

УДК 552.164 (551.253)

СТРЕСС-МЕТАМОРФИЗМ И СТРЕСС-МЕТАМОРФИТЫ В ДОКЕМБРИИ ПРИЛАДОЖЬЯ

А. Л. Кулаковский, Ю. А. Морозов, А. И. Смульская

Институт физики Земли РАН

В поле регионально метаморфизованных докембрийских пород Приладожья выявлены приуроченные к зонам разломов тектониты с аномально высокими, до 12 кбар, значениями давления – продукты стресс-метаморфизма относительно позднего этапа деформационно-метаморфической эволюции. Большая часть подобных стресс-метаморфитов локализована в тектонической зоне Мейери, разделяющей свекофенский и карельский геоблоки. Охарактеризованы особенности структуры и состава стресс-метаморфитов двух групп, относящихся к разным стадиям одного деформационно-метаморфического этапа, определены некоторые параметры и тренды стресс-метаморфизма каждой из стадий.

Ключевые слова: стресс, метаморфизм, Приладожье.

A. L. Kulakovsky, Yu. A. Morozov, A. I. Smul'skaya. STRESS-METAMORPHISM AND STRESS-METAMORPHITES IN PRECAMBRIAN OF THE LADOGA REGION

The tectonites confined to fault zones with abnormally high, up to 12 kbar, pressures, which appear to be the products of stress-metamorphism of relatively late stage of deformation-metamorphic evolution, are identified in the regionally metamorphosed Precambrian rocks of the Ladoga region. Most of these stress-metamorphites are localized in the Meyer tectonic zone, separating the Svecofennian and Karelian geoblocks. The features of structure and composition of the two groups of stress-metamorphites belonging to the different stages of the deformation-metamorphic phase are described. Some parameters and trends in stress-metamorphism of each stage are defined.

Key words: stress, metamorphism, Ladoga region.

Целью настоящих исследований явилось изучение стресс-метаморфизма, признаки которого в Приладожье были зафиксированы нами ранее [Козловский и др., 2012]. Было проведено изучение составов минералов и рассчитаны параметры метаморфизма в 135 образцах метаморфических пород Приладожья из разных метаморфических зон. Большая часть образцов относится к зоне Мейери, до сих пор – наиме-

нее изученному в отношении метаморфической истории домену Приладожья.

Изучение состава минералов проводилось на микрозонде кафедры петрологии МГУ. Для расчета РТ-параметров использовались программы GBPQ [Wu et al., 2004] и TWQ [Aranovich L. Ya., Berman R. G., 1996; Berman R. G., Aranovich L. Ya., 1996]. Для незначительного числа образцов, в которых составы минералов

не соответствовали граничным условиям применения программы GBPQ, расчеты значений температуры и давления сделаны только по программе TWQ.

1. Представления о метаморфизме Приладожья и природе зоны Мейери

Приладожье является классической областью зонального метаморфизма умеренных и средних давлений. Степень метаморфизма нарастает с северо-востока на юго-запад и на большей части территории Северного Приладожья варьирует в пределах эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций (породы зеленосланцевой фации выходят только в узкой полосе, примыкающей к архейскому кратону и в виде отдельных линз – в поле образований эпидот-амфиболитовой фации), граница между которыми проводится по изограде силлиманита (или «первого силлиманита»). Южнее, по изограде силлиманита в ассоциации с калишпатом («второго силлиманита») проводится граница нижней и верхней субфаций амфиболитовой фации, с которой примерно совпадает и граница области массовой мигматизации [Великославинский, 1972]. Породы гранулитовой фации устанавливаются практически исключительно в Западном Приладожье – в свекофеннских породах лахденпохской серии. Границей карелид Северного и свекофеннид Западного Приладожья служит так называемая «зона Мейери».

Зона Мейери как важный тектонический элемент строения Приладожья выделена в 90-х годах прошлого века [Шульдинер и др., 1995; Балтыбаев и др., 1996], но еще в конце 60-х годов в Приладожье геологами Института геологии и геохронологии докембрия (Н. Г. Судовиков, В. А. Глебовицкий, А. Л. Харитонов) был описан «пояс покровных структур» шириной порядка 40 км, северная граница которого проводилась по южному краю «Сортавальско-Питкярантских поднятий». Фактически, эта граница близка к северному ограничению зоны Мейери в более позднем понимании. В этом «поясе» распространены пологопадающие к югу тектонические покровы пород ладожской и сортавальской серий с пластинами архейских гранито-гнейсов основания [Судовиков и др., 1970], причем, как отмечено авторами, здесь (т. е. в пределах позднее выделенной зоны Мейери) гранито-гнейсы фундамента вместе с амфиболитами сортавальской серии находятся в аллохтонном залегании и надвинуты с юга на север на сланцы и гнейсы ладожской серии.

После того как в 70–80-х годах прошлого столетия финскими геологами была предложена концепция о развитии свекофеннид не как эпи-

кратонных образований на архейской коре, а на активной континентальной окраине с новообразованной корой и о зоне Раахе-Ладога как зоне, пограничной между свекофеннским и карельским блоками, эти представления с середины 90-х годов были распространены [Шульдинер и др., 1995, 1996, 1997] и на территорию Приладожья. Было сформировано и представление о зоне Мейерского надвига как продолжении зоны Раахе-Ладога на российскую территорию (рис. 1).

Зона Мейери рассматривалась [Балтыбаев и др., 1996] как зона сочленения блока карелид (с выходами архейского фундамента и чехлом нижнепротерозойских пород ладожской и сортавальской серии) и блока нижнепротерозойских (позднее отнесенных к «свекофеннидам») глубокометаморфизованных метаосадков и метавулканитов. Выделенная зона Мейери протягивается в субширотном направлении не менее чем на 40 км при ширине до 20 км и мощности 6–8 км. Характерным признаком этой зоны сочленения, по мнению авторов, является «структура пологого рассланцевания»; также эти авторы рассматривают зону Мейери и как зону скачкообразного изменения степени метаморфизма: в северной части зоны породы ладожской серии метаморфизованы в условиях среднетемпературной амфиболитовой фации, в южной части – в гранулитовой фации. Непосредственный контакт пород этих двух фаций метаморфизма определен как пологий надвиг (внутри зоны Мейери), по которому глубоко метаморфизованные породы надвинуты на север на менее метаморфизованные разности той же ладожской серии. И, таким образом, зона Мейери стала рассматриваться как граница в двух смыслах:

- как зона тектонического сочленения двух геоблоков: свекофеннид и карелид;
- как метаморфическая граница: амфиболитовой фации к северу и гранулитовой фации – к югу. В более поздних работах, на геологических картах и схемах (тех же авторов и других исследователей) зона Мейери фигурирует или в том, или в другом, или – одновременно в обоих смыслах.

Согласно данным исследователей Приладожья [Шульдинер и др., 1997; Глебовицкий и др., 2002; Балтыбаев и др., 2009], РТ-параметры пика регионального метаморфизма здесь, в различных метаморфических зонах, следующие:

Зона низкотемпературного метаморфизма «Северного» домена (карелиды Северного Приладожья):

- низкотемпературная ставролитовая подзона: 410–550 °C / 3,2–3,3 кбар;
- высокотемпературная ставролитовая подзона: 530–610 °C / 4,0 кбар;

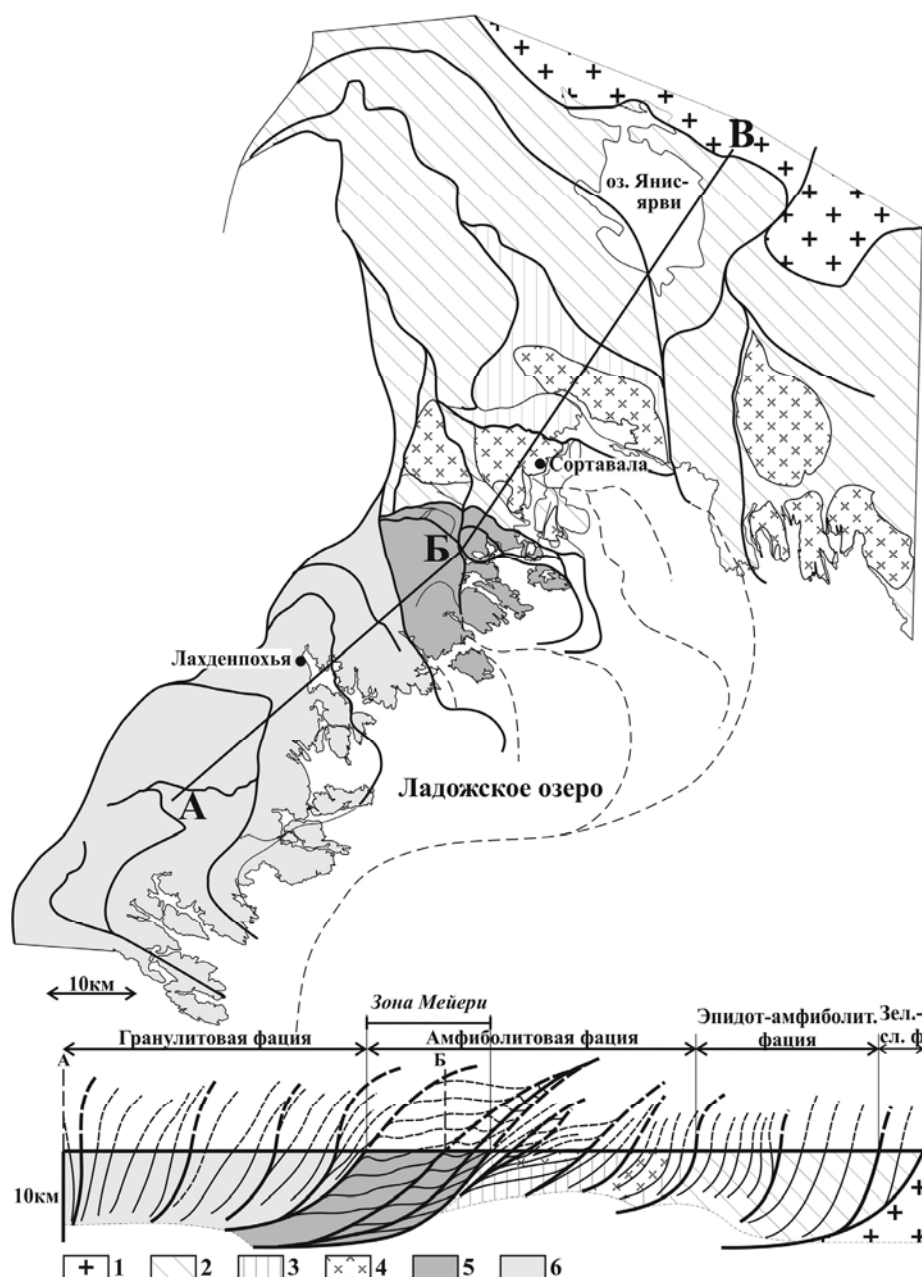


Рис. 1. Зона Мейери в Приладожье:

1 – архейский фундамент, 2–3 – карельские образования: 2 – ладожская серия, 3 – сортавальская серия, 4 – гранитоиды «купольных» структур, 5 – зона Мейери, 6 – свекофеннская ладоженпохская серия

Зона амфиболитовой фации «Северного» домена:

- биотит-силлиманитовая подзона: 600–640 °C / 3,8–5,0 кбар;
- гранат-кордиеритовая (куммингтонитовая) подзона: 650–730 °C / 5,3 кбар;

Зона гранулитовой фации «Южного» домена (свекофенниды Западного Приладожья):

- гиперстеновая зона: 780–840 °C / 4,8–6,4 кбар (для гранат-гиперстеновых гнейсов: 865–945 °C / 5,6–6,5 кбар).

2. Выделение совокупности образцов с «аномальными» значениями давления

Из 135 проанализированных образцов в 58 было зафиксировано давление, превышающее 6,5 кбар, т. е. установленную предшествующими исследователями верхнюю границу диапазона значений давления для гранулитовой фации докембрия Приладожья. На графике частоты распределения пиковых значений давления (рис. 2, а) можно заметить несколько максимумов, из которых два наиболее сильных

примерно отвечают диапазону давления амфиболитовой и гранулитовой фаций регионально-го метаморфизма. Менее сильные максимумы присутствуют в области давлений выше 6,5 кбар. Можно допустить, что породы, для которых рассчитанное давление превышает 6,5 кбар, не являются продуктами зонального метаморфизма амфиболитовой/гранулитовой фаций, но связаны с метаморфическими событиями иной природы.

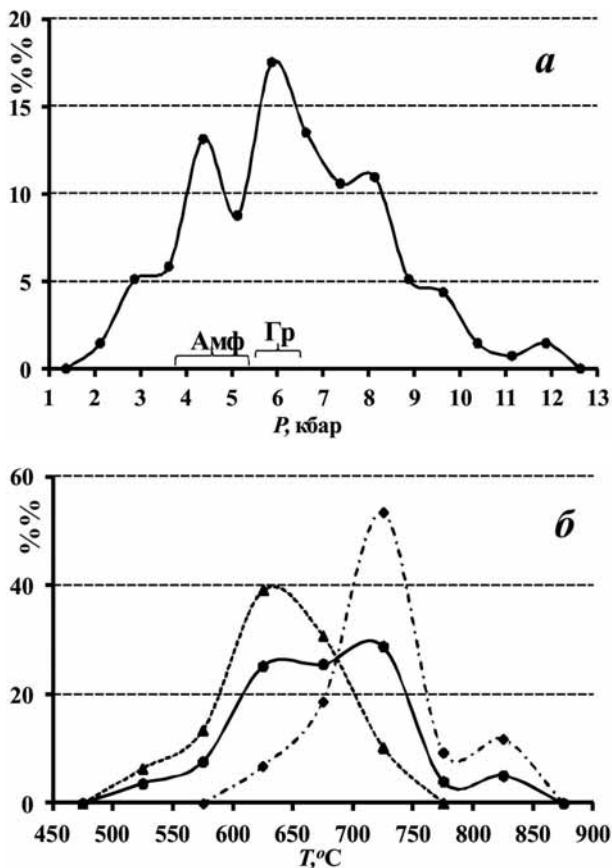


Рис. 2. Частота распределения значений (рассчитанных по программе TWQ): а – давления пика метаморфизма для 135 образцов (Амф – диапазон давлений амфиболитовой фации регионального метаморфизма, Гр – то же, гранулитовой фации, по: [Балтыбаев и др., 2000, 2005]); б – температуры пика метаморфизма

«Обособленность» совокупности из 58 образцов с «аномальными» значениями пиковых давлений от совокупности остальных 77 образцов, для которых рассчитанное давление находится в пределах диапазона давлений регионального метаморфизма, можно заметить и на графике распределения пиковых температур (рис. 2, б). График частоты распределения пиковых температур для всех проанализированных 135 образцов характеризуется двумя «слившимися» сильными максимумами в диапазоне примерно 600–750 °C

и, дополнительно, слабым (возможно, случайным) максимумом в районе 825 °C. Построенные порознь графики частоты пиковых температур для образцов с давлениями ниже 6,5 кбар (т. е. «нормальных» продуктов регионального метаморфизма амфиболитовой/гранулитовой фаций) и для образцов с «аномальными», превышающими 6,5 кбар, значениями давления имеют только по одному сильному (особенно сильному – для совокупности образцов с «аномальными» значениями давления) максимуму.

3. Идентификация пород с «аномальными» значениями давления как продуктов стресс-метаморфизма

Две особенности отличают породы совокупности с «аномальными» значениями давления: а) приуроченность их к зонам разломов и б) их тектонитовая природа. Что касается локализации этих пород в зонах разломов (масштаб этих зон – предмет особого разговора, см. ниже), то пока отметим, что абсолютное большинство связано с вышеупомянутой зоной Мейери – тектоническим швом первого порядка в Приладожье. Небольшое количество образцов с «аномальными» давлениями приурочены к разломам в поле свекофенских образований (гранулитовой фации) к югу от зоны Мейери и единичные образцы – к разломам севернее последней, в поле пород амфиболитовой фации (карелидах). Саму зону Мейери (в терминологии предшествующих исследователей, «пояс покровных структур» или зону «структур пологого расщепления»), видимо, можно рассматривать как крупный дуплексный перегиб надвиговых пакетов, в пределах которого залегание тектонической расслоенности близко к субгоризонтальному (см. рис. 1).

Тектониты, к которым относятся породы «аномальной» по давлению совокупности, принадлежат к одной из двух групп разновозрастных и весьма различных и по структурно-текстурным особенностям, и по минеральному составу, и по составу слагающих их минералов пород: «роговиков» и бластокатаклизитов.

3.1. «Роговики»¹

Первые, по-видимому, указания на присутствие в Приладожье роговикоподобных пород содержатся в монографии Н. Г. Судовикова [Судовиков, 1954], который обнаружил их

¹ Здесь термин «роговики» используется по отношению к породам, обладающим характерной роговиковой (мозаичной, торцовой) микроструктурой, но не связанным с контактовым метаморфизмом; подробная характеристика этих роговикоподобных тектонитов приведена нами ранее: [Кулаковский, 2003].

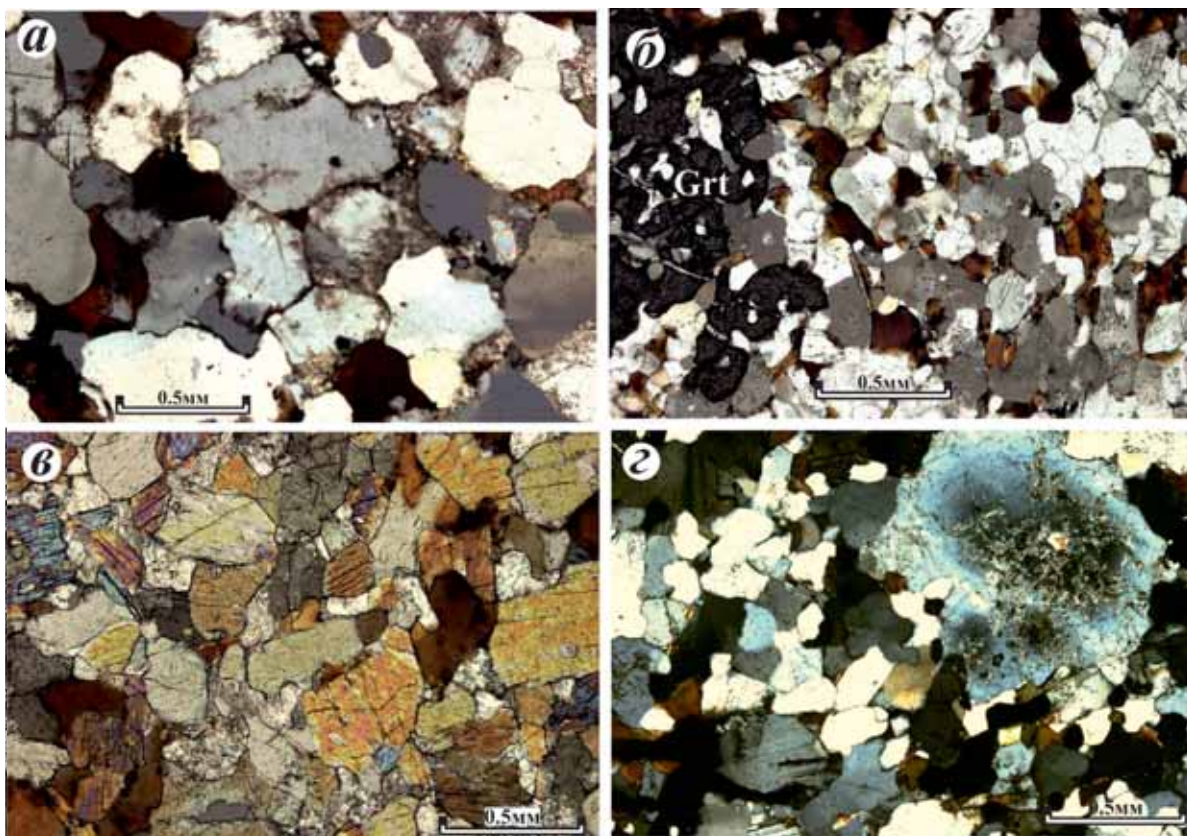


Рис. 3. Микроструктуры «роговиков»: а-б – лейкократовые апогнейсовые «роговики» (а – среднезернистый Bi-Qtz-Pl «роговик», шл. К-42/6 – см. микроструктурную диаграмму рис. 4, а; б – мелкозернистый порфиробластовый Qtz-Grt-Bt-Pl «роговик», шл. К-45/6); в – апоамфиболитовый Pl-Bt-Hbl «роговик» (шл. К-45/3 – см. микроструктурную диаграмму рис. 4, г); г – порфирокласт плагиоклаза в апогнейсовом Grt-Bt-Qtz-Pl роговике, шл. К-13/2

(обычно в виде будин) среди биотитовых и гранат-биотитовых гнейсов. В работе В. А. Глебовицкого [Глебовицкий, 1975] упоминаются встречающиеся в мигматитах будины мелкозернистых биотит-гранатовых «роговиков» с домигматитовыми парагенезами; такие парагенезы – с более кальциевым, нежели обычные гранаты гнейсов, гранатом в ассоциации с биотитом и плагиоклазом – рассматриваются как реликтовые более высокобарические, т. е. более глубоинные (по сравнению с условиями регионального метаморфизма). В более поздних работах возникновение подобных пород связывается с контактовым воздействием ранних, предшествующих региональному метаморфизму интрузий [Шульдинер и др., 1997].

По нашим данным, роговикоподобные породы Приладожья (а также сходные образования во многих других регионах) не имеют отношения к контактовому воздействию каких-либо интрузивов, но являются тектонитами [Кулаковский, 2003]. Формирование «роговиков» Приладожья относится к более позднему этапу, нежели региональный зональный метаморфизм и мигматизация. Вме-

щающими «роговики» породами являются обычные плагиогнейсы и плагиомигматиты амфиболитовой или, реже (в области свекофеннид), гранулитовой фации.

«Ороговиковаются», по всей видимости, наиболее компетентные из уже метаморфизованных пород: метапесчаники ладожской серии (преобразованные в плагиогнейсы и, реже, гнейсы) и амфиболиты (в том числе пироксеносодержащие метагабброамфиболиты). Соответственно, большая часть «роговиков» относится к кислым апогнейсовым гранат-биотитовым разностям или же к менее распространенным апоамфиболитовым (амфиболсодержащим) разностям; очень редко встречаются «роговики» с пироксеном (ромбическим или моноклинным). Особенностью «роговиков» является структура – мелкозернистая (реже – среднезернистая) мозаика из кварца и плагиоклаза, а также биотита в лейкократовых разностях или амфибола – в меланократовых; весьма обычно для «роговиков» присутствие порфиробластов граната (рис. 3).

Лейкократовые (апогнейсовые) «роговики» состоят из кварца, плагиоклаза (преимущественно, андезина) и биотита в разных соотно-

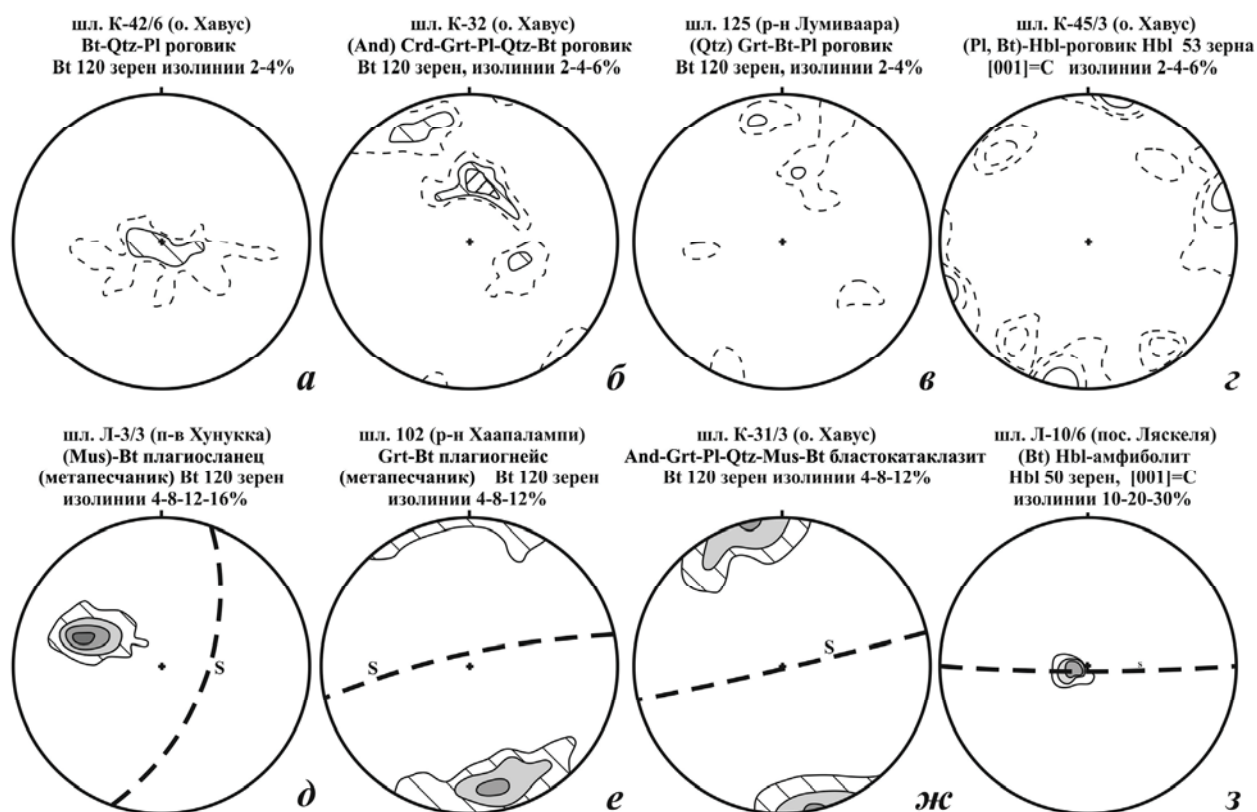


Рис. 4. Сравнение микроструктурной ориентировки биотита и роговой обманки в «роговиках» (верхний ряд) и в близких по составу метаморфитах и бластокатаклазитах (нижний ряд), проекция на нижнюю полусферу, S – след полосчатости

шениях, обычно с гранатом. Изредка присутствуют калишпат, амфибол (роговая обманка или куммингтонит), мусковит, кордиерит. В лейкократовых «роговиках» также нередки «реликты» их субстрата – плагиогнейсов или плагиогранито-гнейсов: чаще в виде отдельных порфировкластов плагиоклаза (более крупных, нежели зерна «матрицы» «роговика», кристаллов, иногда – зональных), реже – в виде небольших, с размытыми контурами полос или пятен плагиогнейса.

Предпочтительная ориентировка минералов, слагающих «роговики», практически отсутствует – как по форме (и на макро- и на микроуровне), так и по оптической индикатрисе. На микроструктурных диаграммах сила максимумов ориентировки осей (полюса спайности биотита или [001] роговой обманки) редко достигает 6 %, т. е. петроструктура «роговиков» практически квазиизотропная (рис. 4).

Максимальное распространение «роговики» в Приладожье имеют в тектонической пластине на юге о. Хавус – на восточном фланге зоны Мейери, где они перемежаются с бластокатаклазитами, а также со слаботектонизированными гнейсами и плагиогнейсами. Морфология тел «роговиков» здесь различная: будино- (линзо-) образ-

ная – на участках преобладания бластокатаклазитов и/или плагиогнейсов и пластинообразная – при преобладании собственно «роговиков».

Процесс образования «роговиков» можно понять, изучая в шлифах породы, лишь в незначительной степени преобразованные в «роговики» и потому сохранившие участки исходного матрикса. Весьма наглядно все ступени этого процесса проявлены в среднезернистых породах типа плагиогнейса (плагиогранито-гнейса). Преобразование этих пород в «роговики» сводится к грануляции исходно крупных, нередко идиоморфных, иногда зональных кристаллов плагиоклаза – замещению последних «мозаикой» мелких аллотриоморфных зерен плагиоклаза; одновременно, как правило, в этой мелкозернистой массе идет рекристаллизация ксеноморфного биотита и, часто, порфиобластез граната.

Соотношение в породах среднезернистого материала «исходного» плагиогнейса, с одной стороны, и мелкозернистой мозаики (матрикса) «роговика», с другой, может быть самым различным, в соответствии с интенсивностью «ороговикования». В слабо «ороговикованных» плагиогнейсах (с макроскопически невыраженными признаками «ороговикования») мелкозернистой мозаикой сложены тончайшие зонки

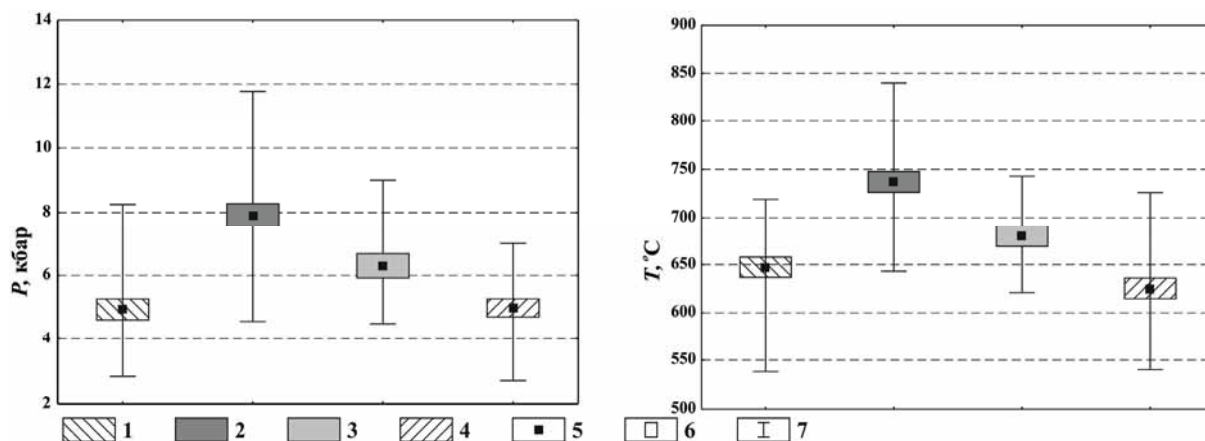


Рис. 5. Диаграммы размаха PT -параметров для регионально метаморфизованных гнейсов кислого состава и апогнейсовых тектонитов :

1–3 – породы зоны Мейери: гнейсы и плагиогнейсы (1), «роговики» (2), бластокатаклазиты (3); 4 – гнейсы и плагиогнейсы вне зоны Мейери; 5 – среднее; 6 – среднее $\pm$ Стандартная ошибка; 7 – размах вариации

по границам крупных кристаллов плагиоклаза или столь же тонкие жилки, секущие плагиогранит, или только отдельные крупные кристаллы плагиоклаза. Обратный случай – сохранение в мелкозернистом матриксе макроскопически однородных «роговиков» единичных крупных порфиороклавов плагиоклаза. Отсюда – достаточно широкое распространение разностей промежуточных по структуре между «роговиками» и регионально метаморфизованными породами их субстрата: роговиковоподобных пород со слабопроявленной предпочтительной ориентировкой темноцветных минералов (биотита – в лейкократовых и амфибола – в меланократовых разностях) или тонко- (до микро-) полосчатых пород с разной степенью выраженности предпочтительной ориентировки.

Парадоксальный на первый взгляд процесс – формирование в зонах разломов при стрессе массивных высокобарных тектонитов с квазиизотропной петроструктурой, по всей видимости, аналогичен таковому при возникновении массивных апогаббровых пород в надвиговых зонах северо-восточной части Беломорского пояса, описанных В. М. Козловским [Козловский, Вирюс, 2011]. Согласно модели, предложенной этими исследователями, при деформации основная масса гнейсов, исключая наиболее компетентные и менее обводненные разности пород (в нашем случае – метапесчаники и амфиболиты), в присутствии флюида переходит в пластичное состояние; при этом для сохраняющихся в твердом состоянии блоков (пластин) компетентных пород стресс трансформируется в нормальное гидростатическое давление. И в этом квазиизотропном поле напряжений протекает рекристаллизация метапесчаников и амфиболитов с формированием высокобарных

компрессионных парагенезисов (роговиковоподобных по петроструктуре пород).

3.2. Бластокатаклазиты

Бластокатаклазиты распространены довольно ограничено и в основном приурочены к флангам зоны Мейери: западному – району оз. Куоккаярви и восточному – о. Хавус. Субстратом бластокатаклазитов служат те же гнейсы, плагиогнейсы и гранито-гнейсы, что и для кислых (апогнейсовых) «роговиков». Структура и текстура бластокатаклазитов – мелкоочковая и микролинзовидная (флазерная), свилеватая – свидетельствует о формировании их в процессе интенсивного пластического течения. Характерна четкая директивная (плоскостная, реже – линейно-плоскостная) петроструктура и микроструктура бластокатаклазитов (рис. 4, ж).

Из двух групп тектонитов «роговики» характеризуются более высокими значениями давления и температуры, нежели бластокатаклазиты (рис. 5¹)

3.3. Возрастные соотношения «роговиков» и бластокатаклазитов

«Роговики» и бластокатаклазиты относятся к двум разным эпизодам стресс-метаморфизма, разделенным фазой складчатости. Складки этой фазы варьируют по величине и морфологии, но характеризуются устойчивой ориентировкой шарниров, погружающихся к югу

¹ Здесь и далее приведены результаты статистической обработки (программа «Statistica») микрозондовых анализов для четырех групп близких по минеральной ассоциации (Qtz+Bt+Grt+Fs +/- Mus, Sil, Crd, And) пород кислого состава: гнейсов/плагиогнейсов, «роговиков» и бластокатаклазитов с южного берега о. Хавус (23, 32 и 13 образцов в группе, соответственно), а также гнейсов/плагиогнейсов амфиболитовой и, менее, гранулитовой фаций вне о. Хавус (23 образца).

(учитывая, что в целом падение метаморфической и тектонической расслоенности в зоне Мейери – в южных румбах, ориентировка шарниров складок данной генерации близка к линии падения расслоенности). Складки сминают как метаморфическую (и мигматитовую) расслоенность метаморфитов (гнейсов, плагиогнейсов, гранитогнейсов), так и пластины «роговиков». При этом, как правило, маломощные пластины последних разлинзовываются и будинируются (рис. 6, а); очень часто будины «роговиков» встречаются в ядрах этих складок (рис. 6, б). Формирование складок данной фазы сопровождается возникновением минеральной (агрегатной и мономинеральной) и механической (бороздчатости) линейности, ориентированной параллельно шарнирам складок. Такая линейность фиксируется по ориентировке призматических кристаллов роговой обманки и по полевошпатовообманковым (+/- гранат) агрегатам в амфиболитах и меланократовых «роговиках», по стержневидным агрегатам кварц-полевошпатового (+/- гранат) состава (рис. 6, г) или

веретенообразным rodding-структурам из крупнозернистого кварца в плагиогнейсах и в лейкократовых «роговиках».

«Жилы» бластокатаклазитов нередко секут складки данной генерации (рис. 6, в), и тем самым определяется постскладчатый (в основном) возраст бластокатаклаза. Но, в то же время, имеются и признаки, указывающие, что начало бластокатаклаза относится еще ко времени складчатости. Об этом свидетельствует линейность по стержневидным агрегатам граната (+/- кварц, полевой шпат), реже – по силлиманиту в бластокатаклазитах, ориентировка которой близка к ориентировке шарниров складок данной генерации.

3.4. Некоторые особенности состава стресс-метаморфитов

В целом, минеральный состав лейкократовых (апогнейсовых) «роговиков» весьма схож с таковым их исходной «матрицы» – гнейсов, плагиогнейсов и гранито-гнейсов: Qtz, Bt, Grt, Pl +/- KFs. Но составы породообразующих минералов «роговиков» заметно отличаются от составов минералов «матрицы».



Рис. 6. Структура и петроструктура тектонитов: а – будины «роговиков» в бластокатаклазитах, б – будина «роговиков» (лейкократовых – светлых и меланократовых – темные полосы) в ядре складки в катаклазированных плагиогнейсах, в – «жила» бластокатаклазитов (внизу снимка) сечет смятые в складку «роговики», г – линейность по (гранат) полевошпатовым агрегатам в катаклазированных плагиогнейсах

Таблица 1. Статистически значимая (вероятность ошибки $P < 0,05$ для U-теста Манна-Уитни) разница составов минералов гнейсов кислого состава и апогнейсовых тектонитов

Группы пород		Минерал	Южный Хавус			Вне Хавуса
			Гнейсы	«Роговики»	Бласто-катаклазиты	Метаморфиты
Южный Хавус	гнейсы	Grt		<u>XFeGrt</u> , <u>XMgGrt</u> , <u>XCagrt</u> , XMnGrt	XMgGrt, XMnGrt	
		Bt			<u>XAlBio</u>	XMgBio, <u>XAlBio</u> , <u>XTiBio</u>
		Pl		XCaPl		
	«роговики»	Grt	<u>XFeGrt</u> , <u>XMgGrt</u> , <u>XCaGrt</u> , XMnGrt		XFeGrt, <u>XCaGrt</u>	<u>XFeGrt</u> , <u>XMgGrt</u> , <u>XCagGrt</u> , XMnGrt
		Bt			<u>XAlBio</u>	<u>XAlBio</u> , <u>XTiBio</u>
		Pl	XCaPl		<u>XCaPl</u>	<u>XCaPl</u>
	бласто-катаклазиты	Grt	XMgGrt, XMnGrt	XFeGrt, <u>XCaGrt</u>		<u>XMgGrt</u> , XMnGrt
		Bt	<u>XAlBio</u>	<u>XAlBio</u>		
		Pl		<u>XCaPl</u>		
Вне Хавуса	метаморфиты	Grt		<u>XFeGrt</u> , <u>XMgGrt</u> , <u>XCaGrt</u> , XMnGrt	<u>XMgGrt</u> , XMnGrt	
		Bt	XMgBio, <u>XAlBio</u> , <u>XTiBio</u>	<u>XAlBio</u> , <u>XTiBio</u>	XTiBio	
		Pl		<u>XCaPl</u>		

Примечание. XCaGrt – весьма статистически значимая ($P < 0,05$) разница.

Бластокатаклазиты, наоборот, по минеральному составу существенно отличаются от гнейсов/плагиогнейсов: помимо кварца (содержание которого, как правило, выше, нежели в гнейсах/плагиогнейсах), полевых шпатов, биотита и граната присутствуют обычно кордиерит, силлиманит и/или андалузит, часто – мусковит, графит. В то же время, составы плагиоклаза, биотита и граната, в целом, отличаются от таковых в гнейсах/плагиогнейсах незначительно.

Результаты статистической обработки составов минералов для упомянутых выше четырех групп пород суммированы в табл. 1, где приведены только статистически значимые различия в составах биотита, плагиоклаза и граната между породами этих групп; отдельно отмечены «весьма статистически значимые» различия в составах.

Очевидно, что наиболее резко по составу всех трех минералов выделяются «роговики», демонстрирующие статистически значимое (а чаще – «весьма значимое») отличие как от регионально метаморфизованных пород близкого минерального состава (гнейсов Хавуса и метаморфитов за пределами последнего), так и от бластокатаклазитов. При этом следует отметить параметр XCaGrt, по которому фиксируется весьма значимое отличие гранатов «роговиков» от гранатов пород всех других трех групп. Это отличие выражено и в среднем содержании XCaGrt, и в диапазоне колебаний данного параметра (рис. 7). Ранее аналогичная закономерность была описана

для стресс-метаморфитов в зоне пластического сдвига в докембрийских гнейсах центральной части Кольского п-ва, где сильно тектонизированные разности гнейсов характеризуются и аномально высокими значениями, и чрезвычайно широкими вариациями содержаний CaO [Беляев и др., 1998].

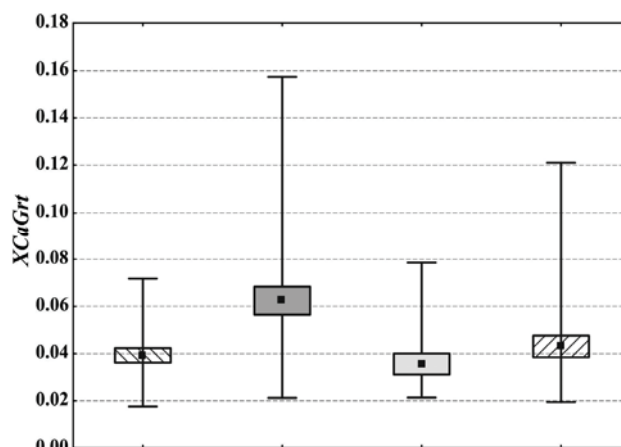


Рис. 7. Диаграмма размаха содержаний XCaGrt для регионально метаморфизованных гнейсов кислого состава и апогнейсовых тектонитов

«Роговики» также отличаются от пород трех других групп и по силе корреляции составов минералов с давлением – весьма значимая обратная корреляция с XFeGrt и прямая с XCaGrt (рис. 8, а) и с температурой – весьма значимая прямая корреляция с XFeBt (рис. 8, б) и обратная с XMgBt (табл. 2). Таким

Таблица 2. Статистически значимая (вероятность ошибки $P < 0,05$) корреляция (и ее знак) составов минералов с давлением и температурой (по расчету коэффициента корреляция Спирмена)

Группы пород		Корреляция с давлением	Корреляция с температурой
Южный Хавус	гнейсы	-XCaPl	XMgGrt, -XCaGrt, -XMnGrt, -XCaPl
	«роговики»	-XFeGrt, XCaGrt	XFeBt, -XMgBt, -XTiBt
	бластокатаклазиты		XMgGrt
Вне Хавуса	метаморфиты	-XMnGrt	-XMnGrt

Примечание. XCaGrt – весьма статистически значимая ($P < 0,05$) корреляция.

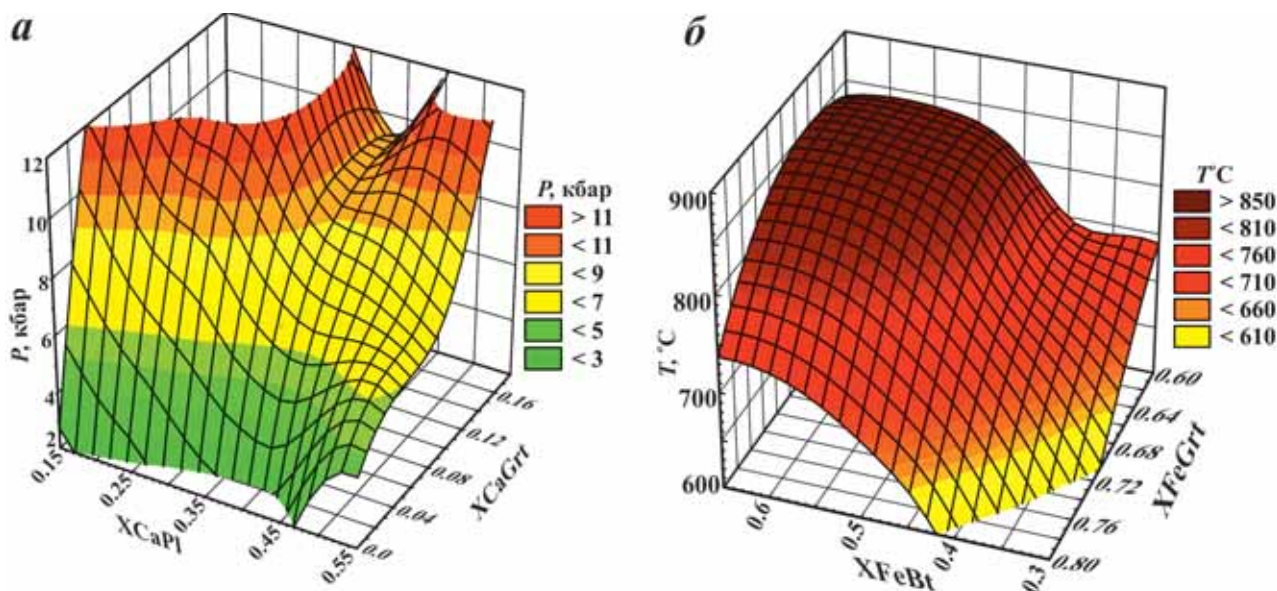


Рис. 8. 3D-диаграммы корреляции PT-параметров с составами минералов для «роговиков»: а – P, кбар-XCaGrt-XCaPl, б – T °C-XFeGrt-XFeBt.

образом, «роговики» представляют собой резко обособленную группу специфических по структурно-текстурным особенностям, химизму породообразующих минералов и по PT-параметрам формирования пород – продуктов стресс-метаморфизма.

5. Многоуровенная дискретность проявления стресс-метаморфизма

Анализируя закономерности распространения тектонитов с «аномальными» PT-параметрами пика стресс-метаморфизма, можно отметить как главную особенность – крайне неравномерное их распределение в пределах зон и амфиболитовой и гранулитовой фаций: и «роговики», и бластокатаклазиты перемежаются («соседствуют») с метаморфитами с «нормальными», типичными для данных метаморфических зон, значениями пиковых температур и давления. Причем подобного рода «неоднородность» распределения тектонитов прослеживается на масштабных уровнях, различающихся на 7–8 десятичных порядков (в диапазоне от десятков километров – до миллиметров).

Как было отмечено выше, в масштабе всего Приладожья основная масса «роговиков» (еще в большей степени это относится к бластокатаклазитам) связана с субширотной зоной Мейери, а в рамках последней – сконцентрирована, главным образом, на ее западном и восточном флангах. Неоднородность распределения тектонитов в более крупном масштабе (в диапазоне десятков – первых сотен метров) демонстрирует профиль с восточного фланга зоны Мейери (мыс Керетини на о. Хавус) (рис. 9). А для отдельных фрагментов этого профиля установлена неоднородность распределения тектонитов в еще более крупном, метры – десятки метров, масштабе.

На этом же профиле и в близлежащих обнажениях на южном берегу о. Хавус неоднократно наблюдалась частая перемежаемость согласных и субсогласных пластин, линз, будин тектонитов и слаботектонизированных разностей гнейсов, плагиогнейсов и гранитогнейсов мощностью в дециметры – первые метры (рис. 10), в которых рассчитанные PT-параметры метаморфизма в породах смежных пластин (линз, будин) различаются на 100–150 °C по температуре и до 4–5 кбар по давлению.

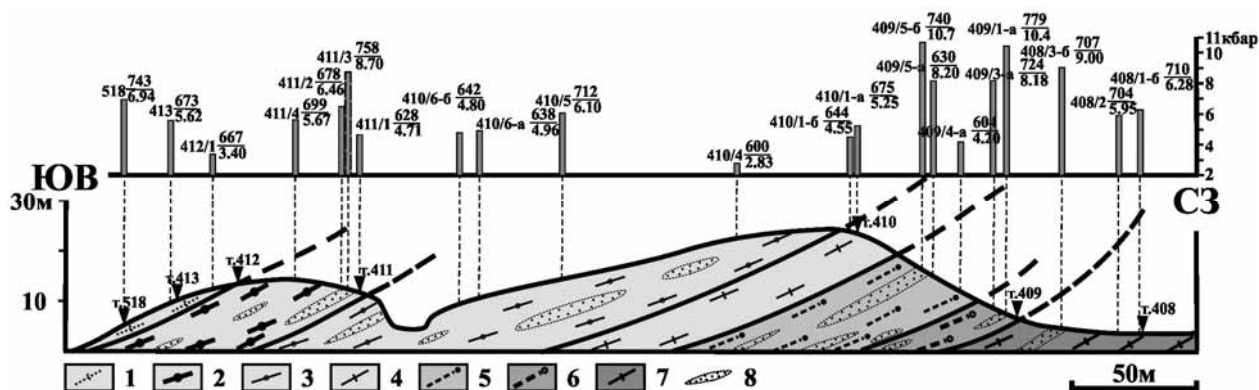


Рис. 9. Профиль через зону Мейери (о. Хавус, мыс Керетиниemi):

1 – однородные катаклазированные (Grt) Bt – плагиогранито-гнейсы, 2 – катаклазированные (And) Crd-Grt-Bt и Grt-Bt-плагиогранито-гнейсы и бластокатаклазиты с подчиненными пластинами и линзами-будинами ороговикованных (Grt) Bt-плагиогнейсов и апоамфиболитовых (Grt) Bt-Cum «роговиков», 3 – чередование катаклазированных (And, Grt) Bt-плагиогнейсов и роговикоподобных тектонитов, 4 – однородные катаклазированные (Grt) Bt-плагиогранито-гнейсы с редкими линзами-будинами ороговикованных (Grt) Bt-плагиогнейсов и апоамфиболитовых «роговиков», 5 – существенно амфиболовые сильно ороговикованные (до апоамфиболитовых «роговиков») плагиогнейсы с подчиненными пластинами апогнейсовых «роговиков», 6 – преобладание (And) Hbl-Grt-Cum в разной степени ороговикованных плагиогнейсов с подчиненными пластинами и редкими линзами-будинами апоамфиболитовых «роговиков», 7 – катаклазированные биотитовые, иногда с And, Crd, Grt, Mus, плагиогранито-гнейсы и катаклазиты с редкими пластинами и линзами-будинами апоамфиболитовых «роговиков», 8 – крупные линзы «роговиков» (518⁷⁴³_{6.94}: номер образца, в числителе – температура, °C, в знаменателе – давление, кбар)

Подобного же рода дискретность распределения тектонитов можно видеть и в еще более крупном, сантиметровом масштабе (рис. 11).

И, наконец, неоднородность, дискретность стресс-метаморфизма в ряде случаев обнаруживается и в масштабе шлифа (в миллиметровом диапазоне) – в виде сонахождения микрополосок в различной степени тектонизированных разностей, различающихся как по степени упорядоченности микроструктурной ориентировки минералов, так и по рассчитанным параметрам температуры и давления (рис. 12).

Дискретность проявления стресс-метаморфизма, по всей видимости, предопределена неоднородностью разреза (не столько по химическому составу, сколько по физико-механическим свойствам пород): исходной неоднородностью строения флишеидной толщи ладожской серии и, главное, тектонической (деформационной) расслоенностью в шовной зоне Мейери.

6. О тренде стресс-метаморфизма в Приладожье

Дискретность проявления на разных масштабных уровнях предполагает локальные вариации РТ-параметров стресс-метаморфизма как на стадии ороговикования, так и бластокатаклаза. Поэтому можно предположить, что в масштабе всего региона вряд ли возможно существование единого четкого тренда стресс-метаморфизма. И, действительно, на диаграмме температура – давление поля РТ-параметров

и для «роговиков», и для бластокатаклазитов весьма растянуты по обеим осям графика (рис. 13), и в значительной степени перекрываются друг с другом и с полем регионально метаморфизованных пород их «матрицы» (гнейсов и плагиогнейсов). Используя для построения трендов стресс-метаморфизма средние значения РТ-параметров «роговиков», бластокатаклазитов и гнейсов/плагиогнейсов, можно видеть, что тренды стресс-метаморфизма обеих стадий (ранней – ороговикования и поздней – бластокатаклаза) весьма близки. Аналогичным образом (опять же – по средним значениям РТ-параметров в краевых каймах зональных зерен граната) построенные регрессивные ветви стресс-метаморфизма для гнейсов/плагиогнейсов, «роговиков» и бластокатаклазитов практически выстраиваются в одну прямую линию. И эта линия общей регрессивной ветви очень близка к линиям прогрессивных ветвей стресс-метаморфизма двух стадий. То есть, на регрессивной стадии стресс-метаморфизма температура и давление снижаются так же сопряженно, как они росли на прогрессивных стадиях (фактически – «обратное скольжение» по линии проградной ветви).

По всей видимости, правомочно допустить, что в отдельных (локальных) зонах стресс-метаморфизм не достигал пикового (максимально высокого для региона) уровня, а останавливался где-то на полдороги к нему. И в таких зонах «недороговикованные» или «недокатаклазированные»

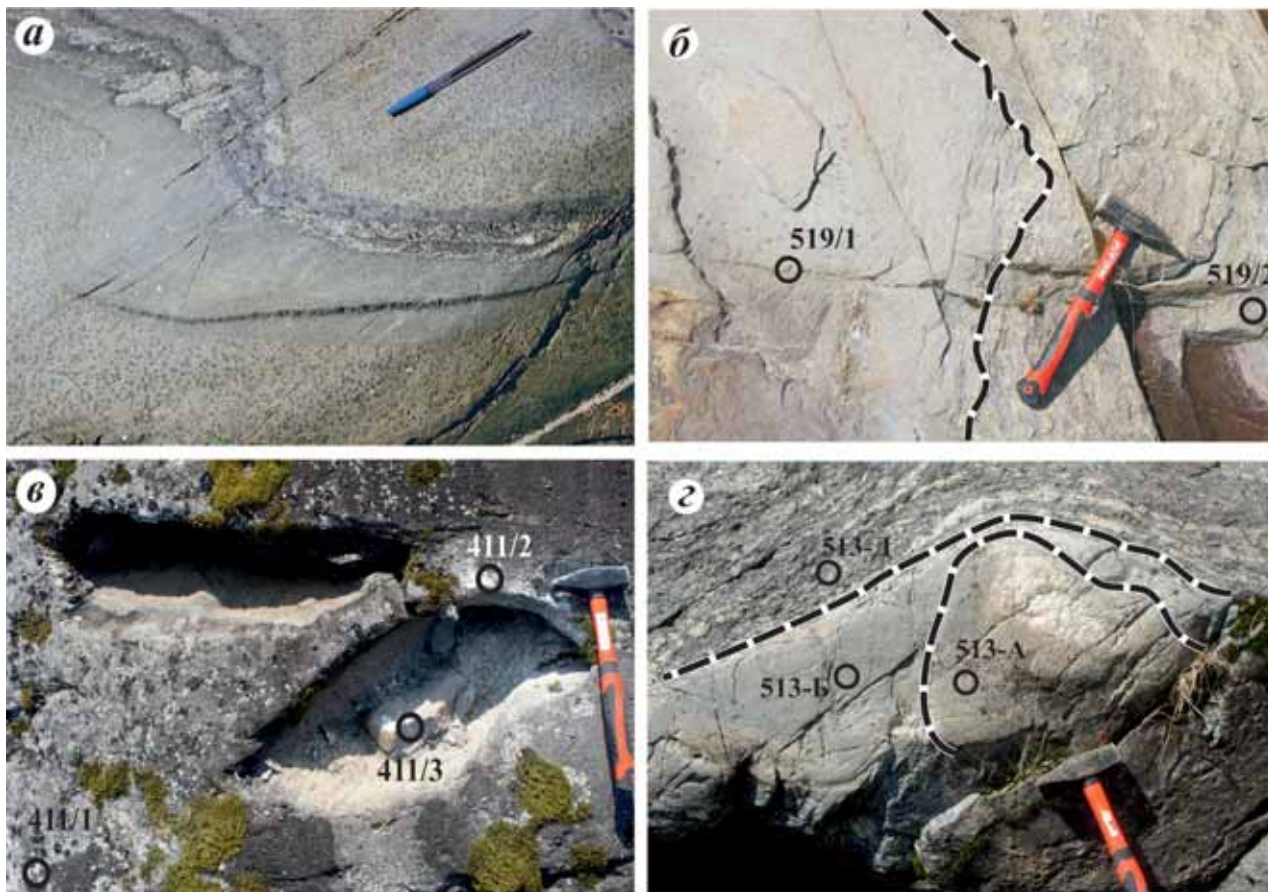


Рис. 10. Неоднородность распределения тектонитов в дециметровом диапазоне:

а – пластина «роговиков» мощностью в 10–15 см меж двух пластин Grt-Bt-бластокатаклазитов, б – контакт пластин (мощностью 20–40 см) Qtz-Grt-Bt-Pl «роговика» (обр. 519/1: $T = 745^{\circ}\text{C}$, $P = 9\text{--}66$ кбар) и катаклазированного (Grt) Bt-плагиогнейса (обр. 519/2: $T = 660^{\circ}\text{C}$, $P = 5\text{--}41$ кбар), в – частично выщелоченная будина (Grt) Qtz-Bt-Cum-Pl «роговика» (обр. 411/3: $T = 758^{\circ}\text{C}$, $P = 8,70$ кбар) в катаклазированном (And) Grt-Crd-Bt плагиогнейсе (обр. 411/1: $T = 628^{\circ}\text{C}$, $P = 4,71$ кбар); эндоконтактная зона будины – роговикоподобный (Grt, Crd, And) Bt-плагиогнейс (обр. 411/2: $T = 678^{\circ}\text{C}$, $P = 6,46$ кбар), г – будина Pl-Grt-CPx-Qtz «роговика» (обр. 513-А: $T = 718^{\circ}\text{C}$, $P = 8,74$ кбар) в (Grt, And) Mus-Crd-Bt-Qtz-Pl бластокатаклазите (обр. 513-Д: $T = 727^{\circ}\text{C}$, $P = 5,57$ кбар); эндоконтактная зона будины – Grt-Bt-Qtz-Pl «роговик» (обр. 513-Б: $T = 704^{\circ}\text{C}$, $P = 6,31$ кбар)

ванные» разности гнейсов и плагиогнейсов характеризуются более низкими, нежели «пиковые», значениями температуры и давления стресс-метаморфизма (отсюда – значительный разброс РТ-параметров перекрывающих друг друга «полей» и «роговиков» и бластокатаклазитов на диаграмме температура – давление). Более того, в таких зонах слабого проявления стресс-метаморфизма значения температуры и давления последнего могут оказаться примерно на уровне или даже ниже, чем РТ-параметры предшествующего регионального метаморфизма. Такого рода породы – продукты стресс-метаморфизма слабой интенсивности – характеризующиеся (в случае низких ступеней ороговикувания) только частичной грануляцией полевых шпатов с сохранением большой доли порфиорокластов и неполным разрушением предпочтительной ориентировки минералов (слюд, амфибо-

ла) исходных метаморфитов или же (в случае низких ступеней бластокатаклаза) незначительным проявлением пластического течения и порфиоробластеза (граната, кордиерита, андалузита, силлиманита) достаточно часто можно встретить, например, в надвиговой зоне южного побережья о. Хавус, где они слагают линзы и пластины мощностью в сантиметры – первые дециметры среди как метаморфитов (гнейсов и плагиогнейсов), так и стресс-метаморфитов («роговиков» и бластокатаклазитов). Определенные для таких пород значения температуры/давления составляют: для слабоороговикованных плагиогнейсов $600^{\circ}\text{C}/2,83$ кбар (обр. 410/4), $616^{\circ}\text{C}/3,94$ кбар (обр. 519/5), $604^{\circ}\text{C}/4,2$ кбар (обр. 409/4а), для слабокатаклазированных плагиогнейсов $655^{\circ}\text{C}/4,55$ кбар (обр. 515/6), $660^{\circ}\text{C}/5,41$ кбар (обр. 519/2), $615^{\circ}\text{C}/5,65$ кбар (обр. К-46/4).

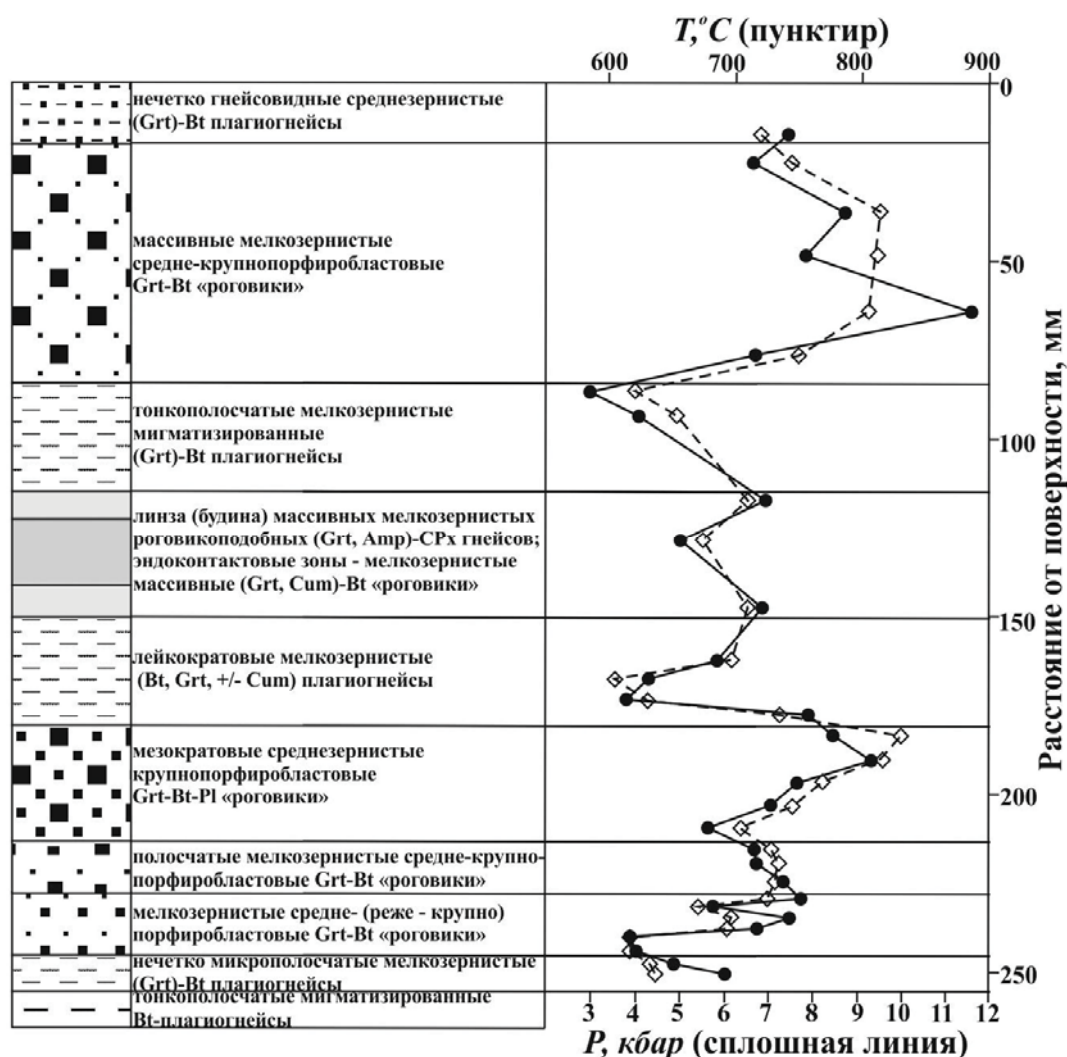


Рис. 11. Неоднородность распределения тектонитов, слаботектонизированных и нетектонизированных гнейсов/плаггиогнейсов в субгоризонтальной тектонической пластине южного берега о. Хавус (по керну скважины) в сантиметровом диапазоне

На стадии бластокатаклаза «роговики», слагающие тонкие пластины, линзы и будины в бластокатаклазах претерпевают незначительное преобразование в эндоконтактных зонах. В амфиболсодержащих разностях «роговиков» обычно замещение роговой обманки куммингтонитом, а иногда и полное исчезновение амфиболов, раскисление плаггиоклаза, возрастание содержания кварца и биотита, изредка – уменьшение содержания граната. Поскольку значения РТ-формирования и «роговиков» и бластокатаклазитов значительно варьируют от одной тектонической зоны/микрозоны к другой, то изменения «роговиков» в эндоконтактных зонах при бластокатаклазе может оказаться как регрессивным (см. рис. 10, в, г), так и прогрессивным относительно РТ-параметров неизменных при бластокатаклазе «роговиков» ядерных участков этих пластин и линз.

В целом, стресс-метаморфизм обеих стадий (учитывая их практически общий тренд), вместе с разделяющим их эпизодом складчатости следует относить к одному этапу деформации. При этом стресс-метаморфиты ранней стадии («роговики») представляют собой, без сомнения, компрессионный парагенез. Стресс-метаморфиты поздней стадии (бластокатаклазиты), сформированные при более низких значениях давления (в рамках этого этапа деформации), видимо, являются декомпрессионными – относительно стресс-метаморфитов ранней стадии («роговиков») – образованиями. Но по отношению к гнейсам/плаггиогнейсам, избежавшим (в силу все той же дискретности проявления стресс-метаморфизма) орогоживания на ранней стадии стресс-метаморфизма, бластокатаклаз формально, по более высоким в среднем

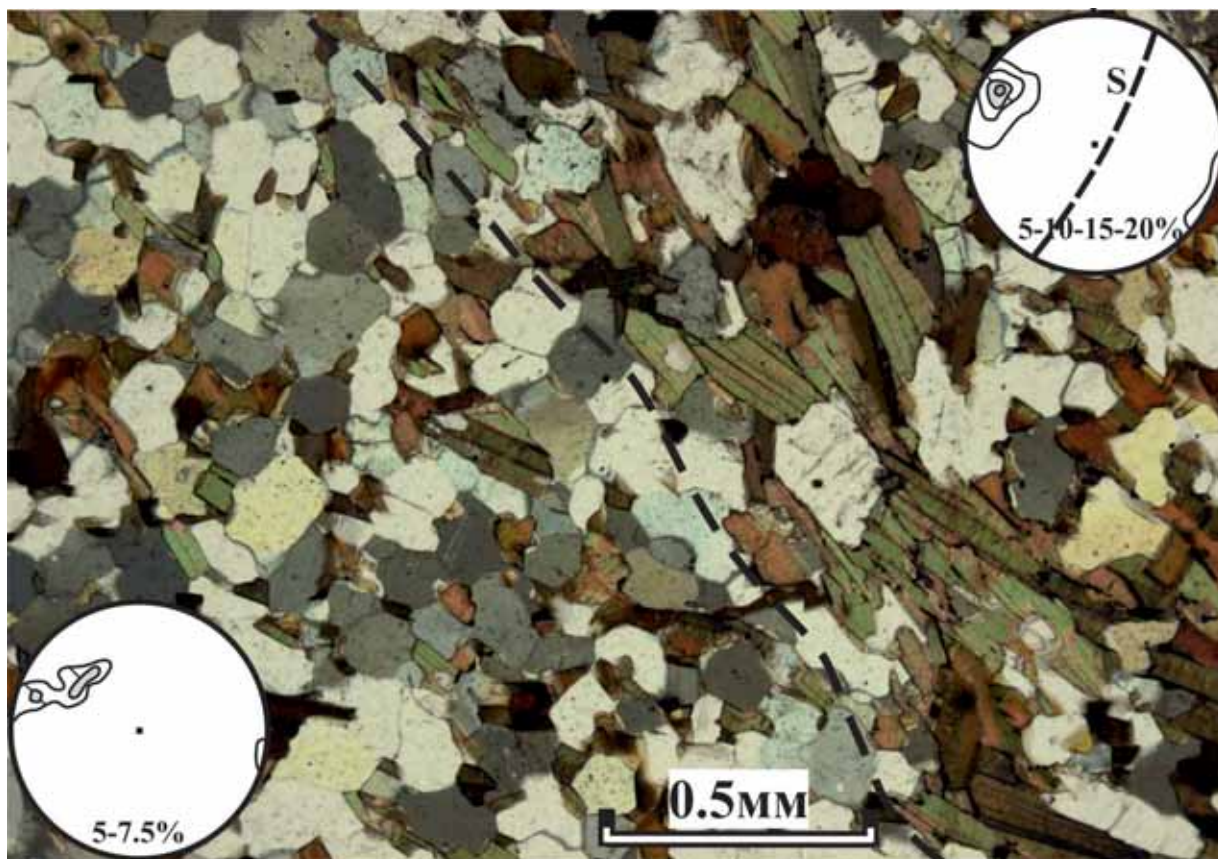


Рис. 12. Контакт в шлифе Grt-Bt-Qtz-Pl плагиогнейса (справа; $T = 688^\circ\text{C}$, $P = 7,06$ кбар) и «роговика» того же состава (слева; $T = 738^\circ\text{C}$, $P = 9,97$ кбар); как видно из соответствующих микроструктурных диаграмм (по 120 полюсов спайности биотита, проекция на нижнюю полусферу, S – след плоскости сланцеватости), формирование высокобарного парагенезиса в роговике сопровождается исчезновением предпочтительной ориентировки биотита и возникновением квазиизотропной петроструктуры (обр. 515/5, южный берег о. Хавус)

значениям РТ-параметров, можно рассматривать как прогрессивный метаморфизм (стресс-метаморфизм).

Выводы

- Проявления стресс-метаморфизма в Приладожье приурочены к зонам разломов и, в первую очередь, к тектоническому шву первого порядка – зоне Мейери, разграничивающей карельский и свекофеннский геоблоки. Стресс-метаморфизм относится к более позднему, относительно регионального зонального метаморфизма, деформационному этапу.

- Выделяются две стадии стресс-метаморфизма, разделенные фазой складчатости. Продуктами стресс-метаморфизма ранней стадии являются роговикоподобные тектониты («роговики») квазиизотропной петроструктуры, возникшие по наиболее компетентным разностям (метапесчаникам/плагиогнейсам и амфиболитам) регионально метаморфизованных пород. Стресс-метаморфиты

поздней стадии представлены бластокатаклазитами. РТ-параметры формирования стресс-метаморфитов достигают значений $800\text{--}825^\circ\text{C}/12\text{--}12,5$ кбар для стресс-метаморфитов ранней стадии («роговиков») и $750\text{--}775^\circ\text{C}/9\text{--}9,5$ кбар – для стресс-метаморфитов поздней стадии (бластокатаклазитов).

- Минеральный состав лейкократовых (апогнейсовых) «роговиков» весьма схож с таковым их исходной «матрицы» – гнейсов, плагиогнейсов и гранито-гнейсов, но составы породообразующих минералов «роговиков» статистически значительно отличаются от составов минералов «матрицы». Бластокатаклазиты, наоборот, по минеральному составу заметно отличаются от гнейсов/плагиогнейсов, но составы плагиоклаза, биотита и граната в них обычно близки таковым гнейсов/плагиогнейсов.

- Наиболее примечательной особенностью стресс-метаморфизма является многоуровневная дискретность его проявления и, соответственно, «неоднородность» распределения стресс-метаморфитов обеих стадий, которая фиксируется

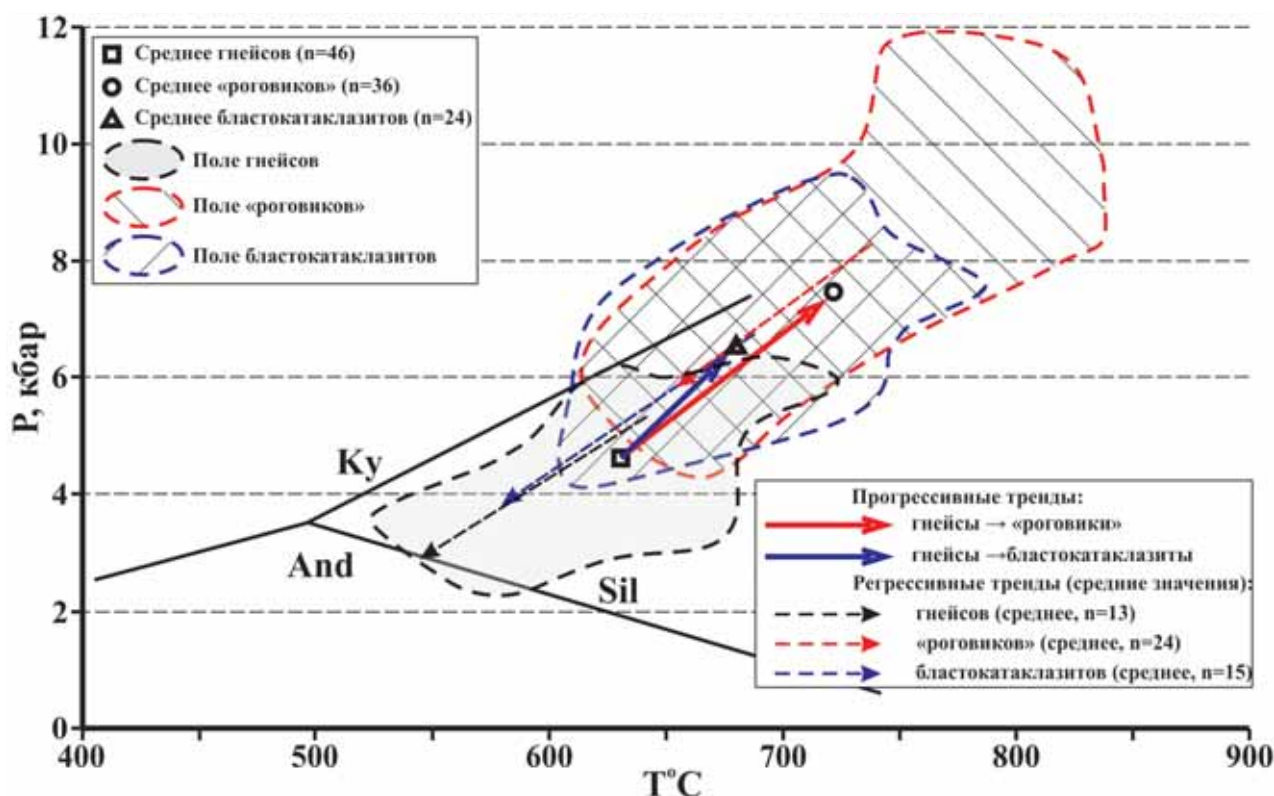


Рис. 13. Тренды стресс-метаморфизма двух стадий (ороговикования и бластокатаклаза), рассчитанные по средним значениям PT -параметров для регионально метаморфизованных пород «матрицы» тектонитов, «роговиков» и бластокатаклизитов (n – число анализов по группам пород)

на масштабных уровнях, различающихся на 7–8 десятичных порядков (в диапазоне от десятков километров – до миллиметров).

- С дискретностью проявления сопряжены широкие вариации PT -параметров стресс-метаморфизма обеих стадий, откуда проистекает значительный разброс значений PT -параметров формирования и «роговиков», и бластокатаклизитов. Но при этом построенные по средним значениям тренды стресс-метаморфизма двух стадий оказываются весьма близкими. С векторами прогрессивных трендов практически совпадают и регрессивные тренды стресс-метаморфизма обеих стадий, т. е. снижение температуры и давления на регрессивных стадиях стресс-метаморфизма протекало так же сопряжено, как и рост этих параметров на прогрессивных стадиях.

Авторы выражают глубокую признательность за ценные консультации В. М. Козловскому.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН № 6 «Динамика континентальной литосферы: геолого-геофизические модели».

Литература

- Балтыбаев Ш. К., Глебовицкий В. А., Козырева И. В., Шульдинер В. И. Мейерский надвиг – структура сочленения Карельского кратона и Свекофеннского пояса в Приладожье // Докл. РАН. 1996. Т. 348, № 3. С. 353–356.
- Балтыбаев Ш. К., Глебовицкий В. А., Козырева И. В. и др. Геология и петрология свекофенид Приладожья. СПб.: Санкт-Петербург. ун-т, 2000. 198 с.
- Балтыбаев Ш. К., Левченко О. А., Левский Л. К. Свекофеннский пояс Фенноскандии: пространственно-временная корреляция раннепротерозойских эндогенных процессов. СПб.: Наука, 2009. 276 с.
- Беляев О. А., Митрофанов Ф. П., Петров В. П. Локальные вариации PT -параметров тектонометаморфизма в зоне пластического сдвига // Докл. РАН. 1998. Т. 361, № 3. С. 370–374.
- Великославинский Д. А. Сравнительная характеристика регионального метаморфизма умеренных и низких давлений. Л.: Наука, 1972. 190 с.
- Глебовицкий В. А. Свекофеннский метаморфический пояс // Восточная часть Балтийского щита. Геология и глубинное строение. Л.: Наука, 1975. С. 24–42.
- Глебовицкий В. А., Балтыбаев Ш. К., Левченко О. А., Бережная Н. Г. Время, длительность и PT -параметры полистадийного метаморфизма свекофенид Приладожья (Балтийский щит) (по данным термобарометрии и U-Pb геохронологии) // Докл. РАН. 2002. Т. 384, № 5. С. 660–664.

Козловский В. М., Вирюс А. А. Гранулитовые парагенезисы в локальных зонах деформаций Восточного Беломорья // Гранулитовые и эклогитовые комплексы в истории Земли: мат-лы науч. конф. и путеводитель науч. экскурсий. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 93–97.

Козловский В. М., Кулаковский А. Л., Митрофанов Ф. П. и др. Об изменчивости термодинамических параметров метаморфизма в локальных зонах деформаций // Мат-лы совещания «Современные проблемы магматизма и метаморфизма». Т. 1. СПб., 2012. С. 271–275.

Кулаковский А. Л. Об одном типе метаморфических пород в зонах разломов // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2003. Т. 78, вып. 3. С. 88–98.

Судовиков Н. Г. Тектоника, метаморфизм, мигматизация и гранитизация пород Ладожской формации // АН СССР. ЛАГЕД. Тр. 1954. Вып. 4. 198 с.

Судовиков Н. Г., Глебовицкий В. А., Сергеев А. С. и др. Геологическое развитие глубинных зон подвижных поясов (Северное Приладожье). Л.: Наука, 1970. 227 с.

Шульдинер В. И., Козырева И. В., Балтыбаев Ш. К. и др. Плутоно-метаморфическая эволюция Западного Приладожья (новая модель) // Региональная геология и металлогения. 1995. № 4. С. 52–62.

Шульдинер В. И., Козырева И. В., Балтыбаев Ш. К. Возрастное и формационное расчленение раннедокембрийских образований Северо-Западного Приладожья // Стратигр. Геол. коррел. 1996. Т. 4, № 3. С. 11–22.

Шульдинер В. И., Козырева И. В., Балтыбаев Ш. К. Эволюция термального режима свекофеннид Западного Приладожья и ее геодинамическая интерпретация // Докл. РАН. 1997. Т. 352, № 3. С. 380–383.

Aranovich L. Ya., Berman R. G. Optimized standard state and solution properties of minerals: II. Comparisons, predictions, and applications // Contrib. Mineralogy and Petrology. 1996. Vol. 126. P. 25–37.

Berman R. G., Aranovich L. Ya. Optimized standard state and solution properties of minerals: I. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, and ilmenite in the system FeO-MgO-CaO-Al₂O₃-TiO₂-SiO₂ // Contrib. Mineralogy and Petrology. 1996. Vol. 126. P. 1–24.

Wu C.-M. et al. Empirical Garnet-Biotite-Plagioclase-Quartz (GBPQ) Geobarometry in Medium- to High-Grade Metapelites // J. Petrology. 2004. Vol. 45, No 9. P. 1907–1921.

Поступила в редакцию 10.04.2014

References

Baltybaev Sh. K., Glebovitskii V. A., Kozyreva I. V., Shul'diner V. I. Meierskii nadvig – struktura sochleneniya Karel'skogo kratona i Svekofennskogo poyasa v Priladozh'e [The Meyeri Thrust – the main element of the structure at the boundary between the Karelian Craton and the Svecofennian Belt in the Ladoga region]. *Dokl. RAN [Proceedings of RAS]*. 1996. Vol. 348, No 3. P. 353–356.

Baltybaev Sh. K., Glebovitskii V. A., Kozyreva I. V. et al. Geologiya i petrologiya svekofennid Priladozh'ya [Geology and petrology of the Ladoga region svecofennides]. St. Petersburg: Sankt-Peterburg. un-t, 2000. 198 p.

Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A., Levskii L. K. Svekofennskii poyas Fennoskandii: prostranstvenno-vremennaya korrelyatsiya ranneproterozoiskikh endogennykh protsessov [The Svecofennian belt of the Fennoscandia: spatio-temporal correlation of the early Proterozoic endogenous processes]. St. Petersburg: Nauka, 2009. 276 p.

Belyaev O. A., Mitrofanov F. P., Petrov V. P. Lokal'nye variatsii RT-parametrov tektonometamorfizma v zone plasticheskogo sdviga [Local variations of RT-parameters of tectono-metamorphism in the plastical shift area]. *Dokl. RAN [Proceedings of RAS]*. 1998. Vol. 361, No 3. P. 370–374.

Velikoslavinskii D. A. Srovnitel'naya kharakteristika regional'nogo metamorfizma umerennykh i nizkikh davlenii [Comparative characteristics of regional moderate and low pressures metamorphism]. Leningrad: Nauka, 1972. 190 p.

Glebovitskii V. A. Svekofennskii metamorficheskii poyas [The Svecofennian metamorphic belt]. Vostochnaya chast' Baltiiskogo shchita. Geologiya i

glubinnoe stroenie [The eastern Baltic shield. Geology and deep structure]. Leningrad: Nauka, 1975. P. 24–42.

Glebovitskii V. A., Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A., Berezhnaya N. G. Vremya, dlitel'nost' i RT-parametry polistadiinogo metamorfizma svekofennid Priladozh'ya (Baltiiskii shchit) (po dannym termobarometrii i U-Pb geokhronologii) [Time, duration and RT-parameters of polystage metamorphism in the svecofennides from the Ladoga region, Baltic Shield (thermobarometry and U-Pb geochronology)]. *Dokl. RAN [Proceedings of RAS]*. 2002. Vol. 384, No 5. P. 660–664.

Kozlovskii V. M., Viryus A. A. Granulitovye paragenезисы в локальных зонах деформации Восточного Беломорья [Granulite parageneses in the local deformation zones of the eastern White Sea area]. Granulitovye i eklogitovye komplekсы v istorii Zemli: mat-ly nauch. konf. i putevoditel' nauch. Ekskursii [Granulite and eclogite complexes in the Earth's history. Extended abstracts and field guide]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2011. P. 93–97.

Kozlovskii V. M., Kulakovskii A. L., Mitrofanov F. P. et al. Ob izmenchivosti termodinamicheskikh parametrov metamorfizma v lokal'nykh zonakh deformatsii [On the variability of thermodynamic metamorphism parameters in the local deformation zones]. Mat-ly soveshchaniya «Sovremennye problemy magmatizma i metamorfizma». Vol. 1. St. Petersburg, 2012. P. 271–275.

Kulakovskii A. L. Ob odnom tipe metamorficheskikh porod v zonakh razlomov [One type of metamorphic rocks in fault zones]. *Bul. MOIP*. 2003. Vol. 78, iss. 3. P. 88–98.

Sudovikov N. G. Tektonika, metamorfizm, migmatizatsiya i granitizatsiya porod Ladozhskoi formatsii [Tectonics, metamorphism, migmatization, and granitization of the Ladoga formation rocks]. *AN SSSR. LAGED*. 1954. Tr. Iss. 4. 198 p.

Sudovikov N. G., Glebovitskii V. A., Sergeev A. S. et al. Geologicheskoe razvitiye glubinnykh zon podvizhnykh pojasov (Severnoe Priladozh'e) [Geological development of deep zones of mobile belts (northern Ladoga region)]. Leningrad: Nauka, 1970. 227 p.

Shul'diner V. I., Kozyreva I. V., Baltybaev Sh. K. et al. Plutono-metamorficheskaya evolyutsiya Zapadnogo Priladozh'ya (novaya model') [Plutono-metamorphic evolution of the western Ladoga region (new model)]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]*. 1995. No 4. P. 52–62.

Shul'diner V. I., Kozyreva I. V., Baltybaev Sh. K. Vozrastnoe i formatsionnoe raschlenenie rannedokembriiskikh obrazovaniy Severo-Zapadnogo Priladozh'ya [Age and structural differentiation of Precambrian formations in the north-western Ladoga region]. *Stratigr. Geol. korrel.* 1996. Vol. 4, No 3. P. 11–22.

Shul'diner V. I., Kozyreva I. V., Baltybaev Sh. K. Evolyutsiya termal'nogo rezhima svekofennid Zapadnogo Priladozh'ya i ee geodinamicheskaya interpretatsiya [Evolution of thermal regime of svekofennides of the western Ladoga region and its geodynamic interpretation]. *Dokl. RAN [Proceedings of RAS]*. 1997. Vol. 352, No 3. P. 380–383.

Aranovich L. Ya., Berman R. G. Optimized standard state and solution properties of minerals: II. Comparisons, predictions, and applications. *Contrib. Mineralogy and Petrology*. 1996. Vol. 126. P. 25–37.

Berman R. G., Aranovich L. Ya. Optimized standard state and solution properties of minerals: I. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, and ilmenite in the system FeO-MgO-CaO-Al₂O₃-TiO₂-SiO₂. *Contrib. Mineralogy and Petrology*. 1996. Vol. 126. P. 1–24.

Wu C.-M. et al. Empirical Garnet–Biotite–Plagioclase–Quartz (GBPQ) Geobarometry in Medium- to High-Grade Metapelites. *J. Petrology*. 2004. Vol. 45, No 9. P. 1907–1921.

Received April 10, 2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кулаковский Алексей Львович

старший научный сотрудник лаб. тектоники и геодинамики, к. г.-м. н.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН)
ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, Москва Д-242, ГСП-5, Россия, 123995

эл. почта: akulakovskij@mail.ru

тел.: +79161477327

Морозов Юрий Алексеевич

зав. лаб. тектоники и геодинамики, д. г.-м. н.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН)
ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, Москва Д-242, ГСП-5, Россия, 123995

эл. почта: morozov@ifz.ru

Смульская Анна Игоревна

старший научный сотрудник лаб. тектоники и геодинамики
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН)
ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, Москва Д-242, ГСП-5, Россия, 123995

эл. почта: anna-smulskaya@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Kulakovsky, Alexey

The Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

10 Bolshaya Gruzinskaya St., bld. 1, 123995 Moscow, Russia

e-mail: akulakovskij@mail.ru

tel.: +79161477327

Morozov, Yury

The Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

10 Bolshaya Gruzinskaya St., bld. 1, 123995 Moscow, Russia

e-mail: morozov@ifz.ru

Smul'skaya, Anna

The Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

10 Bolshaya Gruzinskaya St., bld. 1, 123995 Moscow, Russia

e-mail: anna-smulskaya@mail.ru