

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНИТНЫХ РАСПЛАВОВ В ВЫСОКОБАРНЫХ УСЛОВИЯХ (БЕЛОМОРСКАЯ ЭКЛОГИТОВАЯ ПРОВИНЦИЯ, ВОСТОК ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА)

Докукина К.А.

Кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник, Геологический
институт РАН, Москва, Россия

e-mail: dokukina@mail.ru

Аннотация. Эклогиты, обнажающиеся вдоль северо-восточной границы Беломорского орогена на западе Фенноскандинавского щита были сформированы как результат мезо-неоархейской субдукции и коллизии. Сверхвысокобарная и высокобарная ассоциация Гридинских пород представлена ТТГ гнейсами, содержащими прослои, фрагменты и дайки основных и ультраосновных пород. Неоархейская декомпрессия высокобарных пород сопровождалась частичным плавлением ТТГ гнейсов. Исследование реакционных структур в мигматитах позволило проследить изменение РТ параметров при перемещении пород от пиковых условий эклогитовой фации в условия высокобарной гранулитовой фации (10-13 kbar, 800-850 °C). Мигматиты наиболее часто приурочены к границам контрастных по составу пород (кислых и основных), которые были наиболее благоприятны для частичного плавления, миграции флюида и диффузии компонентов. Начальная стадия плавления характеризуется формированием калиевой гранитной лейкосома замещающей гнейсы и пронизывающей породы основного состава. Гранат и фенгит-содержащая лейкосома имеет высокие содержания бария, ярко выраженные положительные Eu и Sr аномалии при очень низком содержании всех остальных редких и рассеянных элементов. Зрелая стадия плавления представлена небольшими интрузивными телами нормального гранитного состава калиевой специфики. Граниты характеризуются более высокими содержаниями малых и рассеянных и отрицательными Eu и Sr аномалиями.

Ключевые слова: Беломорская эклогитовая провинция, эклогит, гранулит, частичное плавление, лейкосома, симплектит.

Введение

В пределах Южно-Кольской активной окраины вдоль северо-восточной границы Беломорского аккреционного орогена размещены тела эклогитов, сформированные в результате мезо-неоархейской субдукции океанических и континентальных комплексов (ассоциации Салма и Гридино) (рис. 1а, б) (Mints et al., 2014, 2015). Детальные исследования привели нас к выводу о том, что эклогитовый метаморфизм всех пород Беломорской эклогитовой провинции был не позднее 2.7 млрд лет назад (Dokukina and Konilov, 2011; Dokukina et al., 2014) и связан с процессами мезо-неоархейской субдукции и формированием Южно-Кольской активной окраины в результате закрытия мезоархейского Салминского палеоокеана при сближении микроконтинента Хетоламбина и Кольского кратона

(Mints et al., 2014). Событие с возрастом 2.7 млрд лет отвечает пост-эклогитовому декомпрессионному метаморфизму гранулитовой фации повышенных давлений. В это время происходило частичное плавление сложного по строению континентального субстрата, включающего в себя разные типы гранитоидов (тоналит-трондьемитовые гнейсы, граниты и мигматиты) и породы основного состава (метаморфизованные мафические дайки и фрагменты мафических пород). Цель настоящей статьи продемонстрировать на конкретном примере зарождение коровых гранитных расплавов в корневых частях континентальных орогенов.

Краткий геологический очерк

Метаморфические комплексы Мезоархейско-Неоархейской Беломорской эклогитовой провинции расположены в пределах Южно-

Кольской активной окраины вдоль северо-восточной границы Мезоархейско-Палеопротерозойского Беломорского аккреционного орогена (рис. 1). Две ассоциации эклогитов в пределах провинции различаются по природе протолитов. Эклогиты ассоциации Салмы формировались по породам океанической коры. В районе Гридино эклогитизации подвергались дайки и фрагменты пород основного состава. Дискуссии о возрасте и природе эклогитов Беломорской эклогитовой провинции в настоящий момент актуальны и рассматриваются в многочисленных публикациях, посвященных петрологии, геохимии, геохронологии и геодинамике данного

региона (Володичев и др., 2004; 2005; 2008; 2009; Докукина и др., 2009; 2010; 2012а, 2012б; 2014; Докукина, Докукин, 2015; Dokukina, Konilov, 2011, Dokukina et al., 2014; Аранович, Козловский, 2009; Козловский, Аранович, 2010; Козловский, Аранович, 2008; Konilov et al., 2011; Минц и др., 2010а, 2010б; Mints et al., 2010, 2014; 2015; Моргунова, Перчук, 2012; Perchuk and Morgunova, 2014; Скублов и др., 2011а, 2011б; Слабунов и др., 2006а, 2006б, 2008, 2011; Степанова, Степанов, 2005а, 2005б; Степанов, Степанова, 2006; Травин, Козлова, 2005; Сибелев и др., 2004; Каулина и др., 2010; Щипанский и др., 2012а, 2012б и др.).

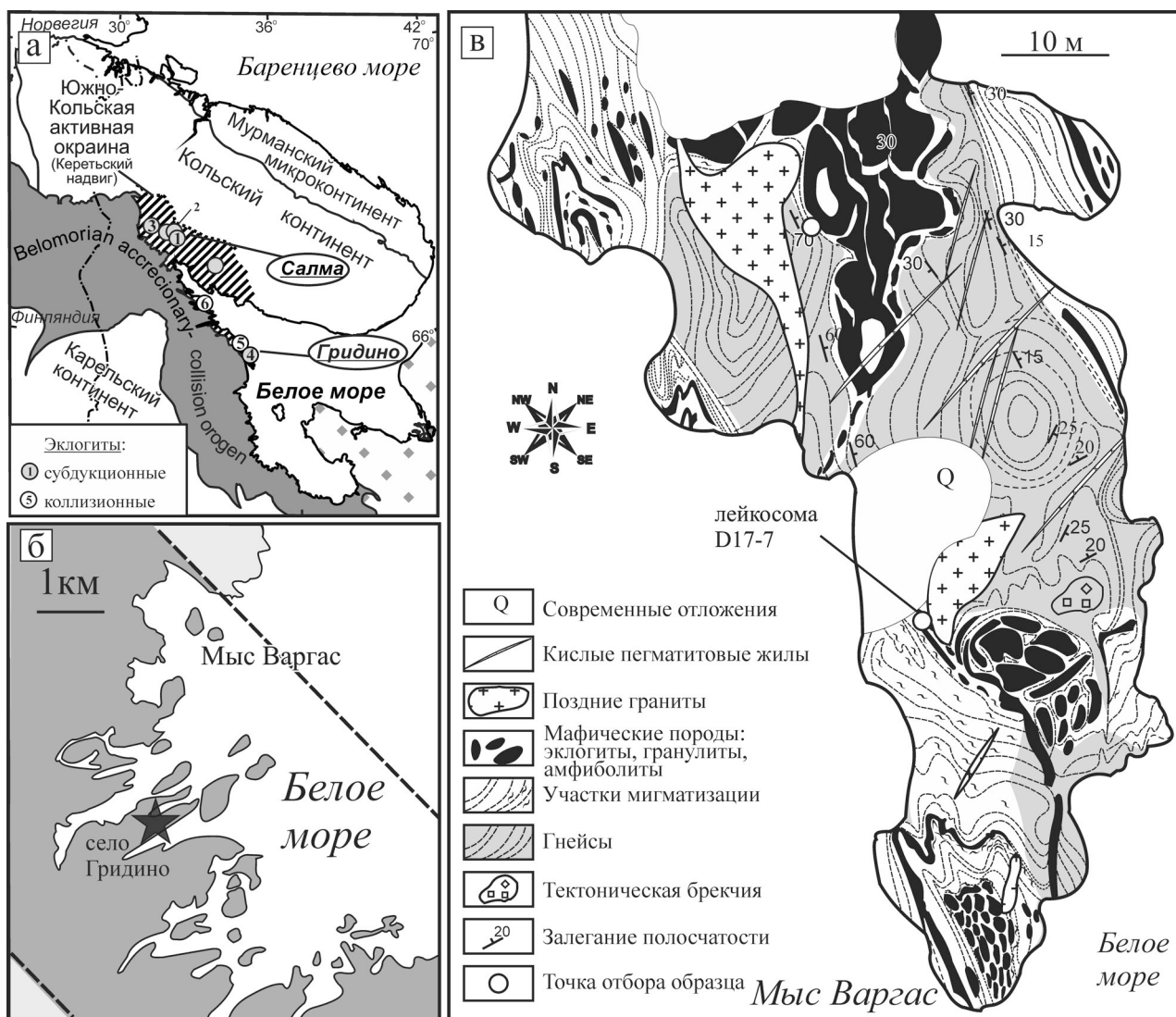


Рис. 1. (а) Тектоническая позиция эклогитовых ассоциаций Салмы и Гридино, образующих архейскую Беломорскую эклогитовую провинцию (БЭП) в восточной части Фенноскандинавского щита. (б) - положение объектов исследования в Гридинской зоне (серый тон). С небольшими изменениями по (Минц и др., 2010). (в) Геологическая схема мыса Варгас (модифицировано из Докукина и др., 2012).

Хороший пример частичного плавления контрастных по составу пород представлен на мысе Варгас (рис. 1 б, в), который находится в 3-х километрах от села Гридино (VGS-84: N 65°56', E 34°40'). Здесь распространены мезоархейские ~ 3.0-2.9 млрд лет гранитогнейсы тоналитового состава с прослоями амфиболовых гнейсов, интродуцированные мезоархейскими ~ 2.82 млрд лет дайками метагаббро и

содержащие многочисленные тела амфиболитизированных гранулитов по эклогитам различного (от первых сантиметров до первых метров) размера, от изометричной до сильно уплощенной формы.

Гнейсы и дайки метагаббро совместно формируют складчатый пакет с пологими шарнирами и субвертикальными осевыми плоскостями (рис. 2а).

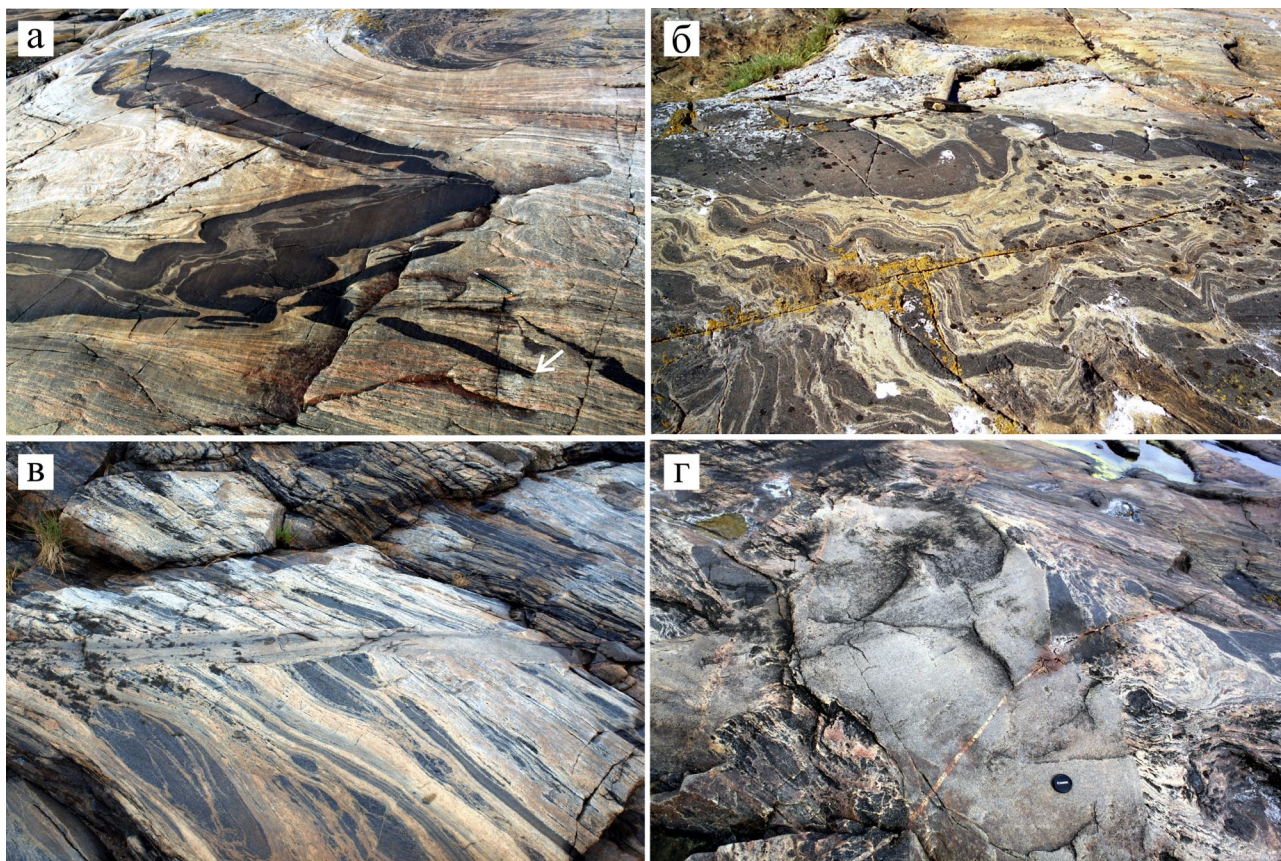


Рис. 2. Фотографии обнажений: (а) деформированные дайки метагаббро, пронизанные жилами гранат и фенгит-содержащей лейкосомы. Стрелкой показан сохранившийся секущий контакт апофиза дайки с гнейсами; (б) деформированная дайка метагаббро, пронизанная жилами гранат и фенгит-содержащей лейкосомы; (в) Лейкосомы замещают гнейсы и содержат реститовые тела нерасплавленных тоналитов и фрагменты мафических пород. Мало мощная жила лейкогранитов пересекает мигматиты; (г) Тело лейкогранитов пересекает мигматиты.

Полосчатость гнейсов конформна дайковым телам. Однако на южном окончании мыса на протяжении 30 м одна из даек метагаббро сохраняет секущие контакты с вмещающими гнейсами, насыщенными включениями мафических пород (рис. 1в). К северу дайка деформирована, имеет раздувы и пережимы, смята в складки и будинирована. На участках деформации

породы испытали частичное плавление (Докукина и др., 2009; 2010; 2012 Dokukina et al., 2014) с формированием гранат- и фенгит-содержащей кислой лейкосомы (рис. 2б). Реликты интрузивных контактов апофизов даек с гнейсами тем не менее сохраняются в зонах интенсивных деформаций (рис. 2а).

В зонах частичного плавления лейкосома замещает гнейсы, а многочисленные тонкие жилы лейкосомы (от нескольких до десятков сантиметров в ширину) расщепляют мафические породы (рис. 2б) и содержат реститовые тела нерасплавленных тоналитов и фрагменты мафических пород (рис. 2в). Зоны частичного плавления с формированием фенгит-содержащей лейкосомы строго приурочены к границам между основными и кислыми породами. Лейкограниты представлены относительно крупными телами и жилами лейкократовых гранитов (от десятков сантиметров до десятков метров в ширину), которые пересекают полосчатость всех метаморфических пород (рис. 2в, г). Цирконы из лейкогранитной жилы были датированы методом LA-ICP-MS и дали возраст 2721 ± 19 млн лет (данные Л.М. Натапова и Е.А. Белоусовой). Этот возраст в пределах ошибки совпадает с конкордантным возрастом 2713 ± 6 млн лет, полученным в фенгит-содержащей лейкосоме U-Pb-Th изотопными и химическими методами по цирконам (Dokukina, Konilov, 2011; Докукина и др., 2012; Хиллер, Докукина, 2016).

Петрография и минералогия

Гнейсы характеризуются однородным минеральным составом. Это мигматизированные полосчатые биотит-амфибол-эпидотовые, гранат-биотит-эпидотовые или амфиболовые плагиогнейсы.

Мафические породы, морфологически представленные дайками или фрагментами в гнейсах, представляют собой высокобарные гранулиты, сформированные после эклогитов. Равновесный гранулитовый гранат-клинопироксен-плагиоклазовый минеральный парагенезис испытал преобразования в условиях амфиболитовой фации с формированием амфибола и биотита. Рутил и апатит – типичные акцессорные

минералы. Гранат $\text{Alm}^{50-60}\text{Prp}^{14-27}\text{Grs}^{18-24}\text{Sps}^{1-3}$) иногда содержит включения омфацита, который содержит до 43 мольных % Jd и характеризуется высоким содержанием Ca-Ts (до 6.5 mol % Ca-Ts) (рис. 3).

Лейкосома имеет полосчатую текстуру: чередование полевошпат-кварцевых ($\pm$ гранат) прослоев и прослоев почти целиком выполненными фенгитом с кварцем ($\pm$ гранат). Ti- и Ba-содержащий фенгит (до 3.20 Si cations на 11 атомов O, MgO 1.62–1.79 вес.%, TiO_2 0.16–2.27 вес.% и BaO 0.39–0.76 вес.% (рис. 4) имеет две генерации. Первая представлена относительно широкими чешуйками (рис. 5а). Вторая генерация фенгита представленная симплектитовыми сростаниями с кварцем и часто развивается вокруг фенгитов первой генерации (рис. 5а). Полевые шпаты представлены калиевыми и калиево-бариевыми полевыми шпатами, плагиоклазом мирмекитами (рис. 5б). В составе лейкосомы встречаются клиноцоизит-кварцевые симплектиты (рис. 5в), гранат ($\text{Alm}^{46-52}\text{Prp}^{6-13}\text{Grs}^{30-37}\text{Sps}^{4-13}$), клинопироксен, рутил, циркон, апатит и алланит.

В лейкосоме были изучены реакционные структуры, отвечающие условиям высоких давлений и/или температур.

1. Скелетные и симплектитовые сростания Ba-фенгита, кварца ($\pm$ плагиоклаз) пересекают относительно крупные оптически однородные зерна калиевого полевого шпата (рис. 5а). На границе с фенгит-кварцевыми сростаниями в калиевом полево шпате повышается содержание бария и формируется зональная кайма калий-бариевого полевого шпата с повышением содержания бария к периферии.

2. Мирмекиты (вермикулярные выделения кварца в плагиоклазе) наблюдаются в тесной ассоциации с фенгит-кварц-плагиоклазовыми сростками (рис. 5б).

3. Вермикулярные прорастания клиноцоизита и кварца (клиноцоизит-кварцевые симплектиты) сформированы в равновесии с фенгитом и фенгит-кварцевыми сростаниями (рис. 5в). Реликтовые зерна кальцита иногда встречаются в областях, где развиваются клиноцоизит-кварцевые симплектиты.

4. На границе с породами основного состава (например, породами дайки) в лейкоosome наблюдаются короны калиевого полевого шпата на границе с кварцем и сростками биотита и плагиоклаза (рис. 5 г).

5. Реститовые гранат ($\text{Alm}^{46-47}\text{Prp}^{12-13}\text{Grs}^{36-37}\text{Sps}^{4-5}$) и клинопироксен

замещаются клиноцоизит-кварцевыми симплектитами. В этих же образцах клиноцоизит-кварцевые симплектиты обрастают оптически однородным биотитом, внутри которого присутствуют червеобразные включения калиевого полевого шпата и кварца. Центральные части плагиоклазов в непосредственной близости с клинопироксеном и гранатом представлены антипертитами – регулярными выделениями оптически однородного калиевого полевого шпата в плагиоклазе. В плагиоклазе наблюдаются идиоморфные кристаллы биотита без включений и циркон.

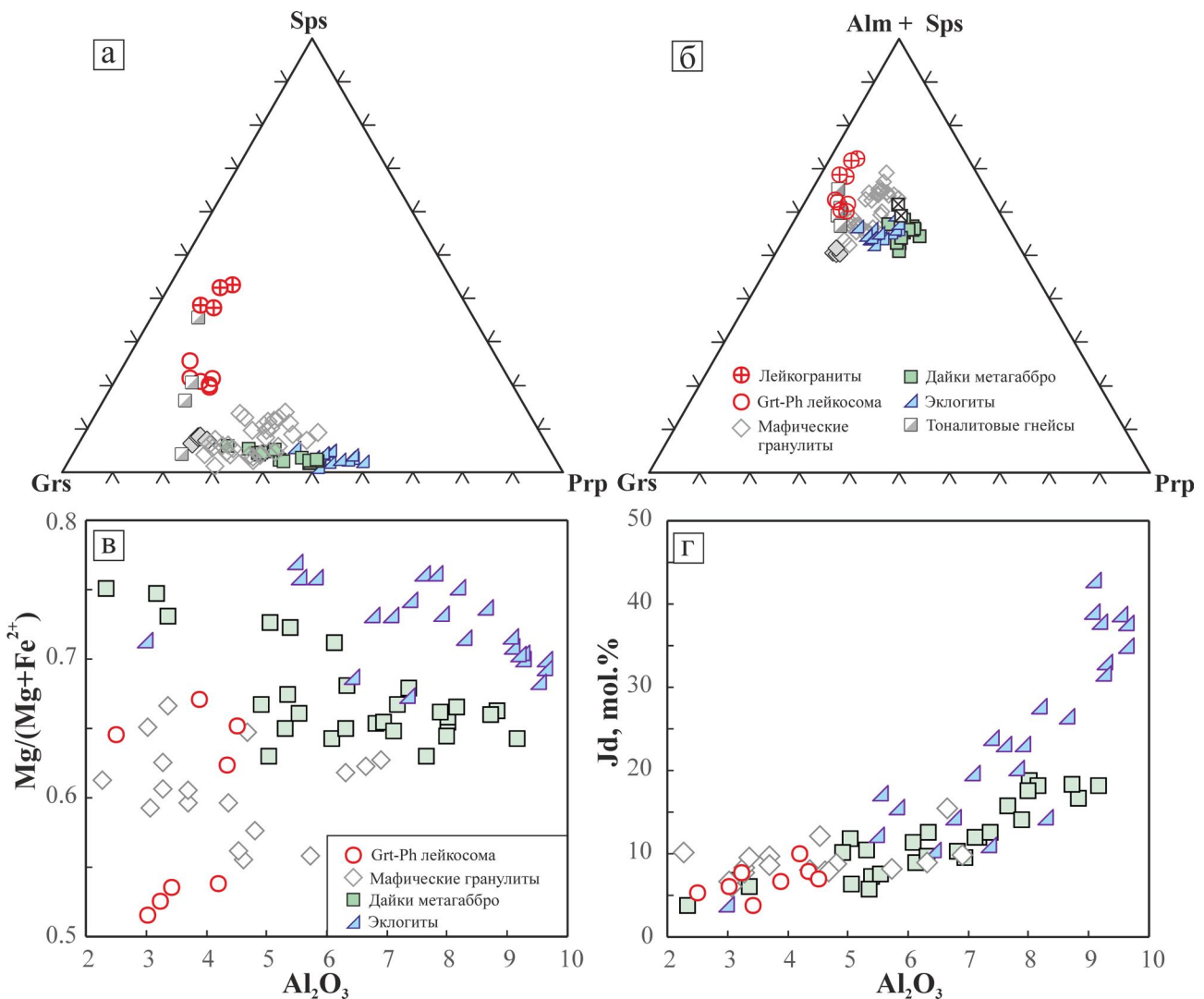


Рис. 3. Составы гранатов (а, б) и клинопироксенов (в, г) в породах мыса Варгас. Grs – гроссуляр, Alm – альмандин, Sps – спессартин, Prp – пироп, Jd – жадеит.

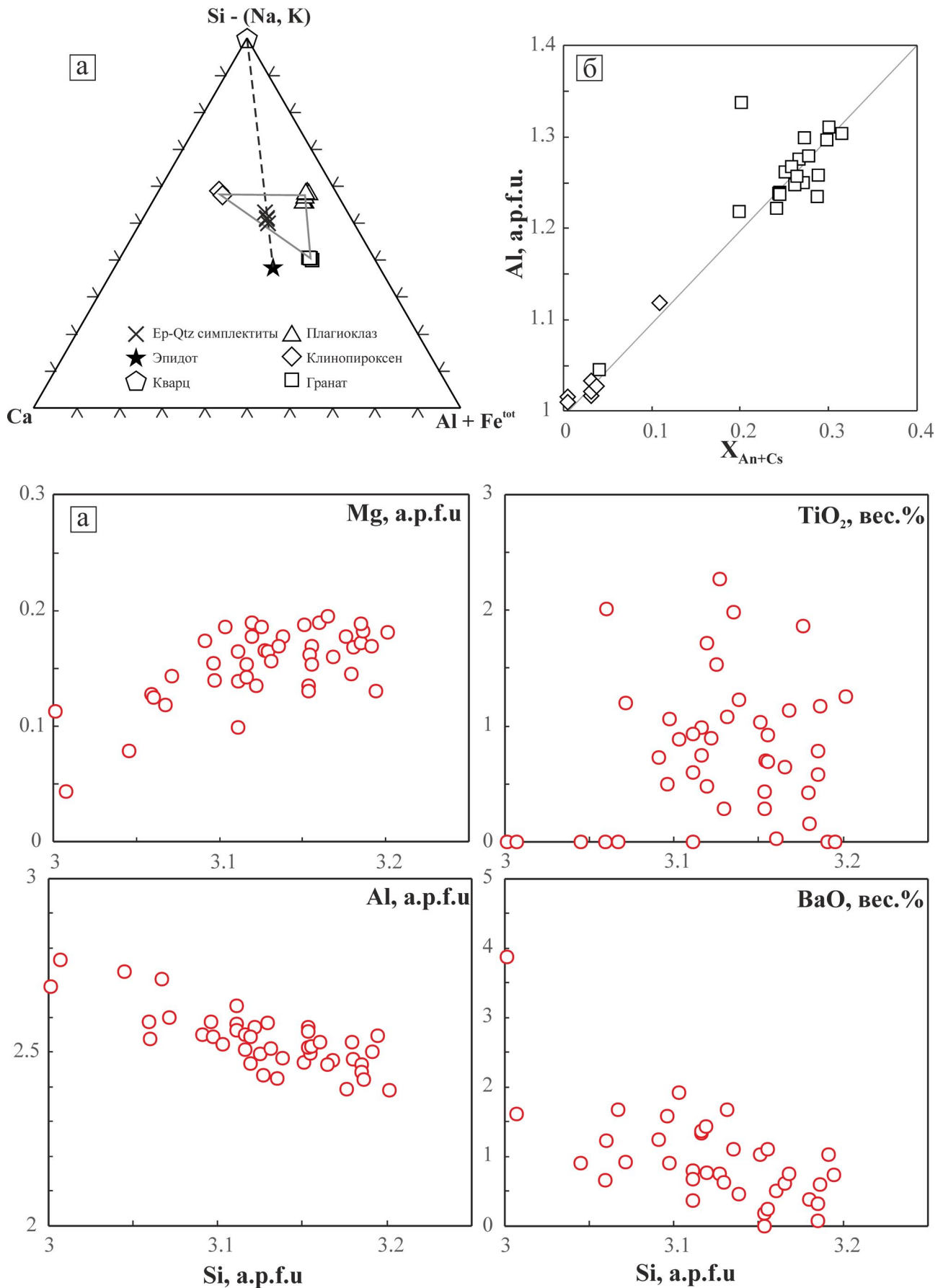


Рис. 4. Составы породообразующих минералов в лейкоosome: (а) интегральный состав эпидот-кварцевых симплектитов на треугольной диаграмме Ca – (Si - (Na, K)) – (Al + Fe); (б) составы полевых шпатов; (в) составы белой слюды. а.р.ф.у. – формульные единицы.

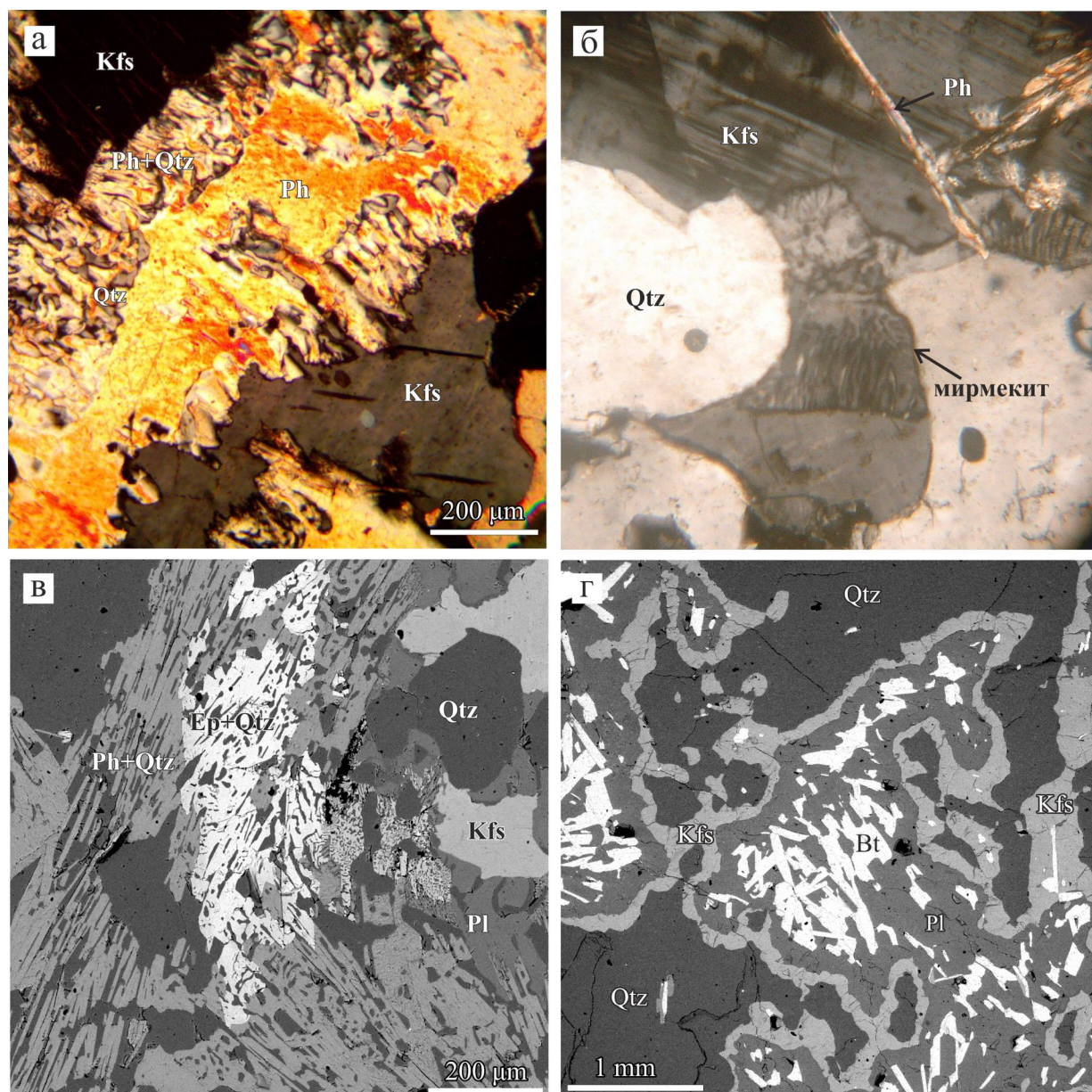


Рис. 5. Микрофотографии и BSE изображения реакционных микроструктур в лейкосоме (а) широкая пластинка фенгита, обрастающая скелетными фенгит-кварцевыми срастаниями, микрофотография в скрещенных николях; (б) мирмекиты, микрофотография в скрещенных николях (с) вермикулярные симплектиты клиноцоизита и кварца в равновесии с фенгит-кварцевыми срастаниями, BSE изображение; (д) срастания плагиоклаза и биотита, окруженные непрерывным «рвом» калиевого полевого шпата на границе с кварцем, BSE изображение.

Аббревиатура минералов дана по (Whitney, Evans, 2010).

Лейкограниты состоят из калиевого полевого шпата, кислого плагиоклаза, биотита и кварца. В редких случаях в лейкогранитах также обнаруживается фенгит и клиноцоизит-кварцевые симплектиты. Акцессорные минералы представлены гранатом ($\text{Alm}^{49-63}\text{Prp}^{4-9}\text{Grs}^{30-37}\text{Sps}^{5-21}$), цирконом, апатитом и магнетитом. Недеформированные лейкогранитные тела имеют характерную внутреннюю

структуру: пленки калиевого полевого шпата разделяют овальные зерна кварца и натриевый плагиоклаз. В деформированных и разгнейсованных лейкогранитных телах вокруг пластинок биотита формируется новый гранат.

Геохимия

Плагиогнейсы имеют тоналитовый (Рис. 6а) гранитный

состав ($A/CNK = 1.05-1.08$, Рис. 66), повышенными содержаниями Ba и Sr, повышенные содержания ЛРЗЭ и незначительные положительные и отрицательные аномалии по Eu ($Eu/Eu^* = 0.5-1.2$) (Рис. 7).

Мафические породы различаются по магнетиальности $Mg \# = 0.47-0.60$. Регрессивно измененные эклогиты и амфиболиты в гнейсах характеризуются низкими содержаниями и плоским распределением РЗЭ с отрицательными аномалиями по Eu (24–82 ppm, $La_N/Lu_N = 0.7-0.8$, $Lu_N/Sm_N = 0.9-1.7$). Дайки метагаббро незначительно обогащены в содержании РЗЭ (46–120 ppm, $La_N/Lu_N = 1.5-6.7$) и имеют отрицательные Eu и Sr аномалии ($Sr/Sr^* = 0.5-0.6$; $Eu/Eu^* = 0.8-0.9$) (Рис. 7).

Лейкосома относится к субщелочным пералюминевым гранитам с калиевой спецификой (Na_2O 2.18–3.2, K_2O 3.8–4.9 вес. %, Рис. 6), имеет высокое содержание SiO_2 (69.8–77 вес.%); аномально высокие содержания Ba (1548–3533 ppm) при низких содержаниях всех остальных рассеянных элементов. Лейкосома имеет обогащенный в ЛРЗЭ ($La_N/Lu_N = 6.7-68.9$, $Lu_N/Sm_N = 0.06-0.82$) или W-образный ($La_N/Lu_N = 2.97-3.27$, $Lu_N/Sm_N = 1.43-2.26$) РЗЭ спектр (Рис. 7) с положительной европиевой аномалией ($Eu/Eu^* = 1.1-12.4$) и низкие валовые содержания РЗЭ (6–29 ppm), что в совокупности является признаками эвтектической природы лейкосомы (например, Skjerlie, Johnston, 1996).

Лейкограниты пералюминевые характеризуются калиевой спецификой (Na_2O 2.76–3.9, K_2O 3.1–4.91 вес. %, Рис. 6), нормальным содержанием SiO_2 (66.6–74.5 wt. %), пониженным содержанием бария (Ba 429–858 ppm), ЛРЗЭ обогащенным спектром ($La_N/Lu_N = 9.7-55$, $Lu_N/Sm_N = 0.13-0.46$) (Рис. 7) с отрицательной европиевой аномалией (0.3–0.6) и суммой РЗЭ 110–300 ppm.

Дискуссия и выводы

Интерпретация реакционных структур

Скелетные и симплектитовые срастания Ba-фенгита, кварца и плагиоклаза формируется за счет калиевого полевого шпата и Ba- и CO_2 - и H_2O -содержащего расплава или флюида: $Ksp + melt/fluid \pm Ky = Ph + Pl + Qtz$. Две генерации фенгита в лейкосоме можно объяснить с использованием выводов из работы (Waters, 2001): широкие чешуйки фенгита первой генерации вероятнее всего представляют собой продукт кристаллизации непосредственно из расплава. Скелетные и симплектитовые кварцсодержащие срастания фенгита и плагиоклаза с кварцем наоборот развивались за счет твердой фазы (в данном случае калиевого полевого шпата) в субсоллюдных условиях.

Эпидот-кварцевые симплектиты известны в магматических породах как продукты субсолидусной кристаллизации из расплава (Schmidt, Poli, 2004 и ссылки в ней), в метаморфических породах при реакциях распада Ca- и Al-содержащих минералов, таких как плагиоклаз, гранат, амфибол и пироксен (Enami et al., 2004; Ravna, Roux, 2006). В условиях дефицита воды в высокобарных (Schmidt, Poli, 2004 и ссылки в ней) и ультравысокобарных мигматитовых террейнах (Korsakov et al., 2002, 2006). Гранат и клинопироксен очевидно являются релитовыми фазами реакции $Grt + Pl + melt = Czo + Qtz$ и $Cpx + Pl + melt = Czo + Qtz$. Фазе расплава по-видимому отвечает плагиоклаз-антипертит.

Короны полевого шпата между кварцем и биотит-плагиоклазовыми срастаниями по-видимому представляют собой реакцию инконгруэнтного плавления фенгит + кварц: $Ph + Qtz = Bt + Kfs + melt \pm Ky$, где калиевый полевой шпат является перитектической фазой, а плагиоклаз по-видимому отвечает расплаву.

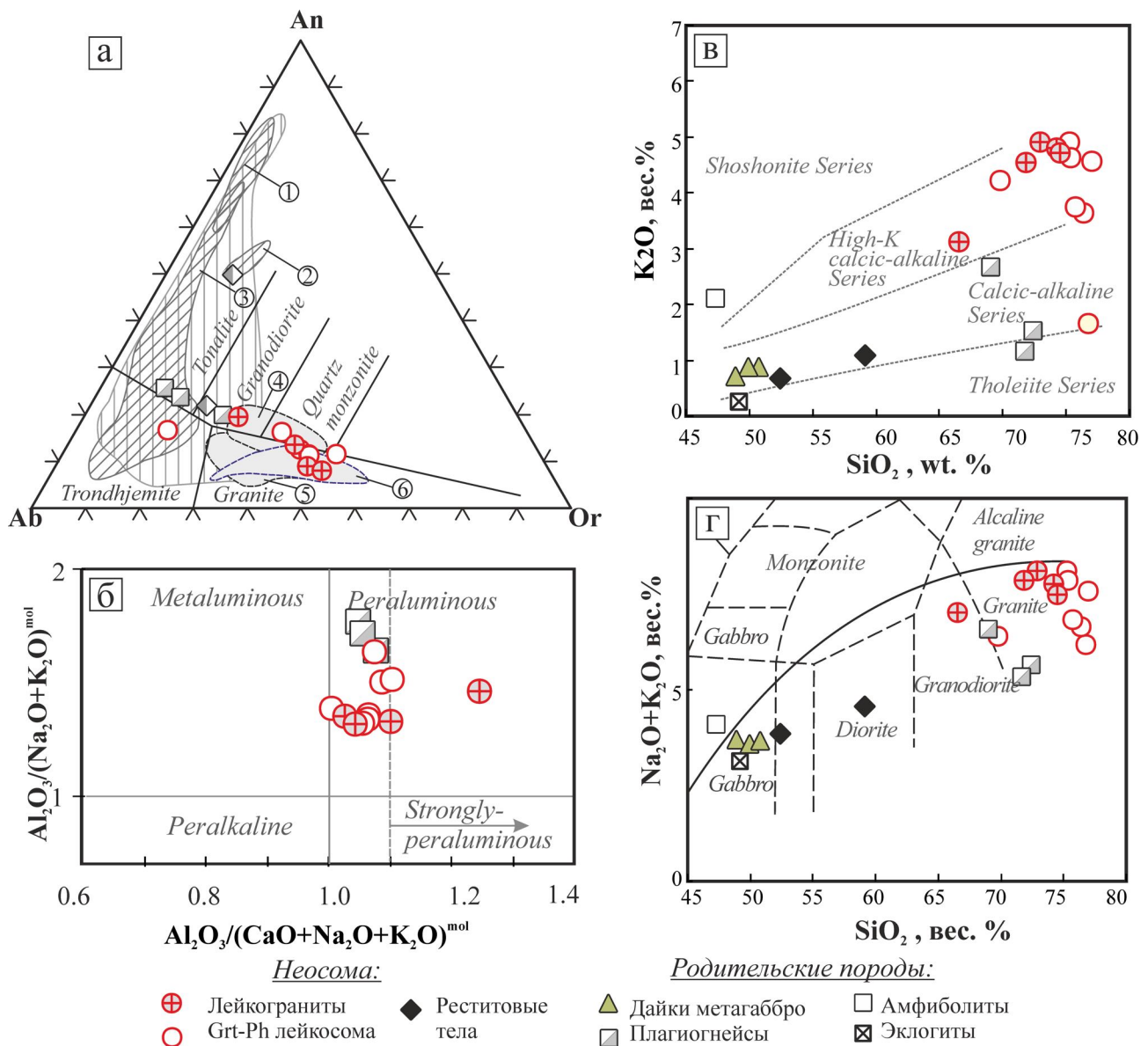


Рис. 6. Составы кварц-полевошпатовых пород мыса Варгас на классификационных диаграммах. (а) Нормативные составы кислых пород мыса Варгас на классификационной диаграмме Ab–An–Or (а) Показаны поля экспериментальных стекол, полученных в результате плавления амфиболитов (косая штриховка), доизитовых эклогитов (вертикальная штриховка) по Skjerlie & Patiño Douce (2002), и плавления ТТГ гнейсов (серое поле). Номерами в кружках показаны результаты экспериментов по плавлению: (1) Wolf & Wyllie (1994); (2) Rushmer (1991); (3) Winther (1996); (4) Watkins et al. (2007), sample SC4; (5) Watkins et al. (2007), sample SC5; and (6) Patiño Douce (2005); (б) A/NK vs. A/CNK (Shand, 1943), (в) K₂O vs. SiO₂ (Peccerilo & Taylor, 2011), и (г) Na₂O + K₂O vs. SiO₂ (Cox et al., 1979).

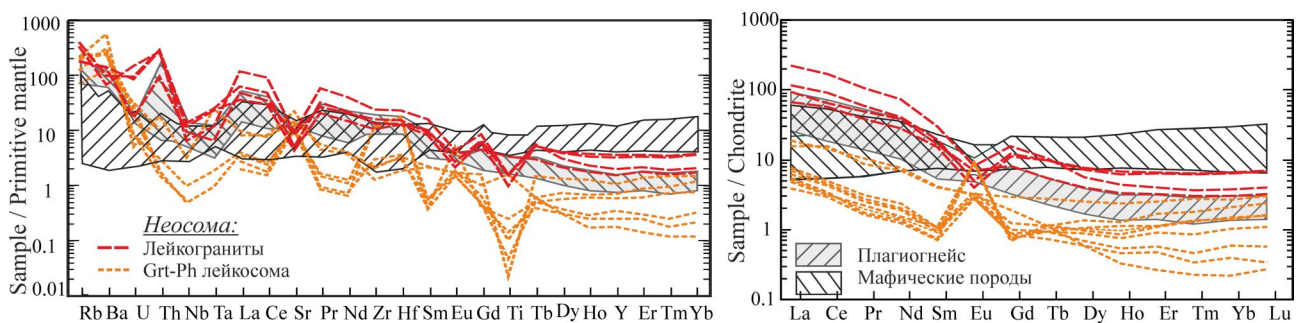


Рис. 7. Спайдер и РЗЭ диаграммы пород мыса Варгас. Примитивная мантия по (Hofmann, 1988), хондрит по (Sun & McDonough, 1989).

Эта реакция хорошо изучена в экспериментальных работах (см, например, Brearley A. J., Rubie, 1990), а продукты этой реакции известны в разных метаморфических террейнах

Определение РТ условий плавления

Ранее были проведены оценки РТ условий формирования фенгита в лейкоosome (Dokukina, Konilov, 2011). Фенгитовый геобарометр (Caddick, Thompson, 2008) дал высокobarные условия формирования достигающие 25 кбар при заданной температуре 750 °C (2). РТ оценки проводились по фенгиту, сформированному по калиевому полевоому шпату в равновесии с клиноцоизит-кварцевыми сростаниями. Большинство исследователей рассматривают клиноцоизит-кварцевые симплектиты, как высокотемпературные структуры, сформированные из расплава или флюида при температурах > 850 °C (Ravna, Roux, 2006; Korsakov et al., 2002; Beard, 2005). Минеральный парагенезис фенгита, клиноцоизита и кварца отвечает плавлению более высокobarной ассоциации в лейкоosome, частью которой был калиевый полевоый шпат, а оценки формирования этой ассоциации соответствуют экспериментальным данным. Минеральные ассоциации, наблюдаемые в шлифах на границе между ретроградно измененными эклогитами и гранат-фенгитовой лейкосомой, вероятно отвечают пиковой реакции плавления $Zo + Kfs + Qtz = Ph + Grt + Mel$.

Дальнейшее плавление пород, формирование гранитного расплава и переплавление уже сформированной лейкосомы происходило при перемещении пород до при снижении давления до нижнекоровых и среднекоровых уровней в поле гранулитовой фации повышенных давлений. Внутри кианитового поля, дегидратационное плавление фенгита происходит при температуре более

785°C (Thompson, 1982; Vielzeuf, Schmidt, 2001). Калиевый полевоый шпат представляет здесь перитектической фазой и является важным свидетельством, что процессы плавления происходили в отсутствии воды (Brearley, Rubie, 1990; Thompson, 1982).

Bt-Grt и Grt-Cpx геотермометры и Grt-Cpx-Pl-Qtz геобарометр (Fonarev et al., 1991) также дают условия гранулитовой фации повышенных давлений: 750-800 °C and 10-12 kbar (Dokukina, Konilov, 2011). Такие же оценки давления и температуры дали гранулитовые минеральные парагенезисы в породах основного состава (Dokukina, Konilov, 2011). Равновесная гранат-клинопироксен-плаггиоклазовая минеральная ассоциация формировалась 840-870 °C (Grt-Cpx геотермометр, Powell, 1985) и 13.4–13.6 кбар (TPF-согласованный Grt-Cpx-Pl-Qtz геобарометр, Fonarev et al., 1991) или 12.7–15.5 кбар при заданной температуре 800 °C (Cpx-Pl-Qtz геобарометр, McCarthy, Patiño Douce, 1998).

Формирование лейкосомы

Два типа гранитной лейкосомы с контрастными геохимическими свойствами встречаются в метаморфических террейнах, которые испытали частичное плавление, и характеризуют разные стадии процесса. Лейкосомы отвечают стадии сегрегации и экстракции расплава (Brown, 2013; Sawyer, 1987, 1998; Solar & Brown, 2001a, 2001b; Hinchey & Carr, 2006; Korhonen et al., 2010; White & Powell, 2010). Позитивные Eu и Sr аномалии в лейкоosome могут быть связаны с ранней кристаллизацией полевых шпатов или отсутствием полевых шпатов в источнике. Граниты напротив характеризуют позднюю стадию плавления и формируются из эволюционирующих порций расплава, просачивающихся и застывших на поздних стадиях процесса.

Новообразованные граниты по составу попадают в поле синтетических стекол, полученных в экспериментах по частичному плавлению архейских тоналитов и метатоналитов в сухих условиях при 6-12 кбар и 15-32 кбар (Patiño Douce, 2005; Watkins *et al.*, 2007) (Рис. 6а). Содержание РЗЭ, значения Eu/Eu^* и Sr/Sr^* в лейкоosome, лейкогранитах и ТТГ гнейсах хорошо коррелируют (Рис. 7). Такая корреляция характеризует ТТГ гнейсы как источник кислого расплава.

Результаты геохимического моделирования, проведенного для проверки гипотезы, что гранитная магма эволюционировала через частичное плавление ТТГ гнейсов с последующей сепарацией и фракционной кристаллизацией расплава в целом воспроизвели плавление гнейсов с формированием небольших объемов лейкогранитов и лейкосомы, которая представляет собой остаточный полевошпатовый кумулат при степени плавления $F = 40\%$.

Локализация процессов плавления на границах контрастных по составу пород по-видимому не случайно. Как следует из результатов экспериментального плавления расслоенных кристаллических протолитов в сухих условиях (Skjerlie *et al.*, 1993; Skjerlie, Patiño-Douce, 1995), породы, истощенные в подвижных компонентах, неспособные произвести расплав в нормальных условиях становятся более способными на контактах с породами, которые содержат компоненты, дестабилизирующие водные фазы и инициирующие дегидратационное плавление. В таком случае, анатектические граниты могут включать элементы из двух или более источников, которые участвуют в плавлении (Skjerlie *et al.*, 1993; Skjerlie, Patiño-Douce, 1995).

Полевые наблюдения и микроструктурные особенности исследованных мигматитов

показывают, что породы основного состава также вовлекались в плавление и становились источником элементов для новообразованных гранитов (Рис. 2). Соотношение между элементами в гранитах, гнейсах и основных породах демонстрируют повышенные концентрации ТРЗЭ в лейкогранитах, относительно плагиогнейсов (Рис. 7). По-видимому, основные породы могли быть дополнительным источником ТРЗЭ в лейкоosome.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 15-05-01214 и при поддержке Министерства образования и науки РФ по Программе повышения конкурентоспособности РУДН «5-100» среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2016-2020 гг.

Литература

1. Володичев О.И., Парфенова О.В., Кузенко Т.И. Палеопротерозойские эклогиты Беломорского подвижного пояса (об эклогитизации габбро в дайке комплекса лерцолитов-габброноритов) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 11. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 37-61.
2. Володичев О. И., Слабунов А. И., Сибелев О. С., Лепехина Е. Н. Геохронология (SHRIMP-II) цирконов из палеопротерозойских эклогитов района с. Гридино (Беломорская провинция) // Изотопные системы и время геологических процессов: Материалы IV Рос. конф. по изотопной геохронологии. Т. II. СПб., 2009. С. 110-112.
3. Володичев О.И., Слабунов А.И., Бибикина и др. Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Петрология. 2004. Т. 12. № 6. С. 609-631.
4. Володичев О.И., Слабунов А.И., Степанов В.С., Сибелев О.С., Травин В.В., Степанова А.В., Бабарина И.И. Архейские и палеопротерозойские эклогиты и палеопротерозойские друзиты района с. Гридино (Белое море) // Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минерагения (путеводитель и материалы конференции). Институт геологии КарНЦ РАН, 2005. С. 60-74.
5. Докукина К.А., Баянова Т.Б., Каулина Т.В., Травин А.В. Конилов А.Н. Новые геохронологические данные для метаморфических и магматических пород района села Гридино (Беломорская

- эклогитовая провинция) // Доклады РАН, 2010. Т. 432. № 3. С. 370–375.
6. Докукина К.А., Каулина Т.В., Конилов А.Н. Датирование реперных событий в истории докембрийских сложнодислоцированных комплексов (на примере Беломорской эклогитовой провинции) // Доклады АН, 2009. Т. 425. № 1. С. 83–88.
 7. Докукина К.А., Баянова Т.Б., Каулина Т.В., Травин А.В., Минц М.В., Конилов А.Н., Серов П.А. Беломорская эклогитовая провинция: последовательность и возраст событий в истории эклогитовой ассоциации Гридино // Геология и геофизика, 2012а. № 10. С. 1338–1371.
 8. К.А. Докукина, Конилов А.Н., Ван К.В., Минц М.В., Симакин С.Г. Происхождение раннепалеопротерозойских цирконов в породах архейской эклогитовой ассоциации Гридино (Беломорская эклогитовая провинция) // Доклады академии наук, 2012б. Том 445. № 1. С. 72–79.
 9. Докукина К.А., Каулина Т.В. Конилов А.Н., Натапов Л.М., Белоусова Е.А., Ван К.В., Симакин С.Г., Лепехина Е.Н., 2014. Мезоархейские мафические дайки Беломорской эклогитовой провинции (район села Гридино). Доклады Академии Наук. Т.457, № 1. С. 74–80.
 10. Докукина К.А., Докукин П.А. Тектонические брекчии Беломорской эклогитовой провинции (район с. Гридино): свидетельства палеосейсмических дислокаций в зоне мезоархейской субдукции // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле», 2015. №2. С. 17–39. <http://geo-science.ru/?p=866>
 11. Каулина Т.В., Япаскурт В.О., Пресняков С.А., Савченко Е.С., Симакин С.Г. Метаморфическая эволюция архейских эклогитоподобных пород района Широкой и Узкой Салмы (Кольский п-ов): геохимические особенности цирконов, состав включений и возраст // Геохимия, 2010, № 9, с. 926–945.
 12. Козловский В. М., Аранович Л. Я. Геолого-структурные условия эклогитизации палеопротерозойских базитовых даек восточной части Беломорского подвижного пояса // Геотектоника, 2008. № 4. С. 70–84.
 13. Козловский В. М., Аранович Л. Я. Петрология и термобарометрия эклогитовых пород Красногубского дайкового поля, Беломорский подвижный пояс // Петрология, 2010. Том 18. № 1. С. 29–52.
 14. Минц М.В., Конилов А.Н., Докукина К.А., Каулина Т.В., Белоусова Е.А., Натапов Л.М., Гриффин У.Л., О'Рейлли С. Беломорская эклогитовая провинция: уникальные свидетельства мезо-неоархейской субдукции и коллизии // Доклады РАН. 2010а. Т. 434, № 6. С. 776–781.
 15. Минц М.В., Сулейманов А.К., Бабаянц П.С., Белоусова Е.А., Блох Ю.И., Богина М.М., Буш В.А., Докукина К.А., Заможная Н.Г., Злобин В.Л., Каулина Т.В., Конилов А.Н., Михайлов В.О., Натапов Л.М., Пийп В.Б., Ступак В.М., Тихоцкий С.А., Трусов А.А., Филиппова И.Б., Шур Д.Ю. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС: В 2 т. + комплект цветных приложений. // Серия аналитических обзоров, 2010б. - Очерки по региональной геологии России-. Вып. 4. М.: Т. 1. 408 с. + 48 с. цв. вкл. ГЕОКАРТ: ГЕОС. — Т. 2. 400 с. + 36 с. цв. вкл. (РОСНЕДРА, РАН, ГЕОКАРТ)
 16. Моргунова А.А., Перчук А.Л. Ультравысокобарный метаморфизм в архейско-протерозойском подвижном поясе (Гридинский комплекс, Карелия, Россия) // Доклады РАН. 2012. Т. 443, № 3. С..
 17. Сибилев О.С., Бабарина И.И., Слабунов А.И., Конилов А.Н. Архейский эклогитсодержащий меланж Гридинской зоны (Беломорский подвижный пояс) на о. Столбиха: структура и метаморфизм // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, Кар. НЦ РАН, 2004. Вып. 7. С. 5–20.
 18. Скублов С.Г., Астафьев Б.Ю., Марин Ю.Б., Березин А.В., Мельник А.Е., Пресняков С.Л. Новые данные о возрасте эклогитов Беломорского подвижного пояса в районе с. Гридино // Доклады АН. 2011а. Т. 439. № 6. С. 795–802.
 19. Скублов С.Г., Березин А.В., Мельник А.Е. Палеопротерозойские эклогиты северо-западной части Беломорского подвижного пояса, район Салмы: состав и изотопно-геохимическая характеристика минералов, возраст метаморфизма // Петрология. 2011б. Т. 19. № 5. С. 493–519.
 20. Слабунов А.И., Бибикина Е.В., Степанов В.С., Володичев О.И., Балаганский В.В., Степанова А.В., Сибилев О.С. Неоархейский Беломорский подвижный пояс. // В кн.: Строение и динамика литосферы Восточной Европы (А.Ф. Морозов, Н.В. Межеловский, Н.И.Павленкова - ред.). Разд. 1.10. Москва, ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006а. С. 143–151.
 21. Слабунов А.И., Володичев О.И., Скублов С.Г., Березин А.В. Главные стадии формирования палеопротерозойских

- экологитизированных габбро-норитов по результатам U-Pb (SHRIMP) датирования цирконов и изучения их генезиса // Доклады академии наук, 2011. Т. 437. № 2. С. 238-242.
22. Слабунов А.И., Лобач-Жученко С.Б., Бибикина Е.В., Балаганский В.В., Сорьенен-Вард П., Володичев О.И., Щипанский А.А., Светов С.А., Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Степанов В.С. Архей Балтийского щита: геология, геохронология и геодинамика // Геотектоника. 2006б. № 6. С. 3-32.
 23. Слабунов А.И., Степанова А.В., Бибикина Е.В., Бабарина И.И., Матуков Д.И. Неоархейские габброиды Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: геология, состав, геохронология // Доклады РАН. 2008. Т.422, № 6. С. 793-797.
 24. Степанов В.С., Степанова А.В. Гридинское дайковое поле: геология, геохимия, петрология // Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика. минералогия (Материалы научной конференции и путеводитель экскурсии). Петрозаводск, 2005. С. 285-288.
 25. Степанов В.С., Степанова А.В. Ранние палеопротерозойские метагаббро района с. Гридино (Беломорский подвижный пояс) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. С. 55-71.
 26. Степанова А.В., Степанов В.С. Коронитовые габбро Беломорского подвижного пояса // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск, 2005. С. 29-39.
 27. Травин В.В., Козлова Н.Е. Локальные сдвиговые деформации как причина экологитизации (на примере структур Гридинской зоны меланжа, Беломорский подвижный пояс) // Доклады РАН, 2005. Т.405. №3. С.376-380.
 28. Щипанский А.А., Ходоревская Л.И., Конилов А.Н., Слабунов А.И. Экологиты Беломорского пояса (Кольский полуостров): геология и петрология // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 1. С. 3-29.
 29. Щипанский А.А., Ходоревская Л.И., Слабунов А.И. Геохимия и изотопный возраст экологитов Беломорского пояса (Кольский полуостров): свидетельства осудуцировавшей архейской океанической коре // Геология и геофизика, 2012, т. 53, №3. С. 341-364.
 30. Хиллер В. В., Докукина К. А. Химическое Th-U-Pb изохронное (SHIME) датирование цирконов из высокобарной кислой лейкосомы района с. Гридино (Беломорская экологитовая провинция) // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле», 2016. № 3. С. 17-39.
 31. Beard, J.S., Ragland, P.C., & Crawford, M.L. (2005). Using incongruent, equilibrium hydration reactions to model latter-stage crystallization in plutons: examples from the Bell Island tonalite, Alaska. *Journal of Geology* **113**, 589-599.
 32. Brearley, A. J., Rubie, D. C. (1990). Effects of H₂O on the disequilibrium breakdown of muscovite + quartz. *Journal of Petrology* **31**, 925-956.
 33. Brown, M. (2013). Granite: from genesis to emplacement. *Geological Society of America Bulletin* **125**, 1079-1113.
 34. Caddick, M.J., Thompson, A.B. (2008). Quantifying the tectono-metamorphic evolution of pelitic rocks from a wide range of tectonic settings: mineral compositions in equilibrium. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **156**, 177-195.
 35. Cox, K. G., Bell, J. D. & Pankhurst, R. J. (1979). The Interpretation of Igneous Rocks. George Allen & Unwin. Ltd. London, 450 pp.
 36. Dokukina K.A., Kaulina T.V. , Konilov A.N., Mints M.V., Van K.V., Natapov L., Belousova E., Simakin S.G., & Lepekhina E.N. (2014). Archaean to Paleoproterozoic high-grade evolution of the Belomorian eclogite province in Fennoscandian shield (Gridino area): geochronological evidences. *Gondwana Research* **25**, 585-613. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2013.02.014>.
 37. Dokukina, K.A., & Konilov, A.N. (2011). Metamorphic evolution of the Gridino mafic dyke swarm (Belomorian eclogite province, Russia). In: *Ultrahigh-Pressure Metamorphism. 5 Years After the Discovery of Coesite and Diamond* (eds Dobrzhinetskaya, L.F., Faryad, S.W., & Wallis, S.), pp. 579-621. Elsevier.
 38. Enami, M., Liou, J.G., Mattinson, C. (2004). Epidote minerals in high- and ultrahighpressure metamorphism. In: Liebscher, A., Franz, G. (Eds.), *Epidotes. Review in Mineralogy and Geochemistry* **56**, 347-398.
 39. Fonarev, V.I., Graphchikov, A.A., & Konilov, A.N. (1991). A consistent system of geothermometers for metamorphic complexes. *International Geology Review* **33**, 743-783.
 40. Hinchey, A.M., & Carr, S.D. (2006). The S-type Ladybird leucogranite suite of southeastern British Columbia: Geochemical and isotopic evidence for a genetic link with migmatite formation in the North American basement gneisses of the Monashee complex. *Lithos* **90**, 223-248. Doi:10.1016/j.lithos.2006.03.003.
 41. Hofmann, A.W. (1988). Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* **90**, 297-314.

42. Konilov, A.N., Shchipansky, A.A., Mints, M.V., Dokukina, K.A., Kaulina, T.V., Bayanova, T.B., Natapov, L.M., Belousova, E.A., Griffin, W.L., & O'Reilly, S.Y. (2011). The Salma eclogites of the Belomorian Province, Russia: HP/UHP metamorphism through the subduction of Mesoarchean oceanic crust. In: *Ultrahigh-Pressure Metamorphism. 5 Years After the Discovery of Coesite and Diamond* (eds Dobrzhinetskaya, L.F., Faryad, S.W., & Wallis, S.), pp. 623–670. Elsevier.
43. Korhonen, F.J., Saito, S., Brown, M., Siddoway, C.S. & Day, J.M.D. (2010b). Multiple generations of granite in the Fosdick Mountains, Marie Byrd Land, West Antarctica: Implications for 140lyphaser intracrustal differentiation in a continental margin setting. *Journal of Petrology*, **51**, 627–670.
44. Korsakov, A.V., Shatsky, V.S., Sobolev, N.V., & Zayachkovsky, A.A. (2002). Garnet-biotite-clinozoisite gneisses: a new type of diamondiferous metamorphic rocks of the Kokchetav massif. *European Journal of Mineralogy* **14**, 915–929.
45. Korsakov, A.V., Theunissen, K., Kozmenko, O.A., & Ovchinnikov Yu.I. (2006). Reaction textures in clinozoisite gneisses. *Russian Geology and Geophysics* **47** (4), 497–510.
46. McCarthy, T.C., Patiño Douce, A.E. (1998). Empirical calibration of the silica-Ca-tschermak's-anorthite (SCAn geobarometer). *Journal of Metamorphic Geology* **6**, 671–682.
47. Mints, M.V., Belousova, E.A., Konilov, A.N., Natapov, L.M., Shchipansky, A.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., Dokukina, K.A., & Kaulina, T.V. (2010). Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia. *Geology* **38** (8), 739–742. doi: 10.1130/G31219.1
48. Mints, M.V., Dokukina, K.A., & Konilov, A.N. (2014). The Meso-Neoproterozoic Belomorian eclogite province: Tectonic position and geodynamic evolution. *Gondwana Research* **25**, 561–584.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2012.11.010>
49. Mints, M.V., Dokukina, K.A., Konilov, A.N., Philippova, I.B., Zlobin, V.L., Babayants, P.S., Belousova, E.A., Blokh, Yu.I., Bogina, M.M., Bush, W.A., Dokukin, P.A., Kaulina, T.V., Natapov, L.M., Piip, V.B., Stupak, V.M., Suleimanov, A.K., Trusov, A.A., Van, K.V., Zamozhniaya, N.G. 2015. East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 510.
50. Patiño Douce, A. E., (2005). Vapor-absent melting of tonalite at 15 - 32 kbar. *Journal of Petrology* **46**, 275–290.
51. Peccerillo, A. & Taylor, S.R. (1976). Geochemistry of Eocene calc-Alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contribution Mineralogy and Petrology* **58**, 63–81.
52. Perchuk, A.L., Morgunova, A.A. (2014). Variable P-T paths and HP-UHP metamorphism in a Precambrian terrane, Gridino, Russia: Petrological evidence and geodynamic implications. *Gondwana Research* **25**, 614–629.
53. Powell, R. (1985). Regression diagnostic and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revised. *Journal of Metamorphic Geology* **3**, 231–243.
54. Ravna, E. J. K., & Roux, M. R. M. (2006). Metamorphic evolution of the Tønsvika Eclogite, Tromsø Nappe - evidence for a new UHPM province in the Scandinavian Caledonides. *International Geology Review* **48**, 861–881.
55. Rushmer, T. (1991). Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid-absent conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **107**, 41–59.
56. Sawyer, E.W. (1987). The role of partial melting and fractional crystallization in determining discordant migmatite leucosome compositions. *Journal of Petrology* **28**, 445–73.
57. Shand, S. J. (1949). *Eruptive Rocks*. New York: Wiley. 488 pp.
58. Schmidt, M.W., Poli, S. (2004). In: Liebscher, A., Franz, G. (Eds.), *Epidotes. Magmatic epidote. Review in Mineralogy and Geochemistry* **56**, 399–430.
59. Skjerlie, K. P., Johnston, A. D. (1992). Vapour-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: implication for the generation of A-type granites. *Geology*, **20**, 263–266.
60. Skjerlie, K. P. & Patiño Douce, A. E. (2002). The fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 1.0 to 3.2 GPa; implications for melting in thickened continental crust and for subduction zone processes. *Journal of Petrology* **43**, 291–314.
61. Skjerlie, K. P., Patiño Douce, A. E., & Johnston, D. A. (1993). Fluid absent melting of a layered crustal protolith: implications for the generation of anatectic granites. *Contribution to Mineralogy and Petrology* **114**, 365–378
62. Skjerlie, K. P. & Patiño-Douce, A. E. (1995). Anatexis of interlayered amphibolite and pelite at 10 kbar: effect of diffusion of major components on phase-relations and melt fraction. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **122**, 62–78.
63. Solar, G.S., & Brown, M. (2001a). Deformation partitioning during transpression in response to Early Devonian oblique convergence, northern Appalachian orogen, USA. *Journal of Structural Geology* **23**, 1043–1065.

64. Solar, G.S., & Brown, M. (2001b). Petrogenesis of migmatites in Maine, USA: possible source of peraluminous leucogranite in plutons? *Journal of Petrology* **42**, 789-823.
65. Sun, S.S., McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: (Saunders, A.D., Norry, M.J., Eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications 42, pp. 313-345.
66. Thompson, A. B. (1982). Dehydration melting of pelitic rocks and the generation of H₂O undersaturated granitic liquids. *American Journal of Science* **282**, 1567-1595.
67. Vielzeuf, D. & Schmidt, M. W. (2001). Melting relations in hydrous systems revisited: application to metapelites, metagreywackes and metabasalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **141**, 251-267.
68. Waters, D.J. (2001). The significance of prograde and retrograde quartz-bearing intergrowth microstructures in partially-melted granulite-facies rocks. In: Kriegsman, L. (ed.) *Prograde and retrograde processes in crustal melting*. *Lithos* **56**, 97-110.
69. Watkins, J., Clemens, J. & Treloar, P. (2007). Archaean TTGs as sources of younger granitic magmas: melting of sodic metatonalites at 0.6-1.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **154**, 91-110.
70. White, R.W., & Powell, R. (2010). Retrograde melt-residue interaction and the formation of near-anhydrous leucosomes in migmatites. *Journal of Metamorphic Geology* **28**, 579-597. doi:10.1111/j.1525-1314.2010.00881.x.
71. Whitney, D.L., Evans, B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Am Mineral* **95**, 185-187.
72. Winther, K. T. (1996). An experimentally based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts. *Chemical Geology* **127**, 43-59.
73. Wolf, M. B. & Wyllie, P. J. (1994). Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **115**, 369-383.
3. Volodichev OI, Slabunov AI, Bibikova et al. Archean eclogites of the Belomorian mobile belt (Baltic Shield) // *Petrology*. 12. 12. № 6. P. 609-631.
4. Volodichev OI, Slabunov AI, Stepanov VS, Sibelev OS, Travin VV, Stepanova AV, Babarina I.I. Archean and Paleoproterozoic eclogites and paleoproterozoic friends of the district p. Gridino (White Sea) // *Belomorsky mobile belt and its analogues: geology, geochronology, geodynamics, mineralogy (guide and conference materials)*. Institute of Geology, KarRC RAS, 2005. S. 60-74.
5. Dokukina K.A., Bayanova TB, Kaulina TV, Travin A.V. Konilov A.N. New geochronological data for metamorphic and igneous rocks in the area of the village of Gridino (White Sea eclogite province) // *Reports of the Russian Academy of Sciences*, 2010. P. 432. No. 3. P. 370-375.
6. Dokukina K.A., Kaulina TV, Konilov A.N. Dating of reference events in the history of Precambrian complex-dislocated complexes (on the example of the White Sea eclogite province) // *Reports of the Academy of Sciences*, 2009. Vol. 425. No. 1. P. 83-88.
7. Dokukina K.A., Bayanova TB, Kaulina TV, Travin A.V., Mints M.V., Konilov A.N., Serov P.A. White Sea eclogite province: sequence and age of events in the history of the eclogite association Gridino // *Geology and Geophysics*, 2012a. № 10. P. 1338-1371.
8. K.A. Dokukina, Konilov AN, Van KV, Mints MV, Simakin SG Origin of Early Paleoproterozoic zircons in the rocks of the Archaean eclogite association Gridino (Belomorsk eclogite province) // *Reports of the Academy of Sciences*, 2012b. Volume 445. No. 1. P. 72-79.
9. Dokukina K.A., Kaulina T.V. Konilov AN, Natapov LM, Belousova EA, Van KV, Simakin SG, Lepekhina EN, 2014. Mesoarchaean mafic dikes of the White Sea eclogite province (the area of the village of Gridino). *Reports of the Academy of Sciences*. T.457, No. 1. P. 74-80.
10. Dokukina K.A., Dokukin P.A. Tectonic breccias of the Belomorian eclogite province (region Gridino): evidence of paleoseismic dislocations in the mesoarchaean subduction zone // *International Scientific and Technical and Industrial Journal "Earth Sciences"*, 2015. №2. Pp. 17-39. <http://geo-science.ru/?p=866>
11. Kaulina TV, Yapaskurt VO, Presnyakov SA, Savchenko ES, Simakin SG Metamorphic evolution of Archean eclogite-like rocks of the Wide and Narrow Salma region (Kola Peninsula): geochemical features of zircons, composition of inclusions and age // *Geochemistry*, 2010, No. 9, p. 926-945.
12. Kozlovsky VM, Aranovich L. Ya. Geological and structural conditions of eclogitization of the Paleoproterozoic basite dikes in the eastern part of the Belomorian mobile belt. *Geotektonika*, 2008. No. 4. P. 70-84.
13. Kozlovsky VM, Aranovich L. Ya. Petrology and thermobarometry of eclogite rocks of the Krasnogubsky dike field, Belomorsky mobile belt // *Petrology*, 2010. Volume 18. № 1. P. 29-52.
14. Mints MV, Konilov AN, Dokukina KA, Kaulina TV, Belousova EA, Natapov LM, Griffin UL, O'Reilly S. Belomorskaya eclogite province: unique evidence of meso-neo-Archean subduction and collision // *Reports of the Russian Academy of Sciences*. 2010a. P. 434, No. 6. P. 776-781.

Reference

1. Volodichev OI, Parfenova OV, Kuzenko TI Paleoproterozoic eclogites of the Belomorian mobile belt (on eclogitization of gabbro in the dike of the Iherzolite-gabbro complex) // *Geology and minerals of Karelia*. Issue. 11. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2008. P. 37-61.
2. Volodichev OI, Slabunov AI, Sibelev OS, Lepekhina Ye. N. Geochronology (SHRIMP-II) of zircons from the Paleoproterozoic eclogites of the area (in russian) p. Gridino (Belomorskaya province) // *Isotopic systems and time of geological processes: Materials IV Ros. Conf. by isotope geochronology*. T. II. St. Petersburg, 2009. pp. 110-112.

15. Mints MV, Suleimanov AK, Babayants PS, Belousova EA, Blokh Yu.I., Bogina MM, Bush VA, Dokukina K.A., Zamozhnaya NG, Zlobin VL, Kaulina TV, Konilov AN, Mikhailov VO, Natapov LM, Piip VB, Stupak VM, Tikotsky S A.A., Trusov AA, Filippova IB, Shur D.Yu. Deep structure, evolution and minerals of the Early Precambrian basement of the East European Platform: Interpretation of materials based on the 1-EB profile, profiles 4B and TATSEYS: In 2 tons + a set of color applications. // A series of analytical reviews, 2010b. - Essays on regional geology of Russia. Issue. 4. Moscow: T. 1. 408 pp. + 48 sec. color. incl. GEOKART: GEOS. - T. 2. 2. 400 with. + 36 seconds. color. incl. (ROSNEFRA, RAS, GEOKART)
16. Morgunova AA, Perchuk A.L. Ultrahigh-barometric metamorphism in the Archean-Proterozoic mobile belt (Gridinsky Complex, Karelia, Russia) // Reports of the Russian Academy of Sciences. 2012. T. 443, No. 3. With ..
17. Sibilev OS, Babarina II, Slabunov AI, Konilov AN Archean eclogite-containing melange of the Gridin zone (Belomorskii mobile belt) on. Stolbikha: structure and metamorphism // Geology and minerals of Karelia. Petrozavodsk, Kar. SC RAS, 2004. Issue. 7. P. 5-20.
18. Skublov SG, Astafyev B.Yu., Marin Yu.B., Berezin AV, Melnik AE, Presnyakov S.L. New data on the age of the eclogites of the Belomorian mobile belt in the c. Gridino // Reports of the Academy of Sciences. 2011a. P. 439. № 6. P. 795-802.
19. Skublov SG, Berezin AV, Melnik AE Paleoproterozoic eclogites of the northwestern part of the White Sea mobile belt, the Salma region: composition and isotope-geochemical characteristics of minerals, the age of metamorphism // Petrology. 2011b. T. 19. № 5. S. 493-519.
20. Slabunov AI, Bibikova EV, Stepanov VS, Volodichev OI, Balaganskiy VV, Stepanova AV, Sibilev O.S. Neo-Archaic Belomorian mobile belt. // In: The Structure and Dynamics of the Lithosphere of Eastern Europe (AF Morozov, NV Mezhelovsky, NI Pavlenkova - Ed.). Div. 1.10. Moscow, GEOKART, GEOS, 2006a. Pp. 143-151.
21. Slabunov AI, Volodichev OI, Skublov SG, Berezin AV The main stages of the formation of Paleoproterozoic eclogitized gabbro-norites according to the results of U-PB (SHRIMP) dating of zircons and the study of their genesis // Reports of the Academy of Sciences, 2011. P. 437. № 2. P. 238-242.
22. Slabunov AI, Lobach-Zhuchenko SB, Bibikova EV, Balaganskiy VV, Soryenen-Ward P., Volodichev OI, Shchipansky AA, Svetov S.A. , Chekulaev VP, Arestova NA, Stepanov VS Archei of the Baltic Shield: Geology, Geochronology and Geodynamics // Geotectonics. 2006b. № 6. P. 3-32.
23. Slabunov AI, Stepanova AV, Bibikova EV, Babarina II, Matukov DI Neo-Archaean gabbroids of the White Sea province of the Fennoscandian shield: geology, composition, geochronology // Reports of the Russian Academy of Sciences. 2008. T.422, No. 6. P. 793-797.
24. Stepanov VS, Stepanova A.V. Gridinskoye dike field: geology, geochemistry, petrology // Belomorsky mobile belt and its analogues: geology, geochronology, geodynamics. Mining (Materials of the scientific conference and guide of the excursion). Petrozavodsk, 2005. pp. 285-288.
25. Stepanov VS, Stepanova A.V. Early Paleoproterozoic metagabbro of the area with. Gridino (Belomorsky mobile belt) // Geology and minerals of Karelia. Issue. 9. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2006. P. 55-71.
26. Stepanova A.V., Stepanov V.S. Coronite gabbros of the Belomorian mobile belt // Geology and minerals of Karelia. Issue. 8. Petrozavodsk, 2005. pp. 29-39.
27. Travin VV, Kozlova N.E. Local shear deformations as the cause of eclogitization (on the example of structures of the Gridin zone of melange, Belomorsky mobile belt) // Doklady RAN, 2005. T.405. No. 3. P.376-380.
28. Shchipansky AA, Khodorevskaya LI, Konilov AN, Slabunov AI Eclogites of the Belomorian belt (Kola Peninsula): geology and petrology // Geology, Geophysics, 2012, v. 53, No. 1. P. 3-29.
29. Shchipansky AA, Khodorevskaya LI, Slabunov AI Geochemistry and isotopic aging of the eclogites of the Belomorian belt (Kola Peninsula): evidence of the depleted archaean oceanic crust, Geologiya i Geofizika, 2012, v. 53, No. 3. Pp. 341-364.
30. Hiller V. V., Dokukina K. A. Chemical Th-u-Pb isochronous (CHIME) dating of zircons from the high-baric acid leucosome of the region p. Gridino (White Sea eclogite province) // International scientific and technical and industrial journal "Earth Sciences", 2016. № 3. P. 17-39.
31. Beard, J.S., Ragland, P.C., & Crawford, M.L. (2005). Using incongruent, the hydration of hydration, the process of the synthesis of the latter-stage crystallization in plutons: examples from the Bell Island tonalite, Alaska. Journal of Geology 113, 589-599.
32. Brearley, A. J., Rubie, D. C. (1990). Effects of H₂O on the disequilibrium breakdown of muscovite + quartz. Journal of Petrology 31, 925-956.
33. Brown, M. (2013). Granite: from genesis to emplacement. Geological Society of America Bulletin 125, 1079-1113.
34. Caddick, M.J., Thompson, A.B. (2008). Quantifying the tectono-metamorphic evolution of the pelitic rocks from a wide range of tectonic settings: mineral compositions in equilibrium. Contributions to Mineralogy and Petrology 156, 177-195.
35. Cox, K. G., Bell, J. D. & Pankhurst, R. J. (1979). The Interpretation of Igneous Rocks. George Allen & Unwin. Ltd. London, 450 pp.
36. Dokukina K. A., Kaulina T.V. , Konilov A.N., Mints M.V., Van K.V., Natapov L., Belousova E., Simakin S.G., & Lepekhina E.N. (2014). Archaean to Paleoproterozoic high-grade evolution of the Belomorian eclogite province in the Fennoscandian shield (Gridino area): geochronological evidences. Gondwana Research 25, 585-613. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jgr.2013.02.014>.
37. Dokukina, K.A., & Konilov, A.N. (2011). Metamorphic evolution of the Gridino mafic dyke swarm (Belomorian eclogite province, Russia). In: Ultrahigh-Pressure Metamorphism. 5 Years After the Discovery of Coesite and Diamond (eds Dobrzhinetskaya, L.F., Faryad, S.W., & Wallis, S.), pp. 579-621. Elsevier.
38. Enami, M., Liou, J.G., Mattinson, C. (2004). Epidote minerals in high- and ultrahighpressure metamorphism. In: Liebscher, A., Franz, G. (Eds.), Epidotes. Review in Mineralogy and Geochemistry 56, 347-398.

39. Fonarev, V.I., Graphchikov, A.A., & Konilov, A.N. (1991). A consistent system of geothermometers for metamorphic complexes. *International Geology Review* 33, 743-783.
40. Hinchey, A.M., & Carr, S.D. (2006). The S-type Ladybird leucogranite suite of southeastern British Columbia: Geochemical and isotopic evidence for a genetic link with migmatite formation in the North American basement gneisses of the Monashee complex. *Lithos* 90, 223-248. Doi:10.1016/j.lithos.2006.03.003.
41. Hofmann, A.W. (1988). Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* 90, 297-314.
42. Konilov, A.N., Shchipansky, A.A., Mints, M.V., Dokukina, K.A., Kaulina, T.V., Bayanova, T.B., Natapov, L.M., Belousova, E.A., Griffin, W.L., & O'Reilly, S.Y. (2011). The Salma eclogites of the Belomorian Province, Russia: HP/UHP metamorphism through the subduction of Mesozoic oceanic crust. In: *Ultrahigh-Pressure Metamorphism. 5 Years After the Discovery of Coesite and Diamond* (eds Dobrzhenetskaya, L.F., Faryad, S.W., & Wallis, S.), pp. 623-670. Elsevier.
43. Korhonen, F.J., Saito, S., Brown, M., Siddoway, C.S. & Day, J.M.D. (2010b). Multiple generations of granite in the Fosdick Mountains, Marie Byrd Land, West Antarctica: Implications for 170 Myr phaser intracrustal differentiation in a continental margin setting. *Journal of Petrology*, 51, 627-670.
44. Korsakov, A.V., Shatsky, V.S., Sobolev, N.V., & Zayachkovsky, A.A. (2002). Garnet-biotite-clinzoisite gneisses: a new type of diamondiferous metamorphic rocks of the Kokchetav massif. *European Journal of Mineralogy* 14, 915-929.
45. Korsakov, A.V., Theunissen, K., Kozmenko, O.A., & Ovchinnikov Yu.I. (2006). Reaction textures in clinzoisite gneisses. *Russian Geology and Geophysics* 47 (4), 497-510.
46. McCarthy, T.C., Patiño Douce, A.E. (1998). Empirical calibration of the silica-Ca-tschermak's-anorthite (SCAN) geobarometer. *Journal of Metamorphic Geology* 6, 671-682.
47. Mints, M.V., Belousova, E.A., Konilov, A.N., Natapov, L.M., Shchipansky, A.A., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., Dokukina, K.A., & Kaulina, T.V. (2010). Mesozoic subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia. *Geology* 38 (8), 739-742. doi: 10.1130/G31219.1
48. Mints, M.V., Dokukina, K.A., & Konilov, A.N. (2014). The Meso-Neozoic Belomorian eclogite province: Tectonic position and geodynamic evolution. *Gondwana Research* 25, 561-584. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2012.11.010>
49. Mints, M.V., Dokukina, K.A., Konilov, A.N., Philippova, I.B., Zlobin, V.L., Babayants, P.S., Belousova, E.A., Blokh, Yu.I., Bogina, M.M., Bush, W.A., Dokukin, P.A., Kaulina, T.V., Natapov, L.M., Piip, V.B., Stupak, V.M., Suleimanov, A.K., Trusov, A.A., Van, K.V., Zamozhniaya, N.G. 2015. East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 510.
50. Patiño Douce, A. E., (2005). Vapor-absent melting of tonalite at 15 - 32 kbar. *Journal of Petrology* 46, 275-290.
51. Peccerillo, A. & Taylor, S.R. (1976). Geochemistry of Eocene calc-Alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contribution Mineralogy and Petrology* 58, 63-81.
52. Perchuk, A.L., Morgunova, A.A. (2014). Variable P-T paths and HP-UHP metamorphism in a Precambrian terrane, Gridino, Russia: Petrological evidence and geodynamic implications. *Gondwana Research* 25, 614-629.
53. Powell, R. (1985). Regression diagnostic and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revised. *Journal of Metamorphic Geology* 3, 231-243.
54. Ravna, E. J. K., & Roux, M. R. M. (2006). Metamorphic evolution of the Tønsvika Eclogite, Tromsø Nappe - evidence for a new UHPM province in the Scandinavian Caledonides. *International Geology Review* 48, 861-881.
55. Rushmer, T. (1991). Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid-absent conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 107, 41-59.
56. Sawyer, E.W. (1987). The role of partial melting and fractional crystallization in determining discordant migmatite leucosome compositions. *Journal of Petrology* 28, 445-73.
57. Shand, S. J. (1949). *Eruptive Rocks*. New York: Wiley. 488 pp.
58. Schmidt, M.W., Poli, S. (2004). In: Liebscher, A., Franz, G. (Eds.), *Epidotes. Magmatic epidote. Review in Mineralogy and Geochemistry* 56, 399-430.
59. Skjerlie, K. P., Johnston, A. D. (1992). Vapour-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: implication for the generation of A-type granites. *Geology* 20, 263-266.
60. Skjerlie, K. P. & Patiño Douce, A. E. (2002). The fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 1.0 to 3.2 GPa; implications for melting in thickened continental crust and for subduction zone processes. *Journal of Petrology* 43, 291-314.
61. Skjerlie, K. P., Patiño Douce, A. E., & Johnston, D. A. (1993). Fluid absent melting of a layered crustal protolith: implications for the generation of anatectic granites. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 114, 365-378.
62. Skjerlie, K. P. & Patiño-Douce, A. E. (1995). Anatexis of interlayered amphibolite and pelite at 10 kbar: effect of diffusion of major components on phase-relations and melt fraction. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 122, 62-78.
63. Solar, G.S., & Brown, M. (2001a). Deformation partitioning during transpression in response to Early Devonian oblique convergence, northern Appalachian orogen, USA. *Journal of Structural Geology* 23, 1043-1065.
64. Solar, G.S., & Brown, M. (2001b). Petrogenesis of migmatites in Maine, USA: possible source of peraluminous leucogranite in plutons? *Journal of Petrology* 42, 789-823.
65. Sun, S.S., McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: (Saunders, A.D., Norry, M.J., Eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications 42, pp. 313-345.
66. Thompson, A. B. (1982). Dehydration melting of pelitic rocks and the generation of H₂O

- undersaturated granitic liquids. *American Journal of Science* **282**, 1567–1595.
67. Vielzeuf, D. & Schmidt, M. W. (2001). Melting relations in hydrous systems revisited: application to metapelites, metagreywackes and metabasalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **141**, 251–267.
 68. Waters, D.J. (2001). The significance of prograde and retrograde quartz-bearing intergrowth microstructures in partially-melted granulite-facies rocks. In: Kriegsman, L. (ed.) Prograde and retrograde processes in crustal melting. *Lithos* **56**, 97–110.
 69. Watkins, J., Clemens, J. & Treloar, P. (2007). Archaean TTGs as sources of younger granitic magmas: melting of sodic metatonalites at 0.6–1.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **154**, 91–110.
 70. White, R.W., & Powell, R. (2010). Retrograde melt-residue interaction and the formation of near-anhydrous leucosomes in migmatites. *Journal of Metamorphic Geology* **28**, 579–597. doi:10.1111/j.1525-1314.2010.00881.x.
 71. Whitney, D.L., Evans, B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Am Mineral* **95**, 185–187.
 72. Winther, K. T. (1996). An experimentally based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts. *Chemical Geology* **127**, 43–59.
 73. Wolf, M. B. & Wyllie, P. J. (1994). Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **115**, 369–383.



GRANITE MELTS FORMING IN HIGH-PRESSURE CONDITIONS (BELOMORIAN ECLOGITE PROVINCE, EASTERN FENNOSCANDIAN SHIELD)

Dokukina K.A.

PhD in Geology, Senior Researcher,
Geological Institute of RAS, Moscow, Russia

e-mail: dokukina@mail.ru

Abstract: The eclogites exposed along northeastern boundary of the Belomorian orogen in the eastern Fennoscandian Shield were formed as a result of Mesoarchean–Neoarchean subduction and collision. The ultrahigh-pressure and high-pressure association of Gridino rocks consists of TTG gneisses with interlayers, fragments and dykes of mafic–ultramafic rocks. The Neoarchean decompression of high-pressure rocks was accompanied by TTG partial melting. The reaction structures in migmatites make it possible to trace variation of PT parameters during transfer of rocks from the peak eclogite-facies conditions to the conditions of high-pressure granulite facies (10–13 kbar, 800–850°C). Studied migmatites are related to the boundaries between felsic and mafic rocks, which are the most suitable for partial melting, fluid migration, and component diffusion. The initial stage of melting is marked by formation of minimum-melt potassic granitic leucosome that replaces gneiss and percolates mafic rocks. High-pressure garnet- and phengite-bearing leucosome is distinguished by a high Ba content, striking positive Eu and Sr anomalies along with very low concentrations of all other trace elements. The mature stage of melting is represented by small-volume leucogranitic intrusions, which are characterized by high contents of trace elements and negative Eu and Sr anomalies.

Keywords: Belomorian eclogite province, continental crust, eclogite, granulite, partial melting, leucosome, symplectite.

© Докукина К.А., 2017