

# СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ МИГМАТИЗАЦИИ АМФИБОЛИТОВ БЕЛОМОРСКОГО КОМПЛЕКСА И ИХ ОТРАЖЕНИЕ ВО ФРАКТАЛЬНЫХ РАЗМЕРНОСТЯХ.

В.М. Козловский  
ИГЕМ РАН  
e-mail: [bazil@igem.ru](mailto:bazil@igem.ru)

Мигматиты распространены в глубоко эродированных частях региональных зон смятия, где возникают в результате взаимодействия деформаций сдвига и флюидных потоков, преобразующих вмещающие породы. Соответственно, основными вопросами при изучении мигматизации являются ее соотношение с деформациями, эволюция флюидного потока и последовательность структурных и вещественных преобразований пород. Благодаря сочетанию петрологического подхода с фрактальным анализом структуры мигматитового поля удалось получить свидетельства в пользу эпигенетической (метасоматической) природы полосчатости мигматизированных амфиболитов и синхронности мигматизации с деформациями сдвига.

Изучены мигматиты в неоднородной ритмично полосчатой Хетоламбинской толще Беломорского комплекса. Данная толща соответствует плагиогранитогайсам ( $Lc_1$ ) ребольского этапа метаморфизма (2,73 – 2,68 млрд. лет), образовавшимся в результате натрий-кремниевое метасоматоза при температуре 700 – 750°C и давлении 6 – 8 кбар (Седова, Глебовицкий, 2005). По данным Т.Ф. Щербаковой (1988, 2006), формирование неоднородной полосчатости связано с начальным этапом ступенчатой метасоматической региональной мигматизации амфиболитов с возникновением ряда: амфиболиты – биотит-амфиболовые плагиомигматиты – амфибол-биотитовые плагиомигматиты – биотитовые плагиомигматиты и плагиограниты. Нашими полевыми наблюдениями установлено, что Хетоламбинская апоамфиболитовая мигматитовая толща имеет хорошо выраженное ритмично-полосчатое или линзовидно-прожилковое строение: темные прослои (плагиоклаз-амфиболовые) последовательно сменяются все более и более лейкократовыми (кварц-биотит-плагиоклазовыми). В строении ритма участвуют 5 субпараллельных прослоев, которые соприкасаются друг с другом по четким геологическим границам. Отдельные элементы ритмов могут быть не проявлены.

В изученной полосчатой мигматитовой толще мощность прослоев ступенчато убывает в обратной зависимости от кремнекислотности и лейкократовости мигматитов. По мере возрастания интенсивности метасоматических преобразований увеличивается содержание  $SiO_2$  и  $Na_2O$ , происходит осветление мигматитов в результате ступенчатого возрастания доли плагиоклаза и кварца и сокращения содержания роговой обманки и биотита. Поэтому наиболее мощные прослои сложены малоизмененными меланократовыми разновидностями мигматитов, а наиболее тонкие – лейкократовыми максимально преобразованными.

Согласно наблюдениям, выделяются пять последовательных стадий мигматизации амфиболитов с нарастанием доли парагенезиса  $Pl+Otz+Vt$ . По крайней мере для трех из них наблюдались структурные соотношения, указывающие на последовательность образования: 1 – ранние меланократовые амфиболовые и биотит-амфиболовые мигматиты; 2 – более поздние мезократовые биотитовые мигматиты; 3 – лейкократовые кварц-олигоклазовые тонкие тела с редким биотитом. Зарождение новых лейкократовых мигматитов происходит внутри более ранних меланократовых мигматитовых полос. Практически во всех лейкократовых мигматитовых прослоях сохраняются реликтовые текстуры, унаследованные от ранее образованных меланократовых мигматитов. Самые маломощные лейкократовые мигматиты изредка образуют извилистые тела, секущие границы мощных меланократовых мигматитов, что также указывает на их относительно более позднее образование.

Приведенные особенности строения Хетоламбинской толщи позволили подойти к решению вопроса о природе ее ритмичной полосчатости. Для этого изучены состав, мощность и пространственное распределение ритмов в мигматизированных амфиболитах. Учитывая, что формирование полосчатых текстур и рассланцевание метаморфических пород связано с тектоническими процессами (Русинов, 2002), рассмотрим природу слоистого строения Хетоламбинской толщи в ее связи с динамикой зоны сдвига.

Развивающиеся тектонические зоны сдвига характеризуются повышенным притоком флюидов, которые взаимодействуют с боковыми породами, изменяя их и ускоряя сдвиг, и инициируют образование новых систем флюидопроводников (Русинов, 2002; Русинов, 2005). Таким образом, процесс приобретает нелинейный автокаталитический характер. В результате взаимодействия флюида с породой меняется химический и минеральный состав исходных горных пород и их хрупко-пластичные свойства. В рассматриваемой мигматитовой толще смена хрупких амфиболовых мигматитов более пластичными биотитовыми способствует развитию на поздних стадиях кливажа пластического течения.

Мигматизация происходила вдоль трещин кливажа пластического течения. При этом полосы мигматитов соответствуют зонам активной трещиноватости. По мощности и по составу различаются несколько рангов полос (и, соответственно, зон интенсивности трещиноватости). Согласно экспериментальным данным по эволюции сдвиговых деформаций (Борняков, Шерман, Гладков, 2001; Борняков, Шерман, 2003; Борняков, Гладков, Матросов, 2004; Шерман, Буддо, Мирошниченко, 1991; Русинова, Русинов, Абрамов, 1999) на ранних стадиях формируются мелкие непротяженные трещины, ориентированные под  $25-45^\circ$  к направлению сдвига. При взаимодействии с флюидом они залечиваются минеральным веществом. После этого внутри этих зон возникают более протяженные и мощные трещины, которые также залечиваются. На заключительной стадии формируется сложнопостроенный магистральный шов. Мощность зоны активной трещиноватости ступенчато снижается от ранних стадий к поздним. Приведенные экспериментальные данные хорошо согласуются с особенностями геологического строения разрезов мигматизированных амфиболитов. Следовательно, это позволяет считать, что мощные темные слабомигматизированные полосы, обогащенные  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$  и  $CaO$ , относятся к ранним стадиям развития зоны трещиноватости, а тонкие светлые интенсивно мигматизированные прослои, обогащенные  $SiO_2$ , – к поздним.

В динамично развивающейся тектонической зоне, в результате взаимодействия с флюидом, каждая последующая стадия развития зоны трещиноватости накладывается не на протолит, а на горную породу преобразованную флюидом на предшествующей стадии. Следовательно, при приближении к главному разломному шву, степень проработки флюидом амфиболитового протолита возрастает прогрессивно, а мощность зон уменьшается. Интенсивность трещиноватости мигматитовых прослоев для каждой стадии процесса оценивалась по степени и мощности метасоматических преобразований. Каждой стадии трещиноватости соответствует определенный состав метасоматитов и соотношение флюид/порода. Поэтому количественная оценка интенсивности трещиноватости возможна по изменению содержания основных пороодообразующих компонентов в мигматизируемых амфиболитах.

Содержание  $SiO_2$  во флюиде, равновесном с плагиомигматитами, реагирует на изменение давления гораздо более чутко, чем содержания других компонентов раствора (Козловский, Корпечков, 2005; Козловский, 2006). Растворимость  $SiO_2$  при декомпрессии существенно снижается, что инициирует обогащение кремнеземом формирующихся минеральных ассоциаций (Manning, 1994). Следовательно, кремнекислотность мигматитов может являться индикатором степени развития трещиноватости, а также индикатором интенсивности мигматизации амфиболитов.

Геологические наблюдения и многочисленные замеры мощностей прослоев мигматитов разного состава показывают, что структура Хетоламбинской толщи масштабно инвариантна в

том смысле, что мощности прослоев находятся в логарифмической зависимости от ранжированного содержания  $\text{SiO}_2$  (рис. 1).

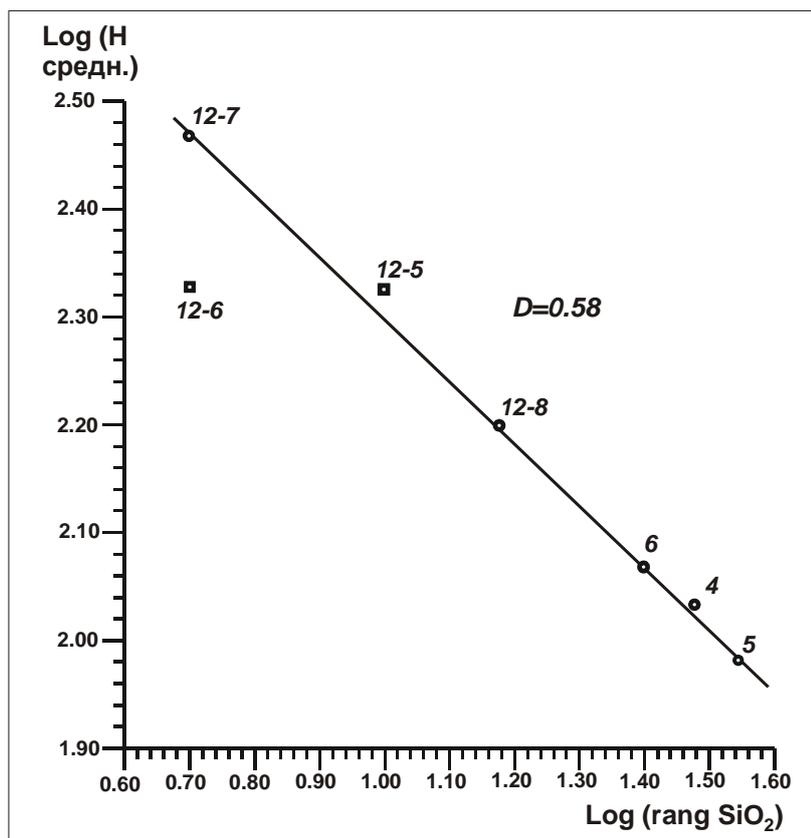


Рисунок 1. Фрактальная организация мощностей прослоев в разрезе ритмично слоистой мигматитизированной Хетоламбинской толщи.

В качестве параметра фрактала выступает ранжированное с шагом в 5 масс. % содержание  $\text{SiO}_2$  в мигматитовом прослое (rang  $\text{SiO}_2$ ). Интервал для ранжирования составляет от 40 до 75 %  $\text{SiO}_2$ , перекрывающий вариации кремнекислотности в мигматитовых прослоях. Ранжирование таким способом обеспечивает ступенчатое увеличение масштабного отрезка от 5 до 35 единиц (масс. %  $\text{SiO}_2$ ). Собственно фрактальная зависимость построена на основе замеров средней суммарной мощности мигматитового прослоя ( $H_i$ ), соответствующей каждому рангу  $\text{SiO}_2$ .

График (рис. 1) показывает, что весь ряд новообразованных апоамфиболитовых пород (пробы 12-7, 12-8, 6, 4, 5) составляет единый регулярный фрактал. Породы протолита – амфиболиты (12-6) и кварц-амфиболовые породы (12-5) отражают полосчатость, унаследованную от протолита и в этот ряд не входят, что подтверждает вывод об эпигенетическом, метасоматическом генезисе полосчатости изученных мигматитов. Фрактальная размерность ( $D$ ) рассчитывалась по стандартной методике [12]:  $D = -\log(H_i)/\log(\text{rang SiO}_2)$  и равна  $D = 0,58$ . Исследованная структура близка к “множеству Кантора” (Mandelbrot, 1967).

Установленная фрактальная организация полосчатости мигматитовых прослоев Хетоламбинской толщи означает, что степень трещиноватости прослоев и интенсивность изменения пород флюидом и мощность зоны активной трещиноватости находятся в нелинейной логарифмической зависимости. Это, в свою очередь, свидетельствует о существовании обратных связей между интенсивностью флюидно-метасоматической проработки и мощностью формирующихся метасоматических зон. Такая зависимость возможна, если прослои мигматизированных амфиболитов разного состава представляют собой последовательный ряд продуктов единого метасоматического процесса и не являются результатом наследования первичной слоистости вулканогенной (протоамфиболитовой) толщи.

В результате, мигматитообразование представляется ступенчатым самоорганизующимся процессом в системе зона сдвига – флюидный поток в понимании (Летников, 1993). При этом каждый прослой мигматизированных пород отвечает определенной ступени структурно-вещественной эволюции зоны трещиноватости. Вероятный механизм действия упомянутых обратных связей основан на снижении хрупкости и увеличении пластичности мигматитовых прослоев от стадии к стадии. Изменение хрупко-пластичных свойств вызвано реакциями пород с флюидом в ходе которых амфиболовые мигматиты ступенчато сменяются более пластичными кварц-биотитовыми мигматитами. Установленная стадийность мигматитообразования и ее связь с эволюцией трещиноватости при сдвиге доказывает, что формирование мигматитовых прослоев проходило синхронно со сдвиговыми деформациями в амфиболитовой толще, а не наложено на ранее образованную систему кливажных трещин.

Результаты наших исследований показали, что процесс мигматитообразования был инициирован серией сдвиговых деформаций, вызвавших поток Na-Si-содержащих флюидов, которые производили метасоматическое преобразование амфиболитового субстрата вдоль сети трещин кливажа пластического течения. В процессе метасоматоза изменялись хрупко-пластичные свойства пород. Такой автокаталитический процесс прерывался перестройкой системы трещин. Подобный механизм взаимодействия трещинообразования и метасоматоза обусловил дискретность процесса и фрактальные свойства мигматитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 04-05-65131, Фонда содействия отечественной науке и программы ОНЗ РАН №2.

#### *Список литературы*

- Борняков С.А., Гладков А.С., Матросов В.А. и др. Нелинейная динамика разломообразования по результатам физического моделирования // *Геотектоника*. 2004. № 5. с. 85-95.
- Борняков С.А., Шерман С.И. Стадии развития сдвиговой зоны и их отражение в соотношениях амплитуд смещения с длинами разрывов // *Геология и геофизика*. 2003. т. 44. № 7. с. 712-718.
- Борняков С.А., Шерман С.И., Гладков А.С. Структурные уровни деструкции в сдвиговой зоне и их отражение во фрактальных размерностях (по результатам физического моделирования) // *Докл. РАН*. 2001. т. 377. № 1. с. 72-75.
- Козловский В.М. Физико-химическая модель образования свекофенских плагиомигматитов Беломорского комплекса Северной Карелии // *Геохимия*, № 9, 2006 с. 924-936.;
- Козловский В.М., Корпечков Д.И. Минералогическая зональность свекофенских плагиомигматитов Беломорского комплекса / *Беломорский подвижный пояс и его аналоги*. Петрозаводск. Ин-т геологии КарНЦ. 2005. с. 181-183.
- Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. М.: Наука. 1993. 230с.
- Русинов В.Л. Зоны сдвиговых деформаций в литосфере и их роль в эндогенной активности Земли // *Геотектоника*. 2005. № 3. с. 66-79.
- Русинов В.Л. Флюидные потоки в рудообразующих системах: главные источники и металлогеническая роль / *Флюидные потоки в земной коре и мантии*. М.: РАН. 2002. с. 77-83.
- Русинова О.В., Русинов В.Л., Абрамов С.С., и др. Околорудные изменения и физико-химические условия формирования золото-кварцевого месторождения Советское // *Геол. Рудн.. Мест.* 1999. т. 41. № 4. с. 308-328.
- Седова И.С., Глебовицкий В.А. Особенности позднеархейской гранитизации и мигматитообразования в Беломорском поясе // *Записки ВМО*. 2005. Ч. СXXXIV. № 3. с. 1-24.
- Шерман С.И., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И. Вертикальная зональность и флюидная проницаемость зон развивающихся разломов // *Геол. Рудных. Местор.* 1991. № 5. с. 13-25.
- Щербакова Т.Ф. Амфиболиты Беломорского комплекса и их гранитизация. М.: Наука. 1988. 150 с.
- Щербакова Т.Ф. К геохимии гранит-мигматитовых образований северо-восточной и юго-западной частей Беломорского пояса на примере Карельского региона // *Геохимия*, № 4, 2006, с. 377-397.
- Mandelbrot B.B. How long is the coast of Britain? Statistical selfsimilarity and fractional dimensions // *Science*. 1967. vol. 156. p. 636-638.
- Manning C.E. The solubility of quartz in H<sub>2</sub>O in the lower crust and upper mantle // *Geochimica Cosmochimica Acta*. 1994. vol. 58. № 22. p. 4831-4839.