1. *Polat A., Kerrich R.* Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from late-archean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: implications for late Archean subduction zone petrogenetic processes // Contrib. to Mineral. and Petrol. 2001. V. 141. P. 36–52.

2. *Polat A., Kerrich R.* Nd-isotope systematics of ~2.7 Ga kites, nesian sites and arc basalts, Superior Province: evidence for shallow crustal recycling at Archean subduction zones // Earth and Planet. Sci. Letters. 2002. V. 202. P. 345–360.

3. *Wyman D. A., Kerrich R., Polat A.* Assembly of archean cratonic mantle lithosphere and crust: plume-arc interaction in the Abitibi-Wawa subduction-accretion complex // Precambrian Research. 2002. 115. P. 37–62.

4. Светов С. А. Магматические системы зоны перехода океан — континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. Петрозаводск, 2005. 230 с.

5. *DePaolo D. J., Linn A. M., Schubert G.* The continental crustal age distribution: methods of determining mantle separation ages from Sm–Nd isotopic data and application to the cordilleran South-western United States // J. Geophys. 1991. Res. 96. P. 2071–2088.

6. *Martin H., Smithies R. H., Rapp R. et al.* An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationship and some implication for crustal evolution // Lithos. 2005. 79. P. 1–24.

7. *Martin H.* Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids // Lithos. 1999. 46. P. 411–429.

8. Ort M. H., Coira B. L., Mazzoni M. M. Generation of a crust-mantle magma mixture magma sources and contamination at Cerro Panizos, central Andes // Contrib. to Mineral. and Petrol. 1996. 123. P. 308–322.

9. Orozco-Esquivel M. T., Nieto-Samaniego A. F., Alaniz-Alvarez S. A. Origin of rhyolic lavas in the Mesa Cetral, Mixico, by crustal melting related to extension // Jor. Volcan. and Geothermal. Res. 118. 2002. P. 37–56.

10. *Kelemen P. B.* Genesis of high Mg# andesites and continental crust // Contrib. to Mineral. and Petrol. 1995. V. 120. P. 1–19.

11. Calmus T., Aguillo-Robles A., Maury R. C. et al. Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites ("bajaites") from Baja California, Mexico: the role of slab melts // Lithos. 2003. 66. P. 77–105.

12. *Taylor S. R., McLennan S. M.* The geochemicalevolution of the continental crust // Rev. Geophys. 1995. V. 33. P. 241–265.

13. Sajona F. G., Maury R. C., Bellon H. et al. High field strength element enrichment of Pliocene – Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, western Mindanao (Philippines) // J. Petrol. 1996. 37. P. 693–726.

14. Kepezhinskas P. K., Defant M. J., Drummond M. S. Progressive enrichment of island arc mantle by melt – peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. 60. P. 1217–1229.

ГИПОТЕЗА МАГМАТИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА ЭКЛОГИТОВЫХ ПАРАГЕНЕЗИСОВ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ДАЙКАХ БАЗИТОВ ГРИДИНСКОЙ ЗОНЫ МЕЛАНЖА, БЕЛОМОРСКИЙ ПОДВИЖНЫЙ ПОЯС

О. С. Сибелев

Институт геологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск; Sibilev@krc.karelia.ru

Гридинская зона эклогитсодержащего меланжа (ГЗМ) — уникальная структура, где на сравнительно небольшой площади присутствуют дезинтегрированные фрагменты практически всех архейских толщ, имеющих место в Беломорском подвижном поясе (БПП), от габбро-анортозитов и мраморов до ультрамафитов и глиноземистых гнейсов. Эти фрагменты (обломочная часть меланжа) уже к рубежу $AR_2 - PR_1$ претерпели полифациальные метаморфические изменения. Они заключены в неоднородный, сложноскладчатый гнейсовый матрикс тоналитового, гранитоидного или диоритового состава.

В палеопротерозое сформировавшиеся меланжированные толщи прорваны базитовыми дайками, дополнительно деформированы и метаморфизованы, частично мигматизированы, а участками метасоматически изменены. Несмотря на всестороннее изучение ГЗМ в последние годы [1—4 и др.], по мнению автора, не определена даже десятая часть «рецептуры» этого многокомпонентного и долго готовящегося «блюда». Нерешенными или решенными частично остаются вопросы геодинамических обстановок, способствующих высокобарным метаморфическим проявлениям и эксгумации эклогитсодержащих комплексов, полистадийности процессов эклогитизации, латеральной неоднородности ГЗМ, взаимосвязи эклогитового и гранулитового метаморфизма и тоналит-трондьемитовых комплексов, структурной эволюции матрикса, образованию «ранних мигматитов» (адакитов?) в обломках апоэклогитов, минглингу габброидных магм и т. д. Но одной из наиболее важных проблем, препятствующих моделированию эволюции структуры, является отсутствие высокобарных парагенезисов во вмещающих эклогиты породах. Цель настоящей работы - попытка предложить гипотетическое решение одного из вопросов: механизма эклогитизации протерозойских габброидов (на примере даек комплекса лерцолитов - габброноритов возраста 2,42-2,44 млрд лет).

Постановка проблемы. Фактические данные, прямо или косвенно касающиеся палеопротерозойской эклогитизации базитов ГЗМ, в тезисной форме сводятся к следующему:

• Наличие эклогитовых парагенезисов исключительно в дайках или частично будинированных телах метагабброидов.

• Отсутствие ассоциаций эклогитовой фации в раме (матриксе меланжа), даже в породах, где присутствуют индекс-минералы, способные отразить в своем составе РТ-параметры высокобарного метаморфизма.

• Генетическая связь эклогитизации с магматизмом, о чем свидетельствует кристаллизация, по крайней мере, части омфацита на субсолидусной стадии [5].

• Наличие нескольких групп даек в составе не менее двух магматических комплексов: лерцолитов — габброноритов и коронитовых габбро [6]; породы некоторых разновозрастных групп даек подвержены эклогитизации.

• Непостоянство минерального состава и структурно-текстурных особенностей интрузивных пород (зональность, зоны закалки, эндоконтактовые и связанные с деформациями преобразования, вторичные изменения и т. д.).

• Достаточная флюидонасыщенность магмы лерцолит-габброноритов для протекания реакций эклогитизации (например, наличие ламмелей Am в магматическом Cpx).

• Необычная петрография эклогитсодержащих базитов.

• Участками внедрение даек в пластичную («теплую») раму и их деформация еще до своей полной кристаллизации [7].

Совокупность этих данных, обладающих высокой степенью достоверности, требует непротиворечивого объяснения и адекватного взаимного согласования.

Обзор существующих моделей. В настоящее время имеется несколько концепций, рассматривающих образование палеопротерозойских эклогитов в базитах ГЗМ:

1. Одна из них формулируется так: «плохо искали ассоциации эклогитовой фации в раме или они не сохранились». Это «стандартная» модель, которая предполагает попадание (в общем случае субдукционное) всей толщи пород в условия высокобарного метаморфизма. Если для архейских эклогитов ГЗМ данная модель в какой-то мере может быть приемлема, то в случае палеопротерозойской эклогитизации она вступает в противоречия с геологическими данными. При тех расчетных параметрах метаморфизма, в которых формировались парагенезисы эклогитовой фации (max T до 930 °С и Р до 19 кбар, по [5]), тоналит-гнейсовые толщи должны быть полностью гомогенезированы (переплавлены). Между тем степень их проработки на этом этапе не столь значительна и контролируется структурно-метаморфическими процессами в дискретных сдвиговых зонах. Характер контактов базитов с вмещающими породами (снижение РТ-параметров метаморфизма от центра к периферии дайковых тел, зоны закалки, участками — экзоконтактовые изменения и т. д.) и другие факты также вводят ограничения на использование этой модели.

2. «Контроль процессов эклогитизации локальными сдвиговыми зонами». По мнению авторов этой концепции [8], пластические деформации в условиях анизотропных полей напряжений могут привести к бластезу высокобарических минералов при относительно невысоких литостатических нагрузках. Несмотря на хорошо представленный авторами материал, эта концепция вызывает определенные противоречия. Например, в самих эклогитизированных породах внутри даек синметаморфические деформации не фиксируются, а между подвергшимися эклогитизации участками базитовых даек и их деформированными эндоконтактами или вмещающими породами существует колоссальный градиент давлений метаморфизма (7-10 кбар). Представляется, что на такое повышение, даже «условного» давления, маломощные (тах первые метры) сдвиговые зоны не способны. Эти зоны способны привнести флюид и в «сухих» метастабильных ассоциациях гранулитов или габброидов, как это происходит в комплексах Берген-Аркс (ЮЗ Норвегия) и Марун-Кеу (Полярный Урал) [9–11 и др.], вызвать эклогитизацию, но, как отмечают сами авторы обсуждаемой концепции, в базитах ГЗМ флюида было достаточно. Кроме того, остается неучтенным факт субсолидусной кристаллизации, по крайней мере, части эклогитовых (омфацитовых) кайм и отсутствие хотя бы близизофациальных эклогитам парагенезисов в тех же сдвиговых зонах, но вне тел базитов (в раме).

3. «Автоклавный эффект» - концепция, предложенная О. И. Володичевым [3]. Она подразумевает уникальную ситуацию преобразования габбро в эклогит «in situ», за счет высокого флюидного давления при кристаллизации магматического расплава в замкнутой системе дайкового тела. Данная концепция объясняет многое из того, что можно наблюдать на реальных геологических объектах ГЗМ, но остается неясным механизм этого процесса. Во время эклогитизации габброидная магма уже содержит большой процент твердой фазы (>50-70%). Насколько солидус оставшегося расплава может повысить флюидное давление? И еще один момент - очевидно, что автоклавный эффект характеризует специфические условия кристаллизации, поскольку эклогитизация базитов в БПП – явление далеко не повсеместное. Неясно, почему эти условия реализовались только в ГЗМ, при этом сохранялись на значительной площади рассматриваемой структуры и в разновозрастных дайках?

4. На оценку РТ-условий формирования омфацит-гранатового парагенезиса может влиять фактор «зависимости растворимости Jd в Cpx^{*} от насыщенности породы Si». По мнению С. П. Кориковского [12], в недосыщенных Si породах реальное давление эклогитизации может быть ниже расчетного на 4–5 кбар. Но в случае рассматриваемых базитов такая поправка не выводит образовавшиеся Omp за рамки эклогитовой фации и не объясняет остающийся градиент давлений между эклогитизированными базитами и вмещающими породами.

5. Рассматривалась и версия метасоматического генезиса эклогитов, но геохимические исследования зональности внутри тел оливиновых габброноритов [5] привели к выводу об изохимическом характере высокобарных метаморфических преобразований.

Таким образом, перечисленные концепции либо неприемлемы, либо нуждаются в дополнительных исследованиях.

Гипотеза «магматического транспорта». Предлагаемая концепция основана лишь на логических построениях, геологических наблюдениях и некоторых петрографических материалах, потому и фигурирует лишь как рабочая гипотеза. Между тем она представляется небезосновательной и может заслуживать определенное внимание не только для палеопротерозойских габбро района Гридино. Суть ее очень проста: в процессе эклогитизации габбро еще сохраняли какое-то количество расплава и имели способность к перемещению. Ниже дан один из предполагаемых сценариев развития геологических событий, сопровождающих эклогитизацию даек габбро (на примере даек комплекса лерцолитов – габброноритов).

К началу палеопротерозоя происходит ремобилизация архейской зоны конвергенции литосферных плит, след деятельности которой на современном эрозионном срезе маркируется областью ГЗМ. Эта относительно пологая зона тектонических движений, возможно, являлась «бронирующим горизонтом» для интрудирующих базитовых магм, по крайней мере, на глубинных уровнях здесь могли формироваться промежуточные магматические камеры. Магмы после частичной кристаллизации представляли собой магматическую суспензию с большой долей твердой фазы – кумулофиры. Например, в относительно хорошо сохранившихся породах комплекса лерцолитов - габброноритов доля кумулата (Ol-Cpx-Opx) значительно превышает половину объема породы. В промежуточных камерах и начинается эклогитизация. Высокое давление обеспечивается как литостатической, так и дополнительной тектонической нагрузкой. Главное направление кристаллизации протекает с формированием микрокристаллитовых друзитовых кайм Орх→Срх вокруг Ol; Срх→Отр вокруг Орх; и омфацитовых кайм по периферии Срх (рис. 1, А). В отдельных случаях можно наблюдать резорбционные ограничения не только кумулокристов, но и омфацитовых агрегатов (рис. 1, А). Возможно, каймы формировались не при твердофазных биметасоматических реакциях Pl с Ol и Opx (например, [13]), а либо путем последовательной кристаллизации остаточного расплава, либо путем реакций твердой фазы с расплавом. Забегая вперед, необходимо отметить, что во многих изученных шлифах из габброноритов Pl практически отсутствует или находится в очень ограниченном количестве. Он мог участвовать в перитектических реакциях, разлагаясь на омфацит и гранат, а мог и просто не кристаллизоваться, отдавая свои компоненты на «строительство» других минералов.

На каком-то этапе магматическая суспензия начинает «выдавливаться» из магматической камеры вдоль зоны архейского меланжа. Петрографически этот процесс выражается в формировании флюидальных текстур в габбро (рис. 1, Б, 2). О том, что это флюидальная, а не деформационная текстура, свидетельствует ветвящаяся, волнистая и прерывистая форма полос интеркумулусной компоненты, облекание ею крупных зерен, отсутствие в последних каких-либо деформаций. В строении флюидальных текстур участвует часть микрокристаллических агрегатов омфацитовых кайм, оторванных течением расплава от корон, гранат и Crn±Pl-Omp агрегат гранофироподобной структуры (рис. 2). Помимо флюидальности, в некоторых случаях наблюдается трахитоидность (ориентировка кумулокристов в направлении, согласном движению потока).

Гранат представляет собой ксеноморфную массу, развитую либо в виде флюидальных полос. либо в виде корон, облекающих пироксены, точнее – их омфацитовые каймы. Он выполняет значительную часть интеркумулусного пространства и начинает формироваться несколько позднее омфацита. Центральные части гранатовых агрегатов выполняет гранофироподобный агрегат, который строго повторяет очертания интеркумулусного пространства (рис. 3). В направлении от кумулокристов, к «гранофиру» (согласно данным О. И. Володичева, персональное сообщение) закономерно возрастает магнезиальность Grt (от 48,4 до 50,6%) и содержание Jd компонента в Отр (от 23,6% в каемке вокруг Орх до 54,5% в средней части гранофироподобного агрегата).

В центральных частях гранофироподобного агрегата содержание Jd в Отр снижается до 38,2%. Эти данные позволяют сделать заключение о том, что в ходе движения суспензии в магматическом канале высокое давление сохранялось до тех пор, пока не были перекрыты (раскристаллизованы) межзерновые каналы и магма не остановилась. Инерция дайковой системы по давлению (и, конечно, по температуре) объясняет своеобразные

^{*} Используемые в тексте сокращения минералов: Am – амфибол, Bt – биотит, Hbl – роговая обманка, Grt – гранат, Срх – клинопироксен, Crn – корунд, Ol – оливин, Omp – омфацит, Opx – ортопироксен, Pl – плагиоклаз, Jd – жадеит.



Рис. 1. Развитие омфацитовых корон, по орто- и клинопироксену, в правом нижнем углу снимка — резорбционные очертания омфацитового агрегата (шлиф В-16, без анализатора) (А); флюидальные текстуры, маркируемые м/з омфацитовым и корунд-омфацит-гранатовым агрегатом (шлиф В-30, николи скрещены) (Б)

формы дайковых тел — многочисленные апофизы и разрывы сплошности вмещающих пород в стенках дайковых полостей; экзоконтактовые изменения вмещающих пород; эклогитизацию габброидов в узких зонах экзоконтакта в тех случаях, когда дайка пересекала более ранние и еще «теплые» (?) базитовые тела.

Самые последние порции расплава (центральная часть гранофироподобных агрегатов) кристаллизовались в условиях снижения температуры и давления. После затвердевания суспензии происходило еще одно интересное явление, природа которого не совсем ясна, - грануляция (перекристаллизация), в первую очередь кумулата, а затем и межкумулусного пространства в мелкозернистый (Срх, Отр, Орх, ±Grt, Вt, Am и др.) агрегат мозаичной структуры. Вероятно, такой процесс был релаксационным, приводящим магматическую систему в равновесие с внешними условиями. Несмотря на подавляющее преобладание твердой фазы в момент остановки суспензии, в эндоконтактах даек формировались закалочные структуры. Скорей всего, это происходило путем бластеза, а не кристаллизации из расплава, о чем говорят находки в закалочных зонах реликтов кумулокристов Орх.

Вполне естественное неравномерное движение магматической суспензии, скорость которого выше в центре тел, и пространственное тяготение грануляции к периферии даек привели к формированию наблюдаемой псевдозональности в относительно крупных телах. Она «усугублялась» амфиболитизацией эндоконтактов и участков наложенных деформаций. Тектонические движения в ГЗМ продолжались достаточно долго, поэтому рассматриваемый механизм эклогитизации не имеет ограничения, касающегося разновозрастности эклогитизированных даек. Возможность проявления такого механизма подчеркивается тем, что Т-параметры эклогитизации палеопротерозойских базитов ГЗМ значительно превышают температуру водного солидуса габбро и эклогита [14].



Рис. 2. Флюидальные текстуры эклогитизированных габбро с начальной стадией грануляции кумулокристов (шлиф В-16-54, николи скрещены)



Рис. 3. Характер кристаллизации гранофироподобного агрегата корунд-омфацитового (А) (шлиф В-16-50-6) и корундплагиоклаз-омфацитового состава (Б) (шлиф В-30). Фотографии любезно предоставлены О. И. Володичевым (в отраженных электронах)

Таким образом, несмотря на некоторую умозрительность отдельных положений гипотезы, при дополнительном обосновании и корректировке, особенно в части петрологии, она способна объяснить практически все парадоксы палеопротерозойской эклогитизации базитовых даек ГЗМ.

1. Бибикова Е. В., Слабунов А. И., Володичев О. И. и др. Изотопно-геохимическая характеристика архейских эклогитов и глиноземистых гнейсов Гридинской зоны тектонического меланжа Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза: Материалы II Рос. конф. по изотопной геохронологии. СПб., 2003. С. 68–71.

2. Володичев О. И., Слабунов А. И., Бибикова Е. В. и др. Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Петрология. 2004. Т. 12, № 6. С. 609–631.

3. Володичев О. И., Слабунов А. И., Степанов В. С. и др. Архейские и палеопротерозойские эклогиты и палеопротерозойские друзиты района с. Гридино (Белое море) // Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минерагения. Материалы науч. конф. и путеводитель экскурсии. Петрозаводск, 2005. С. 60–80.

4. Сибелев О. С., Бабарина И. И., Слабунов А. И., Конилов А. Н. Архейский эклогитсодержащий меланж Гридинской зоны (Беломорский подвижный пояс) на о. Столбиха: структура и метаморфизм // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск, 2004. С. 5–20.

5. Володичев О. И. Беломорский подвижный пояс – древнейшая на Земле высокобарическая долгоживущая система // Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минерагения... Петрозаводск, 2005. С. 129–133.

6. Степанов В. С., Степанова А. В. Гридинское дайковое поле: геология, геохимия, петрология // Там же. С. 285–288. Автор выражает огромную благодарность О. И. Володичеву за предоставленные материалы, обсуждения и замечания к работе; А. И. Слабунову, В. С. Степанову, А. В. Степановой за конструктивную дискуссию.

7. *Травин В. В., Докукина К. А.* Дайки базитов района села Гридино, Западное Беломорье: условия внедрения и особенности деформаций // Там же. С. 302–305.

8. Травин В. В., Козлова Н. Е., Степанов В. С., Степанова А. В. О роли пластических деформаций в процессах эклогитизации // Области активного тектоногенеза в современной и древней истории Земли. Материалы XXXIX Тектонического совещания. Т. 2. М., 2006. С. 312–315.

9. Удовкина Н. Г. Эклогиты Полярного Урала. М., 1971. 191 с.

10. Шацкий В. С., Симонов В. А., Ягоуц Э. и др. Новые данные о возрасте эклогитов Полярного Урала // ДАН. 2000. Т. 371, № 4. С. 519–523.

11. *Austrheim H*. The granulitt-eclogite facies transitions: a comparison experimental work and a natural occurrences in the Bergen Arcs, Western Norway // Lithos. 1991. N 25. P. 163–169.

12. Кориковский С. П. Реакционные фазовые равновесия при перекристаллизации палеопротерозойских габброноритов беломорского комплекса в условиях, близких к границе амфиболитовой и эклогитовой фаций // Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минерагения... Петрозаводск, 2005. С. 189–191.

13. Ларикова Т. Л. Формирование коронарных (друзитовых) структур при метаморфизме габброидов Северо-Западного Беломорья (Балтийский щит): Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2002. 23 с.

14. *Lambert I. B., Wyllie P. J.* Melting of gabbro (quartz eclogite) with excess water to 35 kb pressure, with geological application // Journal of geology. 1972. N 80. P. 693–708.