

АРХИТЕКТУРА АРХЕЙСКИХ КОНВЕРГЕНТНЫХ СИСТЕМ В СРАВНЕНИИ С ФАНОРОЗОЙСКИМИ АНАЛОГАМИ

С.А. Светов

Институт геологии КарНЦ РАН, г.Петрозаводск, e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru

Изучение древнейших (3.05-2.99 млрд лет) мезоархейских андезитовых комплексов Фенноскандинавского щита (выявленных в Центральной части Карельского кратона в пределах западного обрамления Водлозерского блока -Хаутаваарской мегаструктуре), позволило выделить набор характерных для современных субдукционных систем магматических ансамблей, включающих адакитовую (HSA и LSA- типов), байяитовую (высоко- Mg), Nb-обогащенную БАДР, толеитовую и высоко-Nb серии [Светов, 2005].

Геохимическое сопоставление изучаемых мезоархейских вулканитов андезитового ряда Центральной Карелии с породными ансамблями, формирующимися в фанерозойских субдукционных комплексах островодужного и окраинно-континентального типа (северная и южная зона погружения плиты Наска (Эквадор, Чили) и Филиппинской плиты (ЮЗ Япония), приуроченных к зонам пологого погружения слэбов, показывает близкую геохимическую характеристику генерируемых расплавов со значимой ролью адакитового магматизма.

Если проводить параллели между архейскими и современными субдукционными системами, основанные на геохимической характеристике породных ассоциаций, соотношении серий в их пределах, в качестве наиболее близкого аналога мезоархейским мультисериальным ансамблям Центральной части Карельского кратона, может служить вулканическая система Северного Эквадора и Колумбии (NVZ- северная вулканическая зона) в области пологого погружения плиты Наска под Южно-Американскую плиту (вулканы Пичинча, Антисана и Сумако, формирующие фронтальную, центральную и тыловую зону субдукционной системы) [Bourdon et. al., 2002]. Становление магматических формаций этого района проходит при непосредственном участии в процессе магмогенерации, как вещества мантийного слэба, так и метасоматизированной мантии. При этом вулканизм в субдукционной системе имеет четкую латеральную геохимическую зональность, отражающую внутреннее строение конвергентной системы, положение магматических очагов в ее пределах и общую архитектуру.

В режиме пологого погружения слэба, область фронтального вулканического пояса значительно отодвинута от желоба (на расстояние около 250 км), маркируется вулканом Пичинча (Западные Кордильеры). В данной области доминирующим развитием пользуются адакиты (HSA-типа, с содержанием MgO <3 мас. %; K₂O/Na₂O~ 0.4, с низкими содержаниями TPЗЭ и Y, высокими концентрациями Sr>500 ppm и высокими значениями отношений La/Yb, Sr/Y) и высокомагнезиальные андезиты (байяиты), характеризующиеся высокими содержаниями MgO до 6.02 мас.%, повышенным уровнем TPЗЭ, высокими концентрациями Cr (150-170 ppm) и Ni (70-85 ppm). Формирование адакитов Пичинчи проходит при плавлении базальтового слэба, в зоне «перелома» (области увеличения наклона) плиты Наска, генерация байяитов - в ходе смешения первичных адакитовых расплавов с веществом мантийного клина в ходе подъема магм на поверхность.

По мере смещения вулканического фронта в сторону континента (в центральном вулканическом поясе - вулкан Антисана, Восточные Кордильеры) растет роль геохимически переходных серий от адакитов к АДР-серии известково-щелочного ряда, в тыловом вулканическом поясе (вулкан Сумако) ключевую роль играют высоко-Nb базальты. Породы характеризуются низким содержанием SiO₂ (44-54 мас.%), повышенными содержаниями K₂O (0.8-4 мас.%), Na₂O (4.1-6.5 мас.%), при отношении K₂O/Na₂O~ 0.6, и могут быть классифицированы как абсорокиты и шошониты. Вулканиты значительно обогащены PЗЭ (La/Yb=28-50), как в легкой, так и тяжелой части спектра, и характеризуются аномально высокими концентрациями Nb (от 21 до 80 ppm). Таким образом формирование магматических систем в центральном и тыловом поясах происходит за счет частичного плавления пород метасоматизированной мантии [Bourdon et. al., 2002].

На наш взгляд важным является тот факт, что наличие породной триады: адакиты-байяиты- высоко-Nb или Nb-обогащенные андезиты (БАДР-АДР) является своеобразным геохимическим маркером существования «пологих и горячих» субдукционных систем (как в случае фанерозойских систем Северного Эквадора и других аналогичных областей субдукции)

и может с большой долей вероятности распространяться на модели архейских конвергентных систем. При этом формирование контрастных геохимических серий связано прежде всего со взаимодействием магм, образованных при плавлении субдуцируемого слэба, с веществом метасоматизированного мантийного клина. В меньшей степени, это обусловлено контаминацией первичными магмами корового вещества.

В рамках данного исследования, нас интересовали дополнительные геохимические аргументы, позволяющие подтвердить существование режима пологой горячей субдукции в ходе эволюции архейских конвергентных систем, что позволило бы реконструировать их архитектуру и модель развития. С этой целью нами было проведено изучение распределения флюид-мобильных (FME) элементов в древнейшем островодужном комплексе Фенноскандинавского щита с целью оценки роли флюидной фазы при формировании магматических расплавов на основании прецизионного ICP-MS анализа.

Основное внимание уделялось В/Ве систематике вулканитов. В связи с тем, что бор (В) является одним из наиболее подвижных во флюидной фазе элементов, он может быть использован в качестве химического маркера существования глубинных флюидов [Leeman, Sisson, 1996]. Для этой цели наиболее приемлемо сопоставление концентраций бора с другими, менее подвижными во флюидной фазе элементами (но с близкими коэффициентами распределения (K_d) минерал-расплав), что позволяет оценить процесс дегидротации океанического слэба, а также вклад осадочного материала в процесс формирования магм в зонах субдукции [Leeman et al., 1994]. Вместе с тем кроме бора, для оценки роли флюида при формировании андезитовых расплавов можно использовать такие FME элементы как Li, Be, As, однако анализ их поведения может вызывать некоторые дополнительные трудности при интерпретации, например в связи с ярко выраженной халькофильной природой As.

В настоящее время имеются прецизионные данные по средним концентрациям бора в базальтах из различных геодинамических обстановок. Так мафиты островных дуг характеризуются значительными вариациями концентраций бора в пределах от 1 до 90 ppm, в то время как его содержание в современных океанических базальтах N-MORB-типа находится в интервале от 0.28 до 3 ppm, а в базальтах океанических островов на уровне 2-3 ppm [Mogris et al., 1990]. Основное объяснение, которое используется для трактования столь высокого уровня бора в островодужных сериях связывается с удалением бора из субдуцируемого слэба в зону мантийного клина (из которой и формируются многие субдукционные расплавы), в ходе процессов метасоматизации мантии. Однако отмечается и тот факт, что метаморфизованная океаническая кора может быть обогащена бором еще до стадии инициализации субдукционных процессов [Leeman et al., 1996].

Следует подчеркнуть, что В/Ве отношение позволяет существенно дополнить петрологическую картину процессов магмообразования. Это связано с тем, что бор и бериллий хотя и имеют очень близкие коэффициенты распределения минерал-расплав (в магматических системах субдукционных зон при существующих там РТ-условиях) [Vebout et al., 1993], но при этом обладают разной подвижностью во флюидной фазе.

Бериллий менее подвижный элемент и может транспортироваться в слэбе на более глубокий уровень без существенного перераспределения [Tatsumi, Isoyama, 1988]. Таким образом, с одной стороны высокая растворимость флюидной фазой бора, а с другой более стабильное поведение в этом процессе бериллия, позволяет получить петрологически важное отношение (В/Ве), оценивающее роль флюида в процессе магмогенерации расплавов в субдукционных системах, и не меняющееся в зависимости от степени частичного плавления и фракционирования расплава.

В настоящее время исследователями указывается на значительные вариации В/Ве отношения в магматических системах из супрасубдукционных обстановок, где значения отношения могут варьировать в широких пределах (от 10 до 170), что чаще всего интерпретируется наличием обогащенного мантийного резервуара и значительным вкладом осадочного материала в процесс плавления [Mohan et al., 2008]. В противоположность, базальты MORB и OIB типов характеризуются низкими значениями В/Ве отношения, на уровне 3-5 [Ryan et al., 1996].

Основная трудность при изучении флюид-мобильных элементов, особенно в архейских породах, связана с процессами выветривания и метаморфической проработки породных литотипов. Изучаемые породы имеют разную степень метаморфической сохранности и вторичной проработки. Существует несколько вариантов оценки степени изменения породной

серии, один из них по уровню концентраций H_2O в пробах и потерь при прокаливании. Средние концентрации H_2O в вулканитах адакитового ряда не высоки, составляют в лавах - 0.153 ± 0.046 вес.%, для субвулканитов - 0.126 ± 0.028 вес.%, в туфах - 0.166 ± 0.023 вес.%. Значение потерь при прокаливании (п.п.п.) для лав адакитов - 2.052 ± 0.145 вес.%, для субвулканитов - 1.655 ± 0.170 вес.%, в туфах - 2.180 ± 0.142 вес.%, что говорит о хорошей сохранности пород. Кроме того, для оценки степени химического выветривания породных литотипов мы использовали индекс химического выветривания [Nesbitt, Young 1982] $CIA = 100[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$, в молекулярных процентах (CaO^* - в силикатной фракции). Несмотря на то, что использование индекса направлено на изучение вулканогенно-осадочных пород, в последнее время его применяют для характеристики изменения вулканических образований [Mohan et al., 2008]. Значения индекса CIA для пород мезоархейского островодужного комплекса варьирует от 46 до 52, что говорит об очень низкой степени (или полном отсутствии) химического выветривания породного ансамбля. Так же важным маркером химического выветривания является наличие положительной или отрицательной Ce аномалии - $Ce/Ce^* = 3Ce_n / (2La_n + Nd_n)$. Для адакитов и ассоциирующих вулканических серий Центральной Карелии Ce/Ce^* отношение варьирует от 0.86 до 1.15, что не позволяет предполагать активное химическое выветривание. Таким образом, полученные выводы позволяют надеяться на сохранность FME-системы в древнейшем островодужном комплексе Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Центральной Карелии.

Приведем полученные нами результаты. Для адакитов древнейшего островодужного комплекса Фенноскандинавского щита значения концентраций FME элементов приведены в табл. 1.

Табл.1. Средние содержания FME элементов (ICP-MS) в мезоархейских адакитах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса

Породы	Структура	B	Be	B/Be	Li	Cs
Субвулканиты	Игнойльская	6.938 ± 3.558	1.453 ± 0.017	4.74	20.175 ± 3.798	1.146 ± 0.388
Лавы	Игнойльская	1.778 ± 0.130	1.822 ± 0.125	0.94	24.622 ± 2.537	1.040 ± 0.118
Туфы	Игнойльская	1.120	1.294	0.86	28.169	1.986
Дайки	Чалкинская	6.086 ± 1.970	1.744 ± 0.079	3.48	28.446 ± 0.623	5.491 ± 0.919
Лавы	Няльмозерская	-	1.245 ± 0.053	-	0.685 ± 0.418	0.552 ± 0.321

Для древнейших адакитов Карельского кратона нами отмечаются значительные вариации бора, бериллия и B/Be отношения в различных литофациальных разновидностях пород адакитовой серии, что подтверждает предположение о возможном обеднении (разной степени обеднения) FME-системы. Предполагая, что субвулканиты с большей вероятностью сохранили первичные концентрации флюид-мобильных элементов, следует отметить, что уровень концентрации бора в Игнойльском адакитовом некке и адакитовых дайках Чалкинской палеопостройки идентичен, и равен 6.0-6.9 ppm. Для адакитов из дайковой фазы Чалкинской палеовулканической постройки нами получены также близкие субвулканитам Игнойлы значения B/Be отношения на уровне 3.4-4.7, а учитывая данные по лавам и туфам древней адакитовой серии величина B/Be отношения варьирует от 0.8 до 4.74.

В качестве сравнения приведем B/Be систематику адакитов из фанерозойских комплексов Панамы [Tomascak et al., 2000], в которых величина данного отношения составляет - 6.76 ± 1.01 , что значительно ниже значений полученных для андезитов БАДР известково-щелочной серии - 11.3 ± 6.10 . В вулканитах дуги Вануату, величина B/Be отношения значительно варьирует, составляет в среднем 18.2 ± 12.60 , а наибольшие значения получены для пород Центрально-Американской дуги, в которой B/Be отношение достигает 36.5, но также со значительными вариациями в серии (36.5 ± 30.2) [Chan et al., 1999].

Таким образом очевидно, что адакиты (как архейского, так и фанерозойского возраста) показывают самые низкие концентрации FME элементов, в отличие от магматических систем, генерируемых из области метасоматизированного флюидами мантийного клина (БАДР-АДР серий фанерозоя), для которых концентрации FME элементов максимальны. Данное наблюдение хорошо коррелирует с моделью формирования адакитов в ходе непосредственного плавления субдуцируемого мафического слэба, когда весь бор и прочие флюид-мобильные элементы были удалены из него на ранней стадии дегидротации. Однако остается вопрос: как варьирует B/Be отношение в сосуществующих с древнейшими адакитами прочих

магматических системах андезитового ряда, отличаются ли они более высокими концентрациями FME элементов. Для ответа на него, целесообразно рассмотреть систематику флюид-подвижных элементов в вулканитах БАДР, толеитового и байяитового типов выделенных нами в пределах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса.

Концентрация флюид-мобильных элементов (FME) и В/Ве отношения в древнейших (3.05-2.99 млрд.лет) островодужных вулканитах Фенноскандинавского щита приведена в таблице 2.

Табл.2. Средние содержания FME элементов (ICP-MS) в островодужном комплексе Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса.

Породы	Структура	В	Ве	В/Ве	Li	Cs
Высоко-Nb (HNB) серия						
Субвулканиты	Остерская	11.974±1.236	1.524±0.323	7.85	76.884*	4.662±0.380
БАДР-Nb-обогащенная серия						
Субвулканиты	Остерская	18.938±2.110	1.300±0.263	14.56	53.252*	4.303±2.328
Лавы	Чалкинская	3.680±1.016	1.475±0.155	2.49	40.694*	2.950±0.301
Байяитовая (высоко-MgO) серия						
Лавы, дайки	Чалкинская	5.820±1.131	1.009±0.097	5.78	24.647*	3.453±1.516
Толеитовая серия						
Лавы, дайки	Чалкинская	6.531±3.165	0.923±0.058	7.07	27.955±7.642	4.072±2.383

Наблюдаемые концентрации бора в ассоциирующих с адакитами высоко-Nb, байяитовой, БАДР и толеитовых сериях находятся в интервале от 1.1-11.9 ppm, что соответствует его содержанию в фанерозойских адакитах и примерно идентично характеристике в изучаемых нами архейских адакитовых системах (1.1-6.9 ppm). Концентрация Ве в древнем островодужном комплексе (0.9-1.5 ppm) в среднем значительно ниже, чем в адакитах. Более высоким выглядит содержание Cs в ассоциирующих с адакитами вулканитах (уровень концентраций 2.9-4.6 ppm), хотя в качестве исключения можно назвать адакитовые дайки Чалкинской структуры, в которых Cs часто превышает 6-8 ppm. Таким образом кроме отдельных превышений по Li, FME-систематика всего островодужного комплекса существенно не различается.

Адакиты и островодужные мезоархейские вулканиты Карельского кратона показывают достаточно низкие В/Ве отношения (так в адакитах -0.8-4.7; в островодужных андезитах – 2.4-7.8 с аномально высокими до 14.5), по сравнению с фанерозойскими островодужными комплексами известково-щелочного ряда, где этот параметр может достигать уровня 30-36.

Данный вывод на первый взгляд не укладывается в ожидаемые тенденции и несколько противоречит модели формирования островодужных андезитовых систем при плавлении флюид-обогащенной области мантийного клина. Однако многими авторами отмечается, что вариации В/Ве отношения зависят не только от типа пород участвующих в субдукции, но и от скорости и температурного режима субдукционного процесса [Vebout et al., 1993].

В случае если субдукция затрагивает молодую (<20 млн.лет) «горячую» океаническую кору в режиме пологого погружения, прогрессивный метаморфизм, связанный с увеличением РТ-параметров по мере погружения слэба, приводит к тому, что большая часть бора, еще в начале метаморфических преобразований, выносятся из слэба, постепенно обедняя им флюидную фазу при стабильной концентрации Ве, следствием чего и является тот факт, что метасоматизированный мантийный клин имеет низкие величины В/Ве отношения [Mohan et al., 2008]. Таким образом, весь ансамбль формирующегося островодужного комплекса будет характеризоваться низкими концентрациями FME элементов.

В противоположность, при субдукции древней (>20 млн.лет) океанической коры, В-Ве система является стабильной и по достижению больших глубин, что при дегидротации,

приводит к переносу бора флюидами в область мантийного клина и отражается в высоких значениях В/Ве отношений в расплавах формирующихся на данном уровне [Leeman, 1994].

Резюмируя, следует подчеркнуть, что FME систематика древнейших адакитовых вулканитов Карельского кратона подтверждает модель их формирования при непосредственном плавлении мантийного слэба и при подъеме расплава с контаминацией вещества мантийного клина. При этом распределение FME элементов во всех породных ансамблях древнейшего островодужного комплекса Карельского кратона может являться дополнительным свидетельством в пользу доминирования пологой архитектуры субдукционных конвергентных систем в мезоархее.

Список литературы

Светов С.А. Магматические системы зоны перехода океан-континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита // Петрозаводск. КарНЦ РАН. 2005. 230с.

Bebout, G.E., Ryan, J.G., Leeman, W.P. B-Be systematics in subduction-related metamorphic rocks — characterization of the subducted component // *Geochim. Cosmochim. Acta*. V. 57. 1993. P.2227–2237.

Bourdon E., Eissen J.P., Gutscher M.A. и др. Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America) // *Earth and Planetary Science Letters*, 2003. V.205. P. 123-138.

Chan L.H., Leeman W.P., You C.F. Lithium isotopic composition of Central American volcanic arc lavas: Implications for modification of the sub-arc mantle by slab-Derived fluids // *Chem. Geol.* 1999. V.160. P. 255-280.

Leeman, W.P., Carr, M.J., Morris, J.D. Boron geochemistry of the central-American volcanic arc — constraints on the genesis of subduction-related magmas // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1994. V. 58. P. 149–168.

Leeman, W.P., Sisson, V.B. Geochemistry of boron and its implications for crustal and mantle processes // *Boron. Rev. Mineral.* 1996. P. 645–707.

Mohan M, Kamber B.S., Piercey S.J. Boron and arsenic in highly evolved Archean felsic rocks: Implications for Archean subduction processes // *Earth and Planetary Science Letters*. 2008.V. 274. P. 479–488.

Morris, J.D., Leeman,W.P., Tera, F. The subducted component in island arc lavas — constraints from be isotopes and B-Be systematics // *Nature*, 1990. V. 344. P. 31–36.

Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motion inferred from major element chemistry of lutites. // *Nature*, 1982. V. 299. P. 715-717.

Ryan, J.G., Leeman, W.P., Morris, J.D., Langmuir, C.H. The boron systematics of intraplate lavas: Implications for crust and mantle evolution // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1996. V. 60. P. 415–422.

Tamascak P.B., Ryan J.G., Defant M.J. Lithium isotope evidence for light element decoupling in the Panama subarc mantle // *Geology*. 2000. V. 28. P. 507-510.

Tatsumi, Y., Isoyama, H. Transportation of beryllium with H₂O at high-pressures - implication for magma genesis in subduction zones // *Geophys. Res. Lett.* 1988. V. 15. P. 180–183.