

на правах рукописи

КОРПЕЧКОВ Денис Иванович

ПЕТРОЛОГИЯ АПОАМФИБОЛИТОВЫХ МИГМАТИТОВ
И СОПРЯЖЕННЫХ МЕТАСОМАТИТОВ ЦЕНТРАЛЬНО-БЕЛОМОРСКОЙ
МАФИЧЕСКОЙ ЗОНЫ, СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ
(на примере Нигрозерской структуры)

Специальность 25 00 04 – петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук



Москва
2008

Работа выполнена в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН)

Научный руководитель:

доктор геол -мин наук, профессор Владимир Леонидович Русинов
(ИГЕМ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор геол -мин наук, профессор Е Н Граменицкий (МГУ)
доктор геол -мин наук Ш К Балтыбаев (ИГГД РАН)

Ведущая организация:

Институт геологии Карельского научного центра РАН

Защита состоится 25 марта 2008 г в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002 122 01 в ИГЕМ РАН по адресу
119017, Москва, Старомонетный пер., д 35

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЕМ РАН

Автореферат разослан 22 февраля 2008 г

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат геол -мин наук

Юдовская М А



Актуальность темы. Проблема становления континентальной коры и образования пород кислого состава является одной из важнейших в петрологии и геологии. Она тесно связана с вопросами образования мигматитов, так как именно в зонах ультраметаморфизма происходит генерация основного количества кислых расплавов. Предложено большое число различных моделей образования мигматитов, и ясно, что мигматиты в природе образуются различными путями (Misch, 1968, Yardley, 1978, Olsen, 1983, Эшуорт, 1988 и многие другие). Однако, критерии, позволяющие отличать друг от друга мигматиты различного происхождения, разработаны недостаточно, в связи с чем остается неясным, какие именно механизмы являются ведущими при образовании мигматитов, а какие имеют второстепенное значение. В частности, ключевыми вопросами для понимания процесса мигматизации являются вопросы о привносе вещества при образовании мигматитовых комплексов (вопрос гранитизации) и об участии в процессе мигматизации расплава, о времени и месте его возможного появления. Разрешению указанных вопросов должно способствовать создание генетических моделей образования отдельных мигматитовых комплексов, так как только на основе обобщения таких частных моделей возможно создание общей петрологической модели мигматизации.

Наиболее интересным представляется процесс образования мигматитов и гранитоидов по породам основного состава. Во-первых, он более точно соответствует понятию первичного, происходящего за счет основных пород, корового гранитообразования, то есть в некоторой степени способен моделировать процесс становления континентальной коры за счет океанической, во-вторых, высокая контрастность по химическому составу между субстратом и новообразованными гранитоидами способствует более четкому выявлению некоторых особенностей образования мигматитов, которые могут быть пропущены при близком составе субстрата и продуктов мигматизации (мигматиты по метапелитам).

Беломорский комплекс Северной Карелии является классическим местом проявления процессов мигматизации и гранитизации. Изучение мигматитов Беломорья имеет длинную историю, начиная с хрестоматийных работ Н.Г. Судовикова. Однако, на фоне многочисленных достижений последнего времени в области изучения структуры и геохронологии Беломорского комплекса, петрология мигматитов изучена недостаточно.

В качестве объекта исследования выбраны апоамфиболитовые мигматиты Нигрозерской структуры, входящей в состав Центрально-Беломорской мафической зоны, во-первых, благодаря широкому проявлению здесь процессов собственно мигматизации, а также сопряженного метасоматоза и гранитообразования, во-вторых, хорошей обнаженности и вскрытости карьером этих образований, что важно при изучении таких сложных пород как мигматиты.

Цели и задачи исследования. Основной целью исследования явилось выявление условий и основных закономерностей образования мигматитов, метасоматитов и гранитоидов Нигрозерской структуры. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) выявление структурных и временных взаимоотношений между различными типами пород Нигрозерской структуры,
 - 2) характеристика химического состава пород Нигрозерской структуры, химического состава и зональности слагающих их минералов,
 - 3) установление P-T параметров и механизмов процесса мигматизации,
 - 4) оценка кислотности-щелочности участвующего в мигматизации флюида,
 - 5) построение непротиворечивой модели формирования изученного комплекса пород.
- Фактический материал и методы исследований.** Полевые материалы собраны автором во время работ 2004–2007 годов. В процессе работы изучено более 200 образцов

пород, использованы данные 60 рентгенофлуоресцентных анализов пород и более 1000 микросондовых анализов минералов

В работе применялся комплекс классических петрографических методов, включающий полевые геологические наблюдения, геологическое картирование, изучение пород в шлифах, методы парагенетического анализа и минеральной термобарометрии, а также современные прецизионные методы изучения состава пород и минералов

Научная новизна работы.

- 1) Проведено систематическое детальное исследование мигматитов и сопутствующих пород Нигрозерской структуры, составлена геологическая карта юго-восточной части структуры, впервые для Нигрозерской структуры выявлена тесная связь процессов мигматизации с тектоническими деформациями и приуроченность наиболее мигматизированных пород к узким протяженным зонам смятия
- 2) Изучены структуры, минеральный и химический состав пород, впервые для мигматитов Центрально-Беломорской мафической зоны рассчитан баланс вещества и установлена неизохимичность процесса мигматизации амфиболитов
- 3) Выявлены особенности химического состава и зональности минералов в различных апоамфиболитовых породах структуры, рассчитаны P-T параметры их формирования
- 5) Установлены минеральные парагенезисы, образованные в результате частичного плавления в открытой системе, перемещения новообразованных расплавов, метасоматоза, предложены конкретные химические реакции образования каждого минерального парагенезиса, предложена модель флюидно-магматического взаимодействия при образовании апоамфиболитовых мигматитов
- 6) Установлено, что апоамфиболитовый комплекс пород Нигрозерской структуры содержит минеральные парагенезисы, образованные при различной кислотности-щелочности равновесного флюида, обоснована связь этого явления с дифференциацией флюида в зонах сдвиговых деформаций

Защищаемые положения.

1 Мигматизация амфиболитов Нигрозерской структуры происходила синхронно с тектоническими деформациями и максимальное развитие получила в узких и протяженных линейных зонах смятия

2 Мигматизация в пределах Нигрозерской структуры имела неизохимический характер и происходила с привнесом в систему SiO_2 . На ранних этапах мигматизация сопровождалась выносом K, на поздних – выносом Na и привнесом K. Из малых элементов в систему привносились Ti, Mn, P, Y, Zr и, на позднем этапе, Ba, выносились Sr и, на позднем этапе, Sr

3 Образование апоамфиболитовых мигматитов Нигрозерской структуры представляет собой сложный петрогенетический процесс, включающий частичное плавление амфиболитов в открытой системе, флюидно-магматическое взаимодействие расплавов и фильтрующихся сквозь них флюидов, перемещение новообразованных гранитоидных расплавов, их кристаллизацию и последующее субсолидусное метасоматическое преобразование реститов и гранитоидов

4 Минеральные парагенезисы апоамфиболитовых пород образовались при различной кислотности-щелочности равновесного флюида, причем наблюдается определенная закономерность в смене этих парагенезисов во времени и пространстве парагенезисы, равновесные с более щелочным флюидом, приурочены преимущественно к периферийным участкам зон смятия и максимальное развитие получили на начальных стадиях процесса мигматизации, парагенезисы, равновесные с более кислым флюидом, в основном связаны с центральными участками зон смятия и максимальное развитие получили на заключительных стадиях образования мигматитов

Практическое значение. Полученные результаты имеют региональное значение и важны для понимания условий гранитизации пород Беломорья. Они могут быть полезны при реконструкции первичного субстрата мигматитов, что важно для региональных геодинамических построений. Предложенная и опробованная в работе методика изучения мигматитов может быть использована для выяснения условий образования и особенностей флюидного режима других мигматитовых комплексов, что может быть использовано при поиске в них полезных ископаемых (керамические и слодоносные пегматиты, камнесамоцветное сырье и др.)

Апробация результатов исследования. Результаты работы докладывались на X всероссийском петрографическом совещании «Петрография XXI века (г Апатиты, 2005), XVI, XVII и XVIII конференциях молодых ученых, посвященных памяти члена-корреспондента АН СССР профессора К О Кратца (г Апатиты, 2005, г Петрозаводск, 2006, г Санкт-Петербург, 2007), научной конференции «Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минералогия» (г Петрозаводск, 2005), XIV, XV и XVI научных чтений памяти профессора И Ф Трусовой (г Москва, 2005, 2006 и 2007 г), VIII Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (г Москва, 2007), Всероссийской научной конференции «Геология и минералогия Кольского региона» и IV Ферсмановской научной сессии (г Апатиты, 2007). По теме диссертации опубликовано 14 работ, из них 1 статья в сборнике и 2 статьи в рецензируемом журнале.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения общим объемом 190 страниц, включает 82 страницы текста, 29 рисунков, 8 таблиц, список литературы из 197 наименований и приложения. Во введении определена актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования. В первой главе обозначена проблема образования мигматитов и сопряженных метасоматитов, изложены современные представления о механизмах мигматизации и гранитизации, уточнена терминология. Во второй главе изложены современные представления о геологии Беломорского подвижного пояса. В третьей главе рассматривается геологическое строение Нигрозерской структуры и приводится петрографическая характеристика разновидностей пород, слагающих эту структуру. Четвертая глава посвящена рассмотрению петрохимии пород структуры, а пятая – особенностей химического состава минералов этих пород. В шестой главе предлагается геологическая модель формирования апоамфиболитовых пород Нигрозерской структуры. В седьмой приведен анализ парагенезисов пород и конкретных химических реакций их образования и сделаны выводы о физико-химических условиях образования мигматитов. В приложении приведены анализы пород и минералов Нигрозерской структуры, полученные в ходе исследования.

Благодарности. Настоящее исследование проводилось под руководством д.г.-м.н., профессора Владимира Леонидовича Русинова в Лаборатории физико-химического анализа эндогенных процессов ИГЕМ РАН. Большую помощь и всестороннюю поддержку на всех этапах исследования автору оказал заведующий этой лабораторией Л Я Аранович, а также сотрудники В М Козловский, И Т Расс, Н С Серебряков. Отдельные аспекты данной работы обсуждались с С С Абрамовым, В Ю Герасимовым, И А Зотовым, С П Кориковым, Т Л Лариковой, Н Н Перцевым, О Ю Плутинской (ИГЕМ РАН), а также П.Я Азимовым, Д В Доливо-Добровольским (ИГГД РАН), Т Ю Должанской, С В Ежовым (РГГРУ) В В Травиным (Институт геологии КарНЦ РАН). Рентгенофлюоресцентный анализ пород произведен в лаборатории ИГЕМ РАН А И Якушевым и Т М Марченко, микронзондовые анализы – Е В Гусевой, Н Н Коротаевой, В О Япаскуртом (МГУ), К В Ваном (ИЭМ, г Черноголовка), Н Н Кононковой (ГЕОХИ РАН), С Е Борисовским и Л О Магазиной (ИГЕМ РАН). Всем перечисленным коллегам автор чрезвычайно признателен за помощь.

Используемые в работе условные обозначения минералов Bt – биотит, Crx – клинопироксен, Grt – гранат, Hbl – амфибол, Mc – микроклин, Ms – мусковит, Pl₃₀ – плагиоклаз и его номер, Qtz – кварц

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Беломорский комплекс или Беломорский подвижный пояс (БПП) в современном понимании представляет собой сложное покровно-складчатое сооружение, в составе которого выделяются архейские (2,8–2,9 млрд лет) супракрустальные образования – Чупинский парагнейсовый комплекс (чупинская свита в прежнем понимании), Центрально-Беломорский зеленокаменный пояс (мафическая зона) и Северо-Карельская система зеленокаменных поясов (на границе БПП и Карельского кратона), а также инфракрустальные образования, в основном представленные архейскими (2,6–2,8 млрд лет) гранитоидами (комплекс пород тоналит-гранодиоритово-гранодиоритовой (ТГГ-) ассоциации, или комплекс гранитогнейсов) Выделяются также протерозойские основные породы тн друзитового комплекса (2,45–2,1 млрд лет) и комплекс свекофенских (с возрастом около 1,8 млрд лет) пегматитов и сопряженных метасоматитов (Ранний докембрий, 2005, Слабунов и др., 2005 и др.)

Нигрозерская структура входит в состав Центрально-Беломорской мафической зоны, или Центрально-Беломорского зеленокаменного пояса (рис 1), который рассматривается как реликт древней океанической коры архейского возраста (Степанов, Слабунов, 1989, Слабунов и др., 2005) Нигрозерская структура расположена на границе Карелии и Мурманской области, имеет синформное строение, размеры в поперечнике – около 7 x 4 км (Щербакова, Куклей, 1984) Сложена преимущественно амфиболитами, в той или иной степени мигматизированными и подверженными метасоматическим изменениям, включает отдельные небольшие (до первых сотен метров поперечником) линзовидные тела метаморфизованных ультраосновных пород, в настоящий момент представленных карбонат-антофиллит-хлорит-актинолитовыми породами с серпентином, ортопироксеном, оливином, шпинелью, реже – с роговой обманкой и гранатом, а также отдельные небольшие тела основных пород друзитового комплекса

Амфиболиты и апоамфиболитовые породы ядра Нигрозерской структуры окаймлены породами кислого состава, ранее описанными ТФ Щербаковой (Щербакова, Куклей, 1989, Щербакова, 1988) как мигматиты, а в современных схемах строения БПП относящимися к комплексу пород ТГГ-ассоциации, или комплексу гранитогнейсов (Ранний докембрий, 2005, Слабунов и др., 2005) Структурные соотношения амфиболитов и гранитогнейсов сложные В ряде случаев контакты резкие и согласные, возможно – залеченные тектонические, однако в большинстве случаев на контакте возникает зона, мощностью от первых метров до первых десятков метров, представленная тонким чередованием полос амфиболитов и гранитогнейсов Гранитогнейсы сами по себе являются породами неоднородными и представляют собой мигматиты, лейкосомы которых по составу отвечают лейкократовым гранитам, а меланосомы – более меланократовым гранитоидам вплоть до гранодиоритов и тоналитов Согласно современным представлениям, гранитогнейсы имеют первично интрузивное происхождение, затем были подвержены метаморфизму и мигматизации

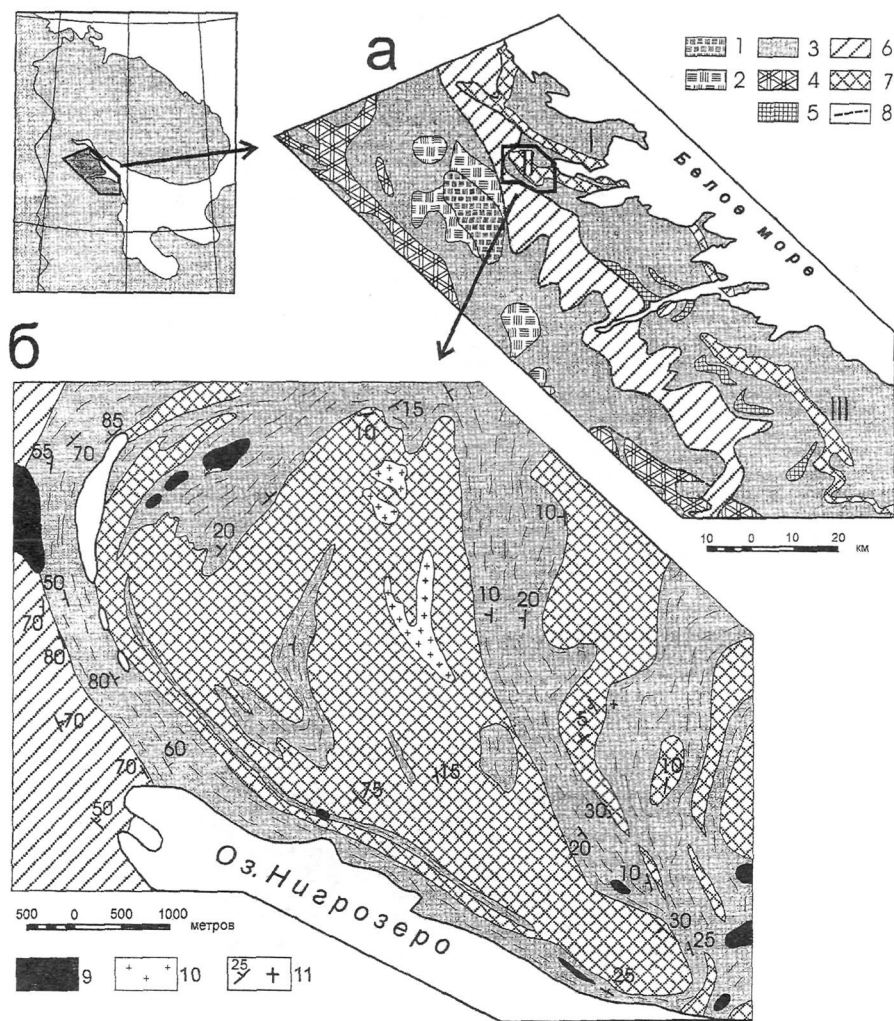


Рис. 1а - положение Центрально-Беломорской мафической зоны и отдельных ее фрагментов (I-III) в структуре Северной Карелии (по В.С. Степанову и А.И. Слабунову - цит. Бибикова и др., 1999). 1 - 3 - инфракрупные образования: 1 - интрузивные чарнокиты; 2 - интрузивные эндербиты; 3 - породы тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ-) ассоциации; 4 - 7 - позднearerхские супракрупные образования: 4 - вулканогенные и осадочные образования Северо-Карельской системы зеленокаменных поясов; 5 - амфиболиты (метабазальты) с прослоями парагнейсов; 6 - парагнейсы с редкими прослоями амфиболитов (Чупинский парагнейсовый пояс); 7 - амфиболиты (метабазальты) и метаультрамафиты Центрально-Беломорской мафической зоны (зеленокаменного пояса), I - Серяско-Картешский, II - Нигрозерский, III - Лоухскоозерско-Пиземский фрагменты; 8 - предполагаемые надвиги.

б - схема геологического строения Нигрозерской структуры (по Т.Е. Щербаковой и Л.Н. Куклею, 1984, с изменениями). 9 - тела основных и ультраосновных пород (метаультрабазиты и друзиты); 10 - гранит-аплиты; 11 - элементы залегания сланцеватости (наклонное, горизонтальное). Остальные условные обозначения - см. рис. 1а.

Геолого-петрографическое описание апоамфиболитовых пород центральных частей структуры. Амфиболиты центральных частей Нигрозерской структуры претерпели значительные изменения при мигматизации и сопряженном метасоматозе, что обусловило здесь значительное петрографическое разнообразие пород, однако детальные наблюдения позволяют среди этого разнообразия выделить несколько устойчивых петрографических типов пород (табл. 1).

Исходные, или неизменные амфиболиты. Сложены преимущественно плагиоклазом и амфиболом, содержат до 10 % граната, клинопироксена, кварца. Для пород характерны мелко-среднезернистые структуры, весьма однородные массивные или слабо выраженные гнейсовидные текстуры. Содержание неизменных амфиболитов среди пород структуры невелико и не превышает 10 %. Они встречаются в виде реликтов среди перекристаллизованных амфиболитов и других пород структуры.

Перекристаллизованные амфиболиты. По фазовому составу идентичны неизменным амфиболитам, но отличаются от них неоднородным строением и количественными соотношениями породообразующих минералов. Можно выделить катаклазированные разности, по составу не отличающиеся от неизменных амфиболитов, но характеризующиеся наличием катакlastических структур, лейкократизированные разности, обогащенные по сравнению с неизменными амфиболитами плагиоклазом и, иногда, клинопироксеном в ассоциации с биотитом или гранатом при уменьшении содержания амфибола, и меланократизированные разности. Среди последних можно выделить разности, преимущественно сложенные амфиболом при невысоких содержаниях граната и плагиоклаза (анхимономинеральные амфиболиты) и разности, обогащенные гранатом (до 40 %) и кварцем и обедненные амфиболом и плагиоклазом. Для обогащенных гранатом разностей характерны порфиробластовые структуры и микроструктуры замещения (рис. 2). Сравнительно редко встречаются окварцованные амфиболиты, по внешнему виду близкие к исходным неизменным амфиболитам, но содержащие небольшое количество новообразованного кварца. Перекристаллизованные амфиболиты пользуются наибольшим распространением в Нигрозерской структуре.

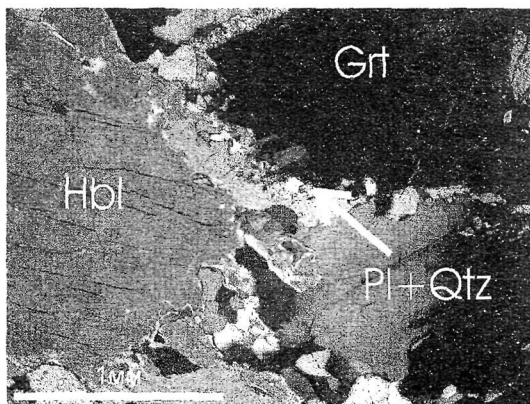


Рис. 2. Структуры замещения в меланократизированных порфиробластовых амфиболитах. Вид в скрещенных николях.

Кварц-гранат-амфиболовые меланократовые породы. Состоят из кварца, граната и амфибола, характерно повышенное содержание титанита (до 5 %); плагиоклаз встречается

Таблица 1 Характеристика пород, слагающих Нигрозерскую структуру

Порода		Локализация	Парагенезисы
Неизменные амфиболиты		реликтовые участки неправильной или будинообразной формы среди других пород	$Hbl + Pl \pm Grt \pm Cpx \pm Qtz$
Перекристаллизованные амфиболиты	катаклазированные	участки неправильной формы с плавными переходами к неизменным амфиболитам (для всех подтипов), меланократовым и лейкократовым породам первого структурного типа (для меланократизированных амфиболитов) и лейкократовым породам первого и, чаще, второго типов (для лейкократизированных амфиболитов)	$Hbl + Pl \pm Grt \pm Cpx \pm Qtz$, меланократизированные породы обогащены Hbl или Grt , лейкократизированные – Pl , окварцованные – Qtz
	лейкократизированные		
	меланократизированные		
	обогащенные амфиболом		
	обогащенные гранатом (порфиробластовые)		
	окварцованные		
Кварц-гранат-амфиболовые меланократовые породы	первого типа	оторочки вокруг жил лейкократовых пород	$Hbl + Grt + Qtz \pm Pl \pm Cpx$
	второго типа	жилы, преимущественно среди перекристаллизованных амфиболитов	$Hbl + Grt + Qtz \pm Pl \pm Cpx$
Гранитоиды (лейкократовые породы)	первого типа	прожилки, жилы, линзообразные тела, тела неправильной амебообразной формы в тесной ассоциации с лейкократовыми породами первого типа	$Pl + Qtz \pm Hbl \pm Bt \pm Cpx$
	второго типа	жилообразные, линзообразные, дайкообразные тела с секущими контактами	$Pl + Qtz + Hbl + Grt, Pl + Qtz + Bt + Grt \pm Mc, Pl + Qtz + Grt \pm Mc, Pl + Qtz + Mc, Mc + Qtz + Ms \pm Pl$
	пегматоидные	небольшие жилы, линзообразные тела	$Pl + Qtz + Bt + Hbl$
Гранат-кварцевые породы		жилы, мелкие прожилки, реже тела неправильной формы	$Grt + Qtz \pm Hbl \pm Pl$
Гранат-клинопироксен-кварц-плагноклазовые породы		участки неправильной формы с плавными переходами к меланократизированным амфиболитам, меланократовым и лейкократовым породам первого типа	$Grt + Cpx + Qtz + Pl$
Биотит-плагноклаз-амфибол-клинопироксеновые породы		линзообразные тела на контакте лейкократовых пород второго типа и неизменных или перекристаллизованных амфиболитов	$Bt + Pl + Hbl + Cpx \pm Qtz$

только в реликтах, часто наблюдаются структуры растворения плагиоклаза и, иногда, амфибола. Можно выделить два типа меланократовых пород. Первый тип – комплементарный лейкократовым породам и слагает меланократовые оторочки вокруг них (мощностью от первых сантиметров до первых десятков сантиметров), часто в ассоциации с меланократизированными амфиболитами. Для меланократовых пород первого типа характерно неоднородное строение: существует тенденция к обособлению кварц-гранатового агрегата с подчиненным количеством амфибола и агрегата, сложенного преимущественно зернами амфибола при подчиненном количестве граната и иногда реликтового плагиоклаза.

Меланократовые породы второго типа слагают отдельные самостоятельные жилы, мощностью от первых сантиметров до десяти сантиметров, чаще всего приуроченные к участкам развития меланократизированных порфиробластовых амфиболитов. Соотношения кварца, амфибола и граната в меланократовых породах второго типа в целом могут варьировать достаточно широко, однако каждая отдельная жила по составу весьма однородна и выдержанна.

Гранитоиды (лейкократовые породы). По структурной приуроченности можно выделить два типа лейкократовых пород.

Породы первого типа слагают небольшие линзообразные тела мощностью первые сантиметры, обычно имеют достаточно крупнозернистые структуры и всегда находятся в окружении меланократовых или меланократизированных пород. Главными минералами являются кварц и плагиоклаз, второстепенными – амфибол и гранат, редко – клинопироксен и биотит.

Породы второго типа слагают отдельные самостоятельные жилы и дайкообразные тела мощностью до нескольких метров и протяженностью в десятки метров. Характерной особенностью этих пород является отсутствие меланократовых оторочек и в основном секущие контакты с вмещающими породами. Главными минералами являются кварц и плагиоклаз, в некоторых разностях большое распространение получает микроклин, который всегда наложенный и развивается за счет плагиоклаза. Темноцветные минералы представлены амфиболом, гранатом, биотитом, редко клинопироксеном, изредка встречается мусковит. Породы крайне неоднородны. Часто встречаются реликты исходных амфиболитов в виде полос или скопления реликтовых зерен амфибола и граната, расположенные цепочками. Собственно лейкократовые породы тоже неоднородны, в них выделяются отдельные полосовидные участки, сложенные различными минеральными парагенезисами, причем в шлифах наблюдается развитие одних парагенезисов по другим. Общий ряд смены парагенезисов лейкократовых пород можно выразить последовательностью $P1 + Qtz + Hbl + Grt \Rightarrow P1 + Qtz + Bt + Grt (\pm Mc) \Rightarrow P1 + Qtz + Grt (\pm Mc) \Rightarrow P1 + Qtz + Mc (\pm Grt) \Rightarrow Mc + Qtz + Ms (\pm P1)$.

В качестве самостоятельной группы лейкократовых пород можно выделить пегматоидные разности (пегматоиды). Они слагают отдельные линзообразные тела мощностью до метра при длине по простиранию в первые метры и характеризуются гигантозернистой структурой, низкими содержаниями темноцветных минералов и высокими содержаниями кварца. Главные минералы представлены плагиоклазом и кварцем, микроклин отсутствует (эта особенность, а также небольшие размеры, отличают пегматоиды Нигрозерской структуры от классических керамических и слюдоносных пегматитов Беломорья, с которыми, по-видимому, рассматриваемые породы не имеют ничего общего).

Гранат-кварцевые породы. Состоят из граната и кварца, приблизительно в равных количествах, часто содержат некоторое количество амфибола и плагиоклаза, которые являются реликтовыми и интенсивно замещаются, в первую очередь, кварцем. Слагают

отдельные жилообразные тела или линзы, реже образуют тонкую сетку мелких прожилков среди вмещающих пород. Могут развиваться как по перекристаллизованным амфиболитам и меланократовым породам (в этом случае содержат реликтовый амфибол и, по сути, представляют собой крайний случай меланократовых пород второго типа), так и по лейкократовым породам (в этом случае характерен реликтовый плагиоклаз).

Гранат-клинопироксен-кварц-плагиоклазовые породы встречаются в небольших количествах, преимущественно среди меланократизированных амфиболитов и меланократовых пород первого типа, часто в ассоциации с лейкократовыми породами первого типа или на контакте их и меланократовых пород. Слагают неправильной формы обособления размером до первых десятков сантиметров в поперечнике. Состоят из граната, клинопироксена, кварца и плагиоклаза, часто содержат некоторое количество амфибола, явно реликтового. Порода очень неоднородна, количественные соотношения между минералами колеблются в значительных пределах. В том случае, если количество плагиоклаза и кварца в породе велико, породы близки к лейкократовым породам первого структурного типа, если, наоборот, преобладают клинопироксен и гранат – к меланократовым породам.

Биотит-плагиоклаз-амфибол-клинопироксеновые, иногда с кварцем, породы встречены в небольших количествах в периферийных частях некоторых жил лейкократовых пород второго структурного типа, где они слагают оторочки мощностью до десяти сантиметров на границе собственно лейкократовых пород и амфиболитов.

Взаимосоотношение всех отмеченных типов пород весьма сложное и часто различное. Неизменные, меланократизированные и лейкократизированные амфиболиты, меланократовые и лейкократовые породы первого типа, изредка в ассоциации с меланократовыми породами второго типа и гранат-кварцевыми породами встречаются в пределах Нигрозерской структуры повсеместно. В то же время, выделяются отдельные достаточно узкие (от нескольких метров до нескольких десятков метров) и протяженные (от первых десятков метров до нескольких сотен метров) зоны, в которых, наряду с другими породами, широкое развитие получают лейкократовые породы второго структурного типа.

Для указанных зон характерно сложное строение и тесная перемежаемость пород различного состава. Лейкократовые породы второго структурного типа, составляющие 20–60 % материала в этих зонах, слагают отдельные небольшие линзо- и жилообразные тела, часто расположенные кулисообразно, иногда связанные друг с другом (рис 3). Между телами лейкократовых пород располагаются отдельные будины и пластообразные тела меланократовых пород. Широко развиты гранат-кварцевые породы. К краевым частям зон количество лейкократового материала постепенно уменьшается, породы становятся более однородными и плавно переходят в породную ассоциацию, характерную для основного объема Нигрозерской структуры (рис 4).

Характерной особенностью указанных зон является существенно более высокая степень деформированности пород в них по сравнению с окружающими породами. В породах зон широко развиты структуры типа будинаж (рис 5а) и так называемые подобные складки (рис 5б), отличительной чертой которых является утонение слоев на крыльях складок (вплоть до полного исчезновения) и утолщение в замках. Складки обычно сильно сжаты и располагаются конгруэнтно, параллельно одна другой. Такие особенности складок позволяют рассматривать их как складки ламинарного течения (Паталаха, 1970). Характерны вязкие разрывы, тесно связанные с морфологией складок, часто параллельные криважу осевой плоскости (см рис 5б). Совокупность отмеченных структур (будинаж, складки ламинарного течения, вязкие разрывы) являются характерными, определяющими

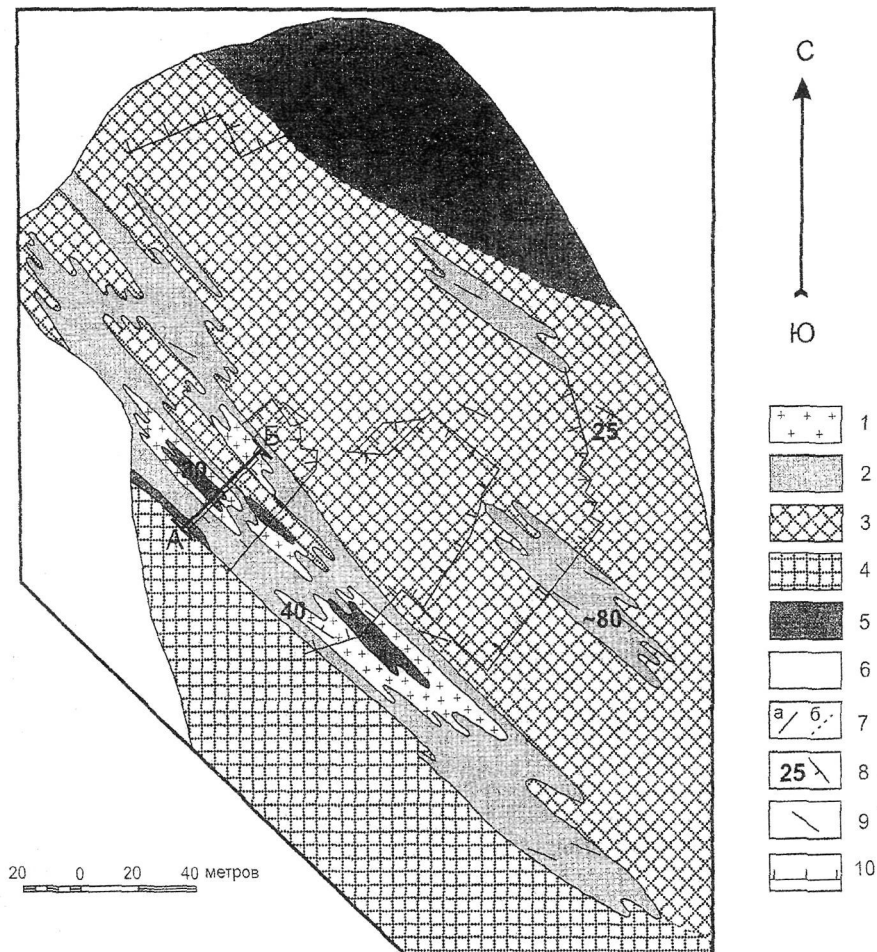


Рис. 3. Схема геологического строения зоны развития лейкократовых пород второго типа, вскрытой Нигрозерским карьером (проекция на первичную, не затронутую разработкой, поверхность).

1 - тела лейкократовых гранитов (лейкократовых пород второго структурного типа); 2 - зоны, сильно обогащенные лейкократовым материалом; 3 - участки с преобладанием лейкократизированных пород, состоящих из отдельных прослоев гранитоидов, меланократовых пород и неизменных амфиболитов; 4 - участки с преобладанием лейкократизированных пород более однородной, по сравнению с предыдущими, текстуры; 5 - участки преимущественного развития меланократизированных пород; 6 - плохо обнаженные участки; 7 - геологические границы: а - установленные, б - предполагаемые; 8-9 - элементы залегания пород: 8 - падение и его угол; 9 - простираение пород в том случае, когда померить падение не удалось; 10 - контуры уступов карьера. А-Б - положение разреза, представленного на рис. 4.

центральные части сдвиговой зоны:
преимущественно лейкократовые
породы второго структурного типа

периферийные части:
неизмененные амфиболиты,
лейкократовые породы
первого структурного типа,
меланократизированные,
меланократовые,
гранат-кварцевые породы

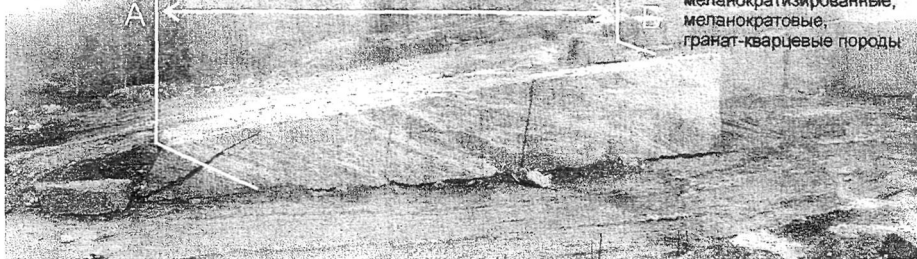
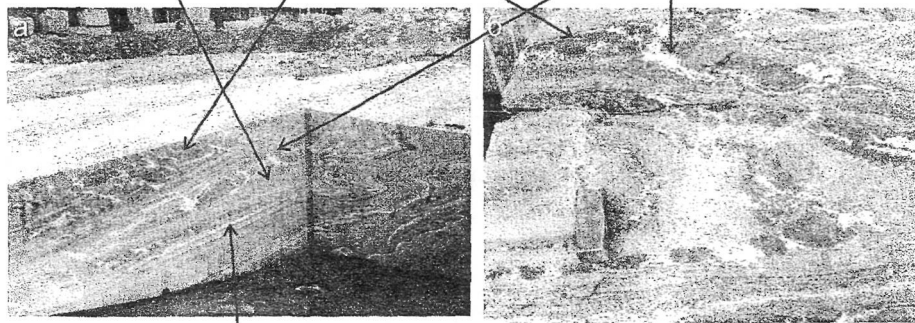


Рис. 4. Строение зоны развития лейкократовых пород второго типа, вскрытой Нигрозерским карьером.

лейкократизированные амфиболиты меланократовые породы первого структурного типа лейкократовые породы первого структурного типа



лейкократовые породы второго структурного типа

Рис. 5. Структуры типа будинаж (а) и подобные складки ламинарного течения (б) в зонах развития лейкократовых пород второго типа. На рис. 5б лейкократовые породы маркируют вязкие разрывы по кливажу в осевых плоскостях складок.

структурами зон смятия (Паталаха, 1970), что позволяет рассматривать зоны развития лейкократовых пород в Нигрозерской структуре как зоны смятия. Наиболее ярко эти зоны проявлены в краевых частях Нигрозерской синформы или приурочены к ее осевой плоскости.

Важно отметить, что временные взаимоотношения одних и тех же петрографических разностей в пределах Нигрозерской структуры часто оказываются различными. Так, например, в одних случаях гранат-кварцевые породы развиваются по лейкократовым породам, в других случаях лейкократовые породы секут гранат-кварцевые, причем иногда и те, и другие взаимоотношения встречаются в пределах одного обнажения. Подобные

соотношения между породами могут возникнуть только в том случае, если вещественные преобразования происходили синхронно с тектоническими деформациями

Изложенное позволяет сформулировать первое защищаемое положение

Мигматизация амфиболитов Нигрозерской структуры происходила синхронно с тектоническими деформациями и максимальное развитие получила в узких и протяженных линейных зонах смятия.

Возраст образования апоамфиболитовых мигматитов Нигрозерской структуры, при отсутствии геохронологических данных, может быть оценен лишь приблизительно, на основе геологических наблюдений. Как известно (Бибикова и др., 2004, Ранний докембрий, 2005 и др.), в Беломорье в настоящий момент выделяются две крупных эпохи мигматитообразования – ребольская (2,6–2,7 млрд лет) и свекофеннская (около 1,8 млрд лет). Мигматиты ребольского этапа имеют в целом площадное распространение, а мигматиты свекофеннского этапа преимущественно приурочены к относительно узким линейным зонам, с которыми связаны поля керамических и слюдоносных пегматитов. Эпохи мигматизации разделены внедрением интрузий основных пород.

Полученные нами данные свидетельствуют скорее в пользу ребольского возраста мигматитов Нигрозерской структуры. Во-первых, мигматиты в Нигрозерской структуре развиты повсеместно, т.е. имеют в целом площадное распространение, хотя и наблюдается максимальная их концентрация в локальных зонах смятия, во-вторых, в Нигрозерской структуре и ее ближайшем окружении неизвестны поля керамических и слюдоносных пегматитов, косвенно могущие указывать на наличие свекофеннской мигматизации в районе, в-третьих, отдельные небольшие тела протерозойских основных пород, встречающиеся среди апоамфиболитовых мигматитов, достаточно интенсивно метаморфизованы, однако не подвержены процессам мигматизации.

Петрохимия пород. Неизменные амфиболиты Нигрозерской структуры по своему составу отвечают базальтам, близким по большинству параметров к базальтам современных срединно-океанических хребтов, однако на некоторых дискриминационных диаграммах (Mullen, 1983, Pearce et al., 1975, 1977) соответствуют островодужным или континентальным базальтам. Содержание кремнезема в этих породах колеблется от 50 до 56,5 мас. %, обычно составляя 50–52 мас. %. Железистость варьирует от 0,48 до 0,56. Суммарное содержание щелочей составляет 3,5–4,5 мас. %. Лейкократизированные амфиболиты по сравнению с неизменными несколько обеднены магнием, железом и кремнием, обогащены глиноземом, кальцием, натрием. Меланократизированные амфиболиты и меланократовые породы по сравнению с исходными амфиболитами обогащены магнием, кальцием, железом и обеднены щелочами. Содержание кремнезема в меланократизированных и меланократовых породах составляет 48–52 мас. %, т.е. оказывается лишь ненамного ниже, чем в неизменных амфиболитах. Лейкократовые породы по сравнению с амфиболитами резко обеднены магнием, железом, сидерофильными и халькофильными элементами, и резко обогащены кремнеземом. Содержание последнего колеблется от 69 до 76 мас. %, в отдельных случаях достигая 84 мас. %. Характерна высокая железистость пород, причем в лейкократовых породах второго структурного типа она существенно больше (0,64 – 0,98), чем в лейкократовых породах первого типа (0,56 – 0,62) и пегматоидах (0,68 – 0,70). Содержания щелочей колеблются в значительных пределах, в основном за счет содержаний калия, причем лейкократовые породы первого структурного типа и пегматоиды характеризуются низкими содержаниями калия, а среди лейкократовых пород второго структурного типа выделяются разности как с низкими содержаниями калия, так и с высокими. Высококалийевые породы отличаются

также высокими содержаниями рубидия и бария. Для гранат-кварцевых пород характерны высокие содержания алюминия и железа, а также кремния, и крайне низкие содержания щелочей. Из редких элементов здесь накапливаются высокозарядные катионы – цирконий, иттрий, ниобий.

Вариации составов минералов и минеральная термобарометрия. Одноименные минералы в различных породах Нигрозерской структуры несколько различны по составу (табл. 2). Так, меланократизированные амфиболиты содержат более магнезиальный амфибол и гранат и более основной плагиоклаз, чем неизменные гранатосодержащие амфиболиты (в не содержащих гранат амфиболитах магнезиальность амфибола выше). Гранат и амфибол из меланократовых пород первого структурного типа по составу оказывается промежуточным между составами одноименных минералов из неизменных и меланократизированных амфиболитов. Для лейкократовых пород характерен более кислый, чем в исходных амфиболитах, плагиоклаз и повышенная железистость темноцветных минералов. Пегматоиды и гранат-клинопироксен-кварц-плагиоклазовые породы характеризуются повышенной основностью плагиоклаза, биотит-плагиоклаз-амфибол-клинопироксеновые – наоборот, пониженной.

Таблица 2. Вариации составов амфибола, граната и плагиоклаза в породах Нигрозерской структуры

Порода		f_{Hf}	f_{Gr}	N_{Hf}
Неизменные амфиболиты и амфиболиты с катакластическими структурами	гранатовые	0,41–0,53	0,79–0,85	26–33
	безгранатовые	0,31–0,38	–	28–37, чаще 28–33
Перекристаллизованные лейкократизированные амфиболиты		0,48–0,52	0,81–0,88, чаще 0,82–0,86	26–32
Перекристаллизованные меланократизированные амфиболиты		0,35–0,48, чаще 0,35–0,43	0,76–0,86, чаще 0,76–0,80	29–43, чаще 35–40
Кварц-гранат-амфиболовые меланократовые породы первого типа		0,35–0,53	0,78–0,84	26–40, чаще 35–40
Гранитоиды (лейкократовые породы) первого типа		0,47–0,52	0,81–0,82	23–34, чаще 25–29
Гранитоиды (лейкократовые породы) второго типа		–	0,80–0,90	23–30, чаще 25–28, редко более кислый
Пегматоиды		0,39–0,44	–	21–38, чаще 34–37
Кварц-гранат-амфиболовые меланократовые породы второго типа		0,34–0,48	0,75–0,84	32–38
Гранат-кварцевые породы		0,47–0,50	0,79–0,85	–
Гранат-диопсид-кварц-плагиоклазовые породы		0,42–0,50	0,77–0,83	31–43, чаще 38–40
Биотит-плагиоклаз-амфибол-клинопироксеновые породы		0,39–0,43	–	22–29, чаще 26–29

Примечание $f = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$

В таблице 3 охарактеризована зональность отдельных зерен минералов в породах Нигрозерской структуры и приведены оценки температур образования этих пород, полученные с помощью системы геотермометров программы GEOPATH (Gerya, Perchuk, 1992) Как видно, температурные оценки образования различных пород варьируют в значительных пределах, причем часто широкие вариации наблюдаются в пределах одного шлифа, что указывает в целом на неравновесный характер минеральных ассоциаций Поэтому полученные цифры во многих случаях оказываются в некоторой степени «виртуальными» Особенно большой разброс значений характерен для температур, оцененных с помощью Fe-Mg равновесия в темноцветных минералах Для амфиболового термометра расхождения несколько меньше по-видимому, это связано с меньшей скоростью диффузии элементов в тетраэдрических позициях по сравнению с позициями с более высоким координационным числом, в связи с чем Hbl-Pl-Qtz термометр дает «замороженные» температуры образования первичных парагенезисов, а Grt-Hbl и Grt-Bt термометры маркируют тренд последующего остывания пород Температуры, оцененные по Grt-Cpx термометру систематически оказываются более высокими, чем оценки температур по другим термометрам, что, по-видимому, связано с особенностями его калибровки Представляется важным отметить в целом ретроградную зональность минералов в большинстве пород Нигрозерской структуры и проградную зональность по Grt-Hbl и Grt-Cpx термометру в меланократизированных амфиболитах, гранат-кварцевых породах и, иногда, меланократовых породах, причем проградная зональность часто оказывается немонотонной Это указывает на сложную историю формирования отмеченных пород и неравновесность их минеральных ассоциаций

Проблема изохимичности процесса образования мигматитов Одна из наиболее часто встречающихся ассоциаций пород Нигрозерской структуры – наличие среди неизменных или слабо перекристаллизованных амфиболитов обособлений меланократовых и лейкократовых пород первого структурного типа, причем часто существуют постепенные переходы между меланократовыми породами первого типа и меланократизированными, в том числе порфиробластовыми, амфиболитами Это наводит на мысль, что меланократовые и меланократизированные породы, с одной стороны, и лейкократовые породы первого структурного типа, с другой, комплементарны друг другу и образовались при дифференциации вещества исходного, неизмененного амфиболита В пользу того, что именно неизменные амфиболиты явились исходным субстратом для образования мигматитов свидетельствуют, во-первых, структурно-текстурные особенности неизмененных амфиболитов (однородные структуры, массивные или гнейсовидные текстуры), во-вторых, достаточно монотонная ретроградная зональность минералов в них, в то время как в меланократизированных и меланократовых породах зональность минералов сложная и в большинстве случаев проградная Лейкократовые породы второго структурного типа в некоторой степени также могут быть продуктами дифференциации вещества исходных амфиболитов, так как в ряде случаев наблюдаются постепенные переходы между лейкократовыми породами первого и второго типов

Важно отметить, что лейкократовые породы по сравнению с неизмененными амфиболитами сильно обогащены кремнеземом, в то время как меланократовые породы по содержанию кремнезема оказываются близки к неизмененным амфиболитам Это может указывать на неизохимичность процесса мигматизации

Был рассчитан баланс вещества при образовании мигматитов

Дифференциация вещества для каждого i -го элемента может быть описана уравнением

$a_i L_i + (1 - a_i) M_i = A_i$, где a_i – доля лейкократового компонента (лейкосома, лейкократовая порода), $1 - a_i$ – доля меланократового компонента (меланосома,

Таблица 3 Зональность минералов и оценки температур их возможного образования для пород Нигрозерской структуры

Порода	Зональность зерен минералов от центра к краю	Оценки температур образования пород (в °С)			
		Термометр	Центры зерен	Края зерен	Температурная зональность
Неизменяемые амфиболиты и амфиболиты с катакластическими структурами	Hbl уменьшение Na+K _{общ.} по f и al зональность различная, Grt увеличение f, Cpx уменьшение f, N _{pl} меняется слабо и различным образом	Grt-Hbl	595–635	560–635, чаще 580–600	Слабовыраженная, чаще ретроградная
		Grt-Cpx	700–735	675–705	Ретроградная
		Hbl-Pl-Qtz	630–665, чаще 640–650	595–675, чаще 630–650	Слабовыраженная, чаще ретроградная
Перекристаллизованные лейкократизированные амфиболиты	Hbl уменьшение Na+K _{общ.} по f и al зональность различная, Grt увеличение f, Cpx зональность проявлена слабо и различно, N _{pl} обычно слегка увеличивается	Grt-Hbl	535–640, чаще 620–635	530–625, чаще 560–600	Ретроградная
		Grt-Cpx	600–745, чаще 680–745	640–695	Ретроградная
		Grt-Bt	620–645	590–625, чаще 590–605	Ретроградная
		Hbl-Pl-Qtz	640–655, чаще 640–645	635–645	Слабовыраженная
Перекристаллизованные меланократизированные амфиболиты	Hbl зональность различная в разных зернах, Grt в целом – уменьшение f, иногда с некоторым ростом в промежуточной зоне и резким увеличением на самом краю, Cpx уменьшение f, N _{pl} чаще уменьшается	Grt-Hbl	550–590	575–660, чаще 580–620, на самом краю – 575–495	Проградная и на самом краю зерен – ретроградная
		Grt-Cpx	680–700	700–750	Проградная
		Hbl-Pl-Qtz	600–645, чаще 620–640	610–665, чаще 615–655	Различная
Кварц-гранат-амфиболовые меланократовые породы первого типа	Hbl зональность сложная и различная в разных зернах, Grt f увеличивается, но не всегда монотонно, N _{pl} не меняется или уменьшается	Grt-Hbl	560–655, чаще 600–620	505–680, чаще 520–620	Различная, чаще ретроградная
		Hbl-Pl-Qtz	620–660, чаще 630–650	600–680, чаще 620–655	Слабовыраженная, различная по направленности
Гранитоиды (лейкократовые породы) первого типа	Hbl al обычно уменьшается, по остальным параметрам зональность различная в разных зернах, Grt f обычно слабо увеличивается, N _{pl} не меняется или увеличивается на 1–4 номера	Grt-Hbl	625–650	600–630, редко до 645	Ретроградная
		Grt-Bt	665–670	650–655	Ретроградная
		Hbl-Pl-Qtz	645–655	630–650, чаще 645–650	Ретроградная

Таблица 3 Продолжение

16

Порода	Зональность зерен минералов от центра к краю	Оценки температур образования пород (в °С)			
		Термометр	Центры зерен	Края зерен	Температурная зональность
Гранитоиды (лейкократовые породы) второго типа	Grt f не меняется или слегка увеличивается, N _{Pl} – чаще увеличивается на 1–2 номера, Mc содержания Ва уменьшаются, зональность по Na и Ca неотчетливая и различная	Grt-Bt	600–700, чаще 650–695, в отдельных шлифах колеблется в узких, интервалах	595–695, чаще 595–665, в отдельных шлифах колеблется в узких интервалах	Ретроградная, иногда слабовыраженная
Пегматоиды	Hbl зональность сложная и различная в разных зернах, N _{Pl} не меняется или уменьшается к краю на 1–2 номера, редко меняется более сложным образом	Hbl-Pl-Qtz	630–640	630–640	Слабовыраженная, чаще ретроградная
Кварц-гранат-амфиболовые меланократовые породы второго типа	Hbl зональность различная в разных зернах, Grt f от центра к краю сначала уменьшается, затем – увеличивается, N _{Pl} (реликтового) не меняется или уменьшается	Grt-Hbl	570–670, чаще 625–655	565–645, чаще 565–625	Различная, чаще ретроградная
		Hbl-Pl-Qtz	620–650, чаще 635–650	630–655, чаще 635–655	Слабовыраженная, различная по направленности
Гранат-кварцевые породы	Hbl (реликтовый) зональность различная в разных зернах, Grt f уменьшается, часто сложно	Grt-Hbl	575–595	635–655	Проградная
Гранат-клинопироксен-кварц-плаггиоклазовые породы	Hbl f растет, al и Na+K _{общ} практически не меняются, Grt рост f, иногда сложно, Cpx уменьшение f, N _{Pl} – увеличивается	Grt-Hbl	595–615	555–615	Ретроградная
		Grt-Cpx	700–770, чаще 730–760	640–710	Ретроградная
		Hbl-Pl-Qtz	620–635	620–655	Неясная
Биотит-плаггиоклаз-амфибол-клинопироксеновые породы	Hbl f меняется слабо, al и Na+K _{общ} уменьшаются, Cpx зональность различная в разных зернах, N _{Pl} увеличивается на 1–6 номеров	Hbl-Pl-Qtz	625–640, чаще 635–640	605–625, чаще 615–625	Ретроградная

Примечания f = Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg), al = Al^{IV}/(Al^{IV}+Si), N_{Pl} – номер плаггиоклаза. Оценки температур по Grt-Bt и Grt-Cpx термометрам сделаны для 7 кбар – давления метаморфизма Беломорского комплекса (Ранний докембрий, 2005). Grt-Bt термометр – с учетом поправки на Mn (Перчук, 1981), Grt-Cpx (Krogh, 1988), Grt-Hbl (Perchuk, 1990), Hbl-Pl-Qtz (Gerya et al, 1997)

меланократовая порода), L_i – содержание того или иного элемента (оксида) в лейкократовой породе, M_i – его содержание в меланократовой породе, A_i – его содержание в исходном амфиболите. Число уравнений равно числу определенных элементов (оксидов), по которым рассчитывается баланс вещества

Исходя из данного уравнения, имеем

$$a_i = (A_i - M_i) / (L_i - M_i)$$

В том случае, если меланосома и лейкосома образовались за счет дифференциации вещества исходного амфиболита, параметр a имеет значения от 0 до 1 и совпадает (в пределах ошибки) для всех уравнений по всем элементам (или их оксидам) ($a_i = a_{Si} = a_{Al} = a_i$). Если для какого-либо элемента $a < 0$ или $a > 1$, образование лейкосома и меланосома путем дифференциации исходной породы невозможно в принципе. В том случае, если a для разных элементов сильно отличаются, также можно предполагать образование мигматитов в открытой системе. Небольшие отличия a , полученные для разных элементов, могут быть связаны с неточностью опробования или аналитической ошибкой.

Баланс вещества был рассчитан для двух случаев: в первом случае расчет производился с использованием средних составов неизмененных амфиболитов (А), меланократизированных амфиболитов и меланократовых пород первого структурного типа (М) и лейкократовых пород первого структурного типа (L), во втором случае L рассчитывалось как средний состав лейкократовых пород обоих структурных типов и пегматоидов. Первый случай расчета отражает баланс вещества на начальных стадиях мигматизации, второй – баланс вещества для всего процесса преобразования амфиболитов в целом. В обоих случаях расчета (Корпечков, 2008) значения a для большинства элементов значительно различаются, однако при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ происходит существенное перекрытие доверительных интервалов значений a . При $\alpha = 0,80$ перекрытие значительно меньше. В силу этого в работе мы использовали доверительную вероятность $\alpha = 0,80$. Это придало выводам в значительной степени вероятностный характер, однако их конкретизировало.

Таким образом, на основании оценки a , с высокой долей вероятности можно утверждать, что меланократовые и меланократизированные породы Нигрозерской структуры, с одной стороны, и лейкократовые породы, с другой, не могли образоваться путем простой дифференциации вещества исходных амфиболитов в закрытой системе, т.е. их становление происходило в открытой системе с привносом – выносом вещества.

Расчет привноса – выноса вещества при мигматизации обычно производится исходя из допущения равенства объемов, либо инертного поведения алюминия, кислорода или титана (Олсен, 1988). Поскольку мигматизация, по всей вероятности, всегда сопровождается тектоническими деформациями, допущение о равенстве объемов представляется некорректным. Инертное поведение кислорода и титана часто также сомнительно, поэтому наиболее правильным представляется расчет при допущении инертного поведения алюминия. К сожалению, содержание алюминия в породе характеризуется весьма значительным среднеквадратическим отклонением, поэтому расчеты с использованием алюминия носят полуквантитативный характер.

На рис. 6а показан баланс вещества при мигматизации (для первого случая расчета) на примере породообразующих элементов при условии инертного поведения алюминия (точнее, его оксида) (в этом случае количество лейкократового материала находится как a_{Al} , меланократового – как $1 - a_{Al}$), и, исходя из содержаний меланократового и лейкократового материала, рассчитываются количества каждого i -го элемента в мигматите (ось абсцисс $(L + M)_i = a_{Al} L_i + (1 - a_{Al}) M_i$), по оси ординат откладывается содержание элемента в исходном амфиболите. Когда лейкосома и меланосома образуются без

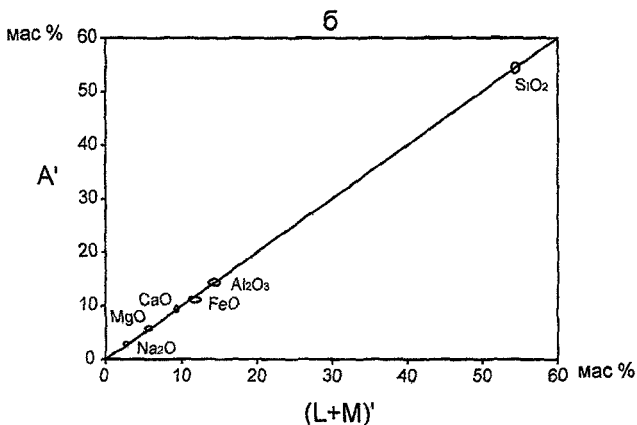
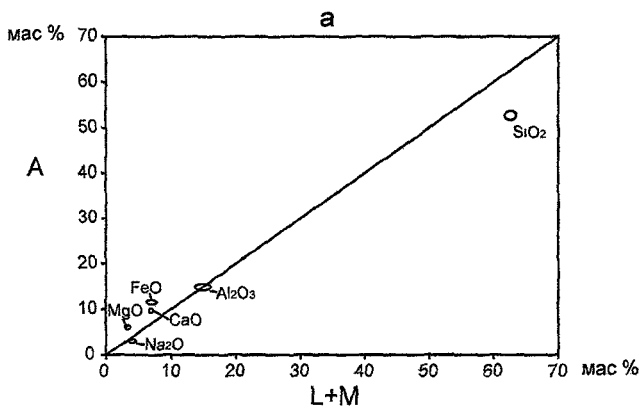


Рис 6 Баланс вещества при мигматизации (привнос–вынос компонентов) для первого случая расчета (на примере породообразующих элементов с высокими содержаниями) при условии инертного поведения алюминия без учета привнесенного кремнезема (а) и с учетом его (б)

привноса какого-либо элемента, точка, соответствующая этому элементу, лежит на диагонали. Если точка расположена выше диагонали, элемент при мигматизации выносится, ниже – привносится. Эллипс вокруг точки ограничивает доверительный интервал значения при $\alpha = 0,80$

Как видно из рисунка, для большинства элементов при мигматизации требуется привнос или вынос. При этом следует иметь в виду, что если привнос или вынос компонентов с невысокими содержаниями практически не смещает балансовых оценок по другим компонентам, то в случае их высоких содержаний (в первую очередь это касается кремнезема) балансовые оценки могут сместиться. Особенно наглядно это видно во втором случае расчета баланса здесь содержание оксида алюминия как в лейкократовой, так и меланократовой частях оказывается ниже, чем в исходном амфиболите, поэтому

составы мигматитов можно получить только при добавлении в исходный амфиболит кремнезема

В первом приближении количество привнесенного кремнезема можно оценить, приравняв новые, рассчитанные с учетом привноса кремнезема, коэффициенты a' глинозема и кремнезема

$$a'_{Si} = a'_{Al}$$

$$\text{где } a'_{Si} = (A'_{Si} - M_{Si}) / (L_{Si} - M_{Si}), \quad a'_{Al} = (A'_{Al} - M_{Al}) / (L_{Al} - M_{Al}),$$

$$A'_{Si} = (A_{Si} + {}^+Si) / (100 + {}^+Si) \cdot 100, \quad A_{Al} = A_{Al} / (100 + {}^+Si) \cdot 100,$$

где ${}^+Si$ – количество привнесенного кремнезема, A'_{Si} и A'_{Al} – соответственно, содержание оксидов кремния и алюминия в «разбавленном» кремнеземе исходном амфиболите, A_{Si} , L_{Si} , M_{Si} , A_{Al} , L_{Al} , M_{Al} – содержание оксидов кремния и алюминия в исходном амфиболите (A), лейкократовой породе (L) и меланократовой породе (M) Отсюда

$${}^+Si = (100 \cdot M_{Si} - 100 \cdot (L_{Si} - M_{Si}) / (L_{Al} - M_{Al}) \cdot M_{Al} - 100 \cdot A_{Si} + 100 \cdot (L_{Si} - M_{Si}) / (L_{Al} - M_{Al}) \cdot A_{Al}) / (100 - M_{Si} + (L_{Si} - M_{Si}) / (L_{Al} - M_{Al}) \cdot M_{Al})$$

Подставляя известные значения A_{Si} , L_{Si} , M_{Si} , A_{Al} , L_{Al} , M_{Al} , получаем ${}^+Si$ в первом случае расчета баланса 3,79 мас %, во втором – 7,13 мас %. Таким образом, привнос кремнезема не очень велик, однако он существенно смещает баланс по всем другим элементам, в результате чего большинство элементов на графиках $(L+M)' - A'$ оказываются лежащими на диагонали, соответствующей изохимической мигматизации (пример такого баланса для породообразующих оксидов с высокими содержаниями для первого случая расчета показан на рис 6б)

Как следует из проведенных вычислений, в первом случае расчета привнос в систему требуется для TiO_2 , MnO и P_2O_5 , незначительный – для Y и Zr , вынос – для K и Cr , во втором случае расчета – привнос для TiO_2 , MnO , K_2O , P_2O_5 , Zr , Y и Ba , вынос – для Sr и Cr , в незначительной степени – для Na_2O . Привнос и вынос этих элементов теоретически также будет смещать найденные нами оценки для привноса кремнезема, однако крайне незначительно

Изложенный материал позволяет сформулировать второе защищаемое положение

Мигматизация в пределах Нигрозерской структуры имела неизохимический характер и происходила с привносом в систему SiO_2 . На ранних этапах мигматизация сопровождалась выносом K , на поздних этапах – выносом Na и привносом K . Из малых элементов в систему привносились Ti , Mn , P , Y , Zr и, на позднем этапе, Ba , выносились Cr и, на позднем этапе, Sr .

Проблема участия в процессе мигматизации расплава и геологическая модель формирования апоамфиболитовых пород Нигрозерской структуры

Рассмотренная выше дифференциация вещества исходного амфиболита на лейкосому и меланосому в условиях привноса кремнезема возможна при частичном плавлении амфиболита, однако она может происходить и в субсолидусе, при метаморфической дифференциации породы. В случае частичного плавления лейкосома представляет собой отжатый застывший расплав, в случае метаморфической дифференциации лейкосома образовывалась за счет переотложения вещества исходного амфиболита из флюидной фазы в областях сброса давления (например, в открытых трещинах). Информацию о том, какой механизм реализовывался, могут дать составы минералов лейкосомы и меланосомы мигматитов

Как показывают экспериментальные данные (Ходоревская, 2006 и др.) при частичном плавлении амфиболитов темноцветные минералы рестита – амфиболы, гранаты – обогащаются магнием по отношению к железу, а магнезиальность расплавов, наоборот, оказывается ниже, чем магнезиальность исходных пород Плаггиоклаз реститов обогащается анортитовой составляющей за счет преимущественной экстракции натрия в расплав

Растворимость различных минералов во флюиде сильно зависит от состава флюида и экспериментально изучена еще достаточно слабо, однако некоторые данные по взаимодействию амфиболитов с флюидами (Ходоревская, 2006), равновесными с гранитом (т.е. флюидами, насыщенными кремнеземом, что и наблюдается в случае пород Нигрозерской структуры) показывают, что темноцветные минералы амфиболитов при таком взаимодействии обогащаются железом за счет преимущественной экстракции флюидом магния, т.е. тенденция взаимодействия темноцветный минерал – флюид оказывается обратной тому, что наблюдается при частичном плавлении амфиболита

Систематическое увеличение магнезиальности темноцветных минералов меланократизированных амфиболитов по сравнению с одноименными минералами неизмененных амфиболитов, наличие в меланократизированных амфиболитах более основного, чем в неизменных амфиболитах плаггиоклаза, наличие в этих породах структур замещения и постоянное соседство этих пород с лейкократовыми породами, плаггиоклаз в которых оказывается более кислым, чем в исходных амфиболитах, очевидно указывает на то, что меланократизированные амфиболиты являются реститами, а сопряженные лейкократовые породы – застывшими расплавами, возникшими при частичном плавлении исходных амфиболитов. В пользу существования расплава в системе говорят также структурно-текстурные особенности апоамфиболитовых мигматитов: увеличение степени деформированности пород при появлении лейкократового материала, аккумуляция лейкократового материала между будинами меланократовых пород, свидетельствующая о достаточной пластичности лейкократового материала, магматогенный облик структур лейкократовых пород первого типа. Оценки температур образования пород Нигрозерской структуры (по наиболее «консервативному», не подверженному поздним воздействиям, Hbl-Pl-Qtz геотермометру – около 650°C) также указывают на принципиальную возможность плавления водонасыщенный солидус амфиболитов при давлениях метаморфизма Беломорского подвижного пояса (7–8 кбар) (Ранний докембрий, 2005 и др.) составляет, по данным (Vielzeuf, Smidt, 2001) около $660\text{--}670^{\circ}\text{C}$, т.е. в пределах ошибки совпадает с температурой становления пород Нигрозерской структуры

Таким образом, на основании данных по составу минералов из пород Нигрозерской структуры, минеральной термобарометрии и анализа структурно-текстурных особенностей пород можно сделать вывод о значительном участии расплава в процессе мигматизации

Тем не менее, образование меланократизированных амфиболитов представляет собой более сложный процесс, чем просто частичное плавление амфиболита. Во-первых, плавление часто сопровождается реакциями замещения амфибола гранатом (при образовании меланократизированных порфириобластовых амфиболитов) с увеличением железистости породы (т.к. гранат всегда является более железистой фазой, чем амфибол). Это может быть связано с флюидной проработкой породы. Также следует отметить, что если достаточно основной состав плаггиоклаза в меланократизированных амфиболитах (табл. 2) указывает на его реститовую природу, то раскисление плаггиоклаза в краевых частях зерен (табл. 3) также, по-видимому, обусловлено воздействием флюида. Температурные оценки образования меланократизированных пород по Hbl-Pl-Qtz термометру и по Grt-Hbl для краевых частей зерен (около $620\text{--}650^{\circ}\text{C}$) выглядят вполне реальными (несколько более низкие оценки по Grt-Hbl термометру, как уже отмечалось,

могут быть связаны с поздним диффузионным обменом между гранатом и амфиболом на фоне понижающейся температуры) Температурные оценки по Grt-Hbl термометру для центров зерен явно занижены, т. е. центры зерен граната и амфибола не находятся в равновесии

Тесная структурная связь меланократизированных пород и меланократовых пород первого структурного типа указывает на то, что генезис меланократовых пород первого структурного типа близок к таковому для меланократизированных пород, т. е. их в целом тоже можно рассматривать как реститы. Однако степень флюидной проработки этих реститов была существенно выше, чем для меланократизированных пород, на это указывает несколько более железистый состав минералов в меланократовых породах, обогащение пород кварцем, иная зональность минералов. В целом, образование рассматриваемых пород, по-видимому, происходит в процессе дальнейшего изменения меланократизированных разностей под воздействием флюидов, выносящих из системы магний и кальций, в результате чего меняется состав минералов и изменяется зональность граната (с увеличением железистости к краю) и плагиоклаза (с раскислением в краевых частях зерен). Температурные оценки, полученные по Hbl-Pl-Qtz термометру (около 630–650⁰С) представляются вполне реальными, температуры по Grt-Hbl термометру явно занижены (что связано с поздним переуравновешиванием Mg и Fe в темноцветных минералах). В то же время обращает на себя внимание широкий разброс по оценкам температур, что свидетельствует о сосуществовании в породе сильно неравновесных доменов.

Для лейкократовых пород первого типа характерны близкие температурные оценки, полученные по Hbl-Pl-Qtz, Grt-Hbl и Grt-Bt термометрам и достаточно слабо выраженная ретроградная зональность зерен. Это указывает на то, что минеральная ассоциация рассматриваемых пород близка к равновесной, и позволяет принять температуру около 650⁰С в качестве температуры ее образования. Слабое увеличение железистости граната к краевым частям зерен, по-видимому, может быть объяснено остыванием породы на регрессивной стадии, а иногда наблюдаемое увеличение основности плагиоклаза в краевой части, по-видимому, может быть связано с воздействием флюида, выносящего из системы натрия.

Сходный генезис, по-видимому, имеют и пегматоиды. Для них, кроме структурных особенностей, характерны, по-видимому, несколько более низкие температуры образования (около 630–640⁰С) и более основной, чем в лейкократовых породах, состав плагиоклаза, что указывает на более существенный вынос натрия из системы, по сравнению с системой лейкократовых пород первого типа. Несколько более низкие температуры образования пегматоидов также могут быть объяснены воздействием флюида.

Отдельный вопрос вызывает происхождение лейкократовых пород второго структурного типа. С одной стороны, часто встречающиеся переходы между лейкократовыми породами первого и второго типов указывают на то, что в некоторой степени образование лейкократовых пород второго типа происходило за счет пород первого типа. С другой стороны, преимущественная локализация лейкократовых пород второго типа в протяженных сдвиговых зонах, возможно, достаточно глубокого заложения, наличие близких по составу пород на контакте комплекса амфиболитов и гранитогнейсов и иногда непосредственно среди гранитогнейсов, а также достаточно специфический состав пород второго типа (обогащение K, Rb, Ba) указывают на то, что лейкократовые породы второго типа, возможно, представляют собой продукт взаимодействия расплавов, возникших при частичном плавлении амфиболитов, с расплавами и флюидами, происходящими из гранитогнейсов. Расплавы были несколько

перегреты относительно плагиогранитного солидуса (температурные оценки по Grt-Bt термометру дают температуры до 700°C) и в силу этого способны к некоторому перемещению. Крайне неоднородный состав лейкократовых пород, наличие отдельных полос, обогащенных кварцем, гранатом, амфиболом, микроклином, структуры замещения плагиоклаза микроклином и кварцем указывают на то, что становление пород происходило при активной фильтрации флюида, выносящего из породы (возможно – из частично застывшего расплава) основания, привносящего кремнезем, а на постмагматической стадии – калий. Температурные оценки по Grt-Bt термометру (около $650\text{--}700^{\circ}\text{C}$), по-видимому, соответствует температурам начала кристаллизации лейкократовых пород второго структурного типа, причем следует отметить, что в разных образцах температурные оценки по Grt-Bt термометру колеблются в достаточно узких, часто неперекрывающихся интервалах, что указывает на то, что кристаллизация лейкократовых пород в каждом отдельном теле имела свои особенности.

Лейкократазированные амфиболиты, по-видимому, представляют собой продукт взаимодействия вещества исходных неизмененных амфиболитов с лейкократовыми породами преимущественно второго структурного типа. На это указывает тесная ассоциация этих пород друг с другом: лейкократазированные амфиболиты обычно развиваются в краевых частях тел лейкократовых пород второго структурного типа. При этом для лейкократазированных пород и лейкократовых пород второго типа в целом характерна внутренняя неоднородность, обусловленная тесной перемежаемостью различных минеральных ассоциаций, с чередованием полосовидных участков, содержащих, наряду с кварцем и плагиоклазом, один, два, три или четыре темноцветных минерала. Это, во-первых, по-видимому, отражает различную степень проработанности породы флюидом, во-вторых, возможно, указывает на сосуществование в пределах единой сдвиговой зоны флюидов различного состава, вызывающих одновременное, но различное по физико-химической направленности преобразование пород Гранат-клинопироксен-кварц-плагиоклазовые и кварцсодержащие биотит-плагиоклаз-амфибол-клинопироксеновые породы, также тесно связанные с лейкократовыми породами, по-видимому, следует рассматривать как более меланократовые краевые фации последних.

Оценки температур для лейкократазированных амфиболитов, гранат-клинопироксен-кварц-плагиоклазовых и биотит-плагиоклаз-амфибол-клинопироксеновых пород, полученные по Hbl-Pl-Qtz термометру, в целом близки ($620\text{--}650^{\circ}\text{C}$, для биотит-плагиоклаз-амфибол-клинопироксеновых пород, возможно, несколько меньше), и, по-видимому, вполне корректны. Температуры по Grt-Hbl и Grt-Bt термометрам частично отвечают температурам кристаллизации минералов, а частично маркируют тренд последующего остывания породы. Температурные оценки, полученные по Grt-Cpx термометру, представляются явно завышенными.

Меланократовые породы второго структурного типа определенно имеют метасоматический генезис, о чем свидетельствуют в первую очередь их структуры (замещение плагиоклаза и амфибола). Температуры, оцененные по Hbl-Pl-Qtz термометру, вполне реальны, однако они могут отражать реликтовые температуры образования субстрата, также как и температуры, полученные для центров зерен по Grt-Hbl термометру. Температуры, полученные по Grt-Hbl термометру для краевых частей зерен, также, возможно, не соответствуют истинным температурам образования пород (так как амфибол в этих породах является реликтовым минералом) и отвечают некоторому переуравновешиванию Mg и Fe в темноцветных минералах, предшествующему собственно процессу замещения амфибола, т. е. являются несколько завышенными. По-видимому, жилы меланократовых пород второго структурного типа маркируют собой каналы

фильтрации остывающих метасоматизирующих флюидов на субсолидусной стадии образования мигматитов

При дальнейшем развитии метасоматического процесса меланократовые породы второго структурного типа сменяются гранат-кварцевыми метасоматитами, в которых количество амфибола резко сокращается вплоть до полного исчезновения. По направленности такой процесс соответствует кислотному выщелачиванию, температурные оценки по Grt-Hbl термометру, по-видимому, не соответствуют температурам образования пород, так как амфибол в данной ассоциации оказывается очевидно реликтовым. В том случае, когда образование гранат-кварцевых пород происходит по лейкократовым породам, этот процесс можно трактовать как процесс сопряженного с кислотным выщелачиванием осаждения оснований.

Изложенный материал позволяет сформулировать третье защищаемое положение

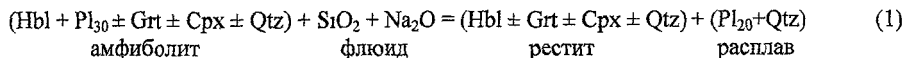
Образование апоамфиболитовых пород Нигрозерской структуры представляет собой сложный петрогенетический процесс, включающий частичное плавление амфиболитов в открытой системе, флюидно-магматическое взаимодействие расплавов и фильтрующихся сквозь них флюидов, перемещение новообразованных гранитоидных расплавов, их кристаллизацию и последующее субсолидусное метасоматическое преобразование реститов и гранитоидов

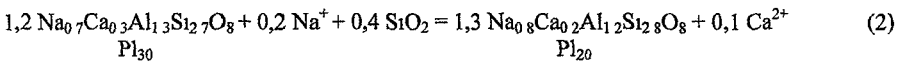
Физико-химические условия формирования мигматитов Нигрозерской структуры. Образование мигматитов Нигрозерской структуры включает процессы частичного плавления, флюидно-магматического взаимодействия и метасоматоза.

Процессы частичного плавления амфиболитов. Процесс частичного плавления амфиболитов Нигрозерской структуры происходил в открытой системе и сопровождался привнесением в систему кремнезема. В ряде случаев стадия плавления предвращалась образованием окварцованных метасоматически измененных амфиболитов, что соответствует классической модели гранитизации, предложенной Д.С. Коржинским (1952). Однако в большинстве случаев зоны передовых метасоматитов не возникало. Это связано с тем, что температуры системы были выше «влажного» плагиогранитного солидуса, поэтому появление в системе флюида, несущего кремнезем, приводило к расплавлению породы, и все реакции происходили с участием расплава. Возможность зарождения гранитного расплава на мономинеральных зернах в присутствии флюида, содержащего другие компоненты эвтектики, экспериментально доказана опытами М.Б. Эпельбаума и М.В. Боголепова (1991). Состав получающихся при таком частичном плавлении расплавов и остаточных фаз практически не зависит от содержаний тех или иных реагирующих минералов в плавящемся субстрате, но в значительной степени зависит от состава реагирующего с породой флюида, в первую очередь от его кислотности-щелочности. В зависимости от состава флюида возможно плавление без изменения соотношений темноцветных минералов в рестите, и плавление, сопровождающееся такими изменениями.

В пределах Нигрозерской структуры нами наблюдалось три различных случая

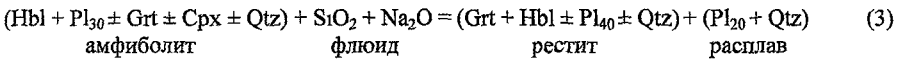
1. Плавление без изменения соотношений темноцветных минералов в рестите. При этом в рестите остается преимущественно амфибол, а плагиоклаз переходит в расплав, так образуются меланократизированные породы, преимущественно состоящие из амфибола



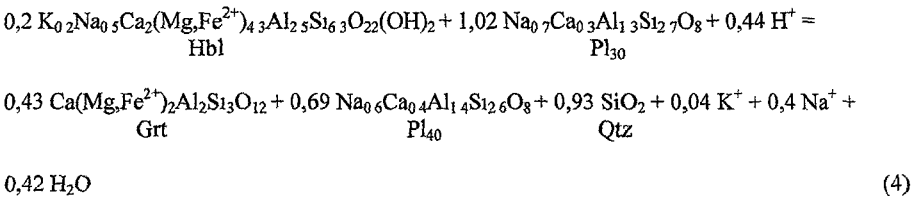


Как видно из уравнения (2), ионы водорода не участвуют в реакции, то есть реакция в целом индифферентна к кислотности–щелочности флюида

2 Плавление с образованием граната по амфиболу При этом в рестите образуются порфиробластовые меланократизированные породы, обогащенные гранатом

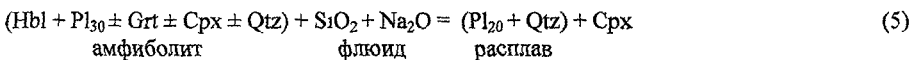


Данная реакция может быть представлена в виде двух комплиментарных реакций с одной стороны, образование расплава – реакция (2), с другой – образование рестита

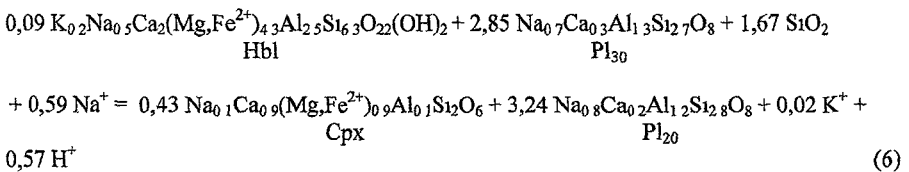


При этом Na, высвобождающийся в ходе реакции (4), по-видимому, принимает участие в реакции (2), K из системы выносится, а SiO₂ – привносится. Общий ход процесса происходит с поглощением ионов водорода, то есть осуществляется в кислых условиях

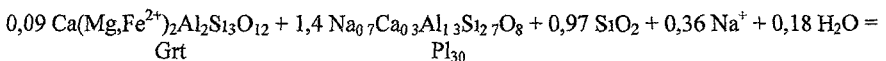
3 Плавление с образованием клинопироксена по амфиболу Рестит как таковой не образуется, однако в лейкоosome часто присутствует значительное количество клинопироксена – так образуются некоторые разновидности лейкократизированных пород

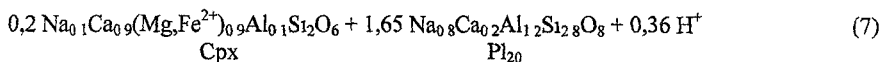


или, с учетом состава минералов



и, в том случае, когда в исходном амфиболите присутствует также гранат





Как видно из уравнений реакций, в ходе процесса происходит привнос в систему кремнезема и натрия, вынос небольшого количества калия, а сама реакция осуществляется в щелочных условиях (так как ионы водорода входят в правую часть уравнения)

Таким образом, процесс плавления амфиболитов в пределах Нигрозерской структуры зависит от кислотности–щелочности флюида, вызывающего плавление и привносящего в систему кремнезем и натрия. В том случае, когда флюид имеет близнейтральную реакцию, плавление происходит без разложения амфибола, в кислых условиях амфибол замещается гранатом (с образованием более основного плаггиоклаза в рестите), в щелочных условиях происходит замещение амфибола и, в меньшей степени, граната клинопироксеном.

Следует отметить, что отмеченные процессы происходят одновременно часто клинопироксеносодержащие лейкократовые породы, гранатовые и амфиболовые рестины можно наблюдать в пределах одного небольшого штупфа без каких-либо петрографических свидетельств развития одних парагенезисов по другим. Это указывает на то, что состав флюида в пределах зоны мигматизации был крайне неоднородным: в одних местах – более кислым, в других – более щелочным.

Флюидно-магматическое взаимодействие в безмикроклиновых лейкократовых породах Нигрозерской структуры. К минералам, кристаллизующимся из расплава, в лейкократовых породах могут быть отнесены плаггиоклаз, кварц, клинопироксен, амфибол, гранат и биотит. Микроклин во всех лейкократовых породах наложенный и связан с поздними метасоматическими процессами. Максимальное количество одновременно существующих в равновесии минералов – 4, количество минералов в системе – 6, то есть при фиксированных Р и Т невариантное равновесие отвечает существованию шести фаз, а дивариантное – четырех. Количество инертных компонентов в такой системе, согласно правилу фаз – 4. По-видимому, это Si, Ca, Al, Mg+Fe²⁺. С учетом реальных составов минералов, на основании методики, предложенной Д.С. Коржинским (1946) построена диаграмма парагенезисов, возникающих при взаимодействии расплавов и фильтрующихся сквозь них флюидов в зависимости от химического потенциала вполне подвижных компонентов (рис 7).

Как видно из диаграммы, при низких рН флюида и повышенном химическом потенциале калия (поле I, разделенное на I₁ и I₂ по составу бескварцевых парагенезисов) в плаггиогранитоидях устойчива ассоциация биотита с пироксеном, при снижении потенциала калия этот парагенезис сменяется ассоциацией амфибола с биотитом или амфибола с пироксеном (поле II), в зависимости от содержаний инертных компонентов. Затем, при увеличении кислотности флюида при низком потенциале калия (поле III) распадается парагенезис биотита с амфиболом: здесь устойчивы ассоциации граната с биотитом, граната с амфиболом и амфибола с клинопироксеном. Наконец, при высокой кислотности системы (поле IV, разделенное на IV₁ и IV₂ по составу безплаггиоклазовых парагенезисов), практически вне зависимости от химического потенциала калия, в плаггиогранитоидях оказывается неустойчив амфибол и устойчивыми оказываются ассоциации граната с биотитом и граната с пироксеном.

Следует отметить, что теоретически возможные четырехминеральные парагенезисы в плаггиогранитоидях Нигрозерской структуры достаточно редки. В большинстве случаев, кроме плаггиоклаза и кварца, присутствует только один темноватый минерал. С одной стороны, это может быть связано с тем, что составы реальных пород оказываются близки

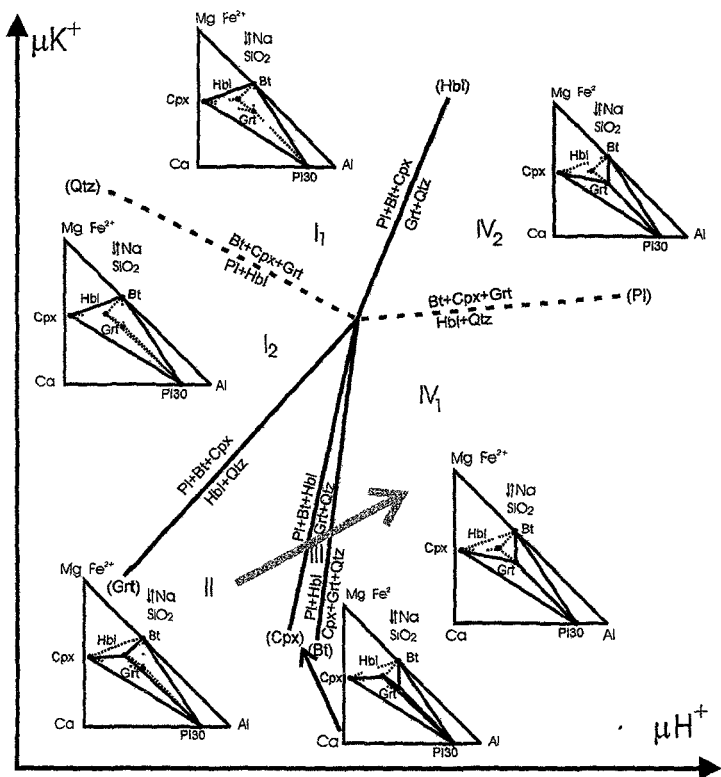


Рис 7 Диаграмма парагенезисов для флюидно-магматической системы лейкократовых пород Нигрозерской структуры в зависимости от химического потенциала калия и иона водорода. Сплошными линиями на диаграммах обозначены парагенезисы плагиогранитоидов, пунктирными – бесплаггиоклазовые или бескварцевые парагенезисы. Стрелкой показано общая эволюция парагенезисов лейкократовых пород при гранулитации.

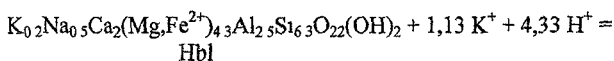
к коннодам амфибол–плаггиоклаз или амфибол–гранат, то есть попадают на разделяющие четырехминеральные парагенезисы линии. С другой стороны, сокращение числа фаз может быть обусловлено тем, что количество инертных компонентов в системе меньше четырех. Действительно, при увеличении кремнекислотности пород наблюдается отчетливое снижение содержаний в плагиогранитах Mg, Fe, Ca, что указывает на интенсивный вынос этих элементов (сначала – Mg и Fe, позднее – Ca) по мере эволюции расплава и, возможно, является следствием их термодинамической подвижности. При этом, подвижность указанных элементов не оказывается постоянной в пределах всего объема расплава, поэтому в затвердевшей породе мы часто видим чередование участков с трех- и четырехминеральными парагенезисами.

Несмотря, однако, на указанные ограничения, на основании изученной диаграммы можно сделать определенные выводы относительно общей эволюции кислотно-основных свойств флюидно-магматической системы. Наиболее часто встречающимся ранним парагенезисом в плагиогранитоидах (лейкократовые породы первого структурного типа)

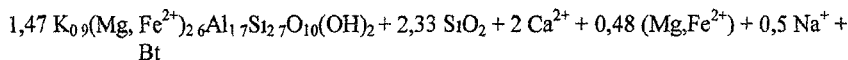
является ассоциация плагиоклаза, кварца, амфибола и небольшого количества граната, что соответствует полю III на указанной диаграмме, существенно реже присутствуют ассоциации амфибола с биотитом (поле II), амфибола с пироксеном (поля II и III) и биотита с гранатом (поля III и IV). При переходе к более поздним лейкократовым породам второго структурного типа наиболее устойчивым оказывается парагенезис граната с биотитом, отвечающий полям III и IV. Таким образом, по мере эволюции системы определенно повышается ее кислотность, кроме того, по-видимому, также происходит некоторое увеличение химического потенциала калия (возможная эволюция системы показана на диаграмме стрелкой).

Образование редко встречающихся гранат-клинопироксен-кварц-плагиоклазовых пород отвечает условиям поля IV, а появление в этой ассоциации клинопироксена вместо биотита определяется более кальциевым составом расплава, контаминированного веществом плавящегося амфиболита. Биотит-плагиоклаз-амфибол-клинопироксеновые породы отвечают бескварцевой ассоциации, устойчивой в пределах поля I₂. Если в породе появляется кварц, амфибол оказывается неустойчивым, что приводит к появлению ассоциации биотит-клинопироксеновых меланократовых плагиогранитоидов или биотит-клинопироксеновых лейкократизированных амфиболитов со структурами замещения амфибола.

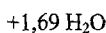
Если мы будем рассматривать часто встречающиеся трехминеральные парагенезисы лейкократовых пород (образование которых мы связываем, как уже отмечалось, с переходом во вполне подвижное состояние магния, железа или кальция), то придем к тем же выводам о повышении кислотности флюида при переходе от амфиболовых плагиогранитоидов к биотитовым и от амфиболовых и биотитовых – к гранатовым.



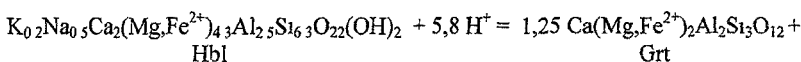
Hbl



Bt

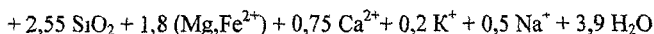


(8)

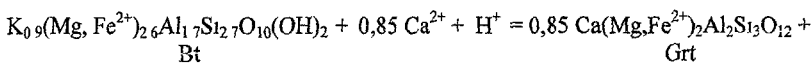


Hbl

Grt

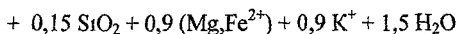


(9)



Bt

Grt



(10)

Все эти реакции возможны только в кислых условиях (ионы водорода в левой части уравнения). Кроме того, образование биотита за счет амфибола происходит с существенным привнесом в систему калия.

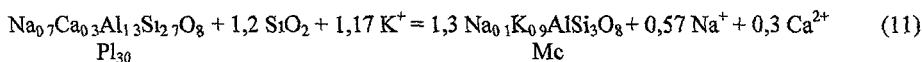
Таким образом, эволюция плагиогранитного расплава достаточно сложна и не может быть строго описана в рамках инертного поведения кальция, магния и железа, в то же

время эти элементы нельзя рассматривать и как вполне подвижные их инертность и подвижность быстро меняется в пределах небольших объемов расплава (породы), в то время как ионы водорода и щелочи подвижны в пределах всей флюидно-магматической системы

Важно отметить, что в большинстве лейкократовых пород плагиоклаз в краевых частях зерен оказывается несколько более основным, чем в центральных. Это также указывает на некоторое увеличение кислотности флюида во времени, даже если не наблюдаются реакции между темноцветными минералами

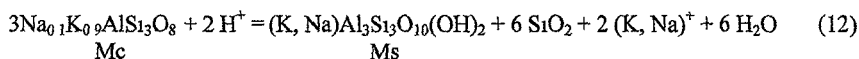
Субсолидусные изменения лейкократовых пород Образование в лейкократовых породах таких минералов, как микроклин и мусковит, происходило в субсолидусных условиях

Ведущей химической реакцией при образовании микроклина является замещение плагиоклаза



Как видно, реакция происходит с привнесом в систему калия и кремнезема и выносом натрия и кальция. Судя по уравнению реакции, она индифферентна к кислотности-щелочности обстановки, тем не менее увеличение химической активности калия (более основного компонента) и понижение химической активности натрия и кальция (менее основных компонентов) указывает, по-видимому, на некоторое увеличение щелочности флюида

Появление в ряде случаев в лейкократовых породах позднего мусковита определяется реакцией замещения калиевого полевого шпата



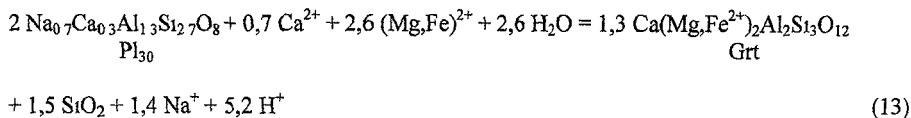
Как видно из уравнения, данная реакция проходит под воздействием кислого флюида, процесс часто сопровождается окварцеванием породы. Это указывает на постепенное увеличение кислотности флюида, фильтрующегося через центральные части сдвиговых зон и приуроченные к ним лейкократовые породы второго структурного типа

Субсолидусные изменения реститов Образование меланократовых пород и гранат-кварцевых метасоматитов. Согласно предложенной геологической модели, меланократовые породы должны рассматриваться как реститы, в значительной степени измененные под воздействием кислого флюида, при этом кислотное выщелачивание приводит к появлению серии пород, которую можно рассматривать как определенную метасоматическую колонку (от меланократизированных пород до гранат-кварцевых метасоматитов) $\text{Hbl} + \text{Pl} + \text{Grt} \pm \text{Qtz} \Rightarrow \text{Hbl} + \text{Grt} + \text{Qtz} \pm \text{Pl} \Rightarrow \text{Grt} + \text{Qtz} \pm \text{Hbl}$

Первым в меланократовых породах исчезает плагиоклаз, что, по всей видимости, означает собой переход во вполне подвижное состояние натрия. Дальнейшее развитие процесса приводит сначала к частичному, а затем и полному растворению амфибола с частичным замещением его гранатом и образованием гранат-кварцевых пород (согласно реакции 9). При этом во вполне подвижное состояние, по-видимому, переходит магний, так как гранат является более железистой фазой, чем амфибол. Инертный кальций преимущественно аккумулируется в гранате и титаните, наблюдается лишь крайне незначительный его вынос из системы по отношению к железу

Исходя из такой последовательности замещения минералов, общий ряд подвижности компонентов можно представить как Na, Mg, Ca, Fe, Al. Такой ряд подвижности компонентов при метасоматозе, по данным В. А. Глебовицкого и С. А. Бушмина (1983), в целом характерен для метасоматитов метаморфических поясов кианит-силлиманитового типа, к числу которых относится и Беломорский подвижный пояс.

Гранат-кварцевые метасоматиты, однако, как уже отмечалось, могут развиваться не только по меланократовым породам, но и по лейкократовым кварц-плагноклазовым породам. При этом происходит растворение плагноклаза и кристаллизация граната. Этот процесс, видимо, можно рассматривать как своеобразную базификацию с перетотложением вынесенного из меланократовых пород железа и, частично, магния и кальция (уравнения сбалансированы по инертному алюминию)



Ионы водорода в правой части уравнения указывают на то, что данный процесс может происходить при нейтрализации кислых флюидов, то есть на стадии повышения их щелочности. Об относительном увеличении щелочности флюидов свидетельствует также зональность граната со снижением железистости в краевых частях зерен.

Таким образом, анализ приведенных реакций показывает, что минералообразование в пределах зон смятия в Нигрозерской структуре происходило в условиях различной кислотности–щелочности флюида, при этом, с одной стороны, наблюдается одновременное развитие парагенезисов различной кислотности–щелочности в зависимости от протекания процесса в центральных или краевых частях зоны смятия (например, развитие гранат-биотитовых плаггиогранитоидов в центральных частях зоны смятия и амфибол- или биотит-клинопироксеновых – на периферийных), с другой стороны, происходит постепенная смена более щелочных парагенезисов более кислотными (например, развитие мусковитосодержащих парагенезисов по микроклинсодержащим, образование гранат-кварцевых пород по амфиболсодержащим меланократовым породам).

Эволюция кислотности–щелочности флюида во времени может быть легко объяснено влиянием температуры: как известно, с падением температуры кислотность флюида возрастает из-за большей степени конденсированности системы и увеличении степени диссоциации кислот.

Одновременное развитие парагенезисов различной кислотности–щелочности в пределах зон смятия можно объяснить следующим образом. Как показывают данные по изучению флюидных включений в метаморфических минералах (например, Мигматизация и гранитообразование, 1985 и др.), флюид в метаморфических толщах, по-видимому, часто оказывается гетерогенным, состоящим из двух фаз – более плотной водно-солевой и менее плотной водно-углекислотной. При наличии в системе двух фаз, согласно экспериментальным данным (Ткаченко, Шмулович, 1992, Граменицкий и др., 2000 и др.), возможно протекание реакции высокотемпературного гидролиза солей (например, $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} = \text{NaOH} + \text{HCl}$). Кислота при этом концентрируется преимущественно в менее плотной водно-углекислотной фазе, щелочь – в более плотной водно-солевой.

Если такой гетерогенный флюид попадает в толщу, характеризующуюся градиентом давления (например, в зону смятия), возможно механическое разделение сосуществующих условно «жидкой» и «газовой» фаз в силу кинетических причин: скорость перемещения («всплывания») «газовой» фазы оказывается выше, чем «жидкой» (явление гетерогенного

вскипания), в связи с чем в пределах зоны смятия могут сосуществовать флюиды различной кислотности–щелочности, что соответствующим образом отражается и на образующихся минеральных парагенезисах

Действительно, в пределах Нигрозерской структуры парагенезисы, отвечающие более кислому флюиду (лейкократовые породы второго структурного типа), приурочены преимущественно к центральным частям зон смятия, где можно предполагать большую роль менее плотной и более кислой флюидной фазы, а парагенезисы, отвечающие более щелочному флюиду – к периферийным частям этих зон

Сказанное позволяет сформулировать четвертое защищаемое положение

Минеральные парагенезисы апоамфиболитовых пород образовались при различной кислотности–щелочности равновесного флюида, причем наблюдается определенная закономерность в смене этих парагенезисов во времени и пространстве: парагенезисы, равновесные с более щелочным флюидом, приурочены преимущественно к периферийным участкам зон смятия и максимальное развитие получили на начальных стадиях процесса мигматизации, парагенезисы, равновесные с более кислым флюидом, в основном, связаны с центральными участками зон смятия и максимальное развитие получили на заключительных стадиях образования мигматитов.

Заключение. Общий ход петрогенетического процесса образования апоамфиболитовых пород Нигрозерской структуры представляется следующим образом. На первой стадии процесса первичные породы Нигрозерской структуры – вулканические или интрузивные породы основного состава – испытывают метаморфизм в спокойной тектонической обстановке, в результате чего образуются метаморфические гранатовые и клинопироксен-гранатовые амфиболиты. Пиковые температуры метаморфизма составляют около 650°С, после чего породы испытывают небольшое охлаждение. Вторая стадия начинается интенсивными сдвиговыми деформациями, в результате чего закладываются сдвиговые зоны. Вдоль системы трещин начинается поступление флюидов, несущих с собой кремнезем, щелочи и дополнительное тепло. Локальное повышение температуры за счет флюидного теплопереноса и, возможно, механической энергии трения приводит к частичному плавлению амфиболитов. Состав выплавляемой магмы и состав рестита сильно зависят от состава вызывающего плавления флюида при низких рН флюида в рестите остается гранат, при более высоких – амфибол или клинопироксен. Состав флюида в различных частях сдвиговой зоны не однороден и сильно варьирует по кислотности–щелочности в связи с процессом возгонки более кислотных компонентов в области пониженного давления.

Образовавшиеся в результате частичного плавления расплавы частично кристаллизуются *in situ*, образуя лейкократовые породы первого структурного типа, а частично перемещаются на небольшие расстояния, порождая лейкократовые породы второго структурного типа.

В это время весьма вероятно поступление дополнительных порций гранитного расплава и флюидов из нижележащего комплекса гранитогнейсов. Эти расплавы и флюиды оказываются более калиевыми, чем расплавы и флюиды комплекса амфиболитов, поэтому смешение различных расплавов и флюидов обогащает систему калием и приводит к появлению биотит- и микроклинсодержащих пород.

Отжатые в сдвиговые зоны расплавы продолжают испытывать воздействие фильтрующегося флюида. В результате этого процесса из расплавов происходит вынос оснований – получившиеся после застывания таких расплавов породы обеднены

темноцветными минералами. Взаимодействие гранитоидных расплавов и амфиболитов приводит к появлению лейкократазированных амфиболитов, гранат-диопсид-кварц-плагноклазовых и биотит-плагноклаз-амфибол-клинопироксеновых пород.

Субсолидусный калиевый метасоматоз приводит в лейкократовых породах к образованию микроклиновых разностей, а более позднее кислотное выщелачивание – к появлению парагенезисов с мусковитом и окварцеванию породы. При этом мы отчетливо наблюдаем сначала некоторый рост щелочности вызывающих метасоматоз флюидов (при образовании микроклиновых пород), а затем – ее снижение (при мусковитизации и окварцевании).

Образованные в результате частичного плавления амфиболитов рестины также продолжают испытывать воздействие кислого флюида (кислотное выщелачивание), в результате чего возникают меланократовые породы и гранат-кварцевые метасоматиты по амфиболсодержащим породам. В том случае, если кислые, обогащенные основаниями флюиды взаимодействуют с уже застывшими лейкократовыми породами, на фоне некоторого роста щелочности флюида образуются гранат-кварцевые метасоматиты отложения по гранитоидам.

Механизм возникновения апоамфиболитовых мигматитов, выявленный нами в пределах Нигрозерской структуры, не является в пределах Беломорья уникальным. Наши наблюдения в других фрагментах Центрально-Беломорской мафической зоны (район оз. Серяк, п-ов Картеш) показывают, что механизм мигматизации амфиболитов здесь чрезвычайно схож с описанным в настоящей работе, т.е., по-видимому, этот механизм является общим для пород всей Центрально-Беломорской мафической зоны.

В то же время, предложенная модель не охватывает всего существующего в Беломорье разнообразия апоамфиболитовых мигматитов. Наши исследования апоамфиболитовых мигматитов и метасоматитов по породам, не входящим в состав Центрально-Беломорской мафической зоны, в районе Хеголабинского месторождения слюдяно-керамических пегматитов (пос. Хеголабин, приблизительно 40 км к ЮВ от Нигрозерской структуры), показывают, что здесь процессы мигматизации проходят совершенно иначе для апоамфиболитовых пород пос. Хеголабина характерно широкое развитие передовых, предшествующих частичному плавлению, метасоматитов, представленных биотитизированными и эпидотизированными, относительно лейкократовыми породами (в полном согласии с моделью Д.С. Коржинского). Появление в этих породах эпидота и биотита, исчезновение амфибола и граната указывают, согласно нашим исследованиям (Корпечков, Козловский, 2007), на относительно менее кислотный характер процесса изменения амфиболитов и интенсивный привнос в систему кремнезема и калия.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1 В.М. Козловский, Д.И. Корпечков. Декомпрессионная зональность плагмиомигматитов // Тезисы докладов на XIV научных чтениях памяти профессора И.Ф. Трусовой. М. 2005. С. 10–11.

2 Д.И. Корпечков, В.М. Козловский. Метасоматические процессы в породах Беломорского комплекса // Материалы международного петрографического совещания «Петрография XXI века». Апатиты. 2005. Т. 3. С. 146–148.

3 В.М. Козловский, Д.И. Корпечков. Минералогическая зональность свекофенских плагмиомигматитов Беломорского комплекса // Беломорский подвижный пояс и его

аналоги геология, геохронология, геодинамика, минералогия Материалы конференции Петрозаводск 2005 С 181–183

4 ДИ Корпечков Апоамфиболитовые мигматиты и метасоматиты горы Нигрозеро структуры и состав // Беломорский подвижный пояс и его аналоги геология, геохронология, геодинамика, минералогия Материалы конференции Петрозаводск. 2005 С 196–198

5 ДИ Корпечков Апоамфиболитовые базификаты горы Нигрозеро (Беломорский комплекс, Северная Карелия) // Материалы XVI конференции молодых ученых «Геология и геоэкология исследования молодых», посвященной памяти чл-корр АН СССР К О Кратца Апатиты 2005 С 47–50

6 ДИ Корпечков Мигматиты и метасоматиты Нигрозерской структуры, Беломорский комплекс, Северная Карелия // Проблемы магматической и метаморфической петрологии Тез докладов на XV научных чтениях памяти профессора И.Ф. Трусовой М 2006 С 11–12

7 ДИ Корпечков Эволюция процессов частичного плавления и метасоматоза при мигматизации амфиболитов Нигрозерской структуры, Северная Карелия // Материалы XVII конференции молодых ученых «Геология, полезные ископаемые и геоэкология Северо-Запада России», посвященной памяти чл-корр АН СССР К О Кратца Петрозаводск 2006 С 143–146

8 ДИ Корпечков Зависимость процесса частичного плавления от флюидного режима пример из апоамфиболитовых мигматитов Северной Карелии // VIII международная конференция «Новые идеи в науках о Земле» Доклады М 2007 Т 3 С 177–180

9 ДИ Корпечков Составы минералов мигматитов как индикатор механизма мигматизации (на примере апоамфиболитовых мигматитов Нигрозерской структуры, Северная Карелия) // Проблемы магматической и метаморфической петрологии XVI научные чтения памяти профессора И.Ф. Трусовой Материалы докладов М 2007 С 13–18

10 ДИ Корпечков Апоамфиболитовые мигматиты Нигрозерской структуры (Беломорский подвижный пояс) влияние кислотности-щелочности гранитизирующего флюида на формирование минеральных парагенезисов // Геология и минералогия Кольского региона Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции и IV Ферсмановской научной сессии, посвященных 90-летию со дня рождения акад А.В. Сидоренко и д-ра И.В. Белькова Апатиты 2007 С 98–101

11 ДИ Корпечков, В.М. Козловский Апоамфиболитовые мигматиты и породы тоналит-гранодиоритовой ассоциации хетоламбинской «свиты» Беломорского комплекса, Северная Карелия геологические типы и возможные условия образования // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии Материалы XVIII молодежной конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К О Кратца СПб 2007 С 65–67

12 ДИ Корпечков Апоамфиболитовые мигматиты Нигрозерской структуры, Беломорский подвижный пояс Статья 1 Петрография и петрохимия пород Баланс вещества при мигматизации // Изв вузов Геология и разведка 2008 № 2

13 Корпечков ДИ Апоамфиболитовые мигматиты Нигрозерской структуры, Беломорский подвижный пояс Статья 2 Минеральные парагенезисы как индикатор условий образования мигматитов // Изв вузов Геология и разведка 2008 № 3

14 ДИ Корпечков Состав и возможные условия образования апоамфиболитовых мигматитов и метасоматитов Нигрозерской структуры, Северная Карелия // Парагенетические аспекты эндогенного минералообразования Под ред. А.А. Маракушева, В.Л. Русинова М Наука, 2008

Подписано в печать 20 02 2008 г
Печать трафаретная

Заказ № 105
Тираж 100 экз

Типография «11-Й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш, 36
(495) 975-78-56, (499) 788-78-56
www.autoreferat.ru