

УДК 552.323.5

DOI: 10.46698/VNC.2024.79.74.007

Оригинальная статья

Литий-цезий-танталовые пегматиты горы Ваза-Хох (Северный Кавказ)

А.И. Гусев 

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет
им. В.М. Шукшина, Россия, 659333, г. Бийск, ул. Короленко, 53,
e-mail: anzerg@mail.ru

Статья поступила: 30.08.2023, доработана: 10.02.2024, принята к публикации: 16.02.2024

Резюме: Актуальность работы. На Северном Кавказе описаны различные типы оруденения, связанные с гранитоидами. Гранитные пегматиты Ваза-Хоха не получили должного освещения в открытой печати, хотя они содержат высококонцентрированное оруденение стратегических металлов: Li, Cs, Ta, которые в минерально-сырьевой базе России относятся к остродефицитным. Следовательно, актуализация современных сведений о пегматитах указанного района не вызывает сомнений. **Целью исследования** является получение комплексной петрологической и геохимической характеристики гранитных пегматитов Ваза-Хоха и их типизация на современном уровне. **Объектом для исследований** были выбраны тела пегматитов Ваза-Хоха, выделенные в качестве потенциального редкометалльного рудного поля. **Материалы исследования.** Материалы, используемые в статье, получены автором в процессе проведения специализированных металлогенических исследований, проведенных в 1989, 2021-2022 годах на пегматитовом поле Ваза-Хох. **Методы.** Методы изучения, кроме геологического и петрографического описания пегматитов, включали получение количественных характеристик состава пород. Силикатный анализ пород на главные компоненты определён рентгено-спектральным флуоресцентным методом, Co, Ni, Zn, Pb, Li, Sc, Cu – ISP-AES, остальные элементы, в том числе РЗЭ – методом ISP-MS в лаборатории Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (г. Москва). **Полученные результаты и выводы.** В результате комплексных исследований получены новые данные по петро-геохимии пегматитов с отнесением их к литий-цезий-танталовому (ЛСТ) типу и выделением нескольких стадий минерализации. В вертикальной зональности пегматитового поля, наиболее продуктивными на редкометалльное оруденение, являются самые верхние тела пегматитов. Впервые в составе пегматитов описаны минералы: сподумен, поллуцит, пиррохлор, циркон, алланит. В породах проявлен тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов М – типа. Менявшиеся физико-химические условия пегматитовых флюидов приводили к предпочтительному обогащению последних рудными компонентами в условиях повышения кислотности среды.

Ключевые слова: Северный Кавказ, гранитные пегматиты, сподумен, поллуцит, танталит, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, кислотность-щёлочность среды.

Для цитирования: Гусев А.И. Литий-цезий-танталовые пегматиты горы Ваза-Хох (Северный Кавказ). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(1): 102-113. DOI: 10.46698/VNC.2024.79.74.007

DOI: 10.46698/VNC.2024.79.74.007

Original paper

Lithia-cesium-tantalum pegmatites of mountain Vaza-Khokh (Northern Caucasus)

A.I. Gusev 

Shukshin Altai State University for Humanities and Pedagogy,
53 Korolenko Str., Biisk 659333, Russian Federation,
e-mail: anzerg@mail.ru

Received: 30.08.2023, revised: 10.02.2024, accepted: 16.02.2024

Abstract: Relevance. Different types ore mineralization related with granitoids on the Northern Caucasus are described. A granitic pegmatites of Vaza-Khokh did not received elucidating in public press although they contain high concentrate ore mineralization of strategic metals: Li, Cs, Ta, that are in very short supply for mineral-raw materials base of Russia. Consequently, the updating of modern information about the pegmatites of the indicated area is beyond doubt. **The aim** of the study is to obtain a comprehensive petrological and geochemical characteristic of the Vaza-Khokh granite pegmatites and their typification at the modern level. **The objects for research** were the bodies of the Vaza-Khokh pegmatites, identified as a potential rare metal ore field. **Materials.** The materials used in the article were obtained by the author in the process of specialized metallogenic studies carried out in 1989, 2021-2022 on the Vaza-Khokh pegmatite field. **Methods.** Research methods, in addition to the geological and petrographic description of pegmatites, included obtaining quantitative characteristics of the composition of the rocks. Silicate analysis of rocks for the main components was determined by the X-ray spectral fluorescence method, Co, Ni, Zn, Pb, Li, Sc, Cu – ISP-AES, other elements, including rare earth elements – by the ISP-MS method in the laboratory of the Institute of Mineralogy, Geochemistry and crystal chemistry of rare elements (Moscow). **Results and conclusions.** As a result of complex studies, new data on the petro-geochemistry of pegmatites were obtained, assigning them to the lithium-cesium-tantalum (LCT) type and identifying several stages of mineralization. In the vertical zoning of a pegmatite field, the most productive rare metal mineralization is the uppermost bodies of pegmatites. For the first time, the following minerals have been described in pegmatites: spodumene, pollucite, pyrrrochlore, zircon, and allanite. The rocks exhibit a tetrad effect of fractionation of M-type rare earth elements. The changing physicochemical conditions of pegmatite fluids led to the preferential enrichment of the latter in ore components under conditions of increasing acidity of the environment.

Keywords: Northern Caucasus, granitic pegmatites, spodumene, pollucite, tantalite, tetradic effect fractionation of TEF, acidic- alkali of environment.

For citation: Gusev A.I. Lithia-cesium-tantalum pegmatites of mountain Vaza-Khokh (Northern Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(1): 102-113. DOI: 10.46698/VNC.2024.79.74.007

Введение

Центральный сектор Большого Кавказа характеризуется разнообразными и разновозрастными гранитоидами, с которыми пространственно и парагенетически связаны различные типы оруденения [Парада и др., 2015; Парада, 2021; Газеев и др., 2022]. Некоторые типы редкометалльного оруденения в этой части Кавказа связаны с Пшиш-Вазахским комплексом позднего палеозоя [Гусев, 2023]. Редкометалльная минерализация в Ваза-Хохском рудном поле представлена гранитными пегматитами и альбититами. Указанные пегматиты не изучались со времён проведения

работ поисково-ревизионной партией на редкие и рассеянные элементы в 60-е годы прошлого века, возглавляемой Кузнецовым К.М. Известно, что гранитные пегматиты характеризуются сильным обогащением несовместимыми литофильными элементами, такими как Rb, Cs, Li, Be и Sn и часто ассоциированы с Nb–Ta–Sn–W минерализацией [Simmons, Webber, 2008; Linnen et al., 2012]. Гранитные пегматиты являются важным источником стратегических металлов, таких как Li, Be, Nb, Ta, Rb, Cs, Zr, Hf, REE (редкоземельных элементов), Th and U, а также геммологических минералов [Černý et al., 2012]. Пегматитовые поля и рои распространены в Главном Кавказском хребте на Каргашили-тау, Лабардан-су, Кюген-кае, Ваза-Хохе, Пшише, Туяле, Аксауте, где они тесно ассоциируют с позднепалеозойскими гранитоидами. Ваза-Хохское пегматитовое поле – одно из самых крупных и в нём насчитывается более 60 пегматитовых тел, имеющих различный состав, а в некоторых из них и высокие концентрации Li, Cs, Ta, Nb, Be, W. В последние годы в связи с резким возрастанием производства литиевых батарей появилось понятие «батарейный литий», т.е. особо чистый гидроксид этого металла. Его, как оказалось, не менее рентабельно получать напрямую из сподумена, а не только из дешевой, но загрязненной рапы соляных озер. Поэтому интерес к литиевым пегматитам опять возрастает. Так в настоящее время готовится к отработке Колмозерское месторождение лития с попутными Nb, Ta и Be [Морозова, 2018]. Оно является крупнейшим месторождением редкометалльных пегматитов России, на долю которого приходится 26% запасов лития страны [Быховский, Архипова, 2016]. Указанные факты не вызывают сомнений в актуальности изучения пегматитов Ваза-Хоха.

Методы исследований

Вещественный состав пегматитов изучался с использованием агрегатно-фазового анализа, включавшего в себя структурно-текстурные взаимоотношения минеральных агрегатов и отдельных минералов. Построенная автором диаграмма Ta – TE_{1,3}, устанавливающая зависимость концентраций тантала и тетрадного эффекта фракционирования редкоземельных элементов пегматитового ареала, позволяет оценивать кислотно-щелочные условия среды кристаллизации в геологических образованиях, что очень важно для понимания связи флюидного режима и литий-цезий-тантал-ниобиевого оруденения в конкретных пегматитовых процессах.

Геологическое строение Ваза-Хохского участка пегматитов

Рой пегматитов расположен в левом борту р. Урух юго-восточнее вершины г. Ваза-Хох (3529,4 м) (рис. 1) среди кристаллических сланцев и гнейсов и разgneйсованных кварцевых диоритов в надинтрузивной позиции поздне-палеозойских гранитоидов пшиш-вазахохского комплекса. Рой насчитывает более 60 пегматитовых тел дайкообразной, жилообразной и линзовидной форм (рис. 2). Протяжённости тел варьируют от 0,3 до 2,5 км, мощности от 1 до 45 м в раздувах. Преимущественное падение северо-западное под углами 40-50°.

Результаты работы и их обсуждение

Пегматиты Ваза-Хоха весьма разнообразны по составу и степени их изменения в результате наложенных процессов. Основная масса пегматитов, расположенных к юго-востоку от горы Ваза-Хох, представляет наибольшую ценность, так как в них

отмечаются наибольшие концентрации сподумена, поллуцита и танталита. Кроме этих разностей к западу локализуются редкие пегматиты с интенсивной альбитизацией и развитием редкой вкрапленности колумбита и танталита. Протяжённости и мощности этих пегматитов незначительные.

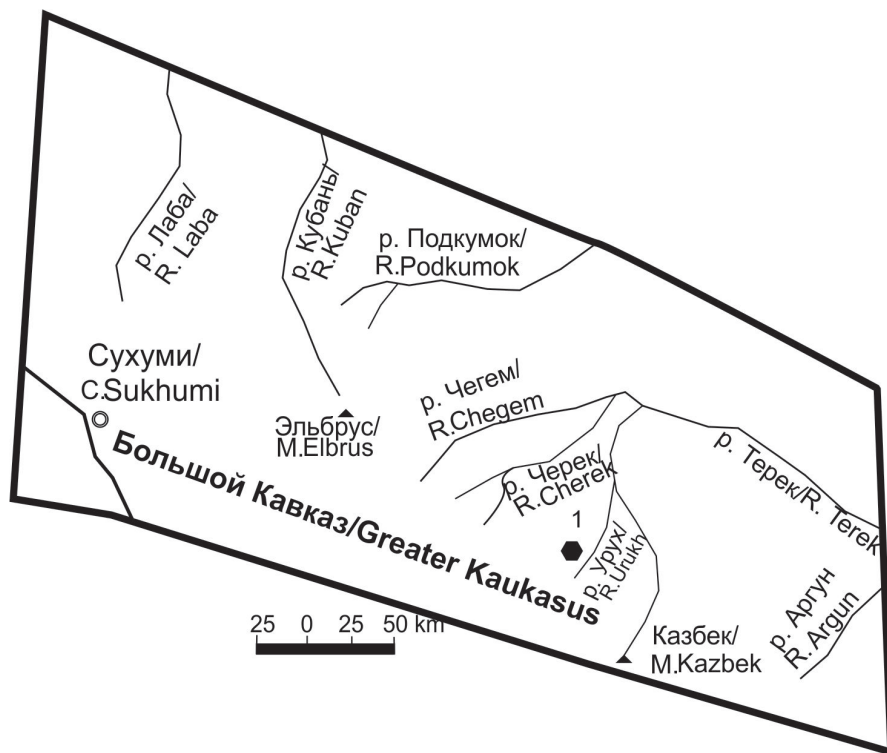


Рис. 1. Схема локализации пегматитов Ваза-Хоха на Большом Кавказе
1 – Пегматиты Ваза-Хоха /

Fig. 1. Scheme of localization pegmatites of Vaza-Khokh on the Greater Caucasus
1 – Pegmatites of Vaza-Khokh

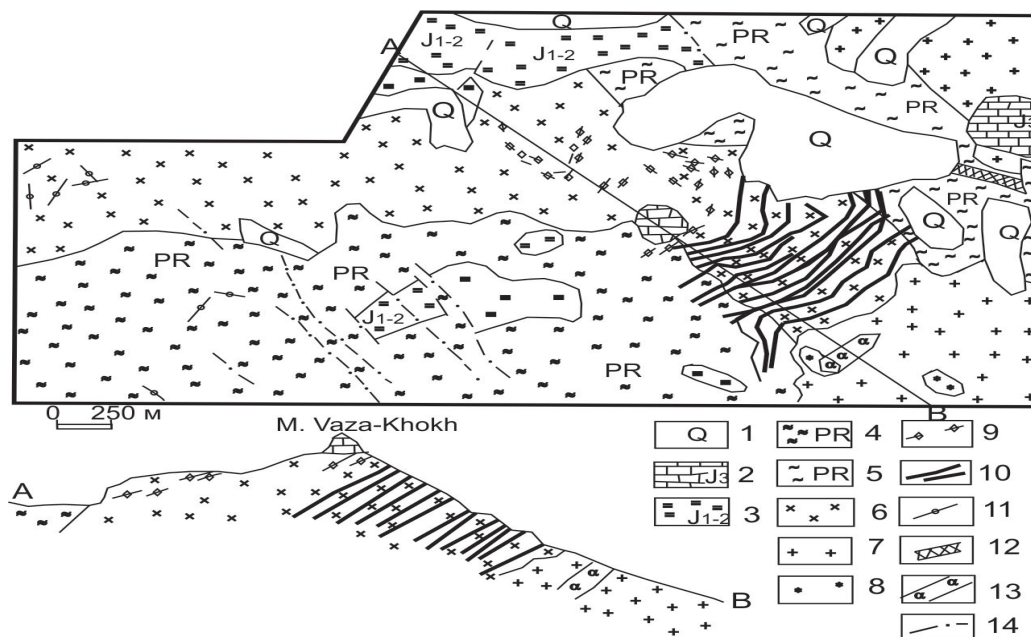


Рис. 2. Схематическая геологическая карта участка горы Ваза-Хох (по А.И. Гусеву с учётом данных К.М. Кузнецова).

1 – четвертичные образования; 2 – известняки верхней юры; 3 – глинистые сланцы ранней-средней юры; 4 – слюдяные сланцы протерозоя; 5 – биотитовые гнейсы протерозоя; 6 – огнейсованные кварцевые диориты раннего палеозоя; 7 – альбитизированные лейкограниты пшиш-вазахского комплекса позднего палеозоя; 8 – аплиты пшиш-вазахского комплекса; 9 – гранит-пегматиты; 10 – сподумен-поллуцитовые пегматиты с танталитом; 11 – интенсивно альбитизированные пегматиты; 12 – шеелитоносные скарны; 13 – альбититы с танталитом; 14 – разломы /

Fig. 2. Scheme geological map of tract mountain Vaza-Khoh (after A.I. Gusev with discount of data K.M. Kuznetsov).

1 – Quaternary deposits; 2 – limestones of Last Jurassic; 3 – clay shall of Early-Middle Jurassic; 4 – micaceous shalls of Proterozoic; 5 – biotite gneiss of Proterozoic; 6 – gneissing of quartz diorites of Early Paleozoic; 7 – albitization leucogranites of Pshish – Vaza-Khokh complex of Last Paleozoic; 8 – aplites of Pshish – Vaza-Khokh complex; 9 – granite-pegmatites; 10 – spodumen-pollucitic pegmatites with tantalites; 11 – intensive-albitization of pegmatites; 12 – scheelite skarns; 13 – albitites with tantalite; 14 – faults

По комплексу текстурных признаков выделены 3 стадии минерализации в наиболее обогащённых пегматитах сподуменом, поллуцитом и танталитом, которые локализуются в самых верхах распространения роя пегматитов.

Последовательность минерализации и минеральный состав пегматитов Ваза-Хоха представлен на парагенетической схеме последовательности (рис. 3).

| Минералы/Minerals | Стадии минерализации/Stages of mineralization | | |
|----------------------|---|----|---------------------|
| | I | II | III |
| Кварц/Quartz | ● | ● | ● |
| Мусковит/Muscovite | ● | ● | ● |
| Олигоклаз/Oligoclase | ● | | |
| Микроклин/Microcline | ● | | |
| Сподумен/Spodumene | ● | | |
| Поллуцит/Pollucite | ● | ● | |
| Альбит/Albite | | | Альбититы/Albitites |
| Берилл/Beryl | ● | | |
| Гранат/Garnet | ● | | ● |
| Танталит/Tantalite | ● | ● | ● |
| Пироклор/Pyrochlore | | | ● |
| Циркон/Zircon | | | ● |
| Апатит/Apatite | | | ● |
| Ильменит/Ilmenite | | | ● |
| Сульфиды/Sulfides | | | ● |

Рис. 3. Стадии и последовательности минералообразования в пегматитах Ваза-Хоха /

Fig. 3. Stages and sequences of mineral formation in pegmatites of Vaza-Khokh

Нами выделены по вещественному составу две разновидности редкометалльных пегматитов: танталит-гранат-сподумен-мусковит-кварцевая и танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевая, химический состав которых представлен в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Состав пегматитов с танталовой минерализацией (оксиды в %, элементы – в г/т) /
Composition of pegmatites with tantalum mineralization (oxides in %, elements in ppm)**

| Компоненты/ Components | Номера проб/Numbers of probes | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| SiO ₂ | 73,9 | 74,63 | 74,4 | 74,08 | 75,1 | 75,7 |
| TiO ₂ | 0,45 | 0,42 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,02 |
| Al ₂ O ₃ | 14,9 | 15,02 | 13,2 | 14,2 | 12,3 | 12,0 |
| FeOt | 0,44 | 0,42 | 0,91 | 0,45 | 0,7 | 0,6 |
| MnO | 0,07 | 0,05 | 0,1 | 0,07 | 0,01 | 0,02 |
| MgO | 0,3 | 0,25 | 0,77 | 1,96 | 0,2 | 0,1 |
| CaO | 0,11 | 0,13 | 0,06 | 0,05 | 0,3 | 0,2 |
| Na ₂ O | 6,3 | 6,22 | 5,93 | 6,97 | 7,1 | 7,0 |
| K ₂ O | 2,2 | 2,38 | 2,97 | 1,4 | 3,4 | 4,1 |
| P ₂ O ₅ | 0,17 | 0,16 | 0,13 | 0,13 | 0,22 | 0,22 |
| Ппп/Loi | 0,9 | 0,45 | 1,53 | 0,55 | 0,3 | 0,2 |
| Σ | 99,67 | 100,07 | 100,02 | 99,92 | 99,68 | 100,16 |
| Li | 432 | 235 | 914 | 859 | 10100 | 8250 |
| Be | 154 | 145 | 82 | 91 | 119 | 97,8 |
| Cs | 98 | 65 | 84 | 101 | 434 | 542 |
| Rb | 908 | 895 | 969 | 864 | 6300 | 9147 |
| Ba | 44 | 41 | 24 | 22 | 35 | 40 |
| Sr | 8 | 6 | 4 | 7 | 31 | 43 |
| Ga | 19 | 15 | 13 | 16 | 24 | 26 |
| Tl | 123 | 121 | 134 | 54 | 195 | 203 |
| Cu | 17 | 20 | 18 | 21 | 19 | 14 |
| Zn | 43 | 54 | 62 | 50 | 66 | 32 |
| Pb | 16 | 21 | 25 | 17 | 18 | 14 |
| Th | 6 | 4 | 5 | 4 | 3,7 | 2,8 |
| U | 42 | 22 | 31 | 27 | 28 | 29 |
| Zr | 142 | 133 | 121 | 118 | 121 | 143 |
| Hf | 15 | 12 | 11 | 9 | 12 | 16 |
| Nb | 64 | 55 | 80 | 53 | 67 | 71 |
| Ta | 195 | 154 | 162 | 187 | 327 | 325 |
| Sn | 40 | 33 | 34 | 28 | 133 | 270 |
| Y | 15 | 17 | 12 | 15 | 3 | 2,5 |
| La | 14 | 15 | 4,02 | 6,09 | 1,61 | 1,88 |
| Ce | 33 | 35 | 7,88 | 10,5 | 2,68 | 3,32 |
| Pr | 3,0 | 4,23 | 1,05 | 1,06 | 0,27 | 0,35 |
| Nd | 10,2 | 25,0 | 3,84 | 3,51 | 0,86 | 1,03 |
| Sm | 5,0 | 22,0 | 0,89 | 0,73 | 0,22 | 0,35 |
| Eu | 0,17 | 4,0 | 0,07 | 0,17 | 0,03 | 0,02 |
| Gd | 10,5 | 63,0 | 0,65 | 0,55 | 0,18 | 0,26 |
| Tb | 4,99 | 30 | 0,14 | 0,12 | 0,05 | 0,08 |
| Dy | 32,9 | 328 | 0,73 | 0,66 | 0,25 | 0,46 |
| Ho | 6,8 | 98 | 0,1 | 0,08 | 0,05 | 0,05 |
| Er | 19,96 | 385 | 0,27 | 0,24 | 0,13 | 0,13 |
| Tm | 3,39 | 78 | 0,04 | 0,05 | 0,03 | 0,03 |
| Yb | 24,99 | 670 | 0,4 | 0,33 | 0,16 | 0,17 |
| Lu | 3,37 | 107 | 0,05 | 0,04 | 0,02 | 0,02 |
| Σ REE | 187,27 | 1856,2 | 32,1 | 39,1 | 9,51 | 10,65 |
| (La/Yb) _N | 0,38 | 0,01 | 6,8 | 12,8 | 6,87 | 7,55 |
| Eu/Eu* | 0,07 | 0,3 | 0,27 | 0,78 | 0,44 | 0,19 |
| TE _{1,3} | 1,42 | 1,14 | 1,2 | 1,24 | 1,15 | 1,47 |

Примечание. В таблице содержания элементов нормализованы по хондриту C1 [McDonough, Sun, 1995]. Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования REE как среднее между первой и третьей тетрадами по [Irber, 1999]. 1-2 – танталит-гранат-сподумен-мусковит-кварцевый пегматит; 3-6 – танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевый пегматит /

Note. Contents of elements normalized on chondrites C1 (McDonough, Sun, 1995). Eu*=(Sm_N+Gd_N)/2. TE_{1,3} – Tetradic effect fractionation of REE, as middle between first and third tetrads after (Irber, 1999). 1-2 – tantalite-garnet-spodumen-muscovite-quartz pegmatite; 3-6 – tantalite-spodumen-pollucite-muscovite-quartz pegmatite

По химизму изучаемые пегматиты относятся к ультракислым и умеренно-щелочным породам, за исключением проб 5 и 6, которые следует рассматривать щелочными разностями. В проанализированных пробах они характеризуются повышенными концентрациями элементов (г/т): Li от 325 до 10100, Be от 82 до 154, Cs от 65 до 542, Rb от 895 до 9147, Ta от 154 до 327, Nb от 53 до 80. В них наблюдаются значительные вариации суммы редких земель – от 9,51 до 1856 г/т. Нормированные отношения La к Yb колеблются от 0,01 до 12,8, указывая на различную степень фракционирования лёгких и тяжёлых редкоземельных элементов (РЗЭ). Она значительно выше у танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевых пегматитов. Отношения Eu/Eu* устойчиво ниже хондритовых значений. Во всех проанализированных пробах пегматитов проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М–типа, варьирующий от 1,14 до 1,47. Особо отличаются анализы 5 и 6. Они представляют собой ультракислые и высокощелочные породы, в отличие от кислых и умеренно щелочных предыдущих 4-х анализов. Именно в двух последних содержание лития достигает 1%, содержание рубидия на порядок, а цезия в 5 и более раз выше, чем в первых 4-х анализах.

На спайдер-диаграмме разновидности редкометалльных пегматитов Ваза-Хоха контрастно различаются по концентрациям редкоземельных элементов с отчётливым европиевым минимумом и выпуклой кривой распределения в области Gd-Но, подтверждая проявление ТЭФ РЗЭ М–типа [Masuda, Ikeuchi, 1979] (рис. 4).

На диаграмме Ta – TE_{1,3} общий тренд концентраций Ta в пегматитах связан с увеличением значений ТЭФ РЗЭ М–типа (рис. 5). Так как проявление ТЭФ РЗЭ М–типа связано с активностью фтор-комплексов [Гусев, Гусев, 2011], то, следовательно, можно сделать вывод о том, что высокие значения тантала в пегматитах обусловлены высокими содержаниями фтора в пегматитовом расплаве.

В нашей стране в классификации редкометалльных пегматитов выделяется 2 подформации; петалитовая и сподуменовая с выделением геохимических эволюционных рядов и парагенетических типов [Загорский и др., 1997]. Согласно этой классификации пегматиты Ваза-Хоха следует относить к сподуменовой подформации, комплексному цезий-тантал-литиевому геохимическому эволюционному ряду и сподумен-калишпат-альбитовому парагенетическому типу, формировавшемуся при повышенном начальном давлении 5-3 кбар. Типичными представителями этого типа являются промышленные месторождения Гольцовое (Восточный Саян), Коктогай (Китай) [Макагон, Шмакин, 1988; Zhang et al., 2004], а также крупнейшие в мире месторождения Парунского пегматитового поля Афганистана [Россовский и др., 1976].

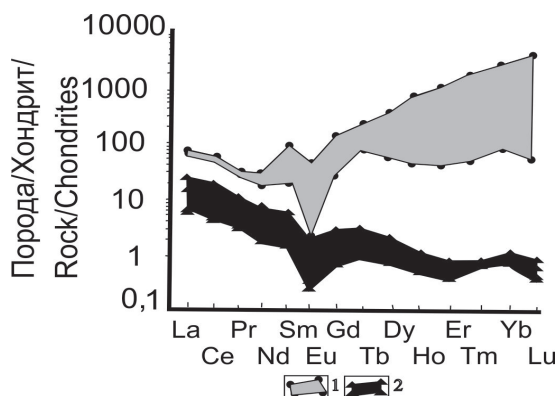


Рис. 4. Спайдер-диаграмма распределения редкоземельных элементов в пегматитах Ваза-Хоха. 1 – танталит-гранат-сподумен-мусковит-кварцевый пегматит; 2 – танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевый пегматит /

Fig 4. Spider-plot of distribution rare earth elements in pegmatites of Vaza-Khokh 1 – tantalite-garnet-spodumene-muscovite-quartz pegmatite; 2 – tantalite-spodumene-pollucite-muscovite-quartz pegmatite.

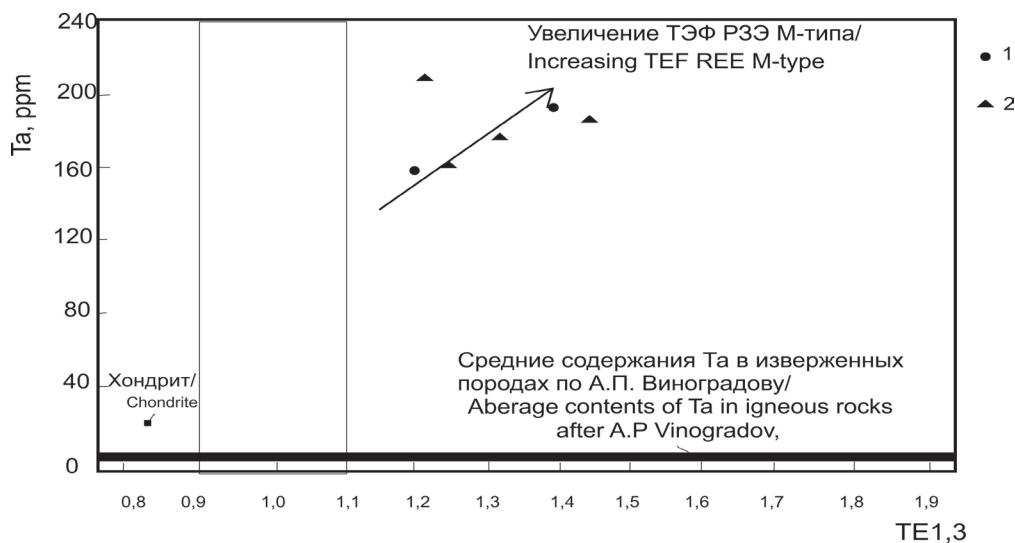


Рис. 5. Диаграмма Та – TE_{1,3} для пегматитов Ваза-Хоха.
Содержания Та в хондритах по [Wasson, Kallemeun, 1988].

Содержания тантала в изверженных породах по [Виноградов, 1962].

Пегматиты участка: 1 – танталит-гранат-сподумен-мусковит-кварцевые; 2 – танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевые /

Fig. 5. Plot of Ta – TE_{1,3} for pegmatites of Vaza-Khokh.

Pegmatites of tract: 1 – tantalite-garnet-spodumen-muscovite-quartz; 2 – tantalite-spodumen-pollucite-muscovite-quartz.

В распределении различных по составу пегматитов Ваза-Хоха наблюдается вертикальная зональность относительно кровли выступа рудогенерирующих альбитизированных лейкогранитов. Вблизи кровли указанных гранитоидов локализуются преимущественно микроклиновые разности пегматитов, выше располагаются микроклин-альбитовые и на самом крайнем удалении от кровли распространены наиболее продуктивные сподумен-альбитовые пегматиты, в которых обнаруживаются поллуцит и танталит (рис. 6).

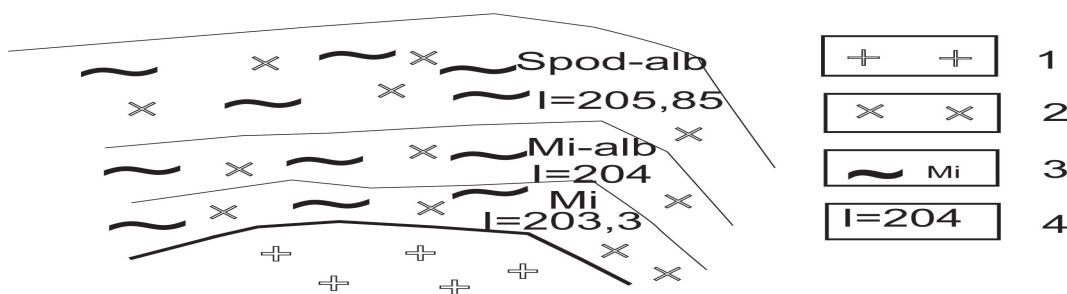


Рис. 6. Схема зональности распределения различных по составу пегматитов Ваза-Хоха относительно кровли рудогенерирующих гранитоидов.

1 – рудогенерирующие альбитизированные лейкограниты, 2 – рудовмещающие разgneйсованные кварцевые диориты; 3 – пегматиты и их состав (Mi – микроклиновые, Mi-alb – микроклин-альбитовые, Spod-alb – сподумен-альбитовые); 4 – потенциал ионизации составов пегматитов и его значения по [Жариков, 1967] /

Fig.6. Scheme of zoning distribution different on composition pegmatites Vaza-Khokh relatively roof of ore generation granitoids.

1 – ore generation albitization leucogranites; 2 – ore containing gneissic quartz diorites; 3 – pegmatites and it composition (Mi- microcline, Mi-alb – microcline-albitic, Spod-alb – spodumene-albitic); 4 – potential ionization of composition pegmatites and it values after [Zharikov, 1967].

Как видно из схемы снизу вверх происходит возрастание значений потенциала ионизации, указывающее на увеличение кислотности среды [Жариков, 1967] пегматито-образования в указанном направлении.

Можно определить физико-химические условия пегматито-образования и другим методом, используя соотношения Eu/Eu^* и $TE_{1,3}$. На авторской диаграмме указанных соотношений отчётливо видно, что с увеличением значений Eu/Eu^* в пегматитах Ваза-Хоха происходит повышение и $TE_{1,3}$ (рис. 7).

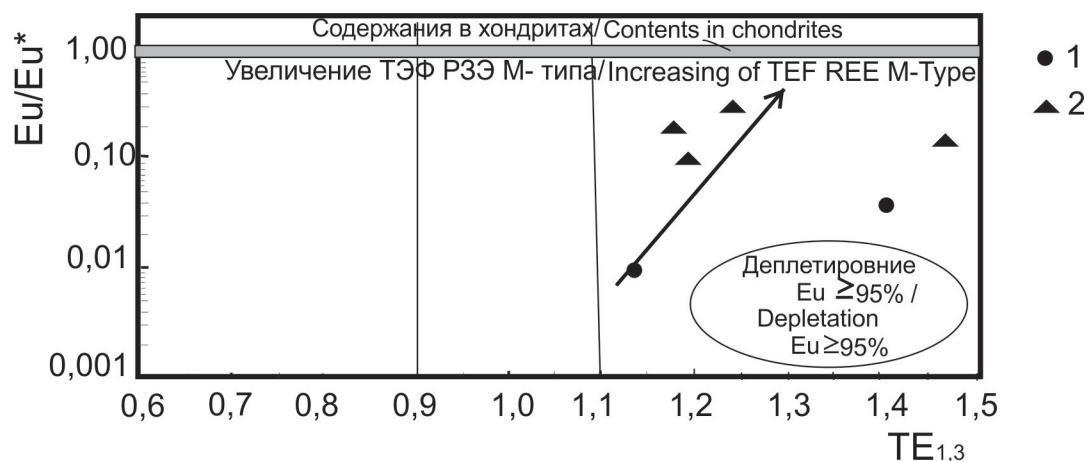


Рис. 7. Диаграмма $Eu/Eu^* - TE_{1,3}$ для пегматитов Ваза-Хоха. Содержания Eu по [McDonough, Sun, 1995]. Условные обозначения на рис. 5 /

Fig. 7. Plot $Eu/Eu^* - TE_{1,3}$ for pegmatites of Vaza-Khokh. Contents of Eu after [McDonough, Sun, 1995]. Legend on fig 5.

Известно, что увеличение величины Eu/Eu^* при проявлении ТЭФ REE М-типа согласно рядам кислотности–щёлочности элементов по [Маракушев, 1976] спектра элементов Sm, Gd, Eu (участвующих в соотношении Eu/Eu^*) в водно-сероводородных растворах при стандартных условиях отвечает повышению кислотности среды. Следовательно, формирование разных по составу пегматитов Ваза-Хоха происходило в условиях повышения кислотности среды.

За рубежом существуют 2 типа классификации гранитных пегматитов. Первая из них основана на содержаниях главных рудных компонентов в пегматитах, в которой выделяют 3 семейства [Černý, 1991]: 1 – ниобий-иттрий-фтористое (NYF); 2 – литий-цезий-танталовое (LCT); 3 – смешанное NYF-LCT. Пегматиты Ваза-Хоха следует относить по этой классификации к семейству литий-цезий-танталовому (LCT). Другая классификация, основанная на комплексной оценке геолого-минералогических, физико-химических и геохимических признаков [Sánchez-Munoz et al., 2016], предусматривает выделение 2-х групп пегматитов: первой группы «Высоко- T° низко-флюидных» с двумя подгруппами: 1 – кремнисто-обеднённых, 2 – кремнисто-обогащённых; второй группы «низко- T° высоко-флюидных» с двумя подгруппами: 3 – кремнисто-обогащённых, низко-фосфористых и 4 – кремнисто-обогащённых высоко-фосфористых. По этой классификации пегматиты Ваза-Хоха следует относить к 4 подгруппе – кремнисто-обогащённых и высоко-фосфористых. Такие пегматиты связаны с эпизональными–мезозональными гранитными массивами в синколлизонных обстановках в условиях растяжения [Sánchez-Munoz et al., 2016].

Значительные масштабы пегматитов Ваза-Хоха и промышленные концентрации в них Li, Cs, Ta позволят в будущем при проведении более детальных работ оценить для потенциального рудного поля прогнозные ресурсы стратегических металлов.

Выводы

Пегматиты Ваза-Хоха формировались в три стадии и относятся к литий-цезий-танталовому типу. В вертикальном разрезе снизу вверх выделяются три зоны пегматитов: микроклиновья, микроклин-альбитовая и сподумен-альбитовая. Последняя зона наиболее продуктивна и в ней выделены две разновидности пегматитов: танталит-гранат-сподумен-мусковит-кварцевая и танталит-сподумен-поллуцит-мусковит-кварцевая. В составе последней две пробы, характеризующиеся повышенной щёлочностью среды, имеют и более высокие концентрации Li, Cs, Rb, Sr, Ga, Ta, Sn. Формирование наиболее продуктивных пегматитов на стратегические металлы характеризовалось высокой насыщенностью флюидов фтор-комплексами и происходило в условиях повышения кислотности и щёлочности среды минералообразования.

Литература

1. Быховский Л.З., Архипова Н.А. Редкометалльное сырьё России: перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы. // Разведка и охрана недр. – 2016. – № 11. – С. 26–36.
2. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры. // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–572.
3. Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Кондрашов И.А. Раннекиммерийские вулканоплутонические образования из района Садонской группы полиметаллических месторождений Северной Осетии: геодинамическая типизация и минерагения. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001.
4. Гусев А.И., Гусев А.А. Тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов и его использование в решении проблем петрологии гранитоидов. // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 5. – С.45–49.
5. Гусев А.И. Высоко-фракционированные гранитоиды Пшишского редкометалльного рудного поля Северного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 1. – С. 96–111. DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007.
6. Жариков В.А. Кислотно-основные характеристики минералов. // Геология рудных месторождений. – 1967. – № 5. – С. 75–89.
7. Загорский В.Е., Кузнецова Л.Г., Макагон В.М., Макрыгина В.А., Шмакин Б.М. Редкометалльные пегматиты. – Нск: Наука, Сиб. предприятие РАН. – 1997. (Гранитные пегматиты; Т. 2) – 285 с.
8. Макагон В.М., Шмакин Б.М. Геохимия главных формаций гранитных пегматитов. – Нск: Наука. Сиб. Отделение. – 1988. 210 с.
9. Маракушев А.А. Термодинамические факторы образования рудной зональности. // Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений. М.: Наука. – 1976. С. 36–51.
10. Морозова Л.Н. Колмозерское литиевое месторождение редкометалльных пегматитов: новые данные по редкоэлементному составу (Кольский полуостров). // Литосфера. – 2018. – Т. 18. № 1. – С. 82–98.
11. Парада С.Г., Маркин М.Ю., Столяров В.В., Шишкалов И.Ю. Геологические условия локализации золотоносных минерализаций и структура Муштинского рудного поля (Кабардино-Балкарская республика). // Геология и геофизика Юга России. – 2015. – № 2. – С. 51–65. DOI: 10.23671/VNC.2015.2.55266.

12. Парада С.Г. Рудно-магматические системы медно-порфирового типа Большого Кавказа. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. № 3. – С. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.01.
13. Россковский Л.Н., Чмырёв В.М., Ерёменко Г.К., Мир-Акбар. Геология и условия формирования сподуменовых месторождений Гиндукуша (Афганистан). // *Геология рудных месторождений*. – 1976. – Т. 18. № 6. – С. 19–33.
14. Černý P. Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies? // *Precambrian Research*. – 1991. – Vol. 51. – pp. 429–468.
15. Černý P., London D., Novak M. Granitic pegmatites as reflections of their sources. // *Elements*. – 2012. – Vol. 8. – pp. 289–294.
16. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. // *Geochim Comochim Acta*. – 1999. – Vol. 63. No. 3/4. – pp. 489–508.
17. Linnen R.L., Van Lichtervelde M., Cerny P. Granitic pegmatites as sources of strategic metals. // *Elements*. – 2012. – Vol. 8. – pp. 275–280.
18. Masuda A., Ikeuchi Y. Lanthanide tetrad effect observed in marine environment. // *Geochim J.* – 1979. – Vol. 13. – pp. 19–22.
19. Mc Donough W.F., Sun S. The composition of the Earth. // *Chem. Geol.* – 1995. – Vol. 120. – pp. 223–253.
20. Sánchez-Muñoz L., Müller A., Andrés S.L., Martin R.F., Modreski P.J., de Moura O.J.M. The P-Fe diagram for K-feldspars: A preliminary approach in the discrimination of pegmatites. // *Lithos*. – 2016. – Vol. 244. – pp. 134–152.
21. Simmons W.B., Webber K.L. Pegmatite genesis: state of the art. // *Eur. J. Mineral.* – 2008. – Vol. 20. – pp. 421–438.
22. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Mean composition of the chondrite groups. // *Phil. Trans. R. Soc. London*. – 1988 – Vol. 5. – pp. 535–544.
23. Zhang A.C., Wang R.C., Hu H., Zhang H., Zhu J.C., Chen X.M. Chemical evolution of Nb–Ta oxides and zircon from the Koktokay No. 3 granitic pegmatite, Altai, northwestern China. // *Mineralogical Magazine*. – 2004. – Vol. 68. No. 5. – pp. 739–756.

References

1. Bykhovskiy L.Z., Arkhipova N.A. Rare metal raw materials in Russia: prospects for exploration and development of mineral resources. Prospect and protection of mineral resources. 2016. No. 11. pp. 26–36. (in Russ.)
2. Vinogradov A.P. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust. *Geochemistry*. 1962. No.7. pp. 555–572. (In Russ.)
3. Gazeev V.M., Gurbanov A.G., Dokuchaev A.Y., Kondrashov I.A. Early cimmerian volcanoplutonic formations of the Sadon group of polymetallic deposits in north Ossetia: geodynamic typification and minerageny. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 6–18. DOI: 10.46698/VNC.2022.77.30.001. (in Russ.)
4. Gusev A.I., Gusev A.A. Tetrad-effect fractionation of rare earth elements and it using in solve problems of petrology granitoids. *Advances of modern natural science*. 2011. No.5. pp. 45–49. (In Russ.)
5. Gusev A.I. High-fractionation granitoids of Pschish rare metal of district the Northern Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 1. pp. 96–111. DOI: 10.46698/VNC.2023.80.89.007. (In Russ.)
6. Zharikov V.A. Acid-base characteristics of minerals. *Geology of ore deposits*. 1967. No.5. pp. 75–89. (In Russ.)
7. Zagorsky V.E., Kuznetsova L.G., Makagon V.M., Makrygina V.A., Shmakin B.M. Rare-metal pegmatites. *Novosibirsk. Nauka. Siberian Enterprise of the RAS*. 1997. (Granitic pegma-

tites; Vol. 2.). 285 p. (In Russ.)

8. Makagon V.M., Shmakin B.M. Geochemistry of the main formations of granite pegmatites. Novosibirsk. Nauka. Siberian Branch. 1988. 210 p. (In Russ.)

9. Marakushev A.A. Thermodynamic factors of ore zonation formation. Prediction of latent mineralization based on the zonality of hydrothermal deposits. M: Nauka. 1976. pp. 36–51. (In Russ.)

10. Morozova L.N. Lithium kolmozero deposit of rare metal pegmatites: new data on rare element composition (Kola peninsula). Lithosphere. 2018. Vol. 18. No. 1. pp. 82–98. (In Russ.)

11. Parada S.G., Markin M.Yu., Stolyarov V.V., Shishkalov I.Yu. Geological conditions of auriferous mineralization localization and the structure of Mushtinskoe ore field (Kabardino-Balkar Republic). Geology and Geophysics of Russian South. 2015. No 2. pp. 51–65. DOI: 10.23671/VNC.2015.2.55266. (In Russ.)

12. Parada S.G. Ore-magmatic systems of the copper-porphyry type of the Greater Caucasus. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 3. pp. 129–147. DOI: 10.46698/VNC.2021.73.74.01. (In Russ.)

13. Rossovskiy L.N., Chmyrev V.M., Eremenko G.K., Mir-Akbar. Geology and conditions for the formation of spodumene deposits in the Hindu Kush (Afghanistan). Geology of ore deposits. 1976. Vol. 18. No. 6. pp. 19–33. (In Russ.)

14. Černý P. Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies? Precambrian Research. 1991. Vol. 51. pp. 429–468.

15. Černý P., London D., Novak M. Granitic pegmatites as reflections of their sources. Elements. 2012. Vol. 8. pp. 289–294.

16. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. Geochim Comochim Acta. 1999. Vol. 63. No. 3/4. pp. 489–508.

17. Linnen R.L., Van Lichtervelde M., Cerny P. Granitic pegmatites as sources of strategic metals. Elements. 2012. Vol. 8. pp. 275–280.

18. Masuda A., Ikeuchi Y. Lanthanide tetrad effect observed in marine environment. Geochim J. 1979. Vol. 13. pp. 19–22.

19. Mc Donough W.F., Sun S. The composition of the Earth. Chem. Geol. 1995. Vol. 120. pp. 223–253.

20. Sánchez-Muñoz L., Müller A., Andrés S.L., Martin R.F., Modreski P.J., de Moura O.J.M. The P-Fe diagram for K-feldspars: A preliminary approach in the discrimination of pegmatites. Lithos. 2016. Vol. 244. pp. 134–152.

21. Simmons W.B., Webber K.L. Pegmatite genesis: state of the art. Eur. J. Mineral. 2008. Vol. 20. pp. 421–438.

22. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Mean composition of the chondrite groups. Phil. Trans. R. Soc. London. 1988 Vol. 5. pp. 535–544.

23. Zhang A.C., Wang R.C., Hu H., Zhang H., Zhu J.C., Chen X.M. Chemical evolution of Nb–Ta oxides and zircon from the Koktokay No. 3 granitic pegmatite, Altai, northwestern China. Mineralogical Magazine. 2004. Vol. 68. No. 5. pp. 739–756.