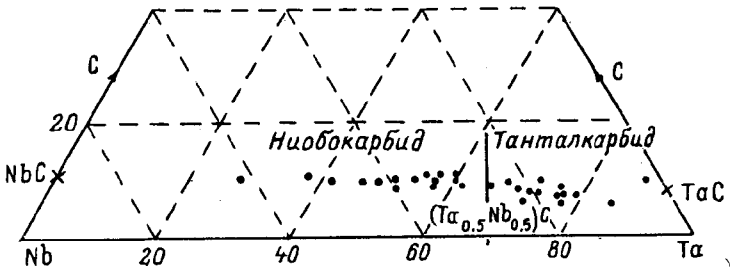

Рис. 5. Диаграмма составов карбидов тантала и ниобия (мас.%).

Fig. 5. Compositional diagram of Ta-Nb carbides (wt.%).

Таблица 2

Химический состав ниобокарбида (мас.%)

Chemical composition of niobocarbide, mas.%

Зерно	№ зерна и зоны в нем	Ta	Nb	W	Дефицит суммы	$C_{теор.}$
1	6–2	50.90	38.97	Не опр.	10.13	8.39
2	8–3	56.79	31.66	" "	8.89	7.83
3	10–2	56.79	33.19	" "	9.85	8.03
4	10–3	40.63	48.39	" "	9.75	8.32
5	11–2	54.11	35.89	" "	9.88	8.20
6	12–2	55.04	34.19	" "	10.74	8.03
7	12–3	46.18	44.21	" "	9.57	8.75
8	13–2	53.84	37.39	" "	8.08	8.37
9	13–3	51.37	40.00	" "	8.53	8.55
10	14–1	57.10	31.80	" "	11.10	7.87
11	15–3а	31.06	54.22	4.08	10.64	9.30
12	15–3б	49.09	37.95	2.93	10.03	8.33
13	15–3в	52.63	33.48	2.14	11.74	7.93
14	15–3г	35.19	50.04	4.06	11.72	9.04
15	15–3д	34.36	50.17	4.44	11.04	9.03
16	15–3е	35.70	44.05	4.55	10.70	8.34
17	16–1	48.16	41.38	0.72	9.74	8.57
18	16–2	37.24	51.16	0.96	10.64	9.12
19	16–3	27.55	60.82	2.07	9.56	9.80
20	17–1	33.45	56.05	0.96	10.54	9.50
21	17–2	41.14	47.92	0.48	10.46	8.93

Кристаллохимические формулы ($C_{теор}$):

ан. 2 – $(Nb_{0.52}Ta_{0.48})C$, ан. 11 – $(Nb_{0.75}Ta_{0.22}W_{0.03})C$,

ан. 17 – $(Nb_{0.62}Ta_{0.37}W_{0.01})C$, ан. 21 – $(Nb_{0.80}Ta_{0.19}W_{0.01})C$.

Примечание. Примеси Fe (до 0.34 %), Sn (до 0.02 %), Mn (до 0.06 %), Pt – следы; O, Cr, Ni не обнаружены. Присутствие углерода определено качественно. Аналитик В. А. Батырев, микрозонд Camebax-microbeam. Анализируемые зоны в зернах: 1 – центральная часть, 2 – промежуточные, 3 – периферические (от а до е по направлению к краю зерна).

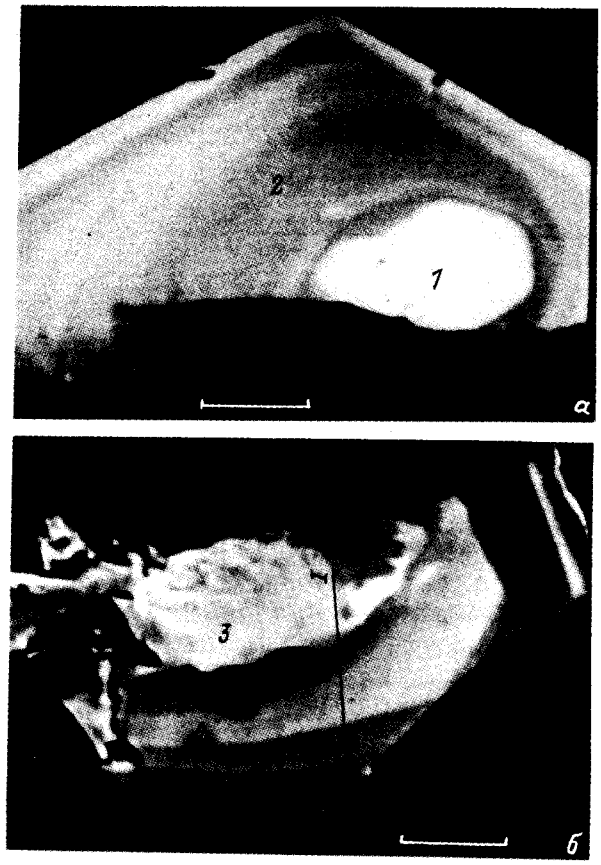

Рис. 6. Зональные кристаллы карбидов тантала и ниобия. Изображения в обратно-рассеянных электронах (e^-). Размер масштабной линейки 10 мкм.

Цифры на рис. *а—г* соответствуют номерам анализов: *1* — ан. 8, табл. 1; *2* — ан. 1, табл. 2; *3* — ан. 2, табл. 1; *4* — ан. 10, табл. 2; *5* — ан. 14, табл. 1; *6* — ан. 2, табл. 2; *7* — ан. 4, табл. 2; *8* — ан. 15, табл. 1; *9* — ан. 5, табл. 2; *10* — ан. 20, табл. 1; I—I — профиль сканирования.

Fig. 6. Zonal crystals of Ta-Nb carbides: back-scattered electron images; scale-bar – 10 mkm.

(мас.%): Ta 59.70–88.0, Nb 2.50–30.51, $C_{расч}$ 6.13–7.88 %. Присутствие углерода подтверждено качественно, по сравнению с фоном в диапазоне линии C_{K_α} на соседних с карбидом безуглеродистых (металлических) минералах, количественные замеры затруднены вследствие инструментальных ограничений. Сопоставление теоретически рассчитанного содержания углерода для тантало-ниобиевых монокарбидов с дефицитом суммы анализов (табл. 1) показывает их расхождение в сторону некоторого превышения суммы над необходимым количеством углерода. Это может быть связано как с характером анализируемой поверхности (наличием микропор, трудностью получения идеально плоской поверхности при полировке мелких зерен, обладающих очень высокой твердостью), так и с возможным присутствием избыточного углерода, рассеянного в матрице карбида в виде ультрадисперсного графита. Глобулярные включения графита размерами в десятые доли микрона были встречены в электронно-микроскопических препаратах, полученных при диспергировании кристаллов карбидов. Пониженный по отношению к теоретическому содержанию углерода дефицит суммы анализа (например, ан. 1, табл. 1)

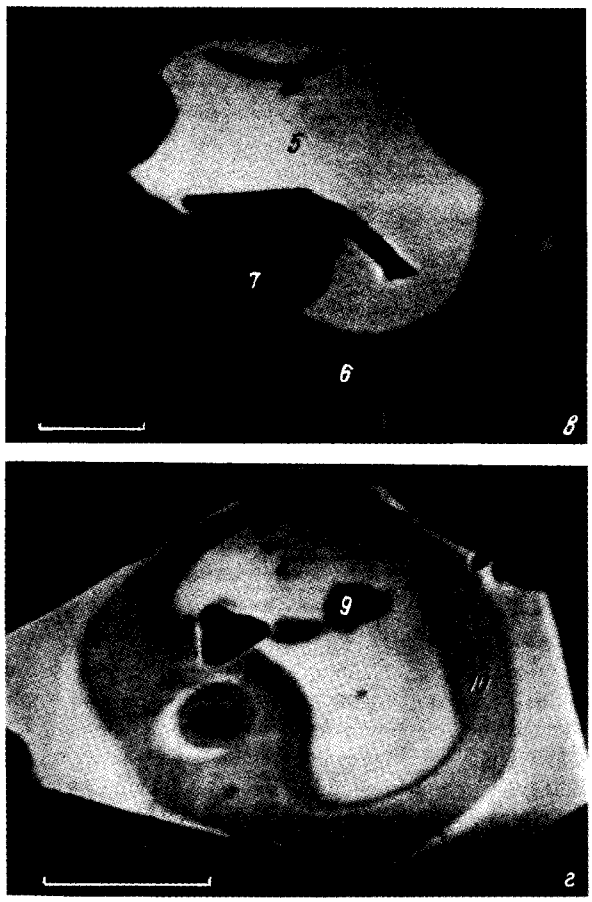

Рис. 6 (*продолжение*).

может быть связан со слабой недосыщенностью углеродом танталкарбида. По расчетам кристаллохимических формул область составов танталкарбида охватывает ряд $Ta_{0.51}Nb_{0.49}C$–$Ta_{0.95}Nb_{0.05}C$. Для TaC теоретические содержания (мас.%): Ta 93.58, C 6.22. Помимо Ta и Nb в составе Ta-Nb карбида определены следующие малые примеси (мас.%): Fe до 0.34, Sn до 0.02, Mn до 0.06, Ti до 0.11. Качественно установлено отсутствие кислорода, с чувствительностью < 0.01 % отсутствуют Cr, Ni и платиноиды.

В составе нового минерала – ниобокарбида присутствуют (мас.%): Ta 27.55–57.10, Nb 31.66–60.82 %, $C_{расч}$ 83–9.80. Установлены те же концентрации малых примесей, что и для танталкарбида. В составе ниобокарбида, обогащенного Nb, обнаружена примесь W 0.48–4.55 мас.% (табл. 2). Теоретический состав NbC (мас.%): Nb 88.55, C 11.45. По расчетам кристаллохимических формул, концентрационная область ниобокарбида составляет $Nb_{0.52}Ta_{0.48}C$–$Nb_{0.80}Ta_{0.19}W_{0.01}C$.

В целом изоморфный ряд карбидов Ta и Nb представлен минералами состава $Ta_{0.95}Nb_{0.05}C$–$Nb_{0.80}Ta_{0.19}W_{0.01}C$. В соответствии с принятой для непрерывных рядов номенклатурой, концентрационной границей между двумя минеральными видами является состав ($Ta_{0.50}Nb_{0.50}C$) (мас.%): Ta 60.75, Nb 31.19, C 8.06 (рис. 5).

Для многих кристаллов Ta–Nb карбидов на изображениях в обратно-рассеянных электронах наблюдается четкая зональность (рис. 6). Центральная часть зерен обычно сложена танталкарбидом, а содержания Nb неравномерно возрастают

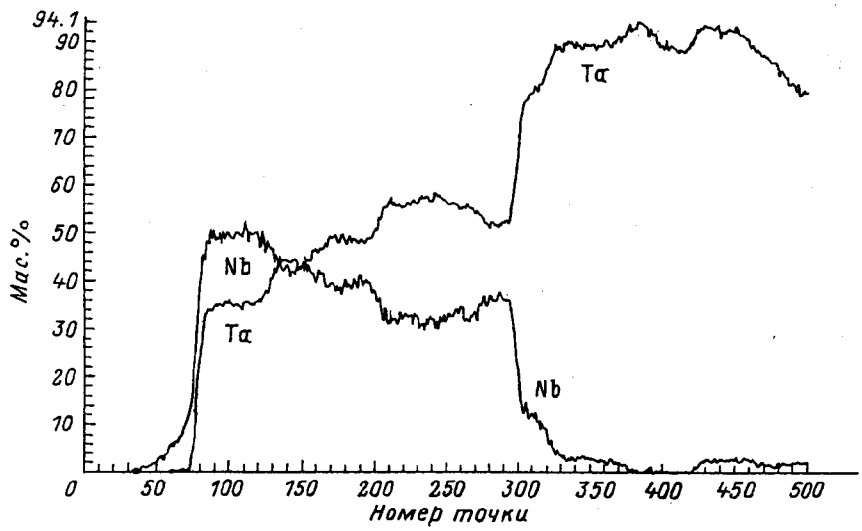

Рис. 7. Вариации содержаний Ta и Nb по профилю I–I в кристалле, изображенном на рис. 6, б. Шаг сканирования 0.1 мкм.

Fig. 7. Variations of Ta and Nb grades along the profile shown at fig. 6.

к периферии (рис. 7) вплоть до ниобокарбидовых составов в отдельных зонах. Центральная высокотанталовая часть зерен часто обнаруживает коррозионные соотношения с периферическими зонами, сложенными ниобокарбидом (рис. 6), что свидетельствует о прерывистости роста кристаллов карбида. Присутствуют зерна, сложенные целиком высокониобиевыми карбидами, зональность которых имеет обратный характер, т. е. их центральные зоны могут быть обогащены ниобием по отношению к периферическим (рис. 8). Указанные соотношения указывают на неоднократное зарождение тантало-ниобиевых карбидов с автоколебательным характером послойного роста кристаллов, отражающихся на формировании ритмично чередующихся периферических зон с варьирующими отношениями Ta/Nb. В зернах ниобокарбида, содержащих примесь W, ее содержание максимально в обогащенных Nb зонах. Кроме зерен с концентрически-зональным внутренним строением, встречены зерна ниобокарбида с элементами сфероидальных, глобулярных структур. В частности, выделяются обогащенные Ta глобули с более богатым Nb интерстициальным заполнением.

В кристаллах Ta-Nb карбидов встречаются полости, иногда в виде отрицательных кристаллов, а также минеральные включения, среди которых диагностированы самородное железо и разнообразные по составу тантало-ниобаты.

Структурные данные для танталкарбида и ниобокарбида получены на основе рентгеновской и электронной дифрактометрии. Дебаеграмма Ta-Nb карбида (табл. 3), снятая с исходного порошковидного материала, обнаруживает множество дополнительных линий с отражениями других минералов, сопутствующих Ta-Nb карбидам. Точечные картины микродифракции однозначно подтверждают кубическую структуру танталкарбида и изоструктурного с ним ниобокарбида, пространственную группу $Fm3m$ (структурный тип NaCl), параметр элементарной ячейки $a = 4.45 \pm 0.01$ Å, $Z = 4$, $V = 88.1$ Å. Различий по величине элементарной ячайки для танталкарбида и ниобокарбида с разным соотношением Ta и Nb не обнаружено. Танталкарбид и ниобокарбид – изоструктурные соединения, неразличимые по рентгенограмме и обладающие одинаковыми (с данной точностью измерений) размерами элементарной ячайки.

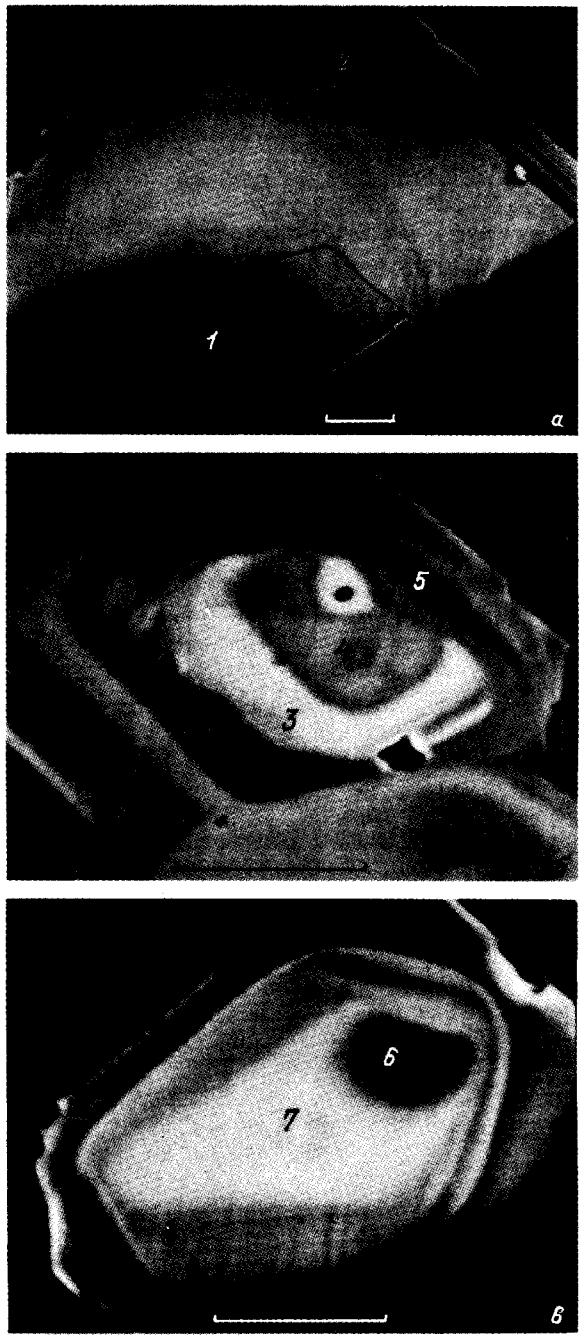

Рис. 8. Зональные кристаллы карбида Ta и Nb, обогащенные Nb и W. Количественные анализы по профилю I кристалла 8, *а* (см. табл. 2).

Изображения в обратно-рассеянных электронах (e^-). Размер масштабной линейки 10 мкм. Цифры на рис. *а*—*в* соответствуют номерам анализов в табл. 2: *1* — ан. 11; *2* — ан. 12, 13, 14, 15, 16 (по профилю I–I, указанному на рис. 8, *а* от центра к периферии); *3* — ан. 17; *4* — ан. 18; *5* — ан. 19; *6* — ан. 20; *7* — ан. 21.

Fig. 8. Zonal crystals of Ta-Nb carbides enriched in W and Nb. Back-scattered electron images; scale-bar – 10 mkm.

Таблица 3

Расчет дебаеграммы смеси Ta-Nb карбидов с сопутствующими тантало-ниобатами

Powder diffraction data for Ta-Nb carbides with associated tantalo-niobates

Исходная проба		TaC ASTM, № 19-1292		Микролит ASTM, № 3-1139		Симпсонит ASTM, № 15-705	
I	*d*, Å	*I*	*d*, Å	*I*	*d*, Å	*I*	*d*, Å
1	6.26	–	–	31	6.00	9	6.29
2	3.62	–	–	–	–	45	3.66
4	3.14	–	–	42	3.13	18	3.19
0.5	3.05	–	–	68	3.00	–	–
7	2.84	–	–	–	–	86	2.84
10	2.56	100	2.57	31	2.60	23	2.59
6	2.46	–	–	16	2.39	18	2.43
9	2.22	65	2.227	–	–	14	2.24
2	2.12	–	–	–	–	68	2.12
4	1.92	–	–	37	2.00	23	1.92
0.5	1.883	–	–	84	1.84	18	1.84
4	1.735	–	–	–	–	36	1.76
4	1.638	–	–	–	–	100	1.64
8	1.574	45	1.575	100	1.57	9	1.59
5	1.479	–	–	42	1.51	23	1.50
3	1.416	–	–	47	1.46	96	1.39
1	1.359	–	–	63	1.36	27	1.36
8	1.343	40	1.344	–	–	45	1.33
1	1.300	–	–	16	1.30	18	1.30
7	1.289	14	1.287	–	–	–	–
6	1.285	–	–	10	1.27	55	1.28
2	1.230	–	–	5	1.23	50	1.22
1	1.158	–	–	21	1.20	45	1.18
1	1.156	–	–	68	1.19	27	1.17
3	1.129	–	–	63	1.16	37	1.15
4	1.116	–	–	32	1.14	–	–
3	1.115	8	1.115	–	–	–	–

Примечание. Условия съемки: РКУ-114.6, Fe-излучение, внутренний стандарт – Si, диаметр резинового шарика 0.3 мм.

Рассчитанная плотность для танталкарбида 14.2 г/см³ (для минерала состава $Ta_{0.95}Nb_{0.05}C$), для ниобокарбида состава $Nb_{0.80}Ta_{0.19}W_{0.01}C$ – 9.3 г/см³.

Основные линии на дебаеграмме, снятой для минеральной смеси, в которой танталкарбид и ниобокарбид – преобладающие фазы (табл. 3), [*d*(Å), (I), (*hkl*)]: 2.56 (10) (111), 2.22 (9) (200), 1.574 (8) (220), 1.343 (8) (311), 1.289 (7) (222), 1.115 (3) (400). Параметр элементарной ячайки по рентгеновским данным, как и указанный выше по расчетам картин микродифракции для зерен с соотношениями Ta > Nb и Ta < Nb, составляет $a = 4.45 \pm 0.01$ Å.

Танталкарбид и ниобокарбид являются природными аналогами искусственных соединений TaC ($a = 4.45$ Å) и NbC ($a = 4.424–4.457$ Å). Известные среди карбидов тантала недосыщенные углеродом соединения – Ta_2C (гексагональный, $a = 3.09$, $c = 4.93$ Å), $\beta = TaC_{0.38}–TaC_{0.50}$ (гексагональный, $a = 3.101$, $c = 4.937$ Å), $\gamma = TaC_{0.38}–TaC_{0.50}$ (кубический $a = 4.42$ Å), $\delta = TaC_{0.38}–TaC_{0.50}$ (гексагональный, $a = 2.46$, $c = 6.69$ Å), метастабильные фазы, известные в системе Nb–C – в исследованных образцах не обнаружены.

Изученный нами материал в качестве эталонных образцов танталкарбида и ниобокарбида помещен для хранения в Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана и в Геологический музей им. В. И. Вернадского (Москва).

САМОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ И ИНТЕРМЕТАЛЛИДЫ

В платиноносных россыпях Среднего Урала наряду с промышленно-ценными металлами – золотом и платиной – еще с прошлого века находили самородные железо, олово и другие металлы. Заслуживающие доверия сообщения Н. К. Высоцкого (Минералогия..., 1941) о теллурическом железе относятся к его находкам в платиноносных россыпях Нижнетагильского района. В самородном железе была определена примесь Pt 8.15 %. Мелкие зерна и пластинки самородного олова также были диагностированы, однако детальные анализы их отсутствуют. Исследования концентрата карбида тантала, выполненные в 60-е годы К. Фронделом и в последние годы Ж. Едвабом (Jedwab, 1990) показали, что помимо самородного золота в нем также присутствует самородный рутений. В составе последнего выявлена примесь Ta и доказано отсутствие в определяемых количествах примесей других платиноидов. Вместе с тем в концентрате обнаружены отдельные зерна Os-Ir-Ru и Ir-Os-Ru-Fe состава. Неизвестными ранее минералами является оловянистое железо с составами $Fe_{0.95}Sn_{0.05}$ и $Fe_{0.50}Sn_{0.50}$ (Jedwab, 1990).

Новые данные по самородным металлам, присутствующим в виде мельчайших

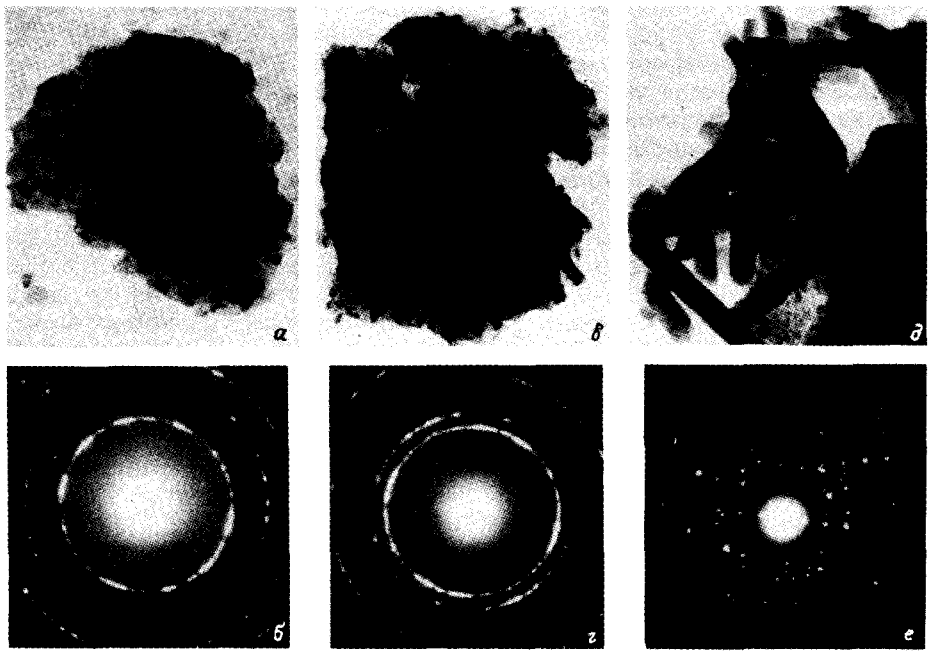

Рис. 9. Самородное хромистое железо (*а, б*), никель (*в, г*) и апатит (*д, е*) из включений в Ta-Nb карбиде. Электронно-микроскопическое изображение и картины микродифракции.

Fig. 9. Native chromium iron (*а, б*), nickel (*в, г*) and apatite (*д, е*) from inclusions within tantalcarbide. TEM images and electron diffraction patterns.

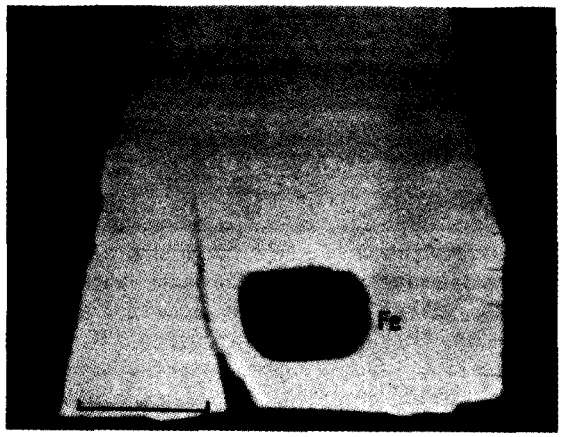

Рис. 10. Включение самородного железа (Fe) с примесями Mn, Sn, W и Pt в карбиде тантала и ниобия.

Изображение в обратно-рассеянных электронах (e^-). Размер масштабной линейки 10 мкм.

Fig. 10. An inclusion of native iron, with Mn, Sn, W and Pt admixtures, in tantalcarbide. Back-scattered electron image; scale-bar – 10 mkm.

включений внутри кристаллов Ta–Nb карбида, получены при помощи просвечивающей электронной микроскопии.

Диагностированы микронные включения самородного железа и его хромистой разновидности со структурой α-Fe и самородного никеля (рис. 9). Четкие кольцевые отражения на картинах микродифракции свидетельствуют о поликристалличности вещества даже в столь малых объемах выделений и, соответственно, крайне малых (десятые доли микрона и менее) размерах монокристальных блоков.

Включения самородного железа, обычно, прямоугольной формы, размерами 1–5 мкм, обнаружены также при исследовании Ta–Nb карбидов под микроскопом в отраженном свете и проанализированы на микрозонде (рис. 10). Состав самородного железа по четырем анализам (мас.%): Fe 86.09–89.00, Sn 1.83–3.41, W 0.65–3.44, Mn 0.23–1.92, Si 0.82–3.05, Cr 0.16–0.18, Pt 0.00–0.09, Ta, Nb отсутствуют. В одном из относительно крупных (30 мкм) включений кроме железа диагностирован железо-оловянный интерметаллид со стехиометрией, близкой к Fe_3Sn (Fe 58.64, Sn 36.08, Mn 1.24, Si 0.26 мас.%).

Другим, более распространенным включением в изученной ассоциации является Fe-Ta-Nb интерметаллид, содержащий иногда существенную примесь Sn, W и Si. По данным микрозондового анализа в составе Fe–Ta–Nb интерметаллида присутствуют (мас.%): Fe 39.17–46.30, Ta 31.67–38.88, Nb 11.57–14.77, Mn 0.32–2.09, Sn 0.22–5.08, W 0.74–7.59, Si 0.34–4.19.

СЛОЖНЫЕ ОКСИДЫ Ta И Nb

В виде включений внутри кристаллов Ta-Nb карбида присутствуют сложные оксиды Ta и Nb (рис. 11). Включения имеют, как правило, изометричную октаэдрическую или округлую форму. Встречены также сростки оксидов с карбидами Ta и Nb, отдельные изолированные зерна обломочной формы. Размер зерен оксидов во включениях составляет 1–10 мкм, отдельных зерен – до 0.1 мм. По составу и рентгеноструктурным характеристикам выделяется два типа сложных оксидов. Один из них по составу отвечает сложному оксиду Ca, Ta, Nb типа $A_2B_2O_7$,

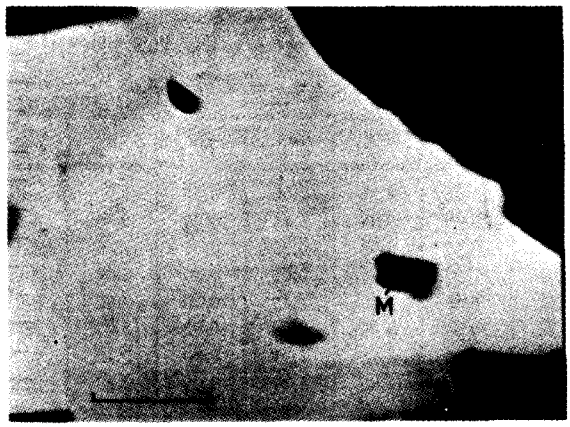

Рис. 11. Включение микролита (М) в карбиде тантала и ниобия.
Изображение в обратно-рассеянных электронах (e^-). Размер масштабной линейки 10 мкм.

Fig. 11. Inclusion of microlite (M) in the Ta-Nb carbide. Back-scattered electron image; scale-bar – 10 mkm.

принадлежащего ряду пирохлор–микролит. Резкое преобладание Ta в составе минерала (Ta/Nb отношение варьирует от 18 до 200) позволяет отнести его к крайнему танталовому члену указанного ряда – микролиту. От микролита, распространенного в гранитных пегматитах, исследованный минерал отличается практически полным отсутствием в его составе щелочных металлов (Na, K), а также U, Th, РЗЭ (табл. 4). Содержания элементов в нем варьируют в пределах (мас.%): Ta 55.14–65.06, Nb 0.32–9.71, Ca 8.02–16.39, Mn 0.09–3.05, Al 0.22–1.45, Ti 0.40–3.72; некоторые зерна обогащены Si (0.76–3.11); в одном из зерен обнаружены Zr 0.45 и Hf 0.14 (Zr/Hf = 3.2). Анализы хорошо рассчитываются на кристаллохимическую формулу микролита. Кислород в составе минерала установлен качественно, а количество его формульных единиц рассчитано по балансу валентности (табл. 4). Установлены также малые примеси Fe (до 0.09 %), Sn (до 0.06 %); Sb, Bi не обнаружены.

На дебаеграмме минеральной смеси (табл. 3) слабо проявлены основные отражения микролита. При исследовании электронномикроскопических суспензионных препаратов, обнаружены монокристальные фрагменты включений микролита в танталкарбиде. Анализ полученных точечных картин микродифракции электронов подтвердил отнесение исследуемого оксида к группе пирохлор–микролит и позволил рассчитать параметр его гранецентрированной кубической ячейки (a = = 10.60 ± 0.05 Å).

Второй тип сложных оксидов Ta и Nb, также обогащенных Ta, отличается по составу от микролита, прежде всего, высокими содержаниями Mn (табл. 6). Содержания (мас.%) Ta составляют 37.45–69.40, Nb 0.66–2.18, Ca 0.01–0.95, Mn 2.56–8.13, Al 0.20–2.86, Ti 1.56–3.72. Как и в составе микролита, Na практически отсутствует, U, Th, РЗЭ, Sb, Bi не обнаружены. В одном из зерен выявлены высокие содержания Zr (20.85 %) и Hf (11.22 %) (табл. 5). Расчет кристаллохимических формул минерала показывает, что его составы укладываются в ряд $A_2B_5O_{14}$–$A_4B_3O_{14}$. Большинство анализов рассчитываются на обобщенную формулу $(Mn, Ca, Al)_2(Ta, Nb, Ti)_5O_{14}$ и лишь Zr-Hf тантало-ниобат – на формулу: $[(Mn, Al)_{0.75}(Zr, Hf)_{3.25}]_4(Ta, Nb, Ti)_3O_{14}$. Присутствие кислорода в составе минерала установлено на качественном уровне. Приведенные в табл. 5 формульные коэффициенты кислорода рассчитаны по балансу валентностей.

Таблица 4

Химический состав микролита

Chemical composition of microlite

Зерно	Ta	Nb	Ca	Mn	Al	Na	Ti	Zr	Hf	Si
1	55.14	0.51	11.45	2.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	60.85	0.32	16.39	0.09	0.22	0.04	3.72	0.00	0.00	0.00
3	63.16	0.78	10.36	3.05	0.32	0.00	1.56	0.45	0.14	0.00
4	65.06	9.71	11.27	2.68	0.07	0.00	3.01	0.00	0.00	0.00
5	63.59	0.51	8.02	1.56	1.45	0.00	3.12	0.00	0.00	1.39
6	64.65	0.32	10.23	3.04	0.28	0.00	3.02	0.00	0.00	0.00
7	60.65	0.88	10.26	2.51	1.37	0.00	2.13	0.00	0.00	0.76
8	63.17	3.51	9.10	1.69	1.17	0.00	2.67	0.00	0.00	0.00

Кристаллохимическая формула

1 – $(Ca_{1.79}Mn_{0.26})_{2.05}(Ta_{1.91}Nb_{0.04})_{1.95}O_{6.87}$

2 – $(Ca_{2.12}Mn_{0.01}Al_{0.04}Fe_{0.01}Na_{0.01})_{2.19}(Ta_{1.74}Nb_{0.02}Ti_{0.06})_{1.82}O_{6.78}$

3 – $(Ca_{1.17}Mn_{0.17}Al_{0.42}Fe_{0.01})_{1.84}(Ta_{1.97}Nb_{0.05}Ti_{0.12}Zr_{0.03})_{2.17}O_{7.27}$

4 – $(Ca_{1.24}Mn_{0.63}Al_{0.04})_{1.91}(Ta_{1.59}Nb_{0.46}Ti_{0.04})_{2.09}O_{7.13}$

5 – $(Ca_{1.15}Mn_{0.16}Al_{0.31}Si_{0.28})_{1.90}(Ta_{2.01}Nb_{0.03}Ti_{0.05})_{2.09}O_{7.52}$

6 – $(Ca_{1.48}Mn_{0.32}Al_{0.06})_{1.86}(Ta_{2.07}Nb_{0.02}Ti_{0.05})_{2.14}O_{7.21}$

7 – $(Ca_{1.38}Mn_{0.25}Al_{0.27}Si_{0.15})_{2.05}(Ta_{1.81}Nb_{0.05}Ti_{0.09})_{1.95}O_{7.07}$

8 – $(Ca_{1.28}Mn_{0.17}Al_{0.25})_{1.70}(Ta_{1.97}Nb_{0.21}Ti_{0.10})_{2.28}O_{7.42}$

Примечание. Зерна 1–5, 7 – округлые включения в Ta–Nb карбидах; 8 – октаэдрическое включение; 6 – сросток с Ta-Nb карбидом. Примеси (мас.%): Fe (до 0.09), Sn (до 0.06). Аналитик В. А. Батырев, микрозонд Camebax, 20 кВ, эталоны – чистые металлы; аналитические линии Ta_{M_α}, Nb_{L_α}, Ca_{K_α}, Mn_{K_α}, Si_{K_α}, Al_{K_α}, Ti_{K_α}, Na_{K_α}, Zr_{K_α}, Hf_{L_α}. Кислород рассчитан по балансу валентностей.

В электронномикроскопических суспензионных препаратах обнаружить фрагменты Mn-Ta-Nb окислов не удалось. На дебаеграмме минеральной смеси (см. табл. 3) многие из дополнительных отражений совпадают с рефлексами, свойственными структуре типа симпсонита $Al_4Ta_3O_{13}(OH)$. Возможно, изученный Mn-Ta-Nb оксид действительно, как и симпсонит, характеризуется тригональной сингонией, однако его структурные характеристики нуждаются в уточнении.

ДРУГИЕ МИНЕРАЛЫ, СОПУТСТВУЮЩИЕ КАРБИДАМ И ИНТЕРМЕТАЛЛИДАМ Ta И Nb

Ж. Едваб (1990) диагностировал в концентрате карбида тантала, помимо минералов платиноидов и золота, также ильменит, магнетит и рутил, встречающиеся в виде обломков кристаллов и округлых зерен. Были обнаружены также титаномагнетит, гранаты, Ca- и Mn-Ti-танталаты, циркон, цирконий-гафниевые оксиды и силикаты (Jedwab e. a., 1992), что, вместе с полученными нами данными о наличии обогащенных Zr и Hf тантало-ниобатов, показывает, что присутствие циркония и аномальная обогащенность гафнием является характерной геохимической особенностью рассматриваемой минерализации.

Дополнительные сведения о минералах, образующих срастания и находящихся во включениях карбидов тантала и ниобия, получены авторами при электронномикроскопических исследованиях.

Таблица 5

Химический состав сложных окислов Mn, Ta и Nb типа $A_2B_5O_{14}$–$A_4B_3O_{14}$ (мас.%)

Chemical composition of complex oxides Mn, Ta and Nb, type $A_2B_5O_{14}$–$A_4B_3O_{14}$

Зерно	Ta	Nb	Ca	Mn	Al	Na	Ti	Zr	Hf
1	65.73	0.68	0.00	8.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	65.74	1.19	0.07	5.63	0.96	0.05	3.72	0.00	0.00
3	69.40	0.83	0.44	8.09	0.29	0.00	1.56	0.00	0.00
4	67.87	1.20	0.95	7.77	0.24	0.00	3.01	0.00	0.00
5	62.56	1.09	0.01	4.82	2.86	0.00	3.12	0.00	0.00
6	62.30	1.44	0.00	5.49	1.67	0.00	3.02	0.00	0.00
7	50.06	1.77	10.07	3.12	2.96	0.00	2.67	0.00	0.00
8	68.96	2.18	0.52	7.92	0.20	0.00	2.13	0.00	0.00
9	37.45	0.66	0.00	2.56	0.57	0.00	2.67	20.85	11.22

Кристаллохимическая формула

1 – $Mn_{2.00}(Ta_{4.90}Nb_{0.10}Ti_{0.00})_{5.00}O_{14.33}$

2 – $(Mn_{1.17}Ca_{0.17}Al_{0.42}Na_{0.17})_{1.93}(Ta_{4.23}Nb_{0.14}Ti_{0.91})_{5.29}O_{14.56}$

3 – $(Mn_{1.73}Ca_{0.12}Al_{0.12})_{1.97}(Ta_{4.51}Nb_{0.10}Ti_{0.40})_{5.01}O_{13.86}$

4 – $(Mn_{1.75}Ca_{0.12}Al_{0.12})_{1.99}(Ta_{4.46}Nb_{0.16}Ti_{0.38})_{5.00}O_{13.05}$

5 – $(Mn_{1.00}Al_{1.21})_{2.21}(Ta_{3.92}Nb_{0.12}Ti_{0.74})_{4.80}O_{14.38}$

6 – $(Mn_{1.19}Al_{0.74})_{1.93}(Ta_{4.13}Nb_{0.16}Ti_{0.75})_{5.04}O_{14.24}$

7 – $(Ca_{2.34}Mn_{0.58}Al_{1.02}Si_{1.04})_{4.98}(Ta_{2.58}Nb_{0.22}Ti_{0.20})_{3.00}O_{13.92}$

8 – $(Mn_{1.65}Ca_{0.14}Al_{0.09})_{1.87}(Ta_{2.48}Nb_{0.15}Ti_{0.29})_{2.92}O_{8.35}$

9 – $[(Mn_{0.52}Al_{0.23})_{0.75}(Zr_{2.54}Hf_{0.70})_{3.24}]_{3.99}(Ta_{2.29}Nb_{0.09}Ti_{0.61})_{2.99}O_{14.42}$

Примечание. Зерно 1 – корродированный реликт во включении Ta-Nb карбида; 2, 5–7 – включения в карбиде; 4, 8, 9 – отдельные обломки зерен. Присутствуют также примеси Fe до 0.09, Sn до 0.04 %; Si 3.11 % в 7 зерне, в других – не обнаружен. Аналитик В. А. Батырев, микрозонд Camebax-microbeam, 20 кВ, эталоны – чистые металлы; аналитические линии $Ta_{M\alpha}$, $Nb_{L\alpha}$, $Ca_{K\alpha}$, $Mn_{K\alpha}$ $Si_{K\alpha}$, $Al_{K\alpha}$, $Ti_{K\alpha}$, $Na_{K\alpha}$, $Zr_{K\alpha}$, $Hf_{L\alpha}$. Кислород рассчитан по балансу валентностей.

Среди микровключений определены длиннопризматический апатит (рис. 9), титансодержащий магнетит, доломит, циркон и графит. Графит распространен в виде мелких (1–2 мкм) округлых включений и микрокристаллов в форме шестиугольных табличек. Встречены единичные зерна магнезиального слоистого силиката, вероятно, серпентина, точная диагностика которого лишь по картинам микродифракции для базальных сечений затруднена. Обнаружены единичные глобули вюстита FeO.

КОРЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ КАРБИДОВ Ta И Nb

Накапливающиеся в россыпи тяжелые минералы могут иметь, как известно, своим источником различные, в том числе и генетически разнородные породы. Вместе с тем, как показано выше, в Нижнетагильском и других районах распространения платиноносных россыпей, возможные коренные источники танталониобиевой минерализации (редкометалльные граниты и гранитные пегматиты либо щелочные пегматиты типа Вишневогорско-Ильменогорского комплекса) не известны. Полученные авторами данные о минеральном парагенезисе карбидов тантала и ниобия, также, как и результаты исследования Ж. Едваба (1990),

Таблица 6

Данные химического анализа (мас.%) платинового самородка из Авроринского прииска (по А. Е. Ферсману, 1933)

Chemical composition of platinum nugget from Aurora deposit (Fersman, 1933), mas.%

Тяжелая фракция (платина)									
Pt	Fe	Ni	Pd	Ir	Cu	Os	Rh	Zn	Co
80.10	11.64	2.11	1.10	0.92	0.74	0.31	0.30	0.15	0.21
Mn	Ru	Au	Ag	Mo	Re	SiO_2	Cr_2O_3	TiO_2	
0.05	0.04	0.04	0.01	0.006	0.00008	1.56	0.57	0.10	

Легкая фракция (минеральные примеси)									
SiO_2	FeO	Cr_2O_3	MgO	ZrO_2	TiO_2	CaO	Ta_2O_5	NiO	ZnO
22.80	16.51	15.02	1.22	11.08	8.29	3.40	2.25	1.26	0.36
Nb_2O_5	MnO	SnO_2	CoO	HfO_2	Pt	Ph	As	Ir	Ru
0.97	0.52	0.65	0.39	1.02	3.30	0.62	0.25	0.10	0.02

позволяют ставить вопрос о генетическом родстве платиноидной и тантало-ниобиевой минерализации в многофазных концентрически зональных дунит-клинопироксенит-габбровых массивах. Минеральный парагенезис карбидов тантала и ниобия, определяемый по минеральному составу сростков и включений, состоит, с одной стороны, из самородного железа с примесями Mn, Sn, W и Pt, интерметаллического соединения Fe, Ta и Nb, самородного Ru с примесью Ta, графита, магнезиального слоистого силиката (серпентин ?), с другой стороны, – апатита, доломита, титанистого магнетита, циркона, тантало-ниобитов с примесями Zr и Hf. Совмещение геохимически некогерентных элементов в едином парагенезисе подтверждается опубликованными еще в 30-е годы результатами химического анализа самородка платины из Авроринского прииска, выполненного И. и В. Ноддакама в Германии (Ферсман, 1933). Этот, остававшийся единственным в своем роде химический анализ крупного самородка платины, из которого была выделена и отдельно проанализирована более легкая фракция (табл. 6), подтверждает сонахождение с платиной тантала, ниобия, циркония и гафния. Комментируя результаты анализов, А. Е. Ферсман (1933) отметил, что Ta, Nb, Zr и Hf совершенно неожиданны в ультраосновной магме и геохимически намечают собой явление огромного теоретического и практического интереса. Заключение А. Е. Ферсмана подтверждается в наше время обнаружением платиноидного и редкометалльного сырья в щелочно-ультрамафитовых комплексах. Геолого-петрологические построения (Ефимов, Таврин, 1978), позволяют говорить о генетическом сходстве платиноносных дунит-клинопироксенит-габбровых массивов Урала и кольцевых щелочно-ультрамафитовых массивов Алданского щита (Кондерский, Инаглинский и другие). Калиевые габброиды уральских массивов с их щелочным трендом дифференциации можно параллелизовать с поздними монцонитоидными и щелочными сериями пород Кондерского массива с направленным изменением состава пород, выражающимся в нарастании их щелочности (Геология..., 1994).

Платиновая минерализация массивов уральского и кондерского типов ассоциирует с хромшпинелидами и, по общепринятому мнению, относится к позднемагматическим образованиям. В Кондерском массиве особенно обогащены платиной дунит-пегматиты.

Щелочной тренд дифференциации флюидно-магматических систем способствует

накоплению Ta и особенно Nb в поздних щелочных дериватах Кондерского массива (Геология..., 1994). Тот же, но редуцированный щелочной тренд для уральских дунит-клинопироксенит-габбровых массивов, возможно, является причиной появления Ta-Nb минерализации, совмещенной с накоплением платиноидов в дунит-клинопироксеновых комплексах пород до формирования габброидов и их салических дериватов. Своеобразие рассмотренной Ta-Nb минерализации, формирующейся при высоком восстановительном потенциале среды (буфер Ta/Ta_2O_5 или IW, поскольку зафиксировано присутствие самородного железа и иоцита) помимо ассоциации с платиноидами заключается в полном отсутствии в составе тантало-ниобатов щелочей, РЗЭ, урана и тория. Вместе с наличием в парагенезисе с бесщелочными тантало-ниобатами карбидов Ta и Nb и платиноидов это является, по-видимому, характерным признаком начальных стадий накопления тантала и ниобия в зональных дунит-клинопироксенит-габбровых комплексах пород с щелочным трендом дифференциации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 93–05–9811, 96–05–64594).

Список литературы

Геология, петрология и рудоносность Кондерского массива. М.: Наука, **1994**. 170 с.

Ефимов А. А., Таврин И. Ф. О генетическом единстве платиноносных дунитов Урала и Алданского щита // Докл. АН СССР. **1978**. Т. 243. № 3. С. 991–994.

Кононова В. А., Донцова Е. И., Кузнецова Л. Д. Изотопный состав кислорода и стронция Ильмено-Вишневогорского комплекса и вопросы генезиса миаскитов // Геохимия. **1979**. № 2. С. 1784–1795.

Кузнецов Е. А. Материалы к характеристике петрографических провинций Урала. Роль щелочных пород в строении Тагильского массива // Вест. МГУ. **1950**. № 10. С. 143–152.

Левин В. Я., Роненсон Б. М. Карбонатиты Урала // Вопросы петрологии Урала (магматизм, метаморфизм, литология). Свердловск.: УНЦ АН СССР. **1980**. С. 112–125.

Минералогия Урала. М.; Л.: Изд. АН СССР, **1941**. Т. II. 414 с.

Семенов Е. И. Систематика минералов. М.: Недра, **1991**. 334 с.

Федоренко Н. В. Развитие исследований платиновых металлов в России. М.: Наука, **1985**. 264 с.

Ферсман А. Е. К геохимии платиновых месторождений Урала // Тр. Уральск. фил. Акад. Наук. **1933**. Вып. 1. С. 3–11.

Ферштатер Г. Б., Пушкарев Е. В. Нефелинсодержащие тылаиты в дунит-пироксенит-габбровой ассоциации платиноносного пояса Урала // Изв. АН СССР. **1992**. № 4. С. 74–84.

Эвгеосинклинальные габбро-гранитоидные серии. М.: Наука, **1984**. 264 с.

Юшкин Н. П., Иванов О. К., Попов В. А. Введение в топоминералогию Урала. М.: Наука, **1986**. 295 с.

Frondel C. Non-existence of native tantalum // Amer. Miner. **1962**. Vol. 47. P. 231–237.

Goldschmidt V. M. Geochemische Verteilungsgesete des Elemente // Skr. Norske Vidensk. Akad. Oslo. I. Matem. Naturvid. **1927**. K. 1. N 8. P. 1–45.

Jedwab J. Native ruthenium in tantalum carbide concentrate from the Ural Mountains, USSR // Miner. and Petrol. **1990**. Vol. 43. P. 137–146.

Jedwab J., Pineau F., Boulegue J. Le carbure de tantale de Nijni Taguil (Oural), ses inclusions et ses mineraux associes // Bulletin de liaison de la Societe francaise de Mineralogie et de Cristallographie. **1992**. Vol. 4/2. P. 30–31.

John W. Native tantalum // Nature. **1910**. Vol. 83. P. 398.

Walther P. A new mineral from a gold washing locality in the Ural mountains // Nature. 1909. Vol. 81. N 2081. P. 751–755.

Поступила в редакцию
29 апреля 1996 г.