

Механизм образования гранофировых пород массива Ярва-Варака (Мончегорский рудный район, Кольский полуостров): Sm-Nd и Rb-Sr системы и термодинамическое моделирование

Каулина Т. В.¹, Анисимов Р. Л.², Кунаккузин Е. Л.¹, Балтыбаев Ш. К.^{2,3}, Нерович Л. И.¹

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, t.kaulina@ksc.ru

² Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, romjulleoanis@ipgg.ru

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, shauket@mail.ru

Аннотация. Проведено изучение Sm-Nd и Rb-Sr систем и термодинамическое моделирование процессов кристаллизации гранофировых пород массива Ярва-Варака Мончегорского рудного района Кольского полуострова. Считалось, что образование гранофира по всему разрезу массива обусловлено значительной коровой контаминацией при плавлении пород мишени в результате метеоритного удара. Полученные значения ϵNd для всех разновидностей пород массива в пределах $-1 - +1$ показывают, что родоначальный для пород Ярва-Вараки расплав имел изотопные характеристики Nd, близкие к хондритовому резервуару. Вмещающие гнейсы кольской серии (породы мишени) в 2.5 млрд лет (время образования массива) имели значения $\epsilon\text{Nd} = -2.4$, что не могло существенно изменить Sm-Nd систему расплава. Термодинамическое моделирование минералообразования на основе минимизации энергии Гиббса показало принципиальную возможность образования гранофира в ходе фракционной кристаллизации магмы и без участия коровой контаминации. Предполагается, что роль метеоритного воздействия на магматическую камеру заключается в механическом смешивании гранофирового расплава с не полностью закристаллизованными породами базитового состава.

Ключевые слова: гранофир, расслоенные интрузии, термодинамическое моделирование, Sm-Nd, Rb-Sr, Кольский п-ов.

Mechanism of granophyre rocks formation of the Yarva-Varaka massif (Monchegorsk ore district, Kola Peninsula): Sm-Nd and Rb-Sr systems and thermodynamic modeling

Kaulina T. V.¹, Anisimov R. L.², Kunakkuzin E. L.¹, Baltybaev Sh. K.^{2,3}, Nerovich L. I.¹

¹ Geological Institute of the Kola Science Center of RAS, Apatity, t.kaulina@ksc.ru

² Institute of Precambrian Geology and Geochronology of RAS, St. Petersburg, romjulleoanis@ipgg.ru

³ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, shauket@mail.ru

Abstract. The Sm-Nd and Rb-Sr systems were studied and thermodynamic modeling of crystallization processes of granophyre rocks of the Jarva-Varaka massif of the Monchegorsk ore district of the Kola peninsula was performed. It was believed that the granophyre formation throughout the section of the massif was due to significant crustal contamination during melting of the target rocks as a result of a meteorite impact. The obtained ϵNd values for all massif rock varieties within the range of $-1 - +1$ show that the parental melt for the Jarva-Varaka rocks had Nd isotopic characteristics close to the chondrite reservoir. The host gneisses of the Kola series (target rocks) at 2.5 Ga (the time of the massif formation) had values of $\epsilon\text{Nd} = -2.4$, which could not significantly change the Sm-Nd system of the melt. Thermodynamic modeling of mineral formation based on Gibbs energy minimization has shown the fundamental possibility of granophyre formation during fractional crystallization of magma without crustal contamination. It is assumed that the role of meteorite impact on the magma chamber consists in mechanical mixing of granophyre melt with incompletely crystallized rocks of basic composition.

Keywords: granophyre, layered intrusions, thermodynamic modeling, Sm-Nd, Rb-Sr, Kola Peninsula.

Введение

Расслоенный массив Ярва-Варака, расположенный на севере Мончегорского рудного района Кольского полуострова, представляет собой интрузивное тело размером 1.7×2.2 км, мощностью до 2 км. Возраст массива составляет 2498–2496 млн лет (Расслоенные интрузии..., 2004; Kaulina et al., 2021). Массив Ярва-варака сложен норитами двух типов, гиперстеновыми диоритами, пижонит-

авгитовыми диоритами, кварцевыми диоритами и гранодиоритами. Вмещающими породами являются гнейсы кольской серии и разнообразные тела гранитоидов. Массив представляет особый интерес, поскольку по геолого-геохимическим данным он может быть сопоставлен с магматическим комплексом Садбери импактного происхождения (Nerovich et al., 2023).

Для всех изученных пород массива характерна массивная текстура и хорошая сохранность магматической, чаще гипидиоморфнозернистой структуры с участками микропегматитовой. Часто отмечается порфировидная структура, а в скважинах представлены и порфириновые разности норитов и диоритов. Общим для всех пород является также прямая зональность ортопироксена и призматического плагиоклаза. Одной из основных сходных черт массива Ярва-Варака и магматического комплекса Садбери является присутствие гранофира по всему разрезу. Гранофир представляет собой разновидность пегматита с микрографической (гранофировой) структурой и часто наблюдается в породах расслоенных комплексов, но, как правило, он составляет доли процента от общего объема интрузивов (Налдретт, 2003; Расслоенные интрузии..., 2004). Разрез массива Ярва-варака, подобно Садбери представляет собой примерно 2 км гранофировых пород, начиная с предполагаемого дна магматической камеры (Nerovich et al., 2023). Наличие гранофира по всему разрезу пород массива может говорить о существенном вкладе корового вещества. Также на коровую компоненту в исходных расплавах указывают хорошо выраженные Nb-Ta минимумы, которые характерны как для пород массива Ярва-Варака (Nerovich et al., 2023) так и магматического комплекса Садбери (Chai, Eckstrand, 1994; Lightfoot et al., 2001; Налдретт, 2003).

Наличие гранофира на дне магматической камеры и далее вверх по разрезу лучше всего можно объяснить взрывом в приповерхностных условиях. Взрыв могут обеспечить два механизма. Первый – это катастрофически быстрое поступление разогретой базитовой магмы в верхние горизонты коры, взрыв и образование депрессии с обрушением значительных объемов пород кровли. То есть это, похоже, но не идентично классической трубке взрыва. Данный механизм хорошо согласуется с небольшими по площади размерами массива Ярва-Варака. Второй механизм – это импактное событие с плавлением основного и кислого материала в породах «мишени», как принято для Садбери. Но, если мощность разреза магматического комплекса в обоих интрузивах составляет около 2 км, то площадь развития пород в них несопоставима: в Садбери породы простираются более чем на 100 км, в Ярва-Вараке примерно на 2 км. Это, вероятно, можно объяснить разницей в размерах и углах падения метеоритов.

В пользу импактного события в структуре Ярва-Варака говорят находки в гнейсах и гранитоидах обрамления псевдотрахитовой брекчии, полос смятия в биотите и клиноцоизите, планарных структур в кварце (Nerovich et al., 2023), диаплектовых стекол циркона, плагиоклаза и силлиманита (Kaulina et al., 2021) и деформационных микроструктур в монаците (Kaulina et al., 2023). Хотя многие из вышеперечисленных структур характерны и для эндогенных процессов (French and Koeberl, 2010), совокупность имеющихся признаков позволяет с большой долей вероятности говорить об импактном происхождении структуры Ярва-Варака.

В данной статье представлены изотопные Sm-Nd и Rb-Sr анализы для всех разновидностей пород массива, а также результаты термодинамического моделирования, позволяющие рассмотреть условия кристаллизации гранофировых пород массива Ярва-Вараки.

Методы исследования

Изотопный Sm-Nd и Rb-Sr анализ пород массива Ярва-Варака проводился в лаборатории геохронологии и изотопной геохимии ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты. Первые данные были опубликованы в работе (Нерович и др., 2019). Методика подробно описана в работе (Баянова, 2004).

Термодинамические расчеты минералообразования производились в программе MAGEMin (Riel et al., 2022). Алгоритм работы программы основан на поиске минимума энергии Гиббса, что определяет устойчивый минеральный парагенезис для конкретного химического состава породы в рассматриваемом диапазоне температуры и давления. При расчетах была использова-

на термодинамическая база (Holland et al., 2018) с обновлением (Green et al., 2025) для системы $K_2O-Na_2O-CaO-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-Fe_2O_3-Cr_2O_3$.

Также для расчетов была использована программа MSC — Magma Chamber Simulator (Bohrson et al., 2014), являющаяся дополнением к программному пакету MELTS (Ghiorso, Sack, 1995; Asimow, Ghiorso, 1998). Программы семейства MELTS позволяют рассчитать последовательность кристаллизации минеральных фаз из расплава заданного состава и оценить эволюцию остаточного расплава в условиях равновесной или фракционной кристаллизации. MCS – термодинамическая модель открытой системы, где возможно моделирование чистой фракционной кристаллизации с учетом ассимиляции вмещающих пород и/или смешения с добавочными порциями расплава.

Результаты и обсуждение

Sm-Nd и Rb-Sr изохроны определили для пород массива близкие возрасты: 2607 ± 180 и 2587 ± 160 млн лет (рис. 1, табл. 1), что несколько древнее U-Pb возраста пород, полученного по циркону и бадделеиту ($2498-2496$ млн лет), но в пределах ошибки согласуется с ним.

Таблица 1. Sm-Nd и Rb-Sr данные для пород массива Ярва-Варака
Table 1. Sm-Nd and Rb-Sr data for rocks of the Jarva-Varaka massif

Номер пробы	Порода	Sm, ppm	Nd, ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($\pm 2\sigma$)	$\epsilon\text{Nd}(T)$	T_{CHUR}	T_{DM}
1/114a	мафитовый норит	4.330	21.667	0.120787	0.511376 ± 10	-0.2	2525	2897
12/113	мафитовый норит	4.477	23.313	0.116077	0.511306 ± 10	-0.1	2509	2866
12/213	мафитовый норит	4.454	23.584	0.114164	0.511264 ± 18	-0.3	2528	2875
13/113	мафитовый норит	3.087	16.235	0.114938	0.511237 ± 21	-1.0	2601	2938
4/118	фельзитовый норит	2.943	16.077	0.110655	0.511269 ± 17	1.0	2416	2770
25/113	фельзитовый норит	3.128	16.926	0.111710	0.511226 ± 15	-0.2	2522	2862
26/113	фельзитовый норит	2.793	15.043	0.112243	0.511245 ± 13	0.0	2504	2849
27/113	фельзитовый норит	3.537	18.794	0.113766	0.511281 ± 26	0.2	2485	2838
15/113	пиж.-авгитовый диорит	7.539	39.251	0.116093	0.511289 ± 11	-0.4	2541	2892
11/118	пиж.-авгитовый диорит	7.681	40.928	0.113439	0.511254 ± 15	-0.2	2524	2869
21/113	гиперстеновый диорит	8.881	48.281	0.111185	0.511201 ± 09	-0.5	2551	2884
28/113	гиперстеновый диорит	5.270	28.159	0.113130	0.511230 ± 08	-0.6	2558	2896
19/113	кварцевый диорит	9.557	50.071	0.115370	0.511281 ± 13	-0.3	2533	2884
22/113	кварцевый диорит	7.847	42.163	0.112499	0.511096 ± 17	-3.0	2778	3077

		Rb, ppm	Sr, ppm	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma\%$	$\epsilon\text{Sr}(T)$	$\text{ISr}(T)$
1/114	мафитовый норит	18.59	259.4	0.202181	0.711116 ± 22	34.3	0.70385
1/114a	мафитовый норит	18.68	236.3	0.223066	0.711147 ± 21	28.0	0.70341
12/113	мафитовый норит	21.24	235.7	0.254249	0.711187 ± 19	17.6	0.70268
3/213	фельзитовый норит	22.33	289.3	0.222401	0.711073 ± 18	17.8	0.70269
25/113	фельзитовый норит	20.49	268.7	0.215149	0.70967 ± 20	6.4	0.70190
27/113	фельзитовый норит	29.37	285.4	0.290355	0.71303 ± 18	15.5	0.70254
15/113	пижонит-авгит. диорит	38.83	194.3	0.563844	0.72136 ± 17	-6.6	0.70098
21/113	гиперстеновый диорит	53.56	215.4	0.701551	0.72762 ± 15	11.7	0.70227
28/113	гиперстеновый диорит	37.82	249.3	0.427951	0.71955 ± 19	37.6	0.70408
19/113	кварцевый диорит	51.43	192.9	0.752305	0.73192 ± 14	46.9	0.70473
22/113	кварцевый диорит	71.72	237.4	0.852362	0.73516 ± 18	41.5	0.70436

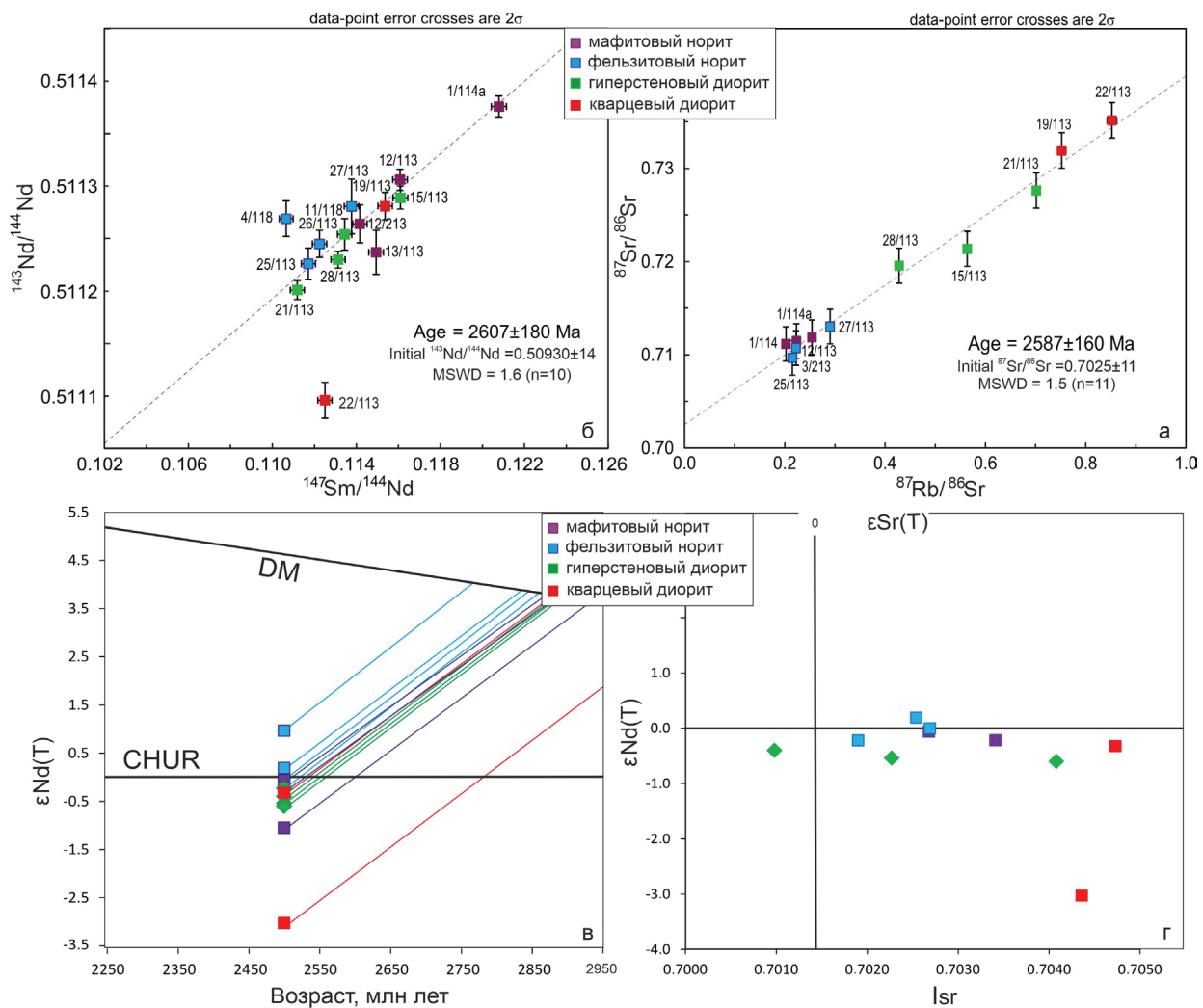


Рис. 1. Sm-Nd и Rb-Sr данные для пород массива Ярва-Варака: а – Sm-Nd изохрона для всех разновидностей пород массива; б – Rb-Sr изохрона; в – диаграмма ϵNd – возраст; г – соотношение изотопного состава Nd и Sr в породах массива

Fig. 1. Sm-Nd and Rb-Sr data for the rocks of the Jarva-Varaka massif: а – Sm-Nd isochron for all rock varieties; б – Rb-Sr isochron; в – diagram ϵNd – age; г – ratio of isotopic composition of Nd and Sr in the massif rocks

Растяжка точек на изохронах связана с фракционной кристаллизацией магмы, в ходе которой Nd и Rb концентрируются в остаточных расплавах относительно Sm и Sr, и более поздние дифференциаты – гиперстеновые и кварцевые диориты – имеют меньшие Sm/Nd и большие Rb/Sr отношения, чем мафитовые и фельзитовые нориты. Эти изменения не так очевидны на Sm-Nd диаграмме, где большинство точек образует облако в узких пределах $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ отношений (рис. 1 а), зато хорошо видны на Rb-Sr изохроне, где отношения $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ меняются в более широком диапазоне (рис. 1 б).

Значения ϵNd для всех разновидностей пород находятся в пределах -1 – $+1$, кроме одного значения кварцевого диорита с $\epsilon\text{Nd} = -3$. То есть, родоначальный для пород Ярва-Вараки расплав имел изотопные характеристики Nd, близкие к хондритовому резервуару (рис. 1 в) и отделился от этого резервуара, судя по модельным возрастам, близко ко времени своей кристаллизации в 2.51–2.60 млрд лет (табл. 1). Считается, что образование расслоенных интрузий Фенноскандинавского щита связано с поднятием мантийных плюмов (Amelin et al., 1996; Puchtel et al., 1997; Hanski et al., 2001). Исследования изотопного состава Os в породах Мончеплутона показало, что его образование продуцировано мантийным плюмом с хондритовыми параметрами Re-Os системы (Yang et al., 2016). Значения I_{Sr} находятся в пределах 0.701–0.705 (рис. 1 г, табл. 1).

Таким образом, Sm-Nd и Rb-Sr изотопные системы на первый взгляд не показывают заметной коровой контаминации расплава при формировании пород массива Ярва-Варака, тогда как

для норита Садбери первичное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ равно 0.7071 ± 0.0005 (Hurst, Farhat, 1977) при ϵNd в пределах $-6 \div -9$ (Налдретт, 2003). Как уже отмечалось, породы магматического комплекса Садбери (1.85 млрд лет) образовались полностью из корового материала от ультрамафит-мафитового до кислого состава, переплавленного в результате падения метеорита. В случае Ярва-Вараки падение метеорита возможно не привело, а совпало по времени с формированием массива, то есть метеорит попал в кристаллизующуюся близко к поверхности магматическую камеру, что согласуется с изометричной формой массива Ярва-Варака. Также надо иметь в виду разный возраст массивов. В 2.5 млрд лет гнейсы кольской серии (породы мишени) согласно данным (Мыскова, Милькевич, 2016) имели $\epsilon\text{Nd} = -2.4$, поэтому добавка материала коры существенно не изменила Sm-Nd систему расплава.

Тем не менее, мы также предположили возможность образования гранофира в результате фракционной кристаллизации родоначальной магмы массива, без привлечения вещества вмещающих пород. Рассматривается модель, в которой на момент удара метеорита породы интрузии «базитового» состава частично находились в полураскристаллизованном состоянии, а дифференцированный кислый расплав (имеющий низкую температуру эвтектики) находился в жидком состоянии в какой-то части магматической камеры. Удар метеорита спровоцировал перемешивание полураскристаллизованной и жидкой магмы. Такое перемешивание могло быть вплоть до движения кислого расплава в нижележащие кумулятивные горизонты. Этот процесс привел к формированию гибридных пород массива.

Для проверки данной модели был рассчитаны:

- возможные химические составы гранофира во всех породах массива, основываясь на его минеральном составе и химическом составе слагающих его минералов;
- произведено вычитание полученных составов гранофира из всех составов пород в пропорциях, в которых гранофир присутствует в этих породах и получены «остаточные» составы.

На бинарных графиках «MgO-оксид» (рис. 2) видно, что получившиеся «остаточные» составы пород, как и следовало ожидать, оказались обеднены SiO_2 , K_2O и несколько обогащены Al_2O_3 , Na_2O и CaO . Это связано с преобладанием калиевого полевого шпата над плагиоклазом в гранофире. На получившиеся графики мы также нанесли рассчитанные составы гранофира (треугольники).

Следующим этапом работы была проверка модели фракционной кристаллизации на основе программных комплексов MAgEMin и MSC, чтобы выявить порядок кристаллизации минералов из расплава при различных P-T-X параметрах.

Для расчета фракционной кристаллизации в качестве исходного расплава был взят средний состав мафитовых норитов – самых примитивных пород массива (составы пород по Nergovich et al., 2023). Для оценки этого среднего состава использовались анализы пород, с вычтенным составом гранофира.

Были заданы следующие начальные параметры: давление 4 кбар, содержание воды в расплаве 0.1 вес. %, кислородный буфер QFM.

Давление было подобрано таким образом, чтобы в кислом остатке было преобладание кварца над полевыми шпатами, что и наблюдается в реальном гранофире. Стоит отметить, что в широком диапазоне давлений (до 9 кбар) последовательность кристаллизующихся минералов и их составы практически не изменяются, что делает выбор конкретного давления для расчета не таким важным.

Низкое содержание воды в расплаве было взято для того, чтобы в кислом остатке главным калиевым минералом был калиевый полевой шпат, а не биотит.

Кислородный буфер QFM был подобран, исходя из того, что большинство коровых пород образуются при данных условиях, а последовательность минералов и их пропорции, полученные при расчете с данным буфером, не противоречат реально наблюдаемым.

Результаты моделирования показаны на рис. 2 и 3. На графиках «MgO-оксид» (рис. 2) видно, что модельные траектории изменения состава остаточного расплава очень хорошо совпадают с облаками точек реальных пород массива с вычтенным гранофиром (за исключением FeO_t). Однако, при этом фигуративные точки составов гранофира также хорошо ложатся на модельные

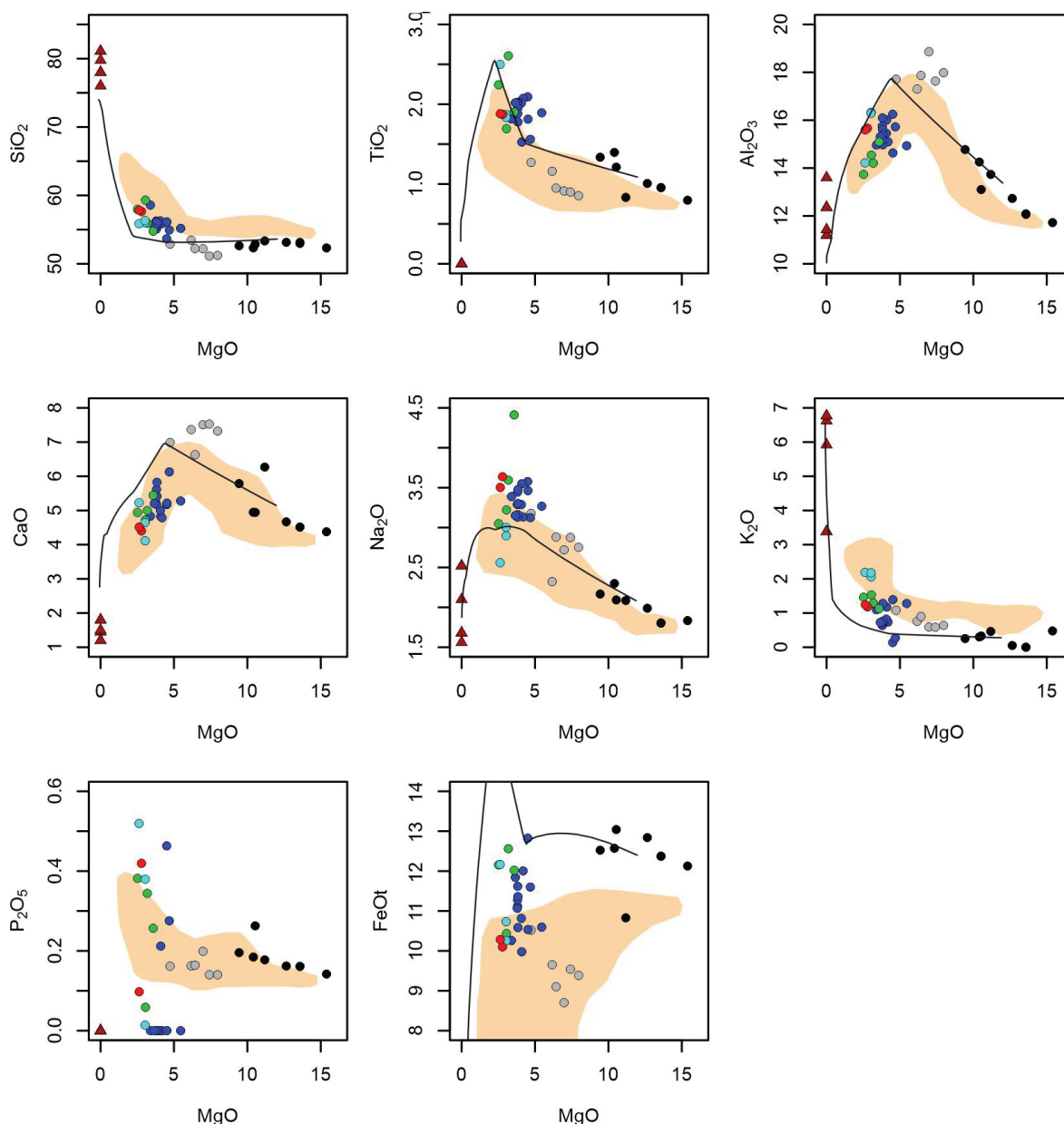


Рис. 2. Диаграммы MgO-оксид для пород массива Ярва-варака. Оранжевым полем обозначена область составов реальных пород массива, кругами – составы пород с вычтенным составом гранофира, треугольниками – составы гранофира. Черной линией показаны траектории кристаллизации, полученные в ходе моделирования фракционной кристаллизации. Черные круги – мафитовые нориты, серые – фельзитовые нориты, синие – гиперстеновые диориты, зеленые – пижонит-авгитовые диориты, голубые – кварцевые диориты, красные – гранодиориты

Fig. 2. MgO-oxide diagrams for rocks of the Jarva-Varaka massif. The orange field denotes the area of the real massif rock compositions, circles denote rock compositions with the granophyre composition subtracted, triangles denote granophyre compositions. The black line shows crystallization trajectories obtained during the modeling of fractional crystallization. Black circles are mafic norites, gray circles are felsic norites, blue circles are hypersthene diorites, green circles are pigeonite-augite diorites, light blue circles are quartz diorites, and red circles are granodiorites

кривые, причем как для случаев, когда составы располагаются на продолжении трендов составов пород массива (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , K_2O), так и когда содержание компонентов (TiO_2 , Na_2O) в гранофиге оказывается заметно меньшим, чем в породах массива.

На рис. 3 показано изменение модального состава кумулусных фаз от температуры, полученное в ходе моделирования. Наблюдается хорошая сходимость результатов моделирования с фактическими данными о минеральном составе пород массива, однако есть

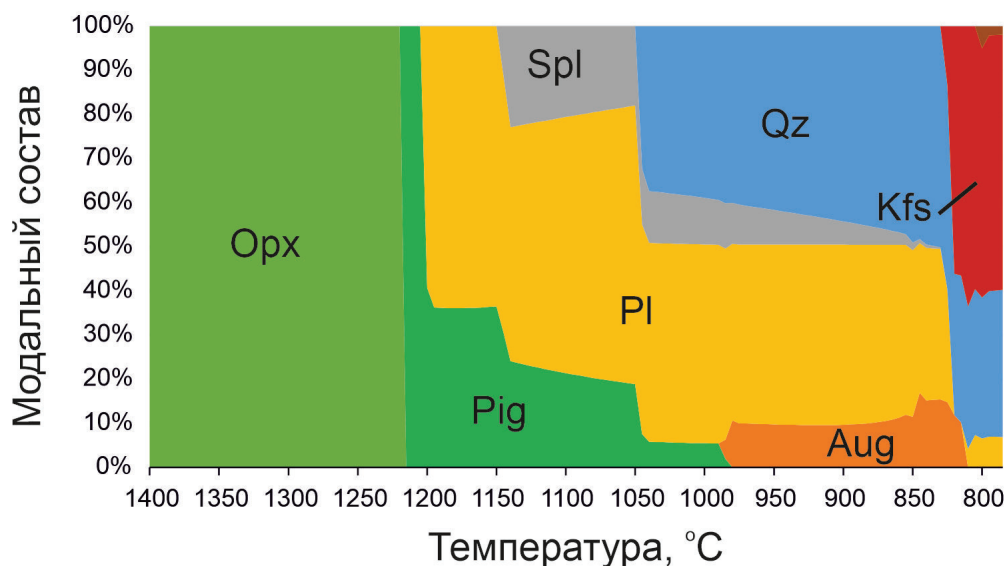


Рис. 3. Порядок и пропорции появления минералов при фракционной кристаллизации пород массива Ярва-Варака

Fig. 3. The order and proportions of minerals during fractional crystallization of the Jarva-Varaka massif rocks

и некоторые расхождения. Так, на самом раннем этапе кристаллизации образуется только ортопироксен, тогда как в самом массиве разрез начинается с мафитовых норитов, то есть с ассоциации «ортопироксен + плагиоклаз». Однако можно предположить, что ортопироксениты могли бы наблюдаться в основании разреза массива, не вскрытого бурением. Далее в ходе кристаллизации моделируется пижонит, в то время как в реальных породах на этом этапе кристаллизации (до появления плагиоклаза и совместно с ним) кристаллизуется ортопироксен. Однако, содержание Са в пижоните, полученном в ходе моделирования, не превышает 0.11 а.ф.е., что составляет около 6 % Wo. Таким образом, это существенно низко-Са пироксен, а его принадлежность к пижониту, а не к ортопироксену, можно объяснить неточностью моделирования. На поздних этапах кристаллизации моделируются авгит и кварц, что не противоречит фактическим наблюдениям. На заключительных этапах кристаллизации темноцветные минералы исчезают и начинается кристаллизация существенных объемов калиевого полевого шпата. Итоговая ассоциация «кварц + калиевый полевой шпат + плагиоклаз» соответствует минеральной ассоциации гранофира.

Заключение

Таким образом, изотопные системы показали, что родоначальный для пород массива Ярва-Варака расплав имел изотопные характеристики Nd, близкие к хондритовому резервуару и отделился от этого резервуара близко ко времени своей кристаллизации 2.51–2.60 млрд лет назад. Значения ϵNd для всех разновидностей пород в пределах -1 – +1 и ISr от 0.701 до 0.705 не противоречат коровой контаминации расплава при формировании пород массива Ярва-Варака, поскольку вмещающие гнейсы кольской серии (породы мишени) в 2.5 млрд лет имели значения $\epsilon\text{Nd} = -2.4$, что не могло существенно изменить Sm-Nd систему расплава.

В ходе термодинамического моделирования выявлена принципиальная возможность образования гранофира за счет фракционной кристаллизации пород массива без участия контаминации. Точки фигуративных составов гранофира закономерно продолжают тренды кристаллизации пород массива, при этом модальный состав полученного кислого остатка отвечает составу гранофира. Моделирование кристаллизации пород массива показало, что мафитовые нориты и прочие породы массива Ярва-Варака могут быть объединены об-

щим трендом кристаллизации, то есть они могли быть сформированы в результате кристаллизации единой магмы, а не двух, как это предполагалось ранее (Nerovich et al., 2023).

У рассмотренной модели есть и свои слабые стороны. Во-первых, объем кислого остатка с момента появления калиевого полевого шпата, составляет всего 3 % тогда как среднее содержание гранофира в массиве составляет около 20 %. Если считать объем кислого остатка по появлению значительного количества кварца, то его объем будет больше – около 16 %, однако в таком случае в гранофире было бы заметно меньшее содержание калиевого полевого шпата.

Во-вторых, не ясен механизм проникновения кислого остатка в интеркумулусное пространство. Между кристаллами кумулуса в момент падения метеорита должен был находиться родной интеркумулусный расплав, более основной, чем кислый остаток. Чтобы обеспечить замещение, нужно допустить проникновение более легкой и вязкой кислой жидкости на место более тяжелого и текучего основного расплава, что, возможно, могло бы быть осуществлено только в результате колоссального давления. К тому же, не ясно поведение раннего интеркумулусного расплава – смешался ли он с кислым или просочился во вмещающие породы?

В-третьих, если на момент воздействия метеорита породы массива находились в полужакристаллизованном состоянии, то почему при ударе сохранилась расслоенность?

В заключение надо добавить, что, если рассмотреть модель образования гранофирового расплава за счет ассимиляции пород массива веществом расплавленных пород рамы, при этом образование этого расплава связывать с метеоритом, то необходимо по меньшей мере 20 % подобного расплава для образования пород (если предположить, что кислый расплав сформировал только гранофир и не принимал участие в формировании минералов кумулуса).

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания ГИ КНЦ РАН по теме НИР FMEZ-2024-0006.

Литература

1. Баянова Т. Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб. Изд-во: Наука, 2004. 174 с.
2. Мыскова Т. А., Милькевич Р. И. Глиноземистые гнейсы кольской серии Балтийского щита (геохимия, первичная природа и возраст протолита) // Труды КарНЦ РАН. Серия: Геология докембрия. 2016. № 10. С. 1–29.
3. Налдретт А. Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб. Изд-во: СПбГУ, 2003. 487 с.
4. Нерович Л. И., Баянова Т. Б., Кунакузин Е. Л., Елизаров Д. В., Базай А. В. К проблеме генезиса массива Ярва-варака (Мончегорский рудный район) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 413–417.
5. Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение / Ред. Ф. П. Митрофанов, В. Ф. Смолькин). В 2-х частях. Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН, 2004. 177 с.
6. Amelin Y. V., Semenov V. S. Nd and Sr isotopic geochemistry of mafic layered intrusions in the eastern Baltic Shield: implications for the evolution of Paleoproterozoic continental mafic magmas // Contrib Mineral Petrol. 1996. V. 124. P. 255–272.
7. Asimow P. D., Ghiorso M. S. Algorithmic Modifications Extending MELTS to Calculate Subsolvus Phase Relations // American Mineralogist. 1998. V. 83. P. 1127–1131.
8. Bohron W. A., Spera F. J., Ghiorso M. S., Brown G. A., Creamer J. B., Mayfield A. Thermodynamic model for energy-constrained open-system evolution of crustal magma bodies undergoing simultaneous recharge, assimilation and crystallization: the magma chamber simulator // Journal of Petrology. 2014. V. 55. P. 1685–1717. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu036>.
9. Chai G., Eckstrand R. Rare-earth element characteristics and origin of the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada // Chemical Geology. 1994. V. 113. P. 221–244.

10. French B. M., Koeberl C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why // *Earth-Science Reviews*. 2010. V. 98. P. 123–170. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.009>.
11. Ghiorso M. S., Sack R. O. Chemical Mass Transfer in Magmatic Processes. IV. A Revised and Internally Consistent Thermodynamic Model for the Interpolation and Extrapolation of Liquid-Solid Equilibria in Magmatic Systems at Elevated Temperatures and Pressures // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1995. V. 119. P. 197–212.
12. Green E. C. R., Holland T. J. B., Powell R., Weller O. M., Riel N. Corrigendum to: Melting of Peridotites through to Granites: a Simple Thermodynamic Model in the System KNCFMASHTOCr, and, a Thermodynamic Model for the Subsolvus Evolution and Melting of Peridotite // *Journal of Petrology*. 2025. V. 66, Iss. 1. <https://doi.org/10.1093/petrology/egae079>.
13. Hanski E., Walker R. J., Huhma H., Suominen I. The Os and Nd isotopic systematics of the c. 2.44 Ga Akanvaara and Koitelainen mafic layered intrusions in northern Finland // *Precam Research*. 2001. V. 109. P. 73–102. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00142-5](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00142-5).
14. Holland T. J. B., Green E. C. R., Powell R. Melting of Peridotites through to Granites: A Simple Thermodynamic Model in the System KNCFMASHTOCr // *Journal of Petrology*. 2018. No. 59. P. 881–900. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy048>.
15. Hurst R. W., Farhat J. Geochronological investigations of the Sudbury Nickel Irruptive and the Superior Province granites north of Sudbury // *Geochim Cosmochim Acta*. 1977. V. 41. P. 1803–1815.
16. Kaulina T. V., Nerovich L. I., Il'chenko V. L., Lialina L. M., Kunakkuzin E. L., Ganninbal M. A., Mudruk S. V., Elizarov D. V., Borisenko E. S. Astroblems in the early Earth history: Precambrian impact structures of the Kola-Karelian region (East Baltic shield) // *Geological and Geo-Environmental Processes on Earth. Springer Natural Hazards*. Springer, Singapore. 2021. P. 25–37. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4122-0_3.
17. Kaulina T. V., Shilovskikh V. V., Nerovich L. I., Savchenko E. E., Bocharov V., Lialina L., Il'chenko V. Microstructural Deformation and the Age of Monazite-(Ce) from Diatellite Granite in the Jarva-Varaka Structure (Kola Region, Russia) // *Minerals*. 2023. V. 13. P. 1325. <https://doi.org/10.3390/min13101325>.
18. Lightfoot P. C., Keys R. R., Doherty W. Chemical Evolution and Origin of Nickel Sulfide Mineralization in the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada // *Economic Geology*. 2001. V. 96. P. 1855–1875.
19. Nerovich L. I., Kaulina T. V., Bayanova T. B., Ilchenko V. L., Kunakkuzin E. L., Bazai A. V., Mudruk S. V., Borisenko E. S., Sosnovskaya M. F. Granophyre norites and diorites of the Jarva- Varaka massif (Monchegorsk ore area, Kola Region, Russia): geology, petrography, geochemistry, geochronology and origin // *Geochemistry International*. 2023. V. 61, No. 6. P. 572–592. <https://doi.org/10.1134/S0016702923060071>.
20. Puchtel I. S., Haase K. M., Hofmann A. W., Chauvel C., Kulikov V. S., Garbe-Schonberg C. D., Nemchin A. A. Petrology and geochemistry of crustally contaminated komatiitic basalts from the Vetreny Belt, southeastern Baltic Shield: evidence for an early Proterozoic mantle plume beneath rifted Archean continental lithosphere // *Geochim Cosmochim Acta*. 1997. V. 61. P. 1205–1222.
21. Riel N., Kaus B. J. P., Green E. C. R., Berlie N. MAGEMin, an Efficient Gibbs Energy Minimizer: Application to Igneous Systems // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2022. V. 23. Ed. 7. <https://doi.org/10.1029/2022GC010427>.
22. Yang S.-H., Hanski E., Li C., Maier W. D., Huhma H., Mokrushin A. V., Latypov R., Lahaye Y., O'Brien H., Qu W.-J. Mantle source of the 2.44–2.50-Ga mantle plume-related magmatism in the Fennoscandian Shield: evidence from Os, Nd, and Sr isotope compositions of the Monchepluton and Kemi intrusions // *Mineralium Deposita*. 2016. V. 51. P. 1055–1073. <https://doi.org/10.1007/s00126-016-0673-9>.