

УДК 549.0 (470.55)

DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-4-1

**К ОНТОГЕНЕЗУ
ЭШИНИТА В ПОЛЕВОШПАТОВОЙ ЖИЛЕ № 31
ВИШНЁВЫХ ГОР НА ЮЖНОМ УРАЛЕ**

В.А. Попов, И.А. Блинов, В.И. Попова

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия;
popov@mineralogy.ru*

Статья поступила в редакцию 14.04.2022 г., принята к печати 30.11.2022 г.

**TO THE ONTOGENESIS OF AESCHYNITE IN FELDSPAR VEIN NO. 31
OF THE VISHNEVYE GORY, SOUTH URALS**

V.A. Popov, I.A. Blinov, V.I. Popova

*South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia;
popov@mineralogy.ru*

Received 14.04.2022, accepted 30.11.2022

Аннотация. Онтогенез мелких выделений акцессорного эшинита в полевошпатовой жиле № 31 Вишнёвых гор на Южном Урале заключается в его сокристаллизации с поздними зонами роста индивидов полевого шпата, ильменитом, титаномagnetитом, мусковитом, цирконом, монацитом, торитом, рутилом, колумбитом и другими минералами. После кристаллизации произошел метамиктный распад индивидов эшинита с образованием нанокристаллической структуры, а затем – многоактное растворение и метасоматоз по микротрещинам в минеральном агрегате. Параллельно метасоматозу эшинита развивалась микропористость в мусковит-ильменитовых сростках, контактирующих с зёрнами эшинита.

Ключевые слова: эшинит, парагенезис, онтогенез, метамиктный распад, метасоматоз, микропористость, полевошпатовые пегматиты.

Abstract. Small grains of accessory aeschynite in feldspar vein no. 31 of Vishnevy Mountains (South Urals) co-crystallize with late growth zones of feldspar crystals, as well as with ilmenite, titanomagnetite, muscovite, zircon, monazite, thorite, rutile, columbite and other minerals. Crystallization of aeschynite was followed by its metamict decay and formation of a nanocrystalline structure and further repeated dissolution and metasomatism along microfractures of the mineral aggregate. Metasomatism of aeschynite was accompanied by the formation of microporosity in muscovite-ilmenite aggregates at the contact with aeschynite grains.

Keywords: aeschynite, paragenesis, ontogenesis, metamict decay, metasomatism, microporosity, feldspar pegmatites.

Для цитирования: Попов В.А., Блинов И.А., Попова В.И. К онтогенезу эшинита в полевошпатовой жиле № 31 Вишнёвых гор на Южном Урале. Минералогия, 8(4), 5–14. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-4-1

For citation: Popov V.A., Blinov I.A., Popova V.I. To the ontogenesis of aeschynite in feldspar vein no. 31 of the Vishnevy Gory, South Urals. Mineralogy, 8(4), 5–14. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-4-1.

Введение

Общий онтогенез геологического (минерального) тела как системы складывается из онтогенезов его частей – минералов. Онтогенетическая информация позволяет рассматривать относительный возраст минеральных тел и их частей (элементов анатомии) как основу для моделирования процессов минералообразования, в том числе – абсолютного возраста минеральных тел. Ниже приведен пример рассмотрения частичного онтогенеза акцессорного эшинита в полевошпатовом пегматите Вишнёвых гор на Южном Урале.

Данные об истории формирования пегматитовой жилы № 31 Вишнёвых гор на Южном Урале (рис. 1) отсутствуют, поскольку минералогическое картирование в процессе разведочных работ не проводилось. Горные выработки на жиле № 31 были заложены в 1930-х–1940-х гг. при поисках цирконсодержащих пегматитов среди миаскитов Седловидной залежи северо-западной части Вишневогорского массива близ контакта его с фенитами (рис. 1а). Жила оказалась бедной в отношении циркона и в дальнейшем была заброшена. Горные выработки обвалились и заросли лесом (рис. 1б). В отвалах разведочных выработок можно обнаружить редкие образцы с мелкими выделениями эшинита в полевошпатовых агрегатах. Минералог-любитель А.М. Кузнецов собрал девять образцов

размером 3–5 см с предполагаемым эшинитом в отвалах пегматитовой полевошпатовой жилы № 31 и в 2018 г. предоставил их для диагностики и описания.

По сравнению с крупными выделениями эшинита жилы № 133, находящейся в северо-восточном замыкании Вишневогорского комплекса на горе Мохнатой (Попова и др., 2021), эшинит жилы № 31 характеризуется мелкими зёрнами, своеобразными парагенезисами и сложными метасоматическими явлениями с возникновением округлых в плоском сечении текстур внутри эшинитовых индивидов. Эшинит был изучен на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 с ЭДС (аналитик И.А. Блинов). В тексте при анализе явлений использованы эмпирические формулы минералов.

Характеристика минералов из пегматитовой жилы № 31

Изученные образцы сложены агрегатами альбита и калиевого полевого шпата с мелкими (1–3 мм) черными минералами с сильным блеском. На минералах под бинокляром наблюдаются преобладающие индукционные поверхности с редкими фрагментами идиоморфных поверхностей у эшинита и циркона. Срастания эшинита с другими акцессорными минералами отличаются по парагенезисам и явлениям замещения (рис. 2). Макроскопически

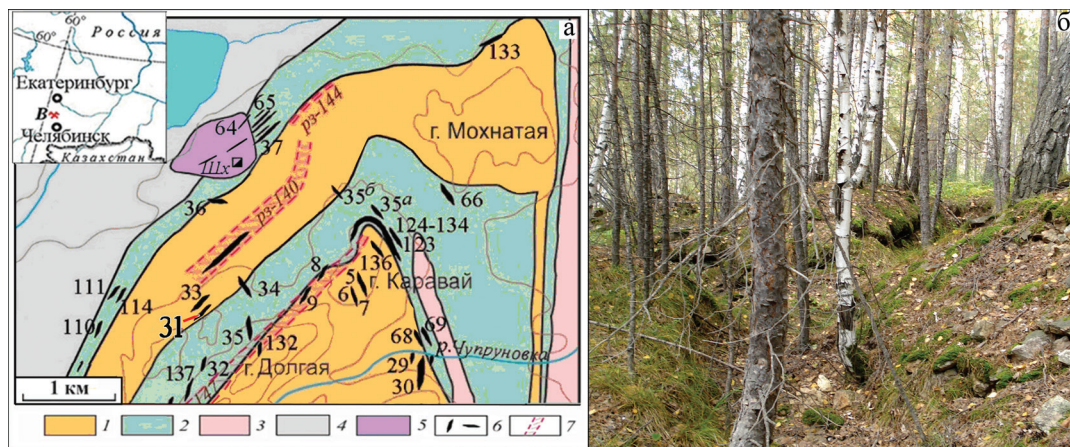


Рис. 1. Локализация пегматитовой жилы № 31 (а) на геологической карте СЗ части Вишневых гор (Попова и др., 2021); б – вид старых выработок по жиле № 31 (фото А.М. Кузнецова).

1–5 – вмещающие породы: 1 – миаскиты; 2 – щелочные сиениты и фениты; 3 – гранито-гнейсы; 4 – плагиогнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты; 5 – серпентиниты; 6 – жилы щелочных пегматитов; 7 – рудные зоны;

Fig. 1. Position of pegmatite vein no. 31 on schematic geological map of the northern part of the Vishnevye Mountains (Popova et al., 2021); б – overview of old mines in vein no. 31 (photo by A.M. Kuznetsov).

1–5 – country rocks: 1 – miaskite; 2 – alkali syenite and fenite; 3 – granite gneiss; 4 – plagiogneiss, crystal schist, amphibolite, quartzite; 5 – serpentinite; 6 – veins of alkali pegmatites; 7 – ore zones.

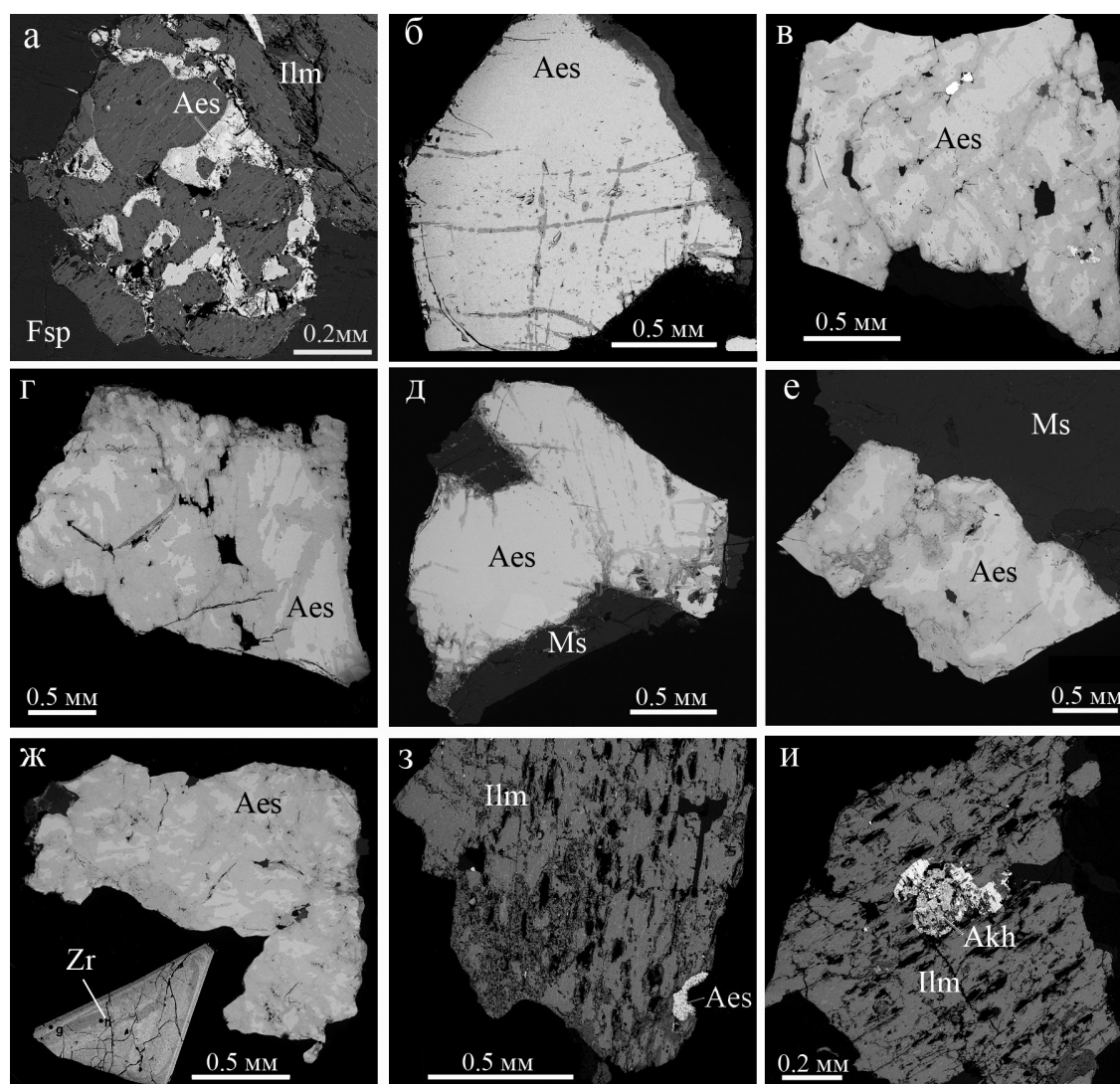


Рис. 2. Зерна и агрегаты эшинита из жилы № 31: а – эшинит (Aes) в ильмените (Ilm) с вростками ориентированных табличек титаномагнетита; б – эшинит с зональной коркой замещения (справа и вдоль трещин); в – измененное зерно эшинита с включениями мусковита (черное) и торита (белое); г – эшинит с изменениями вдоль трещин; д – измененный вдоль тонких трещин эшинит в парагенезисе с мусковитом (Ms); е – измененный эшинит с образованием округлых метасоматических текстур; ж – измененное зерно эшинита с реликтовыми участками первичного эшинита и цирконом (Zr); з – синтаксический сросток ильменита с магнетитом, ориентированными вростками мусковита (черное), эшинита и порами растворения; и – ильменит-магнетитовые сросток с вростками мусковита, эшинита и предполагаемого ахалаита (Akh). BSE-фото.

Fig. 2. Aeschynite grains and aggregates from pegmatite vein no. 31: а – aeschynite (Aes) in ilmenite (Ilm) with ingrowths of oriented titanomagnetite plates; б – aeschynite with a zoned replacement crust (right and along the fractures); в – altered aeschynite with inclusions of muscovite (black) and thorite (white); г – aeschynite altered along fractures; д – aeschynite altered along fractures in assemblage with muscovite (Ms); е – altered aeschynite with formation of round metasomatic structures; ж – altered aeschynite with relics of primary aeschynite and zircon (Zr); з – syntactic intergrowth of ilmenite with magnetite, oriented inclusions of muscovite (black), aeschynite and dissolution pores; и – ilmenite-magnetite intergrowth with ingrowths of muscovite, aeschynite and a possible achalaite (Akh). BSE-images.

чески и при малых увеличениях все мелкие черные сростки на фоне светлых полевых шпатов кажутся однообразными и простыми. Под бинокляром хорошо узнаются некоторые зерна эшинита, мусковита, альбита и циркона в калиевом полево шпате.

Преобладающим по объему минералом пегматитовой жилы является **калиевый полевой шпат**, один из анализов которого характеризуется эмпирической формулой $(K_{0.86}Na_{0.14})AlSi_3O_8$. В относительно крупных индивидах калиевого полевого

Таблица 1

Химический состав мусковита из жилы № 31 (мас. %)

Table 1

Chemical composition of muscovite from vein no. 31 (wt. %)

№ ан.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	MnO	MgO	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	Сумма
22p	46.95	30.23	0.56	6.37	0.14	0.98	–	0.17	9.90	95.30
24m	47.03	29.55	0.60	4.61	–	2.16	0.20	–	9.90	94.09
Эмпирические формулы										
22p	(K _{0.99} Ca _{0.01})(Al _{1.62} Fe _{0.36} Mg _{0.11} Ti _{0.03} Mn _{0.01}) _{Σ2.13} (Al _{0.80} Si _{3.20})O ₁₀ (OH) ₂									
24m	(K _{0.99} Na _{0.03})(Al _{1.60} Fe _{0.26} Mg _{0.25} Ti _{0.03}) _{Σ2.14} (Al _{0.78} Si _{3.22})O ₁₀ (OH) ₂									

Таблица 2

Химический состав торита и монацита-(Ce) из жилы № 31 (мас. %)

Table 2

Chemical composition of thorite and monazite-(Ce) from vein no. 31

№ ан.	CaO	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	ThO ₂	PbO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	Сумма
Торит												
1r	1.09	–	–	–	–	73.92	0.38	13.73	0.44	0.62	–	94.93
2s	3.39	0.36	1.45	–	–	70.78	0.61	16.73	0.46	1.41	–	95.19
Монацит												
3u	–	8.69	45.42	4.58	11.02	–	–	–	–	29.66	0.28	99.65
4t	1.97	8.96	35.40	4.01	14.00	0.75	–	–	–	27.86	3.30	99.61
Эмпирические формулы												
1r	(Th _{0.95} U _{0.06} Ca _{0.07} Pb _{0.01})(Si _{0.88} P _{0.03} Al _{0.03} Fe _{0.01})O ₄											
2s	(Th _{0.82} Ca _{0.16} Ce _{0.02} La _{0.01} Pb _{0.01})(Si _{0.87} P _{0.07} Al _{0.04})O ₄											
3u	(Ce _{0.66} Nd _{0.16} La _{0.13} Pr _{0.07})(P _{0.99} S _{0.01})O ₄ (светлый сектор)											
4t	(Ce _{0.49} Nd _{0.19} La _{0.13} Ca _{0.08} Pr _{0.06} Sr _{0.05} Sm _{0.02} Th _{0.01})(P _{0.90} S _{0.09})O ₄ (тёмный сектор)											

Примечание. Анализы также включают (мас. %): 0.29 FeO и 4.46 UO₂ (ан. 1r), 2.20 SrO и 1.15Sm₂O₃ (ан. 4t).

Note. The analyses also include (wt. %): 0.29 FeO and 4.46 UO₂ (an. 1r), 2.20 SrO and 1.15Sm₂O₃ (an. 4t)

шпата наблюдаются мелкие неориентированные и синтаксические вроски **альбита** (Na_{0.94}K_{0.01}Ca_{0.05})AlSi₃O₈ до 3–5 % площади сечения образцов.

Железистый **мусковит** менее распространен. Его мелкие индивиды почти не видны на фоне полевошпатового агрегата, но в участках с черными минералами наблюдаются скопления мусковита, в том числе в виде синтаксических вросков титаномагнетита с ильменитом (рис. 2з, и). Состав железистого мусковита в разных изученных образцах несколько варьирует (табл. 1), что, возможно, обусловлено разным сечением зерен.

Циркон образует редкие мелкие вроски в калиевом полевошпате. Обычно с одной стороны его кристаллы имеют индукционные поверхности одновременного роста с полевым шпатом, а с другой стороны – идиоморфные головки (рис. 2ж, слева внизу). Кристаллы циркона зональны и секто-

риальны по содержаниям Hf и Th: (Zr_{0.97}Hf_{0.02}Th_{0.01})SiO₄, (Zr_{0.97}Hf_{0.03})SiO₄, (Zr_{0.98}Hf_{0.02})SiO₄.

Торит встречается в виде вросков в эшините, синхронных с монацитом (рис. 3, точки r и s). По составу минерал неоднороден (табл. 2, ан. 1r, 2s). **Монацит** обнаружен в сростаниях с торитом и мусковитом; секториален по составу (рис. 3, точки u и t) (табл. 2, ан. 3u, 4t).

В образцах встречаются синтаксические **магнетит-ильменитовые** сростания (рис. 2а, з, и), в которых при больших увеличениях видны вроски **рутила** и мельчайшие ориентированные таблички **ферроколумбита** (рис. 4, точка h). Ильменит является ведущим вмещающим минералом. Его состав в разных зернах варьирует и характеризуется повышенным содержанием Mn, а также примесями Nb, V и Ta: (Fe_{0.79}Mn_{0.21})(Ti_{0.97}Al_{0.02}Nb_{0.01})O₃, (Fe_{0.82}Mn_{0.18})(Ti_{0.98}Nb_{0.01}V_{0.01})O₃, (Fe_{0.80}Mn_{0.18})_{0.98}(Ti_{1.00}Nb_{0.01}

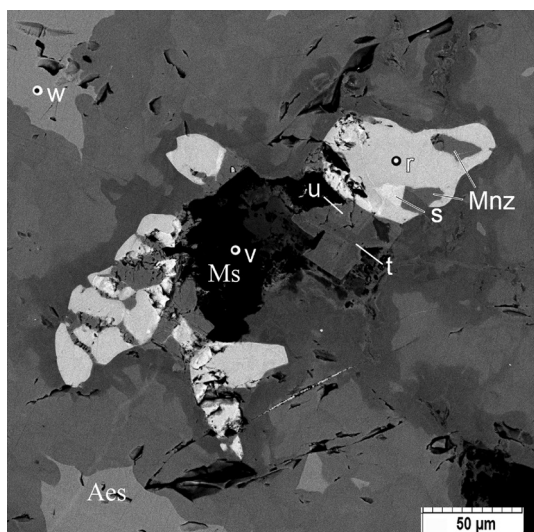


Рис. 3. Неоднородный торит (r, s), секториальный монацит (u, t, Mnz) и мусковит (v, Ms) в измененном «тороэшините» (Aes, w). BSE-фото.

Fig. 3. Heterogeneous thorite (r, s), sectorial monazite (u, t) and muscovite (v, Ms) in altered «toroeschynite» (Aes, w). BSE-images.

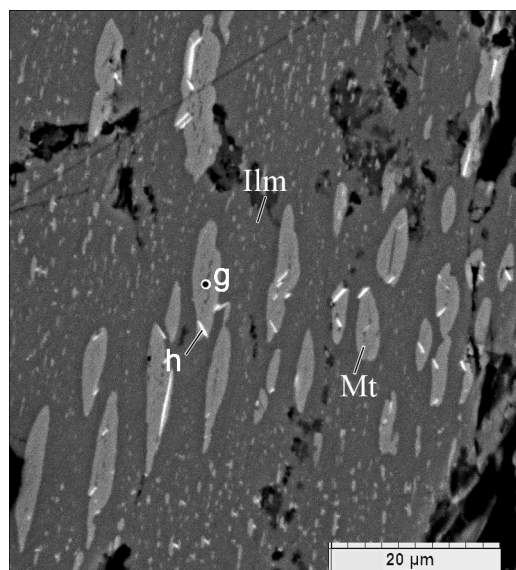


Рис. 4. Ориентированные сростания ильменита (серый), магнетита (g, светло-серый) и ферроколумбита (h, белые таблички). BSE-фото.

Fig. 4. Oriented intergrowths of ilmenite (gray), magnetite (g, light gray) and ferrocolumbite (h, white plates). BSE-images.

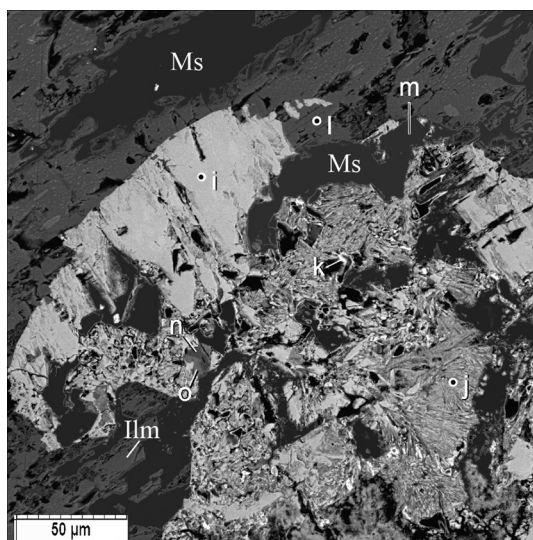


Рис. 5. Включения колумбита (i), «ахалаита» (j), рутила (o, n), эшинита (k) и мусковита Ms (m) в ильмените (l, Ilm). BSE-фото.

Fig. 5. Inclusions of aeschynite (i), «achalaite» (j), rutile (o) and muscovite (m) in ilmenite (l). BSE-image.

$Ta_{0.01}O_3$. Магнетитовые вроски имеют индукционные поверхности с ильменитом, уплощены параллельно (0001) ильменита, а по составу отвечают титаномagnetиту: $Fe(Fe_{1.55}Ti_{0.36}Mn_{0.04}Al_{0.03}V_{0.02})O_4$. Пластинки ферроколумбита расположены под углом 120° соответственно тригональной симметрии ильменита. Местами они расположены и в ильмените, и магнетите. Состав минерала на разных участках

меняется от марганцовитового ферроколумбита $(Fe_{0.47}Mn_{0.45}Sc_{0.08})(Nb_{1.68}Ti_{0.29}Ta_{0.03})O_6$ до железистого манганоколумбита $(Mn_{0.47}Fe_{0.45}Sc_{0.02}Al_{0.03}U_{0.01})(Nb_{1.74}Ta_{0.04}Ti_{0.22}W_{0.02})O_6$ и $(Mn_{0.53}Fe_{0.40}Sc_{0.07})(Nb_{1.77}Ti_{0.17})O_6$. По-видимому, наличие Sc и W в рассматриваемых парагенезисах является химической особенностью колумбита. Рутил имеет резкую секториальность состава: $(Ti_{0.82}Fe_{0.08}Nb_{0.08}Ta_{0.01}W_{0.005}Sn_{0.01})O_2$ и $(Ti_{0.67}Fe_{0.13}Nb_{0.16}Ta_{0.02}W_{0.01}Sn_{0.01})O_2$ (рис. 5, точки n, o).

Вместе с эшинитом и рутилом в магнетит-ильменитовом сростке присутствуют включения расщепленных кристаллов минерала (рис. 5, точка j), состав которого наиболее приближен к составу ахалаита(?) (мас. %): FeO 18.03, MnO 6.38, Nb_2O_5 50.27, TiO_2 13.37, PbO 2.05, ThO_2 1.77, UO_2 0.77, CaO 0.31, SiO_2 3.19, Al_2O_3 0.92, сумма 97.06. Его эмпирическая формула, рассчитанная на четыре катиона без учета Al и Si, $(Fe^{2+}_{0.49}Mn_{0.39}Th_{0.05}Pb_{0.04}Ca_{0.02}U_{0.01})(Fe^{3+}_{0.61}Ti_{0.39})(Nb_{1.66}Ti_{0.34})O_8$ близка к идеализированной формуле ахалаита $(Fe^{2+}, Mn)(Ti, Fe^{3+}, Ta)(Nb, Ta)_2O_8$ (www.mindat.org), но для подтверждения желательны новые находки этого минерала.

Эшинит кристаллизовался в конце роста полевых шпатов одновременно с перечисленными минералами. Его состав в разных образцах и раз-

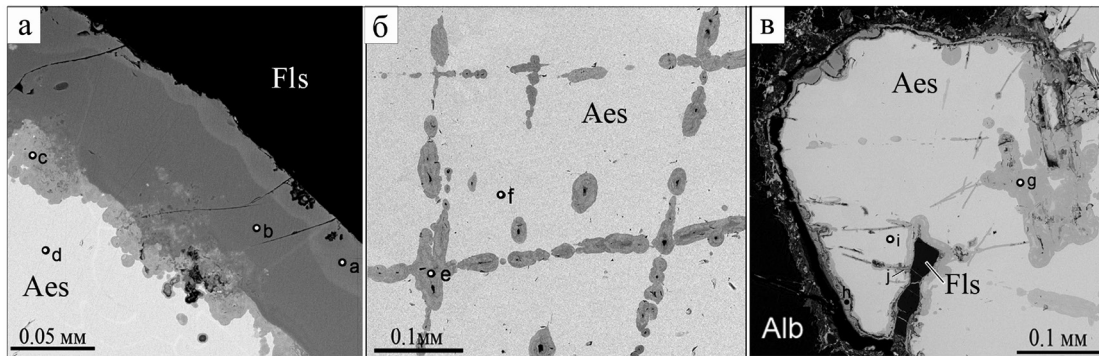


Рис. 6. Округлые зональные текстуры метасоматических изменений в эшините (участки d, f, i).

Alb – альбит, Fls – калиевый полевой шпат. BSE-фото.

Fig. 6. Round zonal structures of metasomatic alteration of aeschynite (areas d, f, i).

Alb – albite, Fls – K-feldspar. BSE-image.

ных участках зерен из жилы № 31 существенно варьирует (табл. 3). Состав исходного (метасоматически неизмененного) эшинита в разных точках зондирования также отличается (табл. 3, ан. № 1, 3, 5, 7, 9, 11), что, по-видимому, связано с ростовой анатомической неоднородностью индивидов, не проявляющейся на BSE-фото.

На BSE-фото видны участки с зональным изменением состава эшинита (рис. 6). Рассмотрим относительный возраст возникновения метамиктности и зон изменения эшинита на примере одного зерна (рис. 2а). На разных участках зерна строение измененных зон разное (рис. 6), но в текстуре метасоматических зон повсеместно наблюдается образование округлых в сечении агрегатов. Изученные эшиниты Вишнёвых гор рентгеноаморфны (Попова и др., 2021). Возникает вопрос об относительном времени метамиктного распада эшинита по отношению к метасоматозу. Метасоматические изменения в эшините (рис. 6) развиваются от поверхности кристаллов и далее по трещинам внутрь в виде округлых в сечении форм. Таким образом, до метасоматоза кристаллы эшинита уже получили нанозернистую структуру и тонкую микропористость, связанные с метамиктным распадом.

Анализ состава эшинита и продуктов его изменения выявил присутствие эшинита-(Ce) (табл. 4, ан. 1, 13), обогащенного Th «тороэшинита» (табл. 4, ан. 3, 5–7, 9–12), а также предполагаемого «титаноколумбита» (смесь минералов), практически не содержащего РЗЭ (табл. 3, ан. 4, 8, 14). Все анализы неизмененного эшинита имеют дефицит суммы 3–4 мас. %, но эмпирические формулы рассчитаны на три катиона возможных компонентов. Это связано с предполагаемой микро- и нанопористостью метамиктных минералов.

В процессе метасоматоза эшинита возникли зоны с разной мощностью, составом и пористостью в разных участках зерна. Возникновение микро- и нанопор осложняет диагностику минералов по данным химического состава, поскольку невозможно определить процентное содержание пор в пределах площади взаимодействия электронов с веществом. В метасоматически измененных зонах минерала дефицит суммы анализов резко увеличивается до 10–15 %. Наноразмерные минералы диагностировать сложно, но можно проследить некоторые химические тенденции в зональных участках минерального индивида, например, метасоматические изменения в одном зерне эшинита.

Рисунок 6а показывает метасоматические изменения в одном зерне эшинита, при котором исходный эшинит-(Y) (табл. 3, ан. 9) заместился высокоторийевым (табл. 3, ан. 8) и далее – высокожелезистым эшинитоподобным минеральным агрегатом (табл. 3, ан. 10). Заметно исчезновение РЗЭ и существенное увеличение Fe.

На втором участке (рис. 6б) исходный эшинит-(Y) (табл. 3, ан. 1) по серии секущих трещин заместился агрегатом с преобладанием Ca («кальциоэшинитом») и незначительным изменением соотношений элементов (табл. 3, ан. 2). Соотношения РЗЭ, Ti и Nb изменились незначительно, но исходная масса вещества стала темнее (уменьшилась). Возможно, это явление связано с появлением нанопористости.

На третьем участке зерна эшинита-(Ce) (рис. 6в) изменения химического состава проявлены гораздо сильнее, соотношения компонентов не соответствуют эшиниту, увеличиваются содержания Fe и Si и уменьшаются содержания Ti и Nb и эшинит замещается смесью минералов («титаноколумбитом») (табл. 3, ан. 14).

Таблица 3

Химический состав эшинита и продуктов его изменения из жилы № 31 (мас. %)

Table 3

Chemical composition of aeschynite and its alteration products from vein no. 31

№ ан.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
№ лаб.	22-f	22-e	22-i	22-h	22-o	22-n	23e	23c	23d	23b	23m	23k	23x	22j
La ₂ O ₃	2.42	1.94	2.45	—	1.03	1.21	1.39	—	1.45	0.78	2.48	0.97	2.68	—
Ce ₂ O ₃	8.14	6.96	8.28	—	5.44	6.52	6.51	0.63	5.66	2.93	6.62	5.74	8.77	0.63
Pr ₂ O ₃	0.91	0.60	0.74	—	0.37	1.19	0.81	—	0.49	0.36	—	0.61	1.08	—
Nd ₂ O ₃	4.05	3.62	3.86	—	3.78	4.20	4.10	—	3.17	2.16	3.74	2.79	3.93	—
Sm ₂ O ₃	0.99	0.97	0.81	—	1.23	0.68	0.65	—	0.58	0.98	—	—	0.72	—
Eu ₂ O ₃	—	0.43	—	—	—	0.20	—	—	—	0.62	—	—	—	—
Gd ₂ O ₃	1.86	1.32	1.56	—	1.57	1.04	1.11	—	—	0.74	—	—	1.39	—
Y ₂ O ₃	5.70	5.36	5.61	—	5.16	4.24	5.16	—	5.11	3.99	4.93	4.73	5.63	—
Dy ₂ O ₃	—	—	—	—	0.78	0.86	—	—	—	—	—	—	—	—
CaO	2.68	3.15	2.27	1.27	1.30	2.74	1.47	0.37	2.57	1.63	1.39	1.64	2.45	0.41
FeO	1.56	1.01	1.38	9.79	1.76	1.81	1.64	9.55	3.54	0.81	1.61	0.59	1.75	41.89
PbO	0.60	0.43	0.69	1.34	0.96	0.81	0.81	3.25	0.79	0.89	0.86	1.10	—	1.63
ThO ₂	13.60	12.47	14.21	13.26	20.06	16.81	18.37	5.44	18.33	21.39	16.51	15.35	13.45	7.28
SrO	—	0.65	—	1.58	—	—	—	0.84	—	1.49	—	1.32	—	0.52
UO ₂	1.66	1.27	2.25	0.53	4.73	4.24	5.84	1.37	6.56	3.99	5.12	3.96	1.91	2.12
Nb ₂ O ₅	30.48	27.45	30.30	32.10	23.61	21.51	24.34	27.05	21.19	17.23	22.34	20.13	31.94	11.39
TiO ₂	21.72	19.39	21.54	25.25	24.18	22.03	23.80	31.31	22.52	23.03	23.40	20.52	21.07	16.78
SiO ₂	0.69	0.73	—	2.53	0.61	1.11	0.48	0.80	0.80	5.43	0.74	2.73	0.64	3.14
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	0.96	0.81	0.93	0.63	—	—	—	0.70
Сумма	97.05	87.75	95.95	87.83	96.58	92.23	97.44	87.40	93.68	89.10	89.73	82.17	97.43	86.49

Эмпирические формулы

1	$[(\text{Ce}_{0.20}\text{Nd}_{0.09}\text{La}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{Sm}_{0.02})_{0.39}(\text{Th}_{0.20}\text{Ca}_{0.19}\text{Y}_{0.19}\text{U}_{0.02}\text{Pb}_{0.01})_{0.61}]_{1.00}(\text{Ti}_{1.02}\text{Nb}_{0.90}\text{Fe}_{0.08})_2\text{O}_6$
2	$[(\text{Ca}_{0.22}\text{Th}_{0.19}\text{Y}_{0.19}\text{Sr}_{0.03}\text{U}_{0.02}\text{Pb}_{0.01})_{0.66}(\text{Ce}_{0.17}\text{Nd}_{0.09}\text{La}_{0.05}\text{Sm}_{0.02}\text{Pr}_{0.01}\text{Eu}_{0.01})_{0.35}]_{1.01}(\text{Ti}_{0.99}\text{Nb}_{0.94}\text{Fe}_{0.07})_2\text{O}_6$
3	$[(\text{Th}_{0.23}\text{Y}_{0.20}\text{U}_{0.04}\text{Pb}_{0.02})_{0.49}(\text{Ce}_{0.21}\text{Nd}_{0.12}\text{La}_{0.08}\text{Sm}_{0.03}\text{Pr}_{0.03}\text{Gd}_{0.04})_{0.51}]_{1.00}(\text{Ti}_{1.05}\text{Nb}_{0.88}\text{Fe}_{0.07})_2\text{O}_6$
4	$(\text{Fe}_{0.49}\text{Th}_{0.18}\text{Si}_{0.15}\text{Ca}_{0.08}\text{Sr}_{0.05}\text{Pb}_{0.02}\text{Mn}_{0.01}\text{U}_{0.01})_{1.00}(\text{Ti}_{1.13}\text{Nb}_{0.87})_2(\text{O},\text{OH})_6$
5	$[(\text{Th}_{0.25}\text{Ca}_{0.19}\text{Y}_{0.14}\text{U}_{0.05}\text{Pb}_{0.01}\text{Pb}_{0.01})_{0.64}(\text{Ce}_{0.15}\text{Nd}_{0.09}\text{La}_{0.03}\text{Gd}_{0.02}\text{Sm}_{0.02}\text{Pr}_{0.02}\text{Dy}_{0.02}\text{Tb}_{0.01})_{0.36}]_{1.00}(\text{Ti}_{1.24}\text{Nb}_{0.75}\text{Fe}_{0.01})_2\text{O}_6$
6	$[(\text{Th}_{0.23}\text{Ca}_{0.18}\text{Y}_{0.14}\text{U}_{0.05})_{0.60}(\text{Ce}_{0.14}\text{Nd}_{0.10}\text{La}_{0.03}\text{Pr}_{0.03}\text{Gd}_{0.02}\text{Sm}_{0.02}\text{Dy}_{0.02}\text{Tb}_{0.01})_{0.37}]_{0.98}(\text{Ti}_{1.13}\text{Nb}_{0.75}\text{Si}_{0.08}\text{Al}_{0.03}\text{Fe}_{0.01})_2(\text{O},\text{OH})_6$
7	$[(\text{Th}_{0.22}\text{Y}_{0.19}\text{Ca}_{0.10}\text{U}_{0.08}\text{Pb}_{0.01})_{0.60}(\text{Ce}_{0.16}\text{Nd}_{0.09}\text{La}_{0.03}\text{Pr}_{0.02}\text{Sm}_{0.01})_{0.31}]_{0.91}(\text{Ti}_{1.11}\text{Nb}_{0.70}\text{Fe}_{0.09}\text{Al}_{0.07}\text{Si}_{0.03})_2(\text{O},\text{OH})_6$
8	$(\text{Fe}_{0.43}\text{Al}_{0.05}\text{Pb}_{0.05}\text{Sr}_{0.03}\text{V}_{0.02}\text{Ca}_{0.02}\text{Ce}_{0.01}\text{U}_{0.02})_{0.65}(\text{Ti}_{1.21}\text{Nb}_{0.60}\text{Ta}_{0.01}\text{Si}_{0.18})_2(\text{O},\text{OH})_6$
9	$[(\text{Th}_{0.27}\text{Ca}_{0.18}\text{Y}_{0.17}\text{U}_{0.09}\text{Pb}_{0.01})_{0.72}(\text{Ce}_{0.13}\text{Nd}_{0.07}\text{La}_{0.03}\text{Pr}_{0.01}\text{Sm}_{0.01})_{0.25}]_{0.97}(\text{Ti}_{1.09}\text{Nb}_{0.61}\text{Fe}_{0.19}\text{Al}_{0.07}\text{Si}_{0.05})_2(\text{O},\text{OH})_6$
10	$[(\text{Th}_{0.31}\text{Y}_{0.14}\text{Ca}_{0.11}\text{Sr}_{0.06}\text{U}_{0.06}\text{Al}_{0.05}\text{Fe}_{0.04}\text{Pb}_{0.02})_{\Sigma 0.79}(\text{Ce}_{0.07}\text{Nd}_{0.05}\text{La}_{0.02}\text{Sm}_{0.02}\text{Pr}_{0.01}\text{Eu}_{0.01})_{0.18}]_{0.97}(\text{Ti}_{1.13}\text{Nb}_{0.51}\text{Si}_{0.36})_2(\text{O},\text{OH})_6$
11	$[(\text{Th}_{0.26}\text{Y}_{0.18}\text{Ca}_{0.10}\text{U}_{0.08}\text{Pb}_{0.02})_{0.64}(\text{Ce}_{0.17}\text{Nd}_{0.09}\text{La}_{0.06})_{0.32}]_{0.96}(\text{Ti}_{1.19}\text{Nb}_{0.68}\text{Fe}_{0.09}\text{Si}_{0.04})_2(\text{O},\text{OH})_6$
12	$[(\text{Th}_{0.27}\text{Y}_{0.20}\text{Ca}_{0.13}\text{U}_{0.06}\text{Sr}_{0.06}\text{Fe}_{0.04}\text{Pb}_{0.02})_{0.78}(\text{Ce}_{0.15}\text{Nd}_{0.07}\text{Pr}_{0.02})_{0.24}]_{1.02}(\text{Ti}_{1.14}\text{Nb}_{0.66}\text{Si}_{0.20})_2(\text{O},\text{OH})_6$
13	$[(\text{Ce}_{0.20}\text{Nd}_{0.09}\text{La}_{0.06}\text{Pr}_{0.02}\text{Gd}_{0.03}\text{Sm}_{0.02})_{0.42}(\text{Th}_{0.19}\text{Ca}_{0.16}\text{U}_{0.03})_{0.38}]_{0.80}(\text{Ti}_{0.99}\text{Nb}_{0.92}\text{Fe}_{0.09})_2(\text{O},\text{OH})_6$
14	$(\text{Fe}_{0.79}\text{Al}_{0.04}\text{Th}_{0.08}\text{Pb}_{0.02}\text{Sr}_{0.01}\text{U}_{0.02}\text{Ca}_{0.02}\text{Ce}_{0.01})_{\Sigma 0.99}(\text{Fe}_{0.95}\text{Ti}_{0.63}\text{Nb}_{0.26}\text{Si}_{0.16})_{\Sigma 2}\text{O}_6$

Примечание. Ан. 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 – эшинит; 4, 8, 14 – «титаноколумбит». Анализы также включают (мас. %): 0.20 MnO (ан. 4); 0.47 Tb₂O₃ (ан. 6), 2.80 Ta₂O₅ (ан. 8) и 1.78 P₂O₅ (ан. 14).

Note. Analyses 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 – aeschynite; 4, 8, 14 are «titanocolumbite». The analyses also include (wt. %): 0.20 MnO (an. 4); 0.47 Tb₂O₃ (an. 6), 2.80 Ta₂O₅ (an. 8) and 1.78 P₂O₅ (an. 14).

Приведенные примеры показывают, что исходный состав метамиктного зерна эшинита в разных точках (элементах ростовой анатомии) отличается. Разный химический состав на разных участках поверхности исходного зерна и около разных трещин, возможно, указывает на некоторую разновремен-

ность появления микротрещин в эшините. Вместе с этим видны тенденции в изменении количества некоторых элементов: исчезают РЗЭ, существенно увеличивается содержание Fe. Заметно, что трещины сначала возникали внутри метамиктного тела и вокруг них развились в сечении округлые зональ-

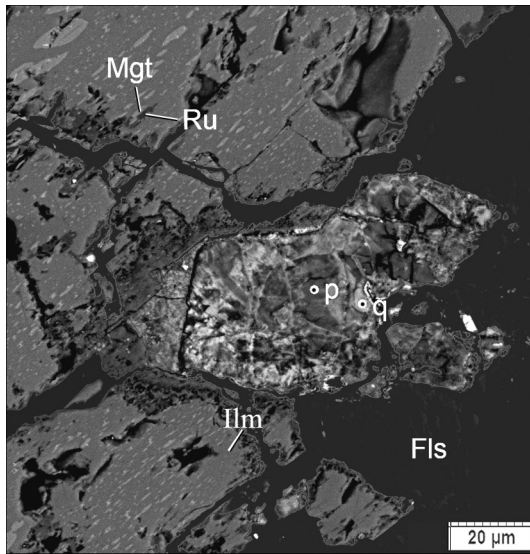


Рис. 7. Вросток «россовскиита» (p, q) в агрегате ориентированных сростаний ильменита, магнетита и рутила. BSE-фото.

Fig. 7. Ingrowth of «rossovskiite» (p, q) in oriented ilmenite-magnetite-rutile aggregate. BSE-image.

ные метасоматические текстуры. Следовательно, метамиктность (нанозернистость) возникла в эшинитах до метасоматических изменений.

Возникновение пористости при метасоматозе является обычным явлением и выглядит по-разному в зависимости от зернистости исходного агрегата. В титаномагнетит-ильменитовом сростании (рис. 2з, нижняя часть снимка) в процессе замещения возникла микропористость, а измененное в этом процессе зерно титанониобата (рис. 7, точка q) по составу приближенно рассчитывается на формулу россовскиита ($\text{Fe}^{3+}, \text{Ta})(\text{Nb}, \text{Ti})\text{O}_4$ (табл. 4). В парагенезисе с титаномагнетит-ильменитовыми синтаксическими сростками наблюдались и другие акцессорные минералы (рис. 8), состав которых условно (возможно, из-за мелких включений минералов) рассчитывается на формулы ишикаваита ($\text{U}, \text{Fe}, \text{Y})\text{NbO}_4$, манганоколумбита $\text{Mn}^{2+}\text{Nb}_2\text{O}_6$ и виджецита $(\text{Ca}, \text{Ce})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_2\text{O}_6$ (табл. 4).

Обсуждение результатов

Электронно-микроскопические исследования агрегатов пегматитовой жилы № 31 Вишневогорского щелочного комплекса выявили морфологические признаки синхронных и последовательных явлений, позволяющих наметить онтогенетическую модель минералообразования в жиле. Индукцион-

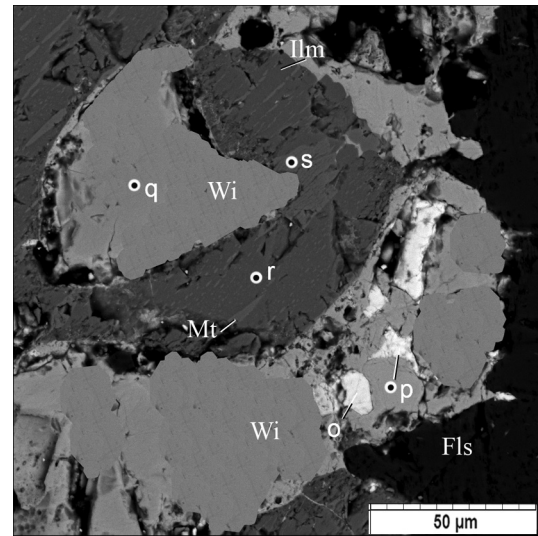


Рис. 8. Парагенезис «виджецита» Wi (q), «ишикаваита» (o) и «манганоколумбита» (p) с ильменитом Ilm (r) и титаномагнетитом Mt (s) в калиевом полевом шпате Fls. BSE-фото.

Fig. 8. Assemblage of «vigezzite» (q), «ishikawaite» (o) and «manganocolumbite» (p) with ilmenite (r) and titanomagnetite Mt (s) in K-feldspar. BSE-image.

ные поверхности между всеми минералами, включая полевые шпаты, указывают на их совместный одновременный рост. Небольшая величина индивидов акцессорных минералов указывает только на частичный одновременный рост их с крупными индивидами полевых шпатов (в поздних зонах роста?). Индукционные поверхности между индивидами мусковита и полевого шпата говорят об их сокристаллизации, т. е. об отсутствии мусковитизации (грейзенизации).

В процессах сокристаллизации выявленных минералов интересны явления синтаксии между ильменитом, титаномагнетитом, колумбитом и мусковитом (иногда и с рутилом). Ориентированные сростания титаномагнетита с ильменитом ранее рассматривались в модели распада твердого раствора (Рамдор, 1962; и др.). Однако индукционные поверхности между минералами указывают на сокристаллизацию, подобно синтаксическим пертитам полевых шпатов (Попов, 2018).

Возникновение округлых метасоматических текстур требует микро- и нанозернистости исходного минерального агрегата (эдукта), что было показано ранее на примере некоторых яшм и скарнов (Попов, 2020). Здесь это явление ярко демонстрируют метасоматические изменения в индивидах эшинита, в онтогенезе которых метамиктность (нанозернистость) должна была появиться до метасо-

Таблица 4

Состав некоторых аксессуарных минералов из парагенезиса с титаномагнетит-ильменитовыми сростками (мас. %)

Table 4

Composition of some accessory minerals from assemblage with titanomagnetite-ilmenite aggregates (wt. %)

№ п/п	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	UO ₂	CaO	Ce ₂ O ₃	PbO	ThO ₂	Ta ₂ O ₅	MnO	Сумма
1	27.41	25.18	27.02	2.97	1.10	1.06	0.26	0.29	2.12	1.84	—	0.47	89.73
2	25.72	5.48	1.76	2.56	1.08	43.96	1.30	0.48	1.00	1.77	—	—	88.80
3	68.45	5.17	9.68	0.67	0.53	0.58	—	—	—	—	1.74	10.1	99.08
4	50.03	10.32	3.32	6.50	0.44	2.90	7.26	1.80	—	3.91	1.13	—	91.01
Эмпирические формулы													
1	(Fe _{0.79} Si _{0.11} Al _{0.04} Pb _{0.02} Mn _{0.01} Ca _{0.01} Th _{0.01} U _{0.01}) ₁ (Ti _{0.60} Nb _{0.40}) ₁ O ₄												
2	(U _{1.06} P _{0.21} K _{0.17} Fe _{0.16} Ca _{0.15} Al _{0.12} Na _{0.05} Th _{0.04} Ce _{0.02} Pb _{0.02}) ₂ (Nb _{1.26} Ti _{0.46} Si _{0.28}) ₂ O ₈												
3	(Mn _{0.49} Fe _{0.45} Sc _{0.02} Al _{0.03} U _{0.01}) ₁ (Nb _{1.71} Ti _{0.22} Si _{0.04} Ta _{0.03} W _{0.02}) ₂ O ₆												
4	(Ca _{0.45} Si _{0.28} Sr _{0.11} Th _{0.05} U _{0.04} Ce _{0.04} Al _{0.03}) ₁ (Nb _{1.29} Ti _{0.44} Fe _{0.16} Si _{0.09} Ta _{0.02}) ₂ O ₆												

Примечание. Минералы: 1 – «россовскиит» (расчет на два катиона), 2 – «ишикаваит», 3 – манганоколумбит, 4 – «виджецит». «Ишикаваит» также содержит 2.26 мас. % P₂O₅, 1.21 мас. % K₂O и 0.22 мас. % Na₂O; манганоколумбит – 0.50 мас. % Sc₂O₃ и 1.66 мас. % WO₃; «виджецит» – 3.38 мас. % SrO.

Note. Minerals: 1 – «rossovskyite» (calculation for two cations); 2 – «ishikawaite»; 3 – manganocolumbite; 4 – «vigezzite». «Ishikawaite» also contains 2.26 wt. % P₂O₅, 1.21 wt. % K₂O and 0.22 wt. % Na₂O; manganocolumbite – 0.50 wt. % Sc₂O₃ and 1.66 wt. % WO₃; «vigezzite» – 3.38 wt. % SrO.

матоза. Некоторое различие состава и количества метасоматически измененных зон возле разных трещин и поверхности кристалла эшинита говорит о последовательном развитии трещинной системы с изменением состава растворов во времени. Собственно метасоматоз увеличивает пористость минерального тела по-разному в зависимости от состава и структуры его и от развития трещинной системы. Возникновение пор особенно наглядно в нашем случае видно на примере ильменита. Микропоры около трещин в мусковит-ильменитовых сростаниях находятся там же в пространстве, где видны изменения в эшините. Это позволяет предположить, что относительный «возраст» изменения этих минералов один и тот же, особенно, если учесть увеличение содержаний Fe и Si в метасоматически измененном эшините, которые могут появиться в растворе при растворении (появлении пор) соседних ильменита и мусковита.

Состав метасоматически измененного эшинита сложно диагностировать вследствие наноразмерности зерен и наноразмерности пор. Возникли мелкие и рентгеноаморфные метасоматические тела. Для сравнения химический состав этих тел можно выразить через формулы минеральных смесей (пород). Лишь в некоторых случаях химический состав продуктов изменения дает предположительную диагностику по соотношению формульных коэффициентов в минерале.

Таким образом, к онтогенезу эшинита в пегматитовой полевошпатовой жиле № 31 Вишнёвогорского щелочного комплекса следует отнести следующие явления:

1) Эшинит образовался в последние моменты кристаллизации полевых шпатов синхронно с ильменитом, титаномагнетитом, мусковитом, рутилом, цирконом, торитом, монацитом – это парагенезис (эвтектика).

2) При последующем понижении температуры из всех минералов парагенезиса только (?) у эшинита произошел метамиктный распад вследствие сложного химического состава и напряжений в структуре из-за резкого различия «атомных радиусов» элементов.

3) После метамиктизации в индивидах эшинита последовательно происходили метасоматические явления и возникновение нанопористости в соответствии с развивающейся трещинной системой. При этом в парагенном ильмените возникла микропористость, а в цирконе образовались трещины, возле которых не замечено никаких преобразований. Параллельно с развитием трещинной системы в ней изменялся раствор, что отразилось на составе и количестве зон в метасоматитах по эшиниту.

Авторы благодарны А.М. Кузнецову за предоставленную для исследований коллекцию образцов из пегматитовой жилы № 31 Вишнёвых гор.

Литература

Попов В.А. (2018) Морфологические заметки об амазоните. *Минералогия*, 4(1), 45–54.

Попов В.А. (2020) О текстурах уральских яшм. *Двадцать первые Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В.О. Полякова*. Миасс: ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 118–124.

Попова В.И., Попов В.А., Макагонов Е.П., Никандров С.Н., Касаткин А.В., Кузнецов А.М. (2021) Минералы Вишнёвых гор. *Минералогический альманах*, 25(3), 128 с.

Рамдор П. (1962) Рудные минералы и их сростания. М., Иностранная литература, 1132 с.

References

Popov V.A. (2018) [Morphological notes on amazonite]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, 4(1), 45–54. (in Russian)

Popov V.A. (2020) [Textures of Uralian jaspers]. *Dvadsat pervye Vserossiyskie nauchnye chteniya pamyati ilmenskogo mineraloga V.O. Polyakova [Twenty First All-Russian Scientific Meeting in Memory of Ilmeny Mineralogist V.O. Polyakov]*. Miass: IMin YuU FNTs MiG UrO RAN, 118–124. (in Russian)

Popova V.I., Popov V.A., Makagonov E.P., Nikandrov S.N., Kasatkin A.V., Kuznetsov A.M. (2021) [Minerals of Vishnevye Mountains]. *Mineralogicheskyy almanakh [Mineralogical Almanac]*, 25(3), 128 p. (in Russian)

Ramdohr P. (1962) [Ore minerals and their aggregates]. Moscow, Inostrannaya literatura, 1132 p.