

## МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

УДК 549.623.5

© Д. чл. В. Б. САВЕЛЬЕВА, \* С. В. КАНАКИН, \*\* Н. С. КАРМАНОВ\*\*\*

### НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО МИНЕРАЛОГИИ АМАЗОНИТОВЫХ ПЕГМАТИТОВ ПРИОЛЬХОНЬЯ (ЗАПАДНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

\* Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск;  
e-mail: vsavel@crust.irk.ru

\*\* Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ;  
e-mail: scan\_61@mail.ru

\*\*\* Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск;  
e-mail: krm@igm.nsc.ru

В амазонитовых пегматитах гранитного массива Ая в Западном Прибайкалье выявлены циннвальдит, марганцевый колумбит-танталит ( $Ta/(Ta + Nb) = 0.42—0.55$ ), микролит ( $Ta_2O_5 = 60.3—67.4\%$ ,  $Nb_2O_5 = 2.95—6.08\%$ ;  $Ta/(Ta + Nb) = 0.86—0.93$ ), плумбомикролит ( $Ta/(Ta + Nb) = 0.77—0.89$ ,  $Pb = 1.02—1.21$  к. ф.), вольфраmistый иксиолит ( $Ta/(Ta + Nb) = 0.55—0.62$ ,  $WO_3 = 21—24\%$ ), танталсодержащие самарскит ( $Ta_2O_5 = 24—34\%$ ), фергусонит ( $Ta_2O_5 = 10.6\%$ ), касситерит ( $Ta_2O_5 = 1.3—3.3\%$ ), а также вольфрамит, иттрийсодержащий флюорит, ксенотим и некоторые другие минералы. Состав аксессуарной минерализации, зональность в колумбит-танталите, его взаимоотношения с микролитом и плумбомикролитом, а также геохимические особенности пород позволяют выделить новый для Приольхонья тип пегматитов редкометалльно-редкоземельной формации — пегматиты фтор-тантал-иттриевого минерогенетического (геохимического) ряда с комплексной минерализацией.

*Ключевые слова:* гранаты, амазонитовые пегматиты, аксессуарные минералы, Прибайкалье.

### V. B. SAVELYEVA, S. V. KANAKIN, N. S. KARMANOV. NEW DATA ON MINERALOGY OF AMAZONITE PEGMATITES IN PRIOLKHONYE (WESTERN BAIKAL REGION)

Zinnvaldite, manganese columbite-tantalite ( $Ta/(Ta + Nb) = 0.42—0.55$ ), microlite ( $Ta_2O_5 = 60.3—67.4\%$ ,  $Nb_2O_5 = 2.95—6.08\%$ ;  $Ta/(Ta + Nb) = 0.86—0.93$ ), plumbomicrolite ( $Ta/(Ta + Nb) = 0.77—0.89$ ,  $Pb = 1.02—1.21$  a. p. f. u.), wolframoixiolite ( $Ta/(Ta + Nb) = 0.55—0.62$ ,  $WO_3 = 21—24\%$ ), Ta-bearing samarskite ( $Ta_2O_5 = 24—34\%$ ), fergusonite ( $Ta_2O_5 = 10.6\%$ ), cassiterite ( $Ta_2O_5 = 1.3—3.3\%$ ), and wolframite, yttrium-bearing fluorite, xenotime and some other minerals have been revealed in amazonite pegmatites occurring in Aya formation in Western Baikal region. Composition of accessory mineralization, zoning in columbite-tantalite, its relationship with microlite and plumbomicrolite, as well as geochemical peculiarities of rocks, allow to distinguish for the region the new type of pegmatites related to the rare-metal and rare-earths formation. i. e. pegmatites of fluorine-tantalum-yttrium mineragenetic (geochemical) series.

*Key words:* granites, amazonite pegmatites, accessory minerals, Baikal region.

Амазонитовые пегматиты являются типичными образованиями редкометалльно-редкоземельной формации гранитных пегматитов (Гордиенко, 1996; Загорский и др., 2003). Являясь источником камнесамоцветного сырья, они

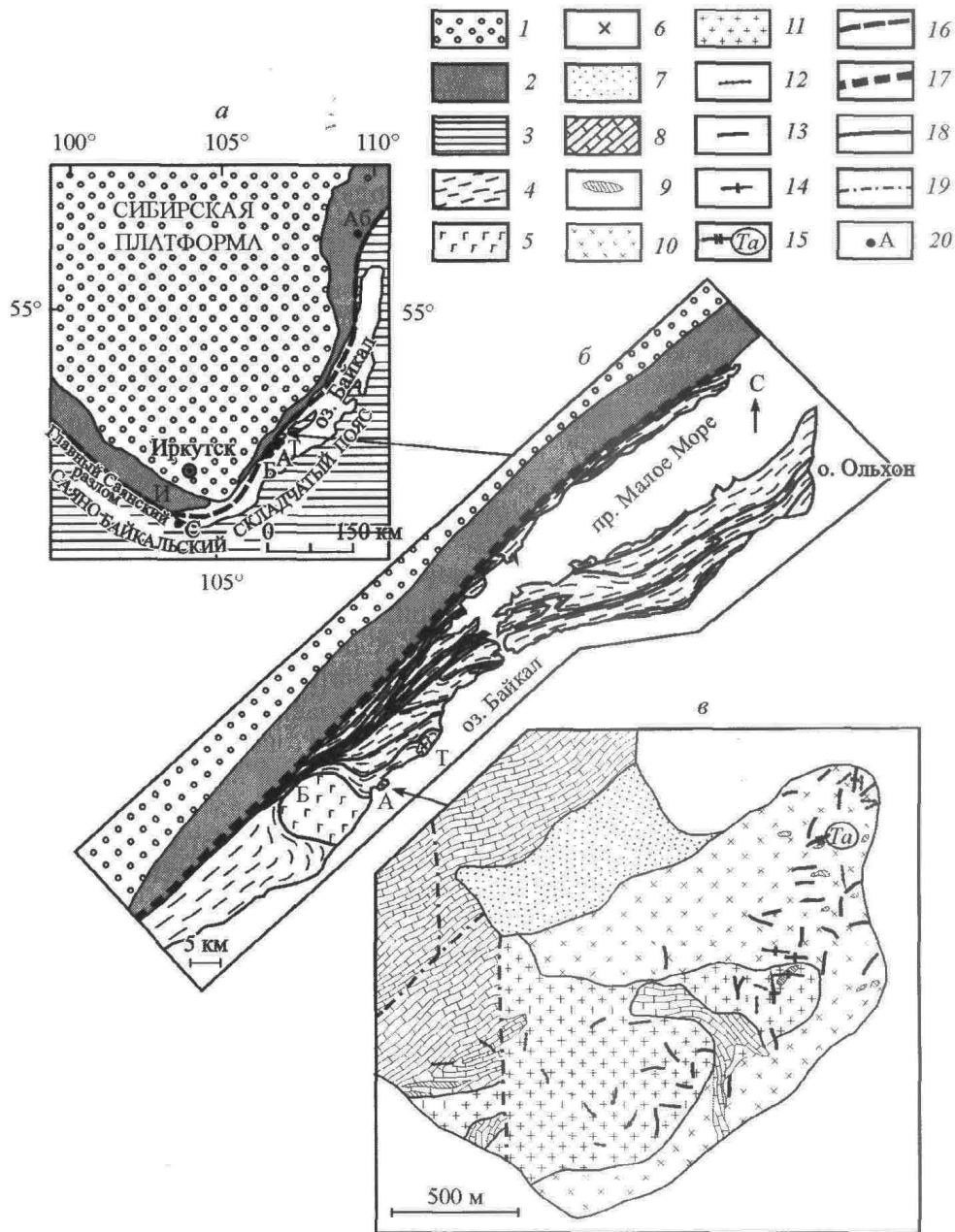


Рис. 1. Схема геологического строения региона (а), тектоническая схема Ольхонской коллизийной системы (Федоровский и др., 2010) (б) и геолого-петрографическая схематическая карта Аинского массива (Иванов, Шмакин, 1980) (в).

1, 2 — Сибирская платформа: 1 — платформенный чехол, 2 — краевые выступы фундамента Сибирской платформы (архей—протерозой); 3 — Саяно-Байкальский складчатый пояс; 4 — раннепалеозойская Ольхонская коллизийная система; 5 — габброиды Бирхинского массива; 6 — щелочные и нефелиновые сиениты Тажеранского массива; 7 — современные отложения; 8 — мраморы с прослоями амфиболовых сланцев; 9 — роговообманковые сланцы; 10—11 — границы аинского комплекса: 10 — биотитовые, 11 — лейкократовые, 12—15 — жилы: 12 — кварцевые жилы, 13—15 — пегматитовые жилы: 13 — без амазонита, 14 — с амазонитом, 15 — жила с Та-минерализацией; 16 — зона глубинных разломов краевого шва Сибирской платформы; 17 — коллизийный шов (граница Сибирского кратона и Ольхонского террейна); 18 — швы бластомилонитов, разделяющие сдвиговые пластины; 19 — разрывные нарушения; 20 — поля амазонитовых пегматитов: А — Аинское, Аб — Абчадское, Б — Бирхинское, И — Иркутское, С — Слодянское, Т — Тажеранское.

Fig. 1. Scheme of geological structure of the region (a), tectonic scheme of the Ol'khon collision system (Fedorovskiy et al., 2010) (b), and geologic-petrographic sketch map of the Aya massif (Ivanov, Shmakin, 1980) (c).

характеризуются также весьма разнообразной акцессорной минерализацией (Шмакин, 2007). По особенностям состава последней выделяют четыре минерогенических (геохимических) эволюционных ряда пегматитов: фтор-тантал-иттриевый, ниобий-редкоземельный, цирконий-редкоземельный и бериллий-редкоземельный (Загорский и др., 2003; Шмакин и др., 2007).

Амазонитовые пегматиты Приольхонья входят в состав Байкало-Саянского пегматитового пояса, протягивающегося вдоль южных границ Сибирской платформы (Гордиенко, 1996). В пределах пояса амазонитовые пегматиты известны в Северном Прибайкалье (Абчадское поле) (Мануйлова и др., 1964), Приольхонье (Шмакин и др., 1973) и Юго-Западном Прибайкалье (Слюдянский кристаллический комплекс) (Калинин, 1968), зона Главного Саянского разлома (Савельева, Зырянов, 2005) (рис. 1, а). На территории Приольхонья амазонитовые пегматиты активно изучались начиная с 70-х годов прошлого века (Шмакин и др., 1973, 2007; Михайлова, 1974; Иванов, Шмакин, 1980). Были изучены строение пегматитовых жил, их минеральный состав и геохимия, охарактеризованы главные акцессорные минералы пегматитов: ортит, фергусонит, эвксенит, пироклор, торит, циртолит и некоторые другие. Эти исследования позволили Б. М. Шмакину с коллегами (Шмакин и др., 2007) отнести амазонитовые пегматиты Приольхонья, и в том числе пегматиты гранитного массива Ая, к пегматитам ниобий-редкоземельного ряда. В то же время отмечалось (Шмакин и др., 2007), что пегматиты массива Ая отличаются от других амазонитовых тел Приольхонья повышенными содержаниями F, Li, Rb, Cs, Sn и Ta. В последнее время авторами настоящей статьи в одной из жил амазонитового пегматита внутри массива Ая были выявлены минералы, характерные для редкометалльных пегматитов: циннвальдит, колумбит-танталит, микролит, плюмбомикролит, касситерит, вольфрамит. Это дает основание рассматривать пегматиты массива Ая как пегматиты с комплексной минерализацией, принадлежащие фтор-тантал-иттриевому геохимическому ряду.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение химического состава гранитов и пегматитов выполнено в Аналитическом центре Института земной коры СО РАН. Для изучения химического состава пегматитов отбирались пробы пород крупнозернистой гипидиоморфнозернистой структуры. Вес штучных проб пегматита составлял около 1 кг. Анализы петрогенных компонентов выполнены традиционным методом «мокрой» химии, Li, Cs — методом фотометрии пламени, Be, Sn, Co, Ni, Cr, V — количественным спектральным методом, Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, Pb, Zn, Th, U — рентгенофлуоресцентным методом, Hf, Ta и лантаноидов — методом ICP-MS. Предварительная диагностика минералов осуществлялась методом фазового рентгеновского анализа в Институте земной коры СО РАН З. Ф. Ущиповской. Анализы минералов выполнены С. В. Канакиным в ГИН СО РАН на модернизированном микроанализаторе MAP-3 производства ОАО «Красногорский механический завод» и электронном сканирующем микроскопе LEO-1430VP (Carl Zeiss International) с энергодисперсионным анализатором INCAEnergy 350 (Oxford Instruments Analytical Ltd.), Н. С. Кармановым в ИГМ СО РАН на электронном сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU (TESCAN Ltd), оборудованном энергодисперсионным спектрометром INCAEnergy 350 (Oxford Instruments Analytical Ltd). Условия анализа на мик-

роанализаторе MAP-3: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 45—50 нА, размер зонда <2 мкм, время измерения 20—40 с; на электронном сканирующем микроскопе: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 0.3—0.4 нА, размер зонда <0.1 мкм, время измерения 50 с.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА

Приольхонье является частью Ольхонского метаморфического террейна, входящего в состав раннепалеозойского Прибайкальского коллизионного метаморфического пояса (Донская и др., 2000). Структура Ольхонского террейна в настоящее время трактуется как коллаж сдвиговых пластин разного состава и возраста (рис. 1, б), породы которых метаморфизованы в условиях от эпидот-амфиболитовой до гранулитовой фации. Основные тектоно-магматические события в пределах террейна датируются интервалами 500—485 и 470—460 млн лет: первый отвечает приращению террейна к Сибирскому кратону, проявлению раннего покровного тектогенеза, гранулитовому метаморфизму, внедрению толеитовых и субщелочных магм, второй — проявлению сдвигового тектогенеза, на фоне которого происходили региональный метаморфизм в условиях амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций, ультраметаморфизм и становление интрузий сиенитов, субщелочных габбро и гранитов (Федоровский и др., 2010).

В пределах Приольхонья выделяются три поля амазонитовых пегматитов: Бирхинское, Аинское и Тажеранское; все поля приурочены к одной сдвиговой пластине в южной части территории (рис. 1, б). Пегматиты Аинского поля располагаются среди гранитов массива Ая, тогда как в Тажеранском поле пегматиты прорывают щелочные и нефелиновые сиениты, а в Бирхинском поле — габброиды. Редкометалльная минерализация выявлена в амазонитовых пегматитах гранитного массива Ая, относимого к аинскому комплексу (рис. 1, в). В состав комплекса помимо гранитов входят пегматиты, аплиты и кварцевые жилы, располагающиеся как в самом массиве, так и за его пределами. Возраст гранитов массива Ая, по данным U-Pb изотопного датирования, составляет  $469 \pm 1.5$  млн лет (Владимиров и др., 2007).

Массив Ая имеет площадь около 2 км<sup>2</sup> и залегает среди мраморов с прослоями амфиболитов; контакты гранитов с вмещающими породами как тектонические, так и интрузивные, но большей частью скрыты водами озера Байкал. В апикальной части массива находится крупный ксенолит мраморов. Видимая обнаженная нижняя часть массива сложена крупнозернистыми биотитовыми слабо огнейсованными средне- и крупнозернистыми гранитами. Их главными породообразующими минералами являются плагиоклаз (35—40 %), калиевый полевой шпат (25—35 %) и кварц (30—35 %), второстепенным — биотит, встречаются также мусковит и гранат. Калишпат представлен ортоклазом и микроклином, а плагиоклаз олигоклазом № 22—28; кварц представлен дымчатой и бесцветной разновидностями (Иванов, Шмакин, 1980; Шмакин и др., 2007). Выше залегают средне- и крупнозернистые лейкократовые альбит-микроклиновые и микроклин-альбитовые граниты. Для лейкократовых гранитов характерен изменчивый состав за счет различного соотношения калишпата и плагиоклаза. Плагиоклаз представлен двумя генерациями — серицитизированным и мусковитизированным олигоклазом № 25—28 и альбит-олигоклазом № 9—15, имеющим свежий облик. В аль-



бит-микроклиновых гранитах количество микроклина составляет 25—35 %, плагиоклаза 25—40 % и кварца (преимущественно дымчатого) 30—40 %; микроклин-альбитовые граниты сложены плагиоклазом (35—50 %), микроклином (25—35 %) и бесцветным сильно корродированным кварцем на (15—25 %). Темноцветные минералы представлены биотитом, гранатом и магнетитом. Отмечается мусковит (не более 1 %). По плоскостям спайности и двойниковым швам плагиоклаза часто развиваются гематит и лимонит.

Повсеместно в пределах массива распространены кварцевые и пегматитовые жилы, а также мелкие жилки аплитов. Среди пегматитов по характеру контактов и степени дифференцированности выделяются два типа (Шмакин и др., 2007). Первый представлен линзовидными жилами длиной 5—7 м, плохо дифференцированными и не содержащими амазонита. Обычно наблюдается среднезернистая эндоконтактная оторочка гранитного состава, а основная часть жил сложена кварц-микроклиновым неравнозернистым пегматитом апографической структуры. Жилы второго типа представлены телами сложной морфологии, имеющими постепенные переходы к вмещающим гранитам (Шмакин и др., 1973; Шмакин и др., 2007). Мощность тел 3—4 м, длина до 30—40 м. Эти тела хорошо дифференцированы. Эндоконтактная мелкозернистая оторочка обычно отсутствует; гранит сменяется крупнозернистым пегматитом гипидиоморфнозернистой, апографической или графической структуры. Калиевый полевой шпат (30—40 %) представлен белым микроклином и бледно-зеленым амазонитом. Последний распределен неравномерно и на многих участках жилы отсутствует. Плагиоклаз (30—40 %) представлен олигоклазом (№ 25—30) и альбитом (№ 4—11), кварц составляет 25—30 % породы. Содержание плагиоклаза к центру жил уменьшается. В центральной части тел в массе апографического пегматита наблюдаются гнезда крупноблоковой структуры с кристаллами амазонита до 15—20 см в поперечнике. На отдельных участках в амазоните встречаются прожилки альбита. Темноцветные минералы представлены биотитом, гранатом, черным турмалином, в эндоконтактных зонах присутствует магнетит, в микропустотах — флюорит. Изредка в пегматитах отмечается мусковит.

Пегматитовая жила, в которой выявлена танталовая минерализация, находится в северо-восточной части массива (рис. 1, в), в скальных выходах на обрывистом склоне. Она крутопадающая, с близким к субширотному простиранием и падением на север под углом 55—70°. Контакты жилы извилистые, по простиранию она разветвляется на две жилы, каждая мощностью от 0.5 до 1 м; обломки пегматита прослеживаются в элювиально-делювиальных россыпях на расстоянии около 30 м. С вмещающими биотитовыми гранитами контакты жилы постепенные. В строении жилы преобладают крупнозернистый пегматит гипидиоморфнозернистой структуры, местами с метакристаллами амазонита, и блоковый кварц-амазонитовый пегматит; на границе этих зон проявлена интенсивная альбитизация. В центральной части жилы наблюдаются обособления кристаллов черного турмалина в сростаниях с кварцем и скопления крупных (до 5 см) чешуек слюды светло-коричневого цвета, представленной, по данным рентгеновского анализа, циннвальдитом. В блоковом пегматите встречаются меланократовые обособления величиной до 5 см, сложенные в центре гранатом, шерлом и небольшим количеством кварца, а по периферии — оторочкой литиевой слюды, иногда в сростаниях с мелким бледно-голубым турмалином. Эти обособления окружены зоной мелкозернистого альбита, замещающего амазонит.

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГРАНИТОВ И ПЕГМАТИТОВ

По химическому составу слагающие массив Ая породы представлены плюмазитовыми гранитами и лейкогранитами повышенной щелочности, с низкими содержаниями  $TiO_2$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ ,  $CaO$ ,  $P_2O_5$  и  $F$  (табл. 1, ан. 1, 2). В биотитовых гранитах отношение  $Na_2O/K_2O$  составляет 0.7—0.9, в лейкократовых гранитах оно возрастает до 0.9—1.3, одновременно несколько возрастает коэффициент апаитности. По сравнению со средним редкоэлементным составом бедных кальцием гранитов (Turekian, Wedepohl, 1961), в биотитовых гранитах более низкие содержания  $Sr$ ,  $Ba$ ,  $V$ ,  $Li$ ,  $Sn$ ,  $Y$ , но повышены  $Be$  (почти в 2 раза),  $Th$  (в 1.7 раза),  $Rb$  и  $Pb$  (в 1.3—1.4 раза). В лейкократовых гранитах по сравнению с биотитовыми в среднем в 1.3—1.4 раза увеличиваются содержания  $Be$ ,  $Pb$ ,  $Ln_Y$ , в 1.8 раза  $Rb$ ,  $Y$ ,  $Ta$ , в 3 раза  $U$  и в 4 раза  $Nb$ , в то же время уменьшаются содержания  $Ba$  (в среднем в 6.5 раза),  $Sr$ ,  $Ln_{Ce}$  (в 2.8—3 раза), в меньшей мере  $Zn$ ,  $Zr$ ,  $Sn$ ,  $Li$  (в 1.5—2 раза).

В табл. 1 приведены усредненные анализы амазонитовых пегматитов с гипидиоморфнозернистой структурой (ан. 3), не содержащих амазонита пегматитов (ан. 4) и средний состав пегматитов из работы (Шмакин и др., 2007) без указания их минерального состава (ан. 5). В целом пегматиты по сравнению с лейкократовыми гранитами имеют более низкие содержания  $SiO_2$ , более высокие содержания калия, железа, марганца,  $F$ , а также суммы оксидов щелочей и коэффициент апаитности. Амазонитовые пегматиты отличаются от пегматитов, не содержащих амазонита, повышенными концентрациями редких щелочей,  $Pb$ ,  $Zn$ ,  $Sn$ ,  $Be$ ,  $Nb$ ,  $Y$ ,  $Th$ , а также более низкими отношениями  $K/Rb$  и  $Ba/Rb$ . По сравнению с биотитовыми гранитами в амазонитовых пегматитах, по нашим анализам, в среднем на два порядка больше  $Cs$ , более чем на порядок  $Sn$  и  $Ta$ , в 6 раз  $Pb$ ,  $Nb$ ,  $Y$ , в 4 раза  $Li$ ,  $Rb$ ,  $U$ ,  $Ln_Y$ , в 2.5 раза  $Be$ ,  $Zn$ , в то же время в пегматитах в 2.5—3.5 раза меньше  $Ba$  и  $Ln_{Ce}$  и резко понижены отношения  $K/Rb$ ,  $Ln_{Ce}/Ln_Y$  и  $Nb/Ta$ . В целом это согласуется с данными Б. М. Шмакина с соавторами (табл. 1, ан. 5).

## СОСТАВ НЕКОТОРЫХ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ ГРАНИТОВ И ПЕГМАТИТОВ

Породообразующие минералы гранитов и пегматитов массива Ая подробно охарактеризованы в работах (Иванов, Шмакин, 1980; Шмакин и др., 1973, 2007). Среди породообразующих минералов гранитов наиболее показательными, несущими информацию об условиях кристаллизации, являются темноцветные минералы. В биотитовых гранитах слюда представлена аннитом (табл. 2, ан. 1, 2), редкий гранат имеет гроссуляр-спессартин-альмандинный состав (табл. 3, ан. 1, 2). В лейкократовых гранитах по сравнению с биотитовыми снижаются магнезиальность биотита и содержания в нем  $Ti$ ,  $Mn$  и  $Cl$ , а глиноземистость и содержание  $F$  возрастают (табл. 2, ан. 3, 4). Меняется и состав граната: в нем снижается содержание  $Ca$  и возрастает —  $Mn$  (табл. 3, ан. 3, 4). Судя по изменению состава темноцветных минералов (снижение магнезиальности и увеличение глиноземистости биотита, рост содержания  $Mn$  в гранате), эволюция состава расплава происходила в направлении роста кислотности на фоне снижения температуры (Иванов, 1970).

Таблица 1

**Средние составы гранитов и пегматитов массива Ая**  
**Average chemical compositions of granites and pegmatites of Aya massif**

Компонент, мас. %	1 (7)	2 (9)	3 (3)	4 (2)	5 (2)
SiO <sub>2</sub>	74.75	76.07	74.93	75.04	74.15
TiO <sub>2</sub>	0.09	He обн.	He обн.	He обн.	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.26	13.51	13.72	13.65	14.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.34	He обн.	0.31	He обн.	1.11*
FeO	1.34	0.62	0.70	0.64	—
MnO	0.02	0.03	0.07	0.02	0.09
MgO	0.13	He обн.	He обн.	He обн.	<0.05
CaO	0.56	0.21	0.35	0.22	0.50
Na <sub>2</sub> O	3.79	4.54	4.01	3.64	4.17
K <sub>2</sub> O	4.53	3.98	5.30	5.61	5.51
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	0.02
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.15	0.12	0.09	0.15	—
П. п. п.	0.75	0.60	0.45	0.62	0.27
F	<0.03	<0.03	0.18	0.03	0.26
-O <sub>2</sub> (F)	—	—	0.07	0.01	0.11
Сумма	99.71	99.68	100.04	99.61	100.11
Элемент, г/т					
Li	32	25	129	22	152
Rb	201	354	935	485	710
Sr	36	13	66	25	20
Y	17	31	115	49	86
Zr	107	79	160	39	50
Nb	13	54	79	30	19.5
Sn	1.4	<1	25	3	31
Cs	<2	<2	205	9	76
Ba	137	21	40	215	36
Be	4.3	5.4	10.7	6.5	8.4
Pb	25	35	155	43	95
Zn	29	15	82	16	41
Hf	7.3 (1)	5.3 (2)	12.1 (1)	—	1.5
Ta	3.8 (1)	6.8 (2)	62.2 (1)	—	20.3
Th	33	32	50	24	37
U	6.4	19	25	18	18
Co	2	<2	<2	<2	1
Ni	4.7	4.6	4.3	5.9	4.0
Cr	6.3	<6	<6	<6	4.1
V	4.0	2.6	<2	<2	4.9
Ln <sub>Ce</sub>	99.3 (1)	33.3 (2)	38.4 (1)	—	29.2
Ln <sub>Y</sub>	16.5 (1)	22.7 (2)	70.5 (1)	—	60.5
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	8.32	8.52	9.31	9.25	9.68
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	0.84	1.14	0.76	0.65	0.76
ASI	1.09	1.11	1.06	1.10	1.03
K <sub>ar</sub>	0.84	0.87	0.90	0.88	0.91
K/Rb	187	93	47	96	64

Таблица 1 (продолжение)

Компонент, мас. %	1 (7)	2 (9)	3 (3)	4 (2)	5 (2)
Va/Rb	0.68	0.06	0.04	0.44	0.05
Ln <sub>Ce</sub> /Ln <sub>Y</sub>	6.0	1.5	0.54	—	0.48
Nb/Ta	3.4	7.9	1.3	—	0.96
Кварц	35	35	31	32	28
Плагиоклаз	36	41	36	33	38
КПШ	27	23	32	34	32
Аннит	2	1	1	1	2

Примечание. 1 — биотитовые граниты, 2 — лейкократовые граниты, 3 — амазонитовые пегматиты гранитной структуры, 4 — не содержащие амазонита пегматиты из недифференцированных жил, 5 — пегматиты Аинского массива по данным (Шмакин и др., 2007). \* Все железо как Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Прочерк — данные отсутствуют. Ln<sub>Ce</sub> включают La, Ce, Pr, Nd; Ln<sub>Y</sub> — Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu (Солодов и др., 1987). В скобках указано число проб, по которым рассчитано среднее.

Таблица 2

**Состав и коэффициенты в кристаллохимических формулах слюды  
из гранитов и пегматитов массива Ая**

**Composition and crystal-chemical formulas coefficients of mica in granites  
and pegmatites of Aya massif**

Компонент, мас. %	1	2	3	4	5	6
	70/04	72/04	106/04	124/04	Шмакин и др., 2007	194/10
SiO <sub>2</sub>	34.81	35.01	34.90	36.26	35.61	51.82
TiO <sub>2</sub>	3.24	3.39	2.08	Не обн.	0.68	Не обн.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.76	14.56	16.63	19.48	16.97	19.99
FeO <sub>общ</sub>	30.10	28.45	29.16	29.07	30.04	4.10
MnO	0.68	0.41	0.17	0.21	1.24	5.26
MgO	3.15	3.41	1.75	0.27	0.27	0.09
CaO	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.09	0.14	Не обн.
Na <sub>2</sub> O	0.12	0.13	0.11	0.11	0.09	0.17
K <sub>2</sub> O	9.99	9.60	9.93	9.20	8.31	10.45
Li <sub>2</sub> O	—	—	—	—	0.70	4.99
Rb <sub>2</sub> O	—	—	—	—	0.51	0.63
Cs <sub>2</sub> O	—	—	—	—	0.19	0.96
Cl	0.41	0.33	0.15	0.06	—	Не обн.
F	0.29	0.48	0.57	0.88	0.97	6.03
-O <sub>2</sub> (Cl)	0.09	0.07	0.03	0.01	—	—
-O <sub>2</sub> (F)	0.12	0.20	0.24	0.37	0.41	2.54
Сумма	96.34	95.50	95.18	95.25	95.31	101.95
Коэффициенты (O = 11)						
Si	2.822	2.826	2.826	2.893	2.917	3.475
<sup>IV</sup> Al	1.178	1.174	1.174	1.107	1.083	0.525
<sup>VI</sup> Al	0.136	0.211	0.413	0.724	0.555	1.055
Ti	0.197	0.206	0.127	0.000	0.042	0.000

Таблица 2 (продолжение)

Компонент, мас. %	1	2	3	4	5	6
	70/04	72/04	106/04	124/04	Шмакин и др., 2007	194/10
Fe	2.037	1.917	1.971	1.936	2.054	0.230
Mn	0.047	0.028	0.012	0.014	0.086	0.299
Mg	0.380	0.410	0.211	0.032	0.033	0.009
Li	—	—	—	—	0.230	1.345
Ca	0.000	0.000	0.000	0.008	0.012	
Na	0.019	0.020	0.017	0.017	0.014	0.022
K	1.033	0.988	1.025	0.936	0.868	0.893
Rb	—	—	—	—	0.017	0.018
Cs	—	—	—	—	0.007	0.027
Cl	0.056	0.045	0.021	0.008		
F	0.073	0.122	0.145	0.221	0.251	1.277
$X_{Mg}$	0.16	0.18	0.10	0.02	0.02	0.04
$l$	19.3	20.4	23.6	27.3	24.3	28.2

Примечание. 1—4 — биотиты из гранитов: 1, 2 — биотитовых, 3, 4 — лейкократовых; 5, 6 — слюды из амазонитовых пегматитов: 5 — аннит по данным (Шмакин и др., 2007), 6 — циннвальдит. Авторские анализы выполнены на рентгеновском микроанализаторе MAP-3; содержания  $Li_2O$ ,  $Rb_2O$ ,  $Cs_2O$  определены методом фотометрии пламени. Прочерк — данные отсутствуют.  $l = 100Al/(Si+Al+Fe+Mn+Mg)$ .  $X_{Mg} = Mg/(Fe+Mg)$ .

По данным Б. М. Шмакина с соавторами (Шмакин и др., 1973, 2007), минералы амазонитовых пегматитов, по сравнению с аналогичными минералами неамазонитовых пегматитов, резко обогащены Li, Rb, Cs и Pb при пониженных концентрациях Ba и Sr. Содержание Rb в амазоните составляет около 2000 г/т, Cs 170—312 г/т, Li 10—13 г/т, Pb около 70 г/т. Для слюд из амазонитовых пегматитов характерны низкие магниальность и содержание титана, но повышенные F, Li, Rb, Cs (табл. 1, ан. 5, 6). Гранат из амазонитовых пегматитов обогащен спессартиновым миналом: содержание спессартина в нем достигает 86 мол. % (табл. 3, ан. 5—9).

#### ХАРАКТЕРИСТИКА АКЦЕССОРНЫХ МИНЕРАЛОВ

Изучением акцессорных минералов гранитов и пегматитов аинского комплекса в 70-е годы прошлого века занимались сотрудники ВостСибНИИГГиМСа. В протолочной пробе пегматита кроме граната, турмалина и магнетита ими диагностированы шеелит, циркон, фергусонит, рутил, циртолит, самарскит, касситерит и минерал из группы редких тантало-ниобатов (Михайлова, 1974). Авторами статьи танталовая минерализация выявлена в блоковом амазонитовом пегматите, где представлена микролитом, плюмбомикролитом и минералами группы колумбит-танталита. Повышенные содержания Ta установлены также в фергусоните, самарските и вольфрамите из альбитизированного амазонитового пегматита с гипидиоморфно-зернистой структурой; здесь также выявлен иксиолит. Кроме этих минералов в пегматитах присутствуют касситерит, циркон и минералы редких земель.



**Состав и коэффициенты в кристаллохимических формулах граната  
из гранитов и пегматитов**

**Composition and crystal-chemical formulas coefficients of garnet in granites and pegmatites**

Компонент, мас. %	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	84/04 ц	84/04 кр	103/04 ц	103/04 кр	197/10 ц	197/10 кр.	194/10 ц	194/10 кр	194/10_8
SiO <sub>2</sub>	36.48	36.90	36.34	36.33	36.50	36.52	36.67	36.49	36.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.02	20.12	20.29	20.22	20.21	20.33	20.38	20.46	20.05
FeO <sub>общ</sub>	24.67	25.71	24.80	25.37	23.19	23.23	16.35	9.38	6.72
MnO	12.57	11.29	15.14	15.53	17.10	17.31	25.92	32.40	36.70
MgO	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	0.10	0.07	0.07	0.05	He обн.
CaO	5.79	6.34	2.70	2.48	2.52	2.00	1.08	0.99	2.00
Na <sub>2</sub> O	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	0.12	0.09	0.06	0.10	He обн.
Сумма	99.53	100.36	99.27	99.93	99.74	99.55	100.53	99.87	101.69

Коэффициенты (на 8 катионов)

Si	2.993	2.999	3.007	2.992	3.003	3.014	3.004	3.004	2.974
Al	1.936	1.927	1.979	1.963	1.959	1.977	1.967	1.984	1.940
Fe <sup>3+</sup>	0.078	0.074	0.007	0.053	0.056	0.009	0.034	0.023	0.111
Fe <sup>2+</sup>	1.611	1.670	1.707	1.691	1.537	1.592	1.084	0.621	0.349
Mn	0.873	0.777	1.061	1.083	1.191	1.209	1.798	2.258	2.552
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.008	0.008	0.006	0.000
Ca	0.508	0.552	0.239	0.219	0.222	0.177	0.095	0.087	0.073
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.014	0.010	0.015	0.000

Содержание миналов, %

Pyр	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.3	0.2	0.0
Alm	53.8	55.7	56.8	56.5	51.9	53.3	36.3	20.9	11.7
Spes	29.2	25.9	35.3	36.2	40.2	40.5	60.2	76.0	85.8
Gros	13.1	14.7	7.6	4.6	4.7	5.5	1.5	1.8	0.7
Andr	3.9	3.7	0.3	2.7	2.8	0.4	1.7	1.2	1.7
Mn/(Mn+Fe)	0.34	0.31	0.38	0.38	0.43	0.43	0.62	0.78	0.85

Примечание. 1, 2 — гранат из биотитового гранита; 3, 4 — лейкократового гранита; 5, 6 — амазонитового пегматита с гранитной структурой; 7—9 — из меланократовых обособлений в блоковом амазонитовом пегматите (9 — сростание с турмалином в центре обособлений).

**Минералы группы колумбит-танталита** представлены призматическими зернами величиной до 0.3 мм и их скоплениями (рис. 2, а—в). Они встречаются в сростании с марганцевым гранатом и турмалином в центре меланократовых обособлений в блоковом пегматите, среди циннвальдита в парагенезисе с цирконом, вольфрамитом, касситеритом, флюоритом, в сростании с микролитом и в виде включений в нем. Содержание Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в точечных анализах изменяется от 23.8 до 69.9 %, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от 11.4 до 54.2 %, при этом в большинстве анализов количество MnO значительно выше FeO; отношение Mn/(Fe+Mn) варьирует в пределах от 0.5 до 1.0. По классификации М. В. Кузьменко (Минералы, 1967), это колумбиты, танталоколумбиты и ниоботанталиты; в соответствии с принятой в современной отечественной литературе классификацией минералов группы колумбит-танталита (Воло-

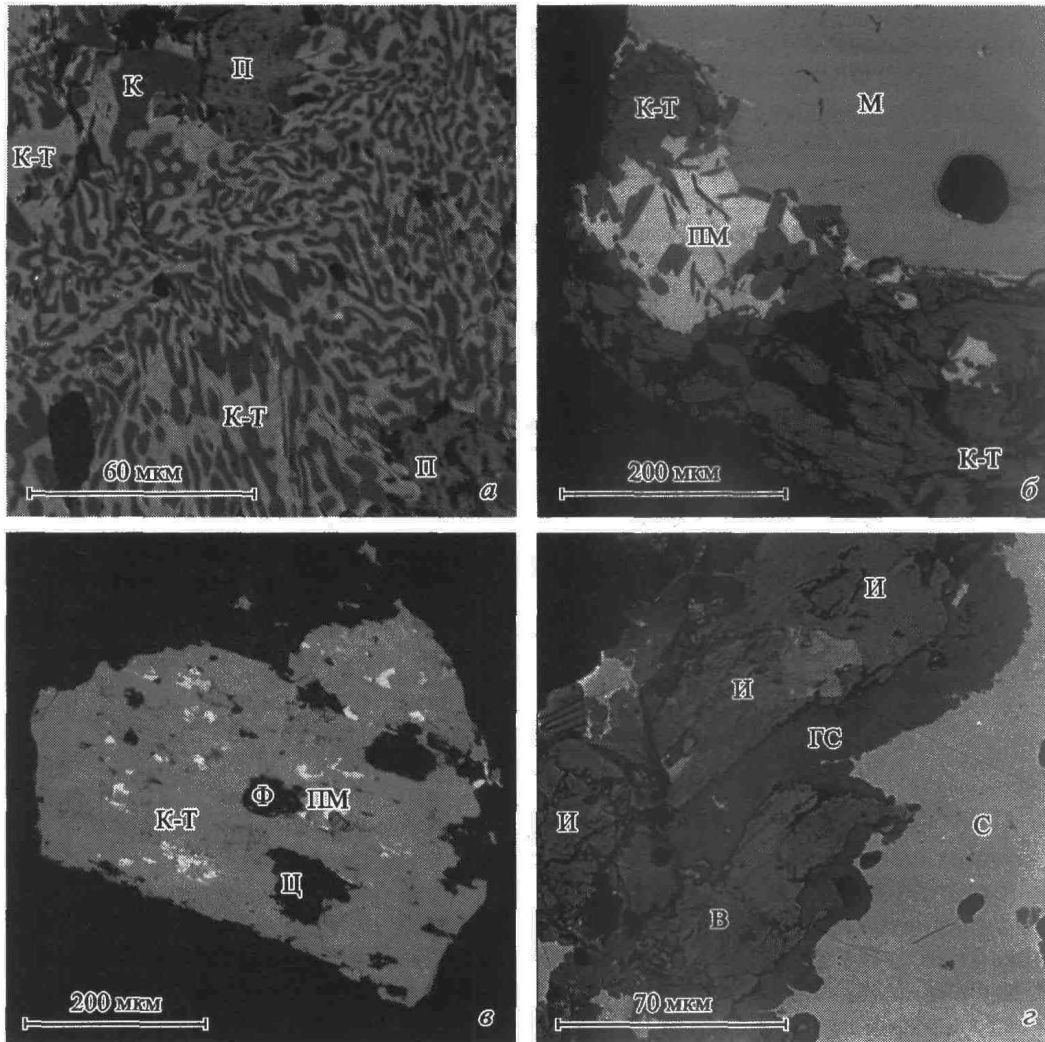


Рис. 2. Взаимоотношения акцессорных минералов в пегматитах (фото в обратнорассеянных электронах).

*a* — фрагмент зерна колумбит-танталита со структурой распада и обособлениями паразита-(Се) (обр. 194/10\_8); *b* — срастание призматических зерен колумбит-танталита с микролитом; колумбит-танталит замещается плумбомикролитом (обр. 194/10\_5); *c* — зерно колумбит-танталита (серое) в срастании с циннвальдитом и флюоритом, замещаемое плумбомикролитом (белое) (обр. 194/10\_7); *d* — зерно самарскита с иксиолитом и танталовым вольфрамитом на участках гидротермального изменения (обр. 79/04\_11). Обозначения: В — вольфрамит, ГС — гидротермально измененный самарскит, И — иксиолит, К — колумбит, К-Т — колумбит-танталит, М — микролит, П — паразит, ПМ — плумбомикролит, С — самарскит, Ф — флюорит, Ц — циннвальдит.

Fig. 2. Relationships of accessory minerals in pegmatites (back scattered electron images).

шин, Пахомовский, 1988) проанализированные минералы в основном имеют состав, промежуточный между марганцевыми колумбитом и танталитом (табл. 4, рис. 3). Во всех анализах присутствует  $TiO_2$ , в большинстве анализов примеси  $WO_3$  и в отдельных анализах  $SnO_2$  (до 1.5 %). Распределение W неоднородное: содержание  $WO_3$  в точечных анализах одного и того же зерна может варьировать от 3.9 до 16.9 мас. % (табл. 4, ан. 7, 8).

Наиболее низкие содержания  $Ta_2O_5$  и  $MnO$  имеют колумбит-танталиты из включения в турмалине и срастания с цирконом (табл. 4, ан. 1, 5). В зерне колумбит-танталита из срастания со спессартиновым гранатом отмечена струк-

Таблица 4

Состав (мас. %) и коэффициенты в кристаллохимических формулах минералов группы колумбит-танталита  
 Composition and crystal-chemical formulas coefficients of the columbite-tantalite group minerals

Компонент, мас. %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	79/04	194/10_8 (г. 1)	194/10_ (г. 2)	194/10_8 (г. 3)	79/04_9Н	194/10_7	194/10_1Н (г. 1)	194/10_1Н (г. 2)	194/10_5 (г. 1)	194/10_5 (г. 2)	194/10_5 (г. 3)	194/10_3Н
MnO	9.79	14.64	14.13	13.61	8.04	16.41	14.42	16.45	17.82	14.76	15.16	14.04
FeO	9.84	2.97	4.50	6.87	11.96	1.48	2.10	1.42	He обн.	2.30	2.16	1.53
TiO <sub>2</sub>	1.07	1.30	1.38	1.70	0.95,	1.53	1.50	1.10	0.80	1.67	1.57	1.38
SnO <sub>2</sub>	1.46	He обн.	0.86	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	1.18	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	35.19	31.24	34.28	62.87	64.42	28.07	25.92	20.81	35.62	27.38	23.78	24.48
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	39.20	44.54	44.67	11.36	14.26	42.52	51.43	42.00	42.04	54.15	48.09	52.07
WO <sub>3</sub>	3.27	4.72	He обн.	He обн.	1.87	8.84	3.86	16.86	2.74	He обн.	6.70	3.82
Сумма	99.82	99.41	99.82	96.41	101.50	98.85	99.83*	100.1**	99.02	100.26	97.42	97.32
Коэффициенты (O = 6)												
Mn	0.564	0.864	0.820	0.701	0.400	0.982	0.878	1.004	1.038	0.886	0.942	0.878
Fe	0.559	0.173	0.258	0.350	0.587	0.087	0.126	0.086	0.000	0.136	0.133	0.094
Ti	0.055	0.068	0.071	0.078	0.042	0.081	0.081	0.060	0.041	0.089	0.087	0.077
Sn	0.040	0.000	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034	0.000	0.000	0.000	0.000
Nb	1.081	0.984	1.061	1.729	1.710	0.896	0.842	0.678	1.107	0.877	0.789	0.817
Ta	0.725	0.844	0.832	0.188	0.228	0.817	1.005	0.823	0.786	1.043	0.959	1.045
W	0.058	0.085	0.000	0.000	0.028	0.162	0.072	0.315	0.049	0.000	0.127	0.073
Ta/(Ta+Nb)	0.40	0.46	0.44	0.10	0.12	0.48	0.54	0.55	0.42	0.54	0.55	0.56
Mn/(Mn+Fe)	0.50	0.83	0.76	0.67	0.41	0.92	0.87	0.92	1.00	0.87	0.88	0.90

Примечание. 1 — включение в турмалине; 2—4 — зерно со структурной распада из сростания с гранатом; 2, 3 — основная масса зерна, 4 — червеобразные вросстки (рис. 2, а); 5 — сростание с цирконом; 6 — сростание с флюоритом и цинвальдитом; 7, 8 — сростание с пиннальдитом; 9, 10 — зональное зерно в сростании с микролитом (9 — центр, 10 — край); 11, 12 — включения в зернах микролита. \* Включая F = 1.04 %, \*\* включая Se<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0.28 %.

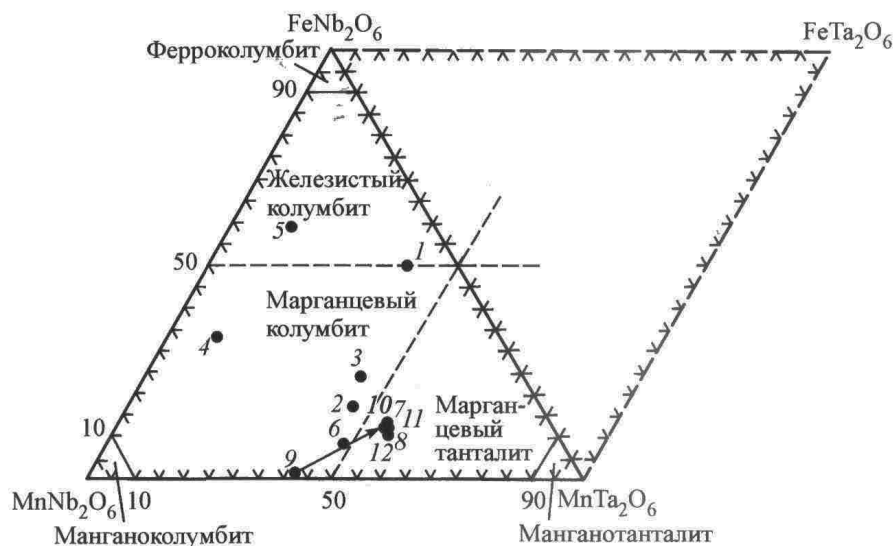


Рис. 3. Составы минералов группы колумбит-танталита на классификационной диаграмме (Волошин, Пахомовский, 1988).

Fig. 3. Compositions of the columbite-tantalite group minerals on the classification diagram (Voloshin, Pakhomovsky, 1988).

тура распада твердого раствора (рис. 2, а): в этом зерне колумбит с отношением  $Ta/(Ta+Nb) = 0.10$  и  $Mn/(Mn+Fe) = 0.67$  (табл. 4, ан. 2) образует червеобразные вросстки в колумбит-танталите с  $Ta/(Ta+Nb) = 0.44—0.46$  и  $Mn/(Mn+Fe) = 0.76—0.83$  (ан. 3, 4). В колумбит-танталите из парагенезиса с циннвальдитом (табл. 4, ан. 6—8) и сростаний с микролитом (ан. 9—12) отношения  $Ta/(Ta+Nb)$  возрастают до  $0.48—0.56$ , а  $Mn/(Mn+Fe)$  до  $0.87—1.00$ . В зернах колумбит-танталита, образующего сростания с микролитом (рис. 2, б) проявлена зональность: от центра к краю возрастают содержания Ta и Fe и снижаются Nb, Mn, W; отношение  $Ta/(Ta+Nb)$  меняется от  $0.42$  до  $0.54$  (табл. 4, ан. 9, 10). Судя по взаимоотношениям между колумбит-танталитом и микролитом, колумбит-танталит либо сингенетичен микролиту либо, скорее, является более ранним минералом.

**Микролит** встречается в виде октаэдрических кристаллов величиной до 5 мм среди кварца или на границе блоков кварца и амазонита, вдоль отдельных зон замещенного мелкозернистым альбитом. Цвет минерала медово-желтый, зеленовато-желтый, красновато-желтый. По химическому составу отдельные зерна минерала отличаются слабо: содержание  $Ta_2O_5$  составляет  $60.7—67.4\%$ ,  $Nb_2O_5$   $2.95—6.08\%$ , отношение  $Ta/(Ta+Nb) = 0.86—0.93$ . В отдельных анализах присутствует  $TiO_2$  в количестве до  $0.82\%$  (табл. 5, ан. 1—5). Рассчитанные коэффициенты кристаллохимических формул показывают, что в группе А преобладает Na; отношение  $Na/(Na+Ca)$  составляет  $0.62—0.68$ . В значительных количествах в группу А входят Pb ( $0.23—0.36$  к. ф.) и U ( $0.06—0.16$  к. ф.), в единичных анализах присутствуют Y и Sb. Сумма катионов в группе А составляет  $1.77—2.03$  к. ф., т. е. микролит относится к насыщенным и слабо дефектным разновидностям по данным работы (Горжевская и др., 1974).

**Плюмбомикролит** (Горжевская и др., 1974; Hogarth, 1977) развивается по колумбит-танталиту и микролиту (рис. 2, б, в). Для него, как и для микро-

Таблица 5

**Состав и коэффициенты в кристаллохимических формулах  
микролита и плюмбомикролита**

**Composition and crystal-chemical formulas coefficients of microlite and plumbomicrolite**

Компонент, мас. %	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	194/10_5	194/10_4	194/10	194/10_6	194/10_2	194/10_5	194/10_1Н	194/10_3Н	194/10_4
Na <sub>2</sub> O	4.37	5.00	4.50	4.84	4.54	1.00	0.92	2.21	0.75
Cs <sub>2</sub> O	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	1.18	Не обн.
CaO	4.35	5.53	3.76	4.39	3.78	» »		0.43	» »
PbO	9.89	8.47	12.86	10.68	12.44	37.09	34.98	29.19	31.90
MnO	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.66	0.75	Не обн.	Не обн.
FeO	» »	» »	» »	» »	» »	Не обн.	0.72	» »	» »
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	2.69	» »	» »	» »	» »	Не обн.	» »	» »
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	Не обн.	» »	» »	» »	» »	1.45	» »	» »
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	» »	1.10	» »	» »	3.46	4.73	1.83	2.47
TiO <sub>2</sub>	» »	» »	0.68	0.58	0.82	Не обн.	1.48	Не обн.	Не обн.
SnO <sub>2</sub>	» »	» »	Не обн.	Не обн.	Не обн.	2.45	2.91	» »	» »
UO <sub>2</sub>	6.81	2.59	4.66	5.64	6.24	Не обн.	Не обн.	3.09	2.38
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.85	2.95	3.78	4.38	6.08	7.32	7.34	4.06	4.28
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	63.98	67.40	62.32	66.40	60.71	44.98	41.52	55.62	54.69
F	1.98	2.19	1.83	1.55	1.67	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.
-O <sub>2</sub> (F)	0.83	0.92	0.77	0.65	0.70	—	—	—	—
Сумма	95.40	95.90	94.72	97.81	95.58	96.96	96.80	97.61	96.47

Коэффициенты (B = 2)

Na	0.865	0.986	0.911	0.917	0.886	0.235	0.211	0.505	0.173
Cs	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059	0.000
Ca	0.476	0.603	0.420	0.460	0.408	0.000	0.000	0.054	0.000
Pb	0.272	0.232	0.361	0.281	0.337	1.209	1.116	0.927	1.022
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.068	0.075	0.000	0.000
Fe	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.071	0.000	0.000
Y	0.000	0.146	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.104	0.000	0.000
Sb	0.000	0.000	0.047	0.000	0.000	0.173	0.231	0.089	0.121
U	0.155	0.059	0.108	0.123	0.140	0.000	0.000	0.081	0.063
Сумма А	1.768	2.026	1.848	1.780	1.770	1.685	1.808	1.715	1.379
Ti	0.000	0.000	0.053	0.043	0.062	0.000	0.132	0.000	0.000
Sn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.118	0.137	0.000	0.000
Nb	0.224	0.136	0.179	0.193	0.277	0.401	0.393	0.217	0.230
Ta	1.776	1.864	1.768	1.764	1.661	1.481	1.338	1.783	1.770
Сумма В	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
F	0.639	0.705	0.604	0.479	0.532	0.000	0.000	0.000	0.000
Ta/(Ta+Nb)	0.89	0.93	0.91	0.90	0.86	0.79	0.77	0.89	0.89
Na/(Na+Ca)	0.65	0.62	0.68	0.67	0.68	—	—	0.90	—

Примечание. 1—5 — микролит; 6—9 — плюмбомикролит; 6, 7 — вторичные по колумбит-танталиту, 8, 9 — по микролиту.



лита, характерны высокие отношения  $Ta/(Ta+Nb)$ , в пределах 0.77—0.89, но помимо  $Ta$ ,  $Nb$  и в некоторых анализах титана в группу В входит  $Sn$  в количестве до 0.14 к. ф. (табл. 5, ан. 6—9). В группе А доминирует  $Pb$  (0.93—1.21 к. ф.); содержания  $Ni$  и  $Ca$  резко понижены по сравнению с микролитами; присутствует  $Sb$  в количестве до 0.23 к. ф. В некоторых анализах отмечены также  $As$  в количестве 0.10 к. ф. и  $Cs$  в количестве 0.06 к. ф. Суммы катионов в группе А составляют 1.38—1.81 к. ф., т. е. плюмбомикролит представлен слабо дефектной и дефектной разновидностями (Горжевская и др., 1974). В отличие от микролита фтор в составе плюмбомикролита не обнаружен. Следует отметить, что отношение  $Ta/(Ta+Nb)$  в плюмбомикролите, развивающемся по микролиту (табл. 5, ан. 8, 9), выше, чем в плюмбомикролите, замещающим колумбит-танталит (табл. 5, ан. 6, 7): соответственно 0.89 и 0.77—0.79.

**Самарскит** присутствует в амазонитовом пегматите с гранитной структурой в виде черных призматических зерен и их скоплений. Величина зерен до 0.5 мм, обычно они несут следы гидротермального изменения. Главными химическими компонентами минерала являются  $Nb$ ,  $Ta$ ,  $Y$  и иттриевые редкие земли,  $U$  и  $Fe$ , второстепенными —  $W$ ,  $Th$ ,  $Sn$ ,  $Mn$ ,  $Pb$ ,  $Ti$  (табл. 6, ан. 1—7). В зернах отмечается неоднородность по составу, обусловленная прежде всего вариациями концентраций  $Ta$ ,  $W$  и  $Nb$ : содержание  $WO_3$  в точечных анализах одного и того же зерна может меняться более чем в 2 раза (табл. 6, ан. 1—3), а отношение  $Ta/(Ta+Nb)$  варьирует от 0.25 до 0.54. В основном же в проанализированных зернах преобладают значения  $Ta/(Ta+Nb) = 0.49—0.55$  (табл. 6, ан. 1—3, 4, 6), т. е. минерал имеет состав, промежуточный между самарскитом и иттротанталитом. На долю  $Nb$  в группе В приходится 39—49 %,  $Ta$  33—48 %,  $W$  6—13 %,  $Sn$  4.8—6.3 % и  $Ti$  до 1.3 %. В группе А около 35 % приходится на долю  $Fe$ , 29—33 % на долю  $Y$  и лантаноидов, 16—18 % на долю  $U$  и 10—13 % на долю  $Mn$ . Отношение  $Ln_2O_3/Y_2O_3$  изменяется от 0.8 до 1.5. Среди лантаноидов ведущая роль принадлежит  $Yb$ ; в пересчете на 100 % состав лантаноидов следующий:  $Yb_{43-55}Er_{19-22}Dy_{12-27}Gd_{0-11}Tm_{0-12}Lu_{0-11}$ . На ранних стадиях гидротермального изменения зерен происходит преимущественный вынос  $Fe$  и  $Mn$  (табл. 6, ан. 5), при более интенсивном изменении минерала в нем снижаются также содержания лантаноидов,  $Y$ ,  $Sn$ ,  $W$ ,  $Nb$  (ан. 7). В то же время в анализах появляются  $Si$ ,  $Al$ ,  $Ba$ ,  $Ca$ . Отношения  $Ta/(Ta+Nb)$  и  $Mn/(Mn+Fe)$  при гидротермальном изменении самарскита меняются закономерно (ан. 4—7).

**Фергусонит** встречается в виде мелких (менее 0.1 мм) удлинённых зерен коричневатого-бурого цвета, покрытых белесой корочкой. Минерал содержит около 10 %  $Ta_2O_5$ , отношение  $Ln_2O_3/Y_2O_3$  составляет 0.90 (табл. 6, ан. 8). Среди лантаноидов доминируют  $Yb$  и  $Dy$ ; в пересчете на 100 % состав лантаноидов  $Yb_{25.8}Dy_{21.8}Er_{18.8}Gd_{12.5}Sm_{8.4}Lu_{4.8}Nd_{4.0}Tm_{3.9}$ .

Циркон, вольфрамит, касситерит присутствуют в виде зерен размером до 2 мм в меланократовых обособлениях и блоках кварце. Циркон преимущественно встречается в парагенезисе с гранатом, а касситерит и вольфрамит приурочены к зоне циннвальдита. В **касситерите** в числе примесных элементов установлены  $Ta_2O_5$  в количестве 1.3—3.3 %,  $Nb_2O_5$  до 0.57 % и  $FeO$  до 0.62 %. Зерна **вольфрамит** различаются между собой по составу. Наряду с «обычным» вольфрамитом с отношением  $Mn/(Fe+Mn) = 0.44$ , не содержащим примесей (табл. 7, ан. 1), присутствует вольфрамит, содержащий  $Ta_2O_5$  и

Таблица 6

**Состав и коэффициенты в кристаллохимических формулах  
редкоземельных тантало-ниобатов**

**Composition and crystal-chemical formulas coefficients of the rare-earths' tantalum-niobates**

Компонент, мас. %	1	2	3	4	5	6	7	8
	79/04_11H (т. 1)	79/04_11H (т. 2)	79/04_11H (т. 3)	79/04_15H (т. 1)	79/04_15H (т. 2)	79/04_12H (т. 1)	79/04_12H (т. 2)	79/04_8H
CaO	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	2.08	0.70
PbO	» »	» »	» »	1.43	0.93	0.82	1.18	Не обн.
MnO	2.88	2.18	2.49	2.09	1.63	2.18	0.36	» »
FeO	7.74	7.26	7.44	7.46	3.89	6.91	1.45	» »
BaO	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	1.48	» »
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	» »	» »	» »	» »	» »	0.72	» »
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	» »	» »	» »	» »	0.21	Не обн.	» »
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	» »	» »	» »	» »	Не обн.	» »	0.76
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	» »	» »	» »	» »	» »	» »	1.66
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	» »	0.75	» »	0.81	0.91	» »	2.56
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.56	1.02	1.95	1.54	1.57	1.64	» »	4.58
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.15	1.85	1.41	1.37	1.20	1.57	» »	4.06
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Не обн.	1.02	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	» »	0.85
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.44	3.78	3.21	3.70	3.21	4.35	» »	5.73
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Не обн.	0.97	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	» »	1.07
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.45	5.91	5.80	5.46	4.83	5.71	2.97	23.62
ThO <sub>2</sub>	2.14	3.66	3.66	3.65	3.22	3.17	4.56	0.73
UO <sub>2</sub>	13.20	13.20	14.26	13.86	12.18	13.85	12.60	2.30
SiO <sub>2</sub>	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	2.18	Не обн.	11.83	Не обн.
TiO <sub>2</sub>	» »	» »	» »	0.32	Не обн.	0.25	Не обн.	0.62
SnO <sub>2</sub>	2.51	2.56	2.77	2.20	2.31	3.01	» »	Не обн.
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	22.04	17.15	18.88	18.18	18.01	16.54	10.63	38.72
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	24.37	34.10	31.48	28.94	23.49	33.05	29.60	10.62
WO <sub>3</sub>	10.33	4.19	5.74	4.86	5.50	4.19	1.13	Не обн.
Сумма	98.71	98.85	99.84	95.06	84.96	98.36	80.59	98.58

## Коэффициенты (O = 8)

	Коэффициенты (O = 8)							(O = 4)
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.245	0.036
Pb	0.000	0.000	0.000	0.044	0.031	0.025	0.035	0.000
Mn	0.257	0.205	0.229	0.203	0.168	0.207	0.034	0.000
Fe	0.681	0.674	0.674	0.714	0.397	0.647	0.134	0.000
Ba	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.064	0.000
Al	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.093	0.000
Sc	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000
Nd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013
Sm	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028
Gd	0.000	0.000	0.027	0.000	0.033	0.034	0.000	0.041
Dy	0.053	0.036	0.068	0.057	0.062	0.059	0.000	0.071
Er	0.038	0.065	0.048	0.049	0.046	0.055	0.000	0.061
Tm	0.000	0.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013
Yb	0.110	0.128	0.106	0.129	0.119	0.149	0.000	0.084
Lu	0.000	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016

Таблица 6 (продолжение)

Компонент, мас. %	1	2	3	4	5	6	7	8
	79/04_12H (т. 1)	79/04_11H (т. 2)	79/04_11H (т. 3)	79/04_15H (т. 1)	79/04_15H (т. 2)	79/04_12H (т. 1)	79/04_12H (т. 2)	79/04_8H
Y	0.417	0.349	0.334	0.333	0.313	0.340	0.174	0.605
Si	0.000	0.000	0.000	0.000	0.266	0.000	1.303	0.000
Th	0.051	0.092	0.090	0.095	0.089	0.081	0.114	0.008
U	0.309	0.326	0.344	0.353	0.330	0.345	0.309	0.025
Ti	0.000	0.000	0.000	0.028	0.000	0.021	0.000	0.022
Sn	0.105	0.113	0.120	0.100	0.112	0.134	0.000	0.000
Nb	1.049	0.861	0.925	0.941	0.993	0.837	0.529	0.843
Ta	0.695	1.030	0.928	0.901	0.779	1.006	0.886	0.139
W	0.282	0.121	0.161	0.144	0.174	0.122	0.032	0.000
Ta/(Ta+Nb)	0.29	0.54	0.50	0.49	0.44	0.55	0.63	0.14
Mn/(Fe+Mn)	0.27	0.23	0.25	0.22	0.30	0.24	0.20	—

Примечание. 1—3 — точечные анализы неоднородного зерна самарскита-(Y); 4—7 — реликты самарскита-(Y) (4, 6) среди продуктов его гидротермального изменения (5, 7) (рис. 2, з); 8 — фергусонит-(Y).

$Nb_2O_5$  в сумме около 11 % [ $Ta/(Ta+Nb) = 0.36$ ] и  $SnO_2$  в количестве около 2 % (ан. 2). В микролите обнаружены микровключения гюбнерита, но анализ этого минерала (ан. 3) следует рассматривать только как качественный.

Кроме того, в составе продуктов гидротермального изменения самарскита (рис. 2, з) присутствуют минералы, отвечающие по составу танталовому вольфраму и вольфраму иксидолиту (Волошин, Пахомовский, 1988). Первый (табл. 7, ан. 4, 5) содержит 13—17 %  $Ta_2O_5$ , около 6 %  $Nb_2O_5$ , 4 %  $SnO_2$  и примесь  $Sc_2O_3$ , отношение  $Ta/(Ta+Nb)$  в анализах варьирует от 0.46 до 0.60, а  $Mn/(Mn+Fe)$  от 0.39 до 0.44.

**Иксидолит** (табл. 8) наряду с относительно высоким содержанием  $SnO_2$  (6.6—8.7 %) характеризуется также высоким содержанием  $WO_3$  (21—24 %), существенным преобладанием железа над марганцем (отношение  $Mn/(Mn+Fe) = 0.36—0.38$ ), низкими содержаниями  $TiO_2$  (0.67 %) и  $Sc_2O_3$  (до 0.22 %). Усредненный химический состав минерала описывается формулой  $(Ta_{0.24}Nb_{0.16}W_{0.15}Sn_{0.08}Ti_{0.01}Fe_{0.24}Mn_{0.14}Sc_{0.01})_{1.03}O_2$ . Отношение  $Ta/(Ta+Nb)$  составляет 0.55—0.62; оно, в соответствии с литературными данными по иксидолиту из пегматитов других регионов (Волошин, Пахомовский, 1988), выше, чем в колумбит-танталите (0.40—0.56, табл. 4) и самарските (0.49—0.55, табл. 6), но ниже, чем в микролите (0.86—0.93, табл. 5). Отношение  $Mn/(Mn+Fe)$  в иксидолите повышено по сравнению с замещаемым им самарскитом (0.36—0.38 и 0.22—0.27 соответственно).

**Циркон** коричневого цвета; содержание  $HfO_2$  в нем преимущественно 5.4—6.4 %, отношение  $ZrO_2/HfO_2$  составляет 9.5—11. В некоторых зернах циркона проявлена ритмическая зональность, выражающаяся в чередовании широких светлых полос, содержащих 5.9 %  $HfO_2$  и 60—62 %  $ZrO_2$ , и узких темных полос, обогащенных  $Y_2O_3$  (2.9—3.8 %),  $Yb_2O_3$  (1.6—2.4 %),  $Nb_2O_5$  (2.3—2.6 %),  $UO_2$  (1.6 %),  $FeO$  (0.9—1.3 %),  $CaO$  (0.9—1.1 %), но с пониженными содержаниями  $ZrO_2$  (47—49 %) и  $HfO_2$  (3.6—4.1 %) и низкими суммами оксидов в анализах (86.1—86.5 %), что позволяет предполагать интенсивную

Таблица 7

**Состав и коэффициенты в кристаллохимических формулах вольфрамита**  
**Composition and crystal-chemical formulas coefficients of wolframite**

Компонент, мас. %	1	2	3	4	5
	79/04_3Н	79/04_14Н	194/10_3_7Н	79/04_11bН	79/04_15Н
MnO	10.01	6.87	19.33	9.45	7.49
FeO	13.24	15.56	1.24	12.30	11.73
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.35	0.25
TiO <sub>2</sub>	» »	» »	» »	Не обн.	0.28
ZrO <sub>2</sub>	» »	» »	» »	1.03	Не обн.
SnO <sub>2</sub>	» »	2.02	1.92	3.55	4.65
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	» »	5.65	2.75	5.56	6.82
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	» »	5.30	9.74	13.49	17.22
WO <sub>3</sub>	72.80	59.98	57.25	53.13	43.94
Сумма	96.05	95.38	92.94*	98.87	92.38
Коэффициенты (O = 4)					
Mn	0.445	0.302	0.895	0.403	0.342
Fe	0.582	0.676	0.057	0.519	0.529
Sc	0.000	0.000	0.000	0.015	0.012
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011
Zr	0.000	0.000	0.000	0.025	0.000
Sn	0.000	0.042	0.042	0.071	0.100
Nb	0.000	0.133	0.068	0.127	0.166
Ta	0.000	0.075	0.145	0.185	0.252
W	0.991	0.807	0.811	0.694	0.614
Ta/(Ta+Nb)	—	0.36	0.68	0.46	0.60
Mn/(Fe+Mn)	0.43	0.31	0.94	0.44	0.39

Примечание. 1, 2 — вольфрамит, индивидуальные зерна; 3 — гюбнерит, микровключение в микролите; 4, 5 — танталовый вольфрамит в составе продуктов гидротермального изменения самарскита. \* Включая F = 1.22 %.

гидратацию минерала. Отношение ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> в светлых и темных полосах отличается незначительно, составляя в среднем 10.3 в светлых и 12.6 в темных полосах. В блоковом пегматите встречаются зерна, более богатые Hf: в цирконе из срастания с циннвальдитом и колумбит-танталитом, замещаемым плюмбомикролитом, содержание HfO<sub>2</sub> возрастает от центра зерна к краю от 8.67 до 19.56 %, а отношение ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> снижается от 6.7 до 2.4.

Минералы-концентраторы редких земель и Y представлены флюоритом, ксенотимом, монацитом и фторкарбонатами Се. **Флюорит** из парагенезиса с циннвальдитом содержит 3.38 % Y и 1.02 % Yb. **Монацит** отмечается в виде зерен желтого цвета. Это селективно цериевый минерал; в пересчете на 100 % состав лантаноидов следующий: Ce<sub>51.9</sub>La<sub>19.2</sub>Nd<sub>16.6</sub>Pr<sub>6.1</sub>Sm<sub>4.2</sub>Gd<sub>1.9</sub>. Особенностью монацита является высокое содержание в нем ThO<sub>2</sub> (11 %) (табл. 9, ан. 1). **Ксенотим** образует микровключения в цирконе. В составе ксенотима на долю иттриевых редких земель приходится 47 % от суммы Y+Ln<sub>Y</sub>; в нем также присутствуют примеси ThO<sub>2</sub> и UO<sub>2</sub> (табл. 9, ан. 2). Фторкарбонат, образующий срастания с колумбит-танталитом и спессартином (рис. 2, а) близок

Таблица 8

**Состав и коэффициенты  
в кристаллохимических формулах иксиолита**

**Composition and crystal-chemical formulas  
coefficients of ixiolite**

Компонент, мас. %	1	2	3
	79/04_11Н	79/04_15Н	79/04_12Н
MnO	6.96	6.03	6.22
FeO	11.60	10.99	10.79
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	0.17	0.14
TiO <sub>2</sub>	0.68	0.67	0.66
SnO <sub>2</sub>	6.57	8.64	8.69
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15.92	12.42	12.84
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	31.78	34.67	35.15
WO <sub>3</sub>	24.24	21.84	21.23
Сумма	97.97	95.43	95.72
Коэффициенты (O = 2)			
Mn	0.146	0.133	0.136
Fe	0.241	0.239	0.234
Sc	0.005	0.004	0.003
Ti	0.013	0.013	0.013
Sn	0.065	0.090	0.090
Nb	0.179	0.146	0.150
Ta	0.215	0.244	0.247
W	0.156	0.147	0.142
Ta/(Ta+Nb)	0.55	0.62	0.62
Mn/(Fe+Mn)	0.38	0.36	0.37

Примечание. 1—3 — вольфрамоиксиолит в составе продуктов гидротермального изменения зерен самарскита.

по составу к **паризиту-(Ce)**, но содержит 26.6 % ThO<sub>2</sub> и 3.9 % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 8, ан. 3), т. е. является, по-видимому, ториевым паризитом. **Бастнезит-(Ce)** отмечен в виде включения в мусковите (табл. 9, ан. 4).

### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Полученные данные наряду с уже имевшимися сведениями по минералогии амазонитовых пегматитов массива Ая показывают, что эти пегматиты содержат минерализацию, присущую как редкоземельным, так и редкометалльным пегматитам — это, с одной стороны, минералы Y, PЗЭ, Th, U, Nb, с другой стороны, минералы В, Li, Cs, Ta, Sn. Это подтверждается геохимическими анализами пегматитов (табл. 1). Из сопоставления с кларками редких элементов в кислых породах по А. П. Виноградову следует, что в наибольшей степени в рассматриваемых пегматитах концентрируются Cs (степень концентрации до 40) и Ta (до 18), в меньшей мере Sn (до 10), U (до 7), Nb (до 4), Y (3), Li (3.5), что указывает на Cs-Ta редкометалльную специализацию пег-



Таблица 9

**Состав и коэффициенты в кристаллохимических формулах  
минералов РЗЭ и Y**

**Composition and crystal-chemical formula coefficients  
of REE- and Y-bearing minerals**

Компонент, мас. %	1	2	3	4
	79/04_5H	194/10_10	194/10_8	79/04_6H
CaO	0.99	He обн.	5.36	He обн.
PbO	He обн.	» »	1.35	» »
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	24.23	3.94	0.56
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.81	He обн.	8.49	20.24
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.53	» »	11.57	38.63
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.51	» »	1.93	3.08
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.69	» »	8.38	7.79
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.56	» »	1.80	He обн.
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.19	» »	He обн.	» »
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	He обн.	3.89	» »	» »
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	6.28	» »	» »
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	23.36	» »	» »
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	» »	4.10	» »	» »
SiO <sub>2</sub>	1.65	2.19	1.05	» »
ThO <sub>2</sub>	11.23	1.37	26.23	» »
UO <sub>2</sub>	He обн.	1.60	He обн.	» »
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	28.28	32.97	» »	» »
F	He обн.	He обн.	4.98	9.01
-O <sub>2</sub> (F)	—	—	2.10	3.79
Сумма	99.44	100.0	72.98	75.52
<b>Коэффициенты</b>				
Ca	0.042	0.000	0.617	0.000
Pb	0.000	0.000	0.039	0.000
Y	0.000	0.46-	0.226	0.012
La	0.159	0.000	0.325	0.289
Ce	0.430	0.000	0.574	0.548
Pr	0.051	0.000	0.076	0.043
Nd	0.138	0.000	0.322	0.108
Sm	0.035	0.000	0.067	0.000
Gd	0.016	0.000	0.000	0.000
Dy	0.000	0.045	0.000	0.000
Er	0.000	0.070	0.000	0.000
Yb	0.000	0.254	0.000	0.000
Lu	0.000	0.044	0.000	0.000
Si	0.066	0.078	0.113	0.000
Th	0.102	0.011	0.641	0.000
U	0.000	0.013	0.000	0.000
P	0.952	0.995	0.000	0.000
F	0.000	0.000	1.694	1.104

Примечание. 1 — монацит-(Ce); 2 — ксенотим-(Y) (1 и 2 — расчет формулы на 4 атома кислорода); 3 — ториевый паризит (расчет формулы на 3 катиона); 4 — бастнезит-(Ce) (расчет формулы на 1 катион).

матитов (Поля редкометалльных..., 1975). Образование редкоземельно-редкометалльной минерализации в пегматитах связано преимущественно со стадией замещения (Власов, 1952), однако степень изученности пегматитов массива Ая на настоящий момент позволяет наметить пока лишь общую схему развития процесса. Сначала из остаточного раствора кристаллизовались минералы, богатые Fe и Mn (турмалин, альмандин-спессартиновый гранат, колумбит, самарскит, вольфрамит) с относительно невысокими отношениями Mn/(Fe+Mn), в пределах 0.30—0.50, и Ta/(Ta+Nb), до 0.55 (табл. 3, 4, 6, 7). Изменение состава граната отражает рост концентрации Mn относительно Fe в растворе. Замещение микроклина альбитом привело к повышению концентрации ионов K<sup>+</sup> в растворе, содержащем также Li, Cs и F и как следствие образованию реакционной оторочки циннвальдита вокруг граната. Наблюдаемая зональность в колумбит-танталите, взаимоотношения между колумбит-танталитом и микролитом, самарскитом и иксиолитом отражают постепенное увеличение в растворе концентрации Ta относительно Nb. В свою очередь замещение микролита плюмбомикролитом указывает на рост в дальнейшем в растворе концентрации свинца, что, возможно, обусловлено альбитизацией микролина, содержащего примеси Pb (Шмакин и др., 1973). Ритмическая зональность в зерне циркона может быть обусловлена периодическим повышением в растворе концентраций Nb и Fe, высвобождаемых при замещении колумбита марганцевым колумбит-танталитом, что могло привести к проявлению в цирконе изоморфизма по схеме  $2Zr^{4+} \rightarrow Y^{3+} + Nb^{5+}$ . Уменьшение отношения ZrO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> в зональном цирконе из сростаний с циннвальдитом отражает его рост в условиях возрастающей щелочности. Присутствие в пегматите вольфрамитов, микровключений гюбнерита в микролите и примеси W в колумбит-танталите, самарските и иксиолите указывает на повышенную концентрацию вольфрама в остаточном пегматитовом расплаве-растворе.

Судя по составу акцессорной минерализации и геохимическим данным, амазонитовые пегматиты Аинского массива представляют собой новый для Приольхонья тип пегматитов — пегматиты с комплексной (Y-Nb-Ta-W-Cs-Sn) минерализацией. Эволюция состава акцессорных минералов, повышенные концентрации Ta в касситерите, фергусоните, самарските, парагенезис минералов Nb и Ta с богатой F литиевой слюдой и в то же время ассоциация их с минералами, концентрирующими Y и Ln<sub>Y</sub>, позволяют предполагать близость изученных пегматитов к пегматитам фтор-тантал-иттриевого эволюционного ряда, петротипом которых в России являются амазонитовые пегматиты Кольского полуострова (Волошин, Пахомовский, 1986). По классификации П. Черны (Černý, 1992), пегматиты массива Ая следует относить, по-видимому, к смешанному семейству, которое занимает промежуточное положение между семейством редкоземельных пегматитов с Nb-Y-F геохимической специализацией и редкометалльными пегматитами с Li-Cs-Ta специализацией.

Проявления амазонитовых пегматитов в Прибайкалье имеют сходное структурное положение — все они приурочены к системе глубинных разломов, отделяющих Сибирскую платформу от Саяно-Байкальского складчатого пояса (рис. 1). Однако имеющиеся геохронологические данные указывают на одновременность формирования пегматитов и связь их с различными геодинамическими процессами. Возраст гранитов массива Ая составляет  $469 \pm 1.5$  млн лет (Владимиров и др., 2007); возраст внутригранитных пегматитов предположительно близок к этому значению или моложе. Этот период

соответствует поздней стадии коллизионного процесса, проявившегося в южном обрамлении Сибирского кратона в раннем палеозое. В Слюдянском поле возраст пегматитов редкометалльно-редкоземельной формации составляет 447 млн лет (Резницкий и др., 2000), что указывает на их формирование после завершения раннепалеозойского коллизионного события. Амазонитовые редкометалльно-редкоземельные пегматиты из юго-восточной части зоны Главного Саянского разлома (Иркутское поле на рис. 1, а) формировались после значительного временного разрыва: они имеют возраст  $353 \pm 1.9$  млн лет (Савельева и др., 2012), и их формирование связано, по-видимому, с тектоно-магматической активизацией зоны краевого шва Сибирской платформы. Для редкометалльных пегматитов Абчадской зоны есть данные о том, что они также были сформированы в ходе герцинского тектонического события (Турченко и др., 2009 г.). Отличия амазонитовых пегматитов массива Ая по геохимии и составу акцессорной минерализации от амазонитовых пегматитов расположенных поблизости Тажеранского и Бирхинского полей Приольхонья, относимых к пегматитам Nb-Y эволюционного ряда (Шмакин и др., 1973, 2007), могут отражать особенности химического состава исходных для пегматитов магм, обусловленные составом протолита, либо быть связаны с разной направленностью эволюции расплавов. Для внутригранитных пегматитов массива Ая исходным был субщелочной плюмазитовый расплав, эволюция которого, судя по изменению состава темноцветных минералов (увеличение глиноземистости биотита, кристаллизация граната вместо биотита, рост содержания Mn в гранате), происходила в направлении роста кислотности, что благоприятствовало накоплению Ta в остаточном расплаве вместе с F, B, Cs, Li, Sn и W.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 10-05-00289.

#### Список литературы

- Владимиров А. Г., Хромых С. В., Мехоношин А. С., Волкова Н. И., Травин А. В., Юдин Д. С., Крук Н. Н., Колотилина Т. Б. Этапы, масштабы и источники раннекаледонского магматизма в Ольхонском регионе, Западное Прибайкалье // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. Т. 1. С. 35—38.
- Власов К. А. Текстурно-парагенетическая классификация гранитных пегматитов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1952. № 2. С. 30—55.
- Волошин А. В., Пахомовский Я. А. Минералы и эволюция минералообразования в амазонитовых пегматитах Кольского полуострова. Л.: Наука, 1986. 168 с.
- Волошин А. В., Пахомовский Я. А. Минералогия тантала и ниобия в редкометалльных пегматитах. Л.: Наука, 1988. 242 с.
- Гинзбург А. И. О некоторых особенностях геохимии тантала и типах танталового оруденения // Геохимия. 1956. № 3. С. 74—83.
- Гордиенко В. В. Гранитные пегматиты (рудные формации, минералого-геохимические особенности, происхождение, поисково-оценочные критерии). СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. 272 с.
- Горжевская С. А., Сидоренко Г. А., Гинзбург А. И. Титано-тантало-ниобаты (свойства, особенности состава и условия образования). М.: Недра, 1974. 344 с.
- Донская Т. В., Скляр Е. В., Гладкочуб Д. П., Мазукабзов А. М., Сальникова Е. Б., Ковач В. П., Яковлева С. З., Бережная Н. Г. Прибайкальский коллизионный метаморфический пояс // Докл. РАН. 2000. Т. 374. № 7. С. 1075—1079.
- Загорский В. Е. Гранитно-пегматитовые системы с месторождениями редких металлов и самоцветов: геохимия, минералогия, петрогенезис. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Иркутск: Институт геохимии СО РАН, 2001. 48 с.

- Загорский В. Е., Макагон В. М., Шмакин Б. М.* Систематика гранитных пегматитов // *Геология и геофизика*. 2003. Т. 44. № 5. С. 422—435.
- Иванов А. Н., Шмакин Б. М.* Граниты и пегматиты Западного Прибайкалья. М.: Наука, 1980. 220 с.
- Иванов В. С.* О влиянии температуры и химической активности калия на состав биотита в гранитоидах (на примере Западно- и Восточно-Иульгинского интрузивов Центральной Чукотки) // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1970. № 7. С. 20—30.
- Калинин П. В.* Амазонитовые пегматиты Слюдянского района // *Изв. вузов. Геология и разведка*. 1968. № 6. С. 44—52.
- Мануйлова М. М., Асланов И. К., Терентьева М. В.* Особенности геологического положения и минерализации редкометалльных пегматитов одного из районов Сибири // *Тр. Лабор. геол. докембрия*. Л.: Наука, 1964. Вып. 19. С. 322—331.
- Михайлова Т. С.* Характерные признаки постпротерозойских гранитных интрузий центральной части Западного Прибайкалья на примере массива Ая / Эндогенные полезные ископаемые Саяно-Байкальской горной области. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1974. С. 72—85.
- Минералы*. Справочник. Т. II. Вып. 3. М.: Наука, 1967. 676 с.
- Поля редкометалльных гранитных пегматитов (геохимическая специализация и закономерности размещения)*. М.: Наука, 1976. 332 с.
- Резницкий Л. З., Котов А. Б., Сальникова Е. Б. и др.* Возраст и продолжительность формирования флогопитовых и лазуритовых месторождений Южного Прибайкалья: результаты U-Pb геохронологических исследований // *Петрология*. 2000. Т. 8. № 1. С. 74—86.
- Савельева В. Б., Зырянов А. С.* Геохимия редкометалльных гранитов и метасоматитов в зоне Главного Саянского разлома (Прибайкалье) // *Геохимия*. 2005. № 1. С. 60—79.
- Савельева В. Б., Пресняков С. Л., Лепехина Е. Н., Ларионов А. Н., Базарова Е. П.* Основные этапы гранито- и пегматитообразования в юго-восточной части зоны Главного Саянского разлома, Восточная Сибирь (по результатам U-Pb датирования циркона, SHRIMP-II) // *Докл. РАН*. 2012. Т. 442. № 3. С. 369—375.
- Солодов Н. А., Семенов Е. И., Бурков В. В.* Геологический справочник по тяжелым литофильным редким элементам. М.: Недра, 1987. 438 с.
- Федоровский В. С., Скляр Е. В., Изох А. Э., Котов А. Б., Лавренчук А. В., Мазукабзов А. М.* Сдвиговый тектогенез и щелочно-базитовый магматизм в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 5. С. 682—700.
- Шмакин Б. М., Макагон В. М., Конев А. А., Иванов А. Н.* Амазонитовые пегматиты Приольхонья (Западное Прибайкалье) // *ЗВМО*. 1973. Вып. 5. С. 591—599.
- Шмакин Б. М.* О разнообразии акцессорных минералов гранитных пегматитов редкометалльно-редкоземельной формации // *ЗРМО*. 2007. № 4. С. 16—23.
- Шмакин Б. М., Загорский В. Е., Макагон В. М.* Редкоземельные пегматиты. Пегматиты необычного состава. Новосибирск: Наука, 2007. 432 с.
- Černý P.* Geochemical and petrogenetic features of mineralization in rare-element granitic pegmatites in light of current research // *Applied Geochemistry*. 1992. Vol. 7. N 5. P. 393—416.
- Hogarth D. D.* Classification and nomenclature of the pyrochlore group // *Amer. Miner.* 1977. Vol. 62. N 5—6. P. 403—410.
- Turekian K., Wedepohl K.* Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1961. Vol. 72. N 2. P. 175—191.

Поступила в редакцию  
24 октября 2012 г.