

УДК 553.493.6, 553.25

## УЛЬТРАКАЛИЕВАЯ ПОРОДА ТОМТОРСКОГО КОМПЛЕКСА УЛЬТРАОСНОВНЫХ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД И КАРБОНАТИТОВ (АРКТИЧЕСКАЯ СИБИРЬ)

© 2020 г. Академик РАН Н. Л. Добрецов<sup>1,2,\*</sup>, Е. В. Лазарева<sup>1</sup>, С. М. Жмодик<sup>1</sup>, В. А. Пономарчук<sup>1</sup>,  
А. В. Травин<sup>1</sup>, И. Н. Мягкая<sup>1</sup>, А. В. Толстов<sup>1</sup>, Н. С. Карманов<sup>1</sup>

Поступило 05.10.2020 г.

После доработки 07.10.2020 г.

Принято к публикации 09.10.2020 г.

Среди богатых REE–Nb-руд верхнего рудного горизонта Томторского месторождения под юрскими отложениями (скв. 324, инт. 47–62 м) обнаружены ультракалиевые породы (полевошпатовый порфирит), состоящие более чем на 90% из калиевого полевого шпата (КПШ). Породы содержат Nb-оксид титана и редкие зерна ферсмита, Се-бастнезита, Се-монацита, кальцита, барита, стронцианита. КПШ неравномерно замещается мусковитом. По типу распределения REE и элементов на мультидиаграммах порода хорошо сопоставляется с богатыми REE–Nb-рудами участка Буранный, при более низких уровнях содержания. Ag–Ag-возраст КПШ соответствует 323.4 млн лет и коррелирует с геологическим временем формирования богатых REE–Nb-руд Томторского месторождения, а также временем проявления магматической и гидротермальной активности в этой части региона в этот период.

*Ключевые слова:* Томтор, месторождение редкоземельных элементов и ниобия, карбонатиты, ультращелочные породы

**DOI:** 10.31857/S2686739720120051

Ультракалиевые породы (УКП), состоящие более чем на 90% из калиевого полевого шпата (КПШ), известны в составе ассоциаций щелочных пород и карбонатитов, в частности, среди щелочных кальдерных комплексов (Уганда) [1, 2]. Согласно схеме [1], УКП формируются на поздней стадии становления комплекса щелочных пород и карбонатитов, являются конечными производными процессов фенитизации и проявляются в виде секущих тел (даек). Предполагалось, что калий в щелочно-карбонатитовой системе является мантийным элементом [1], что подтверждено экспериментами, показывающими его хорошую растворимость в карбонатитовом расплаве [3]. Нами впервые установлены УКП в Томторском комплексе щелочных пород и карбонатитов (ТК) и приводятся результаты исследова-

ний с целью выяснения роли этих пород в формировании ТК и ультрабогатых Nb–REE-руд.

ТК известен уникальными Nb–REE-рудами ([4, 5] и др.). Геология массива Томтор описана ранее ([4, 5] и др.). УКП обнаружены при разведочном бурении участка Южный между двух впадин, заполненных тонкослоистыми Nb–REE-рудами (скв. 324). Под юрскими отложениями (в интервале 29.7–34 м) залегают плотные, массивные, до сих пор не диагностированные породы с содержанием REE до 8%. Ниже них располагается каолинизированная выветрелая порода с сохранившейся порфировой текстурой. В интервале 47–62 м скважина вскрывает серую пористую порфировую породу. Порфиновые выделения и основная масса породы сложены КПШ, крупные (8 × 1.5 мм) кристаллы которого дважды сдвойничены (рис. 1). Выделяются крупные агрегаты оксидов титана черного цвета с зональными кристаллами, края которых обогащены Nb (до 10 мас. %) и содержат включения Nb-минерала (<5 мкм), соответствующего ферсмиту (Ca, Ce, Na)(Nb, Ta, Ti)<sub>2</sub>(O, OH, F)<sub>6</sub>.

Акцессорные минералы УКП приурочены, главным образом, к полостям, внутри которых развиваются Се-бастнезит (Се – 51–52%, La – 2–2.9%, Pr – 1%, Nd – 2–2.5%, Ba – 0.8%, Ca – 1%, Y – 1.4%, Th – 0.3%), Се-монацит (Се – 28%,

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской  
академии наук, Новосибирск, Россия

\*e-mail: RagozaOD@ipgg.sbras.ru



**Рис. 1.** Внешний вид и типичное строение ультракальциевых пород из Томторского комплекса щелочных пород и карбонатитов. Длина 5 см.

La – 15%, Pr – 2.5%, Nd – 7.9%, Th – 0.7%), кальцит. В крупных кристаллах КПШ наблюдаются мелкие (<5 мкм) включения барита, стронцианита и бастнезита. КПШ неравномерно замещается мусковитом.

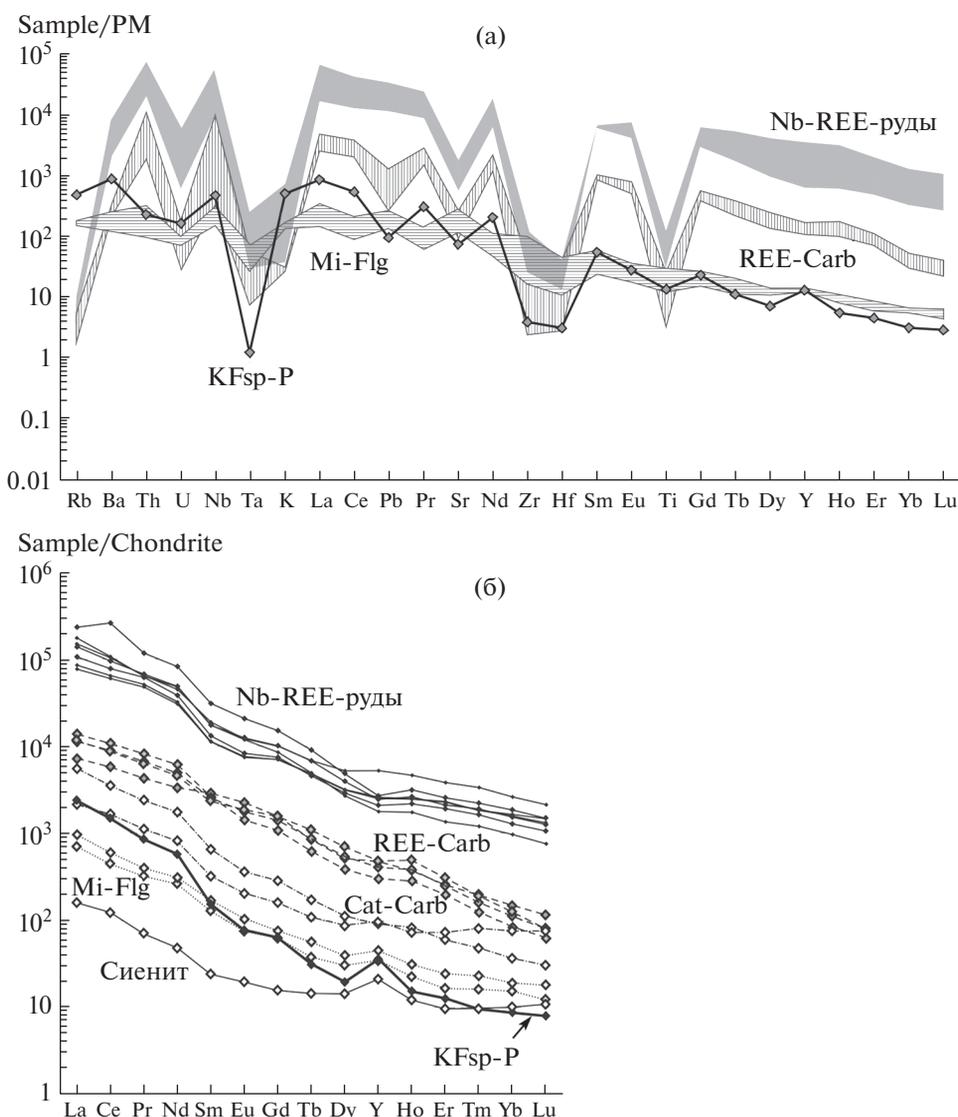
УКП характеризуются повышенным содержанием  $Al_2O_3$  – 22.4 относительно 18.4 мас. % в минерале, пониженным  $SiO_2$  – 55.7 и 65 мас. % (табл. 1). УКП Томтора обогащена Ti. Содержание  $REE_2O_3$  составляет 0.22%, с резким преобладанием LREE (табл. 1), что характерно для большинства пород ТК.

По совокупности геохимических данных УКП занимают промежуточное положение между REE-карбонатитами и микроклин-слюдистыми породами (фенитами), но ближе к последним, исключая Ta, Zr, Hf, которые ближе к карбонатитам (рис. 2а). Существенные отличия наблюдаются в закономерном более высоком содержании K, Rb, Ba, а также Ti. Судя по соотношениям  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  и  $K_2O$ , УКП содержит кальсилит.

Спектры REE основных типов пород массива Томтор и богатых Nb–REE-руд характеризуются резким преобладанием LREE (La, Ce, Pr, Nd) (рис. 2б). Однако отношение  $La_{CH}/Lu_{CH}$  варьирует в разных породах от 14 до 300. Минимальное  $La_{CH}/Lu_{CH}$  установлено в сиените, максимальное – в УКП. Различны и наклоны нормированных графиков легких (LREE), средних (MREE) и тяжелых (HREE) лантаноидов. В некоторых образцах богатых руд наблюдается положительная Ce-аномалия. Наиболее ярко различия проявляются при нормировании содержаний в УКП к другим породам. Относительно сиенита УКП на порядок обогащена LREE, от 8 до 2 раз – MREE, но имеет близкие содержания HREE. Также порода обогащена относительно микроклин-слюдистых пород (фенитов) LREE, при близких содержаниях MREE и незначительно обеднена HREE. Содержание REE в УКП ниже, чем в кальцитовых карбонатитах, но закономерность распределения элементов однотипная, особенно для карбонати-

**Таблица 1.** Содержание основных породообразующих оксидов (мас. %) и микроэлементов (г/т), значения  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$  карбонатов (в ‰) и  $^{87}Rb/^{86}Sr$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr_{400Ma}$  в УКП

| Компонент    | ТЮ-81_1, % | Компонент      | ТЮ-81_1, г/т, ‰ | Компонент                   | ТЮ-81_1, г/т, ‰ |
|--------------|------------|----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| $SiO_2$      | 55.7       | Li             | 100             | La                          | 586             |
| $TiO_2$      | 0.45       | Sc             | 1               | Ce                          | 945             |
| $Al_2O_3$    | 22.4       | V              | 63              | Pr                          | 84              |
| $Fe_2O_3$    | 1.1        | Cr             | 106             | Nd                          | 277             |
| MnO          | 0.07       | Ga             | 84              | Sm                          | 24              |
| MgO          | 0.01       | Rb             | 247             | Eu                          | 4.6             |
| CaO          | 0.27       | Sr             | 1265            | Gd                          | 13.6            |
| $K_2O$       | 16.2       | Y              | 58              | Tb                          | 1.2             |
| $Na_2O$      | b.d.l.     | Zr             | 43              | Dy                          | 5.1             |
| $P_2O_5$     | 0.44       | Nb             | 334             | Ho                          | 0.9             |
| $SO_3$       | 0.12       | Hf             | 0.9             | Er                          | 2.2             |
| SrO          | 0.14       | Ta             | <0.1            | Tm                          | 0.25            |
| BaO          | 0.75       | W              | 1.9             | Yb                          | 1.54            |
| $Nb_2O_5$    | 0.03       | Th             | 20              | Lu                          | 0.21            |
| $REE_2O_3$   | 0.22       | U              | 3.4             | $^{87}Rb/^{86}Sr$           | 0.564           |
| LOI (1000°C) | 2.13       | $\delta^{18}O$ | 22.4            | $^{87}Sr/^{86}Sr$           | $0.70706 \pm 5$ |
| Сумма        | 100.1      | $\delta^{13}C$ | -14.2           | $(^{87}Sr/^{86}Sr)_{400Ma}$ | $0.70386 \pm 6$ |



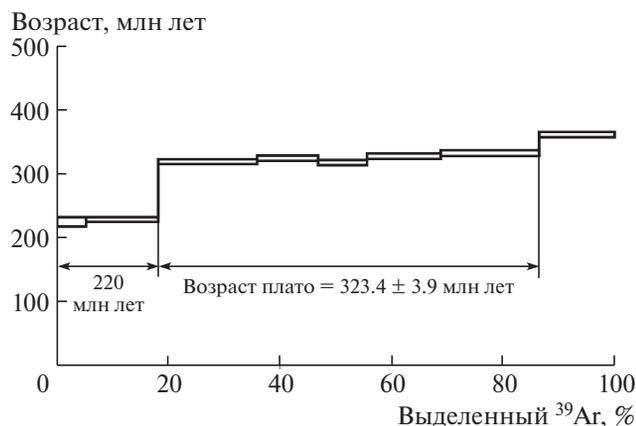
**Рис. 2.** а – Сравнение геохимических особенностей УКП (KFsp-P – ромбы), с полями значений для микроклин-слюдистых пород (Mi-Flg) и редкометалльных карбонатов (Nb-REE-руды и REE-Carb) ТК. Нормировано по примитивной мантии (PM) [6]. б – распределение REE в УКП массива Томтор (KFsp-P), в сравнении с REE (REE-Carb) и кальцитовыми (Cat-Carb) карбонатами, сиенитом, микроклин-слюдистыми породами (Mi-Flg) и богатыми рудами (Nb-REE-руды). б – нормировано на хондрит [6].

тов с жилками кварца и флюорита. Рудные карбонаты также содержат более высокие концентрации REE, но MREE УКП обеднена относительно них в большей степени, чем LREE и HREE. Несмотря на различия в содержаниях, очень близкие закономерности распределения лантаноидов установлены в УКП и богатых Nb-REE-тонкослоистых рудах. Характерным отличием пород, содержащих КПШ, является положительная аномалия Y. Отношение Y/Ho составляет 64.4, что характерно, в большей степени, для гидротермально измененных карбонатов.

На проявление гидротермального низкотемпературного процесса указывает также  $\delta^{18}\text{O}$  (22.4 ‰) карбонатов, которые развиваются в полостях

УКП. При этом  $\delta^{13}\text{C}$  (–14.2 ‰) карбоната отражает влияние биогенно-метаногенных процессов, которые рассматривались на ТК ранее [7–9]. Несмотря на гидротермальные процессы, первичный изотопный состав стронция ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>I</sub> по валовой породе УКП находится в области мантийных значений и составляет 0.7041738, что немного выше, чем ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>I</sub> карбонатов из карбонатов (по нашим неопубликованным данным ~0.7032), и входит в интервал ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>I</sub> рудных горизонтов (0.70371–0.70421 [7]) (табл. 1).

На данный момент надежно установлены 2 основных магматических этапа, сформировавших породу ТК: ~700 и ~400 млн лет [10]. Безрудные



**Рис. 3.** Результаты  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования методом ступенчатого прогрева для порфириковых выделений КПШ из УКП.

(кальцитовые) карбонатиты отнесены к первому временному интервалу, рудные — ко второму. Возрастные характеристики КПШ из УКП не вписываются в эту схему. В  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возрастном спектре КПШ из порфириковых выделений УКП наблюдается плато, характеризующее 70% извлеченного  $^{39}\text{Ar}$  со значением возраста  $323.5 \pm 3.9$  млн лет (рис. 3). В высокотемпературной области — ступень 361 млн лет, возможно, свидетельствует о более древнем возрасте субстрата, который может быть связан с ранними этапами воздействия Вилюйского плюма на восточный край Сибирского кратона, что привело к разрывам литосферы и образованию Вилюйской LIP с радиальной системой рифтов, разломов, дайковых поясов и кимберлитовых трубок [10].

Можно предположить, что 323 млн лет назад произошло внедрение силлов ультракалиевых порфиринов на краю Вилюйского плюма, что привело к “омоложению” изотопной системы уже существующих руд. Такое воздействие должно было отразиться на изотопных системах минералов других пород ТК, в частности биотитов [10], тем не менее, это не наблюдается. В таком случае датировка 323 млн лет соответствует возрасту метасоматического (автометасоматического) изменения УКП в результате флюидного воздействия. Полученный возраст совпадает с возрастом формирования эксплозивных брекчий и активного Mg–K-метасоматоза по бортам щелочных базитов в пределах Накынского кимберлитового поля [12], кимберлитов Далдынского, Восточно-Укукитского, Дюкенского кимберлитовых полей и временем образования нефелиновых сиенитов и щелочных ультраосновных пород ТК [13, 14].

В низкотемпературной части спектра присутствует псевдоплато из двух ступеней, характеризующееся значением 220 млн лет, которое согласует-

ся с завершающей фазой тектоно-магматических событий, связанных с проявлением Сибирского плюма [11].

Приведенные данные показывают широкое проявление гидротермально-метасоматических процессов на минеральном (серицитизация выделений КПШ), изотопном (два этапа теплового воздействия) и геохимическом (распределение РЗЭ, Y/No-отношение) уровнях. Результаты свидетельствуют о полихронности REE–Nb-минерализации на ТК, при этом один из последних этапов ее формирования, вероятно, связан с процессом реювинации на начальной и финальной стадиях проявления Сибирского плюма. Проявление внутриплитного магматизма (Kennedy–Connors–Auburn LIP) в период 320–280 млн лет зафиксировано также на северо-восточной окраине Австралии [15]. Карбоновый возраст УКП хорошо сопоставляется со временем формирования ультрабогатых REE–Nb-руд участков Буранный, Северный и Южный ТК, о чем свидетельствует, в частности, возраст, равный 324 млн лет, определенный Rb–Sr-методом для франколита из гетит-сидерит-франколитового горизонта [13]. По геологическим данным REE–Nb-руды образовались чуть ранее или близодновременно с угленосными отложениями P–C-возраста. Полученные данные свидетельствуют о магматической и гидротермальной активизации в этот период в регионе, которая отчетливо проявилась и в ТК.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 18–17–00120. Аналитические работы проведены в “ЦКП МЭИИ СО РАН”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Le Bas M.J.* // Canadian Mineralogist. 2008. Т. 46. № 4. С. 915–932. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.4.915>
2. *Elliott H.A.L., Wall F., Chakhmouradian A.R. et al.* // Ore Geology Reviews. 2018. V. 93. P. 38–59. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.003>
3. *Shatskiy A., Arefiev A.V., Podborodnikov I.V., et al.* // Gondwana Research. 2019. V. 75. P. 154–171. <https://doi.org/10.1016/j.j.gr.2019.05.004>
4. *Толстов А.В., Тянь О.А.* Геология и рудоносность массива Томтор. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1999. 164 с.
5. *Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Dobretsov N.L., et al.* // Russian Geology and Geophysics. 2015. V. 56. № 6. P. 844–873. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.05.003>
6. *Sun S.-S., McDonough W.F.* // Geological Society Special Publication. 1989. N. 313–345.
7. *Покровский Б.Г., Беляков А.Ю., Кравченко С.М. и др.* // Геохимия. 1990. №. 9. С. 1320–1329.

8. Zhmodik S., Lazareva E., Dobretsov N., et al. // E3S Web of Conferences. 2019. V. 98. 12027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199812027>
9. Ponomarchuk V.A., Dobretsov N.L., Lazareva E.V., et al. // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 490. № 2. P. 76–80. <https://doi.org/10.31857/S2686739720020115>
10. Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С. и др. // ДАН. 2014. Т. 454. № 2. С. 195–199. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14010140>
11. Ivanov A.V., He H., Yan L., et al. // Earth-Science Reviews. 2013. V. 122. P. 58–76. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>
12. Томишин М.Д., Травин А.В., Константинов К.М. / В кн.: Крупные изверженные провинции, мантийные плюмы и металлогения в истории Земли. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2015. 109 с.
13. Зайцев А.И., Энтин А.Р., Ненашев Н.И. и др. Геохронология и изотопная геохимия карбонатитов Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН. 1992. 248 с.
14. Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. Якутск: Офсет, 2010. 108 с.
15. Ernst R.E., Bleeker W., Söderlund U., et al. // Lithos. 2013. V. 174. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.02.017>

## ULTRAPOTASSIUM ROCK OF THE TOMTOR COMPLEX OF ULTRABASIC ALKALINE ROCKS AND CARBONATITES (ARCTIC SIBERIA)

Academician of the RAS N. L. Dobretsov<sup>a,b,#</sup>, E. V. Lazareva<sup>a</sup>, S. M. Zhmodik<sup>a</sup>, V. A. Ponomarchuk<sup>a</sup>, A. V. Travin<sup>a</sup>, I. N. Myagkaya<sup>a</sup>, A. V. Tolstov<sup>a</sup>, and N. S. Karmanov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>b</sup> A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

#e-mail: RagozinaOD@ipgg.sbras.ru

Among the rich REE-Nb-ores of the upper ore horizon of the Tomtor deposit, under the Jurassic deposits (borehole 324, interval 47–62 m), ultra-potassium rocks (feldspar porphyrite) were found, consisting of more than 90% of potassium feldspar (KPS). The rocks contain Nb-titanium oxide and rare grains of fersmite, Ce-bastnesite, Se-monazite, calcite, barite, strontianite. K-feldspar is unevenly replaced by muscovite. By the type of REE and element distribution on multi-diagrams, the rock compares well with the rich REE-Nb ores of the Buranny area, at lower grades. The Ar–Ar age of K-feldspar corresponds to 323.4 Ma and correlates with the geological time of the formation of the rich REE-Nb ores of the Tomtor deposit, as well as the manifestation of magmatic and hydrothermal activity in this part of the region during this period.

*Keywords:* Tomtor, rare earth and niobium deposit, carbonatites, ultra-alkaline rocks