

МИНЕРАЛЫ НИОБИЯ В АЛЯСКИТАХ И МУСКОВИТ-РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ ПЕГМАТИТАХ ВОДЛОЗЕРСКОГО БЛОКА (ЮВ ФЕННОСКАНДИЯ)

Куликова¹ В.В., Куликов¹ В.С., Бычкова² Я.В., Икконен³ П.В., Мельник³ Н.А.

¹Институт геологии Карельского НЦ РАН, г. Петрозаводск, e-mail: vkulikova@yandex.ru,

²ИГЕМ РАН, г. Москва, e-mail: yanab66@yandex.ru

³ИХТРЭМС КНЦ РАН, г. Анатумы, email: nat-melnik@list.ru

В пределах Водлозерского блока ЮВ Фенноскандии и в окаймляющих его зеленокаменных поясах кислый магматизм в мезо- и неоархее приобрел самостоятельное значение и проявился при формировании натровых гранитоидов на начальном, а калиевых гранитов и их производных – на заключительном этапе преобразования тоналит-диорит-гранодиоритового комплекса [Куликова, 1993; Петрохимические серии..., 2001; История Земли..., 2005 и др.]. Известно, что многообразие палингенных гранитоидов подчеркивается разными содержаниями редких элементов, позволивших разделить эти породы на 11 геохимических типов (рядов) толеитового, андезитового и латитового: агапитовые редкометалльные, палингенные известково-щелочные, плюмазитовые редкометалльные, щелочные и щелочные редкометалльные, гранитоиды эндербит-чарнокитовой серии, рапакиви и ультраметаморфические. Плагииграниты ЮВ Фенноскандии близки к среднему геохимическому типу гранитоидов андезитового ряда Л.В. Таусона, где в составе летучих основная роль принадлежит H₂O, Cl, CO₂ [Таусон, 1977; Таусон и др., 1984 и др.].

Трондьемиты и риолиты мезоархее региона встречаются в виде крупных жил с четкими секущими контактами и мигматизируют амфиболиты и тоналиты. Позднекинематические порфирировидные плагииомиоклиновые граниты 1 фазы семейства умереннощелочных гранитов нормального ряда и умереннощелочные лейкограниты принято считать неоархейскими. Они развиты вдоль восточного побережья Онежского, по западному берегу оз. Водлозера и образуют обширные плоские массивы (Кубовский, Охтомозерский и др.), приуроченные к пологим субгоризонтальным зонам отслоения (деламинация – ?) и характеризующиеся небольшой мощностью (10-20м). Граниты возникли, возможно, за счет наложенного окварцевания при аляскитизации и образуют сложнопостроенные многофазные комплексы лейкогранитов–аляскитов–пегматитов, замещающая как тоналиты, так и плагииграниты. При значительном эрозионном срезе эти тела производят впечатление крупных массивов, которые сопровождаются своеобразными полевошпатовыми пегматитами, лейкогранитами и мусковит-редкометалльными пегматитами с возрастом около 2733-2650±50 Ма (но, возможно, и моложе), приуроченными к одной из самых поздних устанавливаемых сланцеватостей. Первые признаки формирования этого комплекса относятся к периоду около 2850 Ма, когда по тектоническим зонам стали проявляться калишпатизация субстрата, амфиболовый порфиробластез по нему (а К-Аг-система амфиболов и биотитов нарушалась) и фиксировался метаморфизм высокотемпературной амфиболитовой фации, обусловленной воздействием мантийного плюма Виндибелт с опережающим его флюидным фронтом.

По своему химическому составу диориты, гранодиориты (тоналиты), плагииграниты (трондьемиты), лейкограниты, мусковит-редкометалльные пегматиты на диаграмме АТМ [(Al₂O₃/TiO₂) – MgO] располагаются в интервалах содержаний MgO, соответственно: 4-1%, 1-0.3%, 0.3-0.1%, <0.1%, что не противоречит диаграмме ТАС [(Na₂O+K₂O) – SiO₂]. При этом обнаруживаются две особенности: 1) боуэновская тенденция в нарастании SiO₂ и H₂O = 1.2-4.3%, что контролируется амфиболом и магнетитом, и 2) четкая феннеровская тенденция, наблюдаемая по нарастанию Fe и щелочей от более примитивных тоналитов – натровых риолитов к трондьемитам, гранитам и лейкогранитам. Петрохимически трондьемиты (плагииграниты) коррелируются с составами вмещающих пород: залегающие среди metabазитов имеют более высокое содержание оксидов Ti, Al, общего Fe, Mg, Ca, P, Zr и более низкое – Rb, Sr, Ba по сравнению с аналогичными породами, секущими диорит-

тоналитовые гнейсы. Средние содержания в неизменных-? плагиогранитах: Rb 80г/т, K/Rb 220, в дацитах, соответственно, 49 и 190; в риолитах 41 и 280; концентрации Pb в риолитах 22 г/т-1.5%, Sn до 22г/т, Mo 7-22г/т. Вмещающие породы вблизи жил лейкосомы насыщены минералами-концентраторами K₂O, Rb, Ba – биотитом и микроклином.

Тренд позднекинematических гранитов начинается от тоналитового тренда с MgO = 1.3-1.5% и АТМ = 35-40 с нарастанием значения последнего до 300 и с уменьшением MgO до 0.1-0.2% для пегматитов мусковит-редкометалльной формации (боуэновская тенденция). Они, являясь продуктом максимального флюидообразования, обнаруживают следующую закономерность составов в ряду лейкограниты–аляскиты–пегматиты [Сафронова, Куликова, 1982], соответственно (в%): SiO₂ 70.08-75.64, 72.26-75.46, 63.34-74.8; CaO 0.98-1.26, 0.7-0.98, 0.14-0.56; Na₂O 2.4-4.5, 3.68-4.44, 3.58-7.14; K₂O 3.22-5.55, 3.5-5.31, 3.5-4.64; Li₂O 0.0021-0.0136, 0.0010-0.0044, 0.0018-0.0006; Rb₂O 0.0195-0.0268, 0.0354-0.048, 0.0489-0.0838; (в г/т) Pb 32, 100, 22; Zn 38, 49, 28; Sn 46, 100, 46. В отдельных пробах лейкогранитов и во всех пробах аляскитов и пегматитов приближенно-количественным анализом ранее был установлен Nb [Куликова, 1993]. Контрастность редкометалльных гранитоидов различных геохимических типов наиболее полно проявлена в лейкократовых гранитах и подчеркивается редкометалльным индексом [(F/1000)×(Li+Rb)/(Sr+Ba)], изменяющимся от 0.002 (в плагиогранитах толеитового ряда) до 156 (в онгонитах – литий-фтористой фации плюмазитовых редкометалльных гранитов) [Таусон и др., 1984]. На АТМ-диаграмме эти особенности гранитоидов отчетливо подчеркиваются на уровне содержаний MgO=0.02-0.3%, где устанавливается обратная феннеровской эволюция в гранитах за счет последовательной смены составов полей гранитов от аляскитов до лейкогранитов, обогащенных фтором и флюидами, и выделения почти мономинеральных топазитов [Коваленко, 1977].

П.В. Икконен и Н.А. Мельник [Мельник, Икконен, 2011] получены эксклюзивные результаты радиологических исследований вышеуказанного района в полевых условиях и на стационарной базе, аккредитованной региональной лабораторией радиационного контроля ИХТРЭМС КНЦ РАН, которые показали, что кислые породы Водлозерского блока, в целом, относятся к торийсодержащим. Максимальные значения эффективной удельной активности (A_{эфф}) с учетом неопределенности измерений установлены для тоналитов – 540 Бк/кг и гранитизированных гнейсов – 430 Бк/кг. Во всех исследуемых горных породах были обнаружены природные радионуклиды рядов ²³⁸U((0.1-1.4)×10⁻³ мас.%) и ²³²Th((0.3-3.9)×10⁻³ мас.%), а также ⁴⁰K (0.5-4.8 мас.%). Максимальные содержания ²³⁸U(²²⁶Ra) характерны для лейкогранитов, максимальные содержания ²³²Th обнаружены также в тоналитах, плагиомикроклиновых гранитах и гнейсах. В пробе пегматита из кровли аляскитового гранита в долине р. Черевы на восточной окраине Водлозерского блока обнаружены природные радионуклиды рядов ²³⁸U и ²³²Th (²²⁶Ra, ²¹², ²¹⁴ Pb, ²²⁸Ac, ²¹², ²¹⁴Bi и др.). Средние значения результатов определения в исследуемом образце удельной радиоактивности радиотоксичных нуклидов, находящихся в состоянии радиоактивного равновесия, составляют (Бк/кг): ²²⁶ Ra 23.2±4.5; ²³²Th 52.9±7.8; ⁴⁰K 794±140; A_{эфф} 160±28; мощность экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения на поверхности образцов 0.10-0.15 мкЗв/ч.

Породы гранитоидного ряда характеризуются повышенными содержаниями ториевых минералов (монацит, ксенотим и др.) [Мельник, Икконен, 2011]. Авторами тезисов исследовался образец крупнозернистых мусковит-редкометалльных пегматитов в Институте геологии Карельского НЦ РАН в 2009 г. на микроанализаторе «INCA Enerdgy 350» на базе сканирующего электронного микроскопа «VEGA II LSH». Установлена ранее неизвестная поздняя минерализация ниобийсодержащих минералов или их фрагментов (рис. 1) переменного состава. Приведенные ниже химические составы минералов (вес.%), полученные на микрозонде, имеют соответствующие координаты на рис. 1. **Рис.1.1:** 1)MgO 0.40, Al₂O₃ 3.81, SiO₂ 38.77, Fe₂O₃ 3.94, ZrO₂ 38.76, Ce₂O₃ 0.90, Er₂O₃ 1.03, Yb₂O₃ 1.32, HfO₂ 1.85, IrO₂ 3.93, ThO₂ 4.25, UO₃ 0.50; 2)SiO₂ 1.88, Fe₂O₃ 94.49, Nb₂O₅ 3.63; 3)MgO 6.76, Al₂O₃ 15.10, SiO₂ 55.52, K₂O 4.14, Fe₂O₃ 18.49; 4) Na₂O 3.16, MgO 0.66, Al₂O₃ 4.70, SiO₂ 18.21, P₂O₅ 18.84, K₂O 1.14, CaO 1.53, TiO₂ 1.28, Fe₂O₃ 18.01, Nb₂O₅ 12.49, Ce₂O₃ 2.10, Ta₂O₅ 4.07, ThO₂

13.20, UO₃ 0.22; **5)**Na₂O 2.31, MgO 1.20, Al₂O₃ 7.02, SiO₂ 17.94, P₂O₅ 23.05, SO₃ 1.68, K₂O 0.98, CaO 2.98, Fe₂O₃ 14.16, Nb₂O₅ 7.31, Ce₂O₃ 4.40, Nd₂O₃ 2.83, Ta₂O₅ 3.03, ThO₂ 10.70;**6)**Al₂O₃ 3.29, SiO₂ 33.81, CaO 0.52, TiO₂ 0.36, Fe₂O₃ 5.34, ZrO₂ 42.37, HfO₂ 1.75, IrO₂ 7.28, ThO₂ 4.83; **7)**Al₂O₃ 2.62, SiO₂ 33.89, K₂O 0.24, CaO 0.34, TiO₂ 0.37, Fe₂O₃ 3.74, ZrO₂ 47.85, HfO₂ 2.26, Ta₂O₅ 0.32, IrO₂ 4.44, ThO₂ 3.67; **8)**Al₂O₃ 3.15, SiO₂ 36.69, K₂O 0.47, CaO 1.88, MnO 2.66, Fe₂O₃ 3.65, ZrO₂ 39.94, HfO₂ 2.28, IrO₂ 3.67, ThO₂ 3.94, UO₃ 0.67; **9)**Al₂O₃ 2.90, SiO₂ 35.95, K₂O 0.49, CaO 1.94, MnO 2.55, Fe₂O₃ 0.82, CoO 0.43, ZrO₂ 41.37, Ce₂O₃ 0.73, HfO₂ 2.39, IrO₂ 4.36, ThO₂ 4.39; **10)**Al₂O₃ 4.38, SiO₂ 39.12, K₂O 1.55, CaO 1.14, MnO 1.31, Fe₂O₃ 1.23, ZrO₂ 41.44, Yb₂O₃ 0.88, HfO₂ 2.18, IrO₂ 2.54, ThO₂ 3.64, UO₃ 0.39; **11)**MgO 0.48, Al₂O₃ 4.28, SiO₂ 41.19, K₂O 0.55, CaO 0.63, MnO 0.65, Fe₂O₃ 2.66, ZrO₂ 41.92, Ce₂O₃ 1.14, HfO₂ 2.28, ThO₂ 3.68. **Рис.1.2:** **1)**MgO 0.52, Al₂O₃ 2.18, SiO₂ 7.63, CaO 1.50, TiO₂ 1.20, Fe₂O₃ 13.54, Nb₂O₅ 52.95, Ce₂O₃ 2.51, Nd₂O₃ 0.77, Sm₂O₃ 0.77, Ta₂O₅ 3.16, IrO₂ 6.75, ThO₂ 2.17, UO₃ 3.69; **2)**MgO 0.63, Al₂O₃ 2.57, SiO₂ 12.35, P₂O₅ 3.58, CaO 0.72, TiO₂ 1.09, Fe₂O₃ 13.68, Nb₂O₅ 50.57, Rh₂O₃ 1.72, Ce₂O₃ 1.58, Ta₂O₅ 2.70, IrO₂ 1.52, ThO₂ 3.02, UO₃ 3.53; **3)**MgO 0.70, Al₂O₃ 3.94, SiO₂ 15.05, K₂O 0.51, CaO 1.92, TiO₂ 1.09, MnO 0.70, Fe₂O₃ 16.67, Y₂O₃ 3.39, Nb₂O₅ 45.9, Ce₂O₃ 3.96, Ta₂O₅ 1.88, ThO₂ 1.27, UO₃ 2.43;**4)**Al₂O₃ 1.63, SiO₂ 28.62, P₂O₅ 2.63, CaO 1.04, TiO₂ 0.67, MnO 0.58, Fe₂O₃ 8.71, Ce₂O₃ 1.80, Nd₂O₃ 0.99, Ta₂O₅ 0.23, IrO₂ 1.99, PbO 10.32, UO₃ 3.50; **5)**Al₂O₃ 1.43, SiO₂ 30.08, CaO 1.81, TiO₂ 1.15, MnO 1.40, Fe₂O₃ 9.65, As₂O₃ 0.55, Y₂O₃ 4.36, Nb₂O₅ 41.90, CdO 0.47, Ce₂O₃ 3.40, Nd₂O₃ 1.61, Sm₂O₃ 0.88, ThO₂ 1.03; **6)**Al₂O₃ 1.30, SiO₂ 85.81, Fe₂O₃ 3.61, Nb₂O₅ 9.29. **Рис.1.3:** **1)**Al₂O₃ 2.90, SiO₂ 7.46, P₂O₅ 6.76, TiO₂ 8.07, Fe₂O₃ 7.49, Nb₂O₅ 25.95, UO₃ 41.36; **2)**SiO₂ 14.34, CaO 5.94, TiO₂ 10.03, Fe₂O₃ 8.71, Nb₂O₅ 51.40, ThO₂ 9.57. **Рис. 1.4:** **1)**Al₂O₃ 0.77, SiO₂ 4.87, CaO 5.89, TiO₂ 2.27, MnO 0.78, Fe₂O₃ 11.03, Nb₂O₅ 60.65, Rh₂O₃ 1.29, Ce₂O₃ 2.38, Nd₂O₃ 1.33, Ta₂O₅ 5.06, ThO₂ 2.54, UO₃ 0.82; **2)**Al₂O₃ 2.31, SiO₂ 22.96, CaO 0.83, TiO₂ 0.85, Fe₂O₃ 5.90, ZrO₂ 36.52, Nb₂O₅ 16.96, HfO₂ 2.50, Ta₂O₅ 2.14, IrO₂ 6.75, ThO₂ 2.26; **3)**MgO 1.90, Al₂O₃ 7.30, SiO₂ 21.92, K₂O 0.75, CaO 1.65, TiO₂ 3.38, MnO 0.54, Fe₂O₃ 13.40, Nb₂O₅ 38.13, Ce₂O₃ 3.15, Nd₂O₃ 1.26, Ta₂O₅ 3.44, ThO₂ 3.19; **4)**SiO₂ 4.93, CaO 4.65, TiO₂ 2.88, MnO 3.39, Fe₂O₃ 9.03, Nb₂O₅ 59.58, Ce₂O₃ 2.75, Nd₂O₃ 1.57, Ta₂O₅ 3.50, OsO₂ 5.09, ThO₂ 1.88, UO₃ 0.75; **5)**Al₂O₃ 1.09, SiO₂ 8.13, CaO 2.61, TiO₂ 2.70, Fe₂O₃ 6.74, Nb₂O₅ 63.92, Rh₂O₃ 0.72, Ce₂O₃ 2.26, Ta₂O₅ 6.18, OsO₂ 1.14, ThO₂ 2.95, UO₃ 1.56; **6)**Na₂O 0.35, MgO 5.01, Al₂O₃ 20.81, SiO₂ 55.74, P₂O₅ 0.73, K₂O 3.03, CaO 0.50, TiO₂ 0.30, MnO 0.67, Fe₂O₃ 10.57, Nb₂O₅ 2.27; **8)**SiO₂

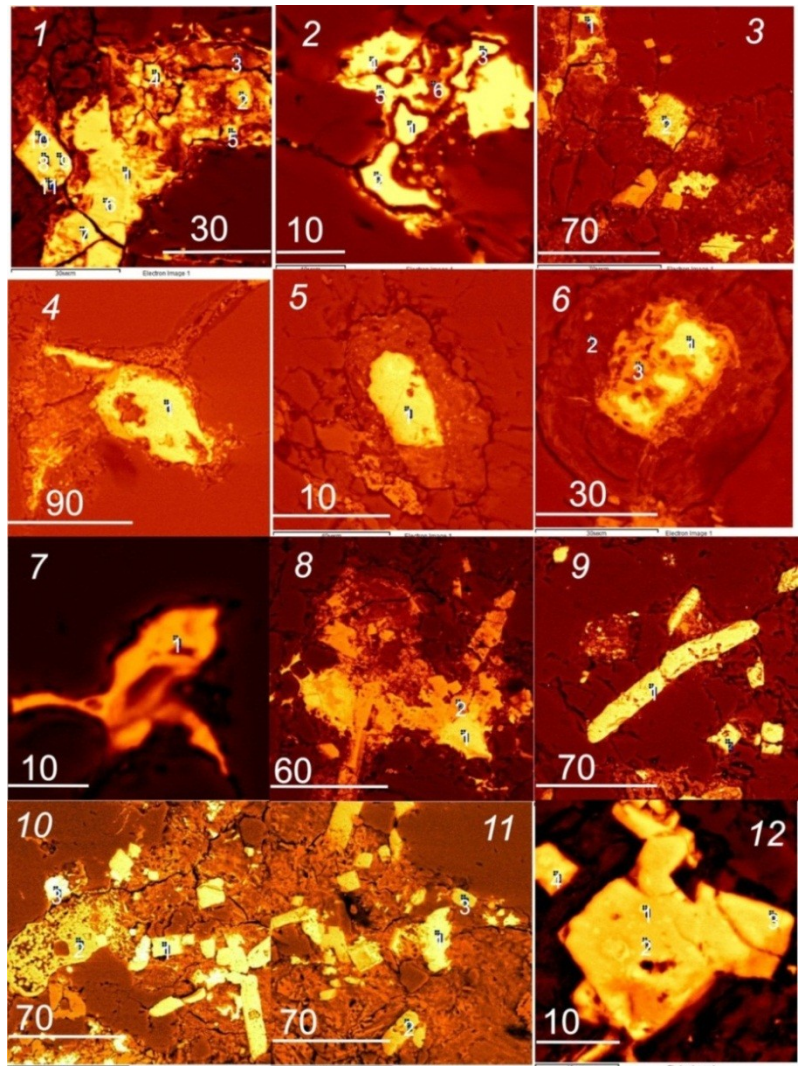


Рис. 1. Акцессорные минералы (в μm) мусковит-редкометалльных пегматитов района оз. Волоцкого (Плесецкий р-н, Архангельская обл.). Пояснения в тексте.

100.00; 9) SiO₂ 100.00. **Рис. 1.5:** 1) SiO₂ 7.13, CaO 2.31, TiO₂ 2.28, Fe₂O₃ 6.00, Y₂O₃ 9.72, Nb₂O₅ 56.49, Rh₂O₃ 2.88, Ce₂O₃ 4.89, Ta₂O₅ 3.74, ThO₂ 4.56. **Рис. 1.6:** 1) SiO₂ 4.12, Fe₂O₃ 5.71, Nb₂O₅ 31.24, UO₃ 58.94; 2) MgO 4.93, Al₂O₃ 22.31, SiO₂ 59.97, K₂O 3.64, Fe₂O₃ 9.14; 3) Al₂O₃ 3.27, SiO₂ 18.36, P₂O₅ 7.32, CaO 1.27, TiO₂ 1.38, Fe₂O₃ 28.84, Nb₂O₅ 17.78, PtO₂ 9.00, ThO₂ 5.81, UO₃ 6.96. **Рис. 1.7:** 1) SiO₂ 11.69, CaO 2.47, TiO₂ 2.01, MnO 0.62, Fe₂O₃ 15.71, Y₂O₃ 4.42, Nb₂O₅ 44.45, Ce₂O₃ 3.84, Nd₂O₃ 1.83, Sm₂O₃ 1.10, Ta₂O₅ 2.14, ThO₂ 7.20. **Рис. 1.8:** 1) SiO₂ 12.71, CaO 2.60, Fe₂O₃ 17.48, Nb₂O₅ 56.95, ThO₂ 10.27; 2) Al₂O₃ 2.86, SiO₂ 38.44, ZrO₂ 52.25, ThO₂ 6.45. **Рис. 1.9:** 1) SiO₂ 42.74, CaO 2.22, ZrO₂ 55.04; 2) Al₂O₃ 2.67, SiO₂ 35.09, CaO 1.73, ZrO₂ 60.51. **Рис. 1.10:** 1) Al₂O₃ 4.07, SiO₂ 39.16, Fe₂O₃ 3.90, ZrO₂ 52.87; 2) SiO₂ 12.45, Fe₂O₃ 87.55; 3) SiO₂ 4.18, CaO 16.51, Nb₂O₅ 79.31. **Рис. 1.11:** 1) SiO₂ 3.63, CaO 3.98, TiO₂ 8.81, MnO 9.63, Fe₂O₃ 23.72, Nb₂O₅ 50.23; 2) Al₂O₃ 3.87, SiO₂ 37.83, ZrO₂ 50.46, ThO₂ 7.84; 3) SiO₂ 42.09, ZrO₂ 57.91. **Рис. 1.12:** 1) Al₂O₃ 2.91, SiO₂ 20.52, CaO 0.94, MnO 1.18, Fe₂O₃ 59.21, ZrO₂ 15.24; 2) Al₂O₃ 3.37, SiO₂ 36.91, CaO 1.80, MnO 3.09, Fe₂O₃ 3.14, ZrO₂ 51.69; 3) Al₂O₃ 5.34, SiO₂ 43.58, CaO 1.66, ZrO₂ 49.43, 4) Al₂O₃ 2.79, SiO₂ 33.49, CaO 1.95, MnO 2.73, Fe₂O₃ 25.49, ZrO₂ 33.55.

Nb и Ta находятся в большом числе редкоземельных, титановых и др. минералов: фергусонит (Y, Er, Ce, U)(Nb, Ta, Ti)O₄, эвксенит (Y, Ce, Ca ...)(Nb, Ta, Ti)₂O₆, самарскит (Y, Er ...)₄[(Nb, Ta)₂O₇]₃, ильменорутит (Ti, Nb, Fe)O₂ и др. [Химическая..., 2010]. Состав минералов ряда пироклор–микрولит меняется в широких пределах (% масс): Nb₂O₅ 0-63, Ta₂O₅ 0-77, TiO₂ 2-13, ThO₂ 0-5, UO₂ 0-11, UO₃ 0-15, PЗЭ₂O₃ 2-18, SnO₂ 0-4, ZrO₂ 0-6 при общей формуле [Na,Ca][Nb, Ta]₂O₆F. Аналоги вышеописанных минералов Nb встречены практически на всей территории блока как в позднекинематических гранитоидах, так и в людииковийских породах разного состава. Они постоянно ассоциируются с хорошо ограниченными кристаллами циркона, что требует дополнительного изучения.

Литература

История Земли в галактических и солнечных циклах / Куликова В.В., Куликов В.С., Бычкова Я.В., Бычков А.Ю. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. – 250 с.

Коваленко В.И. Петрология и геохимия редкометалльных гранитоидов. – Новосибирск: Наука, 1977. – 205 с.

Куликова В.В. Волоцкая свита – стратотип нижнего архея Балтийского щита. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1993. – 255 с.

Мельник Н.А., Икконен П.В. Изучение радиационно-гигиенических характеристик типичных геологических объектов Водлозерского блока // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 20-летию юбилею НП «Водлозерский»: Особо охраняемые природные территории в XXI в. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. с. 194-198.

Сафронова Г.П., Куликова В.В. Геохимические критерии в оценке формационной принадлежности пегматитов ЮВ окраины Балтийского щита // Тез. IV семинара по Геохимическим методам поисков месторождений полезных ископаемых. Москва, 1982. Т.3. С. 117-119.

Петрохимические серии магматических пород // Куликова В.В., Куликов В.С., Бычкова Я.В., Бычков А.Ю. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. – 114 с.

Таусон Л.В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. – М: Наука, 1977. – 267 с.

Таусон Л.В., Антипин В.С., Захаров М.П., Зубков В.С. Геохимия мезозойских латитов Забайкалья. – Новосибирск: Наука, 1984. – 215 с.

Химическая технология ниобия и тантала: учебное пособие // Маслов А.А. и др. ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 97 с.