

Петрохимические особенности пород куркиёкского норит-эндербитового комплекса Северного Приладожья и состав исходного расплава

Григорьева С. Б.¹, Балтыбаев Ш. К.^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, s.grigr1902@gmail.com

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург

³ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, shauket@mail.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты анализа петрохимических особенностей пород палеопротерозойского куркиёкского норит-эндербитового комплекса с оценкой возможного исходного расплава эндербитов. Петрохимический анализ производится с помощью классификационных и дискриминационных диаграмм с делением пород на группы по контрастным значениям SiO_2 и $x\text{Mg}$. Термогеохимическим моделированием в программе COMAGMAT установлена точка пересечения траекторий составов при равновесной кристаллизации, отвечающая температуре $\sim 1160^\circ\text{C}$. Установлено, что при этой температуре присутствует плагиоклаз, а при дальнейшем снижении температуры в систему добавляется ортопироксен. При достижении температуры $\sim 800^\circ\text{C}$ и практически полной кристаллизации породы формируется парагенезис «плагиоклаз + ортопироксен + кварц + биотит + клинопироксен + ильменит». Установлено, что вариации кислородных буферов (QFM, QIF, MW) не оказывают существенного влияния на области устойчивости таких фаз, как амфибол, биотит и ортопироксен.

Ключевые слова: Северное Приладожье, эндербиты, исходный расплав, термогеохимическое моделирование, кислородный буфер.

Petrochemical features of rocks of the Kurkijoki norite-enderbite complex of the Northern Ladoga region and the composition of the initial melt

Grigorieva S. B.¹, Baltybaev Sh. K.^{2,3}

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, s.grigr1902@gmail.com

² Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg

³ Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, shauket@mail.ru

Abstract. The article presents the results of an analysis of the petrochemical features of the rocks of the Paleoproterozoic Kurkijoki norite-enderbite complex with an assessment of a possible initial melt for enderbites. The petrochemical analysis is carried out using classification and discrimination diagrams, dividing the rocks into groups based on contrasting values of SiO_2 and $x\text{Mg}$. Thermogeochemical modeling in the COMAGMAT program established the intersection point of composition trajectories during equilibrium crystallization, corresponding to a temperature of $\sim 1160^\circ\text{C}$. It was found that plagioclase is present at this temperature, and orthopyroxene is added to the system with a further decrease in temperature. When the temperature reaches $\sim 800^\circ\text{C}$ and the rock is almost fully crystallized, a paragenesis of «plagioclase + orthopyroxene + quartz + biotite + clinopyroxene + ilmenite» is formed. It has been established that variations in oxygen buffers (QFM, QIF, MW) do not significantly affect the stability fields of phases such as amphibole, biotite, and orthopyroxene.

Keywords: Northern Ladoga region, enderbite, initial melt, thermogeochemical modeling, oxygen buffer.

Введение

Эндербиты – это кислые составляющие чарнокитовой серии пород с ромбическим пироксеном и плагиоклазом. Согласно классификации (Шемакин, 1988) к эндербитам относятся тоналиты–плагиограниты и, кварцевые диориты, содержащие гиперстен. Формирование этих магматических пород обычно сопряжено с условиями метаморфизма гранулитовой фации.

В Северном Приладожье палеопротерозойские (1.89 млрд лет) эндербиты в составе куркиёкского норит-эндербитового комплекса образуют мелкие и крупные массивы площадью до 45–50 км² (наиболее крупный – Куркиёкский массив) (Ладожская..., 2020). В них преобладают породы диоритового состава. Выделяются отдельные фазы внедрения. Наиболее ранняя фаза – нориты, габбро и редкие гипербазиты. Они образуют в эндербитах шлировые включения, ксенолиты, реже – мелкие линзовидные тела в гнейсах (Ладожская..., 2020). Породообразующие минералы эндербитов – гиперстен, плагиоклаз, кварц, ± амфибол, ± биотит. Иногда встречаются гранат, клинопироксен и весьма редко калиевый полевой шпат. Акцессорные – апатит, магнетит, ильменит, графит, циркон, рутил.

Целью работы является характеристика петрохимических особенностей пород куркиёкского комплекса и оценка состава исходного расплава эндербитов на основе термодинамического моделирования минералообразования.

Петрохимическая характеристика

Петрохимическая характеристика пород основывалась на анализе распределения фигуративных точек составов на классификационных и дискриминационных диаграммах: TAS (Middlemost, 1994), «Ab-An-Or» (O'Connor, 1965), и вариационных диаграммах Харкера.

Исследуемая совокупность из 97 химических составов пород предварительно была разделена на четыре группы (рис. 1) методом кластерного анализа.

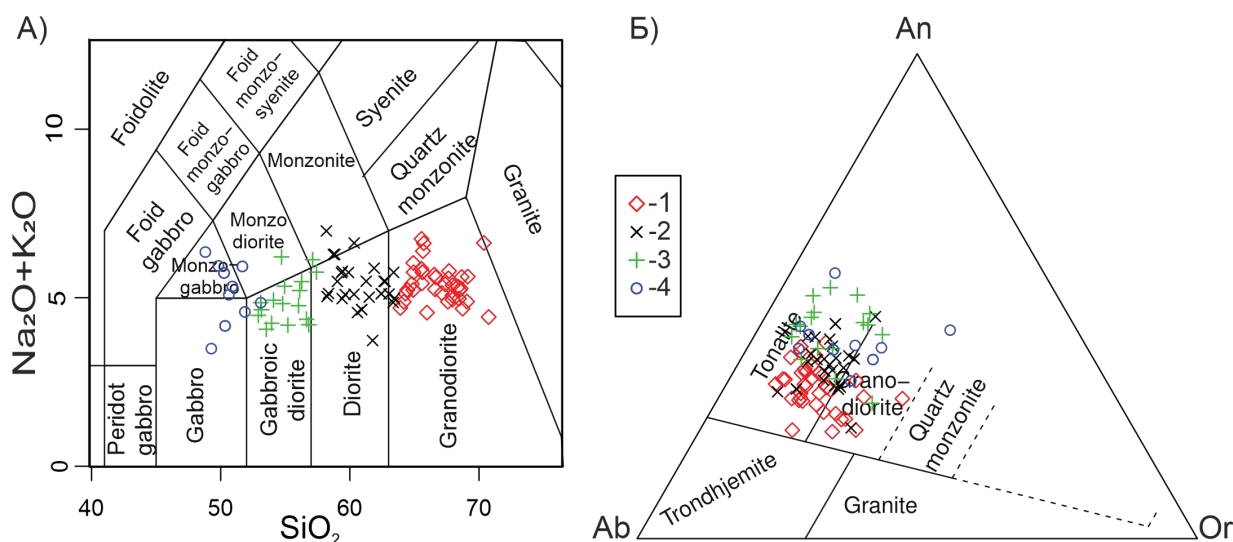


Рис. 1. Составы пород куркиёкского норит-эндербитового комплекса Северного Приладожья: А) диаграмма TAS (Middlemost 1994); Б) Треугольная диаграмма Ab-An-Or (O'Connor, 1965); 1, 2, 3, 4 – номера групп пород (см. текст)

Fig. 1. Compositions of rocks of (как в аннотации) the Kurkijoki norite-enderbite complex in the Northern Ladoga region: A) Diagram TAS (Middlemost 1994); B) Ternary diagram Ab-An-Or (O'Connor, 1965); 1, 2, 3, 4 – numbers of the rock groups (see in text)

Группа 1 относится к ряду гранодиорита, содержание $\text{SiO}_2 = 63.02\text{--}70.4$ мас. %, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 4.42\text{--}6.68$ мас. %, при этом $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.83\text{--}4.83$).
Группа 2 относится к ряду диорита и монзонита, содержание $\text{SiO}_2 = 57.36\text{--}62.8$ мас. %, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3.7\text{--}6.92$ мас. %, при этом $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.23\text{--}7.27$).
Группа 3 относится к ряду габбродиорита и монцодиорита, $\text{SiO}_2 = 52.15\text{--}56.89$ мас. %, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 4.00\text{--}6.11$ мас. %, при этом $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.08\text{--}5.49$).
Группа 4 относится к ряду габбро и монцогаббро, $\text{SiO}_2 = 48.37\text{--}52.48$ мас. %, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3.48\text{--}6.31$ мас. %, при этом $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.49\text{--}5.49$).

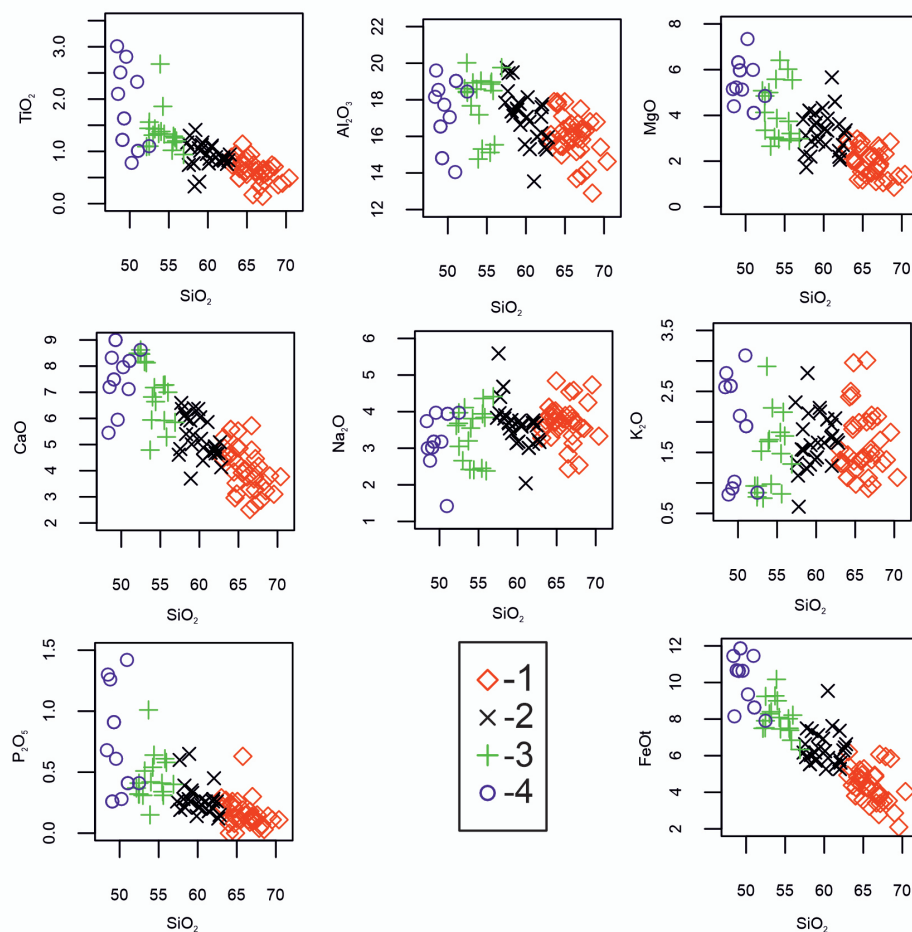


Рис. 2. Составы пород куркиёкского норит-эндербитового комплекса на вариационных диаграммах Харкера: 1, 2, 3, 4 – номера групп пород

Fig. 2. Compositions of rocks of the Kurkijoki norite-enderbite complex on Harker diagrams: 1, 2, 3, 4 – numbers of the rock groups

Согласно диаграмме Ab-An-Or, породы большей частью относятся к тоналитовой серии, некоторые пробы попадают в ряд гранодиорита и монцонита (рис. 1, Б). Эти выводы согласуются с петрографией исследуемых пород.

На вариационных диаграммах Харкера (рис. 2) тренды изменения составов пород характеризуют последовательность кристаллизационной дифференциации, в ходе которой уменьшалось содержание FeO, MgO, в связи с кристаллизацией феррических минералов, CaO – в связи с кристаллизацией феррических минералов и плагиоклазов, и накоплением в остаточном расплаве Na₂O, K₂O, Al₂O₃ и SiO₂, из которого кристаллизовались лейкократовые минералы. Изменение содержания TiO₂ характеризует его вхождение в качестве примеси в породообразующие феррические минералы, а содержание P₂O₅ – кристаллизацию апатита.

Моделирование исходного расплава

Оценка температуры и состава исходной магмы проведена при помощи программы COMAGMAT v. 3.75 (Ariskin, Barmina, 2004), используя метод геохимической термометрии (Френкель и др., 1987). Для моделирования были использованы данные для групп 3 и 4, которые являются менее дифференцированными. Были выбраны составы: MediumPrimitive – среднее из наиболее магнезиальных образцов групп 3 и 4, Medium 3 – средний состав для группы 3. При расчетах использовались следующие начальные параметры: содержание воды в виртуальном расплаве породы 0.1 мас. %, давление 5 кбар, кислородный буфер QFM+1. Эти значения выбраны как наиболее

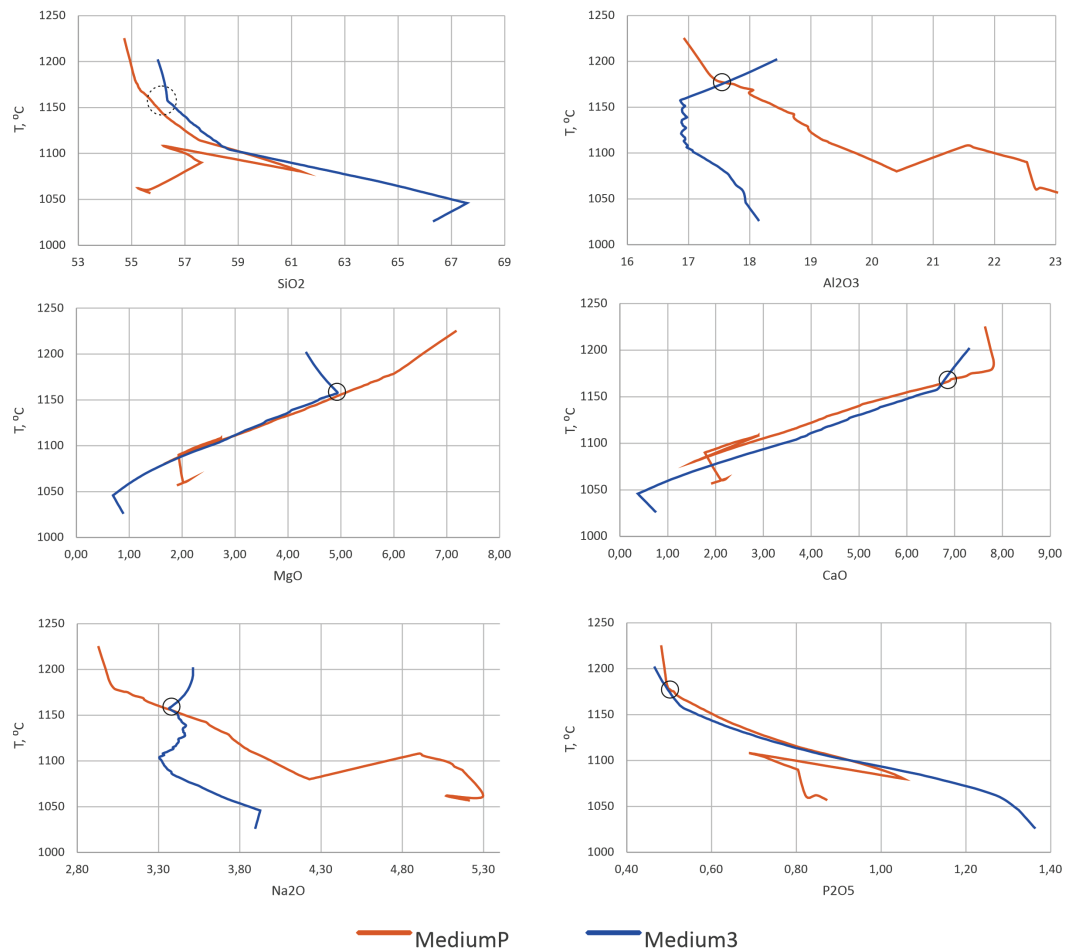


Рис. 3. Траектории равновесной кристаллизации «среднего» (Medium3) и «примитивного» (MediumPrimitive) составов пород куркиёвского норит-эндербитового комплекса: синим цветом показана траектория кристаллизации моделируемого расплава со средним составом группы 3, а красным – со средним составом, рассчитанным для наиболее магнезиальных образцов групп 3 и 4

Fig. 3. Trajectories of equilibrium crystallization for the «average» (Medium3) and «primitive» (MediumPrimitive) compositions of rocks of the Kurkiei norite-enderbite complex: the blue and red lines represent crystallization trajectories of the modeled melts with the average compositions for group 3 the average compositions calculated for the most magnesium samples of groups 3 and 4

вероятные, которые максимально адекватно воспроизводят наблюдаемые минеральные ассоциации в эндербитах.

На рис. 3 показаны пересечения линий эволюции состава модельных расплавов в координатах «петрогенные оксиды—температура». Наблюдаемые траектории пересекаются при температуре $\sim 1160^\circ\text{C}$. Эта точка пересечения характеризует начало формирования каркасов кумулусных минералов (плагноклаза, ромбического пироксена и авгита), находящихся в равновесии с остаточным расплавом. Исходный расплав в точке пересечения характеризуется магнезиальностью $x_{\text{Mg}} = \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO}) \sim 0.53$ при среднем содержании $\text{SiO}_2 \sim 56$ мас. %, коэффициентом глиноземистости $al' (\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{FeO} + \text{MgO})) \sim 0.78$, коэффициентом апгаитности $K_a ((\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3) \sim 0.43$.

Моделирование минерального состава породы

Моделирование минерального состава производилось на основе метода минимизации энергии Гиббса системы. Для этой цели применялась компьютерная программа MAgEMin (Riel et al., 2022) с термодинамической базой данных минералов и твердых растворов (Green et al., 2016). Кроме оценки минерального состава, исследовалось, в частности влияние кислородного буфера на положение ортопироксеновых и амфиболовых минеральных парагенезисов в РТ-поле.

Установлено, что при $T \sim 1160^\circ\text{C}$ при равновесной кристаллизации устойчива система «плагиоклаз + расплав», при дальнейшем снижении температуры до $\sim 1025^\circ\text{C}$ в системе появляется ортопироксен, а при температуре $\sim 785^\circ\text{C}$ формируется устойчивый парагенезис «плагиоклаз + ортопироксен + кварц + биотит + клинопироксен + ильменит» (рис. 4), который чаще всего встречается в изученных эндебитах.

Изменение буфера кислорода в широких пределах (рассмотрены буферы MW, QFM, QIF) не сильно сдвигает области существования таких фаз, как ортопироксен и амфибол: они находятся в диапазоне T от 500 до 780°C для амфибола и T от 700 до 1060°C для ортопироксена при изменении $\text{Log}(f\text{O}_2)$ на 6 единиц при заданной температуре (рис. 5).

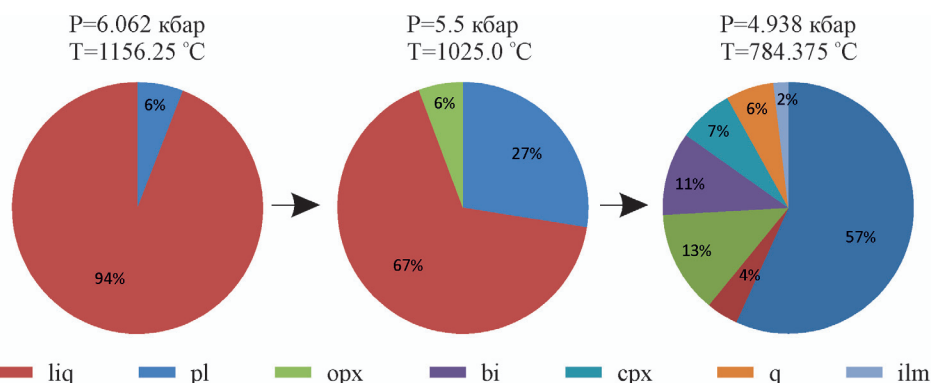


Рис. 4. Минеральные парагенезисы при равновесной кристаллизации среднего состава группы 3 при $T = 1156, 1025, 784^\circ\text{C}$ и $P = 6, 5.5, 5$ кбар, кислородном буфере QFM+1 и содержании $\text{H}_2\text{O} = 0.5\%$

Fig. 4. Mineral parageneses during equilibrium crystallization of the modeled melt with the average composition of group 3 at $T = 1156, 1025, 784^\circ\text{C}$ and $P = 6, 5.5, 5$ kbar, oxygen buffer QFM+1, and the H_2O content = 0.5%

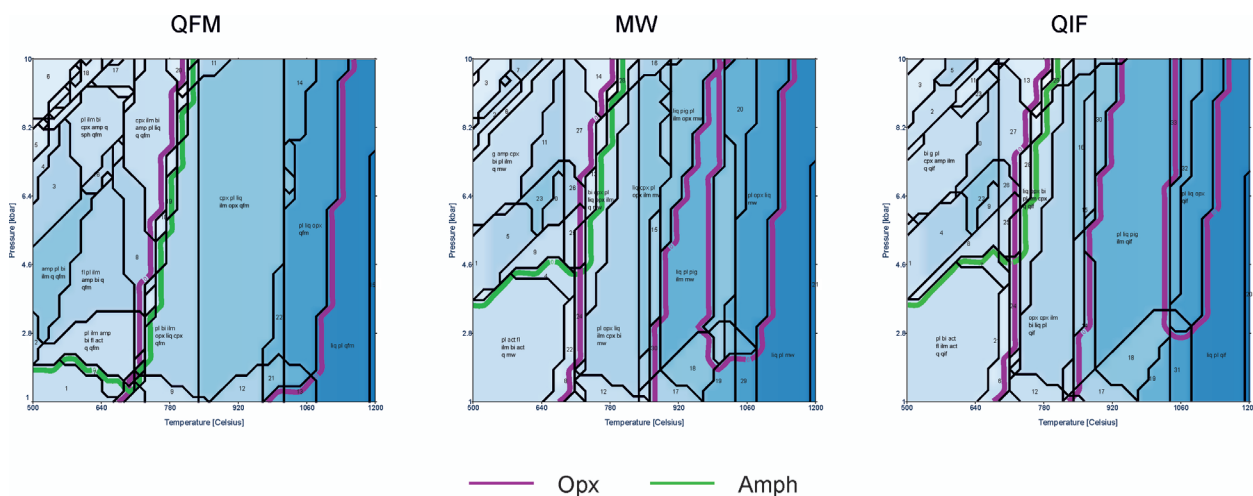


Рис. 5. Диаграммы фазовых равновесий с учетом влияния разных кислородных буферов на равновесную кристаллизацию: использован средний состав породы группы 3

Fig. 5. Phase equilibrium diagrams taking into account the influence of different oxygen buffers on equilibrium crystallization: the average rock composition of group 3 was used

Выводы

Породы куркиёского комплекса по особенностям химического состава делятся на четыре группы, что согласуется с многофазным и дифференцированным строением массивов эндебитов.

Эволюция составов пород куркиёского комплекса характеризуется постепенным уменьшением содержания FeO , MgO при кристаллизации феррических минералов, CaO – при кристаллизации клинопироксенов и плагиоклазов, и накоплением в остаточном расплаве щелочей, глинозема и кремнезема, из которого кристаллизовались лейкократовые минералы.

Исходный расплав эндербитов характеризуется средней магнезиальностью ($x_{Mg} \sim 0.53$), умеренной глиноземистостью и нормальной щелочностью. Наиболее ранними минералами (кумулясной фазой) выступали плагиоклаз и пироксены.

Фугитивность кислорода, в отличие от содержания воды в расплаве, не является основным контролирующим параметром, определяющим появление таких водосодержащих минералов, как амфибол или биотит.

Литература

1. Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерогения) / Ред. Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 435 с.
2. Френкель М. Я., Арискин А. А., Бармина Г. С., Корина М. И., Коптев-Дворников Е. В. Геохимическая термометрия магматических пород – принципы метода и примеры применения // Геохимия, 1987. № 11. С. 1546 –1562.
3. Шемякин В. М. Петрология чарнокитоидов раннего докембрия / Под ред. К. А. Шуркина. Л. Изд-во: Наука, 1988. 232 с.
4. Ariskin A. A., Barmina G. S. COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrological applications // *Geochem. Int.*, 2004. V. 42. P. 1–157.
5. Green E. C. R., White R. W., Diener J. F. A., Powell R., Holland T. J. B., Palin R. M. Activity–composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks // *Journal of Metamorphic Geology*. 2016. V. 34. P. 845–869, <https://doi.org/10.1111/jmg.12211>.
6. Middlemost E. A. K. Naming materials in the magma/igneous rock system // *Earth Science Reviews*, 1994. V. 37. P. 215–224.
7. O'Connor J. T. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios // *US Geological Survey Professional Paper*, 1965. V. 525. P. 79–84.
8. Riel N., Kaus B. J. P., Green E. C. R., Berlie N. MAGEMin, an Efficient Gibbs Energy Minimizer: Application to Igneous Systems // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. V. 23. 2022. <https://doi.org/10.1029/2022GC010427>.