

АРХИТЕКТУРА АРХЕЙСКИХ КОНВЕРГЕНТНЫХ СИСТЕМ В СРАВНЕНИИ С ФАНЕРОЗОЙСКИМИ АНАЛОГАМИ (ПО ДАННЫМ FME-СИСТЕМАТИКИ ВУЛКАНИТОВ)

© 2010 г. С. А. Светов

*Институт геологии КарНЦ РАН
185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11
E-mail: ssvetov@krc.karelia.ru*

Поступила в редакцию 12.04.2010 г.

Проведено изучение распределения флюид-мобильных элементов (FME) в древнейших (3.05–2.95 млрд. лет) андезитовых комплексах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Фенноскандинавского щита, сформированных в конвергентной обстановке. В результате анализа В–В/Ве системы установлено, что породы мезоархейской БАДР (базальт-андезит-дацит-риолитовой)-адакитовой ассоциации характеризуются низким содержанием В, отношением $V/Be < 10$ и геохимически подобны фанерозойским магматическим комплексам, формирующимся в режимах горячей и пологой субдукции, что может свидетельствовать о доминировании подобных систем на архейской стадии инициализации плейт-тектонических процессов.

Ключевые слова: архей, субдукция, андезиты, адакиты, флюид-мобильные элементы.

Изучение петрогенезиса магматических расплавов, формирующихся в субдукционных системах, с момента зарождения плейт-тектонических процессов в архее и до настоящего времени, является одной из фундаментальных проблем петрологии и активно дискутируется на протяжении последних пятидесяти лет, опираясь на классические представления, сформулированные в работах [3, 13]. 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-мантийных взаимодействий на протяжении геологической истории планеты.

Уникальными полигонами для разработки геодинамических моделей развития субдукционных систем стали фанерозойские конвергентные зоны Тихоокеанского огненного кольца, позволяющие не только выявить и систематизировать разнообразие магматических комплексов, к ним приуроченных, но и детально описать, на основе геофизических данных, их архитектуру и глубинное строение. К настоящему времени в фанерозойских островных дугах и активных континентальных окраинах выявлен ряд уникальных породных серий (геохимически контрастных между собой), таких как: адакитовая, байяитовая (высоко-Mg андезитов), высоко-Nb базальтов, толеитовая и др., а также их ассоциации: БАДР, АДР-адакит-байяитовая; БАДР-байяит-толеитовая, отражающие различные условия магмогенеза и маркирующих существенные отличия в механизмах субдукционных взаимодействий.

Обращая взгляд на архейскую историю планеты, наиболее интересный материал для реконструкции геодинамических событий того времени может быть получен при изучении сохранившихся фрагментов архейских гранит-зеленокаменных систем в пределах древних кратонов мира (таких как Супериор, Вайоминг, Илгарн, Дхарвар и мн. др.). В настоящее время установлено, что гранит-зеленокаменные комплексы представляют собой аккрецированные к континентальному основанию фрагменты океанических плато, островодужных систем, задуговых бассейнов и окраинно-континентальных вулканических поясов [14, 19, 22] и при детальном рассмотрении, содержат магматические серии, во многом аналогичные фанерозойским. Это позволяет нам использовать знания по геохимико-петрологической характеристике индикаторных породных ассоциаций, накопленные в ходе изучения фанерозойских зон перехода “океан – континент” [9, 10, 21], в качестве апробированных эталонов при проведении петрологического анализа сходных по составу объектов, сформированных на ранних стадиях развития Земли.

В целях поиска новых возможных методов реконструкции ранних архейских конвергентных режимов, нами проводилось детальное изучение древнейших на Фенноскандинавском щите андезитовых ассоциаций (с возрастом 3.05–2.95 млрд. лет) сохранившихся в пределах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (рис. 1) на западном обрамлении палеоархейского Ведлозерского блока. Основной акцент при этом в работе делался на поиск геохимико-петрологических характеристик, позволяющих на сопоставлении архейских и

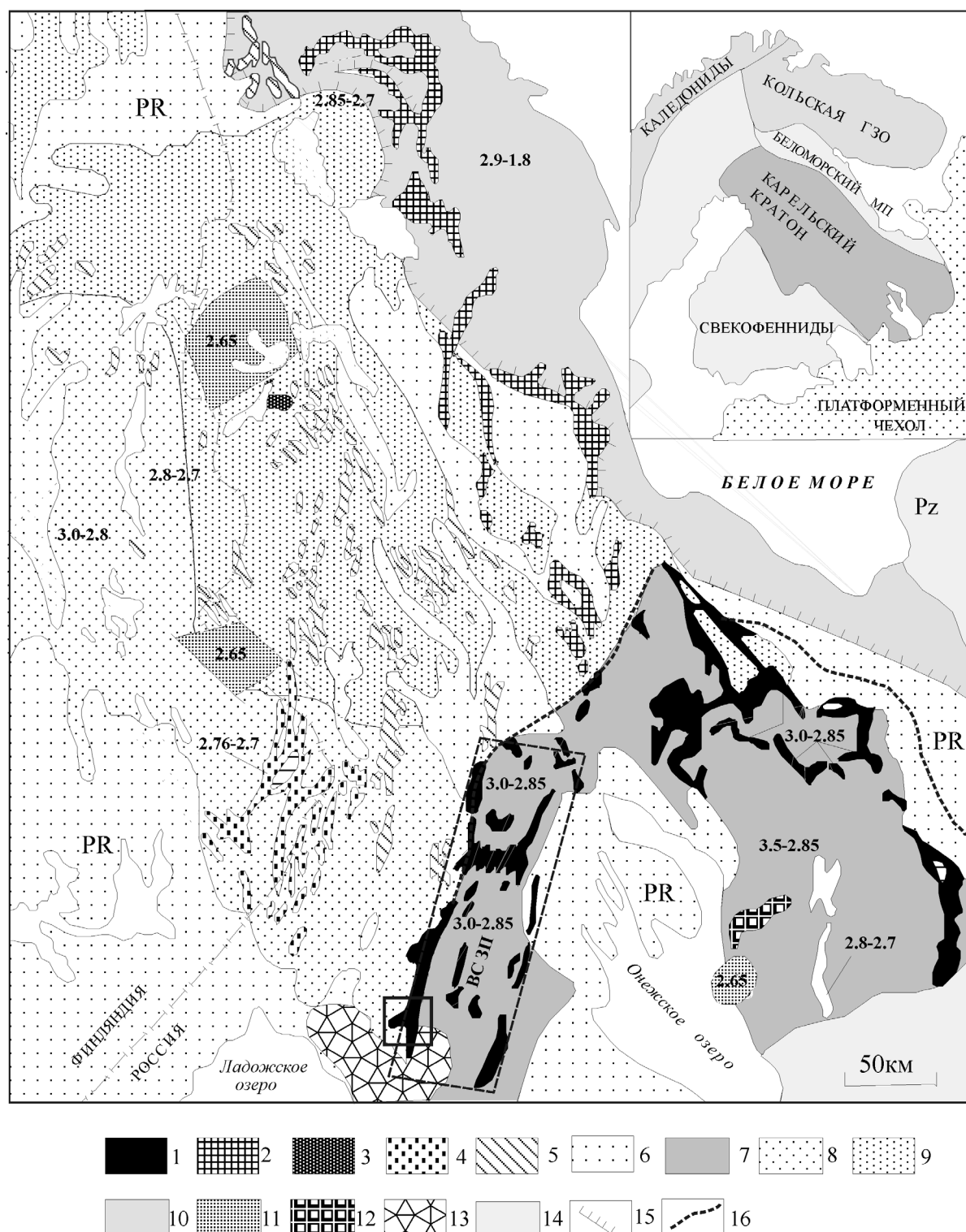


Рис. 1. Схема геологического строения Карельского кратона [1].

1–5 – архейские зеленокаменные пояса (ЗКП) с возрастом: >3.0–2.9 млрд. лет (1), 2.9–2.8 млрд. лет (2), 2.8–2.7 млрд. лет (3), <2.75 млрд. лет (4), неопределенным (5); 6 – палеопротерозойские супракрустальные породы; 7–9 – архейская кора с возрастом: 3.5–2.85 млрд. лет – Водлозерский блок (7), 3.0–2.8 млрд. лет (8), неопределенным (9); 10 – Беломорский мобильный пояс; 11 – высокометаморфизованные комплексы; 12 – Бураковский массив; 13 – Салминский массив гранитов-рапакиви; 14 – палеозойский платформенный чехол; 15 – деформационная зона, разделяющая Беломорский мобильный пояс (Беломорский МП) и Карельский кратон; 16 – предполагаемая граница Водлозерского протократона. Приведенные на схеме значения отвечают возрасту соответствующих комплексов (млрд. лет). ВСЗП (пунктирный прямоугольник) – Водлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс; квадрат – район исследований – Хаутаваарская мегаструктура.

фанерозойских андезитовых ассоциаций конвергентных обстановок проводить реконструкцию их архитектуры и условий магмогенерации расплавов.

Детальная характеристика породных комплексов Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса приведена в [4], поэтому приведем лишь краткое его описание. По геологическому строению зеленокаменный пояс является крупной аккреционно-орогенной структурой, 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 дацит-риолит-адакитовый (2.90–2.85 млрд. лет) комплексы.

Среди перечисленных, древнейшим является островодужный комплекс, представленный реликтами палеовулканических построек, сформированный мультисериальной ассоциацией в которой доминируют дифференцированная базальт-андезит-дацит-риолитовая (БАДР) серия известково-щелочного ряда и адакитовая серия, при подчиненном развитии толеитовой и высоко-Mg андезитовой серий [4, 5]. Морфологически парагенез сформирован глыбовыми, агломератовыми, тонкими туфами в переслаивании с крупноподушечными, массивными, миндалекаменными лавами, лавобрекчиями и кластолавами общей мощностью до 2.5 км. Максимальная сохранность разрезов островодужного комплекса отмечается в юго-западной части террейна в пределах Хаутаваарской мегаструктуры (рис. 1) (включающей Хаутаваарскую, Игноильскую, Чалкинскую, Няльмозерскую палеовулканические структуры). Для ассоциации ключевым объектом является адакитовая вулканическая постройка Игноильской структуры [5], для которой установлены U-Pb возрасты нека – 2995 ± 20 млн. лет [7], лав постройки – 2945 ± 19 млн. лет [2] и детритовых цирконов из терригенных граувакк перекрывающих постройку – 2947 ± 13 млн. лет [6].

МЕТОДИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Базируясь на уже изученном ранее распределении (LIL, HFS, REE) элементов в андезитовых магматических системах мезоархейских конвергентных систем Фенноскандинавского щита [4, 5], позволившее разделить андезитовый комплекс по сериальной принадлежности на несколько серий, наше внимание было сфокусировано на изучении распределения перспективной для реконструкции петрологических процессов группы флюидомобильных (FME) элементов (таких как B, Be, Li, As) в андезитовом комплексе (включающем дифференцированную БАДР ассоциацию, адакитовую, толеитовую и высоко-Mg серии). При этом ак-

цент делался на B–V/Be систематике породных серий как наиболее информативной для реконструкции режимов магмообразования в субдукционных системах.

Следует подчеркнуть, что при геохимическом исследовании вулканитов андезитового ряда из анализа исключались образцы, подвергнутые аномально высокой метаморфической, метасоматической проработке (амфиболитизированные, эпидотизированные, карбонатизированные и окварцованные), отбраковка проводилась по результатам предварительного петрографического изучения. 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) с максимальной погрешностью <2% в аналитической лаборатории Института геологии и геохимии УроРАН (г. Екатеринбург).

Уникальной чертой бора (B) является то, что этот элемент, один из наиболее подвижных во флюидной фазе, может быть использован в качестве химического маркера существования глубинных флюидов в магматических источниках [16]. 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 дополнительные трудности, например в связи с ярко выраженной халькофильной природой As.

В настоящее время имеются лишь отдельные ICP-MS данные по концентрациям бора и других FME элементов в андезитовых сериях различных геодинамических обстановок, что затрудняет проведение глобальных сопоставлений. Анализируя геохимическую базу GeoRock (<http://geogoc.mprch-mainz.gwdg.de>) видно, что андезитовые серии островных дуг характеризуются значительными вариациями концентраций бора в пределах от 1 до 90 г/т, в то время как его содержание в современных океанических базальтах N-MORB-типа находится в интервале от 0.28 до 3 г/т, а в базальтах океанических островов на уровне 2–3 г/т [18]. Столь высокий уровень бора в островодужных сериях связывается с его удалением из субдуцируемого слэба в зону мантийного клина (из которой и формируются многие субдукционные расплавы), в ходе процессов метасоматизации мантии. Таким образом, классификация пород по бору (B) позволяет судить о геодинамических условиях их формирования.

Для более комплексной оценки поведения FME элементов в магматических системах можно использовать отношение концентрации бора к менее подвижным во флюидной фазе элементам, что позволит получить коэффициент для оценки процесса дегидратации океанического слэба, а также вкла-

да осадочного материала в процесс формирования магм в зонах субдукции [15]. С этой целью наиболее удобно применить В/Ве отношение, которое позволяет существенно дополнить петрологическую характеристику магнезиального андезитовых серий. Бор и бериллий имеют близкие коэффициенты распределения минерал-расплав (в магматических системах субдукционных зон при существующих там *PT*-условиях) [8], но обладают разной подвижностью во флюидной фазе. Бериллий (Ве) как менее подвижный элемент может транспортироваться в слэбе в ходе субдукции на большие глубины без существенного перераспределения [25]. 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 [17].

Исследователями отмечаются значительные вариации В/Ве отношения в магматических системах из супрасубдукционных обстановок, где величина отношения может варьировать от 10 до 170, что чаще всего интерпретируется наличием обогащенного мантийного резервуара и значительным вкладом осадочного материала в процесс плавления [17]. В противоположность этому, базальты MORB и OIB типов характеризуются низкими значениями В/Ве отношения, на уровне 3–5 [23]. Используя имеющиеся данные по FME-систематике фанерозойских андезитовых серий, формирующихся в субдукционных обстановках различных типов (пологих и крутых) на примере Мексики, Центральной Америки, вулканических комплексов северного и южного сегментов Андийской зоны (области с пологой субдукцией) и Курило-Камчатской, Алеутской островодужных систем (крутая субдукция), попробуем проанализировать в сопоставлении с ними более древние вулканические комплексы – мезоархейские андезиты Карельского кратона, формирующиеся на стадии инициализации платформенно-тектонических режимов в регионе на уровне 3 млрд. лет.

СОХРАННОСТЬ ФЛЮИД-МОБИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В АРХЕЙСКИХ КОМПЛЕКСАХ

Основная трудность при изучении флюид-мобильных элементов, особенно в архейских породах, связана с сохранностью FME-системы при метаморфизме. В связи с тем, что изучаемые нами породные комплексы (вулканиты, субвулканиты и туфы) с возрастом 2.995–2.945 млрд. лет из Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса изменены в условиях эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма, необходимо на начальном эта-

пе исследования провести оценку степени химического изменения пород и возможной сохранности FME-системы.

Существует несколько вариантов оценки степени изменения породной серии, один из них – по уровню концентраций H_2O и потерь при прокаливании в изучаемых пробах. Для мезоархейских андезитов Карельского кратона получены следующие значения. Средние концентрации H_2O в вулканитах адакитового ряда не высоки, составляют в лавах – 0.153 ± 0.046 вес. %, в субвулканитах – 0.126 ± 0.028 вес. %, в туфах (агломератовых и пелитовых) – 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. %, для туфов (агломератовых и пелитовых) – 2.180 ± 0.142 вес. %, что говорит о достаточно хорошей сохранности пород, и наилучшей сохранности разновозрастных субвулканических комплексов.

Кроме того, для оценки степени химического выветривания породных литотипов мы использовали индекс химического выветривания [20] $CIA = 100 \cdot [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$, в молекулярных процентах (CaO^* – в силикатной фракции). Несмотря на то, что индекс направлен на изучение вулканогенно-осадочных пород, в последнее время его применяют и для характеристики изменения вулканических образований [17]. Значения индекса CIA для пород мезоархейского островодужного комплекса Карельского кратона варьирует от 46 до 52, что говорит об очень низкой степени (или полном отсутствии) химического выветривания породного ансамбля. Также важным маркером химического выветривания является наличие положительной или отрицательной Ce аномалии – $Ce/Ce^* = 3Ce_n / (2La_n + Nd_n)$. Для адакитов и ассоциирующихся с ними вулканических серий Центральной Карелии Ce/Ce^* отношение варьирует от 0.86 до 1.15, что не позволяет предполагать активное химическое выветривание породной ассоциации.

Таким образом, полученные выводы позволяют надеяться на сохранность FME-системы в древнейшем островодужном комплексе Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса и предполагают максимальную сохранность системы в субвулканической фации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведем полученные нами результаты. В качестве основного объекта исследования выступала наиболее детально изученная адакитовая серия Хаутаваарской мегаструктуры (южная часть Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса, включающая Игноильскую, Няльмозерскую и Чалкинскую палеовулканические постройки).

Породы адакитового ряда многие исследователи выделяют в качестве инициальной фазы развития

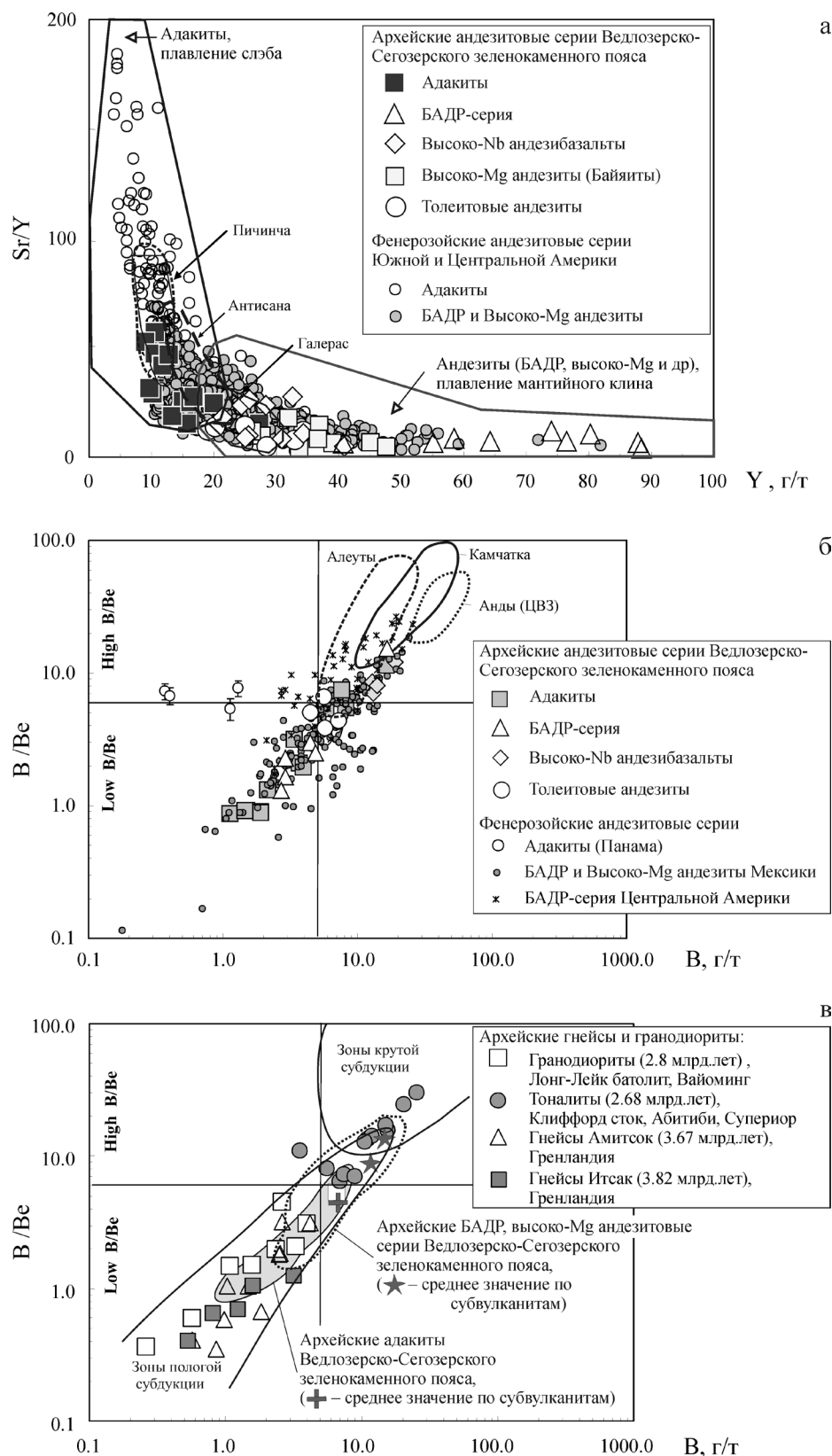


Рис. 2. Диаграммы в координатах Sr/Y–Y (а) и B/Be–B (б–в) для древнейших андезитовых комплексов Велдзерско-Сегозерского зеленокаменного пояса.

Классификационные поля на диаграмме Sr/Y–Y построены по [12], поля вулканитов Северного Эквадора (Пичинча, Антисана, Галерас) по [7]. Точки и поля архейских и фанерозойских комплексов мира на диаграммах Sr/Y–Y и B/Be–B построены по данным базы GeoRock (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de>) и [17]. Содержание B, Be, Sr и Y определены методом ICP-MS.

Таблица 1. Средние содержания (г/т) FME элементов в мезоархейских адакитах Ведлозерско-Сегозерского зелено-каменного пояса

Породы	Структура	B	Be	B/Be	Li	Cs
Субвулканиды	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

Примечание. * – единичный анализ; определение содержаний элементов методом ICP-MS.

субдукционных комплексов [12], формирующейся в ходе непосредственного плавления слэба в режиме горячего и полого погружения, при этом сами породы являются универсальным геодинамическим индикатором существования конвергентных процессов.

Вулканиды и субвулканиды данной серии, выявленные в Хаутаваарской зоне, характеризуются содержаниями SiO_2 на уровне 53–76 мас. %, что позволяет их классифицировать как высококремнистые (HSA) разновидности с подчиненным количеством низко-кремнистых (LSA) литотипов. Вариации содержания Na_2O изменяются от 2.5 до 5.6 мас. %, содержание $\text{MgO} < 4$ мас. %. При этом адакиты характеризуются высокими содержаниями Sr – от 260 до 800 г/т, Ba – > 350 г/т, Zr – 115–140 г/т и U – 1.1–1.7 г/т, при величине Sr/Y отношения на уровне 20–123. Спектры распределения РЗЭ в адакитах имеют ярко выраженные отрицательные аномалии по Nb, Ti и деплетированы HREE [5]. На классификационной диаграмме (рис. 2а) фигуративные точки мезоархейских адакитов Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса попадают в область фанерозойских адакитов Центральной и Южной Америки и эталонных комплексов Северного Эквадора (вулкан Пичинча). Мезоархейские андезитовые вулканиды прочих серий (дифференцированной БАДР, толеитовой и высоко-Mg андезитов и др.) попадают в другое поле – островодужных известково-щелочных серий, формирующихся при плавлении метасоматизированной мантии, четко коррелируя с фанерозойскими аналогами.

Для адакитов из древнейшего островодужного комплекса Фенноскандинавского щита значения концентраций FME элементов и B/Be отношения в усредненном виде приведены в табл. 1.

Для мезоархейских адакитов Карельского кратона нами отмечаются существенные вариации содержания бора, бериллия и B/Be отношения в различных литофациальных разновидностях пород адакитовой серии, что возвращает нас к предположению о возможном нарушении FME-системы. Предполагая, что субвулканиды с большей вероятностью сохранили первичные концентрации флюид-мобильных элементов, следует более доверительно отнести к их характеристике. Уровень concentra-

ции бора в Игнойльском адакитовом некке и адакитовых дайках Чалкинской палеопостройки идентичен и равен 6.1–6.9 г/т (рис. 2б, в), что соответствует фанерозойским адакитам из пологих субдукционных систем и значительно ниже, чем мы наблюдаем в андезитах формирующихся при более крутых углах субдукции.

Для адакитов из дайковой фазы Чалкинской палеовулканической постройки получены также близкие субвулканидам 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 [24], 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 вулканидах дуги Вануату, величина B/Be отношения значительно варьирует, составляя 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) [11].

Таким образом очевидно, что адакиты (архейского 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 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 дегидратации.

Однако остается важный 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-мобильных элементов в разновозрастных с адакитами вулканидах БАДР, толеитового и высоко-Mg (байяитового) типов, выделенных нами в пределах Ведлозерско-Сегозерского зе-

Таблица 2. Средние содержания (г/т) FME элементов в островодужном комплексе Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса

Породы	Структура	B	Be	B/Be	Li	Cs
Высоко-Nb (HNb) серия						
Субвулканиды	Остерская	11.974 ± 1.236	1.524 ± 0.323	7.85	76.884*	4.662 ± 0.380
БАДР-Nb-обогащенная серия						
Субвулканиды	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-Mg) серия						
Лавы, дайки	Чалкинская	5.820 ± 1.131	1.009 ± 0.097	5.78	24.647*	3.453 ± 1.516
Толетовая серия						
Лавы, дайки	Чалкинская	6.531 ± 3.165	0.923 ± 0.058	7.07	27.955 ± 7.642	4.072 ± 2.383

Примечание. * – единичный анализ; содержания элементов определены методом ICP-MS.

ленокаменного пояса, формирование которых по всем параметрам проходило в области метасоматизированного мантийного клина.

Концентрация флюид-мобильных элементов (FME) и B/Be отношения в древнейших (3.05–2.99 млрд. лет) островодужных вулканидах Фенноскандинавского щита приведена в табл. 2.

Наблюдаемые концентрации бора в ассоциирующих с адакитами высоко-Nb, байяитовой, БАДР и толетовых сериях находятся в интервале от 1.1–11.9 г/т, что соответствует его содержанию в фанерозойских адакитах и примерно идентично характеристике в изучаемых нами архейских адакитовых системах (1.1–6.9 г/т).

Концентрация Be в древнем островодужном комплексе (0.9–1.5 г/т) в среднем значительно ниже, чем в адакитах. Более высоким выглядят содержания Cs в ассоциирующих с адакитами вулканидах (уровень концентраций 2.9–4.6 г/т), хотя в качестве исключения можно называть адакитовые дайки Чалкинской структуры, в которых Cs часто превышает 6–8 г/т. Таким образом, кроме отдельных случаев повышенных концентрации Li, FME-систематика всего островодужного комплекса существенно не различается.

Адакиты и ассоциирующие с ними прочие островодужные мезоархейские вулканиды Карельского кратона показывают достаточно низкие B/Be отношения (относятся большей частью к Low B/Be типу, рис. 2б, в) (в адакитах они составляют 8–4.7; в островодужных андезитах – 2.4–7.8 с аномально высокими – до 14.5). Данные значения сопоставимы с B/Be-систематикой архейских гранито-гнейсов Гренландии (3.67 и 3.82 млрд. лет), гранодиоритов Вайоминга (2.8 млрд. лет) [17] и значительно ниже, чем в фанерозойских вулканидах известково-щелочного ряда Алеутской и Курило-Камчатской островодужных систем, где B/Be отношение может достигать уровня 30–70. Данный вывод на первый взгляд не укладывается в ожидаемые тенденции и противоречит концепции формирования островодужных андезитовых систем при плавлении флюид-обогащенной области мантийного клина. Однако многими авторами отмечается, что

вариации B/Be отношения зависят не только от типа пород участвующих в субдукции, но и от скорости и температурного режима данного процесса [8].

В случае, если субдукция затрагивает молодую (<20 млн. лет) “горячую” океаническую кору в режиме пологого погружения, прогрессивный метаморфизм, связанный с увеличением *PT*-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 Be, следствием чего и является тот факт, что метасоматизированный мантийный клин имеет низкие величины B/Be отношения [17]. Таким образом, весь ансамбль формирующегося островодужного комплекса будет характеризоваться низкими концентрациями FME элементов (рис. 2б, вулканиды Мексики и Центральной Америки).

В противоположность этому, при субдукции древней (>20 млн. лет) океанической коры, B–Be система является стабильной и по достижению больших глубин, что при дегидратации, приводит к переносу бора флюидами в область мантийного клина и отражается в высоких значениях B/Be отношений в расплавах формирующихся на данном уровне [15]. Подобная тенденция сохраняется и в случае крутого погружения слэба, иллюстрацией чего, является B/Be-систематика вулканидов Алеутской, Курило-Камчатской островодужных систем и Центральной вулканической зоны (ЦВЗ) Анд (рис. 2б).

Если к данным, полученным нами по FME-систематике архейских андезитовых комплексов Карельского кратона, приобщить результаты комплексного геохимического изучения породных ассоциаций, в качестве наиболее близкого аналога мезоархейским мультисериальным ансамблям Карельского кратона можно предложить вулканическую систему 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) [9]. 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 (со сменой пород от адацитов к известково-щелочным и щелочным сериям, рис. 2а), отражающую внутреннее строение конвергентной системы, положение магматических очагов в ее пределах и общую архитектуру. Кроме того, важным является наличие породной триады: адакиты–высоко-Mg андезиты (байяиты)–высоко-Nb или Nb-обогащенные андезиты (БАДР-АДР), что служит своеобразным геохимическим маркером существования “пологих и горячих” субдукционных систем как в фанерозое, так и с большой вероятностью в архее.

ВЫВОДЫ

Резюмируя результаты исследований, следует подчеркнуть, что наш опыт систематики пород андезитового ряда по флюид-мобильным элементам позволяет говорить о возможности его применения, хотя и с определенными ограничениями (требуется исключение из анализа пород подвергнутых химическому выветриванию). Наибольшая сохранность FME-системы отмечается в породах из субвулканической фации, что делает их максимально перспективными для дальнейшего изучения.

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, что несомненно отражает степень участия флюидной фазы в процессах магмогенерации расплава, а в случае комплексной систематики вулканитов, формирующихся при плавлении как слэба, так и метасоматизированной мантии, может являться геохимическим инструментом для разделения субдукционных систем по их архитектуре (областей с полой и крутой субдукцией).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожеевников В.Н., Бережная Н.Г., Пресняков С.Л. и др. Геохронология циркона (SHRIMP-II) из архейских стратотектонических ассоциаций в зеленокаменных поясах Карельского кратона: роль в стратиграфических и геодинамических реконструкциях // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2006. Т. 14, № 3. С. 19–40.
2. Овчинникова Г.В., Матреничев В.А., Левченков О.А. и др. U-Pb и Pb-Pb изотопные исследования кислых вулканитов Хаутаваарской зеленокаменной структуры, Центральная Карелия // Петрология. 1994. Т. 2, № 3. С. 266–281.
3. Рингвуд А.Е. Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981. 584 с.
4. Светов С.А. Магматические системы зоны перехода океан–континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 230 с.
5. Светов С.А. Древнейшие адакиты Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 115 с.
6. Светов С.А., Кудряшов Н.М., Ронкин Ю.Л. и др. Мезоархейская островодужная ассоциация Центрально-Карельского террейна (Фенноскандинавский щит). Новые геохронологические данные // Докл. АН. 2006. Т. 406, № 3. С. 370–374.
7. Сергеев С.А. Геология и изотопная геохронология гранит-зеленокаменных комплексов архея Центральной и Юго-Восточной Карелии // Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: ИГГД РАН, 1989. 24 с.
8. 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.
9. Bourdon E., Eissen J.P., Gutscher M.A. Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America) // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. V. 205. P. 123–138.
10. Calmus T., Aguillo-Robles A., Maury R.C. et al. Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites (“bajaaites”) from Baja California, Mexico: the role of slab melts // Lithos. 2003. V. 66. P. 77–105.
11. 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.
12. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // Nature. 1990. V. 347. P. 662–665.
13. Kuno H. High alumina basalt // J. Petrol. 1960. V. 1. P. 121–145.
14. Kusky T.M., Polat A. Growth of granite-greenstone terrains at convergent margins and stabilization of Archaean cratons // Tectonophysics. 1999. V. 305. P. 43–73.
15. 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.
16. Leeman W.P., Sisson V.B. Geochemistry of boron and its implications for crustal and mantle processes // Boron. Rev. Mineral. 1996. P. 645–707.
17. Mohan M., Kamber B.S., Piercey S.J. Boron and arsenic in highly evolved Archean felsic rocks: Implications for Archean subduction processes // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. V. 274. P. 479–488.
18. Morris J.D., Leeman W.P., Tera F. The subducted component in island arc lavas – constraints from the isotopes and B–Be systematics // Nature. 1990. V. 344. P. 31–36.
19. Naqvi S.M., Rana Prathap J.G. Geochemistry of

- adakites from Neoarchaeon active continental margin of Shimoga schist belt, Western Dharwar Craton, India: Implications for the genesis of TTG // *Precambrian Res.* 2007. V. 156. P. 32–54.
20. 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.
 21. Orozco-Esquivel M.T., Nieto-Samaniego A.F., Alaniz-Alvarez S.A. Origin of rhyolic lavas in the Mesa Central, Mexico, by crustal melting related to extension // *J. Volcan. Geothermal Res.* 2002. V. 118. P. 37–56.
 22. Polat A., Kerrich R. Reading the geochemical fingerprints of archaean 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.
 23. 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.
 24. 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.
 25. 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.

Рецензент И.В. Семенов

Architecture of Archaean convergent systems in comparison with Phanerozoic analogues, as shown by data on the FME-systematics of volcanites

S. A. Svetov

Institute of Geology, Karelian Research Centre of RAS

In Vedlozero-Segozero greenstone belt on the Fennoscandian Shield the distribution of fluid-mobile elements (FME) in the oldest (3.05–2.95 Ga) andesite complexes, formed in a convergent setting, were studied. Analysis of the B–B/Be system has shown that the rocks of the Mesoarchaeon BADR-adakitic association are typically poor in B and have a B/Be ratio less than 10. Their geochemical similarity to Phanerozoic igneous complexes, formed in hot and gently dipping subduction regimes, suggests the dominance of such systems at Archaean stage during the initiation of plate-tectonic processes.

Key words: *Archaean, subduction, andesites, adakites, fluid-mobile elements.*