

Ферропикритовая вулcano-плутоническая ассоциация палеопротерозоя (Печенга, Кольский регион)

Смолякин В. Ф. ¹, Мокрушин А. В. ²

¹ Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва, v.smolkin@sgm.ru

² Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, a.mokrushin@ksc.ru

Аннотация. Открытые в начале прошлого века месторождения сульфидных Cu-Ni руд на северо-западе Мурманской области в настоящее время обеспечивают около 8–10 % добычи никеля в России. Рудные тела приурочены к малоглубинным дифференцированным массивам печенгского никеленосного комплекса. Интрузии, первоначально имеющие габбро-верлитовый состав, долгое время относились либо к офиолитовому комплексу, либо к дифференциатам базальтовой магмы, представленной в районе обширными полями шаровых лав, силлов офитовых габбро и туфов. В 1970-е годы были обнаружены ультраосновные вулканиты ферропикритового состава, которые перемежаются в разрезе с лавами и туфами базальтов. На основе результатов комплексных (петрологических, геохимических, изотопных и экспериментальных) исследований доказана генетическая связь ферропикритов и рудоносных габбро-верлитовых интрузий, установлен изотопный возраст их формирования, условия генерации и геодинамические условия внедрения материнской магмы.

Ключевые слова: Кольский регион, палеопротерозой, Печенгское рудное поле, габбро-верлиты, ферропикриты, месторождения сульфидных Cu-Ni руд.

The ferropicrite volcano-plutonic association of the Paleoproterozoic (Pechenga, Kola region)

Smolkin V. F. ¹, Mokrushin A. V. ²

¹ Vernadsky State Geological Museum of Russian Academy of Sciences, Moscow, v.smolkin@sgm.ru

² Geological Institute KSC RAS, Apatity, a.mokrushin@ksc.ru

Abstract. Cu-Ni sulfide ore deposits discovered at the beginning of the last century in the northwest of the Murmansk Region currently account for about 8–10 % of nickel production in Russia. The ore bodies are confined to shallow-depth differentiated massifs of the Pechenga nickeliferous complex. The intrusions, originally having gabbro-wehrlite composition, were for a long time attributed either to ophiolite complexes or to basaltic magma differentiates, represented in the area by extensive fields of pillow lavas, ophitic gabbro sills and tuffs. In the 1970 s, ultramafic volcanics of ferropicritic composition were discovered, being interspersed in the section with lavas and tuffs of basalts. Based on the results of complex (petrological, geochemical, isotopic and experimental) studies, the genetic relationship between ferropicrites and ore-bearing gabbro-wherlite intrusions was proved, the isotopic age of their formation, generation conditions and geodynamic conditions of the parent magma ascent were established.

Keywords: Kola region, Paleoproterozoic, Pechenga ore field, gabbro-wherlite, ferropicrites, sulphide Cu-Ni ore deposits.

Введение

В пределах центральной части Печенгской структуры, расположенной на северо-западе Мурманской области, залегают многочисленные массивы серпентинитов и метагаббро, часть из которых включает в себя месторождения и рудопроявления сульфидных Cu-Ni руд (Медно-никелевые..., 1999). Вмещающими породами являются сульфидно-углеродистые сланцы ждановской свиты, которые подстилаются и перекрываются толщами массивных и шаровых лав толеитовых базальтов и их туфами соответственно заполярнинской и матертской свит, сцементированных силлами офитовых габбро (Загородный и др., 1964; Магматизм, 1995; Ранний докембрий, 2005).

Печенгская структура, совместно с более крупной Имандра-Варзугской, составляет единый протяженный (более 600 км) Печенгско-Варзугский пояс, представляющий собою крупную внутриконтинентальную палеорифтогенную систему, развивающуюся в течение палеопротерозоя (2.5–1.9 млрд лет) (Смолякин, 1997). Заложенная на гетерогенном архейском сиалическом фун-

даменте, система эволюционировала от протяженного вулканогенного пояса до глубоководного морского бассейна линейного типа с образованием турбидитов, и далее до орогенной области с формированием гранитных куполов (1.94 млрд лет) и зон интенсивной складчатости в пределах Южно-Печенгской структуры (Кольская сверхглубокая, 1998). Внедрение интрузий произошло на этапе максимального раздвига Печенгской структуры (1.98–1.96 млрд лет). Значительную роль в их пространственном размещении сыграли два фактора – формирование двух мощных толщ вулканитов базальтового состава, разделенных туфогенно-осадочной толщей, и размещение в последней многочисленных, относительно однородных силлов офитовых габбро, которые занимают до 25 % от ее площади.

Массивы Печенгского интрузивного комплекса разделяются по геологическому положению, составу и строению на условно на четыре группы (рис. 1). Первая представлена маломощными телами трещинного типа (Пахтаярви, Соукерйоики и др.), которые прорывают нижележащие вулканиты толеит-базальтового состава запольярнинской свиты и сложены серпентинитами и метапироксенитами. Вторая группа объединяет многочисленные рудоносные маломощные массивы серпентинитов с незначительной ролью метагаббро, залегающих в пределах Западного рудного узла Печенгского рудного поля (Каула, Котсельваара, Ортоайви). К третьей группе отнесены дифференцированные массивы Восточного рудного узла, наиболее крупной из которых является интрузия Пильгуярви, вмещающая Ждановское месторождение. К четвертой группе отнесены безрудные маломощные тела перидотитов и габбро, залегающие в пределах Юго-Восточного фланга (от руч. Луотни и Ламмас до г. Кучин-тундра) (рис. 1). Помимо этого, были исследованы маломощные массивы

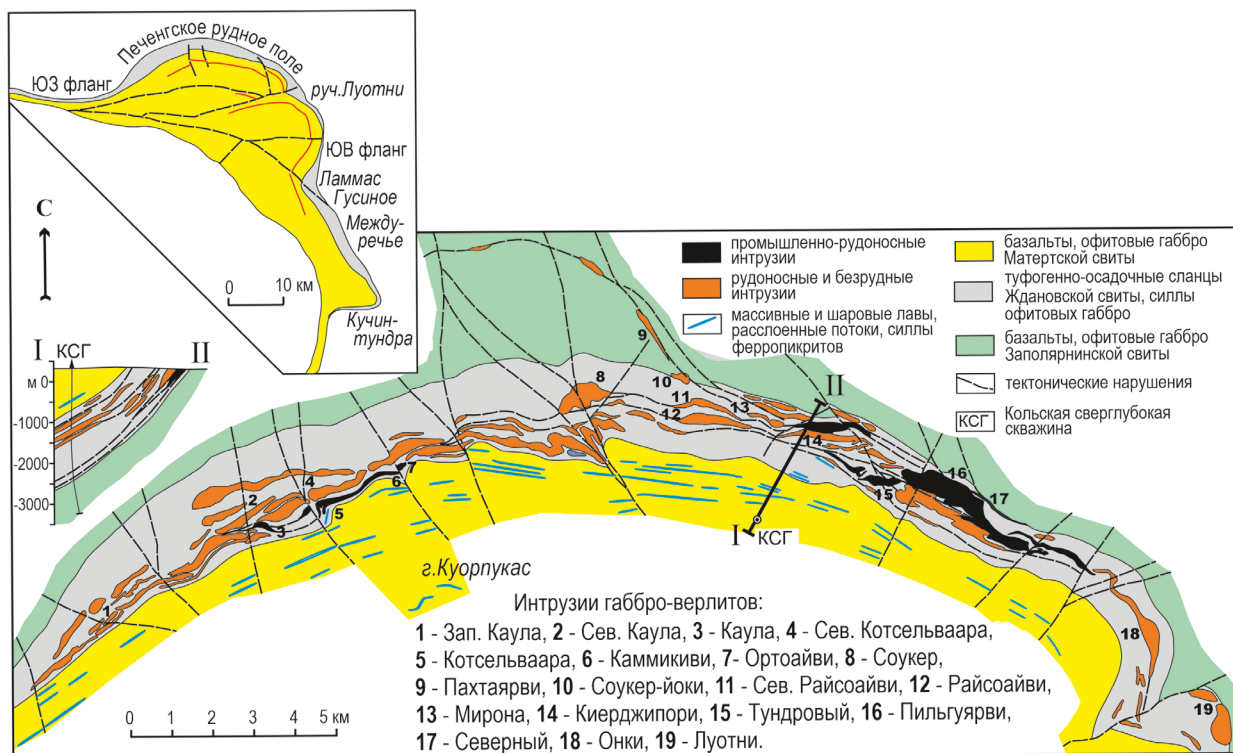


Рис. 1. Схема расположения рудных и безрудных интрузий габбро-верлитов и ферропикритовых вулканитов в центральной части Северо-Печенгской зоны с вертикальным разрезом по Кольской сверхглубокой скважине СГ-3 (КСГ) по данным (Медно-никелевые..., 1999) с авторскими дополнениями и изменениями. На вставке приведена схема расположения изученных объектов; красной линией обозначен маркирующий горизонт высококремнистых пород.

Fig. 1. The scheme of ore and oreless intrusions of gabbro-wherlites and ferropicrite volcanites in the central part of the North Pechenga zone with a vertical section of the Kola Superdeep Borehole SG-3 according to data (Copper-nickel..., 1999) with author's additions and changes. The box shows the layout of the studied objects. The red line marks the marking horizon of highly siliceous rocks.

вы серпентинитов на юго-западном фланге и вблизи государственной границы с Норвегией (западнее г. Каула).

В вертикальном разрезе дифференцированной интрузии Пильгуярви (Смолькин, 1977) были выделены (снизу вверх): I. Нижняя зона закалки клинопироксенитов; II. Зона перидотитов (верлитов) с сульфидными Cu-Ni рудами; III. Промежуточный горизонт оливиновых клинопироксенитов, титаномagnetитовых перидотитов и плагиоклинопироксенитов с гнездами габбро-пегматитов; IV. Габбро-пироксенитовая зона; V. Габбровая зона; VI. Зона крупнозернистых и ортоклазовых габбро; VII. Верхняя приконтактная зона клинопироксенитов и диоритов. Габбро прорваны маломощными дайками долеритов. В пределах Западного рудного узла были обнаружены дорудные и пострудные дайки ферропикритов.

На ранних этапах изучения рудоносных интрузий предполагалось, что они представляют собою дифференциаты основной магмы, т.е. являются родственными толеитовым базальтам и офитовым габбро. Однако в 1970-х годах прошлого века были обнаружены вулканиты пикритового состава в пределах ждановской и матертской свит (Загородный, Мирская, 1967; Предовский и др., 1974). Вулканиты представлены массивными и шаровыми лавами, расслоенными потоками, горизонтами туфов и лавобрекчий, и маломощными силлами. По данным Ж. А. Федотова (1985) доля пикритовых вулканитов составляет до 9 % от площади залегания пород матертской свиты. С учетом anomalously повышенного содержания железа ($\text{FeO}_{\text{tot}} = 15\text{--}18 \text{ мас. \%}$), они были отнесены к ферропикритам (Hanski, Smolkin, 1989; Смолькин, 1992; Hanski, 1992). Судя по соотношению лавовых потоков и туфов, извержения магмы на дно морского бассейна происходили на разных глубинах. Наименьшая глубина была в районе руч. Ламмас, где преобладают пепловые туфы. В Западном и Восточном рудных узлах предполагаются два эруптивных центра ферропикритового вулканизма, названных Каульским и Пильгуярвинским (Скуфьин, Федотов, 1989).

На основе результатов минералогических, геохимических и изотопных исследований была обоснована комагматичность интрузий и ферропикритовых вулканитов (Смолькин, 1992; Hanski, Smolkin, 1989, 1995; Brugmann et al., 2000; Walker et al., 2000). Сходными геохимическими и изотопными характеристиками обладают также маломощные дайки ферропикритов, секущие рудоносные интрузии и серия субпараллельных даек Нясюкского роя, залегающие на площади северного обрамления Печенгской структуры (Smolkin et al., 2015). В центральной части Нясюкского роя залегает крупная дайка керсутитовых перидотитов протяженностью 26 км и мощностью от 40 до 120 м, в обрамлении – более мелкие дайки оливиновых габбро, а также штокообразное тело пироксенитов. Их раздельное залегание свидетельствует о предварительной дифференциации ферропикритовой магмы в промежуточном очаге. В пределах архейского фундамента, вскрытого Кольской сверхглубокой скважиной, залегают также высокомагнезиальные амфиболиты (Кольская сверхглубокая, 1998), которые близки по геохимическим особенностям к ферропикритам и, по-видимому, представляли собою магмоподводящие каналы. Ферропикриты хорошо отличаются по своим геохимическим и изотопно-геохимическим свойствам от одновозрастных толеитовых базальтов и офитовых габбро. Признаки смешения ферропикритовых и базальтовых магм не установлены. Полученные данные позволили объединить рудоносные интрузии габбро-верлитов, ферропикритовые вулканиты и дайки в единую вулcano-плутоническую ассоциацию (комплекс), сформированный в результате внедрения и дифференциации мантийной рудоносной магмы ферропикритового состава (Смолькин, 1992).

Изотопный возраст формирования данной вулcano-плутонической ассоциации установлен на основании изучения U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr и Re-Os изотопных систем (Табл.). Возраст формирования интрузии Пильгуярви по данным U-Pb (TIMS) и U-Th-Pb (SIMS) анализов находится в пределах 1987–1980 млн лет. Завершает ферропикритовый магматизм Нясюкский рой даек с U-Pb возрастом циркона 1941 ± 3 млн лет, внедрение которых произошло в пределы архейского фундамента, уже после закрытия Печенгского бассейна.

Таблица. Изотопный возраст пород вулcano-плутонической ферропикритовой ассоциации
Table. Isotopic age of rocks of the volcano-plutonic ferropicrite association

Объекты	Pb-Pb	U-Pb TIMS	U-Th-Pb SIMS	Sm-Nd	Re-Os	Rb-Sr
Интрузии	1970 ± 70 ¹					
Интрузия Пильгуярви		1980 ± 10 ^{6**} 1987 ± 5 ⁶	1985 ± 10 ^{8*}	1965 ± 87 ⁹ $\epsilon_{Nd} = 2.9 \pm 0.9$		1980 ± 70 ³ $^{87}Sr/^{86}Sr =$ 0.7029 ± 0.004
Ферропикриты	1990 ± 65 ¹			1990 ± 40 ² $\epsilon_{Nd} = 1.5 \pm 0.4$	1970 ± 45 ⁵ $^{187}Os/^{186}Os =$ 0.935 ± 0.031	
Дайки Нясюкки		1941 ± 3 ^{6**}	1961 ± 24 ^{7*}	1956 ± 20 ⁴		

Примечание. **1980 ± 10** конкордантный возраст; * циркон, ** бадделейт. ¹⁻⁹ публикации:

¹ – Пушкарев и др., 1988; ² – Hanski et al., 1990, Смолькин, 1992; ³ – Смолькин, 1992;

⁴ – Smolkin et al., 2015; ⁵ – Walker et al., 1997; ⁶ – Смолькин и др., 2003;

⁷ – Smolkin et al., 2015; ⁸ – Смолькин и др., (2018; ⁹ – Серов и др., 2023.

Интрузии и вулканы изменены в условиях зеленосланцевой фации в пределах Печенгского рудного поля, и эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций в юго-восточной части Северо-Печенгской зоны (Ламмас – Кучин-тундра). Одновременно с метаморфизмом интрузии претерпели тектонические деформации взбросо-надвигового типа. В Центральном руднике, вскрывшем интрузию Пильгуярви, были обнаружены разнообразные по составу и разновозрастные жилы метаморфического генезиса: родингитовые, диопсид-антигоритовые, хлорит-антигоритовые и тальк-карбонатные.

Все фации ферропикритового магматизма объединяет сходство первично-минерального состава (оливин с 84–71 Fo %, титаноавгит, керсутит, Ti-биотит, титанохромит, титаномagnetит), геохимических особенностей пород (аномально высокая железистость; повышенное содержание TiO₂, P₂O₅ и ЛРЗЭ), и близость первичных отношений $\epsilon_{Nd} = 1.6 \pm 0.4$; $^{187}Os/^{186}Os = 0.935 \pm 0.031$; $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7029 \pm 0.004$ (Смолькин, 1992; Hanski, 1992). В интрузивных и вулканических породах были обнаружены фазы непрерывной серии хромит-ульвошпинель.

Кристаллизация в вулканических потоках, судя по составу породообразующих и рудных минералов, происходила в более восстановительных условиях, чем в интрузивных камерах. В расслоенных вулканических потоках хорошо проявлены процессы силикатной ликвации с образованием слоев пород с глобулярной текстурой (Смолькин, 1992).

Состав материнской магмы, рассчитанный на основе среднего состава пород зон закалок интрузий и средневзвешенного состава расслоенных вулканических потоков, отвечает ферропикриту с содержанием MgO в пределах 17.3–19.8 мас. % (Смолькин, 1992).

Формирование интрузий происходило многократно на фоне снижения вулканической активности. Установлено возрастание их рудного потенциала от первой группы ко второй и третьей. Для месторождения «Заполярное» (Северный массив) установлено непропорционально большая мощность рудного тела по отношению к вмещающим метаперидотитам, что может свидетельствовать о дополнительной инъекции сульфидного расплава. Значительную роль в сульфидном рудообразовании играли процессы контаминации ферропикритовых магм породами архейского фундамента и вмещающими породами, обогащенными сульфидно-углеродистым веществом, что подтверждено на основе изучения Re-Os изотопной системы (Walker et al., 1997).

Отделение сульфидного расплава происходило как в глубинных промежуточных очагах, так и в интрузивных камерах. При охлаждении и кристаллизации силикатных магм сульфидные расплавы выжимались в трещины, расположенные в пределах интрузий и во вмещающих породах (Медно-никелевые..., 1999). Помимо интрузий, сульфидные руды обнаружены в расслоенных силах. Сульфиды частично были переотложены в условиях наложенного зеленосланцевого метаморфизма с изменением состава фаз (обогащение пирротина кобальтом и др.) и частично замещены поздним магнетитом.

Методы

Содержания петрогенных компонентов определялись в химико-аналитической лаборатории Геологического института КНЦ РАН (г. Апатиты) с применением следующих методов: атомно-абсорбционный пламенный (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Mn), эмиссионный пламенный (Na, K), фотоколориметрический (Ti), весовой (п.п.п., H_2O) и объемный (CO_2 , FeO). Общее количество проб, используемых для геохимического анализа, 536, из них интрузивные породы – 400, ферропикритовые вулканиты – 126, дайки – 10. При построении графиков анализы пересчитывались на сухой остаток.

Содержания редкоземельных (РЗЭ), редких и рассеянных элементов были определены в двух аналитических лабораториях: ЦАЛ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) и Института геохимии Академии наук Китая (SKLOGD, г. Гуйян, Китай) соответственно 55 и 50 проб. В ЦАЛ ВСЕГЕИ анализы были выполнены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе «ELAN-6100 DRCe» с использованием компьютерной программы обработки данных «TOTALQUANT», включающей автоматический учет изотопных и молекулярных наложений на масс-спектральные аналитические линии определяемых элементов.

В SKLOGD анализы выполнялись с использованием квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Q-ICP-MS, производимого компанией Perkin Elmer. Относительное стандартное отклонение (RSD) для большинства элементов не превышает 10 %. Небольшое количество анализов пород (8 проб) были выполнены в ИГЕМ РАН (г. Москва). Определения содержаний оксидов петрогенных, а также редких и рассеянных элементов проводились методом XRF на приборе X-RAY SPECTROMETER PW 2400 фирмы PHILIPS. Содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) определялись методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Plasma Quad PQ2+Turbo фирмы VG Instruments.

Изучение геохимического состава глобулярных ферропикритов проводилось на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (фирмы Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (фирмы Oxford instruments) в Институте Геологии КарНЦ РАН (г. Петрозаводск).

Объекты исследований

Для изучения интрузивных пород были опробованы промышленно-рудноносные интрузии Западного (Каула, Котсельваара, Ортоайви) и Восточного (Тундровая, Пильгьярви) рудных узлов, а также интрузии с рудопроявлениями и безрудные в пределах Печенгского рудного поля (Западная и Северная Каула, Северная Котсельваара, Соукер, Пахтаярви, Райсоайви, Сев. Мирона, Верхний и Сев. Киердживори, Киердживори, Северный, Онки), а также на Юго-Западном (западнее г. Каула) и Юго-Восточном (руч. Луотни и Ламмас, оз. Гусиное, Междуречье) флангах (рис. 1).

Ферропикритовые вулканиты были исследованы в пределах площади развития пород ждановской (Каула-Котсельваара, Каммикиви, Верхний Киердживори) и матерской (Куорпукас, Двойная, Шулгьявр, Ламмас, Кучин-тундра) свит (рис. 1), а также в западной части Имандра-Варзугской структуры (Митриярви). Детальная информация о строении, составе и минералогии ферропикритов и рудных интрузий приведены в монографиях (Смолькин, 1992; Медно-никелевые..., 1999).

Результаты геохимического анализа

Вариации главных петрогенных компонентов относительно MgO для интрузивных пород показаны на рисунке 2, а для ферропикритов и даек на рисунке 3. Из анализа рисунка 2 следует, что наименьшей степенью дифференциации обладает массив I группы – Пахтаярви, аналитические точки которого группируются вблизи пород зон закалок. Поля составов рудных массивов Западного и Восточного рудных узлов и безрудных массивов Юго-Западного и Юго-Восточного флангов в значительной степени перекрываются, но в массивах обоих флангов отсутствуют перидотиты с содержанием MgO более 33 мас. %.

Отчетливо выделяются два тренда дифференциации: I – перидотит–оливиновый клинопироксенит, II – плагиоклинопироксенит–габбро. I тренд отражает уменьшение содержания MgO от 38

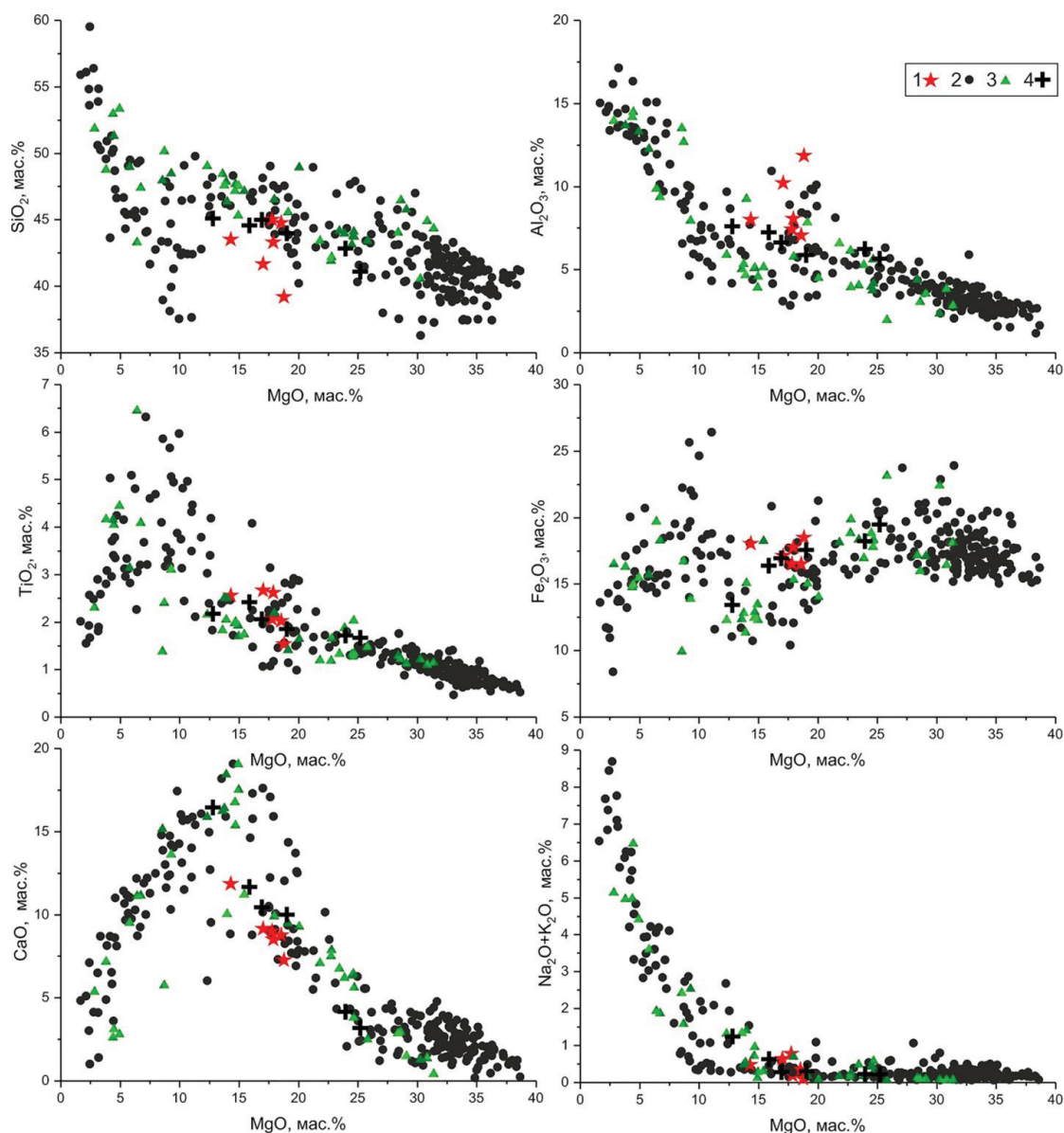


Рис. 2. Соотношение петрогенных компонентов относительно MgO в породах нижней зоны закалки (1), интрузивных породах Западного и Восточного рудных узлов (2), Юго-Западного и Юго-Восточного флангов (3), и Пахтарви (4).

Fig. 2 The ratio of petrogenic components relative to MgO in rocks of the lower chilled zone (1), intrusive rocks of the Western and Eastern ore nodes (2), Southwestern and Southeastern flanks (3), and Pakhtayarvi (4).

до 15 мас. % при постепенном увеличении содержания SiO_2 , Al_2O_3 и TiO_2 . Он связан с ранней кристаллизацией оливина и его аккумуляцией с последующим увеличением роли клинопироксена, представленного титаноавгитом. II тренд характеризуется уменьшением содержания CaO на фоне увеличения SiO_2 , щелочей ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) и TiO_2 . Начало этого тренда связано с совместной кристаллизацией клинопироксена и основного плагиоклаза, а на завершающей стадии к ним присоединяется ортоклаз, что фиксируется увеличением K_2O . В то же время интенсивное, аномальное падение содержания CaO обусловлено интенсивным замещением плагиоклаза метаморфическим парагенезисом альбит-хлоритового состава. В отношении общего железа в виде Fe_2O_3 наблюдается локальный пик резкого повышения его на уровне 8–10 % MgO. Судя по синхронному повышению TiO_2 , данный пик связан с увеличением содержания титаномagnetита в плагиопироксенитах. Аналогичные I и II тренды выделяются и для ферропикритов расслоенных потоков. При этом шаровые лавы и дайки характеризуются наименьшей степенью дифференциации.

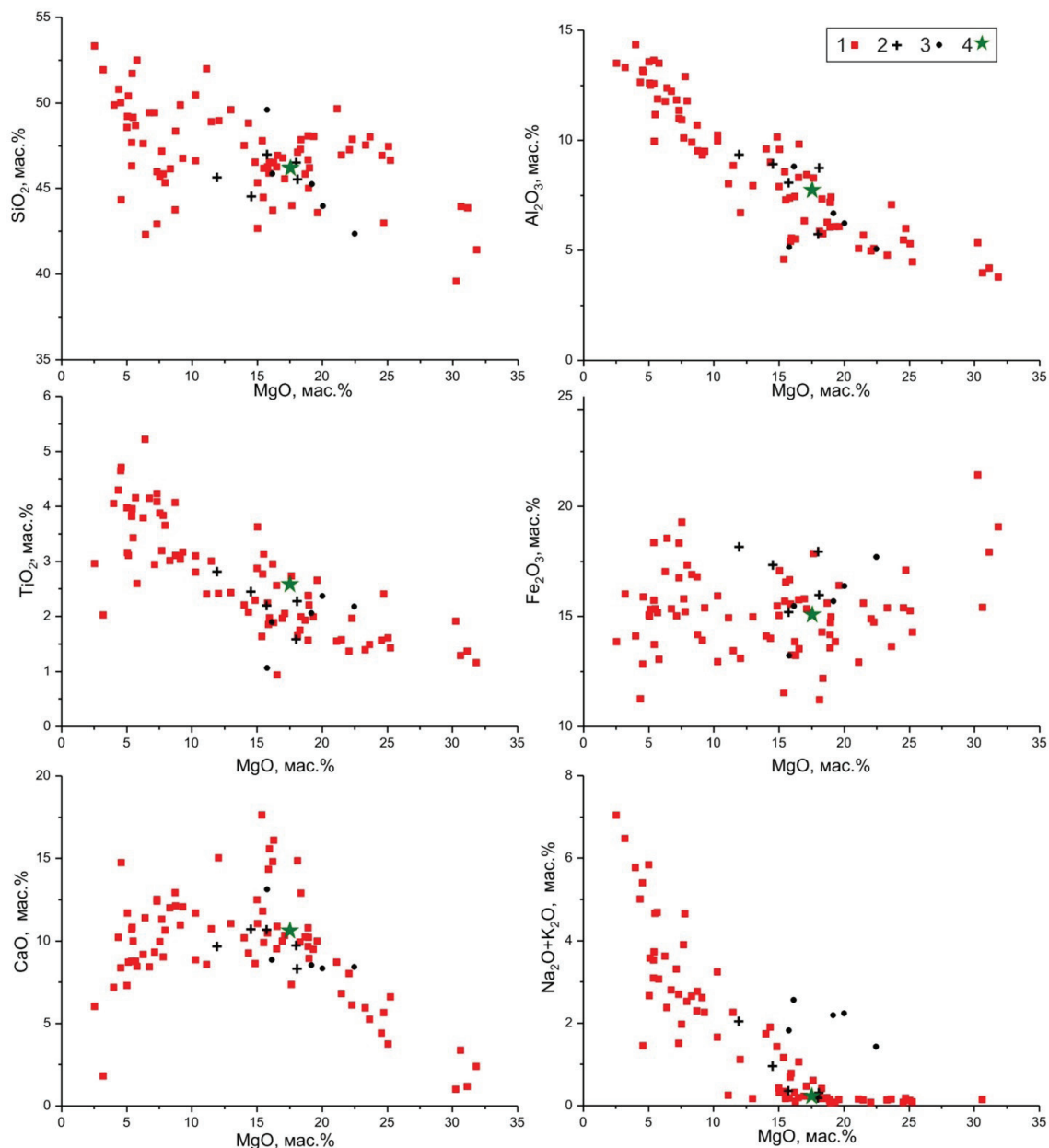


Рис. 3. Соотношение петрогенных компонентов относительно MgO в расслоенных потоках (1) и шаровых лавах (2) ферропикритов, дайках Нясюкского роя (3) и в зонах заделки расслоенных потоков, среднее (4).

Fig. 3. The ratio of petrogenic components relative to MgO in layered flows (1) and pillow lavas (2) of ferropicrites, dykes of the Nyasyukka swarm (3) and in the chilled zones of layered flows is average (4).

Для всех изученных пород установлен однотипный наклонный характер распределения спектров РЗЭ, нормированных к хондриту (рис. 4) и четкое увеличение ЛРЗЭ по сравнению с ТРЗЭ ($La_n/Lu_n = 8-10$), но с разной степенью дифференциации – наименьшей для дайковых пород, средней для ферропикритов и наибольшей для интрузивных пород. При этом спектры дайковых пород, ферропикритов и габбро в значительной степени перекрываются. Наибольшее содержание РЗЭ установлено в габбро, а наименьшее – в метапериодитах. Главным фактором дифференциации спектров является клинопироксен, который является сквозным минералом. Фракционирование плагиоклаза, судя по отсутствию положительной Eu аномалии, отсутствовало.

Характерным для исследованных пород, судя по спайдер-диаграммам, нормированных к деплетированной мантии (DM) (рис. 5), является обогащение литофильными (Rb, Ba) и высокочarged-

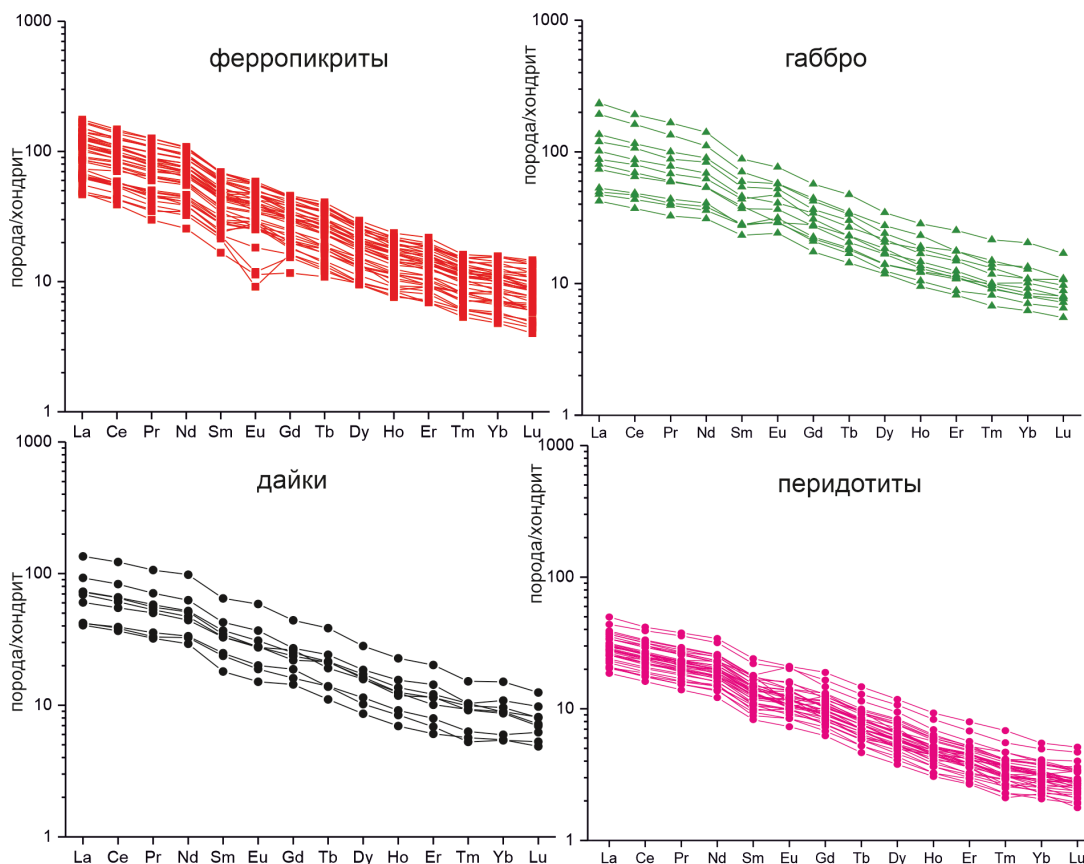


Рис. 4. Спектры распределения РЗЭ, нормированные к хондриту, в породах ферропикритовой ассоциации. Нормирование по (McDonough, Sun, 1995).

Fig. 4. Chondrite-normalized REE distribution spectra in the ferropicrite association rocks. Normalization values from (McDonough, Sun, 1995).

ными (Th, U) элементами. В тоже время для большей части ферропикритов и пироксенитов из разных частей разреза, включая зоны закалки, установлены отрицательные аномалии Rb, Ba и Sr в отличие от габбро и дайковых пород. Отрицательная аномалия Sr наблюдается также для перидотитов. Причиной этого явления является разрушение Ca-содержащих минеральных фаз и прежде всего плагиоклаза, и вынос Sr совместно с Ca из пород в условиях зеленосланцевого метаморфизма.

Распределение рудных элементов Cr и Ni относительно MgO носит четко выраженный линейный характер с высокой степенью корреляции при обогащении Cr и Ni метаперидотитов (рис. 6). На графике Ni – S перидотиты ($\text{MgO} > 25$ мас. %) характеризуются повышенным содержанием Ni, а габбро и ферропикриты ($\text{MgO} < 25$ мас. %) – низкими. Содержание S преимущественно варьирует в пределах 0.1–0.6 мас. %, в исключительных случаях – повышается до 0.8 мас. %. Для ферропикритов и габбро установлен значительный разброс содержания Zr относительно SiO_2 (рис. 6).

Закключение

1. Вулкано-плутоническая ферропикритовая ассоциация с возрастом 1.98 млрд лет включает в себя рудные и безрудные интрузии габбро-верлитов Печенгского никеленосного комплекса, вулканы ферропикритового состава в виде шаровых и массивных лав, расслоенных потоков, силлов и горизонтов туфов, и дайковые комплексы керсутитовых перидотитов-оливиновых габброноритов.

2. Внедрение интрузий произошло после формирования не менее половины разреза вулканогенной матерской свиты. Их внедрение контролировалось более ранним размещением в пределах черносланцевой продуктивной толщи (ждановская свита) безрудных силлов массивных офитовых габбро.

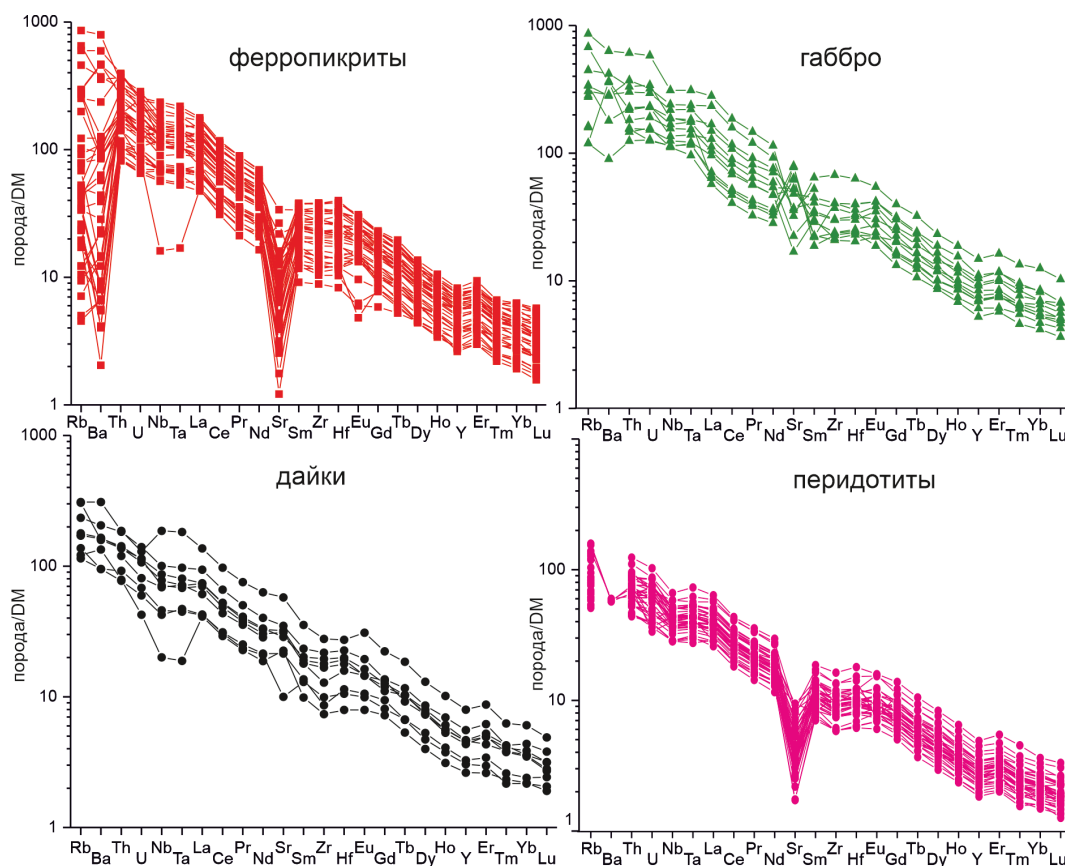


Рис. 5. Спайдер-диаграммы для пород ферропикритовой ассоциации. Нормирование по (Salters, Stracke, 2004).

Fig. 5. Spider diagrams for the ferropicrite association rocks. Normalization values from (Salters, Stracke, 2004).

3. На основе изучения составов разных фаций вулcano-плутонической ферропикритовой ассоциации установлена минимальная степень дифференциации магм в шаровых и массивных лавах, средняя – в дайках и максимальная – в расслоенных потоках и интрузивных камерах; относительно интрузий – минимальная в интрузиях I группы, средняя – в интрузиях Юго-Западного фланга и Междуречья, и максимальная – в дифференцированных интрузиях Восточного рудного узла. Степень дифференциации магм увеличивается от промежуточных очагов к субвулканическим интрузивным камерам и подводным расслоенным потокам. Кристаллизация магм в вулканических потоках происходила в более восстановительных условиях, чем в интрузивных камерах.

4. Интрузии и расслоенные потоки характеризуются однотипными трендами магматической дифференциации. Главный тренд – это уменьшение содержания MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 и CaO , обусловлен первичной кристаллизацией оливина, которая сменилась впоследствии кристаллизацией клинопироксена. Второй тренд – уменьшение содержания CaO и увеличение Al_2O_3 и суммы Na_2O+K_2O , связан с одновременной кристаллизацией клинопироксена и плагиоклаза, уменьшением основности плагиоклаза и поздней кристаллизацией ортоклаза. Частично данный тренд был нарушен из-за замещения плагиоклаза альбит-хлоритовым парагенезисом.

5. Все изученные фации имеют одинаковые спектры распределения РЗЭ, нормированные к хондриту, но отличаются по их содержанию – минимальному для перидотитов и более высокому для пироксенитов, габбро и ферропикритов. Породы зон закалки имеют незначительное превышение содержания РЗЭ по отношению к пироксенитам, залегающих внутри интрузий, в габбро-пироксенитовой зоне.

6. Большая часть ферропикритов, а также перидотиты и клинопироксениты интрузий характеризуются, судя по спайдер-диаграммам, отрицательными аномалиями Ba, Rd и Sr, что обусловлено локальными метаматическими процессами, проходящими в условиях низкотемпературного зеленосланцевого метаморфизма.

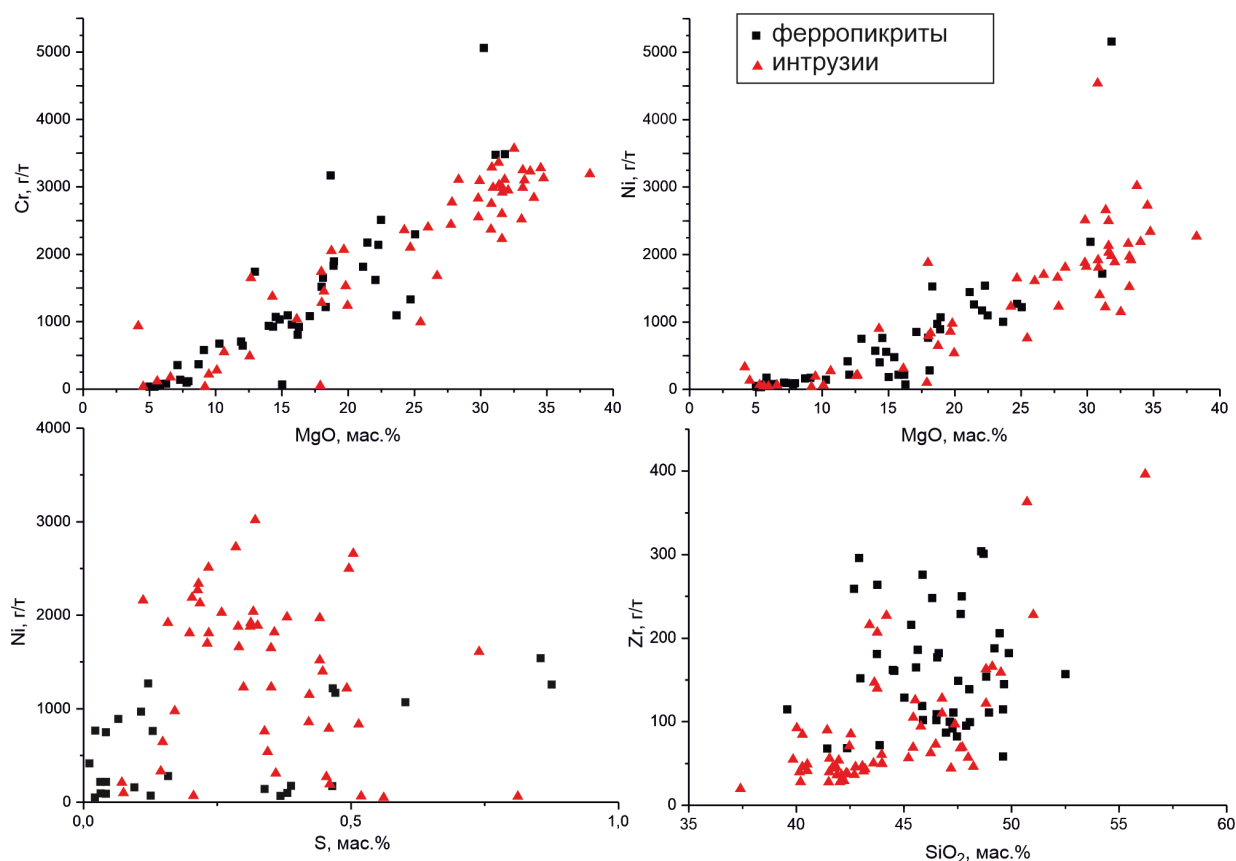


Рис. 6. Соотношение рудных элементов Ni и Cr относительно MgO, Ni-S и Zr-SiO₂ для ферропикритов и интрузивных пород.

Fig. 6. The ratio of ore elements Ni and Cr relative to MgO, Ni-S and Zr-SiO₂ for ferropicrites and intrusive rocks.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Н. А. Криволуцкой (ГЕОХИ РАН), В. Ф. Проскурнину (ВСЕГЕИ), А. А. Кременецкому (ИМГРЭ), С. А. Светову (ИГ КНЦ РАН) и профессору Сиань-Ву Би (Xian-Wu Bi, SKLOGG) за помощь в аналитических исследованиях. Работа выполнена в рамках темы НИР № FMEZ-2024-0004.

Список литературы

1. Загородный В. Г., Мирская Д. Д., Сулова С. Н. Геологическое строение Печенгской осадочно-вулканогенной серии. М.-Л.: Наука. 1964. 207 с.
2. Загородный В. Г., Мирская Д. Д. Об ультраосновных дифференциатах эффузивов четвертой вулканической толщии печенгской серии // Основные и ультраосновные породы Кольского п-ва. Л.: Наука. 1967. С. 3–10.
3. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / ред. Н. П. Лаверов. М.: МФ ТЕХНОНЕФТЬГАЗ. 1998. 260 с.
4. Магматизм и металлогения рифтогенных систем восточной части Балтийского щита / ред. А. Д. Щеглов. СПб: Недра. 1993. 244 с.
5. Магматизм, седиментогенез и геодинамика Печенгской палеорифтогенной структуры. Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН. 1995. 256 с.
6. Медно-никелевые месторождения Печенги / ред. Н. П. Лаверов. М. Изд-во: ГЕОС. 1999. 236 с.
7. Предовский А. А., Федотов Ж. А., Ахмедов А. М. Геохимия Печенгского комплекса (метаморфизованные осадки и вулканиты). Л. Изд-во: Наука. 1974. 139 с.
8. Пушкарев Ю. В., Рюнгенен Г. И., Смолюкин В. Ф., Шуркина Л. К. Геохимия изотопов свинца в связи с особенностями формирования рудообразующих систем никеленосных базит-гипербазитов Кольского полуострова // Изотопная геохимия процесса рудообразования. М. Изд-во: Наука. 1988. С. 150–166.
9. Ранний докембрий Балтийского щита / ред. В. А. Глебовицкий. СПб. Изд-во: Наука. 2005. 711 с.

11. Серов Н. А., Кадыров Р. И., Калашников А. О. Рентгеновская компьютерная микротомография сульфидных минералов: исследования микровключений и следствия для Sm–Nd-датирования рудогенеза // ДАН. 2023. Т. 508. № 2. С. 216–222.
12. Скуфьин П. К., Федотов Ж. А. Пикритовые шаровые лавы в разрезе раннедокембрийских вулканитов Печенгской структуры // ДАН СССР. 1989. Т. 305. № 4. С. 956–962.
13. Смолькин В. Ф. Петрология Пильгуйвинского рудоносного интрузива (Печенга). Рук. деп. ВИНТИ. № 2111-77. Апатиты. Изд-во: КФАН СССР. 1977. 261 с.
14. Смолькин В. Ф. Коматиитовый и пикритовый магматизм раннего докембрия Балтийского щита. СПб. Изд-во: Наука. 1992. 278 с.
15. Смолькин В. Ф. Магматизм раннепротерозойской (2.5–1.7 млрд лет) палеорифтогенной системы. Северо-запад Балтийского щита // Петрология. 1997. Т. 5. № 4. С. 394–411.
16. Смолькин В. Ф., Баянова Т. Б., Федотов Ж. А. Рудоносные базит-ультрабазиты Печенгско-Аллареченского района, Кольский регион: изотопное датирование // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза. Тезисы II Российской конференции по изотопной геохронологии, 25–27 ноября 2003 г. СПб. 2003. С. 467–470.
17. Смолькин В. Ф., Лохов К. И., Скублов С. Г. и др. Палеопротерозойский рудоносный габбро-перидотитовый комплекс Кеулик-Кенирим (Кольский регион) – новое проявление ферропикритового магматизма // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60. № 2. С. 164–197.
18. Федотов Ж. А. Эволюция протерозойского вулканизма восточной части Печенгско-Варзугского пояса (петрогеохимический аспект). Апатиты. Изд-во: КФАН СССР. 1985. 118 С.
19. Brugmann G. E., Hanski E. J., Naldrett A. J., Smolkin V. F. Sulphide segregation in ferropicrites from the Pechenga Complex, Kola Peninsula, Russia // J. Petrology. 2000. V. 41. No 12. P. 1721–1742.
20. McDonough W. F., Sun S. S. The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. V. 120. P. 223–253.
21. Hanski E. J. Petrology of the Pechenga ferropicrites and cogenetic, Ni-bearing gabbro-wehrlite intrusions, Kola Peninsula, Russia, Academic Dissertation // Geol. Surv. Finl. 1990. 190 p.
22. Hanski E.J., Smolkin V.F. Pechenga ferropicrites and other Early Proterozoic picrites in the eastern part of the Baltic Shield // Precambrian Res. 1989, V. 45. No 1–3. P. 63–82.
23. Hanski E., Huhma H., Smolkin V. F., Vaasjoki M. The age of the ferropicritic volcanics and comagmatic Ni-bearing intrusions at Pechenga, Kola Peninsula, USSR // Bull. Geol. Soc. Finl. 1990. V. 2. No 62. P. 123–133.
24. Hanski E. J., Smolkin V. F. Iron- and IREE-enriched mantle source for early Proterozoic intraplate magmatism as exemplified by the Pechenga ferropicrites, Kola Peninsula, Russia // Lithos. 1995. V. 34. P. 107–125.
25. Salters U.J.M., Stracke A. Composition of the depleted mantle. Geochemistry, Geophysics, Geosystems // An electronic Journal of the Earth Sciences. 2004. V. 5. No 5. P. 1–27.
26. Smolkin V. F., Hanski E., Huhma H., Fedotov Zh.A. Sm-Nd and U-Pb isotopic study of the Nyasyukka dike complex, Kola Peninsula, Russia // Труды Карельского НЦ РАН. 2015. № 7. Петрозаводск. С. 74–84.
27. Walker R. J., Morgan J. W., Hanski E. J., Smolkin V. F. Re-Os Systematics of Early Proterozoic ferropicrites, Pechenga complex, NW Russia: evidence for ancient ^{187}Os – enriched plumes // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1997. V. 61. P. 3145–3160.