

Редкометалльные аляскиты массива Маньхамбо (Северный Урал): U-Pb (SIMS) данные и изотопно-геохимические характеристики

О. В. Удоратина, А. С. Шуйский

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина
Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
г. Сыктывкар
udoratina@geo.komisc.ru

Аннотация

Исследование посвящено редкометалльным аляскитам, обнаруженным в составе гранитоидного массива Маньхамбо (Северный Урал).

Проведены петрографо-минералогические и петро-геохимические исследования. Возраст определен U-Pb методом (SIMS) по единичным цирконам, изотопный состав Hf – LA ICP MS.

Высокодифференцированные аляскиты (Zr/Hf<25) сформированы во внутриплитной обстановке. Характерны повышенные содержания Ga, Nb, Ta, Th, HREE, низкие – Zr/Hf, Nb/Ta, Y/Ho. Выявлена сингенетичная редкометалльная минерализация (фергусонит, эшинит, Nb-Ta-титанит, браннерит). Выделены три типа цирконов: ксеногенные (527–512 и 1479 млн лет) и «сетчатые», «пористые» (337,6±7,3 млн лет). Для них типичны низкие Th/U, аномалии La в спектрах РЗЭ, указывающие на флюидное воздействие. Точки составов цирконов находятся вне магматических/гидротермальных полей, что связано либо с нарушением U-Pb системы, либо с особенностью редкометалльных расплавов. Температура кристаллизации пород – 790–677 °С. Положительные значения εHf(t) (+0,38...+6,8) свидетельствуют об ювенильном мантийном источнике. Модельный возраст TDM₂ (1,11–0,82 млрд лет) отражает участие древнего материала в плавлении.

Аляскиты массива Маньхамбо представляют поздний импульс расплава из глубинного ювенильного источника, не связанного с основным этапом формирования массива Маньхамбо. Их кристаллизация из фракционированных расплавов в верхнекоровых очагах обусловила уникальную минералогию и геохимию. По установленному возрасту относится к понинскому щелочному гипабиссальному комплексу C₃-Ppn.

Ключевые слова:

циркон, аляскиты, редкометалльно-редкоземельная минерализация, Северный Урал

Rare-metal alaskites of the Mankhambo massif (Northern Urals): U-Pb (SIMS) data and isotope-geochemical characteristics

O. V. Udoratina, A. S. Shuisky

Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar
udoratina@geo.komisc.ru

Abstract

The study focuses on rare-metal alaskites discovered within the Mankhambo granitoid massif (Northern Urals).

Petrographic-mineralogical and petro-geochemical analyses were conducted. The crystallization age was determined using U-Pb dating (SIMS) on single zircons; the Hf isotopic composition was analysed by LA ICP MS.

The rocks are highly differentiated alaskites (Zr/Hf<25), formed in an intraplate geodynamic setting. They exhibit elevated concentrations of Ga, Nb, Ta, Th, HREE along with low Zr/Hf, Nb/Ta, Y/Ho ratios. Singenetic rare-metal mineralization (fergusonite, aeschynite, Nb-Ta-bearing titanite, brannerite) was identified. Three zircon types were identified: xenogenic (527–512 Ma and 1479 Ma); 'reticulate' and 'porous' (337.6±7.3 Ma) crystals. The latter show low Th/U ratios, La anomalies in REE patterns indicating the Earth's fluid activity. The composition points of zircons are located outside the magmatic/hydrothermal fields, which is related either to the disturbance of the U-Pb system or to the specificity of rare-metal melts. The crystallization temperature of rocks ranges from 790 to 677 °C. Positive εHf(t) values (from +0.38 to +6.8) indicate a juvenile mantle source. The TDM₂ model age (1.11–0.82 Ga) means the involvement of ancient crustal material in melt generation.

The Mankhambo alaskites represent a late-stage pulse of granitic melt derived from a deep juvenile source, which is genetically distinct from the main magmatic phase of the massif. Their crystallization from highly fractionated melts in upper-crustal chambers resulted in unique mineralogical and geochemical features. By the estimated age, the alaskites belong to the Ponino alkaline hypabyssal complex C₃-Ppn.

Keywords:

zircon, alaskites, rare-metal-rare-earth mineralization, Northern Urals

Введение

На севере Урала крупнейшими гранитными массивами являются Маньхамбовский и Ильяизский, слагающие ядро Маньхамбовского блока (рис. 1 а-в). Породы массивов выведены на поверхность на Северном Урале в поле распространения доуралид (протоуралид, тиманид) Ляпинско-Кутимского мегаантиклинория Центрально-Уральского поднятия. Гранитоиды отнесены к сальне-ро-маньхамбовскому комплексу, Маньхамбовский массив является одним из его петротипов [4].

Гранитные массивы сближены в пространстве, обладают большим сходством минерального и химического составов слагающих их пород и имеют двухфазное строение. Первая фаза представлена гранитами и лейкогранитами (подчиненную роль имеют кварцевые диориты и гранодиориты (гибридной фации)). Вторая фаза – лей-

кограниты и аляскиты. Жильную серию слагают аплитовидные граниты, аплиты, реже – пегматиты.

Породы относятся к семействам гранитов, лейкогранитов умеренно-щелочного ряда. Наблюдаемые постепенные переходы не позволяют отнести породы к разным сериям. Биотитовые граниты относятся к I-типу, лейкограниты – к А-типу. Геохимическая типизация гранитоидов (используемая при геодинамических реконструкциях) неоднозначна, часть точек составов попадает в поле внутримпактных образований, часть – в поле позднеколлизонных и постколлизонных [5–7].

Формирование пород массивов, согласно полученным нами в последнее десятилетие данным (U-Pb, SIMS), по единичным зернам цирконов [8 и ссылки в этой работе] происходило в течение среднего-позднего кембрия. Близ субсинхронное формирование гранитоидов Ильяизского массива (I-тип, 520–500 млн лет) и гранитоидов Маньхамбовского массива (А-тип, 520–510 млн лет).

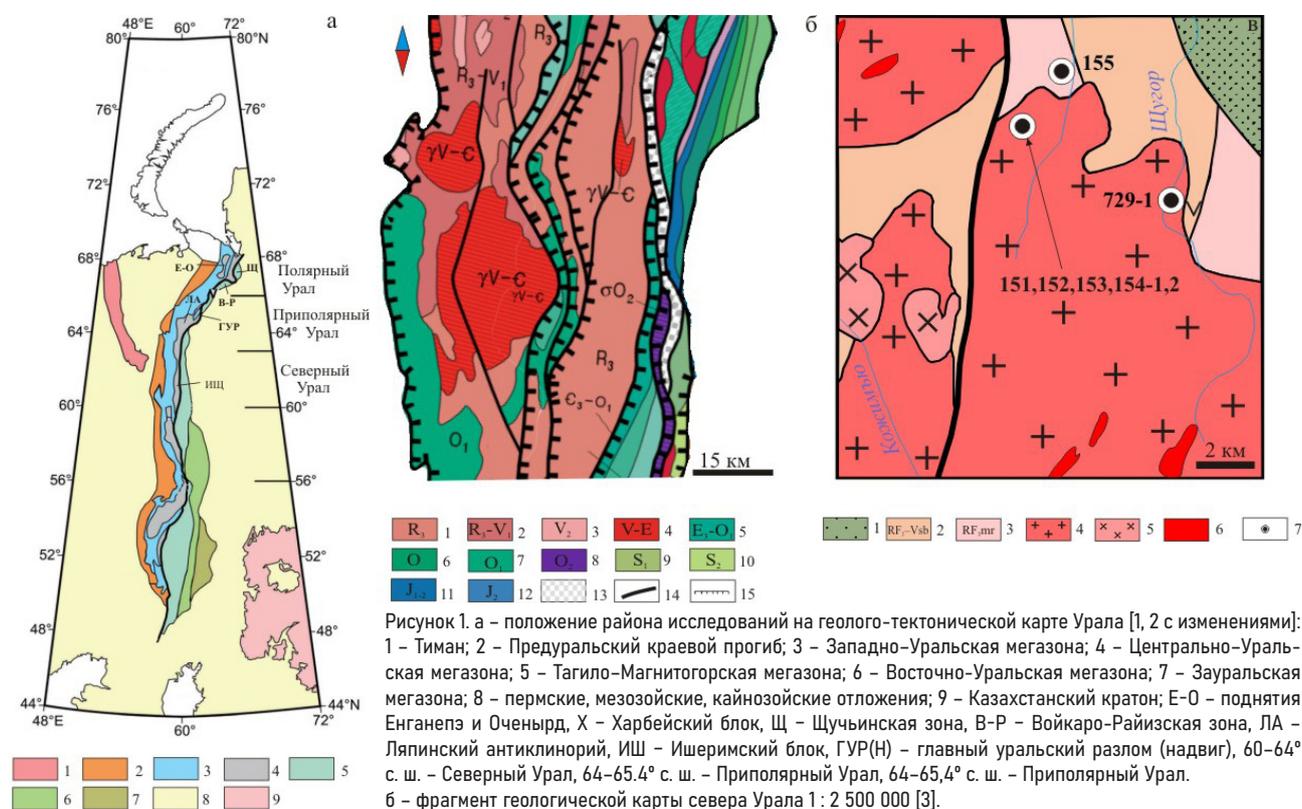


Рисунок 1. а – положение района исследований на геолого-тектонической карте Урала [1, 2 с изменениями]: 1 – Тиман; 2 – Предуральский краевой прогиб; 3 – Западно-Уральская мегазона; 4 – Центрально-Уральская мегазона; 5 – Тагил-Магнитогорская мегазона; 6 – Восточно-Уральская мегазона; 7 – Зауральская мегазона; 8 – пермские, мезозойские, кайнозойские отложения; 9 – Казахстанский кратон; E-O – поднятия Енганепэ и Оченырда, X – Харбейский блок, Щ – Щучьинская зона, В-Р – Войкаро-Райизская зона, ЛА – Ляпинский антиклинорий, ИШ – Ишеримский блок, ГУР(Н) – главный уральский разлом (надвиг), 60–64° с. ш. – Северный Урал, 64–65.4° с. ш. – Приполярный Урал, 64–65.4° с. ш. – Приполярный Урал. б – фрагмент геологической карты севера Урала 1 : 2 500 000 [3].

Условные обозначения: 1 – верхний рифей; 2 – верхний рифей – нижний венд; 3 – венд; 4 – граниты, плагиограниты, кварцевые диориты; 5 – верхний кембрий – нижний ордовик; 6 – ордовик; 7 – нижний ордовик; 8 – перидотиты и дуниты; 9 – нижний силур; 10 – верхний силур; 11 – нижняя-средняя юра; 12 – средняя юра; 13 – меланж тектонический; 14 – геологические границы; 15 – ГУР.

в – северо-восточное окончание массива Маньхамбо (верховье р. Шугур): 1 – терригенные толщи с базальными конгломератами в основании (обеизская свита E_3-O_2ob); 2 – преимущественно вулканиты основного и кислого составов саблегорской свиты (RF_3-Vsb); 3 – преимущественно сланцевые толщи мороинской свиты (Rf_3mr); 4 – граниты I фазы; 5 – гранодиориты I фазы; 6 – лейкограниты, аляскиты II фазы; 7 – точки отбора проб.

Figure 1. а – location of the study area on the geological-tectonic map of the Urals [1, 2 with changes]: 1 – Timan; 2 – Pre-Ural Foredeep; 3 – West-Ural Megazone; 4 – Central-Ural Megazone; 5 – Tagil-Magnitogorsk Megazone; 6 – East-Ural Megazone; 7 – Trans-Ural Megazone; 8 – Permian, Mesozoic, and Cenozoic deposits; 9 – Kazakhstan Craton; E-O – Enganepe and Ochenyrda uplifts, X – Kharbey Block, Щ – Shchuchya Zone, В-Р – Voykaro-Raiz Zone, ЛА – Lyapin Anticlinorium, ИШ – Isherim Block, ГУР(Н) – Main Ural Fault (thrust fault), 60–64° N – Northern Urals, 64–65.4° N – Subpolar Urals, 64–65.4° N – Subpolar Urals. б – fragment of the geological map of the Northern Urals, scale 1:2,500,000 [3].

Keys: 1 – Upper Riphean; 2 – Upper Riphean – Lower Vendian; 3 – Vendian; 4 – granites, plagiogranites, quartz diorites; 5 – Upper Cambrian – Lower Ordovician; 6 – Ordovician; 7 – Lower Ordovician; 8 – peridotites and dunites; 9 – Lower Silurian; 10 – Upper Silurian; 11 – Lower-Middle Jurassic; 12 – Middle Jurassic; 13 – tectonic mélange; 14 – geological boundaries; 15 – Main Ural Fault.

в – north-eastern end of the Mankhambo massif (upper reaches of the Shchugor River): 1 – terrigenous strata with basal conglomerates at the base (Obeiz suite E_3-O_2ob); 2 – predominantly basic and felsic vulcanites of the Sablegorsk suite (RF_3-Vsb); 3 – predominantly shale strata of the Moroinsk suite (Rf_3mr); 4 – phase I granites; 5 – phase I granodiorites; 6 – leucogranites, phase II alaskites; 7 – sampling points.

Породы массивов контактируют с образованиями верхнего рифея-венда и перекрываются осадочными отложениями неопределенного возраста, контакты частичные тектонические, но наблюдаются и интрузивные [9–15].

Возраст палеонтологически «немых» терригенных отложений, перекрывающих Маньхамбовский массив и вмещающих комплексное редкоземельно-уран-торий-редкометалльное оруденение, является раннеордовикским (U-Pb, LA-ICP-MS) [11, 16, 17]. По другим данным датирования циркона методами U-Pb (TIMS) и LA-ICP-MS, возраст Маньхамбовского массива более древний (среднерифейский), а Ильязского – более молодой [13, 18]. При этом предполагается, что более поздние ильязские граниты могли снивелировать первичные изотопные характеристики маньхамбовских.

В пределах массива Маньхамбо А. В. Калиновским обнаружены редкометалльные субщелочные флюорит-содержащие аляскиты [19, с. 9]. Нами получены новые данные: о составе минералов, слагающих аляскиты, петро-геохимические характеристики, геохронологические и изотопно-геохимические.

Материалы и методы

Для изучения использовались образцы и пробы из коллекции А. В. Калиновского (Каменный архив ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Исследования проведены в ЦКП «Геонаука» г. Сыктывкара: петрографические (Olympus BX51), микронзондовые (сканирующий микроскоп Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсным спектрометром X-Max). Содержания петрогенных оксидов получены классическим химическим методом, F, Be, Pb, Ga, V, Y, Li, Nb – количественным спектральным анализом. Концентрации редких, рассеянных и редкоземельных элементов определены методом нейтронной-активации (La, Ce, Pr*, Nd, Sm, Eu, Gd*, Tb, Dy*, Ho*, Er*, Tm*, Yb, Lu, Rb, Sr, Ba, Sc, Cr, Ni, Zn, Se, As, Sb, Th, U, Br, Hf, Ta, Zr, Au, Li) и рентгено-радиометрическим (Nb, Rb, Ta, Y, Zr) методом в ГЕОХИ РАН (г. Москва).

Монофракции циркона были помещены в эпоксидную шашку вместе со стандартами. Методика исследований описана в работе [20]. Определения возраста кристаллов циркона (U-Pb SIMS) проведены в Стэнфордском университете, США, (SHRIMP RG). Катодолюминесцентные изображения кристаллов циркона получены там же.

Изотопный состав Lu-Hf в продатированных кристаллах циркона определен в Институте геологии и минеральных ресурсов (г. Тяньцзинь, Китай) по методике, согласно работе [21].

Результаты и их обсуждение

Геологическое положение участка работ

Предшественниками (М. В. Фишманом, Б. А. Голдиным, Н. П. Юшкиным, Е. П. Калининым и др. [22]) отмечалось наличие в лейкогранитах зон щелочного метасоматоза, маркируемых флюоритом. А. В. Калиновским в составе крупнейшего на севере Урала гранитоидного массива Маньхамбо описаны субщелочные аляскиты, устойчиво

содержащие тонко рассеянные тантало-ниобаты и флюорит [19, с. 9]. Им же обнаружено крупное, более 1,5 км по простиранию, тело аляскитов с постоянным присутствием сингенетичных фергусонита и флюорита.

Обнаруженные и опробованные участки, массив Маньхамбо:

1. Северная часть (г. Понъя-Из, обр. 151-154-2),
2. Северный склон г. Понъя-Из среди метаморфитов маньинской свиты (обр. 155),
3. Северо-восточная часть (верховья р. Щугор), обр. 729-1 (см. рис. 1 в).

Аляскиты наблюдаются в элювиальных развалах, образующих изолированные поля изометричной и вытянутой (дайкообразной) формы. Опробованные породы розовато-белого цвета преимущественно мелкозернистые, массивные. Породы имеют кварц-микроклин-альбитовый состав.

Петрография и минералогия

На разных участках породы имеют неодинаковую сохранность. Под микроскопом наблюдается катаклиз с сохранением на участках гранитной структуры и интенсивная грейзенизация в породах 1 и 2 участков, характерно низкое количество плагиоклаза (альбита), наблюдается развитие микроклина двух генераций и окварцевание с флюоритизацией. Минеральный состав, (об. %): калиевый полевой шпат (микроклин) – 45–55, кварц – 30–45, плагиоклаз (альбит (Al_0)) – 5–10, слюда (ферроалюмоселадонит) 3–5, кальцит. Акцессорные минералы – алланит, апатит, монацит, циркон, торит, карбонаты тория, титанит (Nb-Ta содержащий), эшинит (эшинит-Th), наблюдаются фергусонит, в том числе (фергусонит-Yb), колумбит, флюорит. Рудные минералы – титаномагнетит, ильменит и гематит. Вторичные минералы представлены альбитом, серицитом, хлоритом (диабантитом). Несмотря на развитие позднего альбита, увеличения содержания натрия не отмечено, но проявлено позднее окварцевание.

По данным микронзондового анализа в пертитовом калиевом полево шпате, содержание Na_2O составляет 0,32–0,43 мас. %. Слюда представлена ферроалюмоселадонитом. Кальцит в породе аллотриоморфнозернистый, поздний.

Минералы редких, редкоземельных и радиоактивных элементов образуют тонко распыленную вкрапленность (рис. 2 а). Они представлены выделениями различного размера оксидов железа, Ta-Nb содержащего титанита ассоциирующего с фергусонитом, алланитом, монацитом, цирконом, эшинитом (эшинитом (Th)) и браннеритом (рис. 2).

Эшинит и эшинит (Th) образуют выделения неправильной формы размером до 500 мкм в тесном сростании с Nb-Ta содержащим титанитом и браннеритом (рис. 2 б, в, е; рис. 3, а). В составе эшинита содержание (мас. %) Nb_2O_5 и ThO_2 достигает 20 и 9 соответственно (табл. 1). В эшините (Th) концентрации (мас. %) Nb_2O_5 составляют 9–14, а ThO_2 возрастают до 20–40. Присутствующие в эшините примеси Se_2O_3 , Ta_2O_5 , PbO_2 , UO_2 в эшините (Th) не наблюдаются.

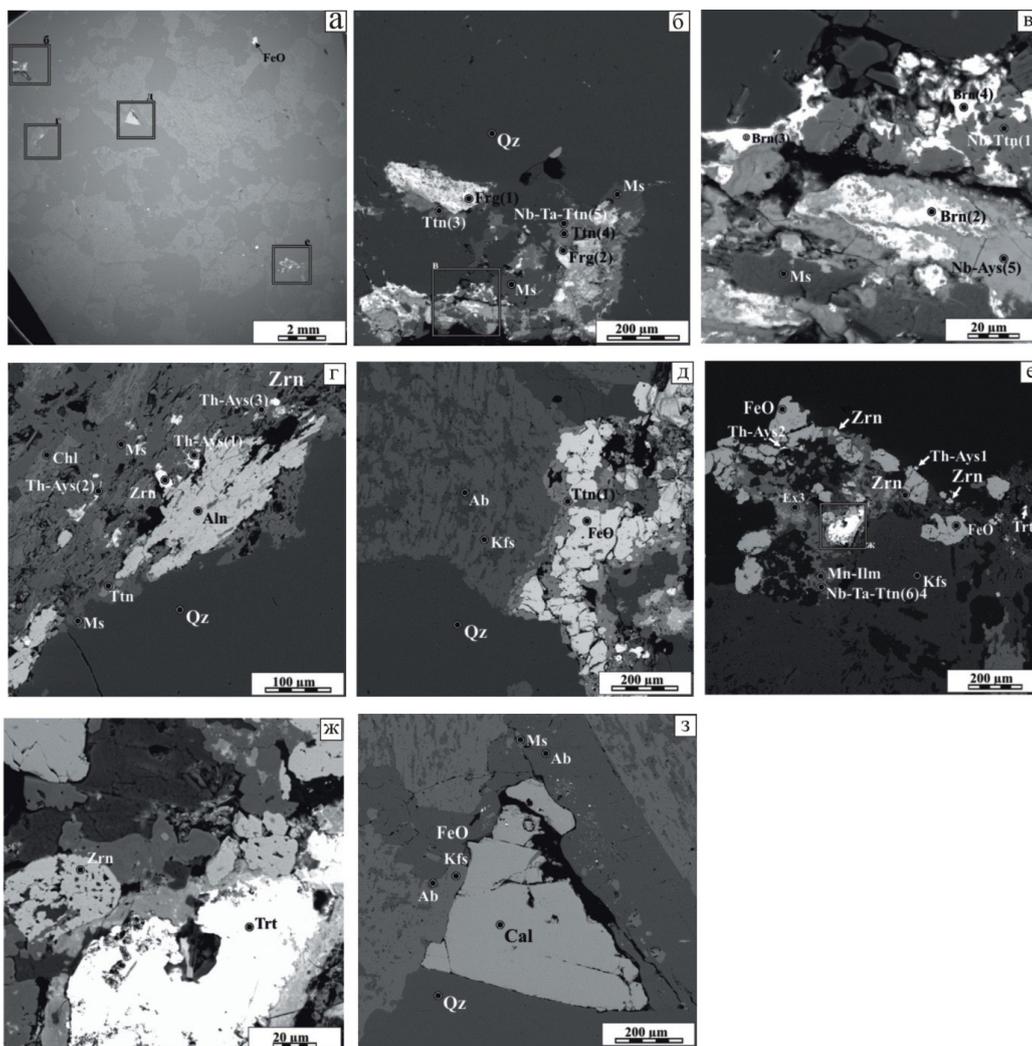


Рисунок 2. Формы выделения редкометалльных, редкоземельных и радиоактивных минералов в редкометалльных аляскитах (обр. 729-1): а – общий вид породы, ненарушенная магматическая микроструктура, рассеянное распределение рудных аксессуарных минералов; б – сросток (агрегат) титанита (Nb-Ta содержащего титанита) и фергусонита с мусковитом (в – увеличенный фрагмент); г – алланит, эшинит (и эшинит (Th)), циркон в сростках с мусковитом и хлоритом; д – сросток Nb-Ta содержащего титанита и оксидов железа; е – сросток циркона, торита, эшинита (Th), Nb-Ta содержащего титанита, Mn-ильменитом и оксидами железа (ж – увеличенный фрагмент, «ажурный», «сетчатый», «пористый» циркон); з – аллотриаморфозернистый кальцит в граните.

Figure 2. Forms of release of rare-metal, rare-earth and radioactive minerals in rare-metal alaskites (sample 729-1): а – general appearance of the rock, undisturbed magmatic microstructure, scattered distribution of ore accessory minerals; б – intergrowth (aggregate) of titanite (Nb-Ta containing titanite) and fergusonite with muscovite (в – enlarged fragment); г – allanite, aeschynite (and aeschynite (Th)), zircon in intergrowths with muscovite and chlorite; д – intergrowth of Nb-Ta-containing titanite and iron oxides; е – intergrowth of zircon, thorite, aeschynite (Th), Nb-Ta-containing titanite with Mn-ilmenite and iron oxides (ж – enlarged fragment, 'lacy', 'reticulate', 'porous' zircon); з – allotriomorphic granular calcite in granite.

Ta-Nb содержащий титанит присутствует в виде агрегатов неправильной формы в тесной ассоциации с минералами Y, Th, U, фергусонитом, браннеритом, Th-эшинитом. Титанит (размером первые десятки мкм до первых сотен мкм) является наиболее ранним кристаллизующимся минералом либо присутствует в каймах оксидов железа (рис. 2, б, в, д). В нем отмечаются примеси (мас. %) Nb_2O_5 (0,98–3,43), Ta_2O_5 (2–8), Al_2O_3 (5,28–6,16), FeO (0,84–2,29) (рис. 3 б).

Алланит наблюдается в виде лучистых агрегатов размером до 100–400 мкм, ассоциирующих с цирконом, Nb-Ta содержащим титанитом, эшинитом (Th) (рис. 2 г), содержание РЗЭ_(La+Ce+Nd) составляет 19 мас. %.

Фергусонит отмечается в скоплениях рудных минералов Nb-Ta содержащего титанита, эшинита (и эшинита

(Th)) в виде неправильной формы неоднородных агрегатов размером 200–300 мкм (рис. 2 б). Содержание Nb_2O_5 составляет 47 мас. %, а Y_2O_3 от 28 до 29 мас. % (табл. 2). Сумма тяжелых РЗЭ (Gd+Dy+Er+Yb) находится в узком диапазоне 10–11 мас. % (рис. 3 в).

Браннерит размером от первых мкм до 60 мкм наблюдается в тесном сростании с Nb-Ta содержащим титанитом и эшинитом (Th) (рис. 2, б, в). Содержание UO_2 находится на уровне 52–53 мас. %, Nb_2O_5 22–24 мас. %, PbO_2 2,5–2,75 мас. % (табл. 2).

В породе наблюдается развитие циркона двух типов (1), призматические кристаллы размером 10–50 – 100 мкм и (2) неправильной нередко округлой формы «ажурного», «сетчатого», «пористого» циркона (до 50–60 мкм) в ассоциации с торитом (до 100 мкм) (рис. 2 ж). Показательно

Химический состав (мас. %) эшинита
Chemical composition (wt. %) of aeschynite

Таблица 1
Table 1

Компоненты Рис. 2, № фото, (т.н.)	Эшинит(Th)					
	б, с (5)	г (1)	г (2)	г (3)	г (4)	г (5)
SiO ₂	5,91	8,45	10,79	6,46	5,48	6,78
TiO ₂	5,04	3,16	2,13	2,7	9,06	11,91
Al ₂ O ₃	1,23	2,86	3,39	1,71	1	1,73
Cr ₂ O ₃	0,48	-	0,37	0,45	0,46	-
Fe ₂ O ₃	4,99	7,93	11,43	7,06	7,59	3,57
MgO	-	-	-	0,3	-	-
CaO	0,59	0,72	0,69	0,81	0,75	-
Na ₂ O	-	0,83	1,25	0,64	0,78	-
K ₂ O	-	0,84	0,67	-	-	-
P ₂ O ₅	4,75	6,74	5,66	6,35	8,39	9,63
Nb ₂ O ₅	19,97	13,72	11,72	14,03	9,02	11,11
Ce ₂ O ₃	0,84	-	-	-	-	-
Ta ₂ O ₅	4,08	-	-	-	-	-
PbO ₂	5,87	-	-	-	-	-
ThO ₂	9,76	26,75	20,48	26,66	31,83	39,58
UO ₂	1,99	-	-	-	-	-
Формульные коэффициенты						
Si	0,41	0,53	0,62	0,47	0,36	0,40
Ti	0,26	0,15	0,09	0,15	0,45	0,53
Al	0,10	0,21	0,23	0,15	0,08	0,12
Cr	0,03	-	0,03	0,03	0,03	-
Fe	0,26	0,37	0,49	0,39	0,38	0,16
Mg	-	-	-	0,03	-	-
Ca	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05	-
Na	-	0,10	0,14	0,09	0,10	-
K	-	0,03	0,02	-	-	-
P	0,28	0,36	0,27	0,39	0,47	0,48
Nb	0,62	0,39	0,30	0,46	0,27	0,30
Ce	0,02	-	-	-	-	-
Ta	0,08	-	-	-	-	-
Pb	0,11	-	-	-	-	-
Th	0,15	0,38	0,27	0,44	0,48	0,54
U	0,03	-	-	-	-	-

Примечание. Здесь и далее «-» – не определено.
Note. Hereinafter “-” – not determined.

положение позднего по образованию, но не вторичного кальцита, имеющего аллотриоморфозернистые формы выделения в породе (рис. 2 э).

Петро-геохимическая характеристика

Исследуемые породы – аляскиты кислые и ультракислые плутонические породы, умереннощелочного подотряда, калиево-натриевого типа щелочности [23]. Содержания (мас. %) кремнезема в них составляет 77–82, глинозема – 9,15–12,41, (Na₂O+K₂O) 6,38–9,30, при преобладании оксида калия (Na₂O+K₂O) 0,7–1,04 (табл. 3, рис. 4 а–д). Содержания TiO₂ (0–1,12) и суммарного железа FeO+Fe₂O₃ (0,68–1,09).

В распределении несовместимых элементов обращают внимание высокие Ni (130–960 г/т) и в то же время низкие Cr (1,25–19,7 г/т) содержания (табл. 4). Породы обеднены литофильными элементами (г/т) Sr (10–195), Ba (369–480, за исключением одного значения), Rb (45–114, за исключением одного значения). Отмечается резкое обогащение Nb (41–110 г/т), Ta (4,9–11,6 г/т), Th (28–88 г/т) и истощение Zr (25–105 г/т).

Аляскиты имеют невысокие содержания РЗЭ (<130 г/т) с подковообразными спектрами распределения и слабым фракционированием легких и тяжелых РЗЭ (La/Yb)_N – 1,5–3,8. Отмечаются глубокие отрицательные Eu аномалии (Eu/Eu* = 0,01–0,27) (табл. 4, рис. 4 е). Мультиспектры нормированных на примитивную мантию значений демонстрируют преобладание крупноионных элементов над высокозарядными (рис. 4 ж).

Изученные породы обладают рядом геохимических особенностей, указывающих на дифференцированность гранитного расплава: высокие содержания Ga, Nb, Ta, Th, HREE, низкие значения Zr/Hf (2,66–6,21), Nb/Ta (3,90–11,02), Y/No (11,80–23,77), табл. 4 [26, 27].

Точки составов на диаграммах, применяемых для реконструкции геодинамических условий формирования пород, группируются в полях внутриплитных образований (рис. 4 з–и).

Температуры формирования пород, рассчитанные по параметру М [28], составили 790–677° С (табл. 3).

Изотопно-геохронологическая характеристика

Был определен U-Pb возраст цирконов из этих пород, для 11 кристаллов получено 12 значений (табл. 5). Цирконы

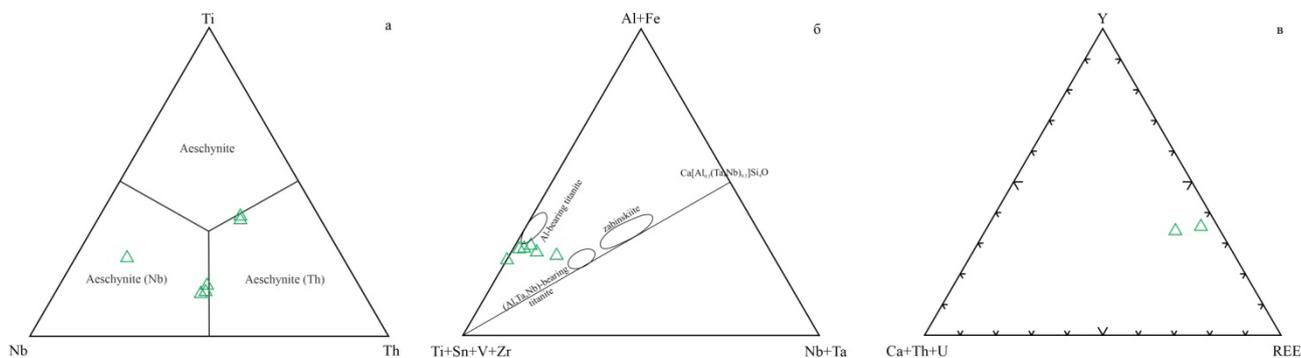


Рисунок 3. Классификационные диаграммы Nb-Ti-Ta для эшинита (а); (Ti+Sn+V+Zr)-(Al+Fe)-(Nb+Ta) для титанита (б); (Ca+Th+U)-Y-REE для фергусонита (в).

Figure 3. Classification diagrams: а) Nb-Ti-Ta for aeschynite; б) (Ti+Sn+V+Zr)-(Al+Fe)-(Nb+Ta) for titanite; в) (Ca+Th+U)-Y-REE for fergusonite.

Химический состав (мас, %) титанита, фергусонита и браннерита

Таблица 2

Table 2

Chemical composition (wt. %) of titanite, fergusonite and brannerite

Компоненты Рис. 2, № фото, (т.н.)	Nb-Ta содержащий титанит						Фергусонит		Браннерит		
	б (3)	б (4)	в (1)	д (1)	е (3)	е (4)	б (1)	б (2)	в (2)	в (3)	в (4)
SiO ₂	30,76	31,64	30,52	30,64	33,43	30,26	-	-	2,66	2,15	2,61
TiO ₂	26,66	22,45	28,47	25,3	25,81	27,19	1,19	0,66	4,40	4,49	4,29
Al ₂ O ₃	6,00	4,52	5,28	6,16	5,54	5,29	-	-	1,1	0,81	0,94
Ce ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	1,17	-	0,87
FeO*	1,39	2,21	0,84	1,30	1,70	2,29	-	-	1,52	2,06	1,74
CaO	26,16	25,3	25,56	25,39	26,34	25,41	0,90	0,72	-	-	-
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	-	2,40	2,56	2,31
Y ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	27,7	29,3	-	-	-
Nb ₂ O ₅	0,98	3,43	-	2,80	3,16	1,15	46,6	47,4	24,24	22,34	21,9
Ta ₂ O ₅	1,75	7,98	-	-	2,67	-	1,47	-	-	-	-
Gd ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	1,37	1,50	-	-	-
Dy ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	3,29	2,44	-	-	-
Er ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	2,54	2,73	-	-	-
Yb ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	4,16	3,60	-	-	-
PbO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	2,75	2,47	-
ThO ₂	-	-	-	-	-	-	2,85	2,02	-	-	-
UO ₂	-	-	-	-	-	-	1,95	1,80	54,04	51,57	51,91
F	2,18	1,30	1,93	2,24	2,22	2,43	-	-	-	-	-
Формульные коэффициенты											
Si	1,05	1,09	1,06	1,06	1,09	1,04	-	-	0,24	0,20	0,25
Ti	0,68	0,58	0,74	0,66	0,63	0,71	0,04	0,02	0,29	0,32	0,31
Al	0,24	0,18	0,22	0,25	0,21	0,22	-	-	0,12	0,09	0,11
Ce	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04	-	0,03
Fe	0,04	0,06	0,02	0,04	0,05	0,07	-	-	0,11	0,16	0,14
Ca	0,95	0,93	0,95	0,94	0,92	0,94	0,05	0,04	-	-	-
P	-	-	-	-	-	-	-	-	0,18	0,21	0,19
Y	-	-	-	-	-	-	0,68	0,73	-	-	-
Nb	0,02	0,05	-	0,04	0,05	0,02	0,98	1,01	0,98	0,96	0,95
Ta	0,02	0,08	-	-	0,02	-	0,02	-	-	-	-
Gd	-	-	-	-	-	-	0,02	0,02	-	-	-
Dy	-	-	-	-	-	-	0,05	0,04	-	-	-
Er	-	-	-	-	-	-	0,04	0,04	-	-	-
Yb	-	-	-	-	-	-	0,06	0,05	-	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	0,07	0,06	-
Th	-	-	-	-	-	-	0,03	0,22	-	-	-
U	-	-	-	-	-	-	0,02	0,02	1,07	1,09	1,10
F	0,23	0,14	0,21	0,24	0,23	0,27	-	-	-	-	-

(до 100 мкм) непрозрачные и полупрозрачные призматического габитуса с сахаровидной поверхностью, $K_u=1:2$. На катодолюминесцентных изображениях мы видим три типа 1. черные (1.1, 2.1, 3.1, 7.1, 8.1-9.1), 2. серые (4.1, 5.1, 6.1, 10.1, 11.1, 12.1), 3. в этом зерне (8.1-9.1) в центральной части проявлена магматическая осцилляторная зональность (рис. 5 а). Наличие в этом кристалле черной каймы позволяет предположить, что возможно центральные части кристаллов черных на катодолюминесцентных изображениях оказались не вскрытыми и можно предполагать наличие внутри таких же осцилляторных зон. Именно в этом кристалле оба замера (табл. 6, 8.1 и 9.1) показали возраста, как мы полагаем, наследованные (захваченные цирконы)

от пород главных фаз массива Маньхамбо (528–513 млн лет). Однако значения измеренных черных на катодолюминесцентных изображениях кристаллов молодые – 432, 379, 329 млн лет.

Серые на катодолюминесцентных изображениях кристаллы циркона (4.1, 5.1, 6.1, 10.1, 11.1, 12.1) коррелируют по строению с «сетчатыми», «ажурными» кристаллами, наблюдаемыми при микроскопических исследованиях (рис. 2 г, рис. 5 а).

Из расчета убраны точки с высокой дискордантностью 5,1, 7,1, 10,1, а также точки 8,1–9,1 (528–513 млн лет) и точка 2,1 с возрастом 1488 млн лет.

Для оставшихся точек характерны крайне высокие содержания U от 1686 до 2673 г/т и сильно варьирующие содержания Th от 171 до 974 г/т (табл. 5), значения Th/U – низкие (0,10–0,37).

Возраст цирконов по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ определен в шести точках (рис. 5 б), диапазон возрастов составил 373–324 млн лет. Рассчитанный средне-взвешенный возраст – $337,6 \pm 7,3$ млн лет (СКВО=0,13).

Геохимические спектры распределения РЗЭ в цирконе являются индикаторами условий образования. Содержания элементов-примесей близки (табл. 6, рис. 6 а, б), однако они варьируют по содержанию La. Из-за сильного фракционирования состав цирконов, возможно, не отражает параметры первичного магматического расплава и не попадает в магматическое поле (рис. 6 в). На диаграмме Yb–U/Th положение точек составов продатированного (серого в CL) циркона также смещается из поля цирконов обычных составов гранитов (рис. 6 г). Значение $(\text{Y}/\text{Gd})_N$ в этих цирконах низкое 11–19 (для магматических цирконов оно составляет ~23, для пористых цирконов, прошедших преобразование, – ~98, какими либо процессами (например, низкотемпературными, гидротермальными или высокотемпературными «позднемагматическими» кристаллизующиеся из остаточного флюидонасыщенного расплава). Значения $(\text{Sm}/\text{La})_N$ низкие (0,2–0,8) отражает наблюдаемое обогащение La.

На рис. 6 б показаны спектры цирконов, возраст которых использован для расчета времени формирования, отмечается высокое содержание La. В продатированных зонах кристаллов, вошедших в выборку для расчета времени формирования циркона, рассчитана по содержанию титана в цирконе температура кристаллизации (табл. 6), полученные значения из-за высокого содержания железа

Таблица 3
Химический состав (мас. %) аляскитов и петрогенетические параметры

Table 3
Chemical composition (wt. %) of alaskites and petrogenetic parameters

Компонент	151	152	153	154-1	154-2	155	729-1
SiO ₂	82,00	77,86	77,12	77,22	77,36	79,96	77,14
TiO ₂	0,11	0,11	0,05	сл	сл	0,12	0,12
Al ₂ O ₃	9,15	11,65	11,97	12,41	11,53	10,86	11,61
Fe ₂ O ₃	0,79	0,89	0,30	0,44	0,81	0,39	0,63
FeO	0,25	0,20	0,38	0,24	0,32	0,29	0,33
MnO	сл	сл	0,01	0,01	0,09	-	0,01
MgO	0,10	0,26	0,32	0,08	0,68	0,21	0,13
CaO	0,13	0,12	0,45	0,46	0,45	0,29	0,3
Na ₂ O	3,00	4,06	4,61	4,44	4,18	3,37	3,41
K ₂ O	3,38	4,63	4,52	4,86	4,14	4,27	4,90
H ₂ O ⁻	0,04	0,06	0,10	0,11	0,13	0,05	0,19
H ₂ O ⁺	0,21	0,14	-	-	-	0,38	0,35
CO ₂	0,02	0,03	0,06	-	0,13	0,06	0,01
S	0,01	0,008	0,02	0,03	0,03	0,005	-
P ₂ O ₅	0,01	-	0,035	0,10	0,03	0,01	0,01
п.п.п.	0,28	0,28	0,23	0,11	0,37	0,46	0,46
Na ₂ O+K ₂ O	6,38	8,69	9,13	9,30	8,32	7,64	8,31
Na ₂ O/K ₂ O	0,89	0,88	1,02	0,91	1,01	0,79	0,70
ASI	1,04	0,98	0,90	0,93	0,95	1,02	1,01
AlI	0,94	1,00	1,04	1,01	0,98	0,94	0,94
K/Rb	444,88	476,90	737,53	818,94	789,47	1007,30	50,02
Rb/Sr	0,46	2,28	8,37	0,58	1,16	0,64	15,94
Kф	0,91	0,81	0,68	0,89	0,62	0,76	0,88
al'	8,03	8,63	11,97	16,33	6,37	12,20	10,65
10 ⁴ Ga/Al	4,42	3,31	2,90	3,26	3,51	2,13	2,60
M	1,23	1,40	1,55	1,51	1,46	1,31	1,34
T°C	762	677	703	693	682	706	790

(1368–12609 г/т) не корректны. Корректные значения получены лишь для ксеногенных цирконов (1.1, 2.1, 8.1, 9.1).

Изотопно-геохимическая характеристика.

Значения изотопного состава гафния в цирконах (обр. 729-1) в исследованных аляскитах варьируют от +0,38 до +6,8, рассчитанный модельный возраст составил 1,11–0,82 млн лет (табл. 7, рис. 6 д).

Полученные значения изотопного состава гафния мантийные, что подтверждают и полученные нами петро-геохимические данные, а также присутствие сингенетичной комплексной Y-Nb-U-Th минерализации.

Выводы

Таким образом, изученные породы имеют линейный характер развития, прослеженный по элювиальным развалам. Породы характеризуются магматическими микроструктурами, мы относим их к дайковым образованиям.

На отдельных участках отмечается катаклаз, проявлены окварцевание и реже – альбитизация пород. Детальные исследования шлифов и аншлифов показали

Таблица 4
Содержание (г/т) редких, рассеянных и редкоземельных элементов в аляскитах

Table 4
Content (ppm) of rare, trace and rare-earth elements in alaskites

№	Элемент	151	152	153	154-1	154-2	155	729-1
1	La	17,30	18,50	29,20	1,57	14,90	29,20	30,50
2	Ce	26,30	30,90	40,00	15,00	23,80	48,20	50,00
3	Pr*	2,48	3,02	3,41	2,25	2,24	4,70	4,85
4	Nd	8,00	10,20	9,90	0,19	7,12	15,00	15,10
5	Sm	1,80	2,35	1,91	0,57	1,51	3,42	3,29
6	Eu	0,008	0,23	0,23	0,048	0,072	0,20	0,11
7	Gd*	3,29	4,01	3,85	0,48	2,90	5,01	5,00
8	Tb	0,62	0,69	0,67	0,11	0,60	0,9	0,89
9	Dy*	4,48	4,99	4,82	0,84	4,52	6,20	6,10
10	Ho*	1,22	1,35	1,32	0,26	1,33	1,63	1,61
11	Er*	4,27	4,61	4,54	1,03	5,00	5,30	5,22
12	Tm*	0,74	0,81	0,81	0,22	0,99	0,90	0,89
13	Yb	5,09	5,47	5,43	1,63	7,02	5,68	5,74
14	Lu	1,07	1,10	1,12	0,39	1,52	1,08	1,13
15	Cs	0,66	1,32	0,26	0,12	-	1,16	0,86
16	Sr	195,00	50,00	10,00	125,00	61,00	70,00	51,00
17	Ba	26,00	89,00	-	11,00	300,00	1010,00	480,00
18	Sc	3,00	2,47	2,74	0,73	2,74	2,57	3,16
19	Cr	19,70	5,87	1,17	1,41	1,16	3,24	4,46
20	Co	0,65	1,53	0,28	0,59	1,22	0,86	2,92
21	Ni	960,00	250,00	220,00	240,00	-	130,00	240,00
22	Zn	-	10,00	-	-	-	-	-
23	Se	0,88	1,13	3,10	2,88	0,79	4,23	9,64
24	As	4,01	1,51	3,35	0,63	1,24	-	8,71
25	Sb	0,19	0,83	0,30	0,35	0,091	0,20	0,27
26	Th	64,00	40,40	61,30	27,70	88,00	72,90	81,70
27	U	7,31	7,10	8,27	7,49	8,32	9,75	10,80
28	Br	0,021	0,015	0,025	0,032	0,084	0,019	0,054
29	Hf	18,80	9,16	14,30	10,00	18,90	8,85	9,40
30	Au	0,019	-	-	0,045	0,02	0,015	0,025
31	Rb	420,00	530,70	389,60	338,00	329,70	208,30	813,00
32	Ta	15,90	9,74	21,30	18,20	23,10	11,80	21,00
33	Y	-	120,00	230,00	-	-	-	20,00
34	Zr	170,00	150,00	210,00	90,00	230,00	170,00	90,00
35	Nb	-	80,00	60,00	20,00	70,00	20,00	10,00
36	F	200,00	150,00	-	90,00	80,00	280,00	1200,00
37	Li	3,50	3,60	2,80	-	2,10	5,30	1,80
38	Y	29,00	27,00	19,00	10,00	21,00	23,00	19,00
39	V	4,40	11,00	9,20	22,00	9,20	11,00	9,20
40	Be	4,00	6,00	3,80	3,20	3,80	3,00	6,50
41	Pb	8,40	10,00	5,20	3,60	7,20	5,50	8,40
42	Ga	21,00	20,00	18,00	21,00	21,00	12,00	16,00
43	Nb	60,00	50,00	60,00	75,00	110,00	65,00	41,00
44	Eu/Eu*	0,01	0,23	0,25	0,27	0,10	0,15	0,08
45	La _N /Yb _N	2,44	2,43	3,86	0,69	1,52	3,69	3,81
46	ΣREE	76,67	88,23	107,21	24,59	73,52	127,42	130,43
47	Zr/Hf	5,59	4,37	4,55	5,50	2,38	6,21	2,66
48	Nb/Ta	7,56	10,25	5,61	8,26	9,48	11,02	3,90
49	Y/Ho	23,77	20,00	14,39	38,46	15,79	14,11	11,80

Примечание. Результаты, полученные методом нейтронно-активационного анализа, (1–30, * – расчетные данные), рентгено-радиометрического анализа (31–35), количественного спектрального анализа (36–43). 44–49 характеристические значения.
Note. Results are obtained by neutron activation analysis (1–30, * – calculated data), X-ray radiometric analysis (31–35), quantitative spectral analysis (36–43). 44–49 – characteristic values.

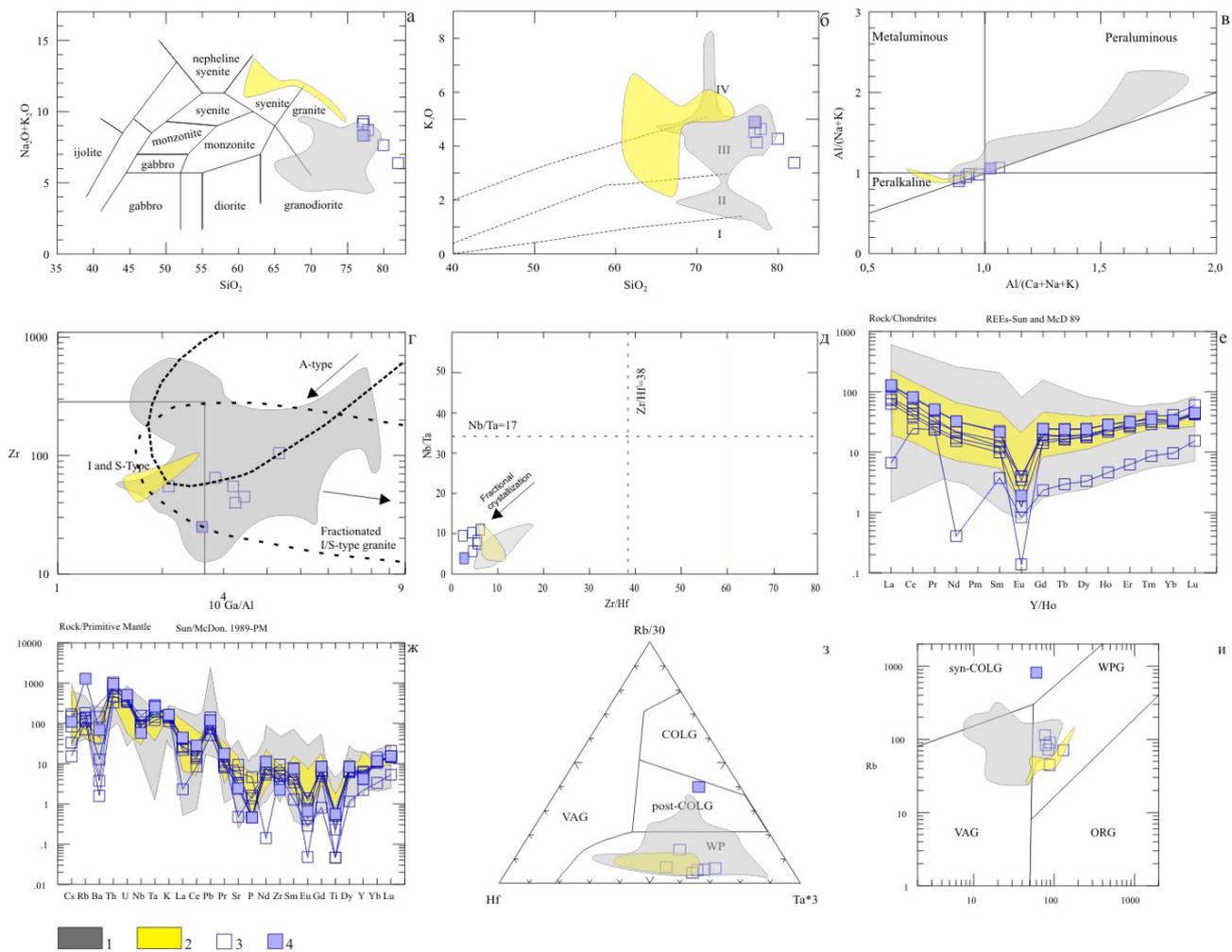


Рисунок 4. Расположение точек составов исследуемых пород на диаграммах: SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (а), SiO_2 - K_2O (б), $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})$ - $\text{Al}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ (в), Zr - $10^4\text{Ga}/\text{Al}$ (г), Zr/Hf - Nb/Ta вариационные диаграммы для высокофракционированных гранитов [24] (д), график зависимости концентрации Y от отношения Y/Ho [25] (е), спектры распределения РЗЭ (ж) и мультиэлементные спектры (з) исследуемых пород. Положение точек составов на диаграммах Hf - $\text{Rb}/30$ - Ta^*5 (и) и Rb - $\text{Y}+\text{Nb}$ (и).

Условные обозначения. 1 – точки составов гранитоидов двух фаз массива Маньхамбо (авторские неопубликованные данные), 2 – точки составов сиенитов Маньхамбо по [19, 24], 3 – аляскисты, 4 – датированная проба (729-1); I – шошонитовая, II – высококальциевая известково-щелочная, III – известково-щелочная, IV – толеитовая. VAG – граниты вулканических дуг, WPG – внутриплитные, COLG – коллизионные, post-COLG – постколлизионные, syn-COLG – синколлизионные, ORG – граниты океанических хребтов.

Figure 4. Distribution of compositional data points of the studied rocks on the following diagrams: SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (a), SiO_2 - K_2O (б), $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})$ - $\text{Al}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ (в), Zr - $10^4\text{Ga}/\text{Al}$ (г), Zr/Hf - Nb/Ta variation diagrams for highly fractionated granites [24] (д), Y concentration versus Y/Ho ratio plot [25] (е), REE distribution patterns (ж), and multi-element spectra (з) of the studied rocks. Position of compositional data points on the Hf - $\text{Rb}/30$ - Ta^*5 (и) and Rb - $\text{Y}+\text{Nb}$ diagrams (и). Keys: 1 – compositional data points of granitoids from two phases of the Mankhambo massif (author's unpublished data), 2 – compositional data points of Mankhambo syenites according to [19, 26], 3 – alaskites, 4 – dated sample (729-1); I – shoshonitic, II – high-K calc-alkaline, III – calc-alkaline, IV – tholeiitic. VAG – volcanic arc granites, WPG – within-plate granites, COLG – collisional granites, post-COLG – post-collisional granites, syn-COLG – syn-collisional granites, ORG – oceanic ridge granites.

Таблица 5

Результаты U-Pb изотопных исследований цирконов

Table 5

Results of U-Pb isotope studies of zircons

Зерно. Кратер	$^{206}\text{Pb}_c$ %	Содержания, мкг			$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	Возраст млн лет, $\pm 1\sigma$		D. %	Изотопные отношения, $\pm 1\sigma$			Rh _o
		$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Серые на катодолюминесцентных изображениях												
6,1	3,43	89	2109	619	0,30	309±5	339±114	+9	0,0801±2,8	0,36±5,3	0,049±1,7	0,3
10,1	22,81	118	2673	372	0,14	327±9	629±678	+49	0,2363±4,7	0,44±31,6	0,052±2,7	0,1
4,1	5,19	122	2656	974	0,38	337±7	368±251	+9	0,0950±4,6	0,40±11,4	0,054±2,2	0,2
5,1	3,33	113	2428	839	0,36	342±4	623±204	+46	0,0801±2,7	0,45±9,5	0,054±1,1	0,1
12,1	6,44	86	1686	171	0,10	373±14	492±804	+25	0,1060±14,0	0,47±36,7	0,060±4,0	0,1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11,1	2,41	92	1802	243	0,14	373±19	383±90	+3	0,0735±2,4	0,45±6,5	0,060±5,1	0,8
Черные на катодоллюминесцентных изображениях												
3,1	1,91	98	2177	1048	0,50	328±5	285±104	-16	0,0684±0,5	0,37±4,8	0,052±1,5	0,3
7,1	5,89	105	2026	916	0,47	381±8	580±208	+35	0,1017±3,6	0,50±9,8	0,061±2,1	0,2
1,1	0,35	150	2530	1295	0,53	432±5	478±14	+10	0,0583±0,4	0,54±1,3	0,069±1,1	0,9
Ксеногенные (соответствуют возрасту гранитоидов I и II фаз массива Маньхамбо)												
8,1	0,25	34	479	288	0,62	512±3	444±41	-16	0,0596±1,0	0,64±1,9	0,083±0,6	0,3
9,1	0,30	52	715	500	0,72	527±9	424±58	-25	0,0605±1,7	0,65±3,1	0,085±1,7	0,5
ксеногенные (древние)												
2,1	1,19	90	408	222	0,56	1488±26	1594±36	+7	0,1028±1,2	3,52±2,8	0,260±2,0	0,7

Примечание. $^{206}\text{Pb}_c$ и $^{206}\text{Pb}^*$ – обыкновенный и радиогенный свинец. Изотопные отношения и содержания ^{206}Pb скорректированы по измеренному ^{204}Pb . D – дискордантность: $D = 100 \times [\text{возраст } (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rh_0 – коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

Note. $^{206}\text{Pb}_c$ и $^{206}\text{Pb}^*$ – ordinary and radiogenic lead. Isotopic ratios and concentrations of ^{206}Pb are corrected by measured ^{204}Pb . D – discordance: $D = 100 \times [\text{age } (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / \text{age } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rh_0 is the correlation coefficient between determination errors of the isotope ratios $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ and $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

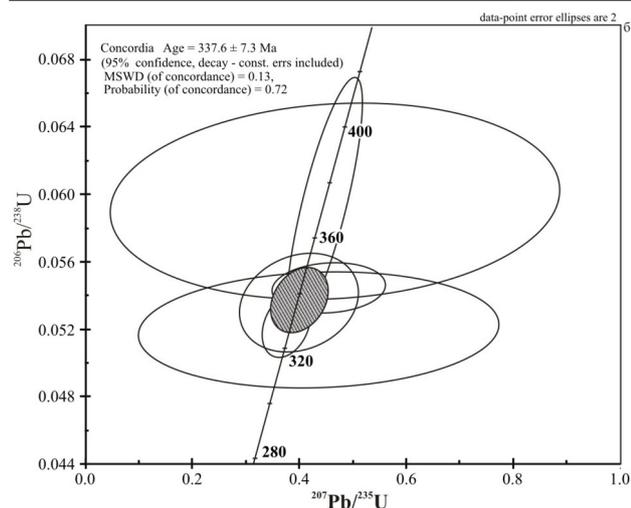
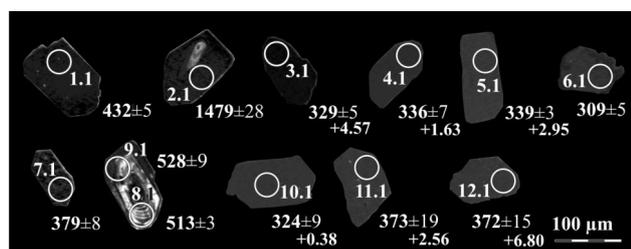


Рисунок 5. Катодоллюминесцентные изображения цирконов с номерами датированных зерен и аналитических кратеров, ϵHf (а) и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ диаграмма с конкордией (б).

Figure 5. Cathodoluminescence images of zircons with numbers of dated grains and analytical craters, ϵHf (a) and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ diagram with concordia (b).

отсутствие приуроченности рудных минералов к межконтинентальному пространству.

Установлена тонкорассеянная сингенетическая комплексная минерализация Y-Nb, U-Th: ассоциации фергусонита, эшинита (эшинита (Th)), Nb-Ta содержащего титанита, браннерита), наличие позднего кальцита.

Петро-геохимически исследованные породы соответствуют аляскитам и рассматриваются нами как сформированные из высокодифференцированного расплава. Для пород характерны высокие содержания кремнезема, преобладание оксида калия над оксидом натрия. Аляскинты

имеют невысокие содержания РЗЭ с подковообразными спектрами распределения и слабым фракционированием легких и тяжелых, характерны глубокие отрицательные Eu аномалии. Мультиспектры нормированных на примитивную мантию значений демонстрируют преобладание крупноионных элементов над высокозарядными. Для исследованных пород характерны высокие содержания Ga, Nb, Ta, Th, HREE, низкие значения Zr/Hf, Nb/Ta, Y/No. Отсутствуют корреляции элементов, слагающих рудные акцессорные минералы (Y, Nb, U, Th), например, с Na_2O , что можно было бы рассматривать как признак метасоматического контроля минерализации. Точки составов пород на диаграммах, применяемых для реконструкции геодинамических условий формирования пород, группируются в полях внутриплитных образований.

Изучение выборки цирконов показало, что в породе присутствуют несколько типов цирконов: 1) захваченные (ксеногенные) цирконы с возрастными, аналогичными возрастам (средний-поздний кембрий) гранитоидов Маньхамбовского массива [8] и 2) более древние (1479, нижне-рифейский), а также 3) серые на катодоллюминесцентных изображениях кристаллы, коррелирующие по строению с «сетчатыми», «ажурными», «пористыми» кристаллами, наблюдаемыми нами при микрозондовых исследованиях. Подобные по внутреннему строению пористые цирконы рассматриваются как преобразованные под действием поздних водно-солевых флюидов [27].

Расчетный средневзвешенный U-Pb возраст цирконов 3-го типа составил $337,6 \pm 7,3$ млн лет (2σ , $n=6$, СКВО=0.13). Эти цирконы характеризуются высокими значениями U и Th и низкими значениями Th/U, варьирующими от 0.1 до 0.3 (есть два значения 0,35, 0,37), и в целом близки к *немагматическим* цирконам ($\text{Th}/\text{U} < 0,1-0,3$). В спектрах распределения РЗЭ в этих цирконах отмечаются вариации по содержанию La, характерны низкие значения $(\text{Sm}/\text{La})_N$ (0,2-0,8), отражающие наблюдаемое обогащение La, характерное для преобразованных цирконов. С одной стороны, для них типичны слишком низкие значения $(\text{Y}/\text{Gd})_N$. Точки составов цирконов находятся вне полей магматических и гидротермальных цирконов, что может указывать на нарушенность

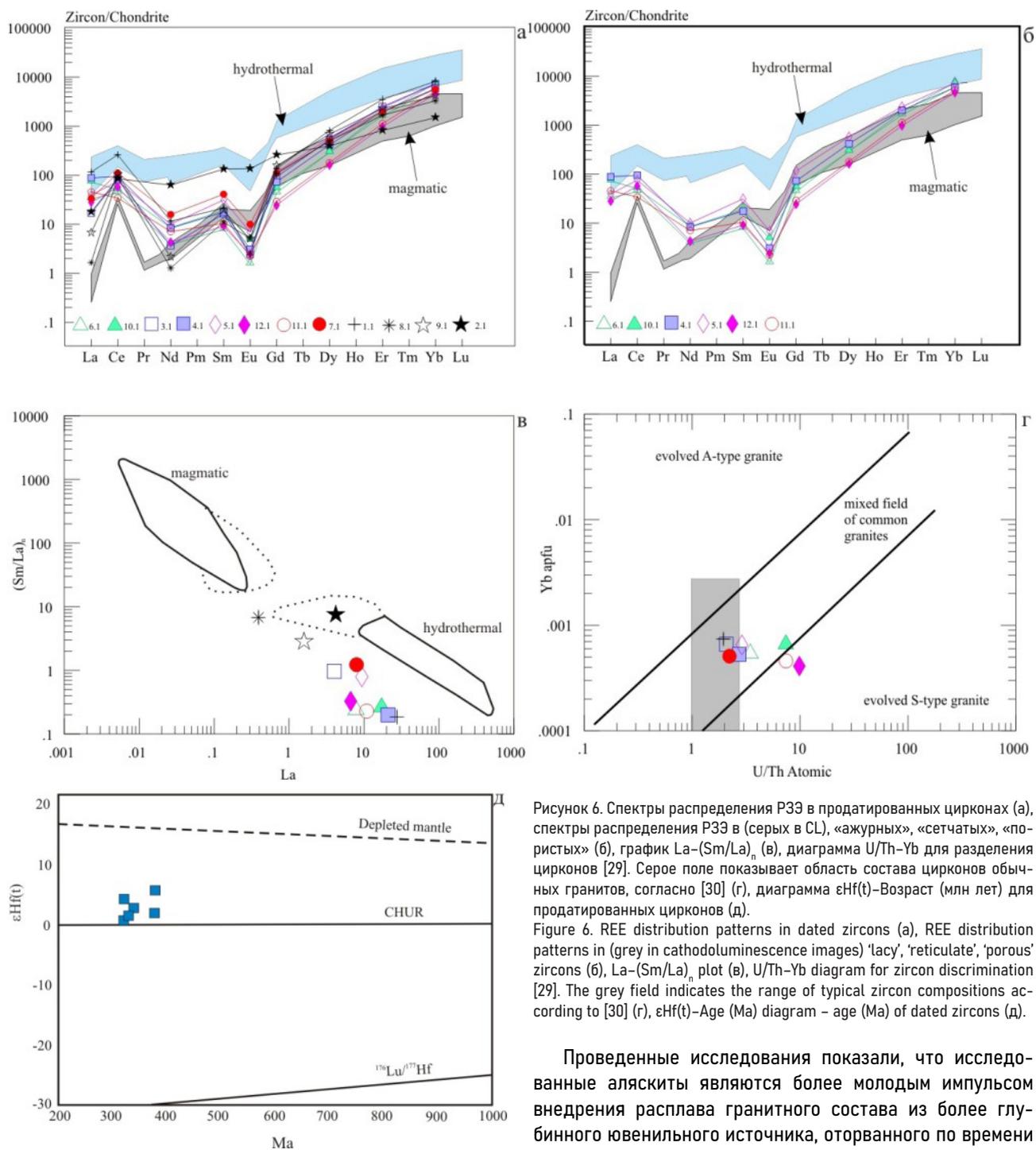


Рисунок 6. Спектры распределения РЗЭ в протитированных цирконах (а), спектры распределения РЗЭ в (серых в CL), «ажурных», «сетчатых», «пористых» (б), график La-(Sm/La)_n (в), диаграмма U/Th-Yb для разделения цирконов [29]. Серое поле показывает область состава цирконов обычных гранитов, согласно [30] (г), диаграмма εHf(t)-Возраст (млн лет) для протитированных цирконов (д).

Figure 6. REE distribution patterns in dated zircons (a), REE distribution patterns in (grey in cathodoluminescence images) 'lacy', 'reticulate', 'porous' zircons (b), La-(Sm/La)_n plot (в), U/Th-Yb diagram for zircon discrimination [29]. The grey field indicates the range of typical zircon compositions according to [30] (г), εHf(t)-Age (Ma) diagram - age (Ma) of dated zircons (д).

Проведенные исследования показали, что исследованные аляскинты являются более молодым импульсом внедрения расплава гранитного состава из более глубокого ювенильного источника, оторванного по времени на 150 млн лет и генетически не связанного с породами, слагающими основную часть массива. Аляскинты кристаллизовались из сильно фракционированных расплавов в верхнекоровых промежуточных очагах и именно поэтому отличаются специфической минералогией и геохимией.

Породы близки по возрасту к лейкогранитам, рассматриваемым в составе щелочного поньинского гипабиссального комплекса (монцогаббро-монцитонитовый, небольшие штоки, линзообразные тела и дайки монцогаббродиоритов ($\mu\text{v}\text{C}_3\text{-Ppn}$), монцодолеритов ($\mu\text{B}_3\text{-Ppn}$) и, возможно, сиенитов (эйситизированные) ($\xi\text{C}_3\text{-Ppn}$), кварцевых сиенитов ($\xi\text{C}_3\text{-Ppn}$), граносиенитов ($\gamma\xi\text{C}_3\text{-Ppn}$), умереннощелочных лейкогранитов ($\epsilon\text{I}\gamma\text{C}_3\text{-Ppn}$) [1].

U-Pb системы, с другой – рассматриваться как специфичность таких малоисследованных цирконов, типичных для многих редкометалльных пород, кристаллизующихся из флюидонасыщенной магмы. Температуры кристаллизации циркона, рассчитанные по содержанию титана, не корректные из-за высокого содержания в цирконах Fe. Температура кристаллизации пород, рассчитанная по параметру M, составила 790–677° C [28]. Значения изотопного состава гафния циркона положительные ($\epsilon\text{Hf} + 0,38$ до +6,8) и указывают на мантийный источник. Рассчитанный модельный возраст T_{DM2} показывает, что в плавление вовлекался материал с возрастом 1,11–0,82 млн лет.

Таблица 6
Содержания редкоземельных элементов, гафния, железа и титана (г/т) и температуры кристаллизации при 1,0/0,7 (°C) в исследованных цирконах

Table 6
Contents of rare-earth elements, hafnium, iron and titanium (g/t) and crystallization temperatures at 1.0/0.7 (°C) in the studied zircons

Т.н.	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Y	Hf	Fe	⁴⁸ Ti	⁴⁹ Ti	T ^[1]
Серые на катодолюминесцентных изображениях															
6,1	7,83	27	1,8	1,2	0,09	9	75	268	1022	1377	13421	1638	50,0	48,6	1023
10,1	17,19	31	4,0	2,9	0,28	11	74	310	1255	1356	14199	12609	9,3	9,1	809
4,1	21,00	58	3,9	2,7	0,18	15	106	333	1001	1457	15064	2608	21,1	20,6	904
5,1	9,37	46	4,7	4,8	0,40	24	147	393	1231	2080	14430	1559	13,7	13,2	852
12,1	6,65	35	2,0	1,4	0,14	5	41	161	783	551	20138	1368	26,6	26,8	934
11,1	10,84	21	3,3	1,6	0,13	6	46	188	883	658	24686	2885	15,3	14,6	865
Черные на катодолюминесцентных изображениях															
3,1	4,01	49	1,7	2,5	0,14	19	136	417	1256	2242	10740	936	28,9	29,2	945
7,1	7,95	68	7,4	6,3	0,58	23	127	325	966	1655	14974	1850	67,2	68,9	1070
1,1	27,63	160	5,4	3,3	0,14	28	209	582	1405	3166	12082	381	21,1	20,7	904
Ксеногенные (соответствуют возрасту гранитоидов I и II фаз массива Маньхамбо)															
8,1	0,39	57	0,6	1,7	0,30	22	128	276	563	1598	10121	65	9,0	8,8	806
9,1	1,58	64	1,0	2,9	0,29	32	175	379	705	2230	10370	252	10,3	10,7	820
Ксеногенные															
2,1	4,20	52	29,4	20,4	7,88	53	101	136	254	820	10778	109	19,5	19,2	894

Таблица 7
Изотопный состав Lu-Hf, εHf и расчетные значения T_{DM2} в цирконах массива Маньхамбо

Table 7
Isotopic composition of Lu-Hf, εHf and calculated T_{DM2} values in zircons of the Mankhambo massif

Точка	Возраст, млн лет	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	εHf(t)	T _{DM} (Ma)	T _{DM2} (Ma)	f _{Lu/Hf}
3.1	329	0,07006	0,00025	0,00342	0,00001	0,28272	0,00002	4,57	0,81	0,90	-0,90
4.1	336	0,07045	0,00060	0,00300	0,00002	0,28263	0,00002	1,63	0,93	1,06	-0,91
5.1	339	0,05872	0,00013	0,00282	0,00000	0,28266	0,00002	2,95	0,88	1,00	-0,91
10.1	324	0,07892	0,00058	0,00316	0,00001	0,28260	0,00003	0,38	0,98	1,11	-0,90
11.1	373	0,02620	0,00014	0,00134	0,00000	0,28262	0,00001	2,56	0,90	1,04	-0,96
12.1	372	0,02882	0,00005	0,00155	0,00000	0,28274	0,00001	6,80	0,73	0,82	-0,95

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Пучков, В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении) / В. Н. Пучков. – Уфа, 2010. – 280 с.
- Estrada S. Insights into magmatic and geotectonic history of the Voikar Massif, Polar Urals / F. Henjes-Kunst, K-P. Burgath, N. W. Roland, F. Schafer, E. N. Khain, D. N. Remizov Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. – 2012. – V163. – №1. – С. 9–41. <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2012/0163-0009>
- Петров, О. В. Геологическая карта России и прилегающих акваторий масштаба 1:2500000 / А. Ф. Морозов, Т. В. Чепкасова [и др.]. ФГБУ «ВСЕГЕИ». Роснедра. 2016.
- Душин, В. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000 (издание второе). Серия Северо-Уральская. Лист Р-40-VI (г. Тельпос-Из). Объяснительная записка / В. А. Душин, О. П. Сердюкова, А. А. Малюгин [и др.]. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2018. – 216 с.
- Махлаев, Л. В. Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал): монография / Л. В. Махлаев. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 150 с.
- Удоратина, О. В. Петрология пород Ильязского массива (Северный Урал) / О. В. Удоратина, А. А. Соболева, Н. С. Дорохов [и др.] // Петрология и минералогия севера Урала и Тимана (Труды Института геологии Коми научного центра Российской АН). – 2003. – Вып. 113. – С. 54–74.
- Удоратина, О. В. Возраст гранитоидов массивов Маньхамбовского и Ильязского массивов (Северный Урал): U-Pb данные / О. В. Удоратина, А. А. Соболева, Н. А. Кузнецов [и др.] // Доклады Академии наук (ДАН). – 2006. – Т. 406, № 6. – С. 810–815.
- Удоратина, О. В. Гранитоиды севера Урала: геохронология, эволюция, источники / О. В. Удоратина, К. В. Куликова, А. С. Шуйский [и др.]. – Сыктывкар, 2022. – 125 с. – URL: <https://doi.org/10.19110/98491-044>.
- Удоратина, О. В. U-Pb возраст цирконов гранитной гальки из отложений, перекрывающих массив Маньхамбо (Северный Урал) / О. В. Удоратина, А. Н. Ла-

- рионов, Н. Ю. Никулова // Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы. ИГГД РАН. – СПб.: Sprinter, 2015. – С. 312–313.
10. Удоратина, О. В. Возраст рудных метапесчаников (Маньхамбо, Северный Урал) / О. В. Удоратина, Н. Ю. Никулова, В. Б. Хубанов // Возраст и корреляция магматических, метаморфических, осадочных и рудообразующих процессов: материалы VIII Российской конференции по изотопной геохронологии. – СПб., 2022. – С. 163–165.
 11. Удоратина, О. В. Цирконы из осадочных отложений восточного контакта гранитного массива Маньхамбо (Северный Урал) / О. В. Удоратина, Н. Ю. Никулова, А. А. Павлова [и др.] // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2012. – № 6. – С. 2–8.
 12. Щербин, С. С. Взаимоотношение разновозрастных гранитоидов с доордовикскими осадочно-метаморфическими породами в районе Мань-Хамбо на Приполярном Урале / С. С. Щербин // Магматизм, метаморфизм и оруденение в геологической истории Урала. – Свердловск, 1974. – С. 62–64.
 13. Душин, В. А. Возраст и геодинамическая позиция гранитоидов маньхамбовского блока (Северный Урал): U–Pb и Sm–Nd изотопная систематика и геохимические ограничения / В. А. Душин, Ю. Л. Ронкин, О. П. Лепихина // Изотопные системы и время геологических процессов: материалы IV Российской конференции по изотопной геохронологии. – СПб.: ИП Каталинка, 2009. – Т. 1. – С. 172–174.
 14. Калинин, Е. П. Новые данные о геологии и редкометалльной металлогении горных пород Урала в бассейне верхней Печоры / Е. П. Калинин, В. Н. Пучков // Тр. ИГ КФАН СССР. – Сыктывкар, 1968. – Вып. 9. – С. 49–60.
 15. Бороздина, Г. М. О корреляции стратотипа хобейнской свиты и отложений в восточном контакте гранитного массива Мань-Хамбо / Г. М. Бороздина // ЕЖЕГОДНИК-2008. Тр. ИГГ УрО РАН. – Екатеринбург, 2009. – Вып. 156. – С. 57–59.
 16. Удоратина, О. В. Минералогия и литохимия рудных метапесчаников, перекрывающих гранитный массив Мань-Хамбо (Северный Урал) / О. В. Удоратина, Н. Ю. Никулова, Д. А. Варламов // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2014. – № 4 (232). – С. 3–9.
 17. Удоратина, О. В. Время формирования комплексных (радиоактивно-редкоземельно-редкометалльных) руд Маньхамбовского рудного района (Северный Урал) / О. В. Удоратина, В. А. Капитанова // Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования: материалы Всероссийской конференции, посвященной 85-летию ИГЕМ РАН, Москва, 25–27 ноября 2015 г. – М.: ИГЕМ РАН, 2015. – С. 250–251.
 18. Душин, В. А. Рифейский гранитный магматизм и металлогения Маньхамбовского блока / В. А. Душин, А. В. Фауст // Региональная геология и металлогения. – 2008. – № 35. – С. 25–33.
 19. Калиновский, А. В. Редкометалльные комплексы Маньхамбовского металлогенического района на Северном Урале / А. В. Калиновский // Серия препринтов «Научные доклады» Коми НЦ УрО АН СССР. – Сыктывкар, 1990. – Вып. 228. – 24 с.
 20. Андреичев, В. Л. Гранитоиды Большеземельской зоны фундамента Печорской синеклизы: состав и U–Pb возраст / В. Л. Андреичев, А. А. Соболева, Е. Г. Довжикова [и др.] // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, № 2. – С. 180–191. – URL: <https://doi.org/10.15372/GiG2022125>.
 21. Geng J. Z. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-ICP-MS / J. Z. Geng, H. K. Li, J. Zhang, H. Y. Zhou, H. M. Li // Geological Bulletin of China. – 2011. – Vol. 30. – №. 10. – P. 1508–1513. (in Chinese with English abstract).
 22. Юшкин, Н. П. Закономерности развития процессов редкометалльного рудогенеза в центральной зоне Приполярного Урала / Н. П. Юшкин, М. В. Фишман, Б. А. Голдин [и др.] // Современное состояние учения о месторождениях полезных ископаемых. – Ташкент, 1975. – С. 184–189.
 23. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2008. – 200 с.
 24. Wu, F. Highly fractionated granites: Recognition and research / F. Wu, X. Liu, W. Ji, // Science China Earth Sciences. – 2017. – Vol. 60. – P. 1201–1219. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5139-1>.
 25. Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // Contrib Mineral Petrol. – 1996, №123, – P. 323–333.
 26. Удоратина, О. В. Аляскиты массива Маньхамбо / О. В. Удоратина, В. А. Жаренков // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Инф. мат-лы 8-й науч. конф. Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 8–9 декабря 1999 г. – Сыктывкар: Геопринт, 1999. – С. 192–198.
 27. Grimes C. On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere / B. E. John, M. J. Cheadle, F. K. Mazdab, J. L. Wooden, S. Swapp, J. J. Schwartz // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2009. – Vol. 158. – P. 757–783. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0409-2>
 28. Watson E. B. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types / M. Harrison. Earth Planet Sci Lett. 1983. – № 64. – P. 295–304.
 29. Breiter K. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites / C. N. Lamarão, R. M. K. Borges, R. Dall'Agnol // Lithos. – 2014. – P. 208–225. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.02.004>
 30. Hoskin P. W. O. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator / T. R. Ireland. // Geology. – 2000. №28. – P. 627–630.

References

1. Puchkov, V. N. Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nyye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodnamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and the Cis-Urals (current issues

- of stratigraphy, tectonics, geodynamics, and metallogeny). – Ufa: Design Polygraph Service, 2010. – 280 p.
2. Estrada, S. Insights into magmatic and geotectonic history of the Voikar Massif, Polar Urals / S. Estrada, F. Henjes-Kunst, K-P. Burgath [et al.] // Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. – 2012. – Vol. 163, №1. – С. 9–41. <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2012/0163-0009>.
 3. Petrov, O. V. Geologicheskaya karta Rossii i prilegayushchikh akvatoriy masshtaba 1:2 500 000 [Geological map of Russia and adjacent water areas, scale 1:2,500,000] / O. V. Petrov, A. F. Morozov, T. V. Chepkasova [et al.]. – VSEGEI. Rosnedra, 2016.
 4. Dushin, V. A. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200 000. Seriya Severo-Ural'skaya. List P-40-VI (g. Telpos-Iz). Obyasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation 1:200,000. North-Ural series. Sheet P-40-VI (Telpoz-Iz mountain). Explanatory note] / V. A. Dushin, O. P. Serdyukova, A. A. Malyugin [et al.]. – SPb: VSEGEI, 2018. – 216 p.
 5. Makhlaev, L. V. Granitoidy severa Tsentral'no-Ural'skogo podnyatiya (Polyarnyy i Pripolyarnyy Ural) [Granitoids of the north of the Central Ural uplift (Polar and Subpolar Urals)] / L. V. Makhlayev. – Ekaterinburg: UB RAS, 1996. – 150 p.
 6. Udoratina, O. V. Petrologiya porod Il'yaizskogo massiva (Severnnyy Ural) [Petrology of rocks of the Ilyaiz massif (Northern Urals)] / O. V. Udoratina, A. A. Soboleva, N. S. Dorokhov [et al.] // Petrologiya i mineralogiya severa Urala i Timana [Petrology and Mineralogy of the North of the Urals and Timan] (Proceedings of the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences). – Syktyvkar, 2003. – Iss. 113. – P. 54–74.
 7. Udoratina, O. V. Vozrast granitoidov massivov Man'khambovskogo i Il'yaizskogo massivov (Severnnyy Ural): U-Pb dannyye [Age of granitoids of the Mankhambovsky and Ilyaiz massifs (Northern Urals): U-Pb data] / O. V. Udoratina, A. A. Soboleva, N. A. Kuzenkov [et al.] // Reports of the Russian Academy of Sciences. – 2006. – Vol. 406. – № 6. – P. 810–815.
 8. Udoratina, O. V. Granitoidy severa Urala: geokhronologiya, evolyutsiya, istochniki [Granitoids of the northern Urals: geochronology, evolution, sources] / O. V. Udoratina, K. V. Kulikova, A. S. Shuysky [et al.]. – Syktyvkar, 2022. – 125 p. – <https://doi.org/10.19110/98491-044>.
 9. Udoratina, O. V. U-Pb vozrast tsirkonov granitnoy gal'ki iz otlozheniy perekryvayushchikh massiv Man'khambo (Severnnyy Ural) [U-Pb age of zircons of granite pebbles from sediments overlying the Mankhambo massif (Northern Urals)] / O. V. Udoratina, A. N. Larionov, N. Yu. Nikulova // Izotopnoe datirovanie geologicheskikh processov: novye rezultaty, podhody i perspektivy [Isotope Dating of Geological Processes: New Results, Approaches and Prospects]. – IGGD RAS. – SPb: Springer, 2015. – P. 312–313.
 10. Udoratina, O. V. Vozrast rudnykh metapeschanikov (Man'khambo, Severnnyy Ural) [Age of ore metasandstones (Mankhambo, Northern Urals)] / O. V. Udoratina, N. Yu. Nikulova, V. B. Khubanov // Vozrast i korrelyatsiya magmaticheskikh, metamorficheskikh, osadochnykh i rudoobrazuyushchikh processov [Age and Correlation of Magmatic, Metamorphic, Sedimentary and Ore-Forming Processes]: Materials of the VIII Russ. Conf. on Isotope Geochronology. – SPb, 2022. – P. 163–165.
 11. Udoratina, O. V. Tsirkony iz osadochnykh otlozheniy vostochnogo kontakta granitnogo massiva Man'khambo (Severnnyy Ural) [Zircons from sedimentary deposits of the eastern contact of the Mankhambo granite massif (Northern Urals)] / O. V. Udoratina, N. Yu. Nikulova, A. A. Pavlova [et al.] // Bulletin of the Institute of Geology Komi SC UB RAS. – 2012. – № 6. – P. 2–8.
 12. Shcherbin, S. S. Vzaimootnosheniye raznovozrastnykh granitoidov s doordovikskimi osadochno-metamorficheskimi porodami v rayone Man'-Khambo na Pripolyarnom Urale [The relationship of different-age granitoids with the pre-Ordovician sedimentary-metamorphic rocks in the Man-Khambo region of the Subpolar Urals] / S. S. Shcherbin // Magmatizm, metamorfizm i orudnenie v geologicheskoy istorii Urala [Magmatism, Metamorphism and Mineralization in the Geological History of the Urals]. – Sverdlovsk, 1974. – P. 62–64.
 13. Dushin, V. A. Vozrast i geodinamicheskaya pozitsiya granitoidov man'khambovskogo bloka (Severnnyy Ural): U-Pb i Sm-Nd izotopnaya sistematika i geokhimicheskiye ogranicheniya [Age and geodynamic position of granitoids of the Mankhamba block (Northern Urals): U-Pb and Sm-Nd isotope systematics and geochemical restrictions] / V. A. Dushin, Yu. L. Ronkin, O. P. Lepikhina // Izotopnye sistemy i vremya geologicheskikh processov [Isotopic Systems and Time of Geological Processes]: Materials of the IV Russ. Conf. on Isotope Geochronology. – SPb: IP Katalina, 2009. – Vol. 1. – P. 172–174.
 14. Kalinin, E. P. Novyye dannyye o geologii i redkometalloy metallogenii gornykh porod Urala v bassejne verkhney Pechory [New data on the geology and rare metal metallogeny of Ural rocks in the upper Pechora basin] / E. P. Kalinin, V. N. Puchkov // Proceedings of the IG KFAS USSR. – Vol. 9. – Syktyvkar, 1968. – P. 49–60.
 15. Borozdina, G. M. O korrelyatsii stratotipa khobeinskoy svity i otlozheniy v vostochnom kontakte granitnogo massiva Man'-Khambo [On the correlation of the stratotype of the Khibeina formation and sediments in the eastern contact of the Man-Khambo granite massif] / G. M. Borozdina // YEARBOOK-2008. Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS. – Ekaterinburg, 2009. – Iss. 156 – P. 57–59.
 16. Udoratina, O. V. Mineralogiya i litokhimiya rudnykh metapeschanikov, perekryvayushchikh granitnyy massiv Man'-Khambo (Severnnyy Ural) [Mineralogy and lithochemistry of ore metasandstones overlying the Man-Khambo granite massif (Northern Urals)] / O. V. Udoratina, N. Yu. Nikulova, D. A. Varlamov // Bulletin of the Institute of Geology of the Komi SC UB RAS. – 2014. – № 4 (232). – P. 3–9.
 17. Udoratina, O. V. Vremya formirovaniya kompleksnykh (radioaktivno-redkozemel'no-redkometal'nykh) rud

- Man'khambovskogo rudnogo rayona (Severnyy Ural) [Formation time of complex (radioactive-rare earth-rare metal) ores of the Mankhambovsky ore district (Northern Urals)] / O. V. Udoratina, V. A. Kapitanova // Mestorozhdeniya strategicheskikh metallov: zakonomernosti razmeshcheniya, istochniki veshchestva, usloviya i mekhanizmy obrazovaniya [Deposits of Strategic Metals: Location Patterns, Matter Sources, Formation Conditions and Mechanisms]. All-Russian Conf. dedicated to the 85th anniversary of IGEM RAS. – Moscow, November 25–27, 2015. – P. 250–251.
18. Dushin, V. A. Rifeyskiy granitnyy magmatizm i metallogeniya Man'khambovskogo bloka [Riphean granite magmatism and metallogeny of the Mankhambovsky block] / V. A. Dushin, A. V. Faust // Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]. – 2008. – № 35. – P. 25–33.
 19. Kalinovsky, A. V. Redkometall'nye komplekсы Man'khambovskogo metallogenicheskogo rayona na Severnom Urals [Rare metal complexes of the Mankhambovsky metallogenic region in the Northern Urals] / A. V. Kalinovsky // Series of preprints 'Scientific reports'. – Komi Science Centre UB USSR AS, 1990. – Vol. 228. – 24 p.
 20. Andreichev, V. L. Granitoidy Bol'shezemel'skoy zony fundamenta Pechorskoy sineklizy: sostav i U-Pb vozrast [Granitoids of the Bolshezemel'skaya zone of the basement of the Pechora syncline: composition and U-Pb age] / V. L. Andreichev, A. A. Soboleva, E. G. Dovzhikova [et al.] // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 2023. – Vol. 64. – № 2. – P. 180–191. – <https://doi.org/10.15372/GiG2022125>.
 21. Geng, J. Z. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-ICP-MS / J. Z. Geng, H. K. Li, J. Zhang [et al.] // Geological Bulletin of China. – 2011. – Vol. 30. – № 10. – P. 1508–1513.
 22. Yushkin, N. P. Zakonomernosti razvitiya protsessov redkometall'nogo rudogeneza v tsentralnoi zone Pripolyarnogo Urals [Development mechanisms of the rare metal rudogenesis processes in the central zone of the Subpolar Urals] / N. P. Yushkin, M. V. Fishman, B. A. Goldin [et al.] // Sovremennoe sostoyanie ucheniya o mestorozhdeniyakh poleznykh iskopayemykh [Current state of the science about mineral deposits]. – Tashkent, 1975. – P. 184–189.
 23. Petrograficheskiy kodeks Rossii. Magmaticheskiye, metamorficheskiye, metasomaticheskiye, impaktnyye obrazovaniya. 2-ye izdaniye., pererabatano i dopolneno [Petrographic Code of Russia. Igneous, metamorphic, metasomatic, impact formations. 2nd edition, revised and expanded]. – SPb: VSEGEI Publishing House, 2008. – 200 p.
 24. Wu, F. Highly fractionated granites: Recognition and research / F. Wu, X. Liu, W. Ji, // Science China Earth Sciences. – 2017. – Vol. 60. – P. 1201–1219. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5139-1>.
 25. Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // Contrib Mineral Petrol. – 1996, №123, – P. 323–333.
 26. Udoratina, O. V. Alyaskity massiva Mankhambo [Alaskaites of the Mankhambo massif] / O. V. Udoratina, V. A. Zharenkov // Struktura, veshchestvo, istoriya litosfery Timano-Severouralskogo segmenta [Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Northern Ural segment]: Inf. Materials 8th Scientific. Conf. Institute of Geology, Komi SC UB RAS, December 8–9, 1999. – Syktyvkar: Geoprint, 1999. – P. 192–198.
 27. Grimes, C. On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere / C. Grimes, B. E. John, M. J. Cheadle [et al.] // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2009. – Vol. 158. – P. 757–783. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0409-2>.
 28. Watson, E. B. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types / E. B. Watson, T. M. Harrison // Earth and Planetary Science Letters. – 1983. – № 64 (2). – P. 295–304.
 29. Breiter, K. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites / K. Breiter, C. N. Lamarão, R. M. K. Borges [et al.] // Lithos. – 2014. – P. 208–225. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.02.004>.
 30. Hoskin, P. W. O. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator / P. W. O. Hoskin, T. R. Ireland // Geology. – 2000, № 28. – P. 627–630.

Благодарность (госзадание):

Авторы выражают огромную благодарность Мэту Коблу (Стэнфордский Университет, США) за совместные U-Pb SIMS исследования единичных цирконов. Исследования проведены по теме НИР «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента» 122040600012–2.

Acknowledgements (state task)

The authors are very grateful to Mat Coble (Stanford University, USA) for joint U-Pb SIMS studies of single zircons. The works were carried out in frames of the research programme 'Deep structure, geodynamic evolution, geosphere interaction, magmatism, metamorphism, and isotopic geochronology of the Timan-Northern Urals lithospheric segment' 122040600012–2.

Информация об авторах:

Удоратина Оксана Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus

Author ID 6507890574, <http://orcid.org/0000-0001-9956-6271> (167982, Российская Федерация, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: taykey@yandex.ru).

Шуйский Александр Сергеевич – младший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; <http://orcid.org/0000-0002-6928-9354> (167982, Российская Федерация, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: self88@yandex.ru).

About the authors:

Oksana V. Udoratina – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; ORCID 0000-0001-9956-6271 (54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: udoratina@geo.komisc.ru).

Aleksander S. Shuisky – Junior Researcher, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; ORCID 0000-0002-6928-9354 (54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: self88@yandex.ru).

Для цитирования:

Удоратина, О. В. Редкометалльные аляскиты массива Маньхамбо (Северный Урал): U-Pb (SIMS) данные и изотопно-геохимические характеристики / О. В. Удоратина, А. С. Шуйский // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 53–67.

For citation:

Udoratina, O. V. Redkometallnye alyaskity massiva Manhambo (Severnyj Ural): U-Pb (SIMS) dannye i izotopno-geohimicheskie harakteristiki [Rare-metal alaskites of the Mankhambo massif (Northern Urals): U-Pb (SIMS) data and isotope-geochemical characteristics] / O. V. Udoratina, A. S. Shuisky // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2025. – № 3 (79). – P. 53–67.

Дата поступления статьи: 05.03.2025

Прошла рецензирование: 10.03.2025

Принято решение о публикации: 01.04.2025

Received: 05.03.2025

Reviewed: 10.03.2025

Accepted: 01.04.2025