ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(СПбГУ)

Институт Наук о Земле

Кафедра региональной геологии

Тагирова Алина Рустэмовна

Петрографическая характеристика пород зоны современного выветривания оазиса Холмы Ларсеманн (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида)

Курсовая работа

Научный руководитель:

к.г.-м.н., доц. Алфимова Н. А.

« » 2019

Заведующий кафедрой:

к.г.-м.н., доц. Ершова В. Б.

« » 2019

Санкт-Петербург

2019

Оглавление

Введение 2
Глава 1. Главные черты геологического строения Антарктиды 4
Глава 2. Геологическое строение оазиса Холмы Ларсеманн 6
Глава 3. Методы исследований 8
Глава 4. Петрография пород 9
Gr-Bt-Sil гнейсы 9
Gr-Sil калишпатовые гнейсы 11
Gr-Sil-Bt калишпатовые гнейсы 16
Глава 5. Химия минералов 18
5.1. Полевые шпаты 18
5.2. Гранаты 19
5.3. Биотит 20
Глава 6. Условия образования 22
Заключение 25
Приложения 26
Приложение 1 26
Приложение 2 27
Приложение 3 29
Приложение 4 31
Приложение 5 32
Приложение 6 34
Список литературы 37

Введение

Антарктида – один из самых неизведанных и неизученных материков нашей планеты. Но, несмотря на экстремальные климатические условия, длительный отрыв от семьи, отсутствие комфорта и другие осложняющие факторы, сейчас на Южном полюсе ведутся постоянные океанологические, гляциологические, климатологические, биологические, а также другие работы, большую часть которых занимают геологические исследования.

Почти на всех почвенных картах мира Антарктида не представлена. Между тем, на этом континенте есть почвы и, следовательно, идут процессы выветривания. Поверхность почв во внутренних районах Антарктиды – одна из самых древних на Земпле.

В LGM (последний ледниковый максимум; 26,5-19 тыс. лет назад) район оазиса Холмы Ларсеманн не покрывался ледником. Суммарный возраст экспонирования в перигляциальных условиях неизвестен (>50 тыс. лет). Оазис Холмы Ларсеманн является одним из мест так называемого выветривания в Антарктиде.

Изучаемые образцы были отобраны в ходе двух Российских Антарктических Экспедиций (РАЭ) – 61 (01-02.2016) и 63 (12.2017) сотрудниками Института Географии Российской Академии Наук – Долгих А. В. и Шоркуновым И. Г. Образцы отбирались на поверхности скальных обнажений различных экспозиций в оазисе Холмы Ларсеманн на полуострове Брокнес (69°20′ ю.ш., 76°20′ в.д.) в Восточной Антарктиде (рис. 1).

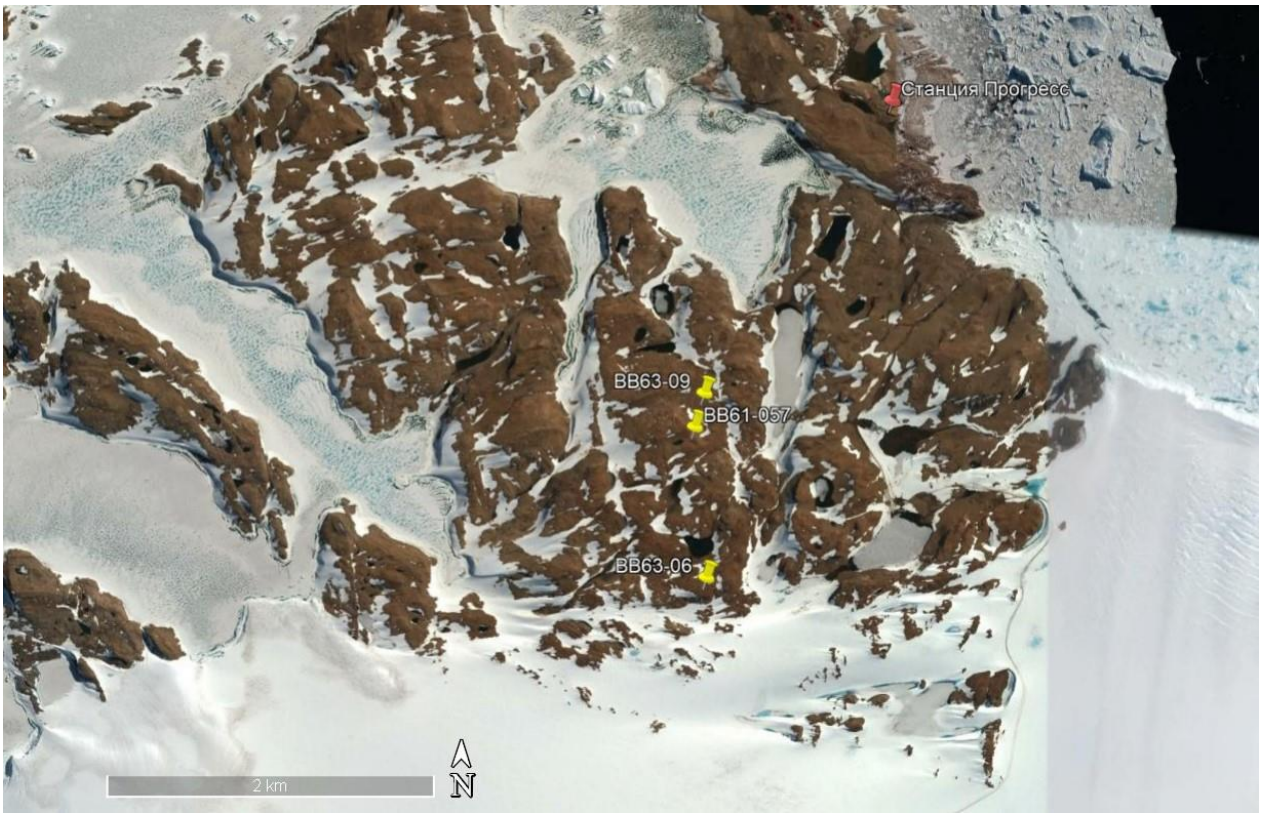

Рис. 1. Спутниковый снимок с метками мест отбора образцов

Целью данной работы является изучение петрографического состава пород из зоны выветривания оазиса Холмы Ларсеманн (Земля Принцессы Елизаветы, Антарктида) и оценка степени низкотемпературных изменений, проявленных в этих породах.

В соответствии с поставленной целью, необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Выполнить петрографическую характеристику пород
2. Изучить химический состав минералов рентгеноспектральным методом
3. Оценить условия образования и преобразования пород

Автор работы выражает благодарность своему научному руководителю к.г.-м.н., доценту Алфимовой Надежде Аркадьевне за предоставленный каменный материал, а также проявленное терпение и неоценимую помощь в процессе работы.

Глава 1. Главные черты геологического строения Антарктиды

В настоящее время в пределах Антарктического материка выделяют следующие геоструктурные элементы: древнюю Восточно-Антарктическую платформу и Тихоокеанский подвижный пояс.

Восточно-Антарктическая платформа охватывает большую часть материка и представляет собой древнюю платформу, протолит кристаллического фундамента которой сформировался в период от 4,0 млрд. до 2,7 млрд. лет назад [Михальский, 2008], который испытал тектономагматическую активизацию в протерозое. Относительно молодой осадочный чехол платформы обнажается лишь в незначительном объеме. Полный разрез верхней части чехла обнажается лишь в Трансантарктических горах на западной границе платформы и представлен недислоцированными девонско-триасовыми кластическими отложениями, именуемыми серией Бикон [Грикуров, Лейченков, Михальский, 2010]. Вследствие фрагментарного развития платформенных отложений, Восточно-Антарктическую платформу также называют Антарктическим кристаллическим щитом.

Разделение в пределах Антарктического щита на области архейской и раннепротерозойской (3,9-1,8 млрд. лет назад) стабилизации (кратоны) и области протерозойской активизации (так называемый Восточно-Антарктический подвижный пояс) происходит по возрасту главных фаз тектономагматической деятельности, которые следовали за периодами осадконакопления и вулканизма [Михальский, 2008].

К архейским кратонам относят: провинцию Грюнехогна в западной части Земли Королевы Мод, Нейпирскую провинцию в центральной части Земли Эндерби, Рукерскую провинцию в южной части гор Принс-Чарльз, прибрежный оазис Вестфолль вместе с прилегающими островами Рёуер на Земле Принцессы Елизаветы, блок Шеклтон в горах Шеклтона, блок Миллер в Трансантарктических горах, выходы архейских пород в районе ледника Денмена и крупный блок на Земле Адели. Остальные площади Восточной Антарктиды сложены, вероятнее всего, протерозойскими структурами [Грикуров, Лейченков, Михальский, 2010] (рис.2).

Некоторые исследователи рассматривают Восточно-Антарктический подвижный пояс как единую область полицикличного развития, во время которой земная кора архейского возраста испытала значительную переработку [Геология и минеральные ресурсы Антарктиды, 1990]. Впрочем большинство авторов придерживается мнения, что данный пояс имеет акреционно-колизионную природу гренвильского поздне-мезопротерозойского и панафриканского неопротерозойско-раннепалеозойского тектонических циклов [Carson, Fanning, Wilson, 1996; Grikurov, Mikhalskii, 2002; Jacobs и др., 1998]. Обширные области были подвержены глубокому метаморфизму амфиблитовой и гранулитовой фаций, мощным складчатым деформациям, частичному плавлению, также имели место множественные магматические инъекции.

К Тихоокеанскому подвижному поясу Антарктиды (ТПП) относят горно-складчатые сооружения западной Антарктиды и Трансантарктических гор. В основном это кулисообразно расположенные, разнородные по строению, по протяженности и времени формирования складчатые системы. Образовались они между поздним протерозоем и кайнозоем, зоны омолаживаются в направлении от щита к тихоокеанской окраине. Главными звеньями являются (в порядке уменьшения времени формирования): 1) Росский ороген – в Трансантарктических горах; 2) ороген Борхгренвинк – на севере Земли Виктории и на западе Земли Мэри Бэрд; 3) ороген Амундсен – в центральной и

восточной части Земли Мэри Бэрд; 4) ороген Элсуэрт – в районе гор Элсуэрт; 5) Андский ороген или Антарктанды – Антарктический полуостров и прилегающие к нему острова [Грикуров, Лейченков, Михальский, 2010]. Возрастная и тектоническая систематика складчатых сооружений Антарктиды во многом неясна, вопросы о роли разных геодинамических процессов в их формировании остаются открытыми.

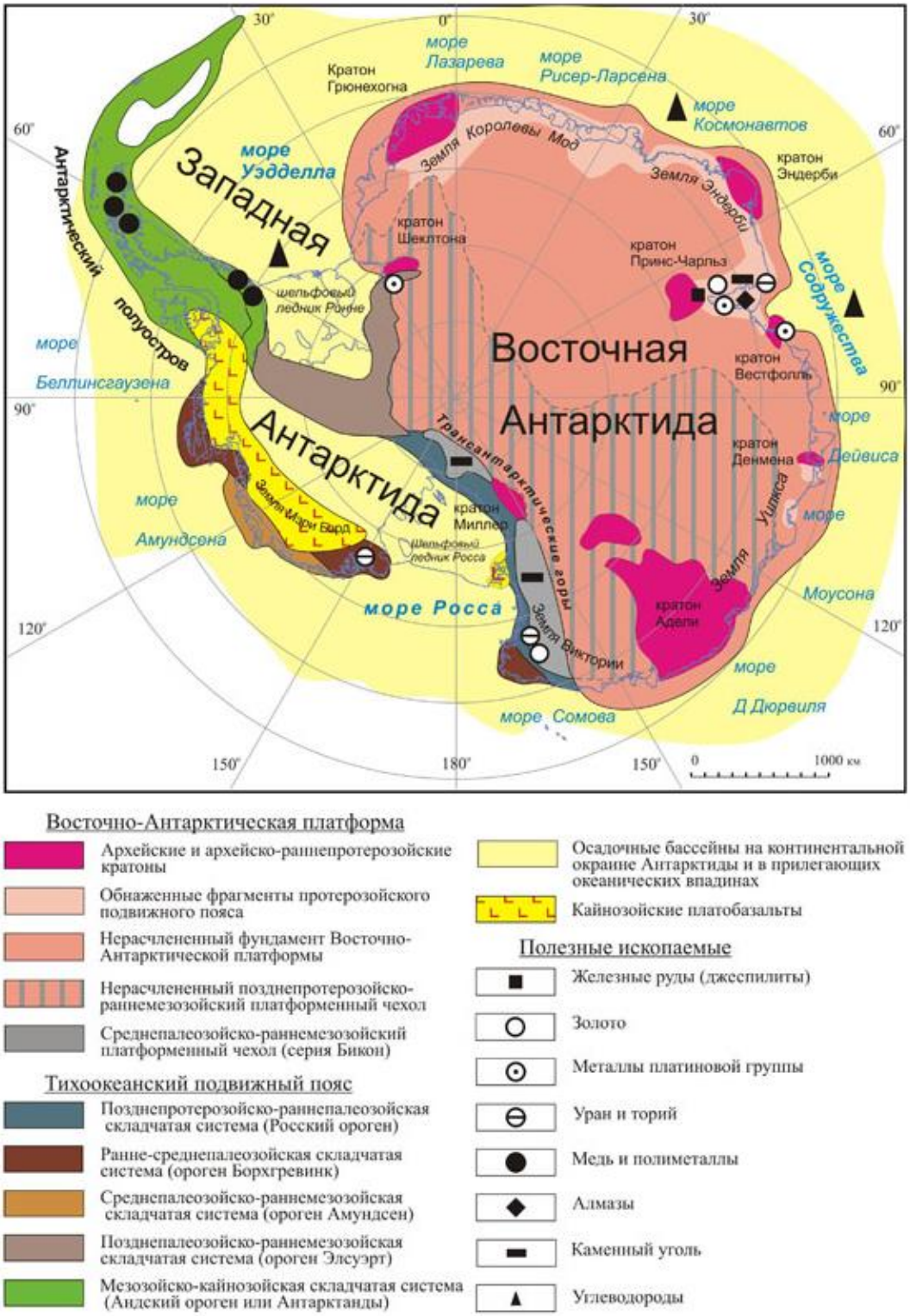

Рис. 2. Тектоническая схема Антарктиды ([Грикуров, Лейченков, Михальский, 2010] с изменениями)

Глава 2. Геологическое строение оазиса Холмы Ларсеманн

Оазис Холмы Ларсеманн – это серия свободных ото льда полуостровов и островов, расположенная вдоль восточного побережья Антарктиды приблизительно между оазисом Холмы Вестфолд и шельфовым ледником Амери в центральной части юго-восточного берега залива Прюдс (Земля принцессы Елизаветы) (рис. 3).

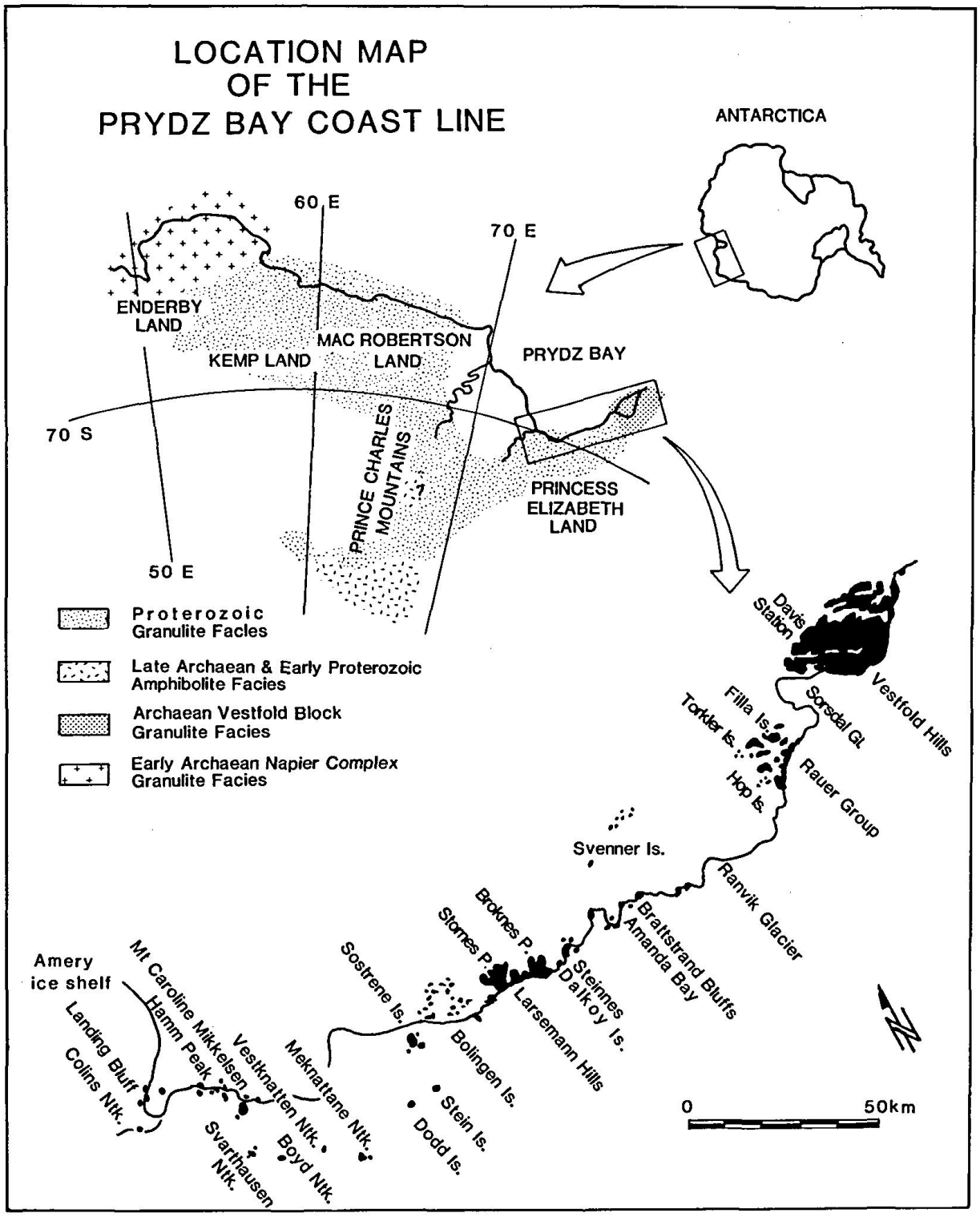

Рис. 3. Расположение оазиса Холмы Ларсеманн [Stüwe, Braun, Peer, 1989]

Район холмов Ларсеманн состоит в основном из псаммитовых и пелитовых парагнейсов, мафических и фельзических ортогнейсов амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма, а так же до- и синкинематических тел гранитоидов (рис. 4) [Carson и др., 1995; Carson и др., 2007; Grew и др., 2012; Tong и др., 2017a; Tong и др., 2017b].

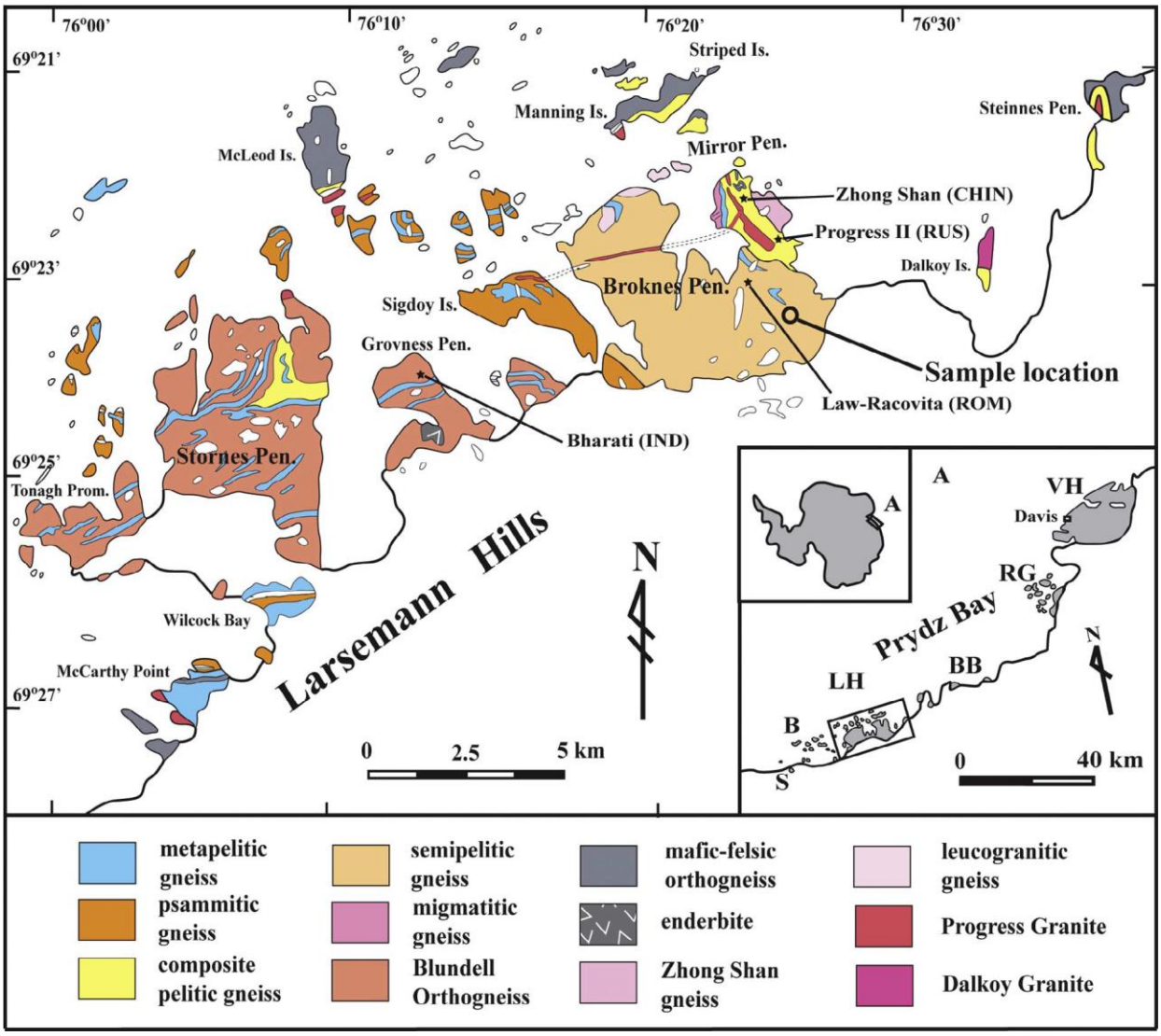

Рис. 4. Геологическая карта Холмов Ларсеманн (Залив Прюдс, Восточная Антарктида) ([Tong и др., 2017b])

Комплекс парагнейсов испытывал интенсивное частичное плавление и мигматизацию [Dirks, Carson, Wilson, 1993], и интерпретируется как обширный осадочный бассейн, простирающийся примерно на 130 км от островов Рауэр до островов Болинген [Carson и др., 1995]. Комплексы парагнейсов и ортогнейсов в этом районе рассматриваются как тектоническое чередование протерозойского кристаллического щита и осадочного чехла [Carson и др., 1995; Dirks, Carson, Wilson, 1993; Stüwe, Braun, Peer, 1989].

Внедрение докинематических вулканитов датируется ~1100 млн. лет, а метаморфизм гранулитовой фации - рубежом 1000 млн. лет назад [Wang и др., 2008]. Внедрение синкинематических тел датируется ~500 млн. лет, с этим же промежутком связан повторный метаморфизм гранулитовой фации [Harley, 1998; Tong и др., 2014].

Глава 3. Методы исследований

Изучение образцов проводилось главным образом в плоско-полированных пластинках следующими методами: оптико-микроскопическим и электронно-микроскопическим методами и рентгеноспектральным микроанализом.

Оптическое изучение проводилось на поляризационном исследовательском микроскопе Olympus BX53P (рис. 5.)

Рис. 5. Микроскоп Olympus BX53P

Электронно-микроскопические исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Геомодель» на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с аналитическими приставками (рис.6). Ускоряющее напряжение от 300 В до 30 кВ.

Изображения были получены при помощи детекторов обратнорассеянных (BSE) элекронов, а информация об элементном составе образцов при помощи спектрометра Oxford Instruments X-Max 20 для энерго-дисперсионного анализа (ЭДС).

Рис. 6. Электронный микроскоп Hitachi S-3400N с аналитическими приставками

Глава 4. Петрография пород

Gr-Bt-Sil гнейсы (серия образцов BB61-057)

К данной разновидности пород отнесены выколотые монолитные образцы S265, S089, S180. Порода имеет красно-рыжий оттенок, который обусловлен красноцветными пленками, содержащими оксиды Fe. Состоит из кварца (35%), калиевого полевого шпата (25%), андезина (20%), силлиманита (10%), биотита (5%), граната (5%). Акцессорные минералы в породе представлены кордиеритом, ильменитом, цирконом и монацитом.

Порода имеет лепидогранобластовую структуру (рис. 7, 8), для которой характерны простые полигональные границы лейкократовых минералов (кварца, КПШ, андезина) и пластинчатая форма слюд (биотита) и массивную текстуру.

Кварц образует ксеноморфные зерна размерами от 0,5 до 1 мм, также наблюдается небольшими (0,1 мм) округлыми включениями в калиевом полевом шпате.

Калиевый полевой шпат также, как и кварц, образует ксеноморфные зерна размерами от 0,3 до 1 мм.

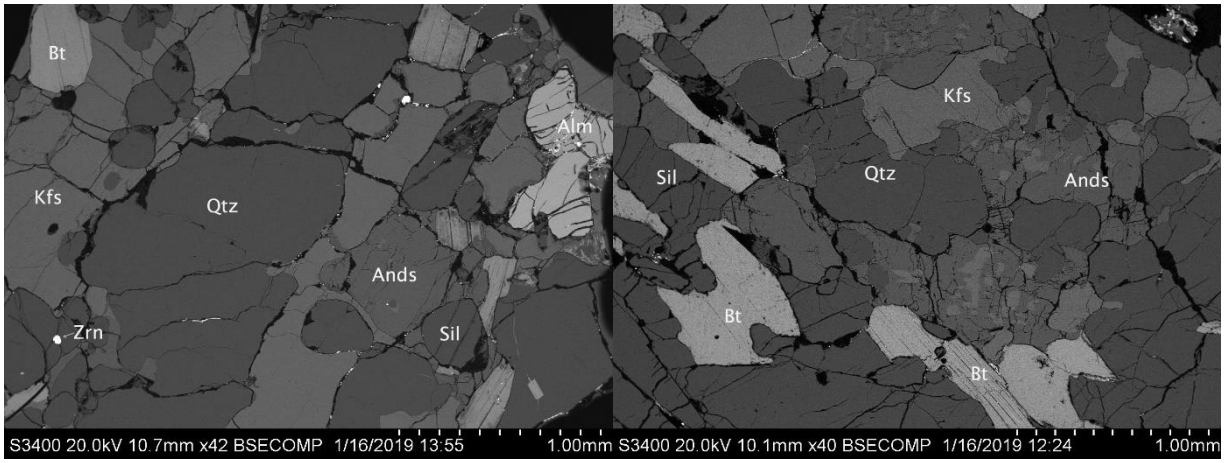

Рис. 7,8. Образцы: S180 – слева, S265 – справа. Общий облик породы с лепидогранобластовой структурой. Изображения в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Плагиоклаз представлен в породе андезином, выделяется в виде ксеноморфных зерен размерами от 0,5 до 0,8 мм. Интенсивно пертитизирован, в большинстве зерен обнаруживается полисинтетическое двойникование.

Силлиманит в породе образует идиоморфные удлиненные в одном направлении зерна с поперечной трещиноватостью размером (по короткой грани) от 0,1 до 0,5 мм. Встречается небольшими (0,1 мм) влючениями в биотите (см. рис. 10).

Биотит присутствует и в мелких (0,3 мм), и в более крупных (до 0,7 мм) индивидах. Выделяется как в виде идиоморфных лейст, так и в виде ксеноморфных пластинок.

Длинные оси зерен силлиманита и биотита иногда бывают вытянуты в одном направлении (рис. 9), но в целом минералы в породе расположены хаотично.

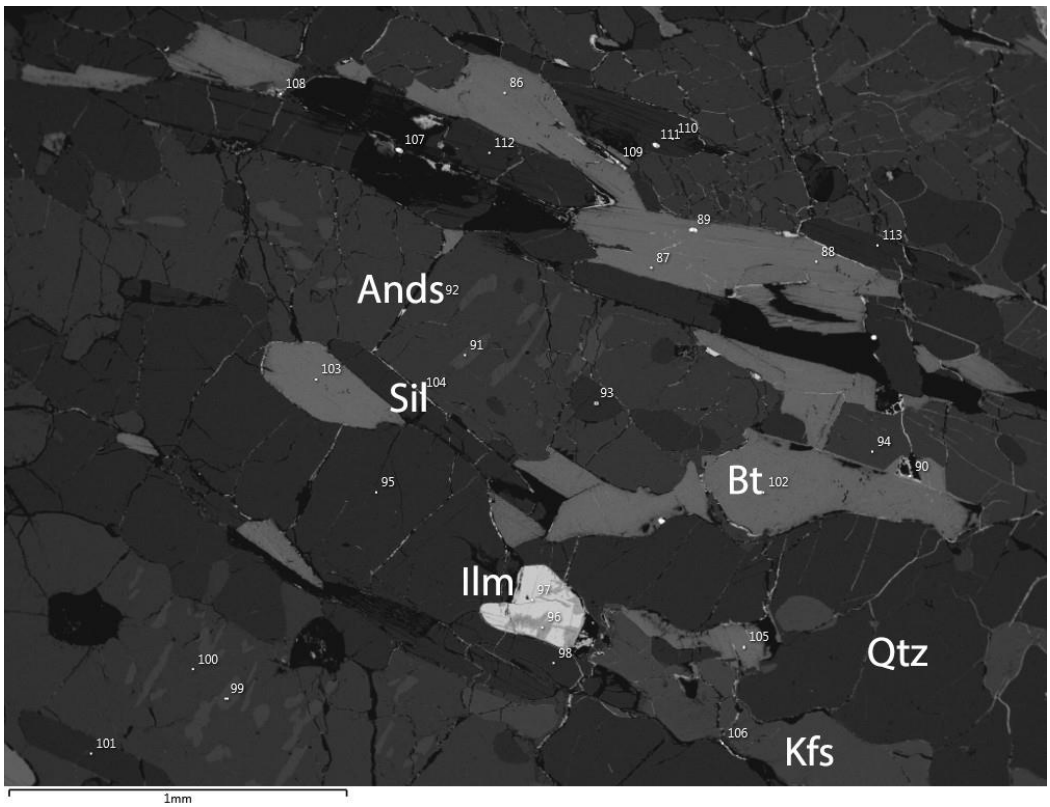

Рис 9. Образец S265. Наблюдается субпараллельное расположение удлиненных зерен силлиманита и биотита. Изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Альмандин образует в породе порфиробласты субидиоморфного до идиоморфного облика размерами от 0,5 до 2 мм. Часто сильно дезинтегрирован (см. рис. 10).

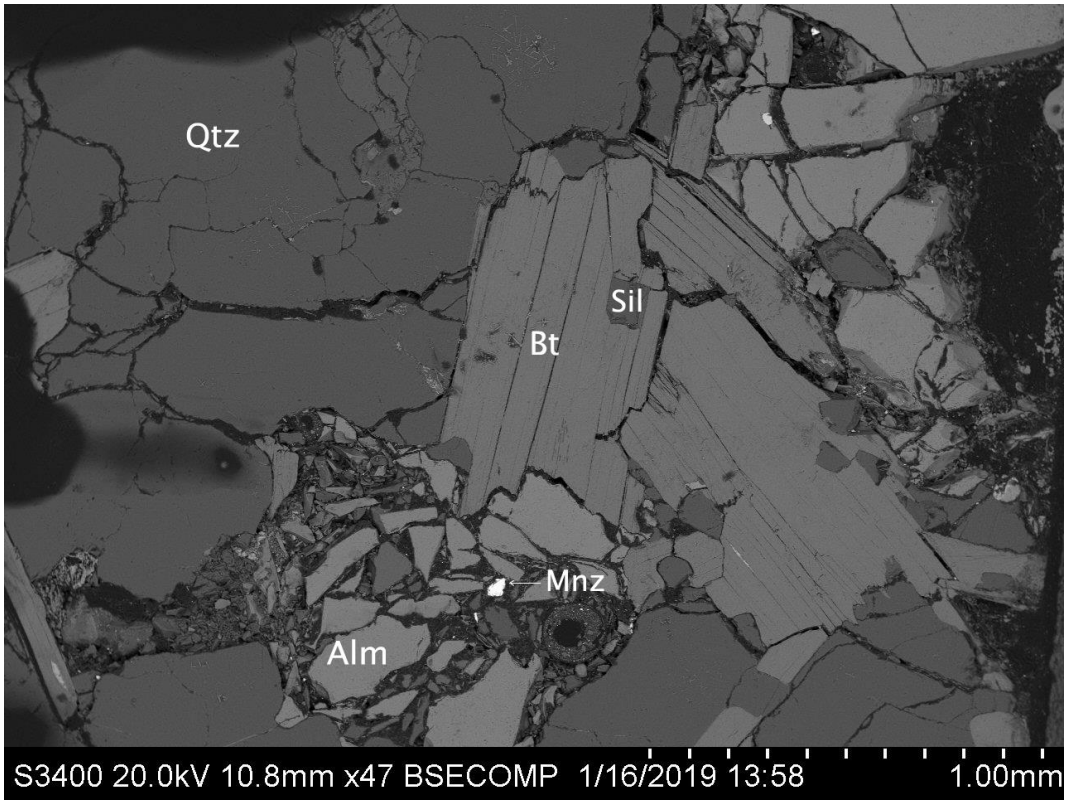

Рис. 10. Образец S180. Зерно альмандина, сохранившее внешнюю форму, но внутренне полностью расколотое. Изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Акцессорные минералы встречаются как включения в других минералах (монацит и циркон в биотите или альмандине) или как обособленные зерна (кордиерит, ильменит).

Данная порода претерпела только физические изменения, что выражается в сильной трещиноватости минералов, в некоторых местах почти полной их дезинтеграции (пример – зерно альмандина на рис. 10, которое сохранило внешние очертания). Также она легко разрушается под действием давления, превращаясь в песок.

Gr-Sil калишпатовые гнейсы (серия образцов BB63-09)

К данной разновидности пород отнесены образцы 037cm01, 043cm07, 044cm08, 047cm11, 050cm14, 053cm17, представляющие собой вертикальный профиль кернового материала. Порода светлая, имеет слегка желтоватый цвет, вокруг зерен альмандина выражены красновато-рыжие ореолы (рис. 11). Вверх по разрезу порода приобретает все более буровато-оранжевый цвет. Приповерхностный керн имеет ярко выраженный красновато-коричневый оттенок и мощную глазурированную светло-красную корку-прокраску (1,5-2 см) (рис. 12).

Данная порода более плотная, чем вышеописанная, не рассыпается в руках, вверх по разрезу становится все более сцеметированной, что связано с образованием скального «загара». По сути он представляет собой микроотложения, которые «привариваются» к поверхности минералов соединениями Mn, Fe и Si [Мергелов и др., 2012].

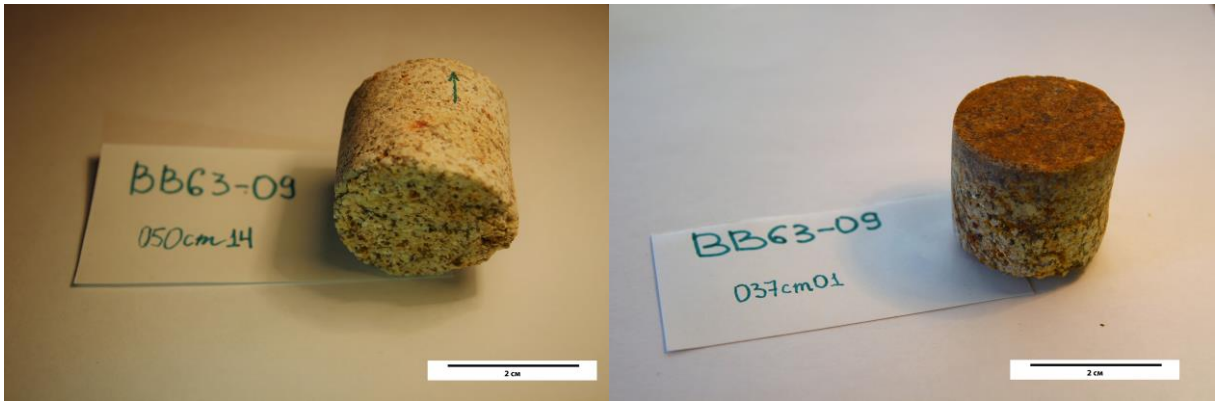

Рис. 11, 12. Макрофото образцов: 050cm14 – слева, 037cm01 (приповерхностный) – справа

Состоит из калиевого полевого шпата (50%), кварца (30%), андезина (10%), силлиманита (5%), граната (5%). Акцессорные минералы представлены ильменитом, рутилом, цирконом, монацитом, мусковитом, биотитом.

Порода имеет мозаичную (или гранулитовую) структуру (рис. 13), для которой характерны простые полигональные границы лейкократовых минералов (кварца, КПШ, андезина) и массивную текстуру.

Калиевый полевой шпат образует ксеноморфные зерна размерами от 0,5 до 1,5 мм с ярковыраженной спайностью по двум направлениям (см. рис 14, 15). В нем присутствуют небольшие (0,1-0,2 мм) включения кварца, как и в вышеописанных гнейсах. Также образует пертитовые срастания с плагиоклазами.

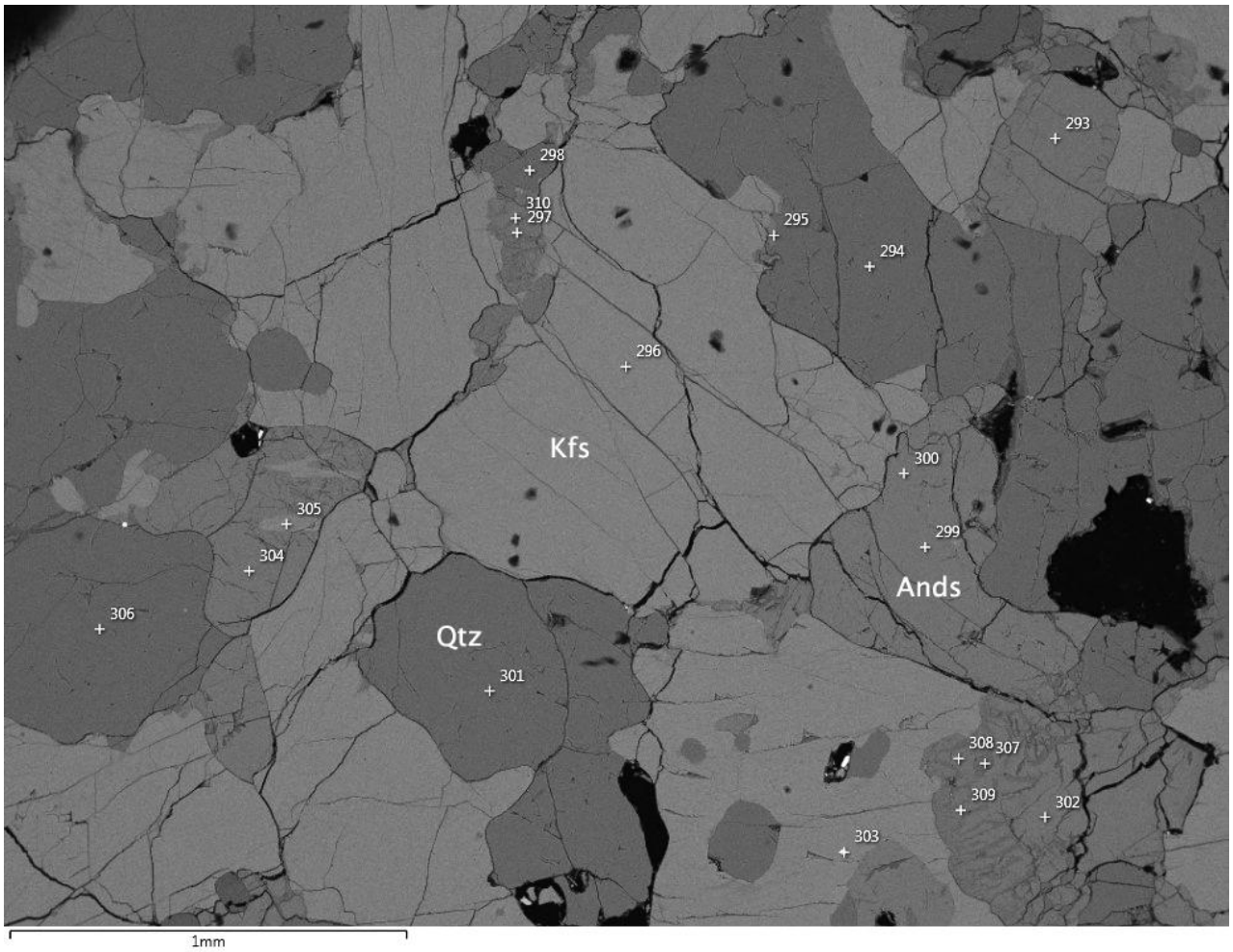

Рис. 13. Образец 037cm01. Общий облик породы с мозаичной структурой. В правом нижнем углу наблюдаются мирмекитовые сростки кварца и андезина. Изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Кварц выделяется в виде ксеноморфных зерен размерами от 0,5 до 1 мм. Также обнаруживается в мирмекитовых структурах с плагиоклазом, образуя тонкие червеобразные изогнутые вростки в андезине на границе с индивидами калиевого полевого шпата (см. рис. 15, 16).

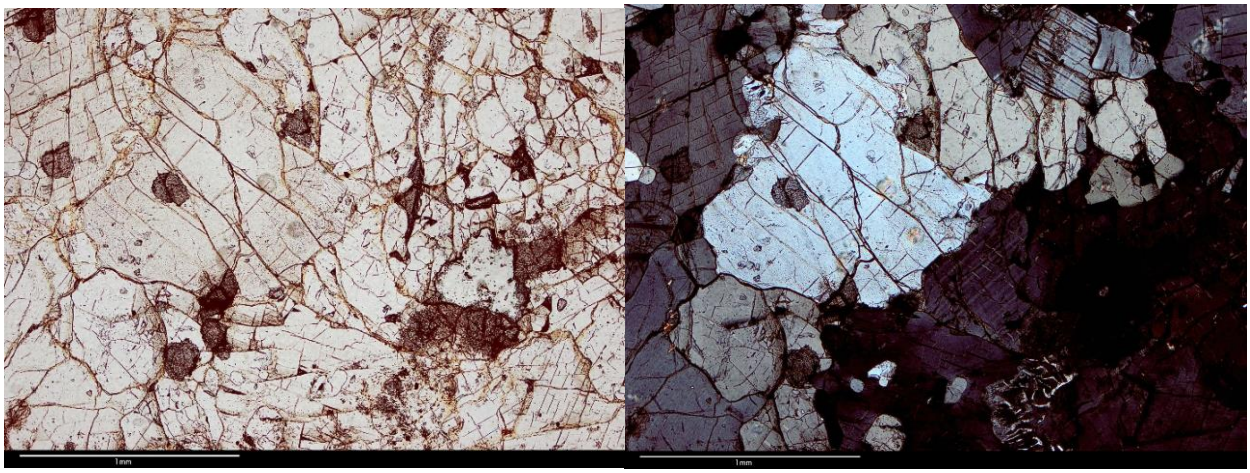

Рис 14,15. То же, что и на рис. 11. Микрофотография образца 037cm01. Верхняя – николи ||, нижняя – николи X

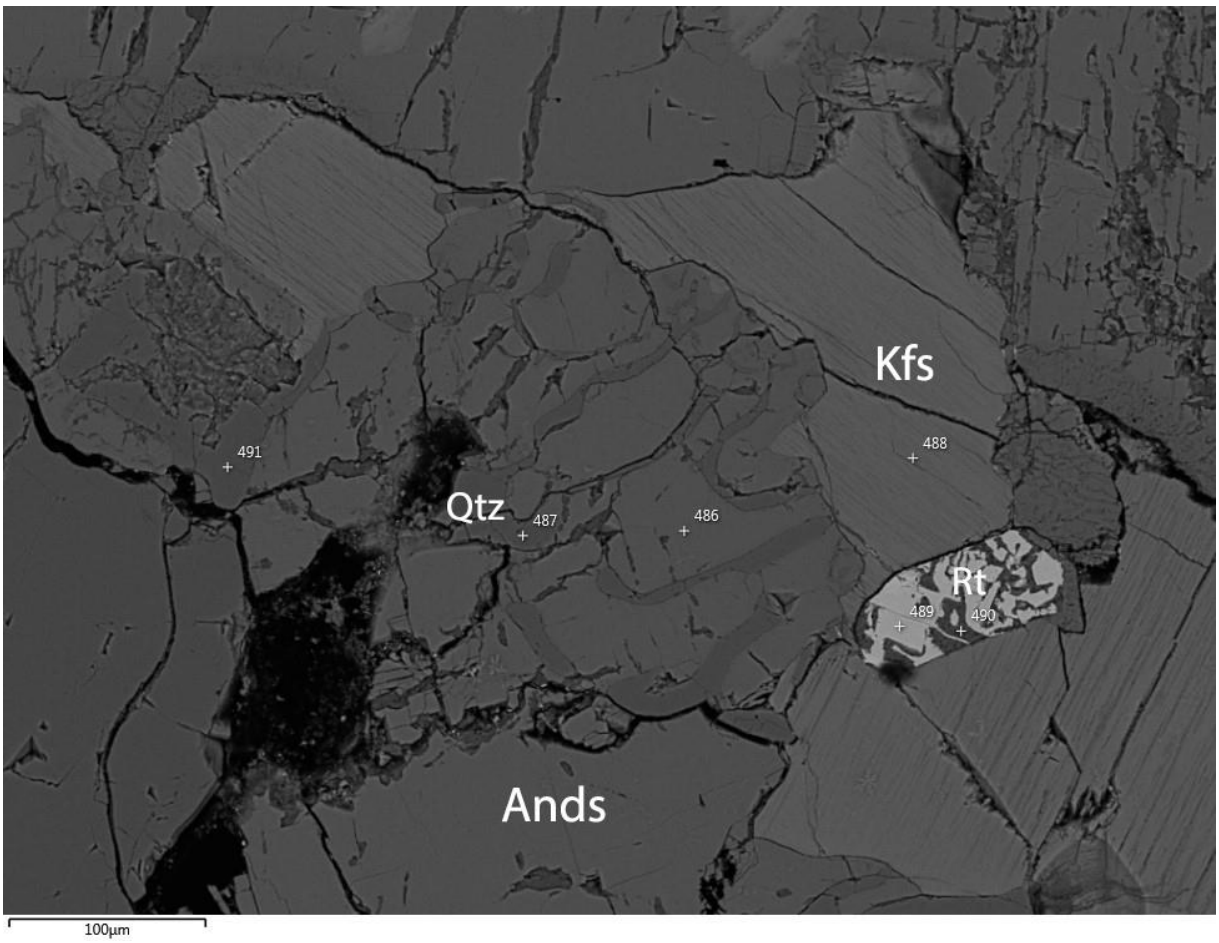

Рис. 16. Образец 047cm11. Мирмекитовые сростки кварца и андезина на границе с КПШ. Изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Плагиоклаз представлен в породе андезином, выделяется в виде ксеноморфных зерен размерами от 0,5 до 0,8 мм. Интенсивно пертитизирован (рис. 17, 18), в большинстве зерен обнаруживается полисинтетическое двойникование (рис. 15).

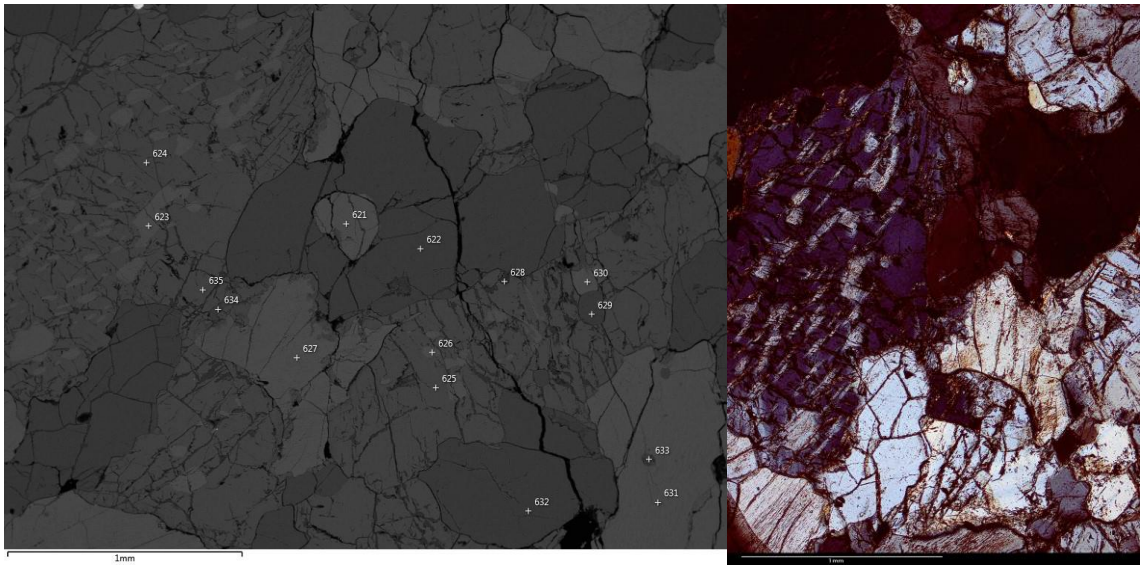

Рис 17,18. Образец 044cm08. Пертитовые срастания андезина и калиевого полевого шпата. Изображение в обратно-рассеянных электронах – слева; микрофотография, николи X – справа

Силлиманит в породе образует идиоморфные удлиненные в одном направлении зерна с поперечной трещиноватостью размером (по короткой грани) от 0,1 до 0,5 мм (рис. 19,20).

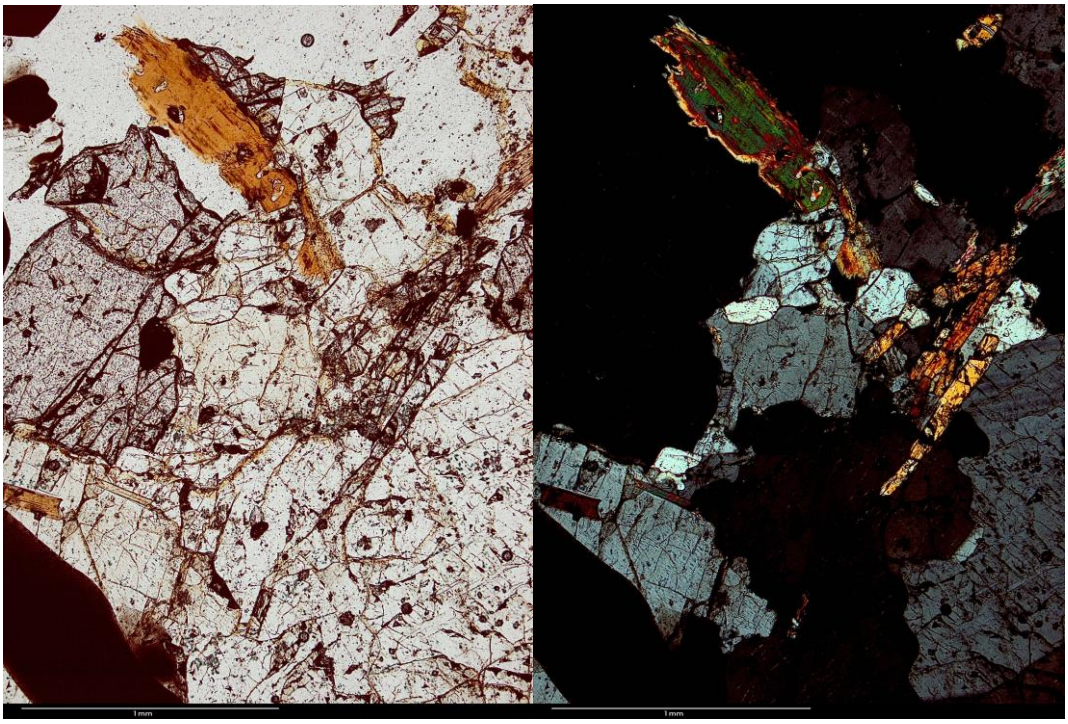

Рис. 19,20. Микрофотография образца 053cm17. Появление биотита в нижней части керна Слева – николи ||, справа – николи X

Альмандин образует в породе порфиробласты субидиоморфного до идиоморфного облика размерами от 0,5 до 2 мм (рис. 21).

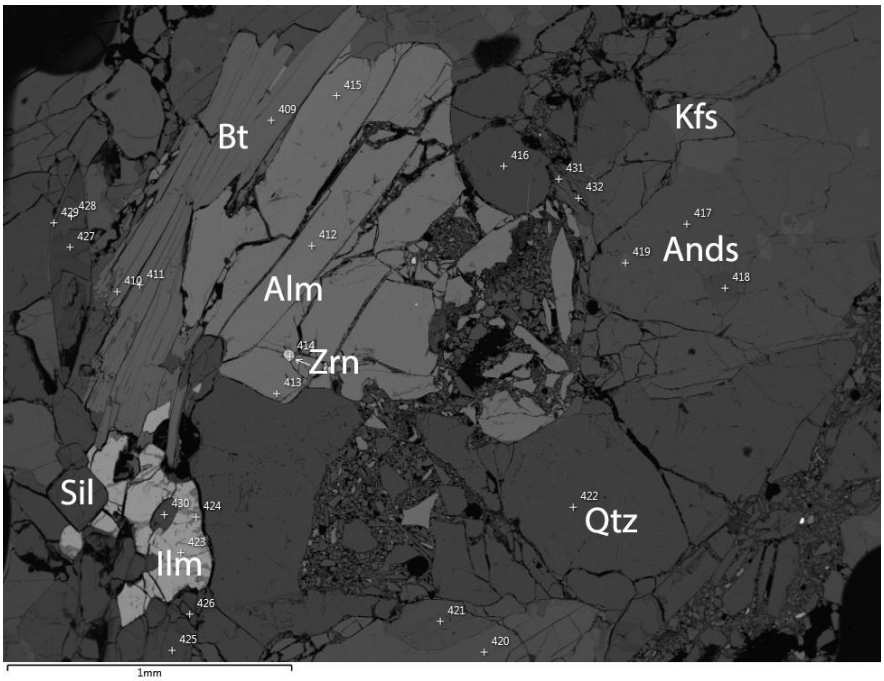

Рис 21. Образец 053cm17. Зона сильной трещиноватости. Изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Биотит присутствует в виде небольших (0,3-0,5 м) идиоморфных лейст только в нижней части керна (образец 053cm17) (рис. 19, 20, 21).

Другие *акцессорные минералы* встречаются как включения в других минералах (монацит и циркон в биотите или альмандине) или как обособленные зерна (мусковит, рутил, ильменит).

Так же в данной породе был обнаружен неопределенный минерал, имеющий цвет от зеленовато-желтого до желтовато-оранжевого, слабое двупреломление (низкие цвета интерференции (до белых)) и показатель преломления до 1,47 (полоска Бекке бежит на КПШ). Данный минерал образует псевдоморфозы по силлиманиту (рис. 22, 23). Предположительно является низкотемпературной фазой.

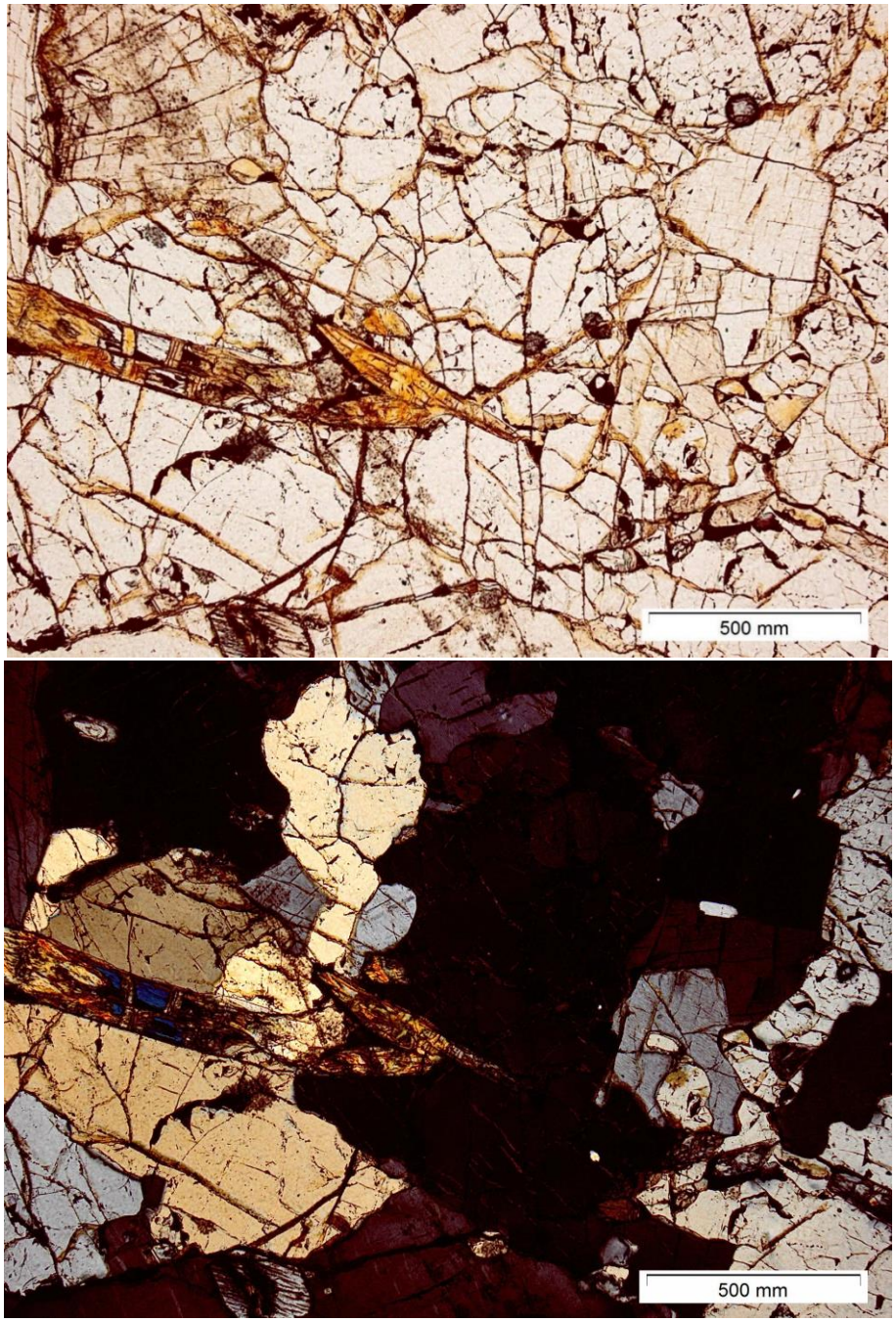

Рис. 22, 23. Микрофотографии образца 043cm07. Псевдоморфоза неизвестной фазы по силлиманиту. Верхняя – николи ||, нижняя – николи X

Gr-Sil-Bt калишпатовые гнейсы (серия образцов BB63-06)

К данной разновидности пород отнесен образец 031cm01 (рис. 24, 25), представляющий собой приповерхностную часть керна. Имеет ярко выраженный красновато-коричневый оттенок и мощную глазурированную темно-красную корку-прокраску (1,5-2 см), как и образец 037cm01. Несмотря на наиболее сильную трещиноватость на минеральном уровне, из всех описанных образцов данные породы самые плотные, что связано со вторичной цементацией и наиболее интенсивным развитием скального «загара».

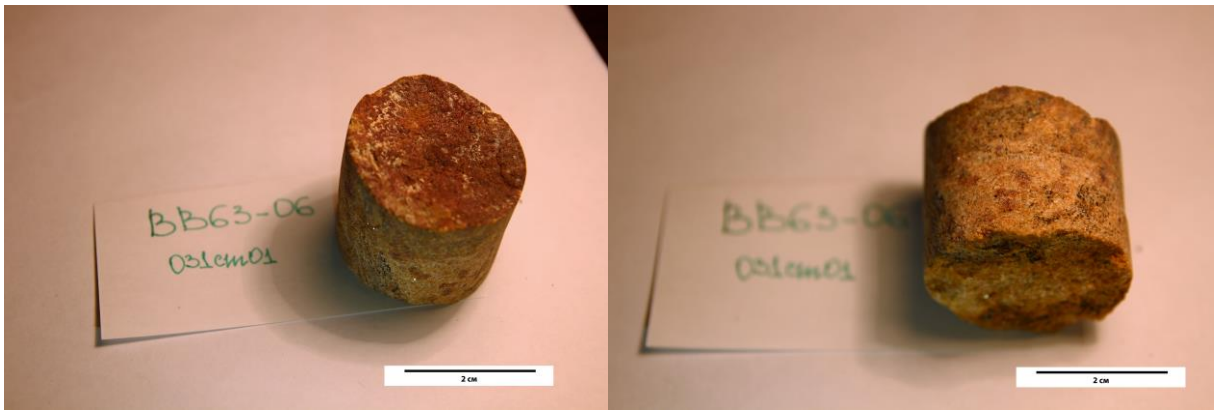

Рис. 24, 25. Макрофотографии образца 031cm01

Порода состоит из калиевого полевого шпата (35%), кварца (35%), силлиманита (15%), биотита (5%), андезина (5%), граната (5%). Акцессорные минералы представлены ильменитом, цирконом, мусковитом.

Порода имеет лепидогранобластовую структуру, для которой характерны простые полигональные границы лейкократовых минералов (кварца, КПШ) и пластинчатая форма слюд (биотита) и слабополосчатую текстуру.

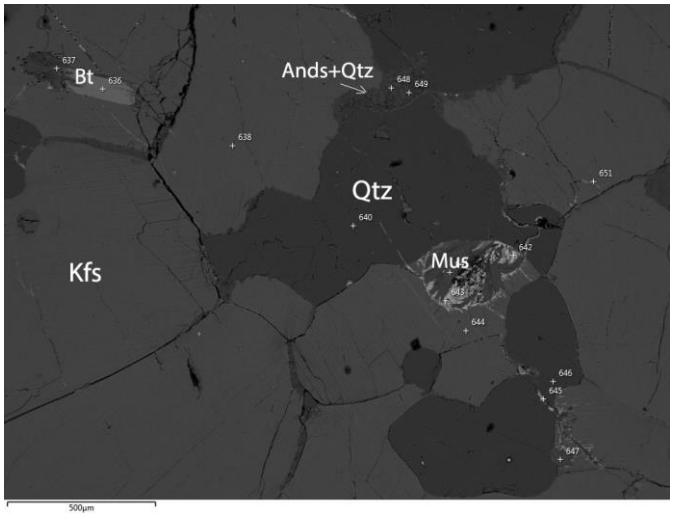

Рис. 26. Образец 031cm01g. Часть образца с мозаичной структурой. В верхней части изображения наблюдаются мирмекитовые срастания кварца и андезина. Изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Калиевый полевой шпат образует ксеноморфные зерна размерами от 0,5 до 1,5 мм с ярковыраженной спайностью по двум направлениям. В нем присутствуют небольшие (0,1-0,2 мм) включения кварца, как и в вышеописанных гнейсах.

Кварц образует ксеноморфные зерна размерами от 0,5 до 1 мм. Также образует мирмекитовые структуры с плагиоклазом, образуя тонкие червеобразные изогнутые вростки в андезине на границе с индивидами калиевого полевого шпата (рис. 26).

Силлиманит в породе образует идиоморфные удлиненные в одном направлении зерна с поперечной трещиноватостью размером (по короткой грани) от 0,1 до 0,5 мм (рис. 27). В данной породе псевдоморфозы по данному минералу не обнаружены.

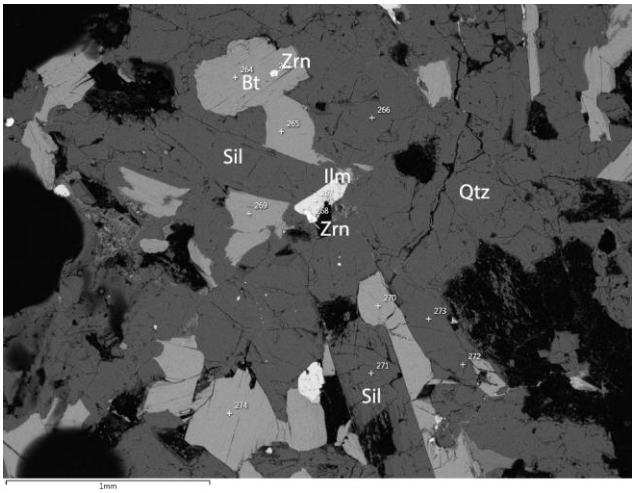

Рис. 27. Образец 031cm01v. Часть образца с лепидогранобластовой структурой. Изображение в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Биотит присутствует как в виде идиоморфных лейст (рис. 28), так и в виде субидиоморфных выделений повсеместно (рис. 27). Размер зерен от 0,2 до 0,7 мм.

Альмандин образует в породе порфиробласты субидиоморфного до идиоморфного облика размерами от 0,5 до 2,5 мм. В гранатах обнаружены множественные включения кварца, биотита, циркона (рис. 28).

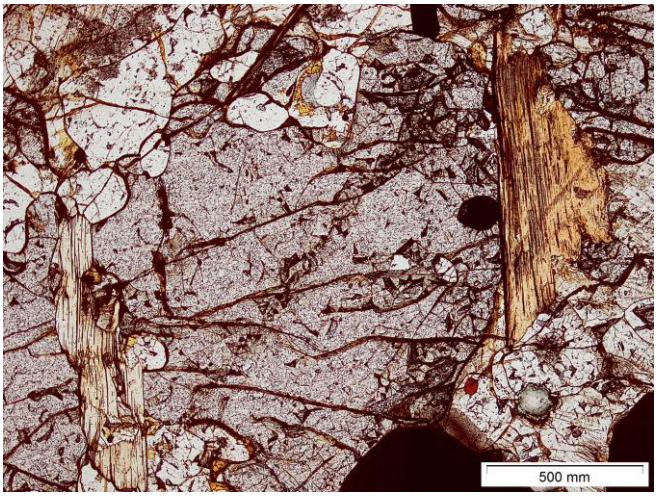

Рис. 28. Микрофотография образца 031cm01(v или g?). Крупный трещиноватый порфиробласт альмандина с включениями кварца и биотита

Плагиоклаз представлен в породе андезином, выделяется в виде ксеноморфных зерен размерами до 0,5 мм и в виде мирмекитовых срастаний с кварцем.

Акцессорные минералы встречаются как включения в других минералах (циркон в биотите или альмандине) или как обособленные зерна (мусковит, ильменит).

Глава 5. Химия минералов

Изучение химического состава минералов производилось на рентгеноспектральном микроанализаторе. По результатам анализа для всех минералов рассчитывались кристаллохимические коэффициенты с использованием программы MINAL 3.0 (Доливо-Добровольский Д. В., 2010-2018).

5.1. Полевые шпаты

Для полевых шпатов при помощи формульных коэффициентов были рассчитаны процентные содержания миналов (конечных членов полевошпатовой серии) - ортоклаза ($KAlSi_3O_8$), альбита ($NaAlSi_3O_8$) и анортита ($CaAl_2Si_2O_8$), которые затем были нанесены на диаграмму составов (рис. 29). В изучаемых породах обнаруживаются две разновидности – существенно калиевые полевые шпаты и Ca-Na плагиоклазы.

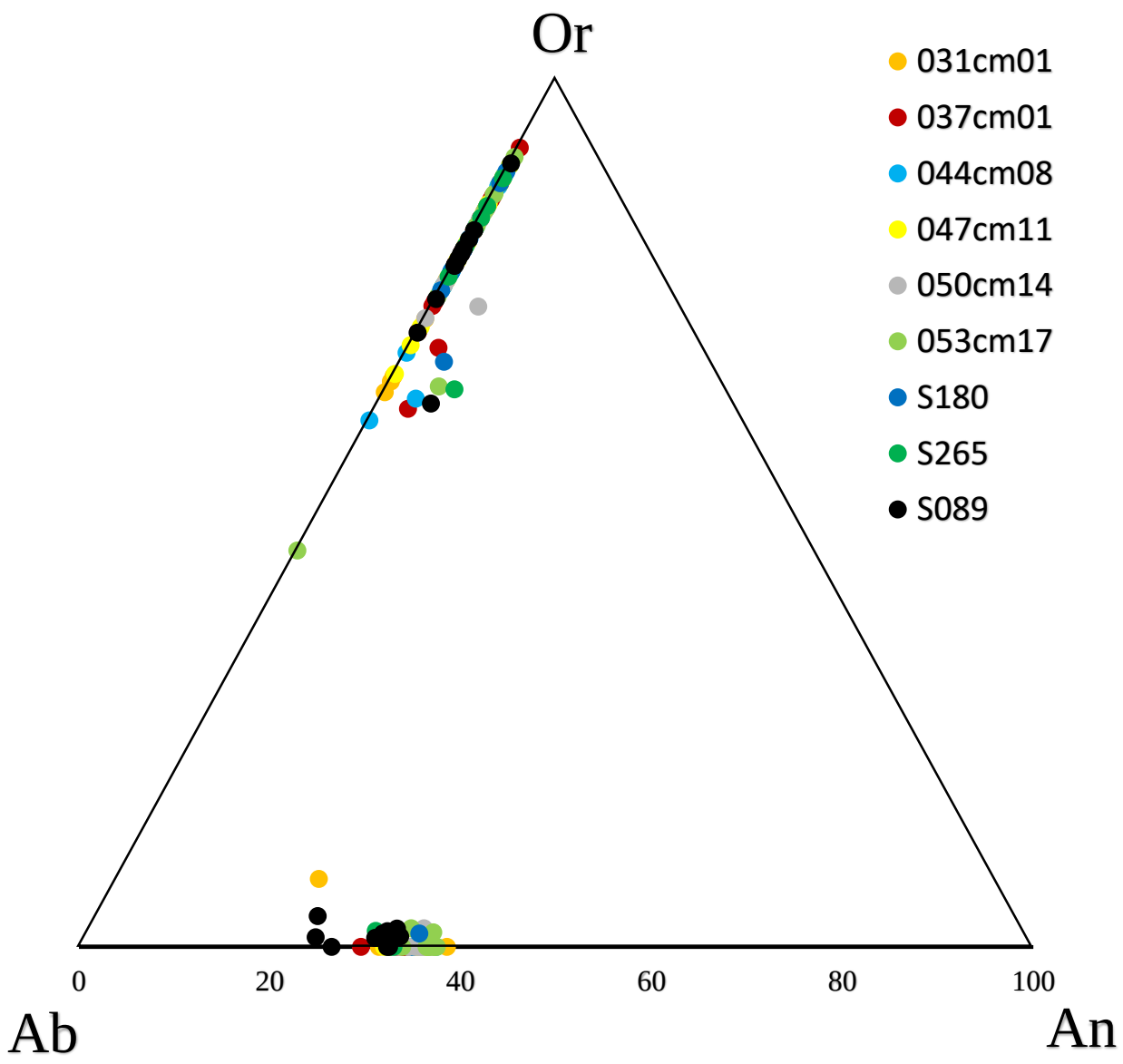

Рис. 29. Диаграмма составов полевых шпатов

5.1.1. Калиевые полевые шпаты

Состав существенно калиевых полевых шпатов (приложение 2) варьирует в пределах изоморфного ряда ортоклаз ($KAlSi_3O_8$) – альбит ($NaAlSi_3O_8$) внутри каждого образца (рис. 29), но существенно тяготеет к ортоклазу. Содержание калия варьирует от 8 до 16 масс. %, натрия – от 1 до 5 масс. %. Из примесей содержат Fe^{3+} и Ca^{2+}.

5.1.2. Плагиоклазы

Состав плагиоклаза (приложение 3) варьирует в пределах изоморфного ряда альбит ($NaAlSi_3O_8$) – анортит ($CaAl_2Si_2O_8$) и представлен андезином, содержащим 30-40% анортитовой молекулы. Содержание кальция варьирует от 4,7 до 8 масс. %, натрия – от 6,3 до 8,9 масс. %. Содержат до 0,6 масс. % калия.

5.2. Гранаты

Состав гранатов (приложение 4) варьирует в пределах изоморфного ряда альмандин ($Fe_3Al_2(SiO_4)_3$)– пироп ($Mg_3Al_2(SiO_4)_3$). Содержание альмандинового минала для всех пород >70% (рис. 30). Рассчитанные минальные соотношения представлены в таблице 1.

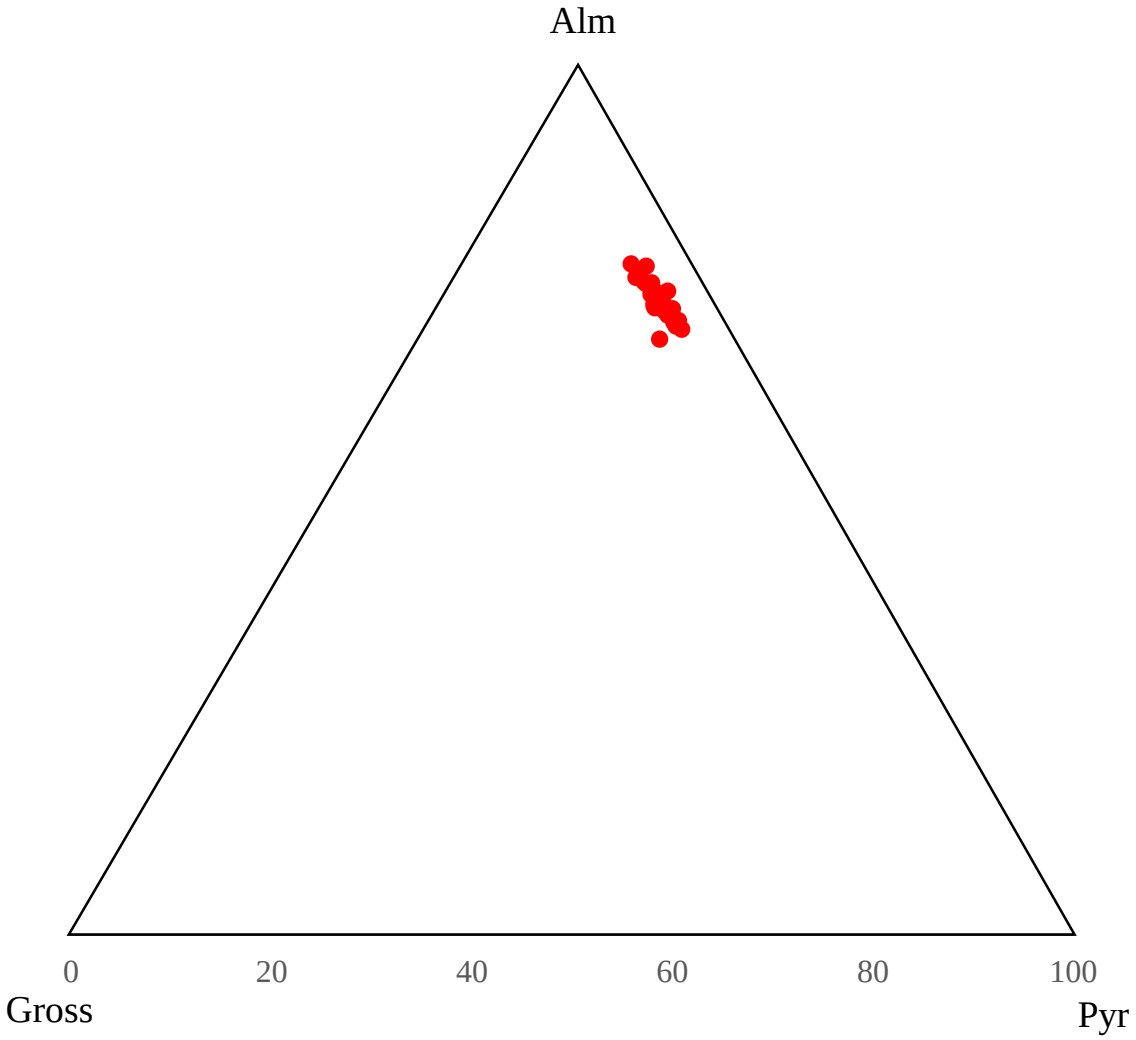

Рис. 30. Диаграмма составов гранатов. Alm – альмандин, Pyr – пироп, Gross – гроссуляр

Alm	Pyr	Gross	Alm	Pyr	Gross
74.30534	22.38526	3.847374	77.17222	18.81034	4.37772
73.03861	21.66874	5.210259	72.65202	21.84018	5.211004
73.11862	22.19388	4.525143	73.52185	21.69023	4.762293
72.38066	22.07068	5.558807	71.10207	24.54602	4.807005
71.52381	23.84127	5.014905	71.62791	23.87597	4.852636
72.68139	22.64984	4.985388	71.54548	23.76456	5.137337
74.19051	21.094	4.812059	70.27112	25.22068	5.034801
72.27723	23.89013	4.43483	75.24256	20.3078	5.293496
74.55696	20.72785	4.824354	74.46092	20.88949	5.040189
70.90113	25.18773	4.36237	75.1	19.86667	4.919667
70.8059	24.83537	4.547119	73.23569	22.03728	5.262583
70.70104	24.80352	4.763932	73.94414	21.42371	4.895796
69.90199	25.98799	4.708629	68.73344	24.37732	5.059586
72.18188	23.27123	4.843626	72.80614	22.25559	4.617769
73.94054	21.4105	5.026172	75.3542	19.50577	4.955863
73.26422	22.40025	4.468349	71.74422	23.80315	4.787794
73.84615	21.56986	4.330022	72.41725	22.7683	4.840691
72.02797	23.17228	4.618193	73.9145	20.90848	4.985211
77.43676	17.16695	4.892965	75.89845	18.4306	5.665007

Таблица 1. Содержание миналов в гранатах

5.3. Биотит

Слюды в данных породах представлены членами флогопит-аннитовой серии, являясь Mg-биотитами. Для некоторых анализов (приложение 5) были рассчитаны соотношения миналов – аннита (Ann), флогопита (Phl), сидерофиллита (Sid) и истонита (Eas) (таблица 2).

Спектр	Phl	Ann	Sid	Eas
241	25.936	54.057	6.475	13.503
242	38.813	46.031	6.933	8.223
255	43.55	49.303	3.352	3.795
259	40.739	45.202	6.664	7.394
260	41.214	49.033	4.454	5.299
264	34.855	48.379	7.021	9.745
265	34.731	47.225	7.647	10.398
269	36.062	46.244	7.753	9.941
270	39.28	48.972	5.229	6.519
274	37.59	44.347	8.287	9.777

Таблица 2. Содержание миналов в биотитах

Содержание всех петрогенных оксидов достаточно сильно варьирует для слюд: SiO_2 – от 31,91 до 39,08 масс.%, TiO_2 – от 2,54 до 6,33 масс.%, Al_2O_3 – 12,38 до 18,8 масс.%, FeO – от 11,84 до 21,67 масс.%, MgO – от 7,28 до 16,87 масс.%, K_2O – от 8,36 до 10,75 масс.%. Примесями являются Ca – до 1,34 масс.% и Na – до 1,26 масс.%.

5.4. Нейзвестный минерал

Нейзвестный минерал по составу (приложение 6) является алюмосиликатом с катионами Fe и Mg. Содержание петрогенных оксидов варьирует в пределах: SiO_2 – от 38,8 до 51,24 масс.%, TiO_2 – до 1,69 масс.%, Al_2O_3 – от 23,25 до 38,59 масс.%, FeO – от 0,67 до 17,06 масс.%, MgO – от 0,34 до 8,39 масс.%. Примесями являются Ca – до 1,22 масс.% и Na – до 1,26 масс.%, K – до 2 масс.%. Частично анализ представлен в таблице 3.

Спектр	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Общее
15	47.92	0	32.81	9.65	7.93	0	0	0	98.31
19	50.35	0	34.29	9.7	8.39	0	0	0	102.73
51	49.1	0	33.08	9.77	7.78	0	0	0	99.73
385	47.08	0.99	36.54	1.14	0.7	0	0	0	86.45
400	43.16	1.17	33.09	1.02	0.95	1.22	1.26	0.33	82.2
720	41.34	1.69	33.06	5.35	0.74	0	0	0.38	82.56
276	44.17	0	34.66	3.66	0.89	0	0.32	0	83.7
312	45.3	0	35.36	2.16	1.22	0	0.18	0.2	84.42
315	47.94	0	31.96	1.5	1.26	0	0	0	82.66
325	41.6	0	32.52	1.56	0.94	0	0	0	76.62
331	47.42	0	23.92	7.7	2.42	0	0	0	81.46
332	44.84	0	36.54	1.92	0.74	0	0	0	84.04
339	47.02	0	36.32	1.46	0.78	0	0	0	85.58

Таблица 3. Представительные анализы неизвестного минерала

Глава 6. Условия образования

Для данных пород были рассчитаны P-T условия метаморфизма при помощи Ti-в-биотите геотермометра по Henry et al. (2005). Данный геотермометр является самым чувствительным к содержанию титана в диапазоне 0,0-0,3 apfu (atoms per formula unit – формульный коэффициент). Геотермометрические расчеты на основе количеств Ti и Mg/(Mg+Fe) в биотите могут быть применены к ильменит- и/или рутил-содержащим метапелитам, уравновешенным при температурах от 500 до 800°C и давлениях 4-6 кбар [Erić и др., 2009]. Содержание Ti и Mg/(Mg+Fe) в биотитах исследуемых образцов позволяет воспользоваться данным геотемометром. Частота изотерм для него предполагает, что все изучаемые биотиты находятся в достаточно чувствительной части диаграммы Ti – X_{Mg} (рис. 31).

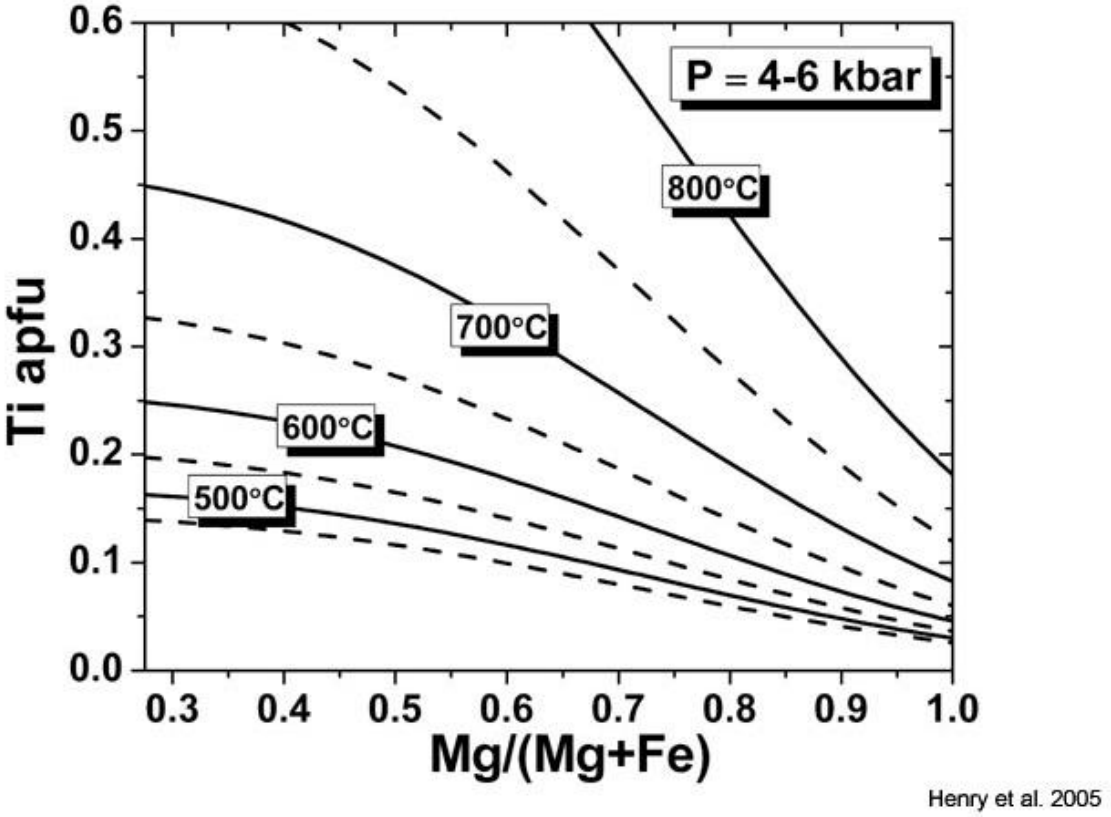

Рис. 31. Изотермы для геотермометра (Henry et al. 2005)

Полученные при расчетах температуры на основе Ti-термометра варьируют от 600 до 720°C для давления 4—6 кбар (рис. 32). Они соответствуют верхам амфиболитовой фации метаморфизма биотит-силлиманитовой-гранат-калишпатовой субфации по [Бушмин, Глебовицкий, 2008] и коррелируется с минеральным парагенезисом изучаемых пород (рис.33.).

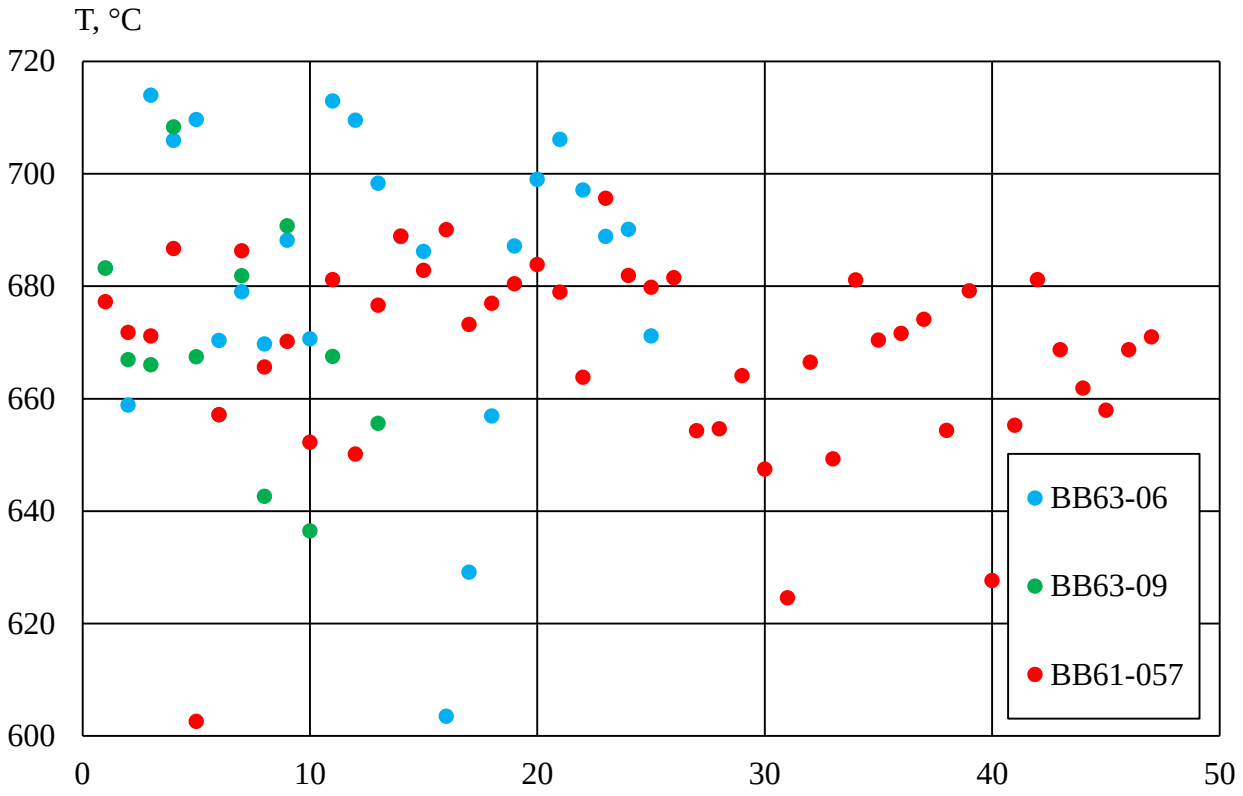

Рис. 32. Диаграмма рассчитанных температур для всех анализов биотитов

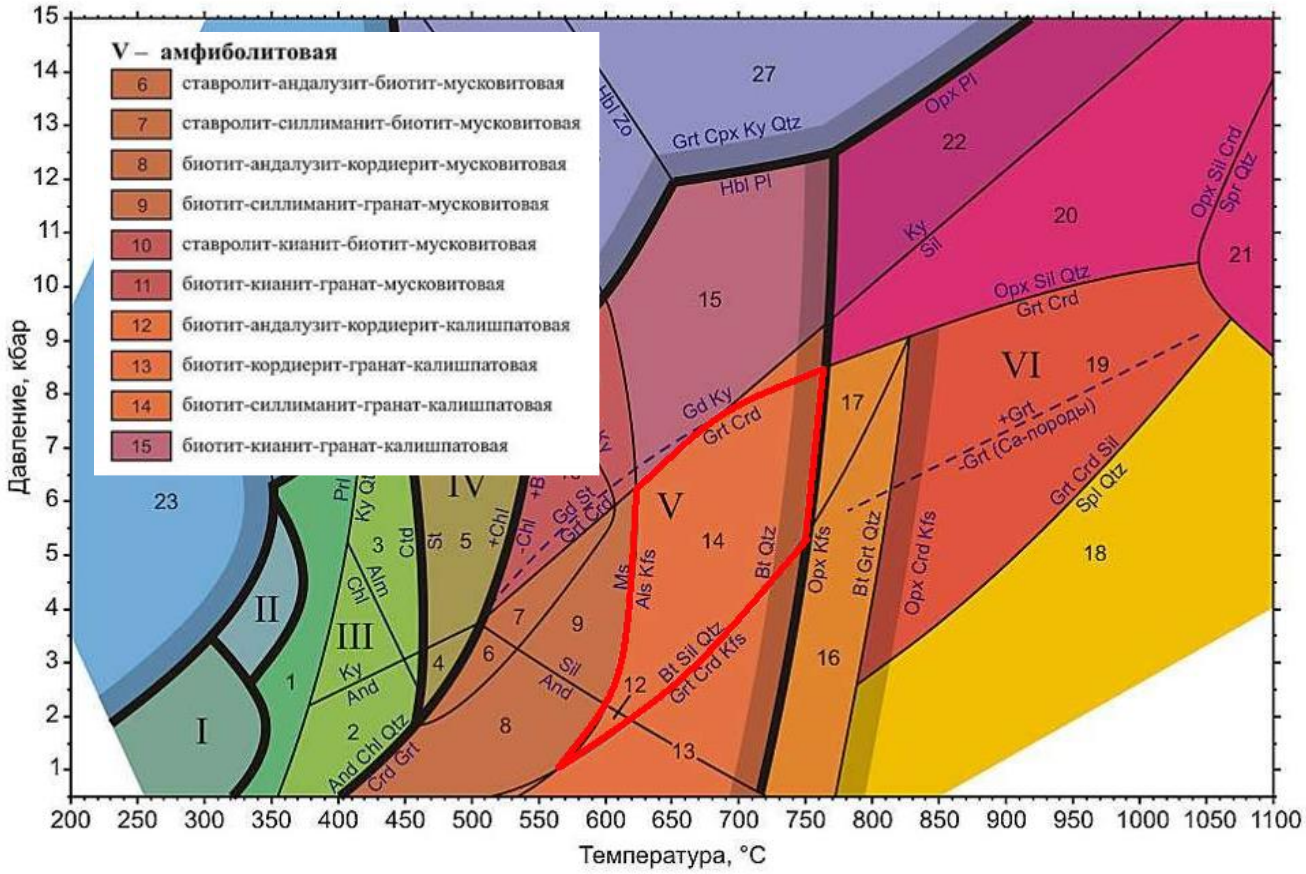

Рис. 33. Схема минеральных фации метаморфизма [Бушмин, Глебовицкий, 2008]

Для пород данной области P-T условия метаморфизма были исследованы многими авторами с начала освоения территории, некоторые из них представлены в таблице 4.

Автор	***M1***	***Возраст***	***M2***	***Возраст***	***M3***	***Возраст***
[Stüwe, Powell, 1989]	4.5 кбар и 750 °C	~1000 Ma	3.0 кбар и 600 °C	~1000 Ma	Зеленосланцевая фация	~500 Ma
[Ren и др., 1992]	9.0 кбар и 850 °C	–	4.5 кбар и 750 °C	~500 Ma	Зеленосланцевая фация	–
[Tong, liu, 1997]	9.5 кбар и 870 °C	~1000 Ma	–	–	–	–
[Tong и др., 2014]	~9 кбар и 900 °C	–	6–7 кбар и 850 °C	–	4–5 кбар и ~700 °C	–
Автор	***M2***	***Возраст***	***M3***	***Возраст***	***M4***	***Возраст***
[Carson и др., 1997]	~7 кбар и 800 °C	~500 Ma	4.5 кбар и 750 °C	~500 Ma	~3.0 кбар и ~650 °C	~500 Ma

Табл. 4. Сводная таблица оценок P-T условий и возрастов из литературы для высокотемпературных метаморфических пород из района Холмов Ларсеманн

Заключение

Исследуемые образцы в результате петрографического изучения были разделены на три группы – Gr-Bt-Sil гнейсы, Gr-Sil калишпатовые гнейсы, Gr-Sil-Bt калишпатовые гнейсы – по процентному соотношению породообразующих минералов.

В результате химического анализа полевые шпаты были разделены на две группы – существенно калиевые полевые шпаты и плагиоклазы. КПШ представлены членами изоморфного ряда ортоклаз – альбит, а плагиоклазы содержат от 30 до 40% анортитовой молекулы и представлены андезином во всех породах. Гранаты существенно альмандиновые с содержанием минала пиропа >30%. Биотиты представлены членами флогопит-аннитовой серии, относятся к Mg разновидности.

Изучаемые породы подвергаются современному выветриванию. Физическому, которое диагностируется даже микроскопически по сильной трещинноватости минералов, и предположительно химическому – обнаруженная неизвестная фаза, образующая псевдоморфозы по силлиманиту (только в образцах серии BB63-09), рассматривается как низкотемпературная. Так же породы повсеместно вторично сцементированы образованием скального «загара».

Были рассчитаны P-T условия метаморфизма на основе Ti-термометра: температуры варьируют от 600 до 720°C для давления 4—6 кбар (рис. 32). Они соответствуют верхам амфиболитовой фации метаморфизма биотит-силлиманитовой-гранат-калишпатовой субфации и коррелируются с минеральным парагенезисом изучаемых пород.

Дальнейшие исследования неизвестной фазы помогут точнее оценить степень вторичных преобразований пород в данном регионе.

Приложения

Приложение 1

Буквенные обозначения минералов:

Alm – альмандин

Ands – андезин

Bt – биотит

Kfs – калиевый полевой шпат

Mnz – монацит

Mus – мусковит

Qtz – кварц

Rt – рутил

Sil – силлиманит

Zrn – циркон

Приложение 2

Представительные анализы калиевых полевых шпатов

Спектр	SiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	Na_2O	K_2O	Сумма
240	61.98	18.35	0	0	3.73	10.98	95.04
245	62.5	18.18	0	0	3.55	10.2	94.43
250	64.74	19.02	0	0	1.6	14.56	99.92
280	63.64	18.72	0	0	2.15	13.6	98.11
281	64.53	18.34	0	0	2.15	13.83	98.85
285	63.47	18.79	0	0	4.04	10.98	97.28
286	63.74	18.68	0	0	1.32	14.87	98.61
287	61.64	18.47	0	0	2.45	12.49	95.05
288	63.74	18.57	0	0	1.23	14.91	98.45
289	60.04	18.77	2.87	0	1.43	13.15	96.26
296	63.78	19.4	0	0	2.6	12.76	98.54
300	61.8	18.74	0	0	1.26	14.54	96.34
305	63.3	18.96	0	0	1.98	13.36	97.6
308	60.9	17.38	0	0	3.02	12.14	93.44
311	66.12	19.32	0	0	2.12	13.82	101.38
321	62.2	18.1	0	0	1.9	13	95.2
322	62.52	18.2	0	0	1.38	13.74	95.84
327	60.12	17.4	0	0	2	12.68	92.2
336	64.2	19.3	0	0	3	11.22	97.72
357	62	18.64	0	0.76	4.24	11.66	97.3
360	64.1	18.58	0	0	1.9	13.88	98.46
366	63.64	21.62	0	0	2.54	11.34	99.14
369	68.14	20.28	0	0.64	3.22	12.26	104.54
381	62.12	17.72	0	0	2.08	11.84	93.76
382	65.64	19.5	0	0	2.22	13.8	101.16
388	65.83	19.44	0	0	1.52	14.65	101.44
389	67.44	19.78	0	0	1.69	15.03	103.94
391	64.83	18.73	0	0	1.26	14.47	99.29
405	65.63	19.01	0	0	1.78	14.35	100.77
419	64.52	18.5	0	0	0.85	15.7	99.57
420	62	17.99	0	0	1.74	12.96	94.69
436	65.27	19.35	0	0	3.08	13.39	101.09
444	65.82	19	0	0	2.88	12.83	100.53
446	63.64	18.24	0	0	2.25	13.57	97.7
450	66.54	19.56	0	0	1.76	14.27	102.13
455	61.98	17.62	0	0	1.84	13.62	95.06
459	65.55	18.91	0	0	1.47	14.65	100.58
466	64.08	20.39	0	2.34	4.78	7.83	99.42
471	63.3	19.35	0	1.11	3.23	11.34	98.33
473	63.56	18.57	0	0	1.26	14.56	97.95
478	62.13	17.64	0	0	1.34	13.91	95.02
479	60.86	17.72	0	0	1.94	12.33	92.85
488	64.35	18.35	0	0	4.25	10.06	97.01
493	66.52	19.46	0	0	2.67	12.95	101.6
497	62.66	17.72	0	0	1.16	14.54	96.08
498	63.04	18.84	0	0.77	3.83	11.2	97.68
502	65.12	19.01	0	0	2.52	13.67	100.32
517	62.64	18.58	0	0	2.34	12.71	96.27
523	64.55	18.58	0	0	1.88	14.28	99.29
529	63.64	18.42	0	0	1.3	14.47	97.83
534	59.98	17.74	0	0	3.27	10.91	91.9
546	64.8	18.83	0	0	2.58	12.73	98.94
547	64.39	18.58	0	0	1.07	15.21	99.25
550	62.54	18.24	0	0	1.29	14.25	96.32
568	65.38	18.74	0	0	3.3	11.47	98.89

571	62.51	18.07	0	0	3.62	10.79	94.99
580	64.17	18.65	0	0	2.21	12.81	97.84
583	63.03	18.45	0	0	2.43	12.59	96.5
597	65.86	19.09	0	0	1.07	15.21	101.23
598	68.86	20.16	0	0	3.57	13.72	106.31
602	62.17	17.98	0	0	1.6	13.68	95.43
611	66.87	19.81	0	0	2.18	14.43	103.29
613	66.03	19.49	0	0	2.21	13.02	100.75
618	67.35	20.11	0	0	2.04	13.61	103.11
621	65.18	18.99	0	0	1.54	14.33	100.04
623	65.95	19.99	0	0	2.55	13.07	101.56
626	63.53	18.54	0	0	1.75	14.02	97.84
627	64.64	18.57	0	0	1.99	13.63	98.83
630	63.47	18.41	0	0	1.58	13.63	97.09
631	60.26	18.22	0	0.93	2.23	11.89	93.53
633	66.25	21.71	1.34	0	2.76	11.16	103.22
638	64.35	18.66	0	0	2.24	12.75	98
644	62.63	18.22	0	0	2.02	13.08	95.95
656	64.42	19.13	0	0	2.6	12.92	99.07
667	63.72	18.76	0	0	6.61	8.5	97.59
702	64.42	19.07	0	0	1.64	14.79	99.92
709	65.48	19.22	0	0	1.28	14.68	100.66
732	62.4	18.37	0	0	2.48	11.47	94.72
737	60.96	17.34	0	0	1.13	14.02	93.45
749	61.92	18.82	0	1.03	3.19	10.51	95.47
750	61.84	17.94	0	0	1.79	13.7	95.27
755	64.52	18.87	0	0	1.43	14.68	99.5
761	64.08	18.8	0	0	1.59	13.94	98.41
784	63.64	18.51	0	0	2.03	13.82	98
786	61.54	18.13	0	0	0.9	14.4	94.97
790	56.99	16.42	0	0	1.27	12.9	87.58
32	66.48	19.35	0	0	2	14.73	102.56
33	66.77	19.72	0	0	2.53	14.39	103.41
37	64.81	19.47	0	1.22	3.87	11.66	101.03
57	66.58	19.58	0	0	3.47	12.91	102.54
60	64.43	18.48	0	0	1.08	15.78	99.77
62	63.17	19.28	0	0	2.2	13.99	98.64
65	61.34	17.51	0	0	2.01	13.73	94.59
69	62.9	18.65	0	0	2.24	13.8	97.59
71	63.33	18.71	0	0	2.4	13.51	97.95
78	66.55	19.34	0	0	2.34	14.29	102.52
80	66.64	19.57	0	0	2.44	14.41	103.06
91	65.41	18.65	0	0	1.37	15.67	101.1
99	62.37	18.08	0	0	2.43	13.3	96.18
115	67.51	19.47	0	0	2.27	14.35	103.6
117	66.42	19.17	0	0	2.87	13.76	102.22
130	63.79	18.31	0	0	1.2	15.82	99.12
132	63.61	18.18	0	0	2.55	13.68	98.02
135	65.33	20.07	0	1.01	3.46	12.74	102.61
176	66.38	19.3	0	0	2.18	14.93	102.79
177	66.33	19.12	0	0	1.66	15.06	102.17
180	65.49	18.58	0	0	1.28	15.49	100.84
200	65.02	18.32	0	0	2.23	14.53	100.1
207	64.67	18.75	0.56	0	1.85	15.15	100.98
217	64.99	18.86	0	0	2.06	15.18	101.09
220	63.3	19.72	0	1.63	3.58	12.35	100.58
223	67.57	20.05	0	0	2.75	14.41	104.78

Приложение 3

Представительные анализы плагиоклазов

Спектр	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	Сумма
293	58.56	25.4	7.06	6.82	0.26	98.1
295	58.52	25.26	6.94	7.42	0	98.14
297	60.52	25.02	6.06	7.98	0	99.58
299	58.28	24.44	6.74	7.26	0	96.72
302	54.12	23.78	6.68	6.56	0	91.14
304	57.04	25.32	7.12	7.2	0	96.68
309	55.5	24.18	6.62	6.72	0	93.02
316	57.86	24.96	7.16	7.08	0	97.06
319	56.36	24.5	6.52	6.74	0	94.12
323	56.5	24.82	7.1	7.04	0	95.46
334	59.14	25	6.84	7.2	0	98.18
338	62.8	26.56	7.36	7.32	0	104.04
341	57.4	25	7	7	0	96.4
344	56.76	25.26	6.72	7	0	95.74
346	57.8	24	6.86	7.58	0	96.24
362	56.1	24.1	6.76	6.72	0	93.68
368	61.16	27.4	7.26	7.66	0	103.48
390	60.78	25.84	7.08	7.62	0	101.32
396	57.66	24.89	7.47	6.92	0	96.94
402	56.63	24.97	7.21	6.64	0	95.45
408	60.93	26.23	7.72	7.29	0.3	102.47
417	60.36	25.19	6.93	7.27	0.37	100.12
421	57.3	24.66	7.18	6.84	0	95.98
429	60.78	25.89	6.47	7.42	0	100.56
437	58.19	25.64	7.26	6.92	0	98.01
447	58.25	25.62	7.16	6.89	0	97.92
449	61.62	25.28	6.57	7.56	0	101.03
453	60.64	27.02	8.06	7.51	0	103.23
472	58	25.63	6.93	6.82	0	97.38
480	52.58	21.75	5.46	6.41	0	86.2
486	57.83	25.18	7.08	7.07	0	97.16
496	57.69	25.21	7.03	6.9	0	96.83
499	55.58	24.03	7.04	6.73	0	93.38
506	57.13	25.09	7.16	7.17	0	96.55
508	57.33	24.68	7.11	6.94	0	96.06
515	55.89	23.87	6.87	6.48	0	93.11
518	57.95	25.21	7.13	7.16	0	97.45
522	59.34	26.15	7.37	7.29	0	100.15
524	59.39	25.51	7.4	7.21	0	99.51
539	58.35	24.56	6.83	7.13	0	96.87
549	58.1	24.99	7.12	7.17	0	97.38
578	55.4	24.29	6.94	6.36	0	92.99
593	58.83	25.42	7.21	7.13	0	98.59
603	56.71	24.85	6.91	6.71	0	95.18

609	60.5	25.46	7.17	7.18	0	100.31
614	59.58	26.31	7.51	7.23	0	100.63
616	60.55	26.04	7.65	7.38	0	101.62
617	61.61	26.77	7.13	7.38	0	102.89
620	58.76	25.44	7	6.97	0	98.17
624	60.57	25.8	7.17	7.29	0	100.83
625	57.79	24.8	7.08	6.98	0	96.65
635	56.59	24.62	7.14	6.59	0	94.94
648	58.1	25.94	7.58	6.67	0	98.29
662	57.77	24.29	3.42	6.3	1.06	92.84
668	56.71	24.69	5.69	6.85	0	93.94
729	55.34	24.14	6.67	7.17	0	93.32
734	58.27	24.73	6.64	6.97	0	96.61
736	55.75	23.86	6.7	6.69	0	93
738	59.36	25.88	7.21	7.12	0.37	99.94
740	58.08	25.03	7.07	7.17	0	97.35
748	57.97	25.16	7.38	6.96	0	97.47
753	60.44	26.08	7.5	7.36	0	101.38
757	55.92	24.03	6.76	6.64	0	93.35
760	59.88	25.81	7.41	7.28	0	100.38
771	55.63	24.25	6.84	6.47	0	93.19
785	57.76	25.12	7.13	7.09	0	97.1
788	57.4	24.89	6.45	7.24	0	95.98
789	55.33	24.57	6.39	6.99	0	93.28
4	59.69	24.75	6.87	8.02	0.26	99.59
22	59.62	25.01	7.03	8.14	0	99.8
24	62.17	26.53	7.34	8.42	0	104.46
38	58.51	25.28	6.77	7.77	0.26	98.59
47	59.47	24.9	7	8.08	0.31	99.76
48	57.96	24.71	6.68	7.78	0.21	97.34
54	63	26.96	7.2	8.92	0.21	106.29
56	60.22	25.5	6.93	8.13	0.34	101.12
59	60.1	25.25	7.2	8.01	0.23	100.79
63	58.35	24.34	6.57	7.88	0.27	97.41
70	58.2	25.01	6.82	7.67	0.38	98.08
76	61.56	26.26	4.77	8.29	0.61	101.49
77	62.16	24.59	5.13	8.72	0.2	100.8
79	65.25	24.12	5.72	8.76	0	103.85
81	60.1	25.89	7.46	8.18	0.23	101.86
92	60.65	25.5	6.99	8.34	0.29	101.77
94	57.48	24.38	6.71	7.53	0	96.1
100	57.03	24.16	6.96	7.83	0.29	96.27
116	59.67	25.24	6.82	8.47	0.36	100.56
131	59.53	25.33	7.01	8.2	0.25	100.32
178	59.41	26.17	7.63	7.68	0.29	101.18

Приложение 4

Представительные анализы гранатов

Спектр	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	Сумма
254	36.72	19.49	33.02	0.81	5.58	0.51	0	96.13
317	37.48	21.26	34	1.12	5.66	1.04	0	100.56
329	37.84	21.62	33.36	1.1	5.68	0.8	0	100.4
330	37.62	20.28	33.44	1.06	5.72	1.16	0	99.28
392	38.56	21.3	33.07	0.86	6.18	1	0	100.97
393	37.53	21.77	33.52	0.9	5.86	0.97	0	100.55
412	38.72	22.06	35.26	1.06	5.62	0.91	0	103.63
413	38.56	21.73	33.37	0.76	6.19	0.78	0	101.39
415	39.8	22.92	36.24	1.08	5.65	0.94	0	106.63
439	37.52	21.67	33.01	0.83	6.58	0.76	0	100.37
440	38.48	22.02	33.61	0.97	6.61	0.85	0	102.54
441	39.2	22.88	34.3	0.95	6.75	0.95	0	105.03
451	39.77	22.74	33.9	0.77	7.07	0.95	0	105.2
468	38.64	22.34	34.2	0.93	6.19	0.95	0	103.25
469	38.16	21.26	34.1	0.9	5.54	0.97	0	100.93
476	36.01	20.1	32.19	0.96	5.52	0.73	0	95.51
477	35.61	20.29	32.33	1.12	5.3	0.68	0	95.33
492	39.43	22.43	34.34	1.15	6.2	0.88	0	104.43
536	33.92	19.56	32.67	0.89	4.47	0.63	0	92.14
607	38.77	21.73	33.81	1.18	5.7	1.06	0	102.25
608	38.79	22.17	34.03	1.05	5.63	0.89	0	102.56
674	38.13	21.52	33.35	0.84	6.46	0.93	0	101.23
687	34.81	20	31.26	0.84	5.85	0.87	0	93.63
743	37.91	22.22	33.55	0.84	6.25	1.05	0	101.82
744	38.03	21.97	32.82	0.78	6.61	1.02	0	101.23
5	38.51	21.95	34.87	0.64	5.25	1.09	0	102.31
6	36.9	21.01	33.94	0.8	5.17	0.97	0	98.79
21	39.97	22.38	36.21	1.11	5.33	1	0	106
40	36.92	20.34	32.97	0.72	5.46	1.05	0	97.46
126	34.02	19.52	32.04	0.76	4.89	0.87	0	92.1
129	35.32	19.05	33.29	0.92	4.08	0.88	0	93.54
143	36.77	20.35	32.77	1.08	5.49	0.84	0	97.3
184	38.18	20.96	34.63	1.12	5.03	0.96	0.41	101.29
189	38.59	21.69	33.86	0.83	6.16	0.95	0	102.08
203	38.2	21.87	33.08	0.96	5.83	0.95	0.48	101.37
214	39.62	22.41	35.3	1.12	5.56	1.02	0	105.03
228	36	20.08	34.83	1.01	4.58	1.16	0.54	98.2
229	36.53	20.93	34.8	1.2	4.21	0.89	0	98.56

Приложение 5

Представительные анализы биотитов

Спектр	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	S	Сумма
241	35.05	5.4	14.6	17.68	10.78	0	0.33	9.2	0	93.04
242	35.03	4.48	14.6	17.03	11.33	0	0.35	9.38	0	92.2
255	35.67	6	14.19	17.21	10.93	0	0.3	9.42	0	93.72
259	35.63	5.77	15.26	17.56	10.93	0	0	9.51	0	94.66
260	36.79	5.93	15.21	17.74	11.84	0	0	9.7	0	97.21
264	36.57	4.24	15.35	16.67	12.98	0	0	9.72	0	95.53
265	36.54	4.54	15.63	16.61	12.67	0	0	9.8	0	95.79
269	36.21	4.28	14.72	16.89	12.15	0	0	9.32	0	93.57
270	34.45	4.64	13.68	16.3	11.4	0	0	9.06	0	89.53
274	33.74	4.21	14.47	16.53	10.94	0	0	9.28	0	89.17
279	36.43	6.26	14.6	18.85	11.32	0	0	9.51	0	96.97
386	38.04	3.87	15.22	13.3	15.81	0	0	10.33	0	96.57
394	36.79	3.38	14.86	12.89	15.08	0	0	9.92	0	92.92
397	36.76	3.13	14.88	11.84	15.82	0	0	9.7	0	92.13
406	37.85	5.12	15.22	14.79	14.13	0	0	10.32	0	97.43
409	39.08	3.96	15.97	15.54	15.27	0	0	10.37	0	100.19
411	38.17	3.64	15.04	15.12	14.5	0	0.38	10	0	96.85
438	38.42	3.81	16.03	13.43	16.87	0	0	10.14	0	98.7
448	36.15	2.8	14.77	12.51	15.45	0	0	9.48	0	91.16
456	35.94	4.26	14.13	14.21	13.66	0	0	9.32	0	91.52
457	36.05	2.64	14.71	12.17	15.62	0	0	9.7	0	90.89
460	38.62	3.24	14.75	12.22	16.77	0	0	10	0	95.6
612	38.64	3.41	18.8	17.34	8.88	1.34	0.44	8.36	0	97.21
636	36.17	6.01	14.68	18.49	11.48	0	0	9.68	0	96.51
659	35.04	5.32	13.6	17.53	10.64	0	0	9.42	0	91.55
664	34.91	4.75	14.45	16.24	11.38	0	0	9.7	0	91.43
666	35.76	4.72	13.92	16.58	11.48	0	0	9.21	0	91.67
672	37.95	2.54	16.07	14.48	15.71	0	0	9.41	0	96.16
673	18.37	1.37	6.79	49.25	7.52	0	0	3.91	0.5	87.71
675	37	2.58	15.41	12.44	16.32	0	0	10.11	0	93.86
683	34.57	3.37	13.87	14.19	13.2	0	0	9.54	0	88.74
684	14.85	0.49	5.65	52.16	6.01	0	0	2.89	0	82.05
694	34.62	4.83	14.18	17.27	11.21	0	0	9.39	0	91.5
696	35.79	5.56	14.41	17.95	10.53	0	0	9.75	0	93.99
710	37.19	6.05	15.21	18.35	10.88	0	0	9.63	0	97.31
712	35.87	5.4	14.66	17.93	11.32	0	0	9.51	0	94.69
713	35.32	4.93	14.01	17.6	11.59	0	0	9.55	0	93
714	33.52	4.84	13.95	16.78	10.67	0	0.59	9.27	0	89.62
717	33.88	4.3	14.36	16.89	10.77	0	0.42	9.04	0	89.66
718	20.37	2.49	9.66	38.88	5.22	0	0	4.35	0	80.97
762	38.42	0.47	15.58	16.39	14.35	0	0	10.01	0	95.22
787	35.88	3.6	14.77	14.97	12.49	0	0	8.87	0	90.58
8	35.27	5.41	14.01	18.67	9.83	0	0.36	9.7	0	93.25
10	31.91	5.24	13.1	19.98	7.28	0	0.5	8.7	0	86.71

14	34.23	5.46	13.99	20.73	8.52	0	0	9.75	0	92.68
17	34.31	5.99	13.42	19.74	7.79	0	0.57	9.58	0	91.4
20	37.99	3.38	15.09	17.83	13.05	0	0.31	10.52	0	98.17
30	37.52	5.35	15.38	21.67	9.82	0	0.37	10.36	0	100.47
34	35.36	6.05	13.78	19.95	8.64	0	0.64	9.63	0	94.05
35	35.85	5.29	14.15	19.87	9.34	0	1.14	9.84	0	95.48
43	35.47	5.54	14.19	21.24	9.3	0	0.27	9.9	0	95.91
61	36.78	4.65	14.67	18.53	11.04	0	0.34	10.25	0	96.26
64	33.67	5.45	13.36	18.38	8.98	0	1.05	9.43	0	90.32
67	35.74	4.41	14.34	17.94	11.24	0	0.24	10.1	0	94.01
68	35.69	5.54	14.83	18.75	9.17	0	0	9.27	0	93.25
73	34.48	5.86	13.59	19.16	9.26	0	0	9.65	0	92
74	36.45	5.85	14.69	19.53	10.1	0	0	10.38	0	97
75	37.56	6.33	14.99	20.14	10.29	0	0	10.53	0	99.84
86	37.69	5.18	15.06	17.88	12.23	0	0.37	10.39	0	98.8
87	37.36	5.27	15.24	17.6	12.04	0	0.31	10.31	0	98.13
88	36.24	5.26	14.39	17.61	11.93	0	0.39	10.03	0	95.85
102	34.43	5.16	13.64	16.57	10.93	0	0.91	10.03	0	91.67
103	36.41	5.24	14.61	17.8	12.07	0	0.3	10.18	0	96.61
105	35.54	4.61	14.34	16.39	10.83	0	0.4	9.32	0	91.43
114	36.46	6.08	14.5	18.45	11.24	0	0.21	10.19	0	97.13
119	35.82	5.44	14.6	18.06	11.22	0	0.49	9.88	0	95.51
120	35.1	5.19	13.67	17.17	10.65	0	0.37	10.14	0	92.29
121	35.36	5.26	14.21	17.19	11	0	0.49	9.85	0	93.36
122	31.99	4.58	12.38	21.67	10.31	0	0.31	9.09	0	90.33
124	34.22	4.1	13.43	16.17	11.78	0	0.25	9.83	0	89.78
125	35.08	4.29	13.7	15.72	12.41	0	0.4	9.74	0	91.34
127	33.8	2.94	12.98	13.1	13.6	0	0.4	9.46	0	86.28
134	38.3	3.61	15.04	16.58	13.79	0	0.52	10.1	0	97.94
137	35.27	4.48	14.06	16.27	12.28	0	0.58	9.87	0	92.81
172	37.25	4.44	15.28	17.74	12.04	0	0.4	10.2	0	97.35
173	34.15	5	12.92	15.79	9.68	0	0.62	8.88	0	87.04
174	36.67	4.87	14.7	16.74	11.75	0	0.47	9.81	0	95.01
181	36.07	5	13.99	17.34	10.84	0	0.39	9.76	0	93.39
182	36.45	5.13	14.36	17.57	11.16	0	0.25	10.12	0	95.04
206	35.96	3.68	14.08	13.75	13.83	0	0.38	10.39	0	92.07
210	34.42	4.74	13.24	16.07	11.99	0	0	10.04	0	90.5
213	38.63	3.41	15.12	15.06	14.96	0	0.38	10.75	0	98.31
218	36.69	3.98	14.74	15.19	13.96	0	0.56	9.96	0	95.08
219	34.43	5.07	14.16	14.89	9.21	0	1.26	9.11	0	88.13
224	37.03	4.81	14.82	16.93	12.42	0	0.59	10.23	0	96.83
225	35.98	4.39	14.74	15.95	12.31	0	0.34	10.3	0	94.01
231	36.76	4.26	14.45	15.85	12.8	0	0.33	10.25	0	94.7
232	36.2	4.68	14.49	16.71	12.47	0	0.23	10.1	0	94.88
235	35.41	4.6	14.03	15.76	11.75	0	0.42	10.04	0	92.01
231	36.76	4.26	14.45	15.85	12.8	0	0.33	10.25	0	94.7
232	36.2	4.68	14.49	16.71	12.47	0	0.23	10.1	0	94.88
235	35.41	4.6	14.03	15.76	11.75	0	0.42	10.04	0	92.01

Приложение 6

Spot	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	Total
15	47.92	0	32.81	9.65	7.93	0	0	0	98.31
19	50.35	0	34.29	9.7	8.39	0	0	0	102.73
51	49.1	0	33.08	9.77	7.78	0	0	0	99.73
385	47.08	0.99	36.54	1.14	0.7	0	0	0	86.45
400	43.16	1.17	33.09	1.02	0.95	1.22	1.26	0.33	82.2
720	41.34	1.69	33.06	5.35	0.74	0	0	0.38	82.56
276	44.17	0	34.66	3.66	0.89	0	0.32	0	83.7
312	45.3	0	35.36	2.16	1.22	0	0.18	0.2	84.42
315	47.94	0	31.96	1.5	1.26	0	0	0	82.66
325	41.6	0	32.52	1.56	0.94	0	0	0	76.62
331	47.42	0	23.92	7.7	2.42	0	0	0	81.46
332	44.84	0	36.54	1.92	0.74	0	0	0	84.04
339	47.02	0	36.32	1.46	0.78	0	0	0	85.58
340	42.7	0	34.34	2.14	0.72	0	0	0	79.9
348	46.16	0	29.36	2.64	1.76	0	0	0	79.92
351	45.76	0	34.66	2.56	0.94	0	0	0	83.92
352	45.3	0	34.02	1.7	0.88	0	0	0	81.9
354	46.16	0	35.64	1.7	0.8	0	0	0	84.3
371	44.12	0	35.5	1.56	0.48	0	0	0	81.66
372	47.1	0	30.64	3.58	1.76	0	0	0	83.08
373	44.84	0	34.22	3	1.32	0	0	0	83.38
376	45.02	0	31.08	5.76	1.42	0	0	0	83.28
378	45.62	0	34.88	2.3	1.06	0	0	0	83.86
379	45.12	0	34.3	2.34	0.98	0	0	0	82.74
387	47.98	0	37.99	0.88	0.42	0	0	0.24	87.51
407	47.58	0	38.59	0.67	0.34	0	0	0	87.18
426	44.4	0	34.12	2.31	1.04	0	0	0.33	82.2
427	46.57	0	36.98	1.62	1.15	0	0	0	86.32
431	45.21	0	36.26	1.41	0.46	0	0	2	85.34
452	45.11	0	37.7	4.37	2.05	0	0.52	0	89.75

462	41.98	0	35.07	3.09	1.38	0	0	0	81.52
464	41.68	0	36.39	2.44	0.88	0	0.33	0	81.72
474	45.66	0	35.01	1.58	0.96	0	0	0	83.21
482	44.29	0	33.07	1.42	0.87	0	0	0.28	79.93
483	43.52	0	34.99	1.57	1.07	0	0	0	81.15
484	44.09	0	33.85	2.47	1.03	0	0	0	81.44
485	48.14	0	32.68	1.8	1.67	0	0	0	84.29
490	42.81	0	32.05	2.14	0.92	0	0	0	77.92
494	46.57	0	36.71	1.5	0.69	0	0	0	85.47
501	45.38	0	33.43	2.15	1.11	0	0	0	82.07
503	44.95	0	37.18	2.07	0.7	0	0	0	84.9
505	44.37	0	34.01	2.82	1.36	0	0	0.5	83.06
510	45.25	0	34.22	1.82	0.86	0	0	0.34	82.49
512	44.62	0	34.16	1.88	1.24	0	0	0	81.9
521	44.1	0	36.15	2.74	1.12	0	0	0	84.11
530	42.06	0	33.49	2.59	1.01	0	0	0	79.15
531	42.56	0	34.27	1.46	0.78	0	0	0	79.07
532	44.96	0	35.12	1.63	0.69	0	0	0.28	82.68
533	40.22	0	35.38	3.03	1.25	0	0	0	79.88
541	46.84	0	34.1	1.22	0.97	0	0	0.37	83.5
542	46.15	0	34.78	1.87	0.68	0	0	0.27	83.75
544	44.21	0	35.88	1.67	0.84	0	0	0	82.6
551	48.34	0	26.68	1.58	2.07	0	0	0.87	79.54
552	48.03	0	30.84	1.11	1.51	0	0	0.52	82.01
553	44.62	0	34.52	2.1	1.02	0	0	0	82.26
557	45.88	0	33.46	2.29	1.09	0	0.3	0.38	83.4
561	43.64	0	34.74	3.8	0.92	0	0	0.37	83.47
562	45.16	0	34.22	4.19	0.98	0	0	0	84.55
565	47.05	0	24.82	10.21	0.47	0	0	0.27	82.82
567	44.87	0	35.28	1.67	1	0	0	0	82.82
569	39.92	0	30.93	10.71	0.62	0	0	0.23	82.41
570	44.82	0	36.09	1.88	0.58	0	0	0	83.37

573	41.83	0	31.93	1.82	1.01	0	0	0.28	76.87
576	41.67	0	32.16	1.9	0.94	0	0	0.31	76.98
581	42.08	0	33.07	2.5	0.81	0	0	0	78.46
582	42.49	0	35.57	2.68	1.41	0	0	0	82.15
584	47.33	0	33.86	1.68	1.18	0	0	0	84.05
588	43.69	0	33.32	2.14	1.41	0	0	0.23	80.79
589	44.68	0	35.24	1.83	1.25	0	0	0	83
591	43.07	0	33.77	1.35	0.78	0	0	0	78.97
592	45.14	0	35.59	2.68	0.77	0	0	0.38	84.56
600	43.05	0	31.44	2.22	1.31	0	0.33	0.37	78.72
604	42.63	0	34.76	1.87	0.68	0	0	0	79.94
605	44.49	0	36.59	1.8	1.23	0	0	0	84.11
610	46.38	0	36.58	0.82	0.53	0	0	0	84.31
615	46.92	0	36.56	1.2	0.57	0	0	0	85.25
628	51.24	0	23.25	2.42	2.98	0	0	0	79.89
653	38.8	0	28.54	17.06	1.04	0	0	0	85.44
693	44.51	0	34.49	5.01	1.46	0	0	0	85.47
707	41.63	0	34.46	2.96	0.91	0	0	0	79.96
727	40.44	0	32.39	4.61	1.36	0	0	0	78.8
745	41.92	0	35.42	3.98	1.11	0	0	0	82.43
751	42.43	0	32.83	3.08	1.04	0	0	0.31	79.69
752	42.02	0	32.98	2.36	0.93	0	0	0.34	78.63
764	46.41	0	29.14	1.71	1.66	0	0	1.09	80.01
766	41.66	0	32.26	2.04	0.76	0	0.21	0.21	77.14
767	43.41	0	33.95	1.89	0.97	0	0	0.29	80.51
768	42.63	0	33.26	1.81	0.9	0	0	0.25	78.85
770	42.74	0	32.54	1.02	0.64	0	0	0.27	77.21
773	45.66	0	34.71	1.75	0.92	0	0	0.49	83.53

Список литературы

1. Carson C.J. и др. Compressional and extensional tectonics in low-medium pressure granulites from the Larsemann Hills, East Antarctica // Geol. Mag. 1995. Т. 132. № 2. С. 151–170.

2. Carson C.J. и др. Partial melting during tectonic exhumation of a granulite terrane: An example from the Larsemann Hills, East Antarctica // J. Metamorph. Geol. 1997. Т. 15. № 1. С. 105–126.

3. Carson C.J. и др. Age of boron- and phosphorus-rich paragneisses and associated orthogneisses , Larsemann Hills : New constraints from SHRIMP U-Pb zircon geochronology // 2007. № January 2014. С. 1–4.

4. Carson C.J., Fanning C.M., Wilson C.J.L. Timing of the Progress Granite, Larsemann Hills: additional evidence for early Palaeozoic orogenesis within the east Antarctic Shield and implications for Gondwana assembly // Aust. J. Earth Sci. 1996. Т. 43. № 5. С. 539–553.

5. Dirks P.H.G.M., Carson C.J., Wilson C.J.L. The Deformational History of The Larsemann Hills, Prydz Bay: The Importance of The Pan-African (500 Ma) in East Antarctica // Antarct. Sci. 1993. Т. 5. № 2. С. 179–192.

6. Erić S. и др. Ti-in-biotite geothermometry in non-graphitic, peraluminous metapelites from Crni vrh and Resavski humovi (Central Serbia) // Geol. Carpathica. 2009. Т. 60. № 1. С. 3–14.

7. Grew E.S. и др. New constraints from U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotopic data on the timing of sedimentation and felsic magmatism in the Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica // Precambrian Res. 2012. Т. 206–207. С. 87–108.

8. Grikurov G.E., Mikhalskii E. V. Tectonic structure and evolution of East Antarctica in the light of knowledge about supercontinents // Russ. J. Earth Sci. 2002. Т. 4. № 4. С. 247–257.

9. Harley S. The evolution of a layered metaigneous complex in the Rauer Group, East Antarctica: evidence for a distinct Archaean terrane // Precambrian Res. 1998. Т. 89. № 3–4. С. 175–205.

10. Jacobs J. и др. Continuation of the Mozambique Belt Into East Antarctica: Grenville-Age Metamorphism and Polyphase Pan-African High-Grade Events in Central Dronning Maud Land // J. Geol. 1998. Т. 106. № 4. С. 385–406.

11. Ren L. и др. Re-examination of the metamorphic evolution of the Larsemann Hills, East Antarctica // Recent Prog. Antarct. Earth Sci. 1992. С. 145–153.

12. Stüwe K., Braun H.M., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica // Aust. J. Earth Sci. 1989. Т. 36. № 2. С. 219–241.

13. STÜWE K., POWELL R. Low-pressure granulite facies metamorphism in the Larsemann Hills area, East Antarctica; petrology and tectonic implications for the evolution of the Prydz Bay area // J. Metamorph. Geol. 1989. Т. 7. № 4. С. 465–483.

14. Tong L. и др. Metamorphic P-T paths of metapelitic granulites from the Larsemann Hills, East Antarctica // Lithos. 2014. Т. 192–195. С. 102–115.

15. Tong L. и др. Ultramafic to mafic granulites from the Larsemann Hills, East Antarctica: Geochemistry and tectonic implications // J. Asian Earth Sci. 2017a. Т. 145. С. 679–690.

16. Tong L. и др. Poly-phase metamorphism of garnet-bearing mafic granulite from the Larsemann Hills, East Antarctica: P-T path, U-Pb ages and tectonic implications // Precambrian Res. 2017b. С. 1–14.

17. Tong L., Liu X. The prograde metamorphism of the Larsemann Hills, East Antarctica: Evidence for an anticlockwise P-T path. In the Antarctic Region: Geological Evolution and Processes. , 1997. 105–114 с.

18. Wang Y. и др. SHRIMP zircon age constraints from the Larsemann Hills region, Prydz Bay, for a late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic tectono-thermal event in east Antartica // Am. J. Sci. 2008. Т. 308. № 4. С. 573–617.

19. Бушмин С.А., Глебовицкий В.А. Схема минеральных фаций метаморфических пород // Записки РМО. 2008. Т. CXXXVII2. № 2. С. 1–13.

20. Грикуров Г.Э., Лейченков Г.Л., Михальский Е.В. Тектоническая эволюция Антарктики в свете современного состояния геодинамических идей // Строение и история развития литосферы. 2010. С. 89–108.

21. Мергелов Н.С. и др. Эндолитное почвообразование и скальный «загар» на массивно-кристаллических породах в Восточной Антарктике // Почвоведение. 2012. Т. 10. С. 1027–1044.

22. Михальский Е.В. Основные этапы и геодинамические режимы формирования земной коры Восточной Антарктиды в протерозое - раннем палеозое // Геотектоника. 2008. Т. 6. С. 1–23.

23. Геология и минеральные ресурсы Антарктиды / под ред. В.Л. Иванов, Е.Н. Каменев. : Недра, 1990. 232 с.