
С. А. Светов, А. И. Светова, Х. Хухма, Т. Н. Назарова

**МАГМАТИЧЕСКИЕ СЕРИИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ДУГ
МЕЗОАРХЕЙСКОЙ ЗОНЫ ПЕРЕХОДА ОКЕАН – КОНТИНЕНТ
НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОГО ОБРАМЛЕНИЯ
ВОДЛОЗЕРСКОГО БЛОКА
АСПЕКТЫ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ТИПИЗАЦИИ
И ИЗОТОПНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ***

В последние годы в ходе детальных исследований было показано, что большинство архейских гранит-зеленокаменных областей и поясов в пределах древних кратонов мира (таких как Супериор, Вайоминг, Илгарн и мн. др.) представляют собой аккрецированные к континентальному основанию фрагменты океанических плато, островодужных систем, задуговых бассейнов и окраинно-континентальных вулканических поясов (Kerrich et al., 1999; Kusky, Polat, 1999).

Классическим полигоном для апробации методов реконструкций геодинамического развития зеленокаменных структур различного архейского возраста на основе изучения геохимии, петрологии и геохронологии отдельных серий стала провинция Супериор, Канада. На ее примере была показана принципиальная важность для понимания генезиса зеленокаменных поясов реконструкции условия формирования отдельных стратотектонических ассоциаций, ее слагающих. Так, в пределах провинции Супериор выделяется более 19 крупных террейнов, представляющих собой породные ансамбли, сформированные в контрастных обстановках: океанических бассейнах (задуговых бассейнах) и примитивных дугах, плюмовых областях и островных дугах, в континентальных дугах и других обстановках (Auer et al., 2002), при этом прецизионные геохронологические данные указывают на быструю смену плейт-тектонических режимов и достаточно локальный характер их проявления.

Таким образом, эволюция провинции Супериор корректно описывается моделью развития транзитной зоны «океан – континент» с эпизодами этапной аккреции островодужных комплексов, океанических плато, краевых бассейнов и аккреционных призм, протекающей с 3,0 по 2,7 млрд лет (Card, 1990).

В пределах Фенноскандинавского щита исследования по изучению литогеохимической и изотопной характеристики реперных стратовулканических ассо-

циаций Сумозерско-Кенозерского зеленокаменного пояса (восточное обрамление Водлозерского блока) позволили получить близкую эволюционную модель развития пояса как островодужной системы на уровне 2,92–2,87 млрд лет (Puchtel et al., 1999). Эти события проходили на ~50 млн лет позднее аналогичных процессов в пределах западной окраины блока в зоне Центрально-Карельского сегмента. Уникальность данной области заключается в том, что она представляет собой одну из немногих наиболее древних на Фенноскандинавском щите и в мире (мезоархейскую) транзитных зон перехода протоокеанической коры (фрагментарно сохранилась в виде коматиит-толеитовой ассоциации Водлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса) и континентальной коры (Водлозерский блок), с эпизодами формирования в транзитали протоостроводужной системы (в интервале 3,05–2,95 млрд лет) и более поздней вулканической ассоциации активной континентальной окраины (2,90–2,80 млрд лет).

По сравнению с прочими архейскими образованиями Фенноскандинавского щита (Восточной Карелии, Западной Карелии и Восточной Финляндии), мантийно-коровый вулканизм Центрально-Карельского сегмента в изотопно-геохимическом и петрологическом отношении изучен недостаточно (хотя именно эта территория является ключевой для понимания специфики зарождения и эволюции мезоархейского магматизма на западной конвергентной границе континентальной коры палеоархейского Водлозерского блока и мезоархейского протоокеана). В пределах данной территории в коллажированном виде сохранился достаточно полный разрез вулканогенно-осадочных комплексов, характеризующих все стадии эволюции транзитной зоны от 3,1 до 2,7 млрд лет.

Относительно низкая степень структурно-метаморфических преобразований вулканогенно-осадочных последовательностей пород позволяет проводить палеовулканические реконструкции динамики литогенеза, петролого-геохимические исследования архейских по-

* Исследования проводились в 2005–2006 гг. при финансовой поддержке Фонда содействия отечественной науки.

родных ассоциаций различной сериальной принадлежности и контрастного геодинамического заложения. Результаты этих исследований были опубликованы ранее (Светов, 2003, 2005; Светов и др., 2004, 2006), настоящая работа дополняет новым геохимическим материалом полученные ранее выводы.

Методы исследования

В связи с тем что исследование целиком построено на интерпретации результатов геохимического изучения наименее измененных породных литотипов в пределах областей распространения мезоархейских андезитовых ассоциаций Центральной Карелии, особое внимание уделялось качеству аналитических исследований.

Геохимический анализ проб (определение петрогенных элементов) проводился в аналитической лаборатории Института геологии КарНЦ РАН (г. Петрозаводск).

Все классификационные построения и предлагаемые классификационные схемы получены исключительно на основе прецизионных анализов содержаний малых и редкоземельных элементов, проводимых методом ISP-MS в аналитической лаборатории Института геологии и геохимии УроРАН (г. Екатеринбург) на тандемном масс-спектрометре высокого разрешения с ионизацией в индуктивно-связанной плазме «Element 2», погрешность определения элементов <2%.

Изотопные исследования осуществлялись в изотопной лаборатории Геологической Службы Финляндии (г. Эспоо). Химическая подготовка проб для Sm-Nd-изотопного анализа проводилась по методике П. Пелтонена (Peltonen et al., 1996). Измерения выполнялись проф. Х. Хухмо на масс-спектрометре VG sector 54. Точность измерений $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ составляет 0,4%. Отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ нормализовано по $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$. Измеренное значение стандарта La Jolla $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,511851 \pm 6$ (n = 10).

Результаты геохимических исследований

В пределах Центрально-Карельского террейна в 2005 г. был проведен новый этап детальных геолого-геохимических исследований в области развития мезоархейских андезибазальт-андезит-дацитовых ассоциаций двух временных рубежей 3,05–2,90 и 2,90–2,80 млрд лет, который позволил подтвердить их изотопно-геохимическую неоднородность, что несомненно является отражением различных петрологических условий и геодинамических режимов формирования ассоциаций.

Андезитовые ассоциации 1 уровня (3,05–2,90 млрд лет)

В пределах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса представительные разрезы самой древней на территории Фенноскандинавского щита (более 2,99 млрд лет) андезитовой ассоциации сохранились в Хаутаваарской и Остерской структурах. В

Хаутаваарской структуре с использованием методов фациально-формационного анализа реконструирована цепь палеовулканических построек центрального типа: Няльмозеро – Игнойла – Хаутаваара – Чалка, сформированных в субмаринных и субаэральных обстановках.

Для ассоциации имеются геохронологические данные по Игнойльской структуре: U-Pb возраст лав андезитов составляет 2945 ± 19 млн лет (Овчинникова и др., 1994), возраст андезидацитового некка – 2995 ± 20 млн лет (Сергеев, 1989). U-Pb-датирование цирконов из субвулканических даек андезитов Паласельгинской структуры – 3000 ± 40 млн лет и из субвулканического штока Остерской структуры – 3020 ± 10 млн лет (Лобиков, 1982).

Породы древней андезитовой ассоциации метаморфизованы в условиях эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма андалузит-силлиманитового типа при сохранении первичных вулканических текстур.

Для палеовулканов установлено сложное эффузивно-эксплозивное строение с грубозональным размещением вулканических и вулканогенно-осадочных фаций вокруг центров извержений с радиусом 20–30 км (Светова, 1988).

Жерловины заполнены некками размером до $2 \times 1,5$ км (Игнойла), иногда с агломератовой мантией (Чалка). Коэффициент explosивности менялся от 40–50 (Чалка) до 70% (Игнойла). В Чалкинском палеовулкане широко развита лавовая фация, представленная массивными, подушечными и миндалекаменными лавами, кластолавами андезитов, андезидацитов и дацитов. Подушечные брекчии присутствуют в прижерловой зоне, часто переслаиваясь с агломератовыми и лапиллиевыми туфами.

Мощность лавовых потоков изменяется от 4–5 м до 25–30 м, по составу преобладают серийнопорфировые андезиты. В Игнойльском палеовулкане лав значительно меньше, они представлены кластолавами, массивными, миндалекаменными разностями андезибазальтового, андезитового, реже андезидацитового состава и формируют мощные (до 60–80 м) непротивленные лавовые потоки.

Пирокластиты принадлежат к фации explosивных выбросов, реже агломератовых потоков, последние образуют локальные площади сваренных туфов. Удаленная группа пирокластических фаций представлена мелкообломочными туфами и продуктами их перемыва – туффитами и туфопесчаниками, субвулканическая фация – дайками андезибазальтов, андезитов, дацитов, реже риодацитов и риолитов.

Общая геохимическая характеристика породных литотипов БАДР-серии показала, что по распределению петрогенных элементов, K-Rb систематике вулканиды относятся к островодужной серии (Светов, 2005). Вместе с тем детальное сопоставление прецизионных геохимических анализов породных литотипов древней андезитовой ассоциации позволило выделить следующие сериальные разновидности пород (табл. 1):

Таблица 1

**Суммарная геохимическая характеристика вулканитов андезитового ряда
в зеленокаменных структурах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса**

Параметр	БАДР-серия, Nb-обогащенная		Высоко-Nb базальты, андезибазальты *	БАДР-вулканиты		
	высоко-Mg ряд *	«нормальный» ряд		толеитовая серия	коматиитовая серия	адакитовая серия
SiO ₂	53–64	51–73/55–78	50–53	58–65/60–63	55–59	54–70/52–73
Mg#	52–58	32–48/33–62	45–48	35–53/60–63	50–54	35–67/40–60
Th	2–4	2–11/4–11	1–3	2–5/1–5	0,5–1,2	4–11/2–5
U	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	1,0–3,5/0,7–1,6
Nb	6–9	7–11/8–17	20–45	5–12/4–5	0,9–1,6	4–12/3–5
Hf	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	3,3–5,9/2,3–3,7
Zr	140–170	180–330/110–420	230–430	130–200/100–150	18–22	140–240/100–200
Cr	225–620	20–200/50–150	100–200	270–800/100–200	600–2400	100–800/40–250
Ni	150–650	12–140/2–40	30–80	100–300/28–45	30–70	25–250/12–150
La	9–22	10–26/10–53	28–52	2–7/2–4	1–2	15–70/12–16
Yb	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	0,7–1,6/0,5–0,8
U	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	1,0–3,5/0,7–1,6
Ga	14–16	17–27/14–22	19–30	15–24/15–19	9–11	18–25/17–27
Sc	20–37	13–32/3–20	20–40	17–27/22–26	43–53	6–22/6–14
Sr	140–320	140–890/16–250	250–360	230–400/15–100	45–65	250–600/120–327
Ba	160–280	312–580/100–1100	270–370	100–630/170–180	10–110	280–980/200–490
Zr/Y	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	8,0–24,5/12,2–23,0
(La/Yb) _{pm}	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	8,1–31,4/10,3–21,6
Nb/Ta	17–19	8–19/9–19	18–23	12–26/10–13	2,0–2,2	16–32/9–16
ΔNb	–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	–0,5...–1,1/–0,7...–1,2

Примечание. * – породные ассоциации с возрастом 3,05–2,90 млрд лет. Через дробь характеристика ассоциаций: первое значение отвечает возрасту 3,05–2,90, второе – 2,90–2,80 млрд лет.

Высоко-Nb базальты, андезибазальты

В настоящее время высоко-Nb базальты и андезибазальты выявлены среди субвулканических пород в пределах Остерской палеовулканической постройки (пробы 500-15а и 500-25). Данный тип характеризуется пониженными содержаниями SiO₂ = 50–53 мас.%, Mg# = 45–48 и высокими концентрациями Nb > 20 ppm (20–45 ppm), ЛРЗЭ – La (10–26 ppm), средним уровнем содержаний Cr (100–200 ppm), Ni (30–80 ppm), имеют отношения Zr/Y 4,8–5,6, (La/Yb)_{pm} = 4,9–6,2, Nb/Ta = 18–23, соотношение Th_{pm} – U_{pm} – Nb_{pm} – La_{pm} – Hf_{pm} системы описывается неравенством Th_{pm} < U_{pm} < Nb_{pm} < La_{pm} > Hf_{pm}, что существенно отличает топологию спектров спайдерграмм от прочих породных серий (рис. 1, А).

Nb-обогащенная БАДР-серия («нормального ряда»)

К данной серии относится большинство лав и туфов древней андезитовой ассоциации Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (Чалкинская, Игнойльская, Няльмозерская, Остерская палеовулканические постройки). По содержанию кремнезема и щелочей породы принадлежат к андезибазальтам, андезитам, дацитам и реже – риодацитам с нормальной щелочностью.

Максимальная дифференциация серии (от андезибазальтов до риолитов) проявлена в Игнойльской структуре. Соотношение щелочей K₂O/Na₂O варьирует от 0,3 до 0,5, что позволяет говорить о явно выраженной Na специфике ассоциации. Породы БАДР-серии имеют 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 вулканиты характеризуются отношениями Zr/Y 5,4–8,8, (La/Yb)_{pm} = 8–19, Nb/Ta = 8–19, соотношение Th_{pm} – U_{pm} – Nb_{pm} – La_{pm} – Hf_{pm} системы описывается неравенством Th_{pm} > U_{pm} > Nb_{pm} < La_{pm} > Hf_{pm}.

Для лав БАДР-серии Чалкинской, Хаутаваарской, Остерской и Няльмозерской структур зеленокаменного пояса типичными являются обогащенные легкими РЗЭ спектры с выполаживанием в области тяжелых РЗЭ, в туфах сохраняется их топологическое подобие при более высоких фоновых концентрациях РЗЭ, Eu аномалия в породах отсутствует или слабо проявлена (рис. 1, Б, В; 2, Г).

Изотопный состав Sm-Nd в БАДР-сериях Чалкинской, Игнойльской и Остерской структур свидетельствует о значительном вкладе в состав их магматических источников более древнего корового материала. Рассчитанные модельные возрасты андезитов и дацитов Чалкинской структуры по модели De Paolo (De Paolo et al., 1991) варьируют от 2890 до 3584 млн лет, для Игнойлы – 2970–3245 млн лет, для Остра – 3000–3380 млн лет. ε_{Nd}(t) для БАДР-серии Чалкинской структуры (Т – 2995 млн лет) изменяется от +1,5 до –2,3, для Игнойльской структуры (Т – 2995 млн лет) варьирует от –1,2 до +2,1.

Высоко-Mg андезиты

Породы данного типа распространены достаточно широко, они представлены лавовой и дайковой фациями в пределах Чалкинской структуры. Основное отличие от вулканитов прочих серий связано с их повышенной магниальностью (Mg# = 53–64 при со-

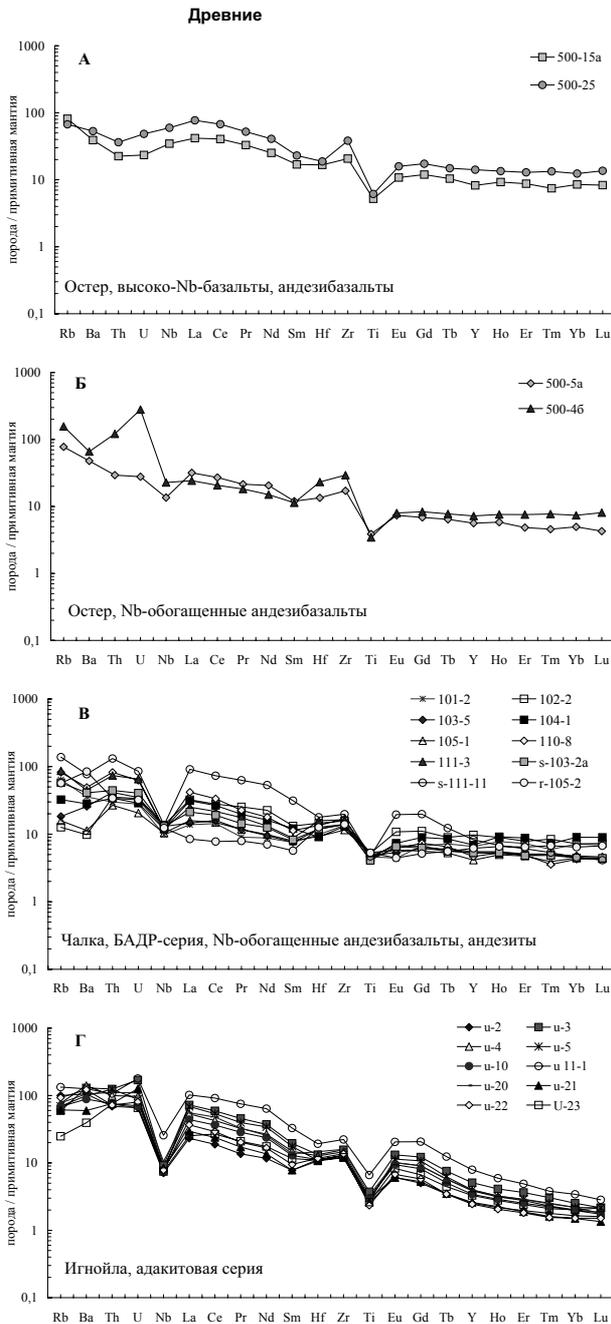


Рис. 1. Спайдерграммы породных ассоциаций андезитового ряда (с возрастом 3,05–2,9 млрд лет) мезоархейского Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса

держания $\text{SiO}_2 = 53\text{--}64$ мас.%, высокими концентрациями Cr (220–620 ppm), Ni (150–650 ppm) при пониженных концентрациях Nb (6–9 ppm). Вулканиды имеют отношения Zr/Y 3,5–5,9, $(\text{La/Yb})_{\text{pm}} = 1,9\text{--}4,5$, $\text{Nb/Ta} = 17\text{--}19$, соотношение $\text{Th}_{\text{pm}} - \text{U}_{\text{pm}} - \text{Nb}_{\text{pm}} - \text{La}_{\text{pm}} - \text{Hf}_{\text{pm}}$ системы соответствует следующему соотношению: $\text{Th}_{\text{pm}} > \text{U}_{\text{pm}} > \text{Nb}_{\text{pm}} < \text{La}_{\text{pm}} > \text{Hf}_{\text{pm}}$. Спектры распределения редких и редкоземельных элементов в высоко-Mg базальтах (рис. 1, В. Серия проб: 101-2, 102-2, 103-5, 104-1, 103-2a) идентичны сосуществующим с ними породам Nb-обогащенной БАДР-серии («нормального ряда»).

Мезоархейские субвулканические тела, дайки, лавы и туфы адакитовой серии, с возрастом ~2995 млрд лет, выявленные в Чалкинской, Игнойльской и ряде других структур Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса, по содержанию SiO_2 (54–70 мас.%) относятся к андезитам – дацитам, могут быть классифицированы большей частью как высоко- SiO_2 адакиты – тип «НАС» (Martin, 1999), при этом отличаются от типичных известково-щелочных пород повышенными концентрациями Na_2O ($3,6 < \text{Na}_2\text{O} < 6,1$ мас.% при средних значениях 3,9–5,1 мас.%), значительной вариацией магнезиальности ($\text{Mg\#} = 54\text{--}70$).

Наиболее яркое отличие между вулканидами адакитовой и прочих выделенных серий проявляется в концентрациях редких и редкоземельных элементов. Так, адакиты Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса имеют содержания Sr > 320 ppm (250–600 ppm). Для современных адакитов этот уровень может превышать 700 и даже достигать 2000 ppm, однако бывают и исключения, так, адакиты полуострова Тайтао содержат Sr < 280 ppm (Martin, 1999). Так же anomalously высокие концентрации отмечаются для Ва (280–980 ppm), Zr (140–240 ppm), U (1,0–3,5 ppm), характеристические отношения равны Zr/Y 8,0–24,5, $(\text{La/Yb})_{\text{pm}} = 8,1\text{--}31,4$, $\text{Nb/Ta} = 16\text{--}32$, соотношение $\text{Th}_{\text{pm}} - \text{U}_{\text{pm}} - \text{Nb}_{\text{pm}} - \text{La}_{\text{pm}} - \text{Hf}_{\text{pm}}$ системы описывается неравенством $\text{Th}_{\text{pm}} > \text{U}_{\text{pm}} > \text{Nb}_{\text{pm}} < \text{La}_{\text{pm}} > \text{Hf}_{\text{pm}}$ (рис. 1, Г; 2, А).

Распределение РЗЭ в мезоархейских адакитах Центральной Карелии сильно фракционированное – $(\text{La/Yb})_{\text{n}} > 10$, при этом уровень содержания ТРЗЭ anomalously низкий: $\text{Ho} < 0,4$, $\text{Er} < 1,0$, $\text{Tm} < 0,1$, $\text{Yb} < 0,9$, $\text{Lu} < 0,11$ ppm. РЗЭ спектры топологически идентичны адакитам островов Кука, которые признаны типовыми представителями высоко- SiO_2 адакитовой серии (Martin et al., 2005).

На классификационных диаграммах в координатах $\text{Sr/Y} - \text{Y}$ и $(\text{La/Yb})_{\text{n}} - \text{Yb}_{\text{n}}$ фигуративные точки субвулканидов Хаутаваары, Игнойлы и Чалки ложатся в область типичных адакитовых серий мира вблизи поля адакитов ЮВ Японской вулканической дуги (Светов, 2003).

Вместе с тем от фанерозойских аналогов мезоархейские адакиты существенно отличаются более высокими средними и максимальными концентрациями Cr (до 800 ppm) и Ni (до 250 ppm).

Изучение Sm-Nd систематики показало, что первичные отношения ϵ_{Nd} для адакитовой серии Игнойльской палеовулканической постройки варьируют от +0,7 до +2,3, модельные возрасты (по модели De Paolo: De Paolo et al., 1991) – от 2956 до 3092 млн лет. Для близлежащего Чалкинского палеовулкана ϵ_{Nd} для адакитов изменяется от +0,8 до +2,0 при модельных возрастах от 2979 до 3071 млн лет. С использованием ранее полученных изотопных данных были рассчитаны Sm-Nd изохроны – 3014 ± 130 млн лет ($\epsilon_{\text{Nd}} = +1,1$, $\text{MSWD} = 27$, $n = 15$) для адакитов Игнойлы и 2990 ± 140 млн лет ($\epsilon_{\text{Nd}} = +1,4$, $\text{MSWD} = 2,1$, $n = 6$) для адакитов Чалки.

Эрахроны для адakitовой серии Хаутаваарской мегаструктуры (адакиты всех палеовулканических построек) дают значение 2976 ± 130 млн лет ($\epsilon_{Nd} = +1,2$, MSWD = 15, n = 8), с использованием ранних данных – 3005 ± 96 млн лет ($\epsilon_{Nd} = +1,1$, MSWD = 16, n = 18), что в принципе, несмотря на большую погрешность, коррелирует с данными по U-Pb системе.

Андезиты толеитовой серии

Породы данного типа представлены лавовой и дайковой фашиями в пределах Чалкинской структуры. По содержанию $SiO_2 = 58-65$ мас.% породы отвечают андезитам, их магнезиальность варьирует в широких пределах Mg# от 35 до 53. В этой серии также отмечаются повышенные концентрации Cr (270–800 ppm), Ni (100–300 ppm) при низких содержаниях Nb (<4 ppm). Вулканисты имеют отношения Zr/Y 5,0–7,5, $(La/Yb)_{pm} = 0,9-1,9$, Nb/Ta = 12–26, соотношение $Th_{pm} - U_{pm} - Nb_{pm} - La_{pm} - Hf_{pm}$ системы удовлетворяет неравенство $Th_{pm} > U_{pm} > Nb_{pm} > La_{pm} < Hf_{pm}$. Основное отличие от вулканистов прочих серий связано с нефракционированным распределением РЗЭ (рис. 2, Б).

Андезибазальты, андезиты коматиитовой серии

Данная группа пород выделена в Паласельгинской структуре, исключительно в виде дайковой фазы, секущей толщю коматиит-базальтового состава. Дайки сформированы андезибазальтами, андезитами ($SiO_2 = 55-59$ мас.%) с магнезиальностью Mg# = 50–54, высокими содержаниями Cr (600–2400 ppm), Ni (30–100 ppm), очень низкими содержаниями Nb (<1,6 ppm), Hf (0,7 ppm), Zr (<22 ppm). Спайдерграмма андезитов имеет недифференцированный характер в области РЗЭ и ярко выраженную положительную U аномалию. Породы также имеют очень низкие, нетипичные для андезитов, отношения Zr/Y 1,3–1,6, $(La/Yb)_{pm} = 0,7-0,9$, Nb/Ta = 2,0–2,2, соотношение $Th_{pm} - U_{pm} - Nb_{pm} - La_{pm} - Hf_{pm}$ системы – $Th_{pm} < U_{pm} > Nb_{pm} < La_{pm} < Hf_{pm}$ (рис. 2, В).

Андезитовые ассоциации 2 уровня (2,90–2,80 млрд лет)

Новый этап магматической активности в пределах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса на рубеже 2,90–2,80 млрд лет маркируется палеовулканическими постройками андезидацитового, дацитового и дацит-риолитового составов, реликты которых сохранились в Масельгской, Янишской, Коробозерской, Семченской и Эльмусской вулканических структурах.

Палеопостройки радиусом около 5–6 км характеризуются небольшими мощностями отложений вулканических продуктов (от 0,3 до 1,2 км). На местности они картируются по выходам пород жерловой и прижерловой фаций и зональному распространению вулканистов вокруг эруптивных центров.

На отдельных участках зеленокаменного пояса фрагментарно сохранились нерасчлениваемые поля пирокластитов.

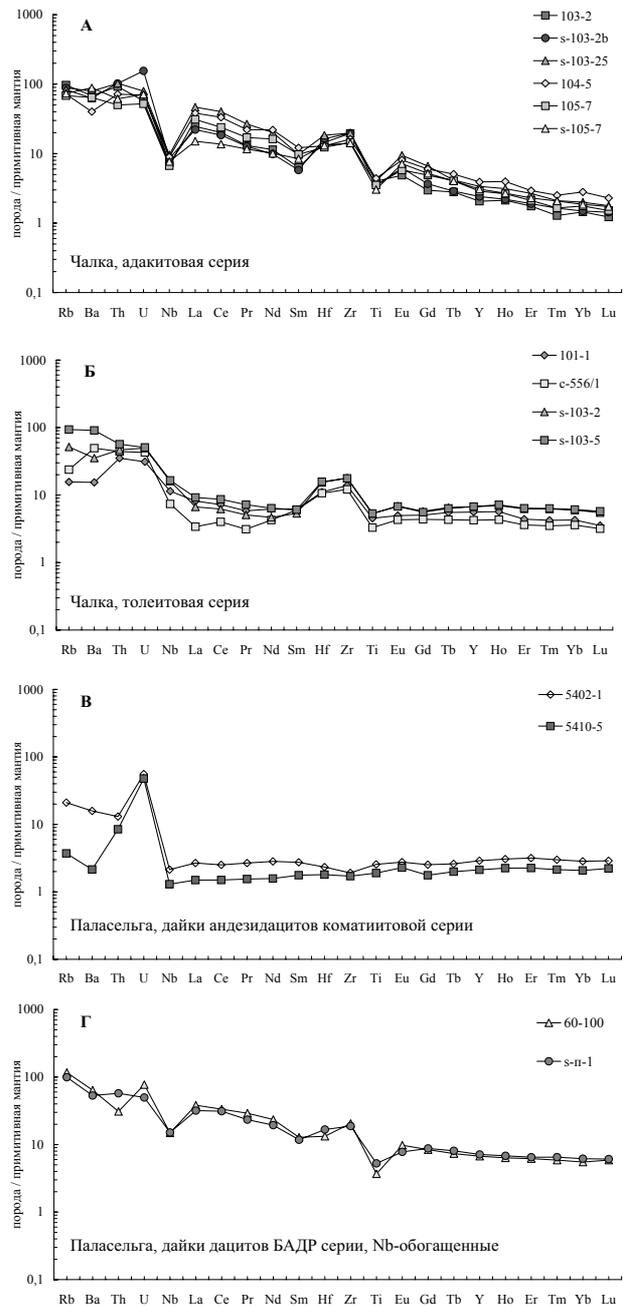


Рис. 2. Спайдерграммы породных ассоциаций андезитового ряда (с возрастом 3,05–2,9 млрд лет) мезоархейского Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса

Существующие данные по реперной геохронологии ключевых объектов позволяют корректно определить время формирования ассоциации на уровне 2,9–2,85 млрд лет. Цирконометрия кислых вулканистов Койкарской (Янишской) палеовулканической постройки позволила получить возраст для лав – 2860 ± 15 млн лет (Самсонов и др., 1996), в Хаутаваарской структуре существуют датировки времени формирования лав дацитов – 2854 ± 14 млн лет (Сергеев, 1989) и дайки дацитов – 2862 ± 45 млн лет (Овчинникова и др., 1994). Завершающая фаза становления вулканического пояса мар-

кируется формированием гранодиоритовых массивов (в Хаутаваарской структуре) с возрастом 2790 ± 20 млн лет (Бибикина, 1989).

Наиболее полно в современном эрозионном срезе сохранилась Янишская палеовулканическая постройка. Прижерловые фации представлены лавами андезидацитов, дацитов с массивными, флюидальными, брекчированными и фрагментарными текстурами и полями пирокластитов в виде сваренных грубых туфов (агломератовые потоки), а также продуктов взрывных выбросов (агломератовые, лапиллиевые, псаммитовые туфы).

Лавы дацитов установлены в Эльмусской и Масельской постройках, в Семченской палеопостройке наиболее широко развиты глыбовые лавы крупнопорфировых андезитов. Пирокластиты образуют обширные поля. Реже встречаются сваренные глыбовые туфы с разным породным набором литокласт (андезиты, дациты) в виде локальных площадей (Янишская, Семченская) или протяженных линз размером $0,3 \times 5$ км (Масельская, Эльмусская).

На площади Эльмусского палеовулкана закартирован участок, сложенный несколькими потоками массивных лав риолитов видимой мощностью от 75 до 120 м, залегающих среди тонкополосчатых и тонкослоистых туфов и туффитов риолитового состава. Породы прорываются дайками риолитов мощностью от 1–2 до 15–20 м.

Фидерные каналы представлены штоками массивных дацитов (Янишская, Эльмусская палеопостройки) или экструзивных брекчий, переходящих в глыбовые лавы (Масельская палеопостройка). Субвулканические дайки мощностью 1,5–10 м выполнены дацитами, риодацитами с голубым кварцем и риолитами.

С удалением от центра упрощается фациальный состав продуктов извержения, исчезают лавы, грубые туфы сменяются лапиллиевыми и псаммитовыми туфами, туффитами и продуктами их перемыва.

Деятельность палеовулканических аппаратов происходила в субаэральной обстановке, что подчеркивается выходами спекшихся туфов и пузыристых лав, а мелководная обстановка отмечается присутствием маломощных слоев туфопесчаников, аркоз и гравийных туфоконгломератов между лавовыми потоками.

По петрогеохимическим характеристикам вулканы относятся к натровой серии ($K_2O/NaO = 0,2–0,4$), представлены андезитами, дацитами, риодацитами (SiO_2 от 52 до 78 мас.%). Распределение РЗЭ имеет более высокий уровень (по сравнению с древними островодужными вулканидами). В пределах ассоциации выделяются вулканы следующих типов:

Nb-обогащенная АДР-серия («нормального ряда»)

Породы этого ряда доминируют в молодом андезидацитовом ансамбле зеленокаменного пояса, наиболее широко они распространены в пределах Койкарской и Эльмусской структур. По содержанию

SiO_2 породы отвечают по составу андезибазальтам, андезитам, дацитам, риодацитами, риолитам с нормальной щелочностью.

Значимым отличием от древней БАДР-серии является более кислая специализация второго уровня вулканизма, что подчеркивается широким развитием пород дацитового и риолитового состава (с содержанием SiO_2 до 78–82 мас.%), при редком проявлении андезитовых составляющих.

Соотношение K_2O и Na_2O в андезидацитовых вулканидах и туфах варьирует от 0,1 до 0,7, при этом характеристическим является интервал 0,1–0,4, что подчеркивает Na-специализацию ассоциации. Вулканиды имеют низкие концентрации MgO и CaO . По распределению петрогенных элементов они близки магматическим породам активных континентальных окраин Андского типа или энсиалическим островодужным системам (Фролова, Бурикова, 1997).

Для вулканидов отмечаются повышенные содержания Nb (8–17 ppm), Cr (50–150 ppm), Ni (20–75 ppm), Zr (110–420 ppm) и Co, Zr, Y в поздних дифференциатах. Часть риолитов (Эльмусская и Койкарская структуры) имеет повышенные концентрации Sr (до 250 ppm), Ba (до 1100 ppm). Величина отношения Zr/Y варьирует в интервале 5,1–17,2, что свойственно вулканидам активных континентальных окраин, Nb/Ta = 9–19. Соотношение $Th_{pm} - U_{pm} - Nb_{pm} - La_{pm} - Hf_{pm}$ системы описывается неравенством $Th_{pm} < U_{pm} > Nb_{pm} < La_{pm} > Hf_{pm}$ (рис. 3, А, Б).

Топология распределения РЗЭ в вулканидах и туфах молодой андезидацитовой ассоциации близка современным формациям центрального сегмента Андийского вулканического пояса (Ort et al., 1996) и олигоценовым риолитовым лавам района Меза Сентрал юго-западной части вулканической провинции Сьерра-Мадре, Мексика (Orozco-Esquivel et al., 2002).

Нормированные отношения РЗЭ в породах молодой СТА Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса следующие: $(La/Sm)_n = 3,00 \pm 0,31$, $(Gd/Yb)_n = 2,31 \pm 0,35$, $(Ce/Yb)_n = 5,81 \pm 2,81$, при этом туфы имеют более деплетированный спектр распределения тяжелых РЗЭ: $(La/Sm)_n = 3,53–4,13$, $(Gd/Yb)_n = 3,89–5,24$, $(Ce/Yb)_n = 22,14–26,39$.

Проведенное изучение Sm-Nd систематики Nb-обогащенной АДР-серии Эльмусской структуры (табл. 2) показало, что значения $\epsilon Nd(t)$, полученные для риолитов, варьируют от –1 до –6 с аномальными значениями –16 для самой измененной пробы. Модельные возрасты вулканидов (по модели (De Paolo et al., 1991) находятся в интервале от 3074 до 3283 млн лет, наиболее древнее значение – 3506 млн лет – получено для дайки риолитов.

К сожалению, отмечаются нарушения Sm-Nd системы, не позволяющие рассчитать изохронный возраст, а все полученные модельные возрасты маркируют существенный вклад древнего сиалического материала в формирование ассоциации.

Таблица 2

Sm-Nd систематика кислых вулканитов Эльмусской структуры

Проба	Порода	Тип	Sm ppm	Nd ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 0,4\%$ 0,0040	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2se	T (Ma)	$\varepsilon(T)$	T-DM 1	T-DM 2
S-э-1	Риолит	Массивная лава	1,72	7,54	0,1378	0,0006	0,510654	0,00001	2860	-17,2		
S-э-2	Риолит	Массивная лава	4,09	21,76	0,1136	0,0005	0,510905	0,00001	2860	-3,3	3283	3395
S-э-3	Риолит	Дайка	1,71	6,87	0,1503	0,0006	0,510947	0,00001	2860	-16,1		
S-э-4	Риолит	Лавобрекчия	2,80	8,74	0,1938	0,0008	0,512277	0,000016	2860	-6,1		
S-э-5	Риолит	Дайка	2,60	13,54	0,1160	0,0005	0,510823	0,00001	2860	-5,8	3506	3603
5726-3	Андезит	Литокласт агломератового туфа	8,01	44,54	0,1087	0,0004	0,510884	0,00001	2860	-1,9	3154	3268
5718-9C	Дациит	Псаммитовый туф	4,64	25,92	0,1083	0,0004	0,510929	0,00001	2860	-0,9	3074	3192

Примечание. T-DM 1 – по модели DePaolo (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); T-DM 2 – по модели Голдштейна и Якобсена (Goldstein S. J., Jacobsen S. B. Nd and Sr isotopic systematic of river water suspended material implications for crustal evolution // Earth and Planet. Sci. Letters. 1988. Vol. 87. P. 249–265).

Адакитовая серия

В настоящее время основной областью распространения адакитов этого возраста является Семченская структура, в пределах Койкарской структуры пока выявлена лишь одна дайка (проба S-80) с адакитовыми геохимическими характеристиками. Породы адакитовой серии имеют аномально низкие содержания ТРЗ элементов и явное подобие топологии РЗЭ спектров фанерозойским адакитовым расплавам. Следует подчеркнуть, что если древнейшая островодужная ассоциация имела доминирующие адакитовые составы в виде субвулканической фазы, то в верхнем уровне АДР-серии адакитовые характеристики более присущи лавовой фации. Для пород также отмечаются аномально высокие содержания Ва (270–500 ppm), Sr (200–320 ppm) и низкие концентрации Nb (3,0–3,8 ppm), Ti (3600–3800 ppm) и всех ТРЗЭ, при этом их общий уровень содержания значительно ниже, чем в адакитах древней островодужной системы. Соотношение $\text{Th}_{\text{pm}} - \text{U}_{\text{pm}} - \text{Nb}_{\text{pm}} - \text{La}_{\text{pm}} - \text{Hf}_{\text{pm}}$ системы описывается неравенством $\text{Th}_{\text{pm}} < \text{U}_{\text{pm}} > \text{Nb}_{\text{pm}} < \text{La}_{\text{pm}} > \text{Hf}_{\text{pm}}$ (рис. 3, В).

Андезиты толеитовой серии

Породы представлены лавовой и дайковой фациями в пределах Койкарской структуры. По содержанию $\text{SiO}_2 = 60\text{--}63$ мас. % породы отвечают андезитам и имеют повышенную магнизиальность (Mg\# от 60 до 63), по геохимической характеристике подобны толеитовым андезитам древнего уровня. В этой серии также отмечаются повышенные концентрации Cr (100–200 ppm), Ni (28–45 ppm) при низких содержаниях Nb (<5 ppm). Вулканиты имеют отношения $\text{Zr/Y} 5,0\text{--}8,2$, $(\text{La/Yb})_{\text{pm}} = 0,7\text{--}1,7$, $\text{Nb/Ta} = 10\text{--}13$, соотношение $\text{Th}_{\text{pm}} - \text{U}_{\text{pm}} - \text{Nb}_{\text{pm}} - \text{La}_{\text{pm}} - \text{Hf}_{\text{pm}}$ системы описывается неравенством $\text{Th}_{\text{pm}} > \text{U}_{\text{pm}} > \text{Nb}_{\text{pm}} > \text{La}_{\text{pm}} < \text{Hf}_{\text{pm}}$ (рис. 3, Г).

Обсуждение результатов

Комплексные геолого-геохимические исследования последних лет показывают, что субдукционные системы (как фанерозойские, так и докембрийские)

характеризуются большим разнообразием петрографических и геохимических типов первичных магм (Gill, 1981; Arculus, 1994; Wyman et al., 2002). Причем не всегда удается все разнообразие пород объяснить процессами дифференциации и фракционирования первичных базальтовых расплавов нормального известково-щелочного ряда.

Как было нами показано на примере геохимической характеристики мезоархейских андезитовых ассоциаций Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса, сериальное деление позволяет в пределах андезитовых ассоциаций двух временных срезов (3,0–2,9 и 2,9–2,8 млрд лет) выделить такие основные ассоциации, как БАДР, адакитовую, высоко-MgO андезибазальтов, андезитов, Nb-обогащенных андезибазальтов, серии андезитов толеитового ряда и ряд других.

Полученные результаты хорошо коррелируют с исследованиями в пределах субпровинции Вава, Канада, где также были выделены близкие породные ансамбли (Polat, Kerrich, 2001; Wyman et al., 2002).

Обобщая полученный геохимический материал, следует кратко рассмотреть варианты формирования подобных ассоциаций в мезоархейской конвергентной субдукционной системе на примере парагенезов Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса.

БАДР-серия «нормального ряда». Формирование данной дифференцированной ассоциации является закономерным этапом развития субдукционной системы. При генерации серии предполагаемой областью плавления являлась зона метасоматизированного мантийного клина. Как показали результаты ранних модельных исследований (Светов, 2005), область плавления располагалась на глубинах 60–70 км (давление в источнике <25 кбар). Степень плавления при генерации первичных известково-щелочных расплавов не превышала 12–20%, температуры $T = 1000\text{--}950$ °C. Все разнообразие пород связано с процессами фракционирования первичных базальтовых, андезибазальтовых расплавов.

Адакитовая серия. Генерация адакитовых расплавов осуществлялась при непосредственном плавлении субдуцируемой океанической плиты, чаще всего в режиме пологой субдукции на инициальной или

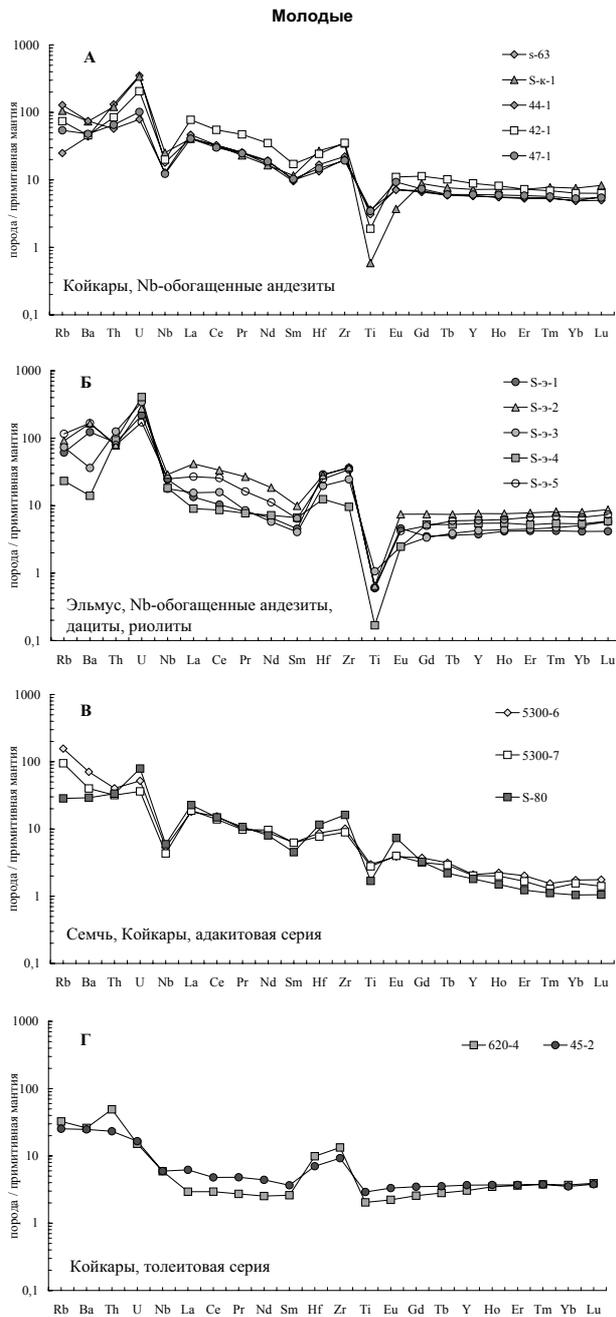


Рис. 3. Спайдерграммы породных ассоциаций андезитового ряда (с возрастом 2,9–2,8 млрд лет) мезоархейского Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса

конечной стадии. В некоторых случаях формирование адакитов возможно и в обстановках «слэб-виндов» (в областях разрыва субдуцируемой плиты). Модельные расчеты генерации адакитов Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса позволили установить, что исходные магмы могли быть получены при 10–15% плавлении амфиболита с образованием Crx (60%) + Gar (10%) + Pl (25%) + Hbl (5%) рессита, с последующим фракционированием $\text{Pl} \pm \text{Crx}$. Формирование адакитов связано с инициальной стадией заложения субдукционной системы, и впослед-

ствии расплавы данного состава внесли существенный вклад в формирование прочих гибридных серий.

Высокомagneзиальные андезибазальты, андезиты (бояиты) характеризуются содержанием SiO_2 на уровне 56–65 мас.%, повышенной магнезиальностью ($\text{Mg\#} > 0,5$) и концентрациями Cr, Ni, ЛРЗЭ. Подобный тип расплавов может формироваться в ходе взаимодействия отделенных при плавлении метасоматизированной мантии расплавов с адакитовыми магмами и прогрессивной их гибридизации (Kelemen, 1995; Wyman et al., 2002; Calmus, 2003).

Высоко-Nb базальты, андезибазальты и Nb-обогащенные андезиты. От пород прочих серий высоко-Nb базальты и андезиты отличаются значительными концентрациями Nb, более 20 ppm, в случае Nb-обогащенных пород эти концентрации составляют 7–20 ppm, что в любом случае намного больше концентрации Nb в породах островодужных систем, где они не превышают 2 ppm (Taylor, Nesbitt, 1998). Обогащенные Nb породы являются типичными ансамблями островодужных систем, как и адакиты (Polat, Kerrich, 2001). Формирование ассоциации возможно по нескольким моделям, включающим взаимодействие адакитовых расплавов с продуктами плавления перидотитов в области мантийного клина; в ходе конвекционных движений в области мантийного клина, когда метасоматизированные перидотиты переносятся непосредственно в область плавления (Kepzhinskas et al., 1996; Sajoma et al., 1996).

Толеитовая и коматиитовая серии. Андезиты и андезибазальты толеитовой серии достаточно широко представлены в мезоархейских островодужных ансамблях Центральной Карелии. Формирование столь «примитивных» расплавов может происходить на инициальной стадии заложения островодужной системы, что достаточно типично для фанерозойских конвергентных обстановок (Фролова, Бурикова, 1997). Обнаружение же андезитов и андезидацитов коматиитового ряда в виде дайковой составляющей является достаточно уникальной находкой. Сопоставление их геохимии с вариолитами (продуктами ликвационной дифференциации коматиитовых расплавов) показывает еще большее обеднение всеми РЗЭ, характеристика спектра почти полностью соответствует примитивной мантии, однако присутствует ярко выраженное обогащение Rb, Ba, Th, U, возможно связанное с контаминацией корового материала. Данные расплавы не могут являться продуктами непосредственного фракционирования коматиитовых магм, о чем свидетельствует крайне низкий уровень содержания лантаноидов, и условия их формирования пока остаются дискуссионными.

Таким образом, формирование геохимически контрастных породных ассоциаций андезитового ряда проходило на различных стадиях заложения и развития субдукционной системы, и ассоциация описанных серий является устойчивой как для архейских, так и для фанерозойских конвергентных обстановок.

ЛИТЕРАТУРА

- Бибикова Е. В.* Уран-свинцовая геохронология ранних этапов развития древних щитов. М., 1989. 256 с.
- Лобиков А. Ф.* О возрасте раннекарельских метавулкани-тов по данным свинцово-изохронного метода // Проблемы изотопного датирования процессов вулканизма и осадкообразования. Киев, 1982. С. 90–91.
- Овчинникова Г. В., Матреничев В. А., Левченков О. А. и др.* U-Pb и Pb-Pb изотопные исследования кислых вулкани-тов Хаутаваарской зеленокаменной структуры, Централь-ная Карелия // Петрология. 1994. Т. 2, № 3. С. 266–281.
- Самсонов А. В., Бибикова Е. В., Пухтель И. С.* Изотоп-ные и геохимические различия кислых вулканических по-род зеленокаменных поясов Карелии и их геотектониче-ское значение // Корреляция геологических комплексов Фенноскандии: Тез. докл. 1-й Междунар. конф. (8–11 сент. 1996 г., Санкт-Петербург). СПб., 1996. С. 74–75.
- Светов С. А.* Новые данные по геохимии древнейших (3,05–2,95 млрд. лет) андезитовых ассоциаций Восточной Фенноскандии // ДАН. 2003. Т. 388, № 5. С. 664–668.
- Светов С. А.* Магматические системы зоны перехода океан – континент в архее восточной части Фенносканди-навского щита. Петрозаводск, 2005. 230 с.
- Светов С. А., Хухма Х., Светова А. И., Назарова Т. Н.* Древнейшие адakitы Фенноскандинавского щита // Докла-ды РАН. 2004. Т. 397, № 6. С. 810–814.
- Светов С. А., Кудряшов Н. М., Ронкин Ю. Л. и др.* Мезоар-хейская островодужная ассоциация Центрально-Карельского террейна (Фенноскандинавский щит). Новые геохронологи-ческие данные // Доклады РАН. 2006. Т. 406, № 3. С. 370–374.
- Светова А. И.* Архейский вулканизм Велдозерско-Се-гозерского зеленокаменного пояса Карелии. Петрозаводск, 1988. 148 с.
- Сергеев С. А.* Геология и изотопная геохронология гра-нит-зеленокаменных комплексов архея Центральной и Юго-Восточной Карелии: Автореф. дис. ... канд. геол.-ми-нер. наук. 1989. 24 с.
- Фрлова Т. И., Бурикова И. А.* Магматические формации современных геотектонических обстановок. М., 1997. 320 с.
- Arculus R. J.* Aspects of magma genesis in arcs // Lithos. 1994. 33. P. 189–208.
- Ayer J., Amelin Y., Corfu F. et al.* Evolution of the southern Abitibi greenstone belt based on U-Pb geochronology: autochthonous volcanic construction and sedimentation // Precambrian Research. 2002. Vol. 115. P. 63–95.
- Calmus T., Aguillo-Robles A., Maury R. C. et al.* Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites («bajaites») from Baja California, Mexico: the role of slab melts // Lithos. 2003. 66. P. 77–105.
- Card K. D.* A review of the Superior Province of Canadian Shield, a product of Archean accretion // Precambrian Research. 1990. Vol. 48. P. 99–156.
- 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.
- Gill J.* Orogenic Andesites and Plate Tectonics. Berlin, 1981. 390 p.
- Kelemen P. B.* Genesis of high Mg# andesites and continental crust // Contrib. to Mineral. and Petrol. 1995. Vol. 120. P. 1–19.
- Kepezhinskas P. K., Defant M. J., Drummond M. S.* Progressive enrichment of island arc mantle by melt – peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. 60. P. 1217–1229.
- Kerrich R., Wyman D., Hollings P., Polat A.* Variability of Nb/U and Th/La in 3.0 to 2.7 Ga Superior Province ocean plateau basalts: implications for the timing of continental growth and lithosphere recycling // Earth and Planet. Sci. Letters. 1999. 168. P. 101–115.
- Kusky T. M., Polat A.* Growth of granite greenstone terranes at convergent margins and stabilization of Archaean cratons // Tectonophysics. 1999. Vol. 305. P. 43–73.
- Martin H.* Adakitic magmas: modern analogues of Ar-chaean granitoids // Lithos. 1999. 46. P. 411–429.
- Martin H., Smithies R. H. et al.* An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // Lithos. 2005. 79. P. 1–24.
- 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 // Jor. Volcan. and Geothermal Res. 2002. 118. P. 37–56.
- Ort M. H., Coira B. L., Mazzoni M. M.* Generation of a crust-mantle magma mixture magma sources and contamination at Cerro Panizos, central Andes // Contrib. to Mineral. and Petrol. 1996. 123. P. 308–322.
- Peltonen P., Kontinen A., Huhma H.* Petrology and geochemistry of metabasalts from the 1.95 Ga Jormua ophiolite, Northeastern Finland // J. Petrology. 1996. Vol. 37, N 6. P. 1359–1383.
- Polat A., Kerrich R.* Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from late-archean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: implications for late Archean subduction zone petrogenetic processes // Contrib. to Mineral. and Petrol. 2001. Vol. 141. P. 36–52.
- Polat A., Kerrich R.* Nd-isotope systematics of ~2.7 Ga adakites, magnesian andesites and arc basalts, Superior Province: evidence for shallow crustal recycling at Archean subduction zones // Earth and Planet. Sci. Letters. 2002. Vol. 202. P. 345–360.
- Puchtel I. S., Hofmann A. W., Amelin Y. V. et al.* Combined mantle plume-island arc model for the formation of the 2.9 Ga Sumozero-Kenozero greenstone belt, SE Baltic shield: isotope and trace element constraints // Geochim. Cosmochim. Acta. 1999. Vol. 63, N 21. P. 3579–3595.
- Sajona F. G., Maury R. C., Bellon H. et al.* High field strength element enrichment of Pliocene– Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, western Mindanao (Philippines) // J. Petrol. 1996. 37. P. 693–726.
- Taylor R. N., Nesbitt R. W.* Isotopic characteristics of subduction fluids in an intraoceanic setting, Izu-Bonin Arc, Japan // Earth and Planet. Sci. Letters. 1998. 164. P. 79–98.
- Taylor S. R., McLennan S. M.* The geochemical evolution of the continental crust // Rev. Geophys. 1995. Vol. 33. P. 241–265.
- Wyman D. A., Kerrich R., Polat A.* Assembly of archaic cratonic mantle lithosphere and crust: plume-arc interaction in the Abitibi-Wawa subduction-accretion complex // Pre-cambrian Research. 2002. 115. P. 37–62.