

АРХЕЙСКАЯ СУБДУКЦИЯ: МАРКЕРНЫЕ ПОРОДНЫЕ АССОЦИАЦИИ И АРХИТЕКТУРА

Светов С.А., Светова А.И.

Институт геологии КарНЦ РАН

ARCHAEOAN SUBDUCTION: MARKER ROCK ASSEMBLAGES AND ARCHITECTURE

Svetov S.A., Svetova A.I.

Institute of Geology, KarelianRC, RAS, Petrozavodsk

One of the basic problems in petrology is the petrogenesis of magmatic melts formed in subduction systems from the generation of plate-tectonic processes to the present time. This paper is an attempt to sum up the results of the detailed study of the Fennoscandian Shield's oldest (3.05-2.99 Ga) andesite assemblages, preserved in the Vedlozero-Segozero greenstone belt on the western margin of the Palaeoarchaeon Vodlozero block, and to analyze the evolution of this transition zone from Meso – to Neoarchaeon time.

The basic method used in this project was the precision study of LILE, HFS and REE distribution in the andesitic magmatic systems of the greenstone belt and the study of fluid-mobile element (FME) distribution.

The Vedlozero-Segozero greenstone belt is a big accretionary-orogenic structure, which involves a series of tectonically overlapping stratotectonic assemblages that mark contrasting geodynamic regimes of its formation: island-arc BADR-adakitic (3.05-2.90 Ga), oceanic komatiitic-basalt (3.05-2.90 Ga) and continental-margin ADR-adakitic (2.90-2.85 Ga) complexes. The detailed petrological-geochemical study of andesitic rock series has led us to conclude that:

- Andesitic magmatism in the Vedlozero-Segozero greenstone belt occurred repeatedly in the following time intervals: 3.05-2.90; 2.90-2.85 and 2.82-2.68 Ga.
- A rock assemblage (adakite-high-Mg andesite – high-Nb or Nb-enriched andesite), characteristic of subduction settings, was formed in each time interval.
- Adakites were essential in all intervals of magmatism. Adakitic melts are characteristic of primary melts which, when mixed with mantle matter, produce bajaites, high-Nb and other new magmatic series.
- During the Mesoarchaeon, the convergent system at the western margin of the Vodlozero block was evolving in a subduction system regime with flat slab plunging. Both oceanic slab and metasomatized mantle matter was involved in magma generation processes. As the hot slab plunged flatly, it began to dehydrate early, thereby decreasing the degree of fluid saturation of the mantle wedge domain. The geochemical diversity of the magmatic series generated (rock succession from adakite to calc-alkaline and alkaline series) is due to the lateral zonation of the subduction system and the succession of magma generation sources during its plunging.
- The FME-systematics of the oldest andesite complexes in the Karelian Craton and its correlation with the characteristics of Greenland's oldest Archaean granite-gneiss and Wyoming granodiorite are consistent with our knowledge of the dominance of the flat architecture of subduction convergent systems in Archaean time.

Изучение петрогенезиса магматических расплавов, формирующихся в субдукционных системах, с момента зарождения плейт-тектонических процессов и до современного времени, является одной из фундаментальных проблем петрологии и активно дискутируется на протяжении последних пятидесяти лет, опираясь на классические представления, сформулированные в работах (Купо, 1960; Рингвуд, 1981). Важность данной научной проблемы обусловлена тем, что ее решение является ключом к реконструкции механизмов генерации как фанерозойской, так и ранней архейской континентальной коры и позволяет детально описать всю эволюцию корово-мантий-

ных взаимодействий на протяжении геологической истории планеты.

Реконструкция архейской геологической истории планеты, ее геодинамических режимов возможна на основании изучения сохранившихся фрагментов архейских гранит-зеленокаменных систем в пределах древних кратонов мира (таких как Супериор, Вайоминг, Илгарн, Дхарвар и др.). В связи с тем, что в последние годы было установлено, что гранит-зеленокаменные комплексы представляют собой аккрецированные к континентальному основанию фрагменты океанических плато, островодужных систем, задуговых бассейнов и окраинно-континентальных вулкани-

ческих поясов (Kusky, Polat, 1999; Кожевников, 2002; Polat, Kerrich, 2006; Naqvi, Prathap, 2007; Щипанский, 2008) и при детальном рассмотрении, содержат магматические серии, во многом аналогичны фанерозойским. Это позволяет нам использовать знания, накопленные в ходе изучения современных зон перехода «океан – континент» (Orozco-Esquivel et al., 2002; Bourdon et al., 2003; Calmus et al., 2003), по геохимико-петрологической характеристике индикаторных породных ассоциаций при интерпретации результатов изучения архейских магматических систем, сформированных на ранних стадиях развития Земли. Главной проблемой подобных реконструкций является фрагментарная сохранность архейских разрезов, связанная с тем, что уровень эрозии гранит-зеленокаменных комплексов часто достигает -10-15 км, не позволяя сохраниться полному набору страто-тектонических ассоциаций, существовавших в этих временных рамках, затрудняя модельные построения.

Важно подчеркнуть, что наиболее дискутируемым вопросом в архейской геологии, является определение времени инициализации плейт-тектонических процессов. По мнению разных исследователей этот рубеж варьирует от 3.2 до 2.5 млрд. лет (Condie, Pease, 2008).

К настоящему времени аргументировано доказаны следующие факты: на границе палео- и мезоархея (на рубеже 3.2-3.1 млрд. лет) уже существовала океаническая кора (мафические плато) и спрединговые центры (маркируются реликтами офиолитовых комплексов); мощность океанической коры в эти периоды превосходила современную кору; уже были сформированы древние континентальные блоки; на границе блоков существовал процесс субдукции, что обуславливает формирование TTG- серий (Кожевников, 2002; Polat, Kerrich, 2006; Naqvi, Prathap, 2007; Щипанский, 2008).

К интервалу 3.0 млрд лет во многих древних кратонах отмечается активизация вулканизма андезитового ряда с геохимическими чертами типичных островодужных и окраинно-континентальных серий; с формированием адакитов высококремнистого и низкокремнистого типов (HSA и LSA), это может являться свидетельством существования конвергентных субдукционных процессов. В разрезах зеленокаменных поясов проявлены признаки обдукции мафических комплексов на континентальное основание.

В целях поиска новых возможных аргументов для корректной реконструкции ранних архейских конвергентных режимов, нами проводилось детальное изучение древнейших на Фенноскандинавском щите андезитовых ассоциаций (с возрастом 3.05-2.99 млрд лет), сохранившихся в пределах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса на западном обрамлении палеоархейского Ведлозерского блока, а также анализ эволюционного развития данной транзитной зоны от мезо-

до неоархея. При этом основной акцент в работе делался на изучение адакитов и поиск геохимико-петрологических характеристик, позволяющих проводить как реконструкцию условий магмогенерации расплавов различных типов, так и с целью восстановления архитектурного облика мезоархейских конвергентных систем.

Методической основой работы стал комплексный геологический анализ породных ансамблей в пределах зеленокаменного пояса, прецизионное изучение распределения (LIL, HFS, REE) элементов в андезитовых магматических системах зеленокаменного пояса, а также изучение распределения группы флюид-мобильных (FME) элементов (таких как B, Be, Li, As) и B - B/Be систематике породных серий, как наиболее информативной при реконструкции режимов магмообразования в конвергентных обстановках.

Геохимический анализ проб, включавший определение FME элементов, проводился методом ICP-MS на тандемном масс-спектрометре высокого разрешения с ионизацией в индуктивно-связанной плазме (Element 2 Thermo Finnigan) в аналитической лаборатории Института геологии и геохимии УроРАН (г. Екатеринбург) и ICP-MS (масс-спектрометр X-Series 2 - Thermo scientific) в аналитической лаборатории Института геологии КарНЦ РАН. В ходе работ было выполнено около 200 прецизионных анализов.

Работа базировалась на проведенном ранее детальном изучении породных комплексов Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (Светов, 2005, 2009) и является развитием проведенных ранее исследований (Кожевников и др., 2001; Светов, 2010).

По геологическому строению зеленокаменный пояс представляет собой крупную аккреционно-орогенную структуру, в составе которой выделяется набор тектонически совмещенных стратотектонических ассоциаций (СТА), маркирующих контрастные геодинамические режимы его формирования: островодужный БАДР-адакитовый (3.05-2.95 млрд. лет), океанический коматиит-базальтовый (3.05-2.95 млрд. лет) и окраинно-континентальный АДР-адакитовый (2.90-2.85 млрд. лет) комплексы.

До проведения геохимической типизации андезитовых комплексов в пределах зеленокаменного пояса следует остановиться на основных временных интервалах развития субдукционной системы, выраженных в проявлении адакитового и ассоциирующего с ним вулканизма. Имеющийся в настоящее время материал позволяет выделить следующие интервалы его развития:

3.05-2.90 млрд. лет. Древнейшим в Ведлозерско-Сегозерском зеленокаменном поясе (и на всем Фенноскандинавском щите) является островодужный комплекс, представленный реликтами вулканических построек в пределах Хаутаваарской мегаструктуры (Светов, 2009), сложенных дифференцированной БАДР (андезит-базальт-ан-

дезит-дацит-риолитовой) ассоциацией известково-щелочного ряда, относимой к адакитовой серии. Для ассоциации ключевым объектом является Игноильская адакитовая вулканическая постройка (Светов, 2009), для которой получены следующие U-Pb возрасты: некка – 2995 ± 20 млн. лет (Сергеев, 1982), лав – 2945 ± 19 млн. лет (Овчинникова и др., 1994) и детритовых цирконов из терригенных граувак перекрывающих постройку – 2947 ± 13 млн (Светов и др., 2006). Дополнительное подтверждение существования средне-кислого вулканизма в этом интервале было получено в ходе прецизионного датирования цирконов из лав толеитовых андезитов (Чалкинская палеовулканическая постройка) находящихся в разрезе БАДР-адакитового комплекса (в переслаивании с туфами адакитового состава и андезитами известково-щелочного ряда). В результате измерений получены две изохроны – 2971 ± 59 млн.лет (нами интерпретируется как время проявления раннего вулканизма) и 2804 ± 31 млн.лет (отражение поздних магматических и метаморфических событий в регионе) (Светов, 2010). В этом же временном интервале широко развита субвулканическая фаза андезидацитового и дацитового состава. В частности, в пределах Койкарской структуры, изучены крупные субвулканические и небольшие дайковые тела, секущие мафитовую (коматиит-базальтовую) часть мезоархейского разреза и содержащие ксенолиты коматиитов и габбро. U-Pb возраст (по циркону) субвулканических дацитов, принадлежащих к адакитовой серии, равен 2935 ± 20 млн. лет (Бибилова, Крылов, 1983). Подобные дайки выявлены также в Совдозерской структуре.

Дополнительные данные получены при анализе детритовых цирконов из мезоархейских мафитовых туфитов и хемогенных силицитов в разрезе лавовой коматиитовой толщи Хаутаваарской структуры, которые позволили получить изохрону – 2917.2 ± 8.7 млн.лет (Светов, 2010). Полученное значение может рассматриваться как возможное древнее ограничение времени формирования высокомагнезиальной ассоциации Хаутаваарской структуры и одновременно как подтверждение существования средне-кислого магматизма.

В выделенном временном интервале наиболее широким развитием вместе с адакитами, пользуются андезиты Nb-обогащенной БАДР, высоко-Mg андезитовой (байяитовой) и толеитовой серий.

2.90-2.85 млрд.лет Данный этап магматической активности в пределах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса, связан с формированием палеовулканических построек андезидацитового, дацитового и дацит-риолитового составов, реликты которых сохранились в Масельгской, Янишской, Корбозерской, Семченской и Эльмусской структурах. Цирконометрия кислых вулканитов Койкарской (Янишской) палеовулка-

нической постройки позволила получить для лав значение – 2860 ± 15 млн. лет (Самсонов и др., 1996), для лав дацитов Хаутаваарской структуры – 2854 ± 14 млн. лет (Сергеев, 1989), при этом для дайки дацитов этой же структуры – 2862 ± 45 млн. лет (Овчинникова и др., 1994). Вулканиты, в данном временном интервале, представлены АДР-комплексом, в котором так же существенную роль играют адакитовые расплавы и вулканиты Nb-обогащенного типа.

В связи с тем, что проведенное ранее изучение Sm-Nd систематики Nb-обогащенной АДР серии Эльмусской структуры показало, модельные возраста вулканитов (по модели (DePaolo et al., 1991) находятся в интервале от 3074 до 3283 млн. лет (наиболее древнее значение – 3506 млн. лет) при $\epsilon Nd(t)$ от -1 до -6 , нами проведена работа по датированию фрагмента Эльмусской палеовулканической постройки, представленной породами АДР-серии известково-щелочного ряда. По результатам датирования цирконов получена изохрона – 2866 ± 11 млн.лет (Светов, 2010), что говорит о принадлежности комплекса к интервалу 2.90-2.85 млрд.лет.

2.82-2.68 млрд.лет. Данный интервал характеризует завершающую фазу формирования средне-кислых комплексов Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса, основные проявления магматизма в этот период связаны с формированием гранодиоритовых массивов санукитоидного ряда (в Хаутаваарской структуре) с возрастом 2790 ± 20 млн. лет (Бибилова, 1989), в Чалкинской структуре – 2745 ± 5 млн. лет (Овчинникова и др., 1994) и вулканитов АДР-серии в Масельгской структуре. Для вулканитов Масельгской палеопостройки были получены две изохроны – 2743 ± 12 млн. лет, что идентично времени формирования санукитоидов, и 2686 ± 18 млн.лет (возможное время метаморфической реактивизации территории) (Светов, 2010). Близкие возрастные значения получены для субвулканического некка у оз.Сарилампи, секущего Чалкинскую вулканическую постройку, изохрона по циркону дает значение – 2765 ± 13 млн.лет, для одного зерна установлено значение – 2811 ± 12 млн.лет (Светов, 2010). Вулканиты адакитового ряда в этом временном интервале представлены ограниченно, лишь в дайковой и вулканокластической фазах.

Подводя итог геохронологическому изучению уровней средне-кислого магматизма в пределах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса, можно в качестве основных пиков магматической активности выделить интервалы: 3.05-2.90; 2.90-2.85; 2.82-2.68 млрд.лет, при этом выделенные пики магматической активности связаны с эволюцией долгоживущей субдукционной системы, развивающейся на западном фланге Ведлозерского блока. Выделяемые при детальном изучении ассоциации являются индикаторами развития транзитали, от древнейшего остроудожного

(3.05-2.90 млрд.лет), окраинно-континентального (2.90-2.85 млрд.лет) до заключительного транс-прессионно-транстенсионного (2.82-2.68 млрд.лет) этапов (Светов, 2005; 2009). В целях оценки возможной архитектуры мезоархейской конвергентной зоны, следует проанализировать геохимическую характеристику и возможные условия петрогенезиса породных ассоциаций.

Маркерные породные ассоциации

Проведенные нами исследования показали не только временную, но и геохимическую неоднородность андезитового магматизма в пределах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. В структурах наблюдается устойчивый породный ансамбль: адакиты – Nb-обогащенные БАДР (АДР) андезиты – байяиты (высоко-Mg андезиты) +/- толеитовые андезиты, который может являться качественным признаком существования субдукционных систем. Причем в данной системе адакиты маркируют режим плавления субдуцируемой плиты, а все прочие ассоциации формировались при плавлении метасоматизированной области мантийного клина или в ходе смешения первичных адакитовых магм с мантийным веществом.

Приведем краткую характеристику наиболее значимых магматических серий:

Адакитовая серия. Вулканыты и субвулканыты данной серии, выявленные в Хаутаварской зоне, характеризуются содержаниями SiO₂ на уровне 53–76 мас. %, что позволяет их классифицировать как высоко-кремнистые (HSA) разновидности с подчиненным количеством низко-кремнистых (LSA) литотипов. Вариации содержания Na₂O изменяются от 2.5 до 5.6 мас.%, содержание MgO < 4 мас.% При этом адакиты характеризуются высокими содержаниями Sr от 260 до 800 ppm, Ba >350ppm, Zr-115-140ppm и U-1.1-1.7ppm., при величине Sr/Y отношения на уровне 20-123. Спектры распределения РЗЭ в адакитах характеризуются ярко выраженными отрицательными аномалиями по Nb, Ti и деплетированы HREE. На классификационной диаграмме Sr/Y-Y фигуративные точки мезоархейских адакитов Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса попадают в область фанерозойских адакитов Центральной и Южной Америки, и эталонных комплексов Северного Эквадора (рис. 1, 2).

Nb-обогащенная БАДР серия. К данной серии могут быть отнесены большинство породных литотипов входивших ранее в дифференцированную БАДР-серию. По содержанию кремнезема и щелочей породные ансамбли принадлежат к андезибазальтам, андезитам, дацитам и, реже, риодацитам с нормальной щелочностью. Соотношение щелочей K₂O/Na₂O в породах варьирует от 0.3 до 0.5, что позволяет говорить о явно выраженной Na специфике ассоциации. БАДР-серия имеет повышенные содержания Nb (7-11 ppm), Al₂O₃ (до

16-18 мас.%), Cr (20-200 ppm), Ni (12-140 ppm) в первичных выплавках и обогащение Co, Zr, Y, Sr, Ba в поздних дифференциатах. Андезитовые вулканыты характеризуются отношениями Zr/Y=5.4-8.8, (La/Yb)_{pm}=8-19, Nb/Ta= 8-19. Для лав БАДР-серии типичным является обогащение легкими РЗЭ, с выполаживанием в области тяжелых РЗЭ (рис.1).

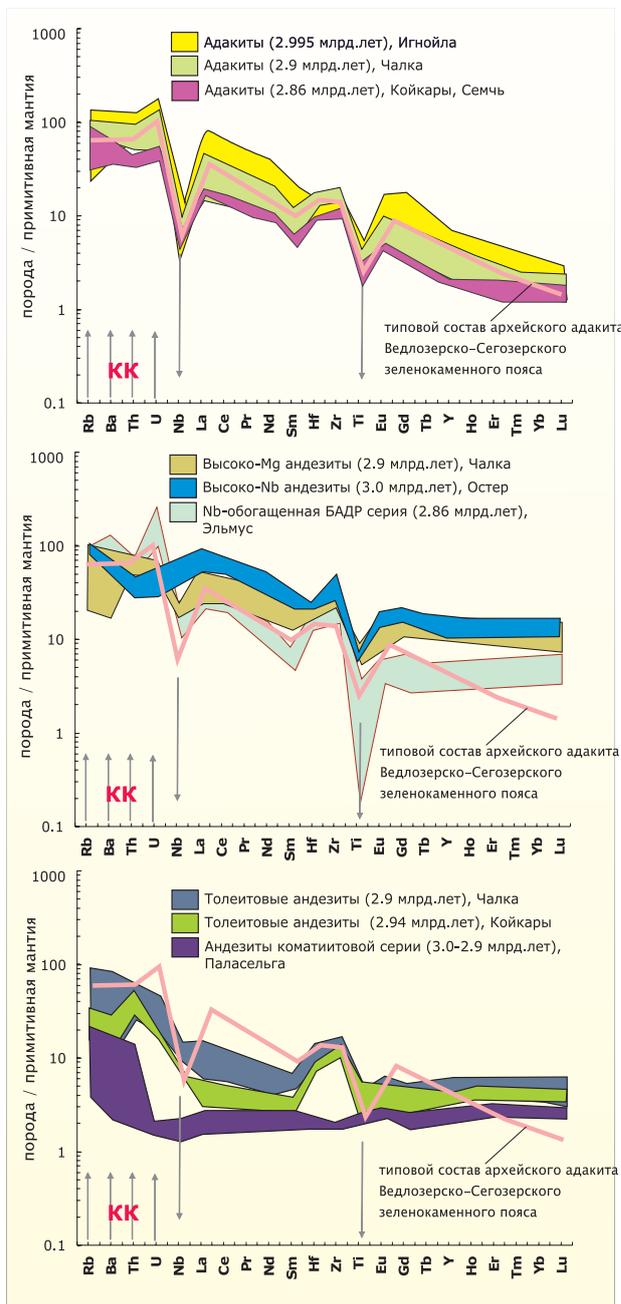


Рис.1. Мультиэлементные диаграммы для древнейших андезитовых комплексов Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. Нормировано по примитивной мантии.

Fig.1. Multielement plots for the oldest andesite complexes of the Vedlozero-Segozero greenstone belt. Normalised to the primitive mantle.

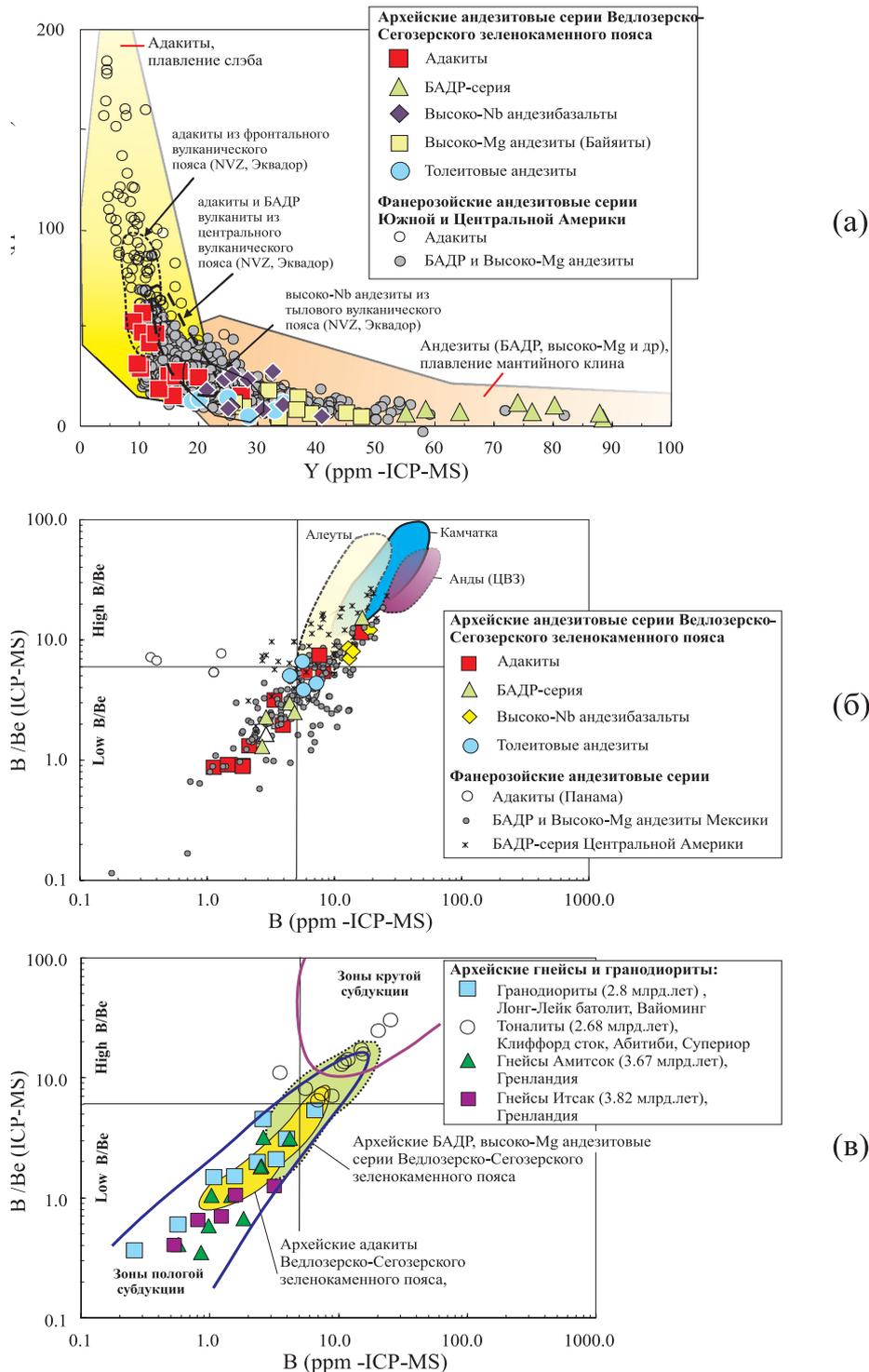


Рис.2. Диаграммы в координатах (а) Sr/Y-Y, (б-в) B/Be-B для древнейших андезитовых комплексов Велдозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. Классификационные поля на диаграмме Sr/Y-Y построены по (Defant, Drummond,1990), поля вулканитов Северного Эквадора (Пичинча, Антисана, Галерас) по (Bourdon, et al. 2003). Точки и поля архейских и фанерозойский комплексов мира на диаграммах Sr/Y-Y и B/Be-B построены по данным базы GeoRock (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de>) и (Mohan et. al., 2008).

Fig. 2. Diagrams in the coordinates (a) Sr/Y-Y, (b-c) B/Be-B for the oldest andesite complexes of the Vedlozero-Segozero greenstone belt. The classification fields in the Sr/Y-Y diagram were constructed (Defant & Drummond,1990) and the volcanic fields of North Ecuador (Bourdon, et al. 2003). The points and fields of the Archean and Phanerozoic complexes of the world in the Sr/Y-Y and B/Be-B diagrams were constructed using the GeoRock database (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de>) and (Mohan et. al., 2008).

Табл. 1. Геохимическая характеристика андезитовых серий
Table 1. Geochemical characteristics of andesite series

Параметр Parameter	Адакитовая серия Adakites	Nb-обогащенная ассоциация		Высоко-Nb Базальты NEB	Толейтовая Серия Tholeiitic Andesites	«Коматиитовая» Серия Komatiitic andesites
		Байяиты (высоко-Mg Андезиты) Bajaites	БАДР-серия «нормального» Ряда BADR			
ΣtO_2	54–70/52–73	53–64	51–73/ 55–78	50–53	58–65/60–63	55–59
Mg#	35–67/40–60	52–58	32–48/33–62	45–48	35–53/60–63	50–54
Th	4–11/2–5	2–4	2–11/4–11	1–3	2–5/1–5	0.5–1.2
U	1.0–3.5/0.7–1.6	0.55–0.85	0.4–1.7/1.2–8.5	0.5–1.0	0.6–1.0/0.3–0.4	1.0–1.2
Nd	4–12/3–5	6–9	7–11/8–17	20–45	5–12/4–5	0.9–1.6
Yf	1.9–5.9/2.3–3.7	2.7–4.5	2.8–7.1/3.8–8.3	5.1–5.8	3.2–4.8/2.1–3.0	0.5–0.7
Zr	87–240/100–200	140–170	180–330/110–420	230–430	130–200/100–150	18–22
Cr	100–800/40–250	225–620	20–200/50–150	100–200	270–800/100–200	600–2400
Ni	25–250/12–150	150–650	12–140/2–40	30–80	100–300/28–45	30–70
La	8–70/12–16	9–22	10–26/10–53	28–52	2–7/2–4	1–2
Yd	0.5–1.6/0.5–0.8	2.1–4.5	2.0–3.6/2.0–4.0	4–6	1.7–3.0/1.6–1.8	1.0–1.4
U	1.0–3.5/0.7–1.6	0.55–0.85	0.4–1.7/1.2–8.5	0.5–1.0	0.6–1.0/0.3–0.4	1.0–1.2
Ga	18–25/17–27	14–16	17–27/14–22	19–30	15–24/15–19	9–11
Sc	6–22/6–14	20–37	13–32/3–20	20–40	17–27/22–26	43–53
Sr	250–840/120–327	140–320	140–890/16–250	250–360	230–400/15–100	45–65
Ba	280–980/200–490	160–280	312–580/100–1100	270–370	100–630/170–180	10–110
Zr/Y	8.0–24.5/12.2–23.0	3.5–5.9	5.4–8.8/5.1–17.2	4.8–5.6	5.0–7.5/5.0–8.2	1.3–1.6
(La/Y) _{pm}	8.1–31.4/10.3–21.6	1.9–4.5	3.2–20.1/3.0–20.0	4.9–6.2	0.9–1.9/0.7–1.7	0.7–0.9
Nb/Ta	16–32/9–16	17–19	8–19/9–19	18–23	12–26/10–13	2.0–2.2
ΔNb	–0.5– –1.1/–0.7– –1.2	–0.02– –0.20	–0.2– –0.4/ –0.3– –0.6	+0.07– +0.10	–0.2– –0.4/ –0.2– –0.7	+0.2 – +0.4

Примечание. Значения приводятся в формате «54-70»/«52-73», левая часть отношения характеризует древний андезитовый комплекс с возрастом 3.05–2.95 млрд.лет; правая часть отношения – ассоциацию с возрастом 2.9–2.85 млрд.лет; Параметр ΔNb (Fitton, 1999), рассчитывается на основе существующей корреляции в содержании Nb, Y, Zr в породах по формуле: $\Delta\text{Nb} = 1.74 + \log(\text{Nb}/\text{Y}) - 1.92 \log(\text{Zr}/\text{Y})$.

Note. The values are given in format “54-70»/«52-73». The lower part of the ratio characterizes an old andesite complex with an age of 3.05–2.95 Ga and the right part an assemblage with an age of 2.9–2.85 Ga; The parameter ΔNb (Fitton, 1999) is calculated from the existing correlation in the Nb, Y and Zr content of the rocks using the formula: $\Delta\text{Nb} = 1.74 + \log(\text{Nb}/\text{Y}) - 1.92 \log(\text{Zr}/\text{Y})$.

Высоко-Nb базальты, андезибазальты, андезиты (HNB). Данная ассоциация выявлена среди субвулканических пород в пределах Остерской палеовулканической постройки. Серия выделяется на основании аномально высоких концентраций Nb в породах андезитового ряда. Высоко-Nb андезибазальты, андезиты Остерской структуры характеризуется пониженными содержаниями $\text{SiO}_2=50-53$ мас.%, $\text{Mg\#} = 45-52$ и высокими концентрациями Nb > 20 ppm (20–45 ppm), ЛРЗЭ – La (10–26 ppm), средним уровнем содержаниями Cr (100–200 ppm), Ni (30–80 ppm), имеют отношениями $\text{Zr}/\text{Y}=4.8-5.6$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{pm}}=4.9-6.2$, Nb/Ta= 18–23.

Байяиты (Высоко-Mg андезибазальты, андезиты). Выделяются нами на основе фанерозойского эталонного типа – высокомагнезиальных андезитов района Байя, Мексика (Calmus et al., 2003; Pallares et al., 2008). Породы данного типа распространены достаточно широко в древнейшем островодужном комплексе Карельского кратона, они представлены лавовой и дайковой фациями в пределах Чалкинской структуры, вы-

явлены в Няльмозерской и Хаутаварской площадях. Основное отличие от вулканитов прочих серий связано с их повышенной магнезиальностью ($\text{Mg\#} = 53-64$, при содержании $\text{SiO}_2=53-64$ мас.%), высокими концентрациями Cr (220–620 ppm), Ni (150–650 ppm) при пониженных концентрациях Nb (6–9 ppm). Вулканиты имеют отношения $\text{Zr}/\text{Y} = 3.5-5.9$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{pm}}=1.9-4.5$, Nb/Ta= 17–19.

Толейтовые андезиты. Породы данного типа представлены лавовой и дайковой фациями в пределах Чалкинской структуры, предположительно существуют в Хаутаварской палеовулканической постройке. По содержанию $\text{SiO}_2 = 58-65$ мас. % породы отвечают андезитам, их магнезиальность варьирует в широких пределах Mg\# от 35 до 53. В этой серии так же отмечаются повышенные концентрации Cr (270–800 ppm), Ni (100–300 ppm) при низких содержаниях Nb (<4 ppm). Вулканиты имеют отношения $\text{Zr}/\text{Y}=5.0-7.5$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{pm}}=0.9-1.9$, Nb/Ta= 12–26. Основное отличие от вулканитов прочих серий связано с нефракционированным распределением РЗЭ (рис.1.).

Андезибазальты, андезиты «коматиитовой» серии. Данная группа пород выделена в Паласельгинской структуре, в виде дайковой фазы, секущей толщу коматиит-базальтового состава, возраст даек оценивается в 3.0-2.9 млрд.лет, что соответствует времени формирования древнейшего островодужного комплекса Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса, поэтому их краткое описание включено в работу. Название серии связано с предположением о том, что формирование расплавов проходило в ходе глубокой дифференциации первичных коматиитовых магм. Выявленные дайки сформированы андезибазальтами, андезитами ($SiO_2=55-59$ мас. %) с магнезиальностью $Mg\# = 50-54$, аномально высокими содержаниями Cr (600-2400 ppm) и повышенными содержаниями Ni (30-100 ppm), низкими концентрациями Sr (< 60 ppm), Ba (<110 ppm), Nb (<1.6 ppm), Hf (0.7 ppm) и Zr (<22 ppm). При этом спайдерграмма андезитов данного типа имеет недифференцированный характер в области РЗЭ (рис.1). Delta Nb систематика андезитов данного типа отмечает плюмовую компоненту в их составе, подобную коматиитам, что может интерпретироваться как результат формирования пород в ходе дифференциации (ликвационной) первичных высокомагнезиальных расплавов. Породы также отличают очень низкие, не типичные для андезитов, отношения $Zr/Y- 1.3-1.6$, $(La/Yb)_{pm}=0.7-0.9$, $Nb/Ta= 2.0-2.2$.

Суммарная геохимическая характеристика вулканитов андезитового ряда в зеленокаменных структурах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса отражена в табл.1., в которой при-

ведены интервалы содержаний элементов в различных магматических сериях.

Реконструкция архитектуры архейских субдукционных систем

Рассмотрев разнообразие магматических серий, существующих в мезоархейских конвергентных системах, следует подчеркнуть, что значимую роль при этом играют адакитовые расплавы. Формирование адакитов (за исключением С-адакитов (Xiao, Clements, 2007)), в настоящее время объясняется моделью их генерации в ходе прямого плавления субдуцируемой океанической коры, преобразованной в ходе погружения в амфиболиты или эклогиты (Kay, 1978; Defant, Drummond, 1990; Martin, 1999; Martin et al., 2005). Данный процесс может проходить на различных этапах существования субдукционных систем и связан со следующими процессами: субдукцией молодой горячей океанической коры (с возрастом < 25 млн лет) и ее непосредственным плавлением (Defant, Drummond, 1990); плавлением океанической коры на инициальной стадии заложения субдукционных систем (Sajona et al., 1993); плавление субдуцируемой океанической коры (с возрастом > 25 млн лет) на стадии отмирания субдукционной системы при восстановлении мантийной геотермы до температур, достаточных для начала плавления водосодержащих компонентов океанической плиты (Sajona et al., 2000); плавление в зонах «мантийных окон», в разрывах субдуцируемых океанических плит и на границах с трансформными разломами при высоком термальном апвеллинге (Yogodzinski et al., 2001; Calmus et al., 2003).

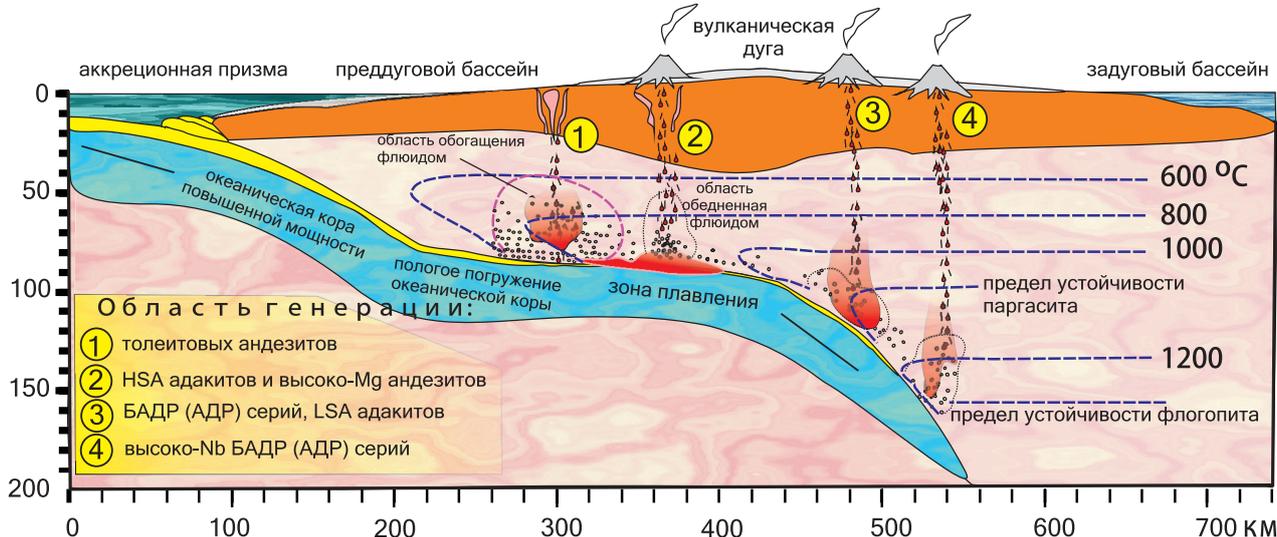


Рис. 3. Схематичная модель строения мезоархейской субдукционной системы на западном обрамлении Ведлозерского блока.

Fig. 3. Schematic structural model of a Mesoarchean subduction system at the western margin of the Vodlozero block

Единственный тип адакитов (континентальные адакиты С-типа), не связан своим существованием с субдукционными обстановками, а образуется в ходе плавления базальтового кила

континентальной коры (Atherton, Petford, 1993).

В связи с тем, что геохронологические данные показывают мультистадийное формирование ада-

китовой ассоциации на западном обрамлении Ведлозерского блока, в модельной интерпретации геодинамических обстановок следует остановиться на модели развития долгоживущей конвергентной системы. Для того, чтобы охарактеризовать стиль субдукции и более корректно приблизиться к описанию ее внутренней структуры можно воспользоваться характеристикой породных ассоциаций по флюид-мобильным элементам (FME).

Петрологическая значимость FME систематики определяется в первую очередь уникальной чертой бора (B), в связи с тем, что этот элемент один из наиболее подвижных во флюидной фазе, и может быть использован в качестве химического маркера существования глубинных флюидных фаз в магматических источниках (Lee-man, Sisson, 1996). Вместе с тем, кроме бора, для оценки роли флюида при формировании расплавов, могут использоваться такие FME элементы как Li, Be, As.

В настоящее время имеются лишь отдельные прецизионные данные (ICP-MS) по концентрациям FME элементов в андезитовых сериях различных геодинамических обстановок. Анализ геохимической базы GeoRock показал, что вулканисты 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, в базальтах океанических островов на уровне 2-3 ppm (Morris et al., 1990). Столь высокий уровень бора в островодужных сериях связывается с его удалением из субдуцируемого слэба в зону мантийного клина (из которой и формируются многие расплавы), в ходе процессов метасоматизации мантии. Таким образом, классификация пород по бору (B) позволяет судить о геодинамических условиях формирования породных серий и позволяет характеризовать архитектуру конвергентной системы. Для более качественной оценки поведения FME элементов в магматических системах, следует использовать отношение концентрации бора к менее подвижным во флюидной фазе элементам (например к Be).

B/Be отношение позволит нам существенно дополнить характеристику режимов магнообразования. Бор и бериллий, имея близкие коэффициенты распределения минерал-расплав (Vebout et al., 1993), обладают разной подвижностью во флюидной фазе. Бериллий (Be), как менее подвижный элемент, может транспортироваться в слэбе в ходе субдукции на большие глубины 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 (B/Be), оценивающее роль флюида в процессе магногенерации расплавов в субдукционных системах, и не меняющееся в за-

висимости от степени частичного плавления и фракционирования расплава (Mohan et al., 2008).

Используя имеющиеся данные по FME систематике фанерозойских андезитовых серий, формирующихся при различных стилях субдукции (пологих и крутых системах) на примере Мексики, Центральной Америки, вулканических комплексов Андийской зоны (северный и южный сегмент (области с пологой субдукцией) и Курило-Камчатской, Алеутской островодужных систем (крутая субдукция) проанализированы в сопоставлении с ними мезо-неоархейские андезитовые комплексы Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. Проведенные предварительные исследования по оценке сохранности флюид-мобильной системы в архейских комплексах показал (Светов 2010), что FME-система в андезитовых ассоциациях достаточно хорошо сохраняется и в наиболее законсервированном состоянии находится в субвулканической фации (Рис. 2 б, в).

Установлено, 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.

B/Be отношение в адакитах фанерозойских комплексов Панама (Tomascak et al., 2000) составляет 6.76 ± 1.01 , что значительно ниже значений полученных для андезитов БАДР известково-щелочной серии в тех же комплексах – 11.3 ± 6.10 . В вулканитах дуги Вануату, величина B/Be отношения значительно варьирует, составляет в среднем 18.2 ± 12.60 , наибольшие значения отношения получены для пород Центрально-Американской дуги, в которой B/Be отношение достигает 36.5, при аномально высоких вариациях в серии (36.5 ± 30.2) (Chan et al., 1999).

Для мезоархейских адакитов Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса установлены концентрации бора (некк и дайки) равные 6.1-6.9 ppm, что соответствует фанерозойским адакитам из пологих субдукционных систем и значительно ниже значений характеризующих адакиты, формирующиеся при крутой субдукции. Данное наблюдение 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.

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 комплексах (1.1-6.9 ppm).

Адакиты и ассоциирующие с ними прочие островодужные мезоархейские вулканисты Карельского кратона показывают достаточно низкие

V/Be отношения (относятся большей частью к Low V/Be типу, (так в адакитах -0.8-4.7; в островодужных андезитах – 2.4-7.8 с аномально высокими до 14.5). Данные значения сопоставимы с V/Be систематикой архейских гранито-гнейсов Гренландии (3.67 и 3.82 млрд.лет), гранодиоритов Вайоминга (2.8 млрд.лет) (Mohan et.al., 2008) и значительно ниже, чем в фанерозойских вулканитах известково-щелочного ряда Алеутской и Курило-Камчатской островодужных систем, где V/Be отношение может достигать уровня 30 - 70. Данный вывод на первый взгляд не укладывается в ожидаемые тенденции и несколько противоречит концепции формирования островодужных андезитовых систем при плавлении флюид-обогащенной области мантийного клина. Однако многими авторами отмечается, что вариации V/Be отношения зависят не только от типа пород участвующих в субдукции, но и от скорости и температурного режима данного 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, выносится из слэба, постепенно обедняя им флюидную фазу при стабильной концентрации Be, следствием чего и является тот факт, что метасоматизированный мантийный клин имеет низкие величины V/Be отношения (Mohan et. al., 2008). Таким образом, весь ансамбль формирующегося островодужного комплекса будет характеризоваться низкими концентрациями FME элементов, что мы и наблюдаем в андезитовых ассоциациях Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (рис.3).

В противоположность, при субдукции древней (>20 млн.лет) океанической коры, V-Be 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 V/Be отношений в расплавах, формирующихся на данном уровне (Leeman, 1994). Подобная тенденция сохраняется и в случае крутого погружения слэба, иллюстрацией чего, является V/Be систематика вулканитов Алеутской, Курило-Камчатской островодужных систем и Центральной вулканической зоны Анд.

Таким образом, в результате анализа В-В/Ве системы выделяется два контрастных типа пород: 1 – с низким содержанием В и низким В/Ве отношением и 2 – с высоким содержанием В и высоким В/Ве отношением. В- В/Ве систематика отражает степень участия флюидной фазы в процессах магмогенерации расплава, а в случае комплексной характеристики вулканитов, формирующихся в конвергентных зонах (как при плавлении слэба, так и метасоматизированной ман-

тии) может являться геохимическим инструментом для разделения субдукционных систем по их архитектуре (областей с пологой и крутой субдукцией).

Обобщая полученный материал, можно сделать следующие выводы:

Эволюция конвергентной системы на западном обрамлении Водлозерского блока проходила в мезоархее в режиме развития субдукционной системы с пологим погружением слэба. В процессе магмогенерации, было вовлечено как вещество океанической плиты, так и метасоматизированной мантии. Пологое погружение горячей плиты приводило к раннему началу ее дегидротации, что уменьшало степень насыщенности флюидом области мантийного клина. Геохимические разнообразие генерируемых магматических серий (смена пород от адакитов к известково-щелочным и щелочным сериям) объясняется латеральной зональностью субдукционной системы и сменой очагов магмообразования по мере ее погружения.

Установленная породная триада: адакиты-высоко-Mg андезиты (байяиты)- высоко-Nb или Nb-обогащенные андезиты (БАДР-АДР) является геохимическим маркером существования «пологих и горячих» субдукционных систем на протяжении всей геологической истории (как в фанерозое, так и в архее).

Адакиты (НАС) являются «первичными магмами» и при смешении с веществом мантийного клина продуцируют ряд новых магматических серий: байяитовые, Высоко-Nb и др.

Проведенная FME-систематика древнейших андезитовых комплексов Карельского кратона и сопоставление ее с характеристикой древнейших архейских гранито-гнейсов Гренландии, гранодиоритов Вайоминга (Рис.2) согласуется с представлением о доминировании пологой архитектуры субдукционных конвергентных систем в архее.

Литература

Бибикова Е.В., И.Н.Крылов. Изотопный возраст кислых вулканитов Карелии // Докл. АН СССР.1983. Т. 268, №5. С. 1231–1235.

Бибикова Е.В.Уран-свинцовая геохронология ранних этапов развития древних щитов. М., Наука. 1989. 256 с.

Кожневников В. Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск. КарНЦ РАН. 2000. 223 с.

Кожневников В.Н., Светов С.А., Светова А.И. Некоторые признаки неглубокой субдукции в архее. // Материалы международной конференции «Новые идеи в науках о земле», М., 2001. Т.1. С. 58.

Овчинникова Г.В., В.А.Матреничев, О.А.Левченков, С.А.Сергеев и др. U-Pb и Pb-Pb изотопные исследования кислых вулканитов Хаутаваарской зеленокаменной структуры, Центральная Карелия // Петрология, т.2., №3. 1994. С. 266–281.

- Рингвуд А. Е.* Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра. 1981. 584 с.
- Самсонов А. В., Библикова Е. В., Пухтель И. С.* Изотопные и геохимические различия кислых вулканических пород зеленокаменных поясов Карелии и их геотектоническое значение // Корреляция геологических комплексов Фенноскандии. 1-я Международная Конференция, 8–11 сентября 1996, Санкт-Петербург. СПб.: изд. фирмы «Минерал», 1996. С. 74–75.
- Светов С.А., А.И.Светова, Т.Н.Назарова.* Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс Центральной Карелии – новые геохронологические данные и интерпретация результатов // в «Геология и полезные ископаемые Карелии», Петрозаводск, ИГ КарНЦ, н. 13. 2010. С. 5–12.
- Светов С.А.* Магматические системы зоны перехода океан-континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита // Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2005. 230 с.
- Светов С.А., Н.М.Кудряшов, Ю.Л.Ронкин и др.* Мезоархейская островодужная ассоциация Центрально-Карельского террейна (Фенноскандинавский щит). Новые геохронологические данные // Доклады РАН. 2006. Т. 406. №3. С. 370–374.
- Светов С.А.* Древнейшие адакиты Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2009. 115 с.
- Светов С.А.* Архитектура архейских конвергентных систем в сравнении с фанерозойскими аналогами (по данным FME-систематики вулканитов) // Литосфера. 2010. № 3. С.12–20.
- Сергеев С.А.* Геология и изотопная геохронология гранит-зеленокаменных комплексов архея Центральной и Юго-Восточной Карелии // Автореф. дис... канд. г.-м.н. 1989. 24с.
- Щипанский А. А.* Субдукционные и мантийно-плюмовые процессы в геодинамике формирования архейских зеленокаменных поясов. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 560 с.
- Atherton M. P., Petford N.* Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust // Nature. 1993. V. 362. P. 144–146.
- 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. 1993. V. 57. P.2227–2237.
- Bourdon E., Eissen J.P., Gutscher M.A.* Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America) // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V.205. P.123–138.
- Calmus T., Aguillo-Robles A., Maury R.C., Bellon H., Benoit M., Cotten J., Bourgeois J., Michaud F.* Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites (“bajaites”) from Baja California, Mexico: the role of slab melts // Lithos. 2003. V. 66. P.77–105.
- Condie, K. C. Pease, V.,* When did plate tectonics begin on planet Earth? Geological Society of America Special Paper 440. 2008. 294 pp.
- 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.
- Defant, M.J., Drummond, M.S.* Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // Nature. 1990. №347. P.662–665.
- 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 Southwestern United States // J. Geophys. 1991. Res. 96. P. 2071–2088.
- Fitton J. G., Saunders A. D., Norry M. J. et al.* Thermal and chemical structure of the Island plume // Earth Planet Sci. Lett. 1997. V. 153. P. 197–208.
- Kay R. W.* Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1978. V. 4. P. 117–132.
- Kuno H.* High alumina basalt // J. Of Petrology. 1960. V. 1. P.121-145
- Kusky T.M., Polat A.* Growth of granite-greenstone terranes at convergent margins and stabilization of Archaean cratons // Tectonophysics. 1999. V. 305. P. 43–73.
- 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.
- Martin H.* Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids // Lithos. 1999. V. 46. P. 411–429.
- Martin H., Smithies R. H., Rapp R. et al.* An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // Lithos. 2005. V. 79.
- 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.
- Naqvi S.M., Rana Prathap J.G.* Geochemistry of adakites from Neoproterozoic active continental margin of Shimoga schist belt, Western Dharwar Craton, India: Implications for the genesis of TTG // Precambrian Research. 2007. V.156. P. 32–54.
- Orozco-Esquivel M.T., Nieto-Samaniego A.F., Alaniz-Alvarez S.A.* Origin of rhyolite lavas in the Mesa Central, Mexico, by crustal melting related to extension // Jor. Volcan. And Geothermal Res. 2002. V. 118. P.37–56. P. 1–24.
- Pallares C., Bellon H., Benoit M. et al.* Temporal geochemical evolution of neogene volcanism in northern Baja California (27°–30° N): Insights on the origin of post-subduction magnesian andesites // Lithos. 2008. V. 105. P. 162–180.
- Polat A., Kerrich R.* Reading the geochemical fingerprints of archaic hot subduction volcanic rocks:

evidence for accretion and crustal recycling in mobile tectonic regime // Archean geodynamics and environments. Geophysical monograph series 164. Am. Geoph. Un. 2006. P.189–213.

Sajona F. G., Maury R. C., Bellon H. et al. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines // *Geology*. 1993. V. 21. P. 1007–1010.

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.

Xiao L., Clements J. D. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints // *Lithos*. 2007. V. 95. P. 399–414.

Yogodzinski G. M., Lees J. M., Churikova T. G. et al. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges // *Nature*. (Lond.). 2001. V. 409. P. 500–504.