

**Модель формирования щелочных нефелиновых сиенитов и ассоциирующих с ними пород Сайбарского массива Минусинского прогиба по геологическим, геохимическим и изотопным ( $\delta^{18}\text{O}$ ) данным**

© *А. А. Воронцов*<sup>1</sup>, *О. Ю. Перфилова*<sup>2</sup>, *А. С. Тарасюк*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия. E-mail: voront@igc.irk.ru

<sup>2</sup> Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия. E-mail: perfil57@mail.ru

Сайбарский массив расположен в горном обрамлении Минусинского прогиба Алтае-Саянской складчатой области. Он сложен щелочными нефелиновыми сиенитами, щелочными сиенитами и щелочными граносиенитами. Геологические, геохимические и изотопные данные для пород массива указывают на кристаллизационную дифференциацию щелочных расплавов мантийной природы и их взаимодействие с коровым веществом.

**Ключевые слова:** щелочной нефелиновый сиенит; Минусинский прогиб; фракционирование; плавление.

**The model for formation of alkaline nepheline syenites and associated rocks at the Saibar massif within the Minusinsk trough by geological, geochemical and isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ) data**

*A. A. Vorontsov*<sup>1</sup>, *O. Yu. Perfilova*<sup>2</sup>, *A. S. Tarasyuk*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: voront@igc.irk.ru

<sup>2</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: perfil57@mail.ru

The Saibar massif is located within the mountainous setting of the Minusinsk trough of the Altay-Sayan folded area. It is composed of alkaline nepheline syenites, alkaline syenites and alkaline granosyenites. Geological, geochemical and isotopic data for the massif rocks indicate crystallization differentiation of alkaline melts of mantle nature and their interaction with crustal material in the same magmatic chamber.

**Keywords:** alkaline nepheline syenite; Minusinsk trough; fractionation; melting.

Щелочные нефелиновые сиениты распространены в разнообразных магматических ассоциациях, но занимают первые доли процента по объёму среди всех изверженных пород Земли. В то же время с ними связаны месторождения алюминиевого сырья и редких литофильных элементов. Вероятно, это определяет актуальность исследований этих пород и значительное многообразие моделей их происхождения и эволюции.

Сайбарский массив расположен в горном обрамлении Минусинского прогиба Алтае-Саянской складчатой области. Он сложен щелочными нефелиновыми сиенитами, щелочными сиенитами и щелочными граносиенитами по [2]. Полученные в 2005 году результаты U-Pb датирования цирконов щелочных нефелиновых сиенитов [1] показали для них позднеордовикский возраст ( $457 \pm 10$  млн лет). В ходе предшествующих исследований для щелочных нефелиновых сиенитов массива были получены противоречивые геологические сведения. Так, Г.М. Саранчина относила их к дайкам [3], в то время как Э.Е. Федоров [4] считал их ксенолитами в сиенитах. Учитывая это, мы в своих исследованиях особое внимание уделили характеристике взаимоотношений породных комплексов.

*Щелочные нефелиновые сиениты* (фойяиты) в пределах массива образуют обособленные поля (20 x 50 м) и линейные зоны протяженностью от 50 до 200 м. Нередко зоны морфологически выражены в виде небольших выступов и гряд высотой от 0,5 до 3 метров, создавая обманчивое впечатление даек. Для фойяитов типично псевдополосчатое и пегматоидное строение. Выделяется широкая гамма разновидностей пород с варьирующими количественными соотношениями калиево-натриевого полевого шпата, альбита, нефелина и эгирина. Содержание  $\text{SiO}_2$  в этих породах изменяется в пределах от 53,9 до 61,6 мас. %,  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  от 12,3 до 13,9 мас. %, коэффициент агпаитности, как правило, превышает 1.

*Щелочные сиениты* (тенсбергиты) резко доминируют в массиве, занимая не менее 90 % его площади. Эти породы сложены ортоклазом, альбитом, эгирин-авгитом и арфведсонитом. Они отличаются от фойяитов более высокими значениями  $\text{SiO}_2$  (от 61,5 до 66,4 мас.%) при относительно низкой суммарной щелочности ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  меняется от 8,9 до 11,6 мас. %). Коэффициент агпаитности изменяется в пределах 0,76-0,99.

*Щелочные граносиениты* слагают участки неправильной формы площадью от 10 до 100 м<sup>2</sup>, которые через промежуточные разности постепенно переходят в крупнозернистые щелочные сиениты и приурочены к мощным (до 100 м) эндоконтактовым зонам в северной и южной частях массива. Ими также сложены дайки (1x20 м), незакономерно рассредоточенные среди щелочных сиенитов. В них,

кроме преобладающего калиево-натриевого полевого шпата, присутствует ксеноморфный кварц, альбит, эгирин-авгит и арфведсонит.  $\text{SiO}_2$  в этих породах варьирует в пределах 68,7–69,9 мас. %, что существенно выше, чем для пород самого массива, при этом  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  изменяется от 9,1 до 10,9 мас. %. Коэффициент агапайности меньше 1.

Для построения модели формирования Сайбарского массива важно подчеркнуть следующие геологические и петрографические особенности пород: 1) В ряду фойяит–тенсбергит–щелочной граносиенит зоны эндоконтакта существуют постепенные переходы. При образовании фойяитов происходит разделение на лейкократовые существенно калишпатовые и меланократовые с преобладанием эгирина фрагменты. Немногочисленные дайки сложены, так же как и зона эндоконтакта, щелочными граносиенитами. 2) Для всех пород типичны магматические (гипидиоморфнозернистые, порфирировидные, трахитоидные) структуры. Эти данные указывают на двухфазное строение массива и близко-одновременное формирование фойяитов, тенсбергитов и щелочных граносиенитов зоны эндоконтакта и их следует относить к единой (первой) фазе внедрения, так как они возникли в результате кристаллизации общего для них расплава. Дайки, являющиеся образованиями второй фазы, близки по своим петрографическим характеристикам породам зоны эндоконтакта. Учитывая, что объём тенсбергитов несоизмеримо больше объёма других типов пород, можно предположить, что их состав отвечает составу материнского расплава. В этом случае следует ожидать, что фойяиты и щелочные граносиениты будут являться продуктами магматической эволюции тенсбергитового расплава. Возникает главный вопрос: в результате каких процессов из общего магматического резервуара могли образовываться нефелиновые (недосыщенные кремнезёмом) и кварцевые (пересыщенные кремнезёмом) породы.

На петрогеохимических бинарных диаграммах с использованием в качестве индекса дифференциации расплава содержания  $\text{SiO}_2$  фигуративные точки составов всех рассматриваемых пород образуют непрерывные тренды, в которых наблюдаются следующие закономерности:

1. Постепенно уменьшается величина  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  от 2,5 в фойяитах до 0,8 в щелочных граносиенитах.
2. Фойяиты по сравнению с другими типами пород обладают повышенными концентрациями  $\text{MgO}$  (до 1,3 мас.%) и  $\text{CaO}$  (до 2,3 мас. %).
3. Диапазоны вариаций  $\text{Zr}$ ,  $\text{Hf}$ ,  $\text{Sr}$  и REE в фойяитах близки к таковым в тенсбергитах. Суммарное содержание REE варьирует в широких пределах (для фойяитов от 143 до 1087 г/т, для тенсбергитов от 210 до 755 г/т) и не зависит от содержаний  $\text{SiO}_2$ .
4. От фойяитов к тенсбергитам постепенно увеличиваются содержания  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ba}$  и уменьшается количество  $\text{Rb}$ .
5. Щелочные граносиениты зоны эндоконтакта и дайки характеризуются минимальными значениями содержаний  $\text{Zr}$ ,  $\text{Hf}$  по сравнению с другими породами.
6. От тенсбергитов к щелочным граносиенитам увеличиваются содержания  $\text{CaO}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Rb}$ .
7. По сравнению с тенсбергитами в щелочных граносиенитах зоны эндоконтакта накапливаются  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Sr}$  и REE.
8. Щелочные граносиениты дайки по сравнению с аналогичными породами зоны эндоконтакта резко обеднены  $\text{P}_2\text{O}_5$  и REE.

Подобное распределение некогерентных литофильных элементов указывает на два разных механизма эволюции исходного тенсбергитового расплава, вероятно, формирующегося в виде магматической вертикальной колонны. Первый приводит к появлению фойяитов в её стволовой части. Здесь фракционирует альбит, в конечных продуктах появляются нефелин, эгирин и калиево-натриевый полевой шпат, что сопровождается понижением  $\text{SiO}_2$ . Другой механизм связан с образованием щелочных граносиенитов зоны её эндоконтакта. В этом случае накопление  $\text{SiO}_2$  обусловлено фракционированием эгирина, ростом доли альбита и появлением свободного кремнезема в виде кварца. В этих породах накапливается апатит, являющийся носителем редкоземельных элементов, но понижаются гидрфобные высокозарядные  $\text{Zr}$  и  $\text{Hf}$ , что, вероятно, связано с ранней кристаллизацией цирконосиликатов при насыщении водным флюидом зоны эндоконтакта.

В спектрах нормированного распределения элементов для фойяитов и тенсбергитов Сайбарского массива прослеживаются одинаковые закономерности фракционирования. При этом в обогащенных дифференциатах значения  $\text{Th}$ ,  $\text{U}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Hf}$ ,  $\text{La}$ ,  $\text{Ce}$ ,  $\text{Pr}$ ,  $\text{Nd}$ ,  $\text{Tm}$ ,  $\text{Yb}$ ,  $\text{Lu}$ , превышают их содержания в верхней континентальной коре. В то же время минимальные содержания  $\text{Ba}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Sm}$ ,  $\text{Eu}$ ,  $\text{Gd}$ ,  $\text{Tb}$ ,  $\text{Dy}$ ,  $\text{Y}$ ,  $\text{Ho}$ ,  $\text{Er}$  в фойяитах не достигают нижнекоровых значений. Наряду с этим, при фракционировании магм в сторону увеличения суммарной щелочности и кристаллизации нефелина рост REE сопровождается увеличением  $(\text{La}/\text{Yb})_n$ . В кварц-нормативной серии величина  $(\text{La}/\text{Yb})_n$  меняется

незначительно и форма спектра нормированного распределения REE близка к спектру состава верхней континентальной коры. Европейский минимум слабо выражен во всех разновидностях пород. Главными отличиями щелочных граносиенитов зоны эндоконтакта от тенсбергитов являются рост REE (до 1822 г/т), сглаживание минимумов в области MREE и падение концентраций Zr и Hf. Щелочной граносиенит дайки обеднён практически всеми несовместимыми элементами и форма спектра его состава приближается к таковой для верхней континентальной коры, что указывает на плавление корового вещества при образовании кислых расплавов поздней фазы.

Изотопный состав кислорода в калиево-натриевых полевых шпатах низкокремнистых фойяитов ( $\delta^{18}\text{O} = 6,3 \text{ — } 8,2 \text{ ‰}$ ) приближен к мантийным меткам. Калиево-натриевые полевые шпаты высококремнистых фойяитов, тенсбергитов и щелочного граносиенита дайки обогащены тяжёлым изотопом кислорода ( $\delta^{18}\text{O} = 9,3 \text{ — } 10,8 \text{ ‰}$ ). Эти данные, в совокупности с геологическими наблюдениями и геохимическими особенностями пород указывают на кристаллизационную дифференциацию щелочных расплавов мантийной природы и их взаимодействие с коровым веществом с появлением нефелиновых и кварцевых пород в пределах одного массива.

*Исследование проведено в рамках государственного задания по Проекту IX.129.1.5. (№ 0350-2016-0030) и при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-05-00181).*

#### *Литература*

1. Разнообразие кембро-ордовикских ультрабазит-базитовых ассоциаций Центрально-Азиатского складчатого пояса как отражение процессов взаимодействия плюма и литосферной мантии / А. Э. Изох [и др.] // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы совещания. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2005. В 2-х томах. Т.1. С. 106-108.
2. Петрографический кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание третье, переработанное и дополненное. СПб: Изд-во «ВСЕГЕИ», 2009. 200 с.
3. Саранчина Г. М. Щелочные породы массива Сайбар (Западная Сибирь, Красноярский край) // Учёные записки ЛГУ, 1940. № 45. 26 с.
4. Фёдоров Э. Е. К вопросу о сиенитовой интрузии Тубино-Сисимского района (Красноярский край) // материалы ВСЕГЕИ. Общ. серия. Госгеолиздат, 1948. № 8. С. 106–112.

**Воронцов Александр Александрович**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск.