

УДК 553.493, 553.061.2

DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-2

## РЕДКОЗЕМЕЛЬНАЯ И НИОБИЕВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ТРАХИТАХ И РИОЛИТАХ ХУЛАМСКОГО ВУЛКАНО-ПЛУТОНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА, СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ

Е.Н. Кайгородова<sup>1</sup>, О.А. Набелкин<sup>2</sup>, П.М. Карташов<sup>1</sup>, В.А. Лебедев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии рудных месторождений, минералогии, петрографии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер. 35, Москва, 119017 Россия; katmsu@mail.ru

<sup>2</sup> Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, ул. Вересаева 15, Москва 121357, Россия

Статья поступила в редакцию 30.03.2021 г., принята к печати 25.11.2021 г.

## REE-Nb MINERALIZATION IN TRACHYTES AND RHYOLITES OF THE KHULAM VOLCANO-PLUTONIC COMPLEX, NORTH CAUCASUS

E.N. Kaigorodova<sup>1</sup>, O.A. Nabelkin<sup>2</sup>, P.M. Kartashov<sup>1</sup>, V.A. Lebedev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geology of Ore Deposits, Mineralogy, Petrography and Geochemistry, Russian Academy of Sciences,  
Staromonetny per., 35, Moscow 119017, Russia; katmsu@mail.ru

<sup>2</sup> Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements,  
ul. Veresaeva 15, Moscow, 121357 Russia

Received 30.03.2021, accepted 25.11.2021

**Аннотация.** В статье представлены первые данные о вещественном составе РЗЭ и Nb минерализации в среднеюрских умеренно-щелочных кислых и умеренно-кислых породах хуламского вулканоплутонического комплекса на территории Кабардино-Балкарии в центральной части Северного Кавказа. Магматические породы (интрузивная и субвулканическая фации) относятся к контрастно-дифференцированной бимодальной ассоциации: (габбро + трахиандезибазальты) – (трахиты + риолиты). На основе химического состава пород обсуждаются их основные петролого-геохимические характеристики и рудная специализация. Трахиты и риолиты хуламского комплекса отличаются аномально высокими концентрациями Zr (до 3100 г/т), Nb (до 400 г/т) и  $\Sigma$ РЗЭ (>1000 г/т). Это обусловлено спецификой процессов кристаллизационной дифференциации магматических расплавов повышенной щелочности при формировании кислых и умеренно-кислых пород бимодальной ассоциации. Ниобиевая минерализация представлена ильменорутилом и Nb-содержащим брукитом, а РЗЭ минералы – монацитом-(Ce), РЗЭ-содержащим фторапатитом и РЗЭ фторкарбонатами гомологического ряда бастнезит–фатерит. Монацит имеет магматогенную природу и его образование связано с обогащением остаточных магм несовместимыми элементами в процессе кристаллизационной дифференциации. Фторкарбонаты и ильменорутил образовались на более поздних стадиях в результате аутометаморфизма и низкотемпературной гидротермальной переработки кислых магматических пород.

**Ключевые слова:** фторкарбонаты, редкоземельные элементы, ниобий, ильменорутил, хуламский комплекс, Северный Кавказ, Кабардино-Балкария.

**Abstract.** The paper presents the first data on the composition of REE and Nb mineralization in the Middle Jurassic moderately alkaline felsic and moderately acid rocks of the Khulam volcano-plutonic complex at the territory of Kabardino-Balkaria, central part of Northern Caucasus. The igneous rocks of the Khulam Complex (intrusive and subvolcanic facies) belong to the contrasting differentiated bimodal association: (gabbro + basaltic trachyandesite) – (trachyte + rhyolite). Their main petrological and geochemical characteristics and ore mineralization are discussed. The trachytes and rhyolites of the Khulam Complex exhibit the high contents of Zr (up to 3100 ppm), Nb (up to 400 ppm), and  $\Sigma$ REE (>1000 ppm), which are caused by specific process of fractional crystallization of magmatic melts of elevated alkalinity during the formation of acid and

moderately acid rocks. The Nb mineralization includes ilmenorutile and Nb-bearing brookite; REE minerals are monazite-(Ce), REE-bearing fluorapatite and REE fluorocarbonates of the bastnasite–vaterite homologous series. Monazite has magmatic origin and its formation is related to the enrichment of residual magmas in incompatible elements during fractional crystallization. The fluorocarbonates and ilmenorutile formed later as a result of autometamorphism and low-temperature hydrothermal alteration of felsic rocks.

**Keywords:** fluorocarbonates, rare earth elements, niobium, ilmenorutile, Khulam Complex, North Caucasus, Kabardino-Balkarian Republic.

---

**Для цитирования:** Кайгородова Е.Н., Набелкин О.А., Карташов П.М., Лебедев В.А. Редкоземельная и ниобиевая минерализация в трахитах и риолитах хуламского вулcano-плутонического комплекса, Северный Кавказ. Минералогия, 7(4), 33–47. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-2

**For citation:** Kaigorodova E.N., Nabelkin O.A., Kartashov P.M., Lebedev V.A. REE-Nb mineralization in trachytes and rhyolites of the Khulam volcano-plutonic complex, North Caucasus. Mineralogy, 7(4), 33–47. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-2.

---

## Введение

Первые сведения о присутствии в Хуламо-Безенгийском ущелье Балкарии «полевошпатовых пород, богатых ортоклазом», приведены еще в работах известного исследователя Кавказа – Г.В. Абиha (1874). Впоследствии по результатам многолетних геологических исследований, проводившихся в течение всего XX столетия (Лебедев, 1950; Брсук, Масуренков, 1964; Борсук, Цветков, 1973; Борсук и др., 1977), среднеюрские умеренно-щелочные породы, распространенные в этом районе, были выделены в хуламский вулcano-плутонический комплекс (Долгих, 1978). Максимальное распространение породы комплекса имеют в бассейне р. Черек Безенгийский, где до середины прошлого века вблизи наиболее доступного для изучения выхода вулканитов располагался балкарский аул Хулам.

Высокие концентрации Nb и PЗЭ в породах хуламского комплекса впервые отмечены в работе (Горохов и др., 1968). В бассейнах рек Шаудорсу и Шиле в кровле силла, сложенного кислыми и умеренно-кислыми вулканитами хуламского комплекса, наблюдается горизонт интенсивно аргиллизированных риолитов. Повышенные содержания в нем Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.03–0.63 мас. %), Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.004–0.02 мас. %), ZrO<sub>2</sub> (0.009–0.04 мас. %) и BeO (0.003–0.55 мас. %) впервые установлены в 1967 г. в ходе геологоразведочных работ, проводившихся редкометалльной партией Тематической экспедиции СКТГУ (Горохов, 1968). Также отмечена редкометалльная специализация риолитов левобережья р. Черек Балкарский (Спаский, Аксаментов, 1982). В районе г. Шишки (севернее с. Верхняя Балка-

рия) в них отмечаются высокие содержания ZrO<sub>2</sub> (до 0.54 мас. %), Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (до 0.09 мас. %) и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 0.25 мас. %). В среднем течении р. Чайнашки в некке риолитов содержание ZrO<sub>2</sub> достигает 0.14–0.54 мас. %.

В ходе изучения кислых пород из субвулканических тел хуламского вулcano-плутонического комплекса нами также установлено повышенное содержание PЗЭ, Y и редких металлов (Zr, Nb) во многих образцах. Целью данной статьи являлось определение основных минеральных фаз PЗЭ и Nb в трахитах и риолитах хуламского комплекса и объяснение возможного происхождения PЗЭ и редкометалльной минерализации в породах.

## Геологическое положение района исследований

Район исследований расположен в Хуламо-Безенгийском ущелье Кабардино-Балкарской Республики в окрестностях с. Безенги (рис. 1). Фундамент изученной территории (Балкаро-Дигорский блок тектонической зоны Главного хребта) сложен кристаллическими сланцами, гнейсами, гранито-гнейсами и амфиболитами палеозоя, прорванными позднепалеозойскими гранитоидами. Фундамент имеет сложное блоковое строение: горстовые поднятия разделены здесь продольными депрессиями общекавказского простирания (Думалинская и Северная Юрская), выполненными ранне-среднеюрскими, преимущественно осадочными, отложениями (песчаники, аргиллиты, алевролиты, глинистые сланцы). К средней юре относятся магматические породы хуламского комплекса (субвулканические

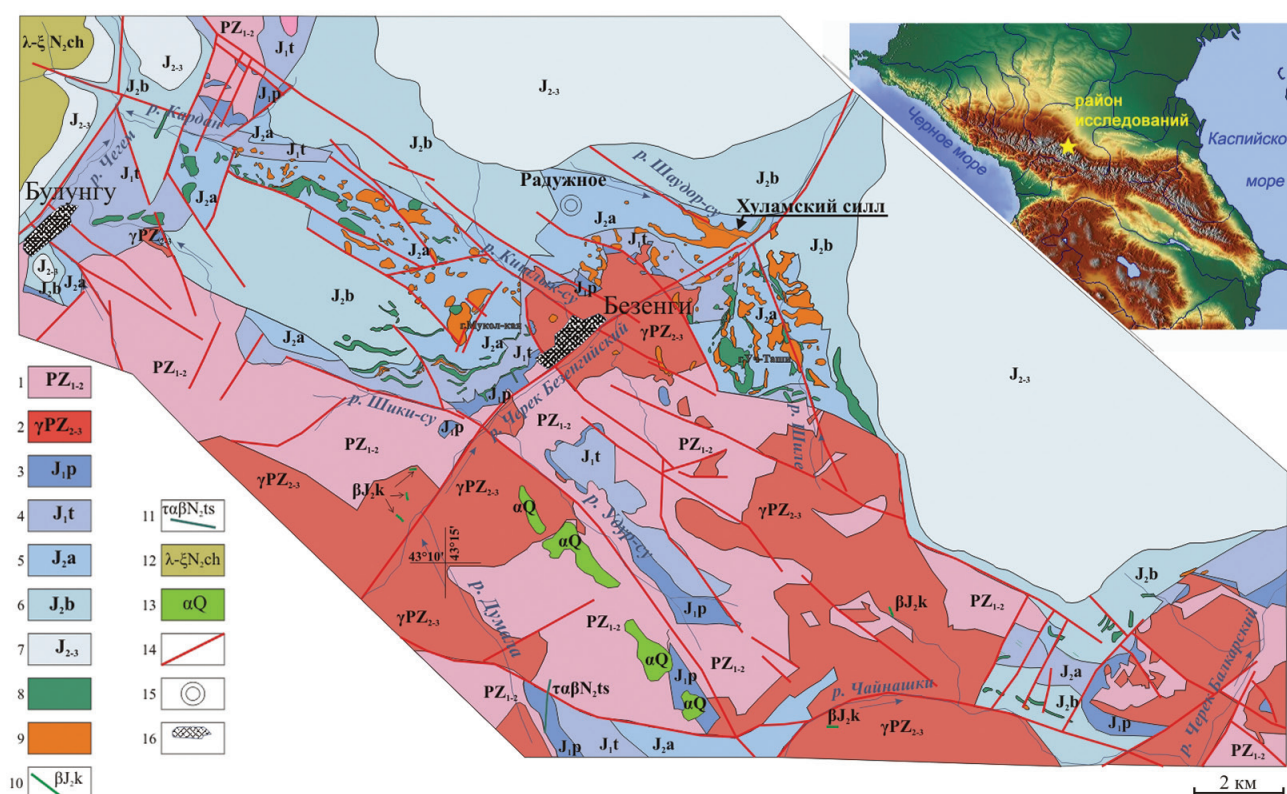


Рис. 1. Схематическая геологическая карта проявлений магматизма среднеюрского хуламского комплекса в междуречье рек Чегем и Черек Балкарский. Составлена по материалам (Горохов и др., 1968; Кайгородова и др., 2021).

1 – палеозойские метаморфические комплексы (гнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты); 2 – позднелпалеозойские гранитоиды; 3–6 – осадочные отложения Северной Юрской депрессии плинсбахского (3), тоарского (4), ааленского (5) и байосского (6) ярусов; 7 – нерасчлененные средне-позднеюрские отложения зоны Скалистого хребта; 8, 9 – магматические породы среднеюрского хуламского комплекса (основного (8) и умеренно-кислого (9) составов); 10 – дайки среднеюрского казбекского комплекса (диабазы); 11 – магматические образования плиоценового цанского комплекса (трахиандеизабазальты); 12 – плиоценовые риолитовые игнимбриты чегемского комплекса; 13 – плейстоценовые андезиты эльбрусского комплекса; 14 – главные разломы; 15 – месторождение Радужное; 16 – контуры населенных пунктов.

Fig. 1. Schematic geological map with igneous rocks of the Middle Jurassic Khulam Complex in the Chegem and Cherek Balkarian interfluvium, composed after (Gorokhov et al., 1968; Kaigorodova et al., 2021).

1 – Paleozoic metamorphic rocks (gneiss, crystalline schist, amphibolite); 2 – Late Paleozoic granitoids; 3–6 – sedimentary rocks of the North Jurassic depression of the Pliensbachian (3), Toarcian (4), Aalenian (5) and Bajocian (6) stages; 7 – unspecified Middle to Late Jurassic sedimentary rocks of the Skalisty Range zone; 8, 9 – Middle Jurassic Khulam complex with mafic (8) and moderately acid (9) rocks; 10 – dikes of the Middle Jurassic Kazbek complex (diabase); 11 – dikes of the Pliocene Tsana Complex (basaltic trachyandesite); 12 – Pliocene rhyolitic ignimbrite of the Chegem Complex; 13 – Pleistocene andesite of the Elbrus Complex; 14 – main faults; 15 – Raduzhnoe deposit; 16 – contours of settlements.

и интрузивные тела габбро, базальтов, трахитов и риолитов) (Горохов и др., 1968; Долгих, 1978; Кайгородова, Лебедев, 2022), а также дайки диабазов казбекского комплекса (Газеев и др., 2018). Также в районе развиты неоген-четвертичные вулканические породы различного состава (Кайгородова и др., 2021).

Породы хуламского комплекса, распространенные в междуречье рек Чегем и Черек Балкарский,

относятся к габбро-трахиандеизабазальт-трахит-риолитовой контрастной бимодальной ассоциации, субвулканические тела которой прорывают терригенно-осадочные толщи нижней – средней юры. Детальное описание пород хуламского комплекса, их возраст и петролого-геохимические характеристики рассмотрены в статье (Кайгородова, Лебедев, 2022). С проявлением среднеюрского магматизма повышенной щелочности по данным



некоторых авторов (Лезин и др., 1976; Мезенина и др., 1982) генетически связано золоторудное месторождение Радужное (рис. 1), а также ряд мелких рудопроявлений. Запасы Au на месторождении по категории  $C_1$  составляют 4.89 т при среднем содержании в рудах 2.9 г/т, запасы Ag по категории  $C_1$  – 96.4 т при среднем содержании в рудах 59 г/т.

Основные породы хуламского комплекса наиболее распространены в бассейнах рек Шиле, Кардан и в районе горы Мукол-Кая. Силлы являются преимущественной формой тел основных пород. Они залегают согласно с вмещающими аргиллитами байоса и имеют мощность порядка 90–100 м при протяженности от 40 до 200 м. Дайки основного состава пространственно тяготеют к силлам, контролируются зонами тектонических нарушений СЗ-простираения и являются в ряде случаев подводящими магматическими каналами для пластовых тел габбро. Основные породы хуламского комплекса представлены серовато-зелеными массивными

полнокристаллическими разностями габбро (от мелко- до крупнозернистых). Матрица пород сложена кристаллами плагиоклаза и клинопироксена. Спорадически присутствуют оливин и биотит. Менее распространены базальтоиды, в которых встречаются миндалины, выполненные хлоритом, кальцитом, цеолитом.

Трахиты и риолиты часто образуют нежки, а также крупные силлообразные и лакколитообразные тела мощностью до 150–200 м и протяженностью до 4.5 км (например, Хуламский силл, рис. 1), а также сложные вулканические постройки (горы Мукол-Кая и Уч-Таши).

Трахиты хуламского комплекса (рис. 2а, в) имеют розовато-серую, розовато-зеленую, светло-коричневую, нередко пятнистую окраску. Текстура пород массивная, пористая или флюидальная. Структура трахитов гломеропорфировая, обусловленная присутствием в основной массе сростков вкрапленников КППШ, иногда плагиокла-

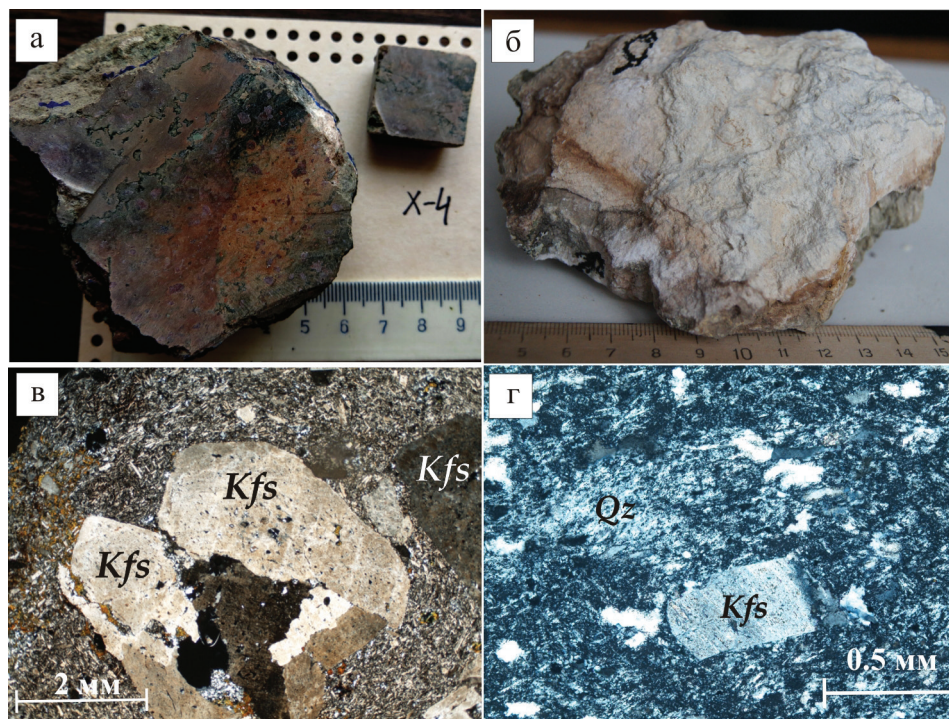


Рис. 2. Макро- и микрофотографии трахитов (а, в) и риолитов (б, г) хуламского комплекса.

а – флюидальные пропилитизированные трахиты, Хуламский силл; б – аргиллизированные риолиты, центральная часть золоторудного месторождения Радужное; в – вкрапленники КППШ в основной трахитовой массе, николи скрещены; г – порфировый флюидальный риолит с вкрапленниками КППШ в интенсивно измененной (аргиллизированной) основной массе, николи скрещены.

Fig. 2. Macroscopic and microscopic images of trachyte (a, v) and rhyolite (b, g) of the Khulam Complex.

а – fluidal propylitized trachyte, Khulam sill; б – argillized rhyolite, the central part of the Raduzhnoe gold deposit; в – K-feldspar phenocrysts in trachytic matrix, × nicols; г – K-feldspar phenocrysts in intensely argillized matrix of porphyry fluidal rhyolite, × nicols.

за. Основная масса изученных вулкаников имеет, как правило, трахитовую структуру и сложена преимущественно микролитами плагиоклаза. Клинопироксен в матрице часто полностью замещен смешанослойными слоистыми силикатами и хлоритом. Стекло матрицы чаще всего полностью замещено смешанослойными силикатами. Акцессорные минералы – циркон, ильменит, вторичные минералы – карбонаты, хлорит, цеолит, халцедон и кварц. По микроклину вкрапленников часто развивается кальцит.

Риолиты хуламского комплекса (рис. 2б, г) – это светло-серые или слабо розоватые породы с массивной, флюидальной или брекчиевидной текстурой. Породы представлены афировыми и порфировыми (вкрапленники составляют 3–10 об. %) разновидностями. Афировые риолиты, как правило, сильнее изменены чем порфировые. В порфировых вулканиках фенокристы представлены КПШ (ортоклаз и санидин), реже кислым плагиоклазом. Фельзитовая основная масса афировых и порфировых риолитов сложена микрокристаллами плагиоклаза (30–35 об. %), КПШ (до 10–15 об. %) и кварца (35–60 об. %). Стекло матрицы полностью замещено минералами группы иллит-сметита и каолинитом. Акцессорные минералы риолитов – циркон, рудный минерал. Вкрапленники ортоклаза в порфировых риолитах часто замещены агрегатом серицита и карбонатов.

### Методы исследования

В ходе полевых работ 2013–2021 гг. авторами была собрана коллекция магматических пород хуламского комплекса в междуречье рек Чегем – Черек Безенгийский. Поскольку максимальные содержания РЗЭ и редкометалльных элементов наблюдались в верхнем горизонте Хуламского силла, в данной статье изучены образцы трахитов и риолитов, отобранных в этом вулканическом теле. Геохимическая характеристика и места отбора изученных образцов приведены в табл. 1. Химический состав пород (породообразующие оксиды) проанализирован рентгенофлуоресцентным методом в ЦКП «ИГЕМ-аналитика» с использованием волнового спектрометра Axios mAX (PANalytical) (аналитик А.И. Якушев). Содержания РЗЭ и ряда редких металлов в вулканиках определены для 22 проб методом ИСП МС (масс-спектрометр X-Series II, аналитик Я.В. Бычкова).

Изучение состава минералов проводилось на СЭМ JSM-5610LV (JEOL) с ЭДС INCA (Oxford Instruments Analytical) и программным обеспечением INCA Energy 450 (ИГЕМ РАН, аналитики А.В. Мохов, П.М. Карташов). Ускоряющее напряжение – 25 кВ, время измерения – 100 с, время обработки рентгеновского сигнала – 6 с. Внутренние стандарты – минералы и соединения с известным составом. Коррекция учета матрицы проводилась по процедуре XPP, учитывающей достоинства методов ZAF и Phi-Rho-Z. Предел обнаружения: ~0.п мас. % для легких химических элементов и 0.0п мас. % – для тяжелых. Аналитическими линиями служили: K $\alpha$ -линия (F, Cl, Si, Ti, Mn, Ca, Fe, P), L $\alpha$ -линия (Nb, Ta, REE). В качестве стандартов применялись чистые элементы, минералы и соединения известного состава. Для фторкарбонатов – накафит (P, F), санидин (Si), килхоанит (Ca), фосфаты РЗЭ (РЗЭ и Y); для оксидов – TiO<sub>2</sub> (Ti), Mn<sub>метал.</sub> (Mn), Nb<sub>метал.</sub> (Nb), FeS<sub>2</sub> (Fe), Ta<sub>метал.</sub> (Ta); для фосфатов – BaF<sub>2</sub> (F), накафит (Ca, F), KCl (Cl), LaPO<sub>4</sub> (La), CePO<sub>4</sub> (Ce), PrPO<sub>4</sub> (Pr), NdPO<sub>4</sub> (Nd), SmPO<sub>4</sub> (Sm), EuPO<sub>4</sub> (Eu), GdPO<sub>4</sub> (Gd).

Минералы также изучены на модернизированном микронзондовом анализаторе Camebax-microbeam (Франция) в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИМГРЭ (г. Москва) по методике (Куликова, Набелкин, 2014). Аналитическими линиями служили: K $\alpha$ -линия (F, Na, Mg, Al, Si, P, Ti, V, Ca, Mn, Fe), L $\alpha$ -линия (Sr, Y, Zr, Ba, La, Ce, Nd, Tb, Dy, Er, Tm, Yb, Lu, Y, Nb, Ta, Pb), L $\beta_1$ -линия (Pr, Sm, Eu, Gd, Ho), M $\alpha$ -линия (Th), M $\beta$ -линия (U). В качестве стандартов применялись: MgF<sub>2</sub> (F), накафит (Na), форстерит (Mg и Si), аугелит (Al), SmPO<sub>4</sub> (P), TiO<sub>2</sub> (Ti), V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (V), апатит (Ca), Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Mn), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Fe), целестин (Sr), ZrO<sub>2</sub> (Zr), барит (Ba), фосфаты РЗЭ (РЗЭ и Y), Nb<sub>метал.</sub> (Nb), NdTa<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Ta), галенит (Pb), ThO<sub>2</sub> (Th) и UO<sub>2</sub> (U).

### Результаты и их обсуждение

**Петролого-геохимические характеристики пород хуламского комплекса.** Мафические разновидности пород хуламского комплекса (плутоническая и субвулканическая фации) содержат 48.7–56.4 мас. % SiO<sub>2</sub>, 4.7–6.7 мас. % K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O (при 0.01–1.20 мас. % K<sub>2</sub>O), 4.5–7.4 мас. % MgO и относятся к умереннощелочным магматическим породам. Это в разной степени дифференцированные умеренно-титанистые породы, по соотношению K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> – умеренно-калиевые и низкокалиевые, по соотношению Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и щелочей – низкоглиноземистые. Данные

Таблица 1  
Table 1  
Содержания основных петрогенных элементов (мас. %), а также РЗЭ и некоторых редких элементов (ppm) в трахитах и риолитах хуламского комплекса

Contents of oxides (wt. %) and rare earth and selected trace elements (ppm) in trachyte and rhyolite of the Khulam Complex																							
Обр.	4	X-4	ПЦ-1	12	15	13	7	X-2	14	8	X-5	5	6	10	2	9	X-3	16	1	X-1	3	17	
Координаты	43°14'26.2"N 43°18'29.8"E	43°14'26.4"N 43°18'30.1"E	43°14'24.7"N 43°18'31.7"E	43°14'11.3"N 43°19'03.6"E	43°14'08.2"N 43°19'24.3"E	43°14'08.7"N 43°19'18.9"E	43°14'22.6"N 43°18'35.1"E	43°14'24.7"N 43°18'31.9"E	43°14'08.8"N 43°19'21.9"E	43°14'16.6"N 43°18'48.3"E	43°14'25.8"N 43°18'31.1"E	43°14'21.0"N 43°18'37.2"E	43°14'21.6"N 43°18'36.6"E	43°14'14.3"N 43°18'57.9"E	43°14'24.5"N 43°18'32.8"E	43°14'14.4"N 43°18'58.4"E	43°14'25.2"N 43°18'32.6"E	43°14'07.0"N 43°19'23.0"E	43°14'23.6"N 43°18'34.1"E	43°14'24.7"N 43°18'31.7"E	43°14'21.7"N 43°18'35.1"E	43°14'07.9"N 43°19'34.4"E	
SiO <sub>2</sub>	53.91	55.05	59.34	64.20	64.31	64.93	67.22	68.68	68.86	69.31	71.03	71.16	71.83	72.86	73.50	74.11	74.97	77.71	79.83	79.89	80.01	80.08	
TiO <sub>2</sub>	0.42	0.20	0.32	0.42	0.37	0.34	0.19	0.20	0.35	0.29	0.21	0.24	0.25	0.24	0.35	0.25	0.45	0.19	0.15	0.16	0.16	0.16	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.59	10.72	14.13	16.97	17.24	19.41	9.23	14.21	14.84	15.60	14.08	13.66	12.27	10.08	11.00	13.98	10.02	8.79	7.95	10.17	8.48	8.19	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.51	5.98	10.97	4.42	5.25	1.17	2.30	0.93	4.68	4.15	0.87	3.43	5.61	9.10	5.55	2.17	5.01	3.68	2.67	1.38	1.78	3.39	
MnO	0.04	0.40	0.14	0.09	0.09	0.02	0.34	0.14	0.06	0.07	0.13	0.08	0.07	0.15	0.12	0.04	0.05	0.06	0.16	0.06	0.08	0.03	
MgO	2.88	1.13	2.05	0.66	0.99	0.13	0.49	0.18	0.90	0.59	0.20	0.40	0.95	3.08	1.90	0.09	1.62	0.77	0.24	0.19	0.14	0.55	
CaO	0.29	12.20	1.77	2.57	0.31	0.87	8.35	3.49	0.20	0.63	2.50	1.91	1.55	0.24	2.16	0.64	0.73	0.75	3.92	0.78	1.86	1.17	
Na <sub>2</sub> O	0.19	3.45	2.50	6.74	7.97	8.56	2.23	4.55	6.05	7.22	4.68	6.16	4.73	0.85	0.86	7.20	0.97	1.07	4.08	3.59	2.80	2.32	
K <sub>2</sub> O	7.07	1.38	3.40	3.53	2.34	3.71	3.53	4.81	3.03	1.88	4.31	1.94	2.21	2.69	2.65	1.39	2.94	5.29	0.29	2.62	3.07	3.36	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.03	0.15	0.06	0.06	0.11	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	
S	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.05	0.06	<0.02	
Σ	6.12	8.93	4.72	0.29	1.27	0.34	5.53	2.29	0.41	0.17	1.53	0.22	0.00	0.13	0.52	0.00	3.02	1.72	0.14	0.69	0.49	0.00	
Σ <sub>ред</sub>	99.09	99.52	99.42	99.97	100.20	99.54	99.44	99.63	99.44	99.97	99.65	99.25	99.52	99.46	98.66	99.93	99.84	100.05	99.46	99.61	98.97	99.28	
Zr	3394	1302	1479	567	1008	1038	1108	1210	816	1029	1162	1840	2582	1743	1191	1260	227	1839	1423	1827	1713	1575	
Y	230	104	178	42.0	85.0	90.0	95.0	107	29.0	38.0	85.0	152	133	112.	109	53.0	23.0	124	85.0	143	153	100	
Nb	267	279	201	45.0	73.0	100	124	134	76.0	83.0	148	301	348	153	120	121	18.0	160	165	224	211	156	
Ta	23.0	14.0	14.0	2.60	4.60	4.80	8.60	15.0	3.20	4.60	15.0	21.0	30.0	10.0	7.30	5.90	0.80	11.0	9.50	9.30	10.7	9.30	
La	158	296	115	33.0	14.0	40.0	92.0	65.0	40.0	69.0	58.0	193	122	115	102	68.0	30.0	101	80.0	108	123	69.0	
Ce	320	394	217	64.0	24.0	83.0	179	153	35.0	131	135	392	220	226	203	129	57.0	196	159	208	240	141	
Pr	35.0	66.0	24.0	7.40	3.90	9.50	19.0	16.0	8.80	13.0	14.0	37.0	25.0	24.0	22.0	14.0	6.50	20.0	17.0	24.0	26.0	14.0	
Nd	166	215	82.0	35.0	17.0	46.0	90.0	56.0	30.0	64.0	46	180	115	111	101	68.0	24.0	98.0	82.0	87.0	125	70.0	
Sm	31.0	34.0	16.0	5.50	3.70	8.70	14.0	12.5	5.30	9.50	9.60	22.0	24.0	15.0	13.0	11.0	4.2.0	16.0	13.0	18.0	19.0	13.0	
Eu	0.90	0.40	0.60	1.00	0.40	0.60	0.40	0.90	0.40	0.50	0.60	0.30	0.40	0.30	0.50	0.40	0.40	0.30	0.20	0.50	0.50	0.20	
Gd	31.0	27.0	18.0	4.50	3.40	7.90	11.0	14.0	3.40	6.70	10.0	15.0	20.0	12.0	8.80	7.70	3.80	14.0	11.0	21.0	15.0	12.0	
Tb	6.90	3.30	3.20	0.90	0.70	1.60	2.50	2.40	0.80	1.30	1.80	3.80	4.50	2.80	2.30	1.60	0.50	3.10	2.40	3.60	3.05	2.60	
Dy	46.0	18.0	26.0	6.00	4.00	10.0	16.0	17.0	5.00	7.00	13.0	27.0	28.0	20.0	18.0	10.0	3.00	21.0	15.0	23.0	24.0	17.0	
Ho	9.30	3.70	6.50	1.20	1.00	2.30	3.40	3.90	1.10	1.50	2.90	6.10	5.30	4.19	4.50	2.10	0.80	4.50	3.20	4.90	5.30	3.70	
Er	26.0	11.0	21.0	3.50	3.00	7.00	10.0	12.0	3.40	4.30	9.50	19.0	14.0	13.0	16.0	5.90	2.70	13.0	9.40	15.0	16.0	11.0	
Tm	3.70	1.60	3.50	0.50	0.50	1.10	1.50	2.00	0.50	0.70	1.60	3.20	2.10	2.00	2.70	0.90	0.40	2.10	1.40	2.20	2.50	1.70	
Yb	22.0	9.60	22.0	3.60	3.30	7.30	9.60	13.0	3.90	4.90	10.0	22.0	13.0	13.0	17.0	6.20	3.20	13.0	9.40	14.0	15.0	10.0	
Lu	3.10	1.30	3.10	0.60	0.50	1.20	1.30	1.80	0.70	0.80	1.50	3.10	1.80	1.90	2.50	1.00	0.50	1.90	1.40	2.00	2.20	1.50	
Σ <sub>ред</sub>	859	1082	559	166	79	227	449	369	138	316	314	923	596	560	513	326	137	506	406	531	618	367	



породы характеризуются повышенными содержаниями Zr (до 235 г/т) по сравнению с кларками этих элементов в основных породах.

Трахиты содержат 59.7–65.5 мас. %  $\text{SiO}_2$ , 7.7–12.2 мас. %  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (2.1–7.2 мас. %  $\text{K}_2\text{O}$ ) и относятся к умеренно-щелочной серии (табл. 1). Это высокодифференцированные ( $\text{Mg\#}$  0.19–0.55,  $\text{Ni} < 20$  г/т,  $\text{Cr} < 25$  г/т и  $\text{Co} < 20$  г/т) породы, по соотношению  $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  – высококалиевые. Риолиты содержат 68.2–84.6 мас. %  $\text{SiO}_2$ , 2.3–12.3 мас. %  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (0.3–12.1 мас. %  $\text{K}_2\text{O}$ ) и относятся к умеренно-щелочной и известково-щелочной сериям (табл. 1). Они характеризуются существенными вариациями содержаний  $\text{SiO}_2$  и щелочей, в том числе отношений  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ . Последний параметр позволяет разделить риолиты на четыре подгруппы: ультракалиевые ( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 40$ ), высококалиевые ( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  15–40), калиевые ( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  2–15) и низкокалиевые ( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 2$ ).

По данным ИСП-МС анализа повышенные содержания РЗЭ установлены в кислых и умеренно-кислых породах. Суммарное содержание РЗЭ в риолитах и трахитах хуламского комплекса иногда достигает 1100 г/т (табл. 1). Кислые и умеренно-кислые породы хуламского комплекса также характеризуются повышенными содержаниями Zr (до 2700 г/т), причем в интенсивно измененных аргиллизированных риолитах его концентрация достигает 3100 г/т (табл. 1). Спектры распределения микроэлементов для умеренно-кислых (трахиты) и кислых (риолиты) пород хуламского комплекса (рис. 3а), нормированные по отношению к базальтам типа N-MORB, показывают обогащение литофильными элементами с крупными ионными радиусами (КИР) в 100 и более раз, а также Pb, Th и U в 500 и более раз, высокочargedными элементами ( $\text{VЗЭ} - \text{Nb, Ta, Zr, Hf}$ ) от 10 до 100 раз.

Трахиты по сравнению с основными разностями пород характеризуются более заметным обогащением ЛРЗЭ по отношению к хондритовому резервуару (рис. 3б), близкими концентрациями ТРЗЭ и заметной отрицательной Eu аномалией в спектрах распределения. В секторе ЛРЗЭ (от La до Eu) спектры имеют пологий наклон, в секторе ТРЗЭ они субгоризонтальны. Риолиты демонстрируют широкие вариации концентраций ЛРЗЭ с обогащением по отношению к хондритовому резервуару от 50 до 1000 раз, а также ТРЗЭ с обогащением от 10 до 100 раз. Отрицательная Eu аномалия в спектрах имеет отчетливый характер.

Ведущим процессом, ответственным за формирование бимодальной ассоциации хуламского комплекса, являлась кристаллизационная дифференциация, в результате которой произошло существенное накопление несовместимых элементов в кислых вулканитах (Кайгородова, Лебедев, 2022). Концентрации Nb, Zr, Y и ВЗЭ, в целом, положительно коррелируют с содержанием  $\text{SiO}_2$  в породах (рис. 4), с максимальным обогащением кислых пород (при этом содержания Nb и Ta в разных образцах изученных вулканитов заметно варьируют). Очевидно, что именно процессы кристаллизационной дифференциации, сыгравшие основную роль в формировании расплавов для трахитов и риолитов, определили РЗЭ-редкометальную (Zr, Nb, Ta) специализацию для кислых пород хуламского вулканоплутонического комплекса.

Наиболее высокие концентрации РЗЭ, редких металлов и Zr наблюдаются в интенсивно аргиллизированных трахитах и риолитах (табл. 1), что, вероятно, связано с автометаморфическими преобразованиями исходных вулканитов. Эти преобразования проявились на поздней стадии магматического процесса и выразились в окварцевании для одной части пород с выносом щелочей и других породообразующих оксидов (содержание  $\text{SiO}_2$  в результате этого процесса в конечном итоге в некоторых породах достигает 80–85 мас. %) и в избирательном выносе Na (вплоть до следовых количеств в остатке) и одновременном привносе K – для другой. В то же время для части риолитов изменение их начального состава, весьма вероятно, было связано с воздействием поздних наложенных метасоматических процессов, проявленных в том числе в период формирования золоторудной минерализации в регионе.

Предполагаемая бериллиевая специализация хуламского комплекса, упоминаемая в работах (Горохов и др., 1968; Газеев и др., 2019), не подтверждается нашими данными: в изученных породах содержания Be обычно не превышают кларковых (Кайгородова, Лебедев, 2022). Исключение составляют единичные образцы интенсивно метасоматически переработанных риолитов, в которых отмечаются несколько повышенные концентрации Be (до 25 г/т). Ранее предполагалось, что концентратором Be является гадолинит, единичные зерна которого обнаружены в протоlochках из риолитов (Горохов и др., 1968). Однако учитывая относительно невысокие содержания BeO в гадолините (8.83 мас. %

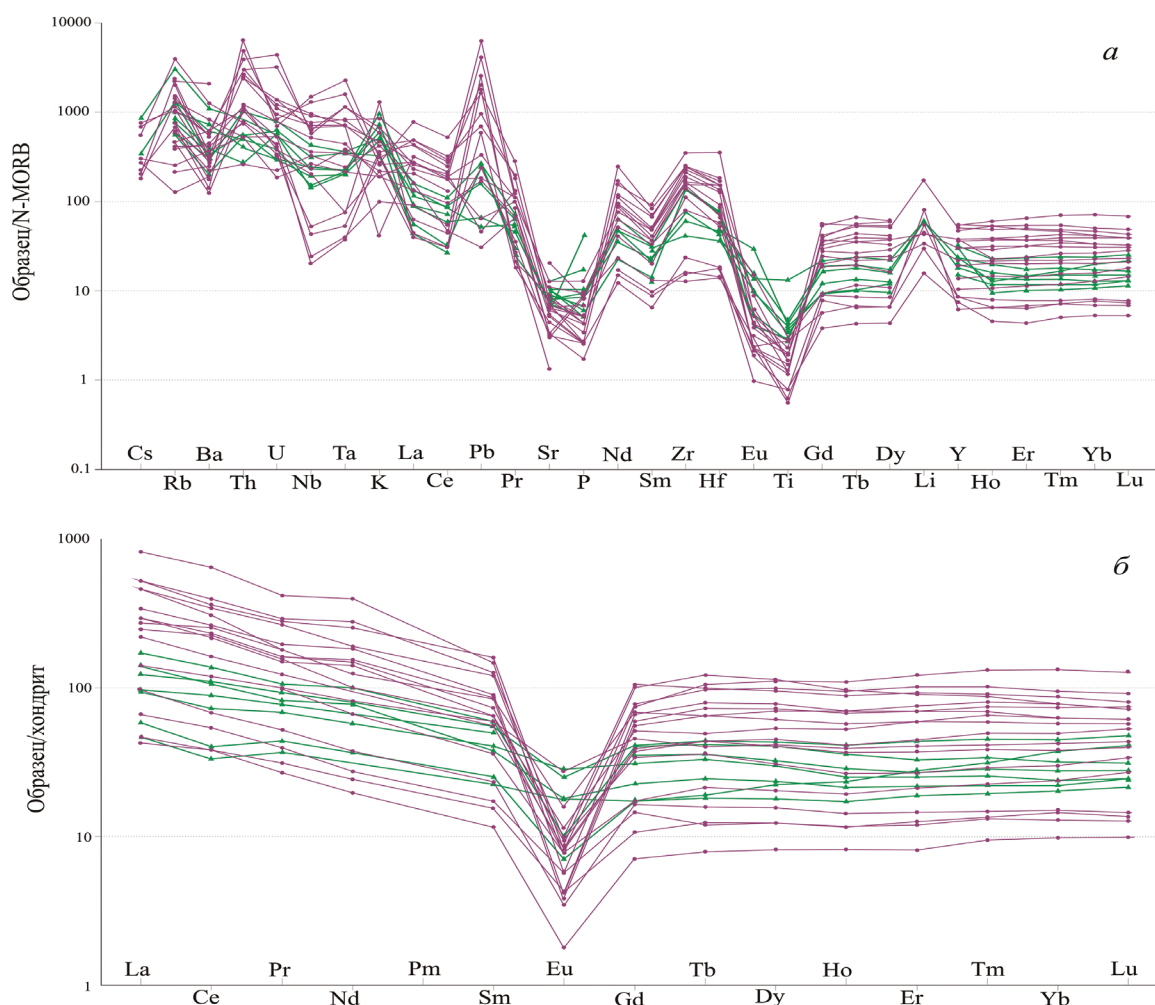


Рис. 3. N-MORB-нормализованные (а) и хондрит-нормализованные (б) спектры распределения редких (а) и редкоземельных (б) элементов в трахитах (зеленое) и риолитах (фиолетовое) хуламского комплекса.

Данные нормированы по (Sun, McDonough, 1989; Anders, Grevesse, 1989).

Fig. 3. N-MORB-normalized (a) and chondrite-normalized (б) patterns of trace (a) and rare earth (б) elements of trachyte (green) and rhyolite (violet) of the Khulam Complex.

The data normalized according to (Sun, McDonough, 1989, Anders, Grevesse, 1989).

(Segalstad, Larsen, 1978)) и крайне низкое содержание этого минерала в породах хуламского комплекса, вероятнее всего, Be был сконцентрирован в кислом стекле матрицы.

**РЗЭ и редкометалльная минерализация в риолитах и трахитах.** РЗЭ минерализация в трахитах представлена РЗЭ фторкарбонатами, реже монацитом-(Ce) и РЗЭ-содержащим фторапатитом. РЗЭ фторкарбонаты образуют тонкую рассеянную вкрапленность с размером зерен первые микрометры (очень редко до 50–60 мкм) (рис. 5а). Нередко они образуют сростания с кальцитом, замещающим ортоклаз вкрапленников в вулканитах (рис. 5б). Они также образуют равномернорассеянную вкрапленность в основной массе интенсивно измененных вулканитов. Фторкарбонатная РЗЭ

минерализация в кислых породах хуламского комплекса представлена отдельными членами гомологического ряда бастнезит–фатерит (синхизит-(Ce) и редко паризит-(Ce)) и, как правило, приурочена к интенсивно аргиллизированным вулканитам. В гомологическом ряду бастнезит–фатерит от бастнезита к синхизиту последовательно увеличивается содержание фатеритового компонента  $\text{CaCO}_3$  и уменьшается бастнезитового  $\text{LPZECO}_3\text{F}$  (Семенов, 2001). В пределах ряда кроме крайних членов (бастнезита  $\text{PZECO}_3\text{F}$  и фатерита  $\text{CaCO}_3$ ) выделяются следующие самостоятельные минералы: синхизит  $\text{CaPZECO}_3\text{F}$ , паризит  $\text{CaPZECO}_3\text{F}_2$  и редкий рентгенит  $\text{Ca}_2(\text{Ce,La})_3(\text{CO}_3)_5\text{F}_3$  с соотношениями конечных минералов 1 : 1, 2 : 1 и 3 : 2, соответственно. РЗЭ в минералах, как правило, представлены



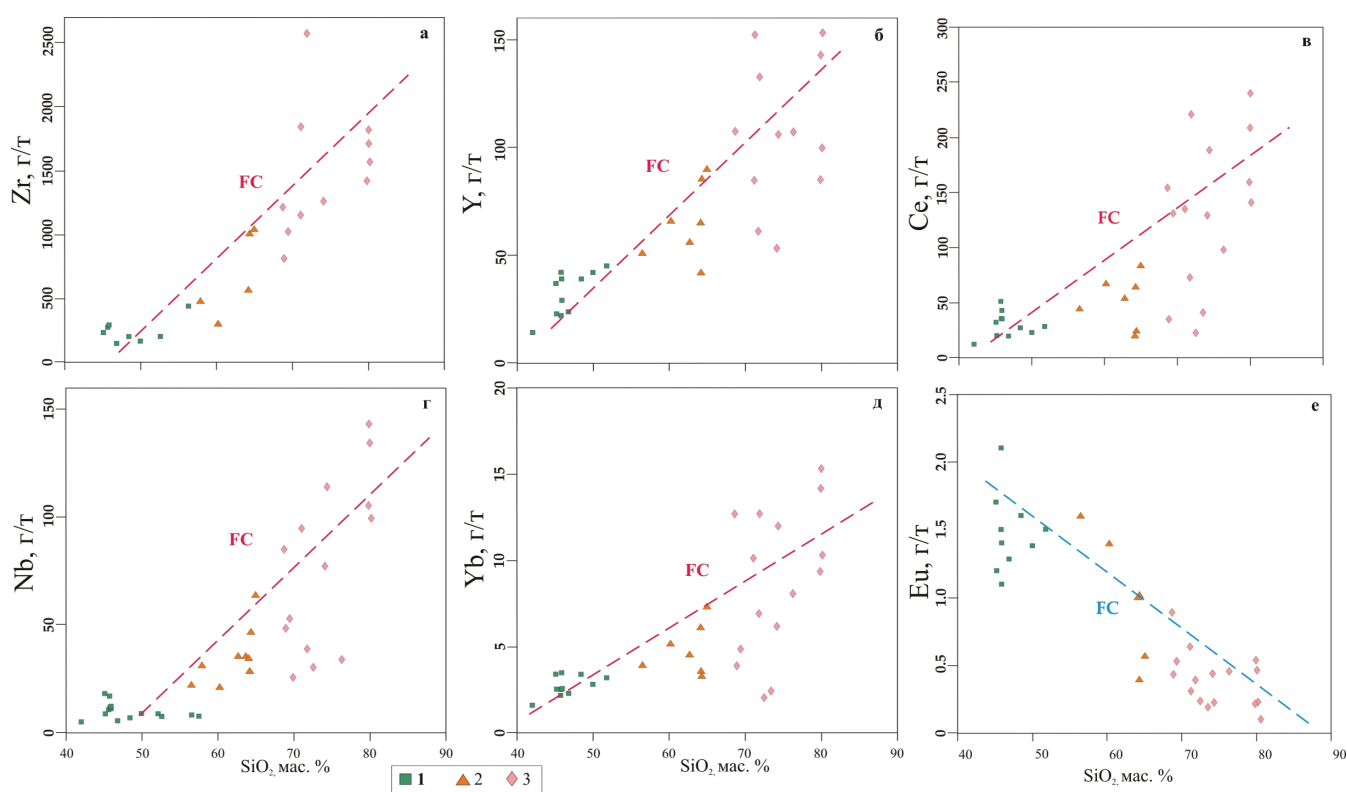


Рис. 4. Бинарные диаграммы Харкера (микроэлементы– $\text{SiO}_2$ ) с трендами кристаллизационной дифференциации для магматических пород хуламского комплекса (Кайгородова, Лебедев, 2022).

Породы: 1 – основные; 2 – трахиты; 3 – риолиты.

Fig. 4. Harker binary diagrams (trace elements– $\text{SiO}_2$ ) with fractionation crystallization trends for igneous rocks of the Khulam Complex (Kaigorodova, Lebedev, 2022).

Rocks: 1 – mafic; 2 – trachyte; 3 – rhyolite.

Ce, La, Y и Nd, образуя, в зависимости от преобладания основного РЗЭ, минералы групп синхизита, бастнезита, паризита и рентгенита. Среди РЗЭ в синхизите содержание  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (21.51–22.96 мас. %), превышает содержание  $\text{La}_2\text{O}_3$  (12.41–18.06 мас. %) и  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (9.50–11.36 мас. %), также присутствует  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  (1.66–2.39 мас. %) и  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  (до 2.15 мас. %) (табл. 2). Паризит встречается гораздо реже синхизита; в нем также наблюдается преобладание  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (21.51 мас. %) над  $\text{La}_2\text{O}_3$  (15.55 мас. %) и  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (7.04 мас. %), присутствует  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  (1.58 мас. %) и  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  (0.76 мас. %) (табл. 2).

Монацит-(Ce) образует мелкую вкрапленность (до 30 мкм) в основной массе пород (рис. 5в), иногда встречается в виде вrostков размером первые микрометры в РЗЭ-содержащем фторапатите в ассоциации с кальцитом и ильменорутилом. Среди РЗЭ (табл. 3) в монаците-(Ce) преобладает  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (30.07 мас. %), в значительных количествах содержатся  $\text{La}_2\text{O}_3$  (16.88 мас. %),  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (9.52 мас. %) и  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  (2.65 мас. %). Из ТРЗЭ присутствуют  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  (2.46 мас. %) и  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  (1.55 мас. %).

Anatum является типичным акцессорным минералом всех пород хуламского вулcano-плутонического комплекса, однако его РЗЭ-содержащая разновидность встречается только в интенсивно гидротермально измененных кислых породах. РЗЭ-содержащий апатит образует мелкие кристаллы размером до 40 мкм (рис. 5и) и встречается только в ассоциации с монацитом-(Ce), кальцитом и ильменорутилом (рис. 5е, ж, з). Содержания РЗЭ $_2\text{O}_3$  в минерале достигают 10.23 мас. % (табл. 3, точка 3.3). Среди РЗЭ в апатите отмечены  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (2.31–5.26 мас. %),  $\text{La}_2\text{O}_3$  (0.90–2.28 мас. %) и  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (0.86–2.12 мас. %). Апатит с включениями монацита-(Ce), как правило, обеднен РЗЭ.

Nb минерализация в породах представлена ильменорутилом и Nb-содержащими брукитом и ильменитом. Nb-содержащий брукит встречен в основной массе аргиллизированных и карбонизированных риолитов, где он образует сростки кристаллов уплощенно-призматического габитуса (рис. 5д) размером до 500 мкм. Содержания  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  в бруките достигают 7.87 мас. % (табл. 4).

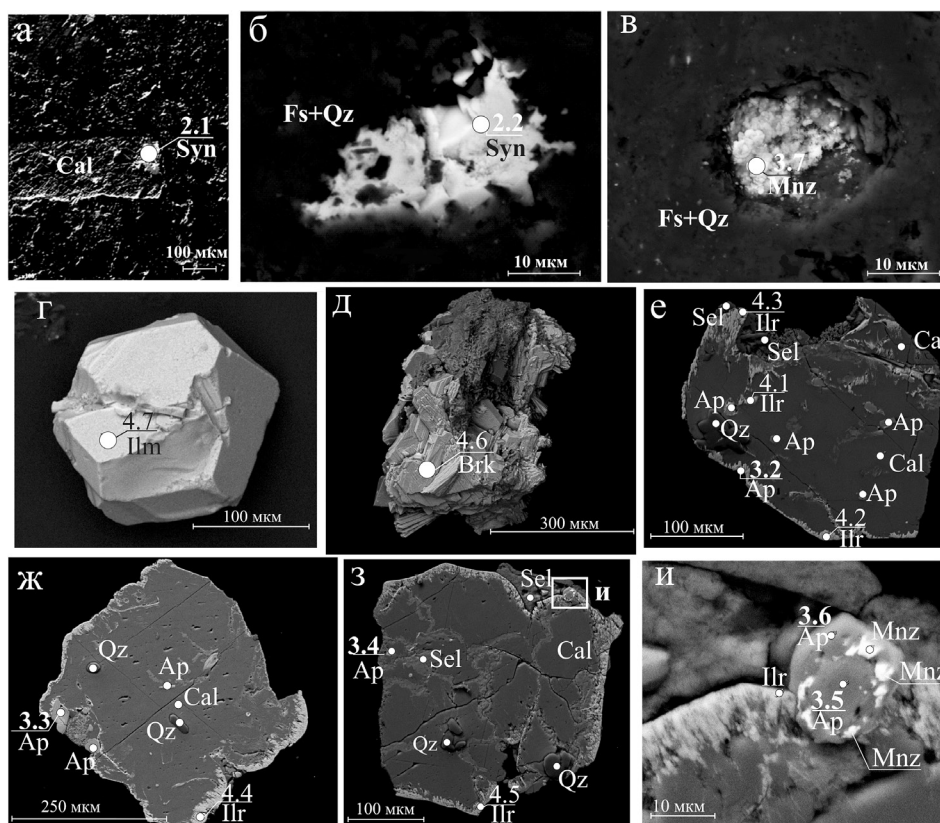


Рис. 5. Фторкарбонатная и редкометалльная минерализация в магматических породах хуламского комплекса.

а – синхизит-(Ce) (Syn) в кальците (Cal), замещающем вкрапленник КФС, в аргиллизированном риолите, обр. РЦ-1; б – синхизит-(Ce) в основной массе карбонатизированного аргиллизированного риолита, обр. X-4; в – монацит-(Ce) (Mnz) в основной массе карбонатизированного аргиллизированного риолита, обр. X-4; г – акцессорный ильменит (Ilm) из трахита; д – Nb-содержащий брукит (Brk) из трахита; е, ж, з, и – ассоциация ильменорутит (Ilr) + кальцит + РЗЭ-содержащий фторапатит (Ap) + монацит-(Ce) из трахита.

Sel – селадонит, Qz – кварц. BSE фото.

Fig. 5. Fluorocarbonate and rare metal mineralization of igneous rocks of the Khulam Complex.

а – synchysite-(Ce) (Syn) in calcite (Cal), which replaces K-feldspar phenocryst in argillized rhyolite, sample RTs-1; б – synchysite-(Ce) in carbonatized argillized rhyolite, sample X-4; в – monazite-(Ce) (Mnz) in carbonatized argillized rhyolite, sample X-4; г – accessory ilmenite (Ilm) in trachyte; д – Nb-bearing brookite (Brk) in trachyte; е, ж, з, и – assemblage of ilmenorutile (Ilr) + calcite + REE-bearing fluorapatite (Ap) + monazite-(Ce) in trachyte.

Sel – celadonite, Qz – quartz. BSE photo.

Рутит с повышенным содержанием Nb и Fe впервые был описан Н.И. Кокшаровым в 1854 г. и выделен под собственным названием «ильменорутит». В 2007 г. «ильменорутит» как самостоятельный минеральный вид был дискредитирован (Burke, 2007). Однако в виду того, что рутит с содержаниями Nb ниже предела обнаружения РСМА широко распространен как акцессорный минерал во всех породах изучаемого района, для Nb-содержащего рутита далее мы будем использовать термин «ильменорутит».

Ильменорутит образует кристаллы и сростки черного цвета размером до 150–200 мкм. Содержание Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в минерале достигает 21.84 мас. %, кон-

центрации Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> низкие (до 0.87 мас. %), отношение Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> варьирует в узких пределах (0.02–0.04), ванадий присутствует только в некоторых зернах (до 0.40 мас. % V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) (табл. 4). Как видно на (рис. 5е, ж, з), ассоциация ильменорутит + кальцит + РЗЭ-содержащий фторапатит + монацит-(Ce) образует сложные минеральные агрегаты с «рубашкой» ильменорутита и кварцем, РЗЭ-содержащим апатитом и поздним кальцитом в полостях. В РЗЭ-содержащем апатите видны структуры распада монацита-(Ce) (рис. 5и).

В основной массе кислых вулканитов хуламского комплекса в качестве акцессорного минерала отмечается также ильменит (рис. 5г), содержания

Таблица 2

Состав РЗЭ фторкарбонатов (мас. %) из аргиллизированных риолитов хуламского комплекса

Table 2

Chemical composition of REE fluorocarbonates (wt. %) from argillized rhyolite of the Khulam Complex

Минерал	Синхизит				Паризит
№ анализа	1	2	3	4	
№ точки на рис. 5	2.1			2.2	
CaO	16.96	16.34	17.89	17.83	8.53
MnO	0.00	0.02	0.05	0.00	0.03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.29	0.05	0.02	0.00	3.76
SrO	0.09	0.16	0.03	0.00	0.11
BaO	0.08	0.33	0.18	0.00	0.00
PbO	0.11	0.20	0.03	0.00	0.28
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.01	0.04	0.00	0.00
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.49	0.13	0.16	0.00	0.38
ZrO <sub>2</sub>	0.00	0.34	0.15	0.00	0.17
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.09	0.00	0.00	0.00
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31	0.05	0.10	0.00	0.00
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.68	21.51	22.96	21.64	0.00
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.06	12.41	13.31	13.31	15.55
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.36	9.50	10.79	9.71	7.04
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.15	0.63	1.11	0.00	0.76
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.20	2.09	2.39	1.66	1.58
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.68	0.37	0.49	0.00	0.64
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	0.00	0.06	0.00	0.00
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	0.05	0.00	0.00	0.02
ThO <sub>2</sub>	0.30	0.10	0.33	0.00	0.35
F				6.68	
Сумма	75.11	64.38	70.19	70.83	60.71
O ≡ F2	0.00	0.00	0.00	2.81	0.00
CO <sub>2</sub> расч.	28.87	25.99	28.00	26.37	21.79
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> расч.	5.91	5.32	5.73	0	5.95
Сумма <sup>1</sup>	109.89	95.69	103.92	94.39	88.45
1 – Ca <sub>0.92</sub> (Ce <sub>0.40</sub> La <sub>0.34</sub> Nd <sub>0.21</sub> Pr <sub>0.04</sub> Sm <sub>0.04</sub> Gd <sub>0.01</sub> Y <sub>0.01</sub> Fe <sub>0.01</sub> ) <sub>1.07</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) 2 – (Ca <sub>0.99</sub> Sr <sub>0.01</sub> Ba <sub>0.01</sub> ) <sub>1.03</sub> (Ce <sub>0.44</sub> La <sub>0.26</sub> Nd <sub>0.19</sub> Pr <sub>0.04</sub> Sm <sub>0.01</sub> Gd <sub>0.01</sub> Zr <sub>0.01</sub> ) <sub>0.97</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) 3 – Ca <sub>1.01</sub> (Ce <sub>0.44</sub> La <sub>0.26</sub> Nd <sub>0.20</sub> Pr <sub>0.05</sub> Sm <sub>0.02</sub> Gd <sub>0.01</sub> ) <sub>0.99</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) 4 – Ca <sub>1.06</sub> (Ce <sub>0.44</sub> La <sub>0.27</sub> Nd <sub>0.19</sub> Pr <sub>0.03</sub> Gd <sub>0.01</sub> ) <sub>1.17</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F 5 (Ca <sub>0.92</sub> Sr <sub>0.01</sub> ) <sub>0.95</sub> (Ce <sub>0.79</sub> La <sub>0.58</sub> Nd <sub>0.25</sub> Fe <sub>0.29</sub> Pr <sub>0.06</sub> Sm <sub>0.03</sub> Gd <sub>0.02</sub> Y <sub>0.02</sub> Zr <sub>0.01</sub> Th <sub>0.01</sub> Pb <sub>0.01</sub> ) <sub>2.06</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>					

Примечание. Образец X-4.

Note. Sample X-4.

Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в котором варьируют от пределов обнаружения до 2–3 мас. %, а содержания Та – ниже предела обнаружения (табл. 4). Повышенные содержания Nb в ильмените связаны, по-видимому, с процессами кристаллизационной дифференциации

(рис. 4) пород хуламского-вулcano-плутонического комплекса.

Цирконий входит в состав акцессорного циркона, который наблюдается в большом количестве в шлифах и протоочках пород хуламского комплек-

<sup>1</sup> Прим. ред. Аналитические ошибки, в частности избыточные суммы анализов, при определении состава минералов, содержащих РЗЭ и легкие элементы одновременно, методом ЭД анализа объясняются сложностями с подбором условий получения ЭД спектров для каждого минерала, что невозможно при рутинном анализе. Кроме того, карбонаты РЗЭ и некоторые другие минералы возгоняются под электронным пучком, что также влечет за собой ошибки определения. Повторный анализ одних и тех же зерен может быть ограничен сказанным выше и мелкими размерами зерен.



Таблица 3

**Состав РЗЭ-содержащего фторапатита и монацита (мас. %) из риолитов и трахитов хуламского комплекса**

Table 3

**Composition of REE-bearing fluorapatite and monazite (wt. %) from rhyolite and trachyte of the Khulam complex**

Минерал	Апатит			Монацит
№ анализа	1	2	3	4
№ точки на рис. 5	3.1	3.2	3.3	3.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	39.37	40.45	38.62	34.87
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.12	0.90	2.28	16.88
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.48	2.31	5.26	30.07
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.57	2.65
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.86	1.02	2.12	9.52
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	2.46
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	1.55
CaO	51.54	52.56	47.22	0.83
F <sub>изм</sub>	2.70	2.50	2.90	
Cl		0.10		
Сумма	98.07	99.84	98.97	98.84
H <sub>2</sub> O	0.41	0.52	0.28	
O≡F, Cl	1.14	1.07	1.22	
Сумма	97.34	99.28	98.03	

Эмпирические формулы:

1. (Ca<sub>4.90</sub>Ce<sub>0.08</sub>La<sub>0.04</sub>Nd<sub>0.03</sub>)<sub>5.04</sub>(P<sub>2.96</sub>O<sub>12</sub>)[F<sub>0.76</sub>(OH)<sub>0.24</sub>]<sub>1.00</sub>
2. (Ca<sub>4.88</sub>Ce<sub>0.07</sub>La<sub>0.03</sub>Nd<sub>0.03</sub>)<sub>5.01</sub>(P<sub>2.97</sub>O<sub>12</sub>)[F<sub>0.69</sub>Cl<sub>0.01</sub>(OH)<sub>0.30</sub>]<sub>1.00</sub>
3. (Ca<sub>4.58</sub>Ce<sub>0.17</sub>La<sub>0.08</sub>Nd<sub>0.07</sub>Pr<sub>0.02</sub>)<sub>4.90</sub>(P<sub>2.96</sub>O<sub>12</sub>)[F<sub>0.83</sub>(OH)<sub>0.17</sub>]<sub>1.00</sub>
4. (Ce<sub>0.41</sub>La<sub>0.23</sub>Nd<sub>0.13</sub>Pr<sub>0.04</sub>Sm<sub>0.03</sub>Gd<sub>0.02</sub>Ca<sub>0.03</sub>)<sub>0.88</sub>P<sub>1.09</sub>O<sub>4</sub>

*Примечание.* Формулы апатита и монацита рассчитаны на 25 зарядов и четыре атома кислорода, соответственно. Метод расчета H<sub>2</sub>O – по стехиометрии.

*Note.* The formulas of apatite and monazite are recalculated to 25 charges and 4 O atoms, respectively. The H<sub>2</sub>O content is recalculated from stoichiometry.

са. Как правило, минерал образует идиоморфные дипирамидально-призматические кристаллы «цирконового» габитуса размером до 100 мкм.

### Заключение

Впервые изучена РЗЭ и редкометалльная минерализация умеренно-щелочных кислых магматических пород среднеюрского умеренно-щелочного хуламского вулcano-плутонического комплекса на Северном Кавказе. Процессы кристаллизационной дифференциации, игравшие ведущую роль в петрогенезисе пород комплекса, привели к заметному обогащению наиболее кислых вулканитов некоторыми некогерентными элементами, в том числе редкими и редкоземельными (до 2700 г/т Zr, до 300 г/т Nb, до 30 г/т Ta, до 400 г/т Ce). Магматогенная ассоциация РЗЭ и редкометалльных минералов, представленная монацитом, ильменитом и цирконом, связана с обогащением остаточных магм несо-

вместимыми элементами в процессе кристаллизационной дифференциации. В то же время фторкарбонаты гомологического ряда бастнезит–фатерит и ильменорутила образовались на поздних стадиях в результате аутометаморфизма и низкотемпературной гидротермальной переработки магматических пород.

Видовой состав магматических акцессорных минералов в кислых вулканитах хуламского комплекса (циркон, апатит, монацит-(Ce), ильменит, рутил) позволяет говорить о присутствии в остаточном расплаве повышенных концентраций некоторых редких металлов, в первую очередь Zr, Nb и Ta, а также Y и РЗЭ. На магматическом этапе Nb<sup>5+</sup> и Ta<sup>5+</sup>, вероятно, входили в виде изоморфных примесей в ильменит. В постмагматическую стадию преобразования трахитов и риолитов проявился аутометаморфизм, выраженный в интенсивной аргиллизации, обусловивший появление минералов Nb и РЗЭ (ильменорутила и РЗЭ фторкарбонатов,

Таблица 4

Состав ильменорутила, ильменита и Nb-содержащего брукита (мас. %) из риолитов и трахитов хуламского комплекса

Table 4

Composition of ilmenorutile, ilmenite and Nb-bearing brookite (wt. %) from rhyolite and trachyte of the Khulam complex

Минерал	Ильменорутил					Nb-содержащий брукит	Лейкоксенизированный ильменит				
№ анализа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
№ точки на рис. 5	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6		4.7			
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.34	0.34	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	21.84	20.06	20.60	18.10	17.92	7.87	2.46	3.32	4.34	1.18	3.13
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.60	0.77	0.87	0.42	0.72	0.25					
TiO <sub>2</sub>	56.35	54.55	51.97	51.35	47.62	86.50	62.09	79.92	69.14	55.70	54.53
MnO	0.13	0.00	0.16	0.29	0.32	0.30	0.98	0.42	0.00	0.00	0.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.61	24.23	24.92	28.15	32.40		32.78	16.35	24.65	41.45	41.03
FeO						3.28					
Сумма	99.53	99.95	98.86	98.71	98.99	98.20	98.31	100.01	98.13	98.33	98.69
Эмпирические формулы											
1. (Ti <sub>0.63</sub> Fe <sub>0.23</sub> Nb <sub>0.15</sub> ) <sub>1.01</sub> O <sub>1.99</sub>											
2. (Ti <sub>0.61</sub> Fe <sub>0.27</sub> Nb <sub>0.14</sub> ) <sub>1.02</sub> O <sub>1.98</sub>											
3. (Ti <sub>0.60</sub> Fe <sub>0.28</sub> Nb <sub>0.14</sub> ) <sub>1.02</sub> O <sub>1.98</sub>											
4. (Ti <sub>0.58</sub> Fe <sub>0.32</sub> Nb <sub>0.05</sub> ) <sub>1.02</sub> O <sub>1.97</sub>											
5. (Ti <sub>0.54</sub> Fe <sub>0.37</sub> Nb <sub>0.12</sub> ) <sub>1.03</sub> O <sub>1.96</sub>											
6. (Ti <sub>0.91</sub> Nb <sub>0.05</sub> Fe <sub>0.04</sub> ) <sub>1.00</sub> O <sub>1.99</sub>											

Примечание. Формулы ильменорутила и Nb-содержащего брукита рассчитаны на сумму атомов, равную двум.

Note. Formulas of ilmenorutile and Nb-bearing brookite are recalculated to atom sum of 2.

соответственно), которые присутствуют только в гидротермально измененных кислых породах хуламского комплекса. Монацит-(Ce), вероятно, мог служить источником РЗЭ для образования РЗЭ-содержащего апатита и фторкарбонатов. РЗЭ и редкометалльная минерализация трахитов и риолитов хуламского комплекса не является на сегодняшний день промышленно значимой, однако комплекс остается недостаточно изученным, поэтому необходимо более детальное исследование его пород.

### Литература

Абих Г. (1874) Краткая заметка о моих путешествиях летом 1874 г. *Известия Кавказского отделения РГО*, 3 (3), 85–87.

Борсук А.М., Масуренков Ю.П. (1964) Об эксплозивных формах интрузивного процесса. *Известия Академии наук СССР. Серия геологическая*, (4), 38–55.

Борсук А.М., Цветков А.А. (1973) Мезозойские магматические формации междуречья Черек Балкар-

ский–Чегем на Северном Кавказе. *Известия Академии наук СССР. Серия геологическая*, (11), 15–26.

Борсук А.М., Цветков А.А., Лезин С.И. (1977) Пропилитизированные породы Горной Балкарии (Северный Кавказ) и связанная с ними рудная минерализация. *Известия Академии наук СССР. Серия геологическая*, (11), 37–52.

Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. (2018) Основные породы среднеюрского задугового дайкового пояса Большого Кавказа (геохимия, вопросы петрогенезиса и геодинамическая типизация). *Геология и геофизика Юга России*, 8(2), 16–29.

Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Кондрашов И.А. (2019) Мезозойские субщелочные породы центральной части Северного Кавказа: геодинамическая типизация, геохимия и минерагения. *Геология и геофизика Юга России*, 9(3), 48–62.

Горохов В.А., Забелов Н.Ф., Шилкин В.Н. (1968ф) Отчет о результатах работ по изучению перспектив редкометалльности (бериллиенности) вулканогенных образований мезозоя в междуречье Чегема – Черек Балкарского за 1967 год. Ессентуки, 192 с.

Долгих А.Г. (1978) Мезокайнозойский магматизм Северного Кавказа. *Материалы докладов II регионального петрографического совещания по Кавказу, Крыму и Карпатам*. Тбилиси, 173–179.

Кайгородова Е.Н., Лебедев В.А., Чернышев И.В., Якушев А.И. (2021) Проявления неоген-четвертичного магматизма в Восточной Балкарии (Северный Кавказ, Россия): изотопно-геохронологические данные. *Доклады Академии наук. Науки о Земле*, **496**(1), 36–44.

Кайгородова Е.Н., Лебедев В.А. (2022) Возраст, петролого-геохимические характеристики и происхождение магматических пород среднеюрского хуламского вулcano-плутонического комплекса (Северный Кавказ). *Вулканология и сейсмология* (2), в печати.

Куликова И.М., Набелкин О.А. (2014) Рентгено-спектральный микроанализ (РСМА) минералов, содержащих редкоземельные элементы. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, (4), 20–27.

Лебедев А.П. (1950) Юрская вулканогенная формация Центрального Кавказа. *Труды ИГН АН СССР*, (113), 174 с.

Лезин С.И., Стативкин Э.В. Селиверстов В.В., Мамедов А.И., Френкель К.Ш. (1976ф) Отчет о поисковых работах на золото-серебряное и полиметаллическое оруденение на Радужном (Хуламском) участке за 1975–76 гг. Нальчик, 156 с.

Мезенина Т.В., Аксаментов Е.В., Андреев Ю.П., Давиденко В.П., Рудыкина Е.В., Манин И.М. (1982ф) Отчет партии № 4 о результатах детальных поисков близповерхностного золото-серебряного оруденения на участках Кишлык-Су, Кардан, Правобережный и зоне II Безенгийского рудного поля за 1979–82 гг. Нальчик, 113 с.

Семенов Е.И. (2001) Оруденение и минерализация редких земель, тория и урана (лантаноидов и актиноидов). М., ГЕОС, 307 с.

Спасский Н.В., Аксаментов Е.В. (1982ф) Отчет о результатах общих поисков золото-серебряного оруденения в междуречье Черек Безенгийский–Псыгансу в 1978–82 гг. Нальчик, 156 с.

Anders E., Grevesse N. (1989) Abundances of the elements: meteoric and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, (53), 197–214.

Burke E.A.J. (2007) A mass discreditation of GQN Minerals. *The Canadian Mineralogist*, 44(6), 1557–1560.

Segalstad T.V., Larsen A.O. (1978) Gadolinite-(Ce) from Skien, southwestern Oslo Region, Norway. *American Mineralogist*, (63), 188–195.

Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in Ocean Basins*. Eds A.D. Saunders, M.J. Norry. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, (42), 313–345.

## References

Abich G. (1874) [A brief note about my travels in summer 1874]. *Izvestiya Kavkazskogo otdeleniya RGO [Bulletin of the Caucasian Branch of the Russian Geographical Society]*, **3**(3), 85–87. (in Russian)

Anders E., Grevesse N. (1989) Abundances of the elements: meteoric and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, (53), 197–214.

Borsuk A.M., Masurenkov Yu.P. (1964) [Explosive forms of intrusive process]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geological series]*, (4), 38–55. (in Russian)

Borsuk A.M., Tsvetkov A.A. (1973) [Mesozoic igneous complexes of the interfluvial Cherek Balkarsky–Chegem, North Caucasus]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya. [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geological Series]*, (11), 15–26. (in Russian)

Borsuk A.M., Tsvetkov A.A., Lezin S.I. (1977) [Propylitized rocks of the Mountainous Balkaria (North Caucasus) and associated ore mineralization]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya. [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geological Series]*, (11), 37–52. (in Russian)

Burke E.A.J. (2007) A mass discreditation of GQN Minerals. *The Canadian Mineralogist*, 44(6), 1557–1560.

Dolgikh A.G. (1978) [Meso-Cenozoic magmatism of Northern Caucasus]. *Materialy dokladov II regional'nogo petrograficheskogo soveshchaniya po Kavkazu, Krymu i Karpatam. [Abstracts of Second Regional Petrographic Meeting on the Caucasus, Crimea and Carpathians]*, Tbilisi, 173–179. (in Russian)

Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. (2018) [Main rocks of the Middle Jurassic back-arc dike belt of the Greater Caucasus: geochemistry, problems of petrogenesis and geodynamic classification]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii. [Geology and Geophysics of the South Russia]*, **8**(2), 16–29. (in Russian)

Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Kondrashov I.A. (2019) [Mesozoic subalkaline rocks of the central part of Northern Caucasus: geodynamic classification, geochemistry and mineralization]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii [Geology and Geophysics of the South Russia]*, **9**(3), 48–62. (in Russian)

Gorokhov V.A., Zabelov N.F., Shilkin V.N. (1968f) [Unpublished report on the results of study of rare metal (beryllium) potential of the Mesozoic volcanogenic formations in the Chegem – Cherek Balkarsky interfluvial at 1967], Essentuki, 192 p. (in Russian)

Kaigorodova E.N., Lebedev V.A., Chernyshev I.V., Yakushev A.I. (2021) Neogene-Quaternary magmatism in the Eastern Balkaria (North Caucasus, Russia): evidence from isotope-geochronological data. *Doklady Earth Sciences*, **496** (1), 36–44.



**Kaigorodova E.N., Lebedev V.A.** (2022) Age, petrological and geochemical characteristics and origin of igneous rocks of the Middle Jurassic Khulam volcano-plutonic complex (North Caucasus). *Vulkanologiya i seismologiya [Volcanology and Seismology]* (2), in press.

**Kulikova I.M., Nabelkin O.A.** (2014) [X-ray spectral microanalysis (EMPA) of REE-bearing minerals]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory Laboratory. Diagnostics of the Materials]*, (4), 20–27. (in Russian)

**Lebedev A.P.** (1950) [Jurassic volcanogenic complex of Central Caucasus]. *Trudy IGN AN SSSR [Proceedings of the IGN Academy of Sciences of the USSR]*, (113), 174 p. (in Russian)

**Lezin S.I., Stativkin E.V., Seliverstov V.V., Mamedov A.I., Frenkel K.Sh.** (1976) [Unpublished report on prospecting works for gold-silver and polymetallic mineralization in the Raduzhny (Khulamsky) area at 1975–1976]. Nalchik, 156 p. (in Russian)

**Mezenina T.V., Aksamentov E.V., Andreev Yu.P., Davidenko V.P., Rudykina E.V., Manin I.M.** (1982) [Unpublished report of party no. 4 on the results of detailed prospecting works for near-surface gold-silver mineralization in the areas Kishlyk-su, Kardan, Pravoberezhny and zone II of the Bezengi ore field in 1979–82]. Nalchik, 113 p. (in Russian)

**Segalstad T.V., Larsen A.O.** (1978) Gadolinite-(Ce) from Skien, southwestern Oslo Region, Norway. *American Mineralogist*, (63), 188–195.

**Semenov E.I.** (2001) [Ore and rare earths, thorium and uranium mineralization (lanthanides and actinides)]. Moscow, GEOS, 307 p. (in Russian)

**Spassky N.V., Aksamentov E.V.** (1982) [Unpublished report on the results of general prospecting for gold-silver mineralization in the interfluvial Cherek Bezengiy–Psyngasu in 1978–1982]. Nalchik, 156 p. (in Russian)

**Sun S.S., McDonough W.F.** (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in Ocean Basins*. Eds A.D. Saunders, M.J. Norry. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* (42), 313–345.