

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АКЦЕССОРНОГО АПАТИТА НА СОСТАВ ПЛАГИОКЛАЗОВ В ЛЕЙКОГРАНИТАХ СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ

© 2025 г. Д. чл. Ш. К. Балтыбаев^{1, 2, *}, М. Е. Петракова³, д. чл. О. Л. Галанкина¹

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 190034, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
Университетская наб., 7, Санкт-Петербург, 199034, Россия

³ Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017, Россия
* e-mail: shauket@mail.ru

Поступила в редакцию: 15.12.2024

После доработки: 27.02.2025

Принята к публикации: 16.04.2025

На примере ряда интрузий двуполевошпатовых лейкогранитов Северного Приладожья показано, что различающиеся составы плагиоклаза в них можно объяснить не изначально разными содержаниями в магмах петрогенных компонентов, входящих в плагиоклаз, или особыми P – T условиями кристаллизации, а вариациями количества кристаллизовавшегося апатита, которые определили разную степень фракционирования кальция из расплава. Эти выводы подтверждены термодинамическим моделированием процессов минералообразования, показавшим возникающий дефицит кальция в магме и соответствующее снижение содержания анортитовой молекулы в плагиоклазе при его совместной кристаллизации с апатитом или после него. Показано, что кристаллизация даже небольшого количества (1–3 %) апатита в малокальциевых магмах может привести к изменению состава плагиоклаза на 10–30 мол. % анортитового минала.

Ключевые слова: апатит, расплав, состав плагиоклаза, лейкограниты, моделирование, кристаллизация

DOI: 10.31857/S0869605525030024

ВВЕДЕНИЕ

Лейкократовые граниты широко развиты в пределах древних щитов и подвижных поясов. В последнем случае их появление обычно приурочено к завершению орогенной стадии, когда при коллапсе орогенов, подъеме к поверхности нижних и средних частей коры на общем фоне растяжения литосферы происходит массовое внедрение кислых магм. В материале кислых расплавов значительную роль играет коровое вещество, определяющее геохимические особенности гранитов S-типа (Chappell, White, 1974).

Состав плагиоклаза в магматических породах с разным содержанием кремнезема варьирует в широких пределах — от анортита в эвкрите (анортитовом габбро) до альбит-олигоклаза в лейкогранитах. В связи с этим возникает вопрос: насколько изменчив состав плагиоклаза в породах с примерно одинаковым содержанием кремнезема и каковы в этом случае закономерности изменения его состава?

Изучение гранитоидных интрузий, залегающих на юго-востоке Свекофеннского аккреционного пояса, показало, что нет строгой зависимости между содержанием кремнезема в гранитах и гранодиоритах и содержаниями Na, Ca, Si в плагиоклазах. Например, номер плагиоклаза и, соответственно, содержание SiO_2 в нем заметно меняется (от 68 до 58 мас. %), хотя во вмещающих породах содержание кремнезема остается на уровне 71 мас. % (табл. 1). Одним из факторов, определяющих основность плагиоклаза, является содержание CaO в исходной магме, из которой кристаллизуются полевые шпаты. Очевидно, что при дефиците этого петрогенного компонента в исходной магме, кристаллизация существенно анортитового плагиоклаза будет невозможна. Но, кроме такого «простого» контроля состава плагиоклаза составом расплава, нужно учитывать, в какие еще минералы входит кальций. Если одновременно с плагиоклазом или раньше него кристаллизуются кальций-содержащие минералы (амфиболы, апатит и др.), возможность образования существенно анортитового плагиоклаза будет ограничена.

Целью данной работы является количественная оценка влияния содержания кальция в системе на минеральные парагенезисы и составы минералов в P – T областях супра- и субсолидусного минералообразования по данным термодинамического моделирования. Закономерности перераспределения кальция при кристаллизации апатит-содержащих лейкогранитов рассматриваются на примере интрузий двуполевошпатовых порфириовидных гранитов юго-восточной части протерозойского Свекофеннского аккреционного пояса.

ИНТРУЗИВНЫЙ МАГМАТИЗМ РЕГИОНА И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЗИЦИИ ИЗУЧЕННЫХ ГРАНИТОВ

Граниты Карельского перешейка слагают интрузии разного размера (рис. 1), внедрившиеся в син- и позднеорогенную стадии становления Свекофеннского аккреционного пояса 1.87–1.80 млрд лет назад (Ладожская протерозойская... 2020). Вмещающими породами для них в основном являются гранат-биотит-плагиоклазовые, гранат-ортопироксеновые и гранат-кордиеритовые гнейсы, мигматизированные и метаморфизованные в условиях гранулитовой фации. Внедрение калиевых порфириовидных гранитов в регионе происходило дискретно, с двумя пиками магматической активности: 1.87 млрд лет (Балтыбаев и др., 2004) и 1.80 млрд лет (Балтыбаев и др., 2016). Аналогичные по составу и тектоническому положению гранитные интрузии на примыкающей территории Финляндии (рис. 1, врезка) имеют изотопный возраст в диапазоне от ~1.85 до 1.79 млрд лет (Kurhila et al., 2011).

Образованию калиевых порфириовидных гранитов предшествовало внедрение габброноритов и эндербитов, а также диоритов-плагиогранитов 1.89–1.87 млрд лет назад (Baltybaev et al., 2004). Завершило магматическую активность в регионе внедрение щелочных интрузий и лампрофировых даек (1.80 млрд лет), а также формирование гранитов-рапакиви 1.65 млрд лет назад (Ладожская протерозойская... 2020).

Сравнение составов лейкосом мигматитов с интрузиями S-гранитов показывает их близость по главным элементам, при существенном отличии по микроэлементам. Граниты часто обогащены редкими землями, что может говорить о более глубинном формировании их источника, которое происходило, вероятнее всего, при сухом плавлении метапелитовых осадков глубоких частей земной коры (Jung et al., 1999).

Рассматриваемые нами гранитные интрузии тесно ассоциированы с мигматитами, содержащими две-четыре генерации лейкосомы (Балтыбаев и др., 2024). Процесс мигматитообразования происходил в условиях метаморфизма гранулитовой фации, на регрессивной стадии которого формировались рассматриваемые в данной статье

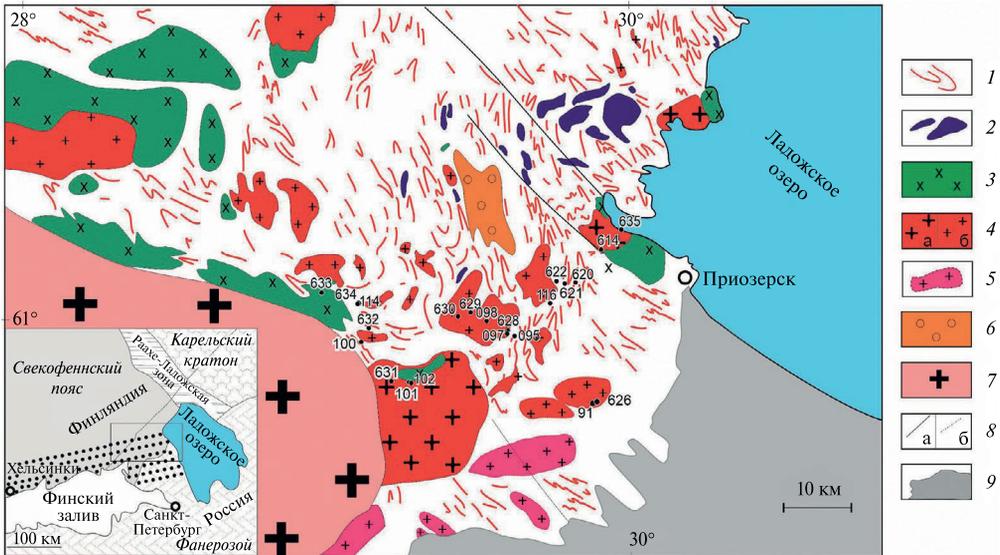


Рис. 1. Геологическая карта с указанием положения изученных гранитов на территории Карельского перешейка. 1 — преимущественно метаморфические породы амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма; 2 — эндербиты, габбро-нориты (1.89–1.88 млрд лет); 3 — диориты, плагиограниты, гранодиориты (1.89–1.87 млрд лет); 4 — лейкограниты калиевые порфировидные: (а) — возрастной группы 1.87–1.85 млрд лет, (б) — возрастной группы 1.80 млрд лет; 5 — гранитные интрузии под малошумным рифейским чехлом; 6 — щелочные гранитоиды (1.80 млрд лет); 7 — граниты-рапакиви (1.65 млрд лет); 8 — разломы: (а) видимые, (б) предполагаемые; 9 — рифейские отложения мощностью 20–200 м. Точками показаны места отбора и номера проб, которые для сокращения записи даны без приставок Б-03 или Б-23. На врезке показаны основные тектонические блоки региона и положение изученного участка (прямоугольник). Точками выделена часть Svecofennian пояса, где широко развиты интрузии лейкогранитов.

Fig. 1. A geological map with the locations of the studied leucogranites in the Karelian Isthmus. 1 — mainly metamorphic rocks of the amphibolite and granulite facies of metamorphism; 2 — enderbites, gabbro-norites (1.89–1.88 Ga); 3 — diorites, plagiogranites, granodiorites (1.89–1.87 Ga); 4 — potassic porphyritic granites: (a) age group of 1.87–1.85 Ga, (b) age group of 1.80 Ga; 5 — granite intrusions beneath the thin Riphean cover; 6 — alkaline granitoids (1.80 Ga); 7 — rapakivi granites (1.65 Ga); 8 — faults: (a) visible, (b) inferred; 9 — Riphean cover with a thickness of 20–200 m. The dots show the sampling locations and sample numbers, which, for the sake of brevity, are given without the prefixes B-03 or B-23. Inset shows the main tectonic blocks of the region and the position of the studied area (shown by a rectangle). The dots highlight the part of the Svecofennian belt, where intrusions of granites are widespread.

лейкограниты. Поэтому они несут следы наложенных метаморфических изменений, выраженных в развитии мусковита, хлорита, вторичного биотита и поздних полевых шпатов, появлении слабой гнейсовидности и/или изменения зернистости пород. Местами отмечаются малошумные тектонические зоны, в пределах которых граниты приобретают структурно-текстурные особенности бластокатаклазитов и бластомилонитов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования минералов проводились на сканирующем электронном микроскопе JSM-6510LA с ЭДС JEOL JED-2200 (аналитик О. Л. Галанкина, ЦКП «АИРИЗ» ИГГД РАН, Санкт-Петербург). Условия съемки: напряжение 20 кВ, ток 1 нА с набором сигнала 35 с, с ZAF-методом коррекции матричных эффектов. Предел обнаружения элементов — 0.1 мас. %. Фотографии минералов получены в режиме композиционного

контраста (BSE) и вторичных электронов (SEI). Результаты микрозондового анализа обрабатывались в программе MINAL (Доливо-Добровольский, 2025).

При петрографических исследованиях номер плагиоклаза определялся методом Мишель-Леви.

Силикатный анализ пород был выполнен в лаборатории Института Карпинского (Санкт-Петербург) на рентгеновском спектрометре ARL 9800 по опубликованной методике (<https://vsegei.ru/ru/activity/labanalytics/lab/lab-operations/rentgenspektr>).

Моделирование суб- и супрасolidусных минеральных парагенезисов выполняли методом минимизации свободной энергии Гиббса с помощью программы PERPLE_X v.6.8.6 (Connolly, 1990) с актуальными обновлениями программного модуля и моделей твердых растворов. В расчетах использовалась база термодинамических данных *hp11ver* (Holland, Powell, 2011) для минералов и твердых растворов: биотита *Bi(W)*, полевых шпатов *Fsp(C1)*, хлорита *Chl(W)*, клинопироксена *Cpx(HP)*, граната *Gt(W)*, шпинели *Sp(WPC)*, ортопироксена *Opx(W)*, светлых слюд *Mica(W)*, хлоритоида *Ctd(W)*, ставролита *St(W)*, кордиерита *Crd(W)*, ильменита *Ilm(WPH)*, силикатного расплава *melt(W)* в системе $MnTiNCKFMASH-CO_2$ ($MnO-TiO_2-Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-CO_2$). Предпочтение данной версии термодинамической базы и моделям твердых растворов отдавалось для сопоставления полученных результатов с результатами, ранее полученными другими исследователями для гранитных систем (White et al., 2014).

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Изученные гранитные массивы представляют собой продукты кристаллизации коровых расплавов с высоким содержанием SiO_2 , достигающим до ~ 77 мас. %. Массивы различаются по минеральному составу пород и степени их преобразования при наложенных деформациях. Встречаются как недеформированные, трахитоидные, так и сильно разгнейсованные и милонитизированные разновидности гранитов. Кроме главных минералов (калиевого полевого шпата, плагиоклаза, кварца и биотита), минералогическое разнообразие гранитовых пород определяют породообразующие и акцессорные гранат, мусковит и апатит. В соответствии с особенностями минерального состава нами выделены три группы гранитов: 1) гранатсодержащие, 2) мусковитсодержащие, 3) безгранатовые и безмусковитовые.

Гранатсодержащие граниты — темно-серые, местами розоватые, серо-розовые породы с массивной текстурой и порфиривидной реже равномерно-зернистой структурой. Порфиривидные вкрапленники в них представлены полевыми шпатами (40–60 об.%) и кварцем (40–60 %); основным темноцветным минералом является биотит (0.2–7 %), присутствуют акцессорные минералы, такие как гранат, апатит, циркон, монацит (0.1–1 %).

Плагиоклаз (An_{17-34}) представлен гипидиоморфными и аллотриоморфными незональными кристаллами размером 0.5–0.2 мм. В плагиоклазе присутствуют антипертитовые вросстки, изредка он содержит включения мелких зерен биотита (рис. 2, *a–e*), апатита или калиевого полевого шпата. Биотит встречается в виде таблитчатых кристаллов размером 0.2–0.4 мм с включениями монацита, апатита, циркона. Часто он хлоритизирован и содержит выделения железо- и титан-содержащих фаз. Биотит обогащен титаном (TiO_2 2.2–4.9 мас. %) и характеризуется магнезиальностью $Mg\# = Mg/(Mg+Fe)$ равной 0.29–0.4. В том случае, когда биотит заполняет трещины в гранате, он более низкотитанистый (TiO_2 0.53–1.3 мас. %), но более магнезиальный ($Mg\#$ 0.51–0.56). Калиевый полевой шпат содержится в равном или подчиненном количестве по отношению к плагиоклазу. В этом типе гранитов он содержит примесь бария (BaO 0.24–0.95 мас. %).

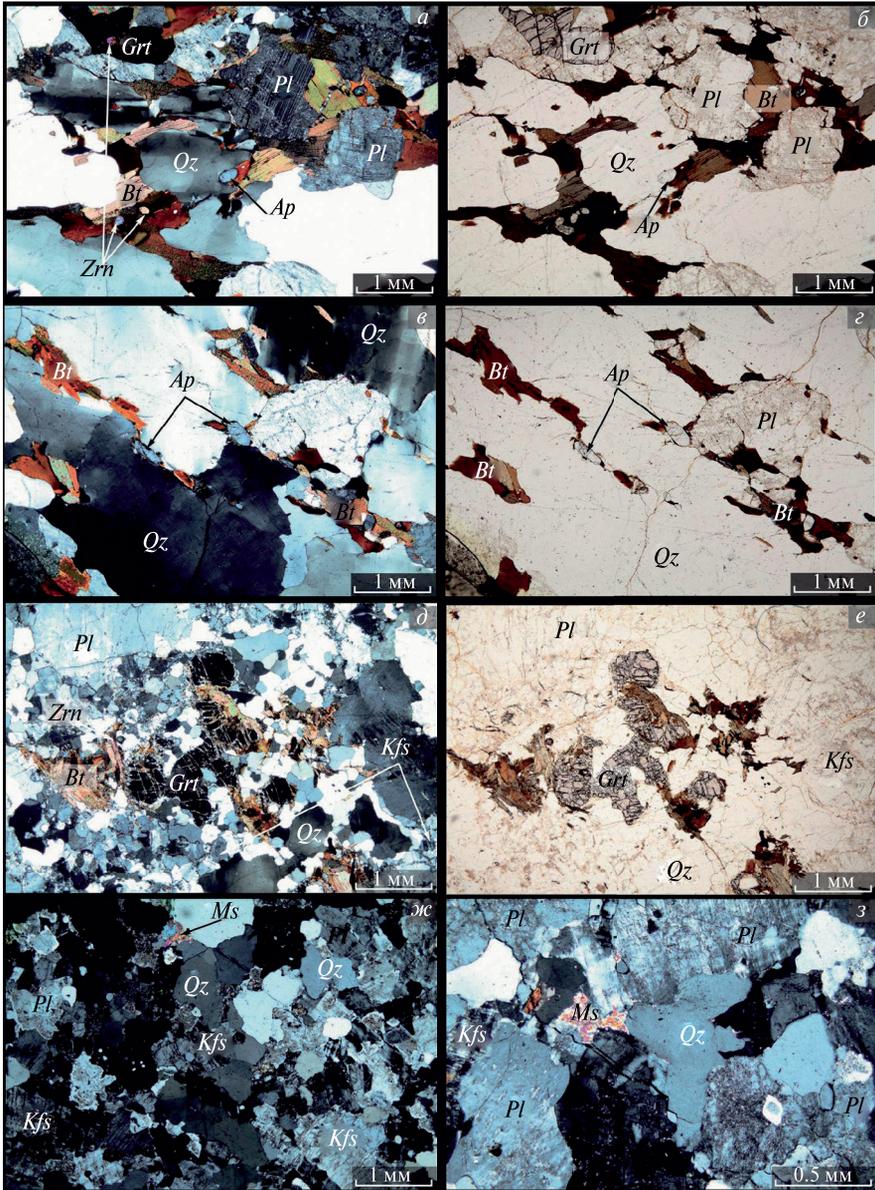


Рис. 2. Микрофотографии прозрачно-полированных шлифов изученных гранитов и гранодиоритов.

a–г — массивный мелко-среднезернистый гранодиорит (обр. Б-03-91) с мелкими единичными зернами граната, апатита, измененным плагиоклазом и кварцем с волнисто-мозаичным погасением; *д, е* — порфировидный гранит с разнотелной структурой (обр. Б-03-101), порфировидные вкрапленники представлены кварцем и полевыми шпатами; *ж, з* — мусковитовый гранит (обр. Б-03-100-1), измененные зерна плагиоклаза с альбит-олигоклазовой каймой, пертитовый калиевый шпат. Фотографии в проходящем свете (слева — с анализатором, справа — без анализатора).

Fig. 2. Micrographs of transparent polished sections of the studied granites and granodiorites.

a–г — massive fine- to medium-grained granodiorite (sample B-03-91) with small isolated grains of garnet, apatite, altered plagioclase, and quartz with wavy-mosaic extinction; *д, е* — porphyritic granite with different grain sizes (sample B-03-101), porphyritic inclusions are represented by quartz and feldspars; *ж, з* — muscovite granite (sample B-03-100-1), altered grains of plagioclase with albite-oligoclase rim, perthitic potassic feldspar. Photographs in transmitted light (left, with analyzer; right, without analyzer).

Гранат пироп-альмандинового ряда с содержанием гроссулярового компонента от 5—6% (обр. Б-23-626, Б-03-91) до 3—4% (обр. Б-23-621) наблюдается в виде зерен неправильной формы, трещины в которых выполнены низкотитанистым биотитом и хлоритом. В зернах граната наблюдаются включения кварца, циркона, монацита. Апатит с содержанием фтора 2.62—2.83 мас. %, образует овальные, бочонкообразные кристаллы, иногда встречается в виде тонких игл или мелких включений в полевых шпатах (рис. 3).

Мусковитсодержащие и мусковит-биотитовые граниты — белые, светло-серые и светло-розовые породы с массивной текстурой, равномерно-зернистой и порфиroidной структурой. Биотит в них основным высокотитанистый (TiO_2 2.3 мас. %) и низкомагнезиальный ($Mg\#$ 0.20—0.23). В случае, когда по биотиту развивается ильменит, содержание TiO_2 в нем падает до 1.6—0.2 мас. %. В других случаях биотит замещается мусковитом. Плаггиоклаз более кислый по сравнению с плаггиоклазом вышеописанной группы гранитов (An_{6-26}), часто он изменен и характеризуется гранулитовой структурой с включениями зерен кварца. Также в плаггиоклазе присутствуют включения калиевого полевого шпата и мелких зерен апатита, биотита, монацита. Калиевый полевой шпат представлен микроклином с содержанием FeO 0.49—0.64 мас. %. Акцессорные минералы представлены магнетитом, апатитом,

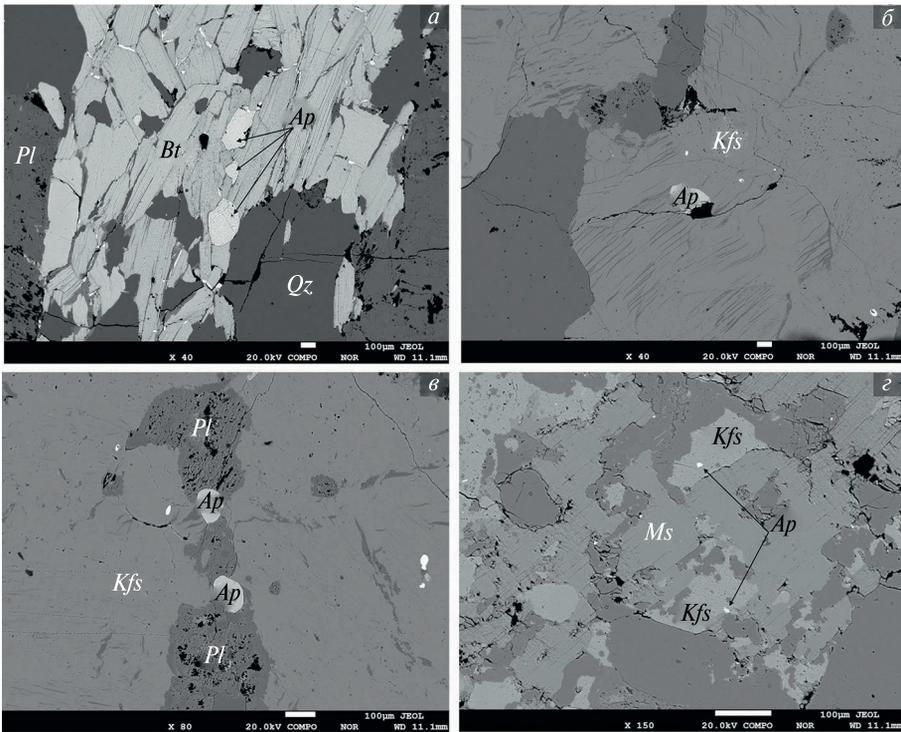


Рис. 3. Фотографии гранитов в режиме отраженных электронов.

a–в — Апатит в виде идиоморфных кристаллов, включенный в зерна полевых шпатов, биотита; *г* — апатит только в виде мелких включений, рассеянных по матриксу породы (обр. Б-03-100-1).

Fig. 3. BSE mode photographs of granites.

a–в — Idiomorphic crystals of apatite included in grains of feldspars and biotite; *г* — apatite only in the form of small inclusions scattered throughout the rock matrix (sample B-03-100-1).

цирконом, монацитом. Апатит образует овальные, бочонкообразные кристаллы и содержит фтор (2.62—2.83 мас. %).

Иногда в гранитах содержится только мусковит и нет биотита (обр. Б-03-100-1). Плаггиоклаз в них зональный, ядра образованы плаггиоклазом An_{23-31} с вторичными изменениями и окружены каймой альбита An_{1-10} (рис. 2, ж, з). Калиевый полевой шпат представлен микроклином, не содержит примеси бария, но содержит FeO (0.49—0.64 мас. %). Особенностью этих гранитов является присутствие апатита только в виде мелких (ситовидных) включения в калиевом полевым шпате.

Безгранатовые и безмусковитовые двуполевошпатовые биотитовые граниты — серые, серо-розовые, розовые, мясо-красные породы с массивной текстурой, порфирированной структурой, иногда трахитоидные или разгнейсованные. Макроскопически похожи на граниты первой группы за исключением присутствия в породах единичных зерен граната. Плаггиоклаз (An_{22-29}) в них представлен гипидиоморфными и аллотриоморфными незональными кристаллами с включениями кварца. Он часто серицитизирован, содержит включения биотита, калиевого полевого шпата, акцессорного циркона и монацита. Трещины в кристаллах плаггиоклаза выполнены хлоритом и биотитом; на контакте плаггиоклаза с калиевым полевым шпатом нередко образуются мирмекиты.

Биотит ($Mg\# = 0.29$, $TiO_2 = 2.3$ мас. %) встречается в виде пластинчатых кристаллов размером 0.2—0.4 мм. Часто он хлоритизирован, содержит включения карбонатов и флюорита. Калиевый полевой шпат содержит примеси ВаО (0.32—0.62 мас. %) и FeO (0.18—0.48 мас. %). Акцессорные минералы — апатит, циркон, монацит, флюорит (0.1—1 об. %). Апатит образует бочонкообразные кристаллы с содержанием фтора 1.84—2.52 мас. %.

ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Все изученные породы по химическому составу относятся к гранитам и гранодиоритам (рис. 4, а), являются пералюминиевыми, магнезиальными и принадлежат к щелочно-известковистой, известково-щелочной серии (рис. 4, б—з), за исключением некоторых мусковитовых гранитов, составы которых ложатся в поле железистой серии (рис. 4, б).

Гранатосодержащие граниты содержат: SiO_2 67—74 мас. %, $Na_2O + K_2O$ 7.1—8.9 мас. %, при $K_2O > Na_2O$ (K_2O/Na_2O 1.3—3.2), низких содержаниях TiO_2 (0.17—0.82 мас. %) и P_2O_5 (0.005—0.25 мас. %).

Безгранатовые граниты имеют сходное содержание SiO_2 (67.5—72.2 мас. %), несколько меньшее содержание калия с суммой щелочей ($Na_2O + K_2O$) 6.9—8.7 мас. %, при $K_2O > Na_2O$ (K_2O/Na_2O 1.15—2.3) (рис. 4, з), более высоких содержаниях TiO_2 (0.27—0.89 мас. %) и P_2O_5 (0.15—0.36 мас. %).

Мусковитовые и мусковит-биотитовые граниты характеризуются слегка повышенными содержаниями кремнезема (68.1—74.6 мас. %) и калия с суммой щелочей ($Na_2O + K_2O$) 6.99—9.21 мас. %, при $K_2O > Na_2O$ (K_2O/Na_2O 1.8—3.3) и меньшими содержаниями TiO_2 (0.03—0.45 мас. %) и P_2O_5 (0.05—0.20 мас. %).

Наблюдаемые особенности химических составов изученных пород хорошо коррелируют с их минеральным составом, отражая тенденции изменения содержания химических элементов в зависимости от соотношения минералов в гранитах.

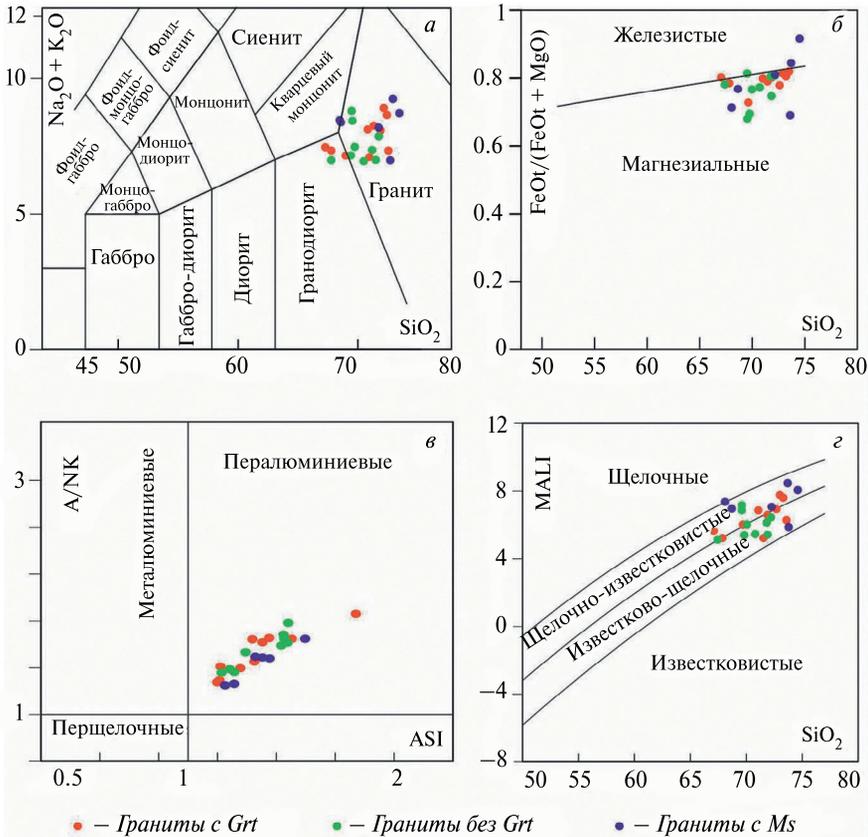


Рис. 4. Петрохимические особенности изученных лейкогранитов.

a – Диаграмма TAS (Middlemost, 1994); *б* – диаграмма $\text{FeO}_{\text{общ}}/(\text{FeO}_{\text{общ}}+\text{MgO})-\text{SiO}_2$ (Frost et al., 2001) для выделения железистой или магниезальной серии пород; *в* – диаграмма $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})-\text{SiO}_2$ с полями щелочных, щелочно-известковистых, известково-щелочных и известковистых гранитоидов (Frost et al., 2001); *з* – диаграмма Шенда (Shand, 1943).

Fig. 4. Petrochemical features of the studied leucogranites.

a – TAS diagram (Middlemost, 1994); *б* – $\text{FeO}_{\text{tot}}/(\text{FeO}_{\text{tot}}+\text{MgO})-\text{SiO}_2$ diagram (Frost et al., 2001) for distinguishing the ferroan or magnesian series of rocks; *в* – $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})-\text{SiO}_2$ diagram with fields of alkaline, alkali-calcic, calcic-alkaline, and calcic granitoids (Frost et al., 2001); *з* – Shand's diagram (Shand, 1943).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ С УЧЕТОМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АПАТИТА

С учетом данных о тектонической позиции и вероятной глубине становления гранитов S-типа в южной части Свеккофеннского пояса (Ehlers et al., 1993; Korsman et al., 1999; Kurhila et al., 2011; Baltybaev et al., 2023), фазовые диаграммы рассчитывались для диапазона давлений и температур 1–7 кбар, 300–900 °С. Расчеты основывались на составах пород, которые были выбраны как наиболее представительные из выборки химических составов лейкогранитов (табл. 1). Близость составов пород по содержанию основных петрогенных компонентов стала причиной принципиального сходства рассчитанных фазовых диаграмм.

Примером фазовой диаграммы для породы наименее кремнекислого состава служит обр. Б-03-91 (табл. 1). Как видно на рис. 5, *a*, наблюдаемому в породе минеральному

Таблица 1. Содержание петрогенных компонентов в изученных гранитах
Table 1. Bulk composition of the studied granites

Образец	Массив	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ tot	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ппп	Сумма
Б-03-91	Мельниковский	67.10	0.82	15.20	5.55	0.06	1.27	1.76	2.43	4.99	0.19	0.53	99.90
Б-23-626		69.70	0.31	16.42	3.86	0.02	1.33	1.16	1.87	5.31	0.20	0.35	101.00
Б-03-95		69.60	0.45	15.00	2.43	0.02	1.05	1.59	2.80	5.95	0.20	0.69	99.70
Б-03-97	Бородинский	73.30	0.25	14.00	1.83	0.02	0.41	1.04	2.85	5.80	0.05	0.41	99.90
Б-03-98		72.20	0.41	13.90	2.70	0.02	0.60	1.38	2.77	5.05	0.15	0.62	99.80
Б-23-628		72.69	0.22	14.70	2.11	—	0.55	1.15	2.46	5.61	0.09	0.50	100.00
Б-23-629		71.08	0.25	14.55	3.12	—	0.73	1.21	3.02	5.04	0.11	0.74	99.86
Б-23-630		76.91	0.25	11.75	2.91	0.01	0.57	1.18	2.17	3.59	0.11	0.46	99.90
Б-03-100	Каменогорский	68.10	0.43	15.50	3.78	0.04	1.40	1.00	2.50	5.87	0.06	0.96	99.70
Б-03-100-1		73.70	0.09	14.10	0.94	0.02	0.39	0.75	2.33	6.88	0.05	0.49	99.80
Б-23-632		67.87	0.40	15.88	4.62	0.04	1.17	2.10	3.10	4.22	0.19	0.41	100.00
Б-03-101	Лазурный	71.90	0.22	15.00	1.83	0.03	0.42	1.65	3.07	5.16	0.05	0.41	99.80
Б-03-102		73.00	0.17	14.50	1.42	0.02	0.30	1.13	2.80	6.10	0.07	0.31	99.80
Б-23-631-1		67.45	0.88	14.91	5.33	0.03	1.38	1.79	2.44	4.48	0.36	1.44	101.00
Б-03-110	Правдинский	68.70	0.45	16.00	3.41	0.02	0.95	1.39	2.97	5.37	0.08	0.60	100.00
Б-03-111	Лесогорский	71.90	0.34	14.30	3.10	0.05	0.97	1.53	3.21	3.74	0.06	0.58	99.80
Б-23-633		70.05	0.36	15.42	3.47	—	0.98	1.43	2.64	4.81	0.26	0.72	100.00
Б-03-114/1	Прудинский	74.60	0.03	13.80	1.58	0.05	0.14	0.67	2.62	6.11	0.09	0.30	99.90
Б-23-634		70.79	0.29	15.23	3.49	—	0.95	1.45	3.10	3.81	0.16	0.67	99.95
Б-03-116		69.60	0.72	14.30	3.44	0.02	0.74	1.52	2.52	5.86	0.38	0.77	99.90
Б-23-620	Заветный	69.82	0.27	17.14	2.41	—	0.97	1.75	3.32	3.83	—	0.94	100.00
Б-23-621		71.53	0.19	15.52	2.43	0.02	0.60	1.86	3.06	4.02	0.25	0.26	99.50
Б-23-622		73.59	0.28	14.71	2.33	—	0.48	1.07	1.74	5.61	—	0.68	101.00
Б-23-622-1	Шушино	72.26	0.27	14.72	2.20	—	0.48	1.09	1.90	6.25	0.05	0.69	99.92
Б-23-614		71.82	0.27	14.75	3.30	—	0.75	1.22	2.35	5.00	0.12	0.70	100.00
Б-23-635	Кузнеченский	73.79	0.16	14.33	2.80	0.01	0.48	1.12	2.02	4.97	0.20	0.45	100.00

Примечание. Fe₂O₃tot — суммарное железо.

парагенезису биотит + плагиоклаз + калиевый полевой шпат + кварц + ильменит ± гранат отвечает достаточно узкая область (от ~750 до 830 °С). Минимальная величина давления устойчивости этого парагенезиса составляет около 3.8—4.0 кбар. Полученный результат не противоречит известным данным о петрологии и тектонической позиции изучаемых гранитоидов (Ehlers et al., 1993; Korsman et al., 1999; Baltybaev et al., 2004; Kurhila et al., 2011).

При содержании H_2O равном 2 мас. % температура начала плавления в рассматриваемой гранитной системе меняется от ~660—720 °С в области низких давлений (1—3 кбар) до ~660—670 °С при 3—7 кбар. При наличии во флюиде углекислоты с мольной долей CO_2 равной 0.3, солидусная кривая смещается в высокотемпературную область (рис. 4, а, желтая пунктирная линия), занимая позицию в среднем на 50—70 °С выше по сравнению с чистым водным флюидом. Точная информация о реальном соотношении H_2O/CO_2 во флюиде при образовании рассматриваемых пород отсутствует; более ранние исследования флюидных включений в кварце и цирконе из гранитов (Baltybaev et al., 2004 и ссылки в указанной работе) указывают на преобладание мольной доли воды над углекислотой с примерным содержанием H_2O 0.6—0.7.

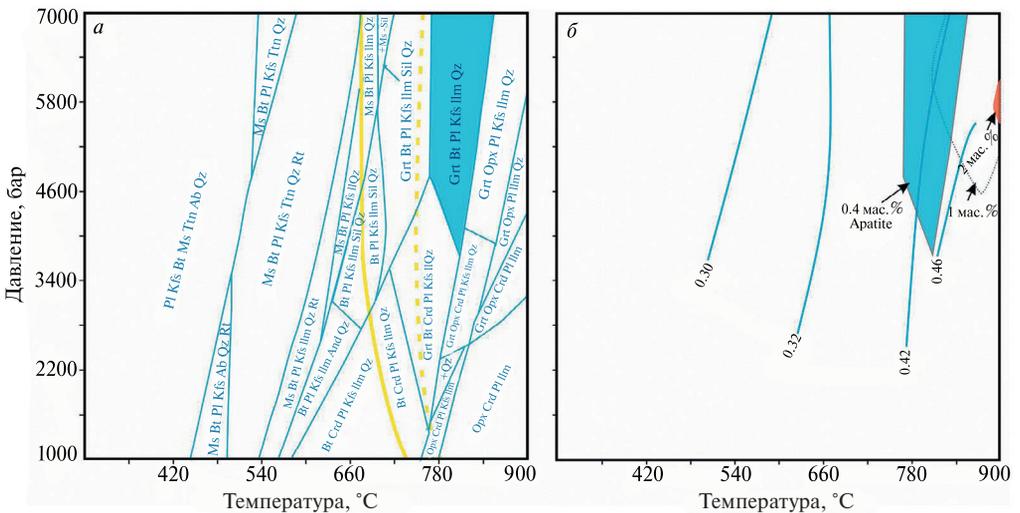


Рис. 5. Фазовые диаграммы, рассчитанные для гранодиорита с пониженным содержанием SiO_2 (67 мас. %). Обр. Б-03-91.

а — синим цветом выделена область, соответствующая наблюдаемому в породе минеральному парагенезису гранат + биотит + плагиоклаз + калиевый полевой шпат + ильменит + кварц с содержанием апатита 0.4%. Желтым цветом показаны: линия солидуса, рассчитанная для содержания H_2O 2 мас. % (сплошная линия), и при наличии во флюиде углекислоты в соотношении $H_2O:CO_2$ равном 0.7:0.3 (пунктирная линия); б — на диаграмме показаны поля устойчивости минеральных ассоциаций при увеличении доли кристаллизующегося апатита и фракционирования кальция из расплава. Если доля кристаллизующегося апатита увеличивается от 0.4 до 2%, фазовые границы минерального парагенезиса гранат + биотит + плагиоклаз + калиевый полевой шпат + ильменит + кварц смещаются в высокотемпературную область. На графике показаны поля с долей апатита 1% (пунктирная линия) и 2% (красное поле) в сравнении с реальным составом гранита, содержащим 0.4% апатита (синее поле). Линиями показаны содержания анортитовой молекулы в плагиоклазе.

Fig. 5. Phase diagram calculated for granodiorite with low contents of SiO_2 (67 wt %). Sample B-03-91. а — the area corresponding to the mineral assemblage of garnet + biotite + plagioclase + K-feldspar + ilmenite + quartz observed in the rock with apatite of 0.4% is highlighted in blue. The lower temperature boundary of the melt existence at 2 wt % H_2O is shown by the yellow line, and in the presence of carbon dioxide in the $H_2O:CO_2$ ratio of 0.7:0.3 is shown by the dotted line; б — the diagram shows stability fields of mineral assemblages with an increase in the proportion of crystallizing apatite and fractionation of calcium from the melt. If the proportion of crystallizing apatite increases from 0.4 to 2%, the phase boundaries of the mineral assemblage garnet + biotite + plagioclase + K-feldspar + ilmenite + quartz systematically shift to the high-temperature area. The diagram shows the fields with apatite proportion of 1% (dotted line) and 2% (red field) in comparison with the real composition of granite containing 0.4% apatite (blue field). Lines show the contents of the anorthite molecule in plagioclases.

Если из расплава такого состава образуется апатит, количество которого выше наблюдаемого (0.4%), то за счет истощения расплава кальцием поле устойчивости упомянутого минерального парагенезиса смещается в более высокотемпературную и высокобарическую область (рис. 5, б). Такое смещение отражает эффект фракционирования кальция в системе порода–расплав.

С помощью рассматриваемой диаграммы (рис. 5, а) можно проверить существование зависимости состава плагиоклаза от мольной доли граната (содержащего гроссуляровый минерал) в парагенезисе. Анализ графика показывает, что кристаллизация небольших объемов низкокальциевого граната не влияет на состав сосуществующего плагиоклаза. Например, при 690 °С, 4.6 кбар [поле безгранатового парагенезиса: калиевый полевой шпат (17 мол. %) + плагиоклаз (18%) + биотит (15%) + ильменит (0.4%) + силлиманит (2.5%) + кварц (26%) + расплав (21%)] устойчив плагиоклаз An_{36} , тогда как при 720 °С, 4.6 кбар [поле гранатосодержащего парагенезиса: гранат (0.2 мол. %) + калиевый полевой шпат (16%) + плагиоклаз (17%) биотит (16%) + ильменит (0.4%) + силлиманит (2.4%) + кварц (25%) + расплав (24%)] — плагиоклаз An_{37} . Увеличение мольной доли граната в несколько раз (с 0.1% до 2.7%) и одновременный рост содержания гроссуляра в нем (с 3% до 6–7 мол. %), также не снижает номер плагиоклаза из-за относительного снижения количества натрия в минералообразующей среде.

Аналогичная фазовая диаграмма построена для гранита с более высоким содержанием SiO_2 (71 мас. % против 67 мас. % в предыдущем образце) при примерно одинаковом содержании в них CaO (1.65 и 1.76 мас. %) (табл. 1). При таком составе породы в парагенезисе уже появляется в незначительном количестве гранат (рис. 6, а, б),

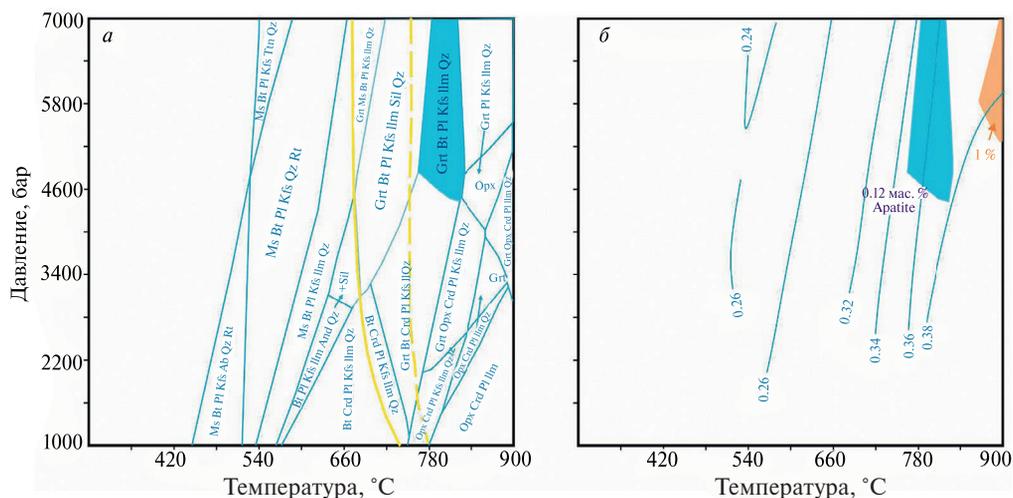


Рис. 6. Фазовая диаграмма для гранита с повышенным содержанием SiO_2 (71 мас. %). Обр. Б-03-101.

а — Синим цветом выделена область устойчивости парагенезиса гранат + биотит + плагиоклаз + калиевый полевой шпат + кварц + ильменит с содержанием апатита 0.12%, при содержании P_2O_5 0.05 мас. %, соответствующим реальному составу породы. Сплошной желтой линией показана нижняя температурная граница существования расплава (линия солидуса) при содержании H_2O 2 мас. %, пунктирной желтой линией — линия солидуса при наличии углекислоты во флюиде в соотношении $H_2O: CO_2$, равном 0.7:0.3; б — оранжевым цветом показано поле аналогичного парагенезиса при фракционировании апатита из расплава (1%) в сравнении с реальным содержанием 0.12 мас. % в образце (синее поле). Линии с числами показывают содержание анортитовой молекулы в плагиоклазе.

Fig. 6. Phase diagram calculated for granite with high contents of SiO_2 (71 wt %). Sample B-03-101.

a — The blue color indicates the area corresponding to the mineral assemblage of garnet + biotite + plagioclase + K-feldspar + ilmenite + quartz with apatite content of 0.12% at P_2O_5 0.05 wt % which is closed to the real composition of the rock. The yellow solid line shows the solidus at 2 wt % H_2O . The yellow dotted line shows the solidus in the presence of carbon dioxide in the fluid under the $H_2O: CO_2$ ratio of 0.7:0.3; б — orange color indicates the field of a similar assemblage during fractionation of apatite from a melt of 1% in comparison with the real content of it (0.12%) in the sample (blue field). Lines show the contents of the anorthite molecule in plagioclases.

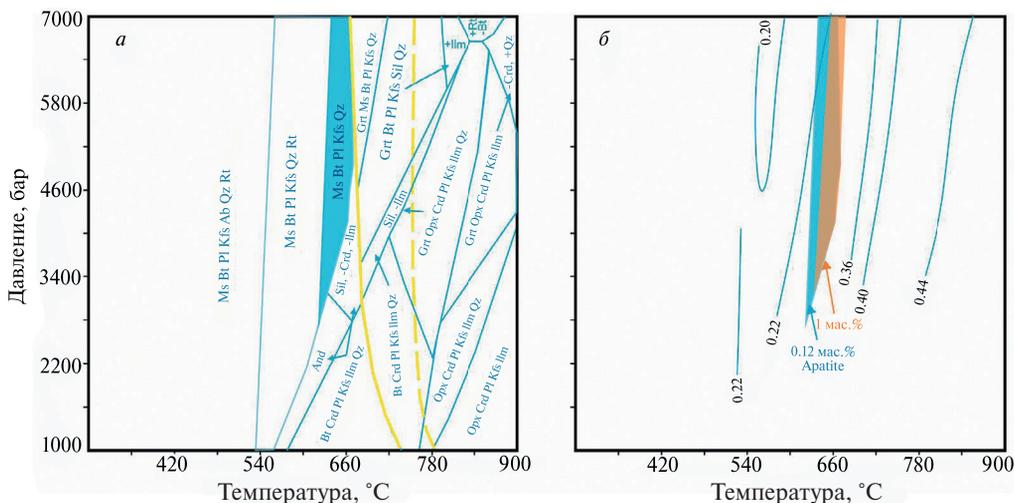


Рис. 7. Фазовая диаграмма для безгранатового гранита. Обр. Б-03-100-1.

a — Синим цветом выделена область устойчивости парагенезиса биотит + мусковит + плагиоклаз + калиевый полевой шпат + кварц с содержанием апатита 0.12 % и содержанием P_2O_5 0.05 мас. %, характерными для породы. Сплошной желтой линией показана линия солидуса при содержании H_2O 2 мас. %, пунктирной желтой линией — линия солидуса при наличии углекислоты во флюиде в соотношении $H_2O:CO_2$, равном 0.7:0.3; *b* — показана расчетная область парагенезиса биотит + мусковит + плагиоклаз + калиевый полевой шпат + кварц при кристаллизации 1 % апатита. Линии с числами показывают состав плагиоклаза.

Fig. 7. Phase diagram calculated for garnet-free granite. Sample B-03-100-1.

a — The blue color indicates the area corresponding to the mineral assemblage of biotite + muscovite + plagioclase + K-feldspar + quartz with apatite of 0.12 % at P_2O_5 0.05 wt % which is characteristic of the rock. The yellow solid line shows the solidus at 2 wt % H_2O . The yellow dotted line shows the solidus in the presence of carbon dioxide in the fluid in the $H_2O:CO_2$ ratio of 0.7:0.3; *b* — the calculated area of the assemblage of biotite + muscovite + plagioclase + K-feldspar + quartz is shown for crystallization of 1 % apatite. Lines show the contents of the anorthite molecule in plagioclases.

что соответствует наблюдениям. Особенностью диаграммы является то, что смещение поля устойчивости парагенезиса гранат + биотит + плагиоклаз + калиевый полевой шпат + ильменит + кварц в высокотемпературную область, при кристаллизации 1 мол.% апатита, выражено значительно сильнее (рис. 6, б). Подобное изменение P – T конфигурации минеральных парагенезисов указывает на достаточно высокую чувствительность фазовых соотношений в гранитной системе на небольшие изменения в соотношениях петрогенных компонентов.

Фазовая диаграмма для мусковитсодержащего гранита (обр. Б-03-100-1, рис. 7) в основном аналогична двум предыдущим. Но стоит отметить, что P – T область наблюдаемого в породе минерального парагенезиса находится левее ликвидусной линии — в более низкотемпературной области — что согласуется петрографическими данными о субсолидусной кристаллизации мусковита в этой породе. Также, поскольку в рассматриваемом граните содержится наименьшее количество CaO по сравнению с предыдущими образцами (0.75 против 1.65–1.76 мас. %), при кристаллизации 1 мол. % апатита расплав практически полностью истощается этим компонентом, что резко сказывается на положении и форме поля устойчивости парагенезиса биотит + мусковит + плагиоклаз + калиевый полевой шпат + кварц (рис. 7, б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из-за пониженного содержания CaO (< 2 мас. %), в изученных лейкогранитах кристаллизующийся из расплава апатит является эффективным концентратором

кальция, вследствие чего образуется менее кальциевый плагиоклаз. Сказанное демонстрирует построенная по данным моделирования зависимость состава плагиоклаза от количества кристаллизующегося апатита (рис. 8).

Как следует из расчетных данных (рис. 5—7), главным фактором, влияющим на устойчивость минеральных парагенезисов лейкогранитов, является содержание СаО в расплаве. Если это содержание низкое, роль апатита, как концентратора кальция возрастает. Рост количества апатита закономерно снижает содержание анортита в плагиоклазе (примерно на 10 мол. % An на 1 % апатита) (табл. 2, рис. 8). Минеральный парагенезис гранитов сдвигается в более высокотемпературную и высокобарическую область.

Кристаллизация другого кальцийсодержащего минерала — граната, который встречается в рассматриваемых гранитах в незначительных количествах, практически не оказывает влияние на состав сосуществующего с ним плагиоклаза и расплава. Как показано выше, одновременно с кристаллизацией граната и плагиоклаза происходит кристаллизация К-Na полевого шпата, что снижает содержание натрия в расплаве, из-за чего отношение Na/Ca в расплаве остается примерно на одном уровне. Сказанное справедливо для минеральных парагенезисов, в которых гранат содержит незначительное количество гроссуляровой молекулы (< 7—10 %) и сам имеет незначительное развитие (< 10 об. %), что типично для изученных лейкогранитов.

Известно, что образование богатых Al фосфатных комплексов в расплавах в гаплогранитных системах существенно влияет на ликвидусы кварца и полевого шпата (London et al., 1993). Экспериментальные исследования (Mysen et al., 1999) показывают, что добавление фосфора в силикатные расплавы (включая гранитные) снижает температуру ликвидуса. Наличие комплексных соединений фосфора в расплаве (включая алюминий-фосфатные), вызывает его деполимеризацию (Mysen et al., 1999;

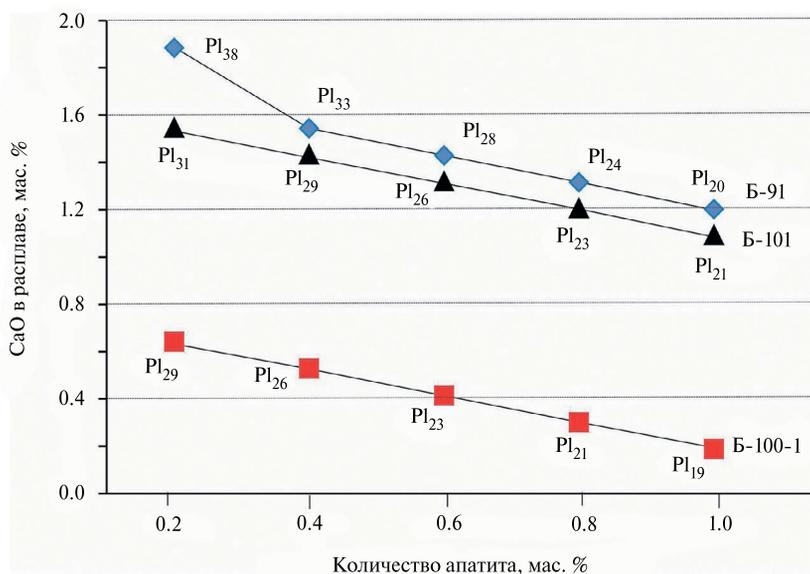


Рис. 8. Диаграмма зависимостей содержания СаО в расплаве при меняющемся количестве кристаллизующегося из него апатита (по данным моделирования). Графики построены для давлений и температур 4.5 кбар, 700 °С.

Fig. 8. Diagram of relations between the CaO content in the melt and the volume of apatite crystallizing from it (under the modeling data). The plot calculated for pressure and temperature of 4.5 kbar, 700 °С.

Таблица 2. Наблюдаемые и расчетные составы лейкогранитов с разным содержанием апатита и составом плагиоклаза
 Table 2. Observed and calculated compositions of leucogranites with different apatite content and plagioclase composition

Оксид	Образец Б-03-91						Образец Б-03-100-1						Образец Б-03-101					
	67.53	67.53	67.53	67.53	67.53	67.53	74.21	74.21	74.21	74.21	74.21	74.21	72.34	72.34	72.34	72.34	72.34	72.34
SiO ₂	67.53	67.53	67.53	67.53	67.53	67.53	74.21	74.21	74.21	74.21	74.21	74.21	72.34	72.34	72.34	72.34	72.34	72.34
TiO ₂	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Al ₂ O ₃	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	14.20	14.20	14.20	14.20	14.20	14.20	15.09	15.09	15.09	15.09	15.09	15.09
Fe ₂ O ₃	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	0.948	0.948	0.948	0.948	0.948	0.948	1.841	1.841	1.841	1.841	1.841	1.841
MnO	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
MgO	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	0.390	0.390	0.390	0.390	0.390	0.390	0.422	0.422	0.422	0.422	0.422	0.422
CaO	1.77	1.88	1.54	1.43	1.32	1.20	0.76	0.64	0.53	0.41	0.30	0.19	1.66	1.55	1.43	1.32	1.21	1.09
Na ₂ O	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.45	2.346	2.346	2.346	2.346	2.346	2.346	3.089	3.089	3.089	3.089	3.089	3.089
K ₂ O	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	6.928	6.928	6.928	6.928	6.928	6.928	5.191	5.191	5.191	5.191	5.191	5.191
P ₂ O ₅	0.20	0.09	0.17	0.26	0.35	0.43	0.050	0.09	0.17	0.26	0.35	0.43	0.05	0.09	0.17	0.26	0.35	0.43
Сумма	100.03	100.03	99.78	99.75	99.72	99.69	99.93	99.86	99.83	99.80	99.77	99.75	99.94	99.86	99.83	99.81	99.78	99.75
Ар.%	0.46	0.2	0.4	0.6	0.8	1	0.12	0.2	0.4	0.6	0.8	1	0.12	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Ап, mol.%	37	38	33	28	24	20	34	31	29	26	23	21	32	29	26	23	21	19

Примечание. Жирным шрифтом выделены колонки, показывающие содержание оксидов в изученных образцах, за которыми идут расчетные составы для каждой породы при разном содержании в них апатита. Состав плагиоклаза рассчитан для давлений и температуры 4,5 кбар, 700 °С.

Zeng et al., 2016). Косвенное влияние фосфора на положение полей устойчивости минеральных парагенезисов лейкогранитов биотит + мусковит + плагиоклаз + калиевый полевой шпат + кварц и гранат + биотит + плагиоклаз + калиевый полевой шпат + ильменит + кварц заключается в том, что в относительно менее кальциевой системе происходит сдвиг этих полей в более высокотемпературную и высокобарическую область (рис. 5–7).

Очевидно, что возможность кристаллизации апатита из расплава, определяется содержаниями кальция и фосфора. Фосфор в гранитных расплавах образует пирофосфатные (P_2O_7) и ортофосфатные ($AlPO_4$) комплексные соединения, причем роль последних возрастает при увеличении величины параметра A/CNK [$Al/(Ca+Na+K)$] и росте температуры расплава (Mysen et al., 1999). Комплексообразование с участием P^{5+} и Al^{3+} в расплавах с высоким содержанием алюминия служит причиной увеличения растворимости апатита с ростом значения параметра A/CNK , что было подтверждено экспериментально (Pichavant et al., 1992; Wolf, London, 1994).

Из сказанного следует, что доминирующими факторами, контролирующими растворимость и кристаллизацию апатита в магматических породах, являются концентрации Si, Al, Ca, Na, K и P_2O_5 в расплаве, а также его температура. Также растворимость апатита и содержание P_2O_5 в магме коррелирует со степенью коровой контаминации расплава. При этом апатит в анатектических расплавах имеет гораздо большую растворимость, чем в основных расплавах (Harrison, Watson, 1984). В то же время содержание воды не является важным фактором, определяющим растворимость апатита (Piccoli, Candela, 2002). В процитированной работе утверждается, что содержание фосфора и растворимость апатита сильно коррелируют со степенью коровой контаминации расплава, но не зависят от давления. Отсюда становится очевидной высокая роль апатита именно в лейкогранитах, имеющих коровую анатектическую природу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изученные лейкограниты характеризуются низким содержанием кальция и присутствием в них существенно натриевого плагиоклаза. Вероятным фактором, определяющим вариации его состава может служить количество кристаллизовавшегося апатита, который контролирует степень фракционирования кальция из остаточного расплава.

Данные моделирования показывают, что при уменьшении количества кальция в расплаве расширяется и сдвигается в более высокотемпературную и высокобарическую область поле устойчивости «гранитного» минерального парагенезиса биотит + полевые шпаты + кварц ± гранат ± ильменит. По данным моделирования, изменение состава плагиоклаза составляет 10–30 мол. % An в малокальциевых магмах при кристаллизации 1–3 % апатита.

Авторы весьма признательны рецензентам, взявших на себя труд по просмотру первой версии рукописи, за высказанные ими комментарии и замечания, которые были учтены при доработке статьи. Работа выполнена в рамках темы НИР ИГГД РАН (№ FMUW-2022-0002) Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балтыбаев Ш. К., Ризванова Н. Г., Глебовицкий В. А. Бородинский массив калиевых порфировидных гранитов: результаты U-Pb датирования и обоснование тектонической позиции (Фенноскандинавский щит) // Доклады РАН. 2016. Т. 470. № 1. С. 67–71.

Балтыбаев Ш. К., Сальникова Е. Б., Глебовицкий В. А. и др. Кузнеченский массив калиевых порфиroidных гранитов: результаты U-Pb датирования и обоснование тектонической позиции (Балтийский щит) // Доклады РАН. **2004**. Т. 398. № 4. С. 519—523.

Балтыбаев Ш. К., Юрченко А. В., Ризванова Н. Г., Вивдич Э. С., Галанкина О. Л., Борисова Е. Б. Раннепротерозойские полимигматиты в зоне гранулитовой фации метаморфизма: термодинамические условия, возраст и длительность формирования (Северное Приладожье) // Геология и геофизика. **2024**. Т. 65. № 7. С. 920—943.

Доливо-Добровольский Д. В. MINAL — программа для эффективной работы с химическими анализами минералов // ЗРМО. **2025**. Т. 154. № 1. С. 142—150.

Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, **2020**. 438 с.

Effect of Crystallization of Accessory Apatite on Composition of Plagioclase in Leucogranites of the Northern Ladoga Region

Sh. K. Baltybaev^{a, b, *}, M. E. Petrakova^c, O. L. Galankina^a

^a Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Saint Petersburg, Russia

^b Saint-Petersburg State University – Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg, Russia

^c Geological Institute RAS, Moscow, Russia

Leucogranites are characterized by low Ca content and, as a consequence, the presence of only essentially sodium plagioclase, usually not higher than andesine composition. Using a number of intrusions of two-feldspar leucogranites in the Northern Ladoga region as an example, it was shown that the different compositions of plagioclase in them can be explained not by the initially different contents of the main oxides in magmas, or by special $P-T$ conditions of crystallization, but by variations in the amount of crystallized apatite, which determined the different degree of fractionation of Ca from the melt. These observations are confirmed by thermodynamic modeling, which showed the emerging “deficit” of Ca in the magma and a decrease in the content of the anorthite molecule in plagioclase during joint crystallization with apatite or after it. It is shown that the crystallization of apatite from low-calcium magmas, even in accessory quantities (1–3%), can lead to a change in the composition of plagioclase in the rock by 10–30 mol. % of An.

Keywords: apatite, melt, plagioclase composition, leucogranites, modeling, crystallization

REFERENCES

Baltybaev Sh. K., Rizvanova N. G., Glebovitsky V. A. Borodinsky massif of potassic porphyry-like granites: results of U-Pb dating and substantiation of the tectonic position (Fennoscandian Shield). *Doklady Earth Sci.* **2016**. Vol. 470. N 1. P. 67—71 (in Russian).

Baltybaev Sh. K., Salnikova E. B., Glebovitsky V. A. et al. Kuznetsk massif of potassic porphyry-like granites: results of U-Pb dating and substantiation of the tectonic position (Baltic Shield). *Doklady Earth Sci.* **2004**. Vol. 398. N 4. P. 519—523 (in Russian).

Baltybaev Sh. K., Yurchenko A. V., Rizvanova N. G., Vивdich E. S., Galankina O. L., Borisova E. B. Early Proterozoic polymigmatites in the granulite facies metamorphic zone: thermodynamic conditions, age and duration of formation (Northern Priladozhye). *Russian Geol. Geophys.* **2024**. Vol. 65. N 7. P. 920—943 (in Russian).

Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A., Berezhnaya N. G., Levskii L. K., Makeev A. F., Yakovleva S. Z. Age and duration of Svecofennian plutono-metamorphic activity in the Ladoga area, southeastern Baltic Shield. *Petrology.* **2004**. Vol. 12. N 4. P. 330—347.

Baltybaev Sh. K., Rizvanova N. G., Kuznetsov A. B., Petrakova M. E., Vivdich E. S. Late orogenic granitoids of the Tervu agmatitic zone in the southeastern part of the Svecofennian Belt (Northern Ladoga Area, Russia). *Doklady Earth Sci.* **2023**. Vol. 511 N 2. P. 685—691.

Chappell B. W., White A. J. R. Two contrasting granite types. *Pacific Geol.* **1974**. Vol. 8. P. 173—174.

Connolly J. A. Multivariable phase-diagrams — an algorithm based on generalized thermodynamics. *Amer. J. Sci.* **1990**. Vol. 290. P. 666—718.

Dolivo-Dobrovolsky D. V. MINAL — A Program for efficient work with chemical analyses of minerals. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2025**. Vol. 154. P. 142—150 (in Russian).

Ehlers C., Lindroos A., Selonen O. The late Svecofennian granite-migmatite zone of southern Finland — a belt of transpressive deformation and granite emplacement. *Precambrian Research*. **1993**. Vol. 64. P. 295—309.

Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J., Arculus R. J., Ellis D. J., Frost C. D. A geochemical classification for granitic rocks. *J. Petrol.* **2001**. Vol. 42. N 11. P. 2033—2048.

Harrison T. M., Watson E. B. The behavior of apatite during crustal anatexis: equilibrium and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **1984**. Vol. 48. N 7. P. 1467—1477.

Holland T. J. B., Powell R. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. *J. Metamorph. Geol.* **2011**. Vol. 29. P. 333—383.

Huaiwei N., Keppler H. Carbon in silicate melts. *Rev. Miner. Geochem.* **2013**. Vol. 75. P. 251—287.

Jung S., Hoernes S., Masberg P., Hoffer E. The petrogenesis of some migmatites and granites (Central Damara orogen, Namibia): evidence for disequilibrium melting, wall-rock contamination and crystal fractionation. *J. Petrol.* **1999**. Vol. 40. P. 1241—1269.

Ladoga Proterozoic structure (geology, deep structure and minerageny). Petrozavodsk: Karelian Research Center RAS, **2020**. 438 p. (in Russian).

Lowenstern J. B. Carbon dioxide in magmas and implications for hydrothermal systems. *Miner. Deposita*. **2001**. Vol. 36. N 6. P. 490—502.

Korsman K., Korja T., Pajunen M. et al. The GGT/SVEKA transect: Structure and evolution of the continental crust in the Paleoproterozoic Svecofennian Orogen in Finland. *Int. Geol. Review*. **1999**. Vol. 41. P. 287—333.

Kurhila M., Mänttari I., Vaasjoki M., Rämö O. T., Nironen M. U-Pb geochronology of the late Svecofennian leucogranites of Southern Finland. *Precambrian Research*. **2011**. Vol. 190. P. 1—24.

London D., Morgan G. B., Babb H. A., Loomis J. L. Behavior and effects of phosphorus in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{H}_2\text{O}$ at 200 MPa (H_2O). *Contrib. Miner. Petrol.* **1993**. Vol. 113. P. 450—465.

Middlemost E. A. K. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Sci. Rev.* **1994**. Vol. 37. P. 215—224.

Mysen B. O., Holtz F., Pichavant M., Beny J. M., Montel J. M. The effect of temperature and bulk composition on the solution mechanism of phosphorus in peraluminous haplogranitic magma. *Amer. Miner.* **1999**. Vol. 84. N 9. P. 1336—1345.

Pichavant M., Montel J.-M., Richard L. R. Apatite solubility in peraluminous liquids: Experimental data and an extension of the Harrison model. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **1992**. Vol. 56. P. 3855—3861.

Piccoli P. M., Candela P. A. Apatite in igneous systems. *Rev. Miner. Geochem.* **2002**. Vol. 48. P. 255—293.

Shand S. J. The eruptive rocks: 2nd ed. John Wiley, New York, **1943**. 444 p.

Stolper E., Fine G., Johnson T., Newman S. Solubility of carbon dioxide in albitic melt. *Amer. Miner.* **1987**. Vol. 72. P. 1071—1085.

White R., Powell R., Johnson T. The effect of Mn on mineral stability in metapelites revisited: New $a-x$ relations for manganese-bearing minerals. *J. Metamorph. Geol.* **2014**. Vol. 32. N 8. P. 261—286.

Wolf M. B., London D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **1994**. Vol. 58. P. 4127—4145.

Zeng H., Wang L., Ye F., Yang B., Chen J., Chen G., Sun L. Mechanical-structural investigation of chemical strengthening aluminosilicate glass through introducing phosphorus pentoxide. *Frontiers in Materials*. **2016**. Vol. 3.