

Геохимическая и минералогическая характеристика протерозойских метапикритов Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3)

Й. Спишиак¹, Й. Досталь², Д. Говорка³, Ш. Мерес³, Ю.П. Смирнов⁴

¹ Геологический институт, Академия наук Словакии, Банска Быстрица, Словацкая Республика

² Департамент геологии, Университет Святой Марии, Галифакс, Канада

³ Факультет естественных наук, Университет Комениус, Братислава, Словацкая Республика

⁴ НПЦ "Кольская сверхглубокая", Заполярный

Аннотация. Протерозойские породы печенгского комплекса, вскрытые Кольской сверхглубокой скважиной (СГ-3) (0-6840 м), представляют собой ритмическое чередование формаций осадочно-вулканогенных пород с комагматичными телами габбро-верлитов и интрузий габбро-диабазов и дацит-андезитовых порфиров. Нами исследованы тела метапикритовых пород никельской группы, входящие в матертскую и ждановскую свиты. Метапикриты представляют собой среднезернистые, в различной степени измененные породы, некоторые метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации. В исследованных породах оливин полностью замещен. Клинопироксен соответствует авгиту, реже геденбергиту. Амфибол встречается в нескольких генерациях, первичный керсутит сосуществует с клинопироксеном. Амфибол в каемках замещения клинопироксена соответствует эдениту, а амфибол, образовавшийся при РТ условиях зеленосланцевой фации, соответствует актинолиту, ферроактинолиту и тремолиту. Мы сравнили метапикриты из СГ-3 и ферропикриты, отобранные на поверхности. Геохимически они очень похожи. Содержание SiO₂ в исследованных метапикритах матертской и ждановской свит варьирует от 38.69 до 48.2 вес.%, содержание MgO – от 10.53 до 33.94 вес.%, Al₂O₃ – от 2.64 до 11.28 вес.%, TiO₂ – от 1.25 до 4.18 вес.%, CaO – от 1.14 до 13.99 вес.%, Fe₂O₃ – от 16.06 до 20.73 вес.%, Mg# – от 50.16 до 77.29 вес.% и потери при прокаливании – от 3.90 до 10.30 вес.%. Высокое содержание когерентных элементов Ni, Co и Cr в протерозойских метапикритах матертской и ждановской свит указывает на мантийный источник пород. Спектры РЗЭ этих пород, нормализованные по хондриту, отличаются от спектров MORB, они обогащены легкими РЗЭ. Содержание высокозарядных и редкоземельных элементов (РЗЭ) отражает первичное магматическое распределение и соответствует типу E-MORB и толеитовым внутриплитным базальтам.

Abstract. The Proterozoic Pechenga complex penetrated by the Kola superdeep borehole SG-3 (0-6840 m) represents a rhythmic alternation of volcano-sedimentary formations with co-magmatic bodies of gabbro-wehrlites and intrusions of gabbro-diabases and dacite-andesite porphyries. We have studied bodies of metapicrite rocks from the Nikelska group – the Matert and Zhdanov Formations. Metapicrites are medium-grained rocks with variable alteration, some of them metamorphosed at the greenschists facies. In the studied rocks olivines were totally altered. Clinopyroxenes correspond to augite, rarely to hedenbergite. Amphiboles occur in several generations, the first kaersutites co-exist with clinopyroxenes. Amphiboles around clinopyroxenes correspond to edenite and the amphiboles which originated during the metamorphosis under the greenschist facies PT conditions correspond to actinolites, ferroactinolites and tremolites. We compared metapicrites from SG-3 and ferropicrites on the surface. They are geochemically very similar. The studied Proterozoic metapicrites from the Matert and Zhdanov Formations have a range of SiO₂ between 38.69 and 48.2 wt%. The MgO content varies from 10.53 to 33.94 wt%, the Al₂O₃ content varies from 2.64 to 11.28 wt%, the TiO₂ content varies from 1.25 to 4.18 wt% and CaO content varies from 1.14 to 13.99 wt%. The Fe₂O₃ content varies from 16.06 to 20.73 wt%, Mg# from 50.16 to 77.29 wt% and LOI from 3.90 to 10.30 wt%. High concentrations of compatible elements Ni, Co, Cr in metapicrites from the Matert and Zhdanov Proterozoic Formations indicate a mantle source. REE-chondrite normalized patterns of these rocks are different from the MORB basalts pattern, they are enriched in LREE. The concentrations of most HFSE and REE are considered to reflect the primary magmatic distribution and correspond to E-type MORB and tholeiitic WPB.

1. Введение

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) (*The Superdeep...*, 1984; 1987), вскрывшая породы протерозойского и архейского комплексов, вызвала многочисленные дискуссии по геодинамическим и тектоническим проблемам Кольского полуострова и прилегающих районов (*Архейский...*, 1991; *Rocks...*, 1999; *Melezhik, Sturt*, 1994; 1998; *Sharkov, Smolkin*, 1997; *Smolkin*, 1997). Согласно терминологии, предложенной в работе *Melezhik u Sturt* (1998), СГ-3 расположена в северопеченгской серии печенгского комплекса. Породы печенгского комплекса (рис. 1) формируют северо-западную часть раннепротерозойского пояса Имандра-Варзуга-Печенга, пересекающего Кольский полуостров в направлении северо-запад – юго-восток (*Hanski*, 1992; *Предовский и др.*, 1987).

Считается, что интенсивность метаморфической рекристаллизации как осадочного, так и магматического комплексов, увеличивается с глубиной от пренит-пумпеллиитовой до амфиболит-гранулитовой фации в архейской части скважины. В то время как тектонические и геодинамические проблемы рассматриваемого района широко обсуждались и в основном решались, петрогенетическим проблемам первично осадочных и магматических комплексов уделялось меньше внимания. В представленной работе рассматриваются протерозойские метапикриты, вскрытые скважиной СГ-3 на разных глубинах. Эта задача соответствует основным направлениям проекта МПГК ЮНЕСКО № 408, которые включают корреляцию аналитических данных, полученных по образцам из сверхглубокой скважины СГ-3 и их аналогам с поверхности. Подобная информация по пикритам представлена ранее в работах *Hanski* (1992) и *Hanski, Smolkin* (1995).

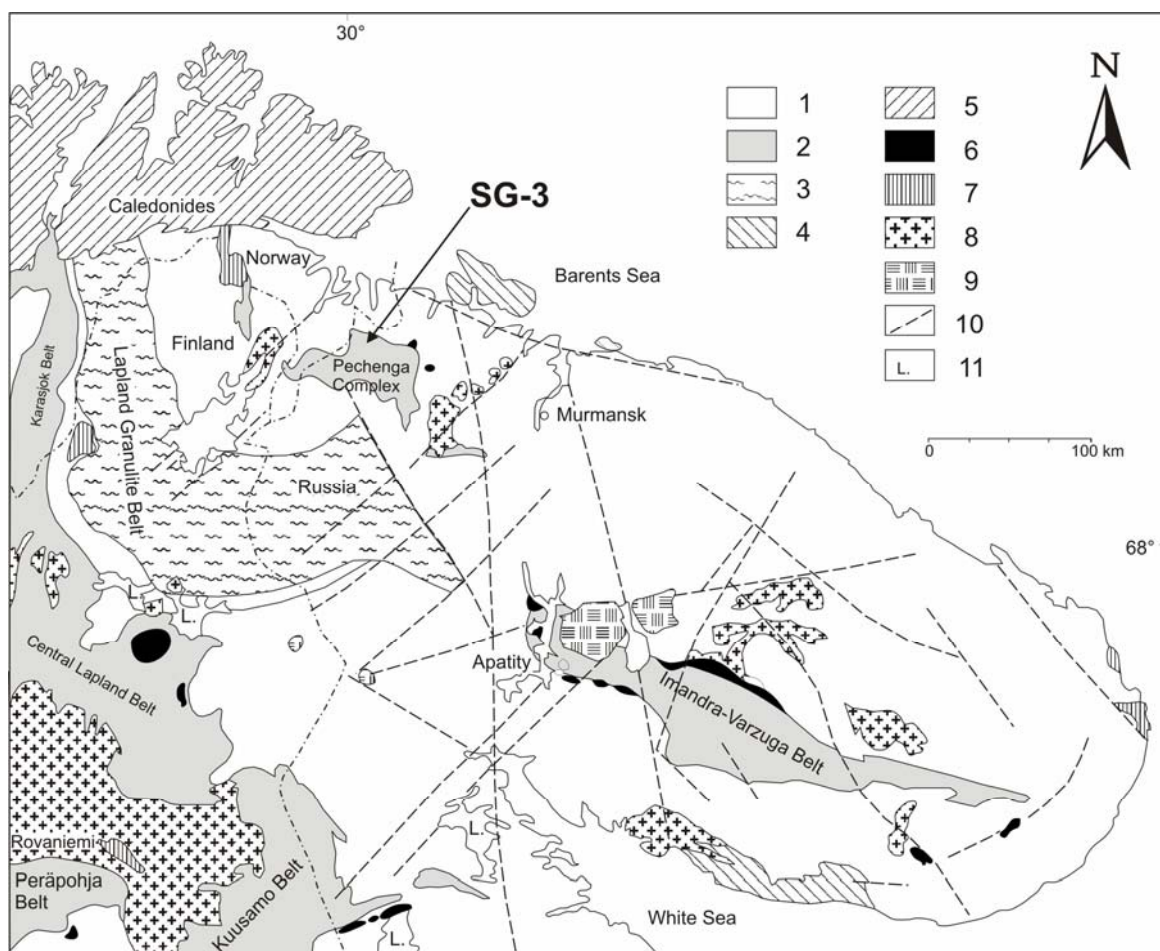


Рис. 1. Схема геологического строения северной части Фенноскандинавского щита по *Hanski* (1992).

1 – архейский комплекс, гранито-гнейсовый/зеленокаменный пояс, 2 – раннепротерозойские зеленокаменные пояса, 3 – Лапландский гранулитовый пояс и пояс реки Тана, 4 – супракрустальные породы среднего и верхнего протерозоя, 5 – каледонский орогенный пояс, 6 – расслоенные интрузии (около 2.45 млрд лет), 7 – мафические и ультрамафические интрузии (около 1.9 млрд лет), 8 – граниты (1.9-1.2 млрд лет), 9 – каледонские и герцинские щелочные интрузии и карбонатиты, 10 – линии разломов, 11 – озера.

Таблица 1. Анализ клинопироксена из протерозойского метапикрита (СГ-3)

Образец, №	835	835	835	1416	1416	1459	1459	1459
Анализ, №	2с	3с	3г	3с	3г	2с	2г	3с
SiO ₂	52.80	52.06	46.98	49.66	50.05	49.86	50.29	50.19
TiO ₂	0.91	1.15	2.78	1.59	1.58	1.97	1.62	1.70
Al ₂ O ₃	1.99	2.44	6.70	3.52	2.97	3.78	3.33	3.66
FeO	6.02	6.36	10.25	11.21	12.35	6.85	7.14	6.63
MnO	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	16.62	16.02	11.82	13.13	12.43	15.46	15.45	15.21
CaO	21.42	21.14	21.02	20.18	20.07	20.99	20.6	21.49
Na ₂ O	0.38	0.38	0.4	0.57	0.38	0.52	0.37	0.34
P ₂ O ₅	0.82	1.05	0.00	0.00	0.00	0.56	0.44	0.63
Всего	100.96	100.6	99.95	100.14	99.83	99.99	99.24	99.85
<i>Формула, основанная на 6 окислах</i>								
Si ^{IV}	1.94	1.92	1.77	1.87	1.90	1.86	1.88	1.87
Al ^{IV}	0.06	0.08	0.23	0.13	0.10	0.14	0.12	0.13
Al ^{VI}	0.02	0.03	0.07	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03
Ti	0.03	0.03	0.08	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05
Fe ²⁺	0.18	0.20	0.32	0.35	0.39	0.21	0.22	0.21
Mg	0.91	0.88	0.66	0.74	0.70	0.86	0.86	0.85
Mn	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.84	0.84	0.85	0.81	0.81	0.84	0.83	0.86
Na	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01

Таблица 2. Анализ амфиболита из протерозойского метапикрита (СГ-3)

Образец, №	835	1416	1416	1459	1459	5145	5145	5145
Анализ, №	2	5	7	11	13	15	18	21
SiO ₂	39.16	50.30	51.17	56.64	46.57	58.15	43.58	42.14
TiO ₂	5.40	0.89	0.00	0.00	2.70	0.00	4.53	0.47
Al ₂ O ₃	13.33	2.65	0.70	0.00	7.39	0.00	9.57	10.91
FeO ⁺	16.38	21.32	26.51	8.89	8.91	4.16	8.41	21.64
MnO	0.30	0.00	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39
MgO	9.60	11.18	6.49	18.99	17.58	22.19	15.44	7.57
CaO	11.20	8.55	11.44	12.93	10.49	13.51	11.24	11.56
Na ₂ O	2.92	2.21	0.00	0.00	3.21	0.00	3.47	2.16
K ₂ O	0.33	0.44	0.00	0.00	0.57	0.00	0.98	0.00
Всего	98.62	97.54	96.59	97.45	97.42	98.01	97.22	96.84
<i>Формула, основанная на расчетах Шумахера</i>								
Si ^{IV}	5.83	7.56	7.96	8.00	6.75	8.00	6.35	6.51
Al ^{IV}	2.17	0.44	0.04	0.00	1.25	0.00	1.65	1.49
Sum T	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al ^{VI}	0.17	0.02	0.09	0.00	0.01	0.00	0.00	0.49
Ti	0.60	0.10	0.00	0.00	0.29	0.00	0.50	0.05
Fe ³⁺	0.35	0.14	0.04	0.00	0.05	0.00	0.28	0.31
Mg	2.13	2.50	1.50	4.00	3.79	4.55	3.35	1.74
Fe ²⁺	1.67	2.23	3.37	1.00	0.86	0.45	0.75	2.38
Mn	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Sum C	4.94	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.87	5.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.02	0.30	0.03	0.04	0.17	0.02	0.00	0.10
Mn	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Ca	1.79	1.38	1.91	1.96	1.63	1.99	1.75	1.91
Na	0.17	0.32	0.00	0.00	0.20	0.00	0.25	0.05
Sum B	2.00	2.00	1.98	2.00	2.00	2.01	2.00	2.09
Na	0.67	0.32	0.00	0.00	0.70	0.00	0.73	0.59
K	0.06	0.08	0.00	0.00	0.11	0.00	0.18	0.00
Sum A	0.73	0.40	0.00	0.00	0.81	0.00	0.92	0.59

2. Аналитические методы и подходы

Микронзондовый анализ породообразующих силикатов был проведен стандартными методами в Геологической службе Словацкой республики в Братиславе и Региональном геохимическом центре в

Университете Св. Марии (Галифакс, Канада). Выборка аналитических данных представлена в табл. 1 и 2. В Региональном геохимическом центре в Университете Св. Марии, Галифакс, Канада, пять образцов протерозойских метапикритов из Кольской сверхглубокой скважины СГ-3 были исследованы рентгенофлуоресцентным методом на содержание главных и рассеянных элементов (Rb, Sr, Ba, Co, V, Zn, Ga, Cr, Ni). Как показали повторные анализы, аналитическая точность для основных окислов составляла выше 5 %, для малых и рассеянных элементов – 5-10 % (Dostal et al., 1986). Остальные рассеянные элементы (REE, Hf, Zr, Nb, Ta, Y и Th) были проанализированы с помощью масс-спектрометра в индуктивно связанной плазме в геологических лабораториях Геологической службы Онтарио, Садбери, Канада (табл. 3). Точность метода, приведенная в работе Ayer u Davis (1997), составляет около 5 %.

Таблица 3. Репрезентативные анализы протерозойского метапикрита (СГ-3)

Образец, №	835	1416	1459	5145	5534
Глубина, м	356.9	576.4	590.6	1550.2	1636.9
Тип породы	Серпентинизированный пикрит	Серпентинизированный пикрит, обогащенный Ti	Метапикрит	Серпентинизированный метапикрит	Серпентинизированный метапикрит
Свита	Матерн	Матерн	Матерн	Ждановская	Ждановская
SiO ₂	43.14	38.69	48.20	43.28	41.19
TiO ₂	2.26	4.18	1.44	1.25	0.85
Al ₂ O ₃	7.56	11.28	4.28	3.26	2.64
Fe ₂ O ₃ *	17.62	20.73	16.06	19.58	19.76
MnO	0.21	0.28	0.13	0.25	0.21
MgO	18.48	10.53	22.36	31.06	33.94
CaO	10.35	13.99	7.41	1.14	1.31
Na ₂ O	0.08	0.02	0.00	0.03	0.00
K ₂ O	0.02	0.05	0.01	0.04	0.02
P ₂ O ₅	0.28	0.26	0.13	0.11	0.08
LOI	5.30	3.90	5.30	8.60	10.30
Mg#	67.50	50.16	73.39	75.86	77.29
Cr	2840	50	1640	2659	3113
Ni	1810	103	1409	1164	2246
Co	158	70	114	130	128
V	299	641	181	184	126
Zn	117	118	87	111	91
Rb	0.1	0	0	0.3	0.2
Ba	22	34	10	22	13
Sr	46	34	15	20	6
Ga	12	20	9	7	5
Ta	1.41	1.87	0.71	0.69	0.47
Nb	25.5	30	12.2	12.1	7.6
Hf	5.1	7	2.8	2.5	1.7
Zr	178	229	98	83	55
Y	18.9	23.4	9.9	8.8	5.7
Th	2.18	2.14	0.95	0.97	0.67
La	9.83	17.67	7.41	7.72	4.90
Ce	28.65	43.09	18.09	17.98	11.41
Pr	4.42	5.97	2.51	2.42	1.53
Nd	20.77	26.37	11.15	10.54	6.51
Sm	5.15	6.59	2.72	2.61	1.56
Eu	1.61	2.761	0.762	0.633	0.534
Gd	4.83	6.31	2.60	2.52	1.49
Tb	0.68	0.91	0.37	0.35	0.21
Dy	3.70	5.06	2.02	1.96	1.16
Ho	0.63	0.84	0.33	0.33	0.19
Er	1.61	2.11	0.84	0.82	0.51
Tm	0.21	0.27	0.11	0.10	0.06
Yb	1.22	1.55	0.62	0.61	0.39
Lu	0.18	0.22	0.09	0.09	0.06

(основной элемент, пересчитанный на 100 % без учета воды, Mg# 100xMgO/MgO+FeO* в мол.%; п.п.п. – потери при прокаливании; Fe₂O₃* суммарный Fe в виде Fe₂O₃).

Породы СГ-3 подверглись влиянию вторичных процессов, включая метаморфизм зеленосланцевой фации и гидротермальное воздействие. Проблемы петрогенезиса и тектонической обстановки для исследуемых пород решались, главным образом, на основании изучения рассеянных элементов, например, высокозарядных элементов (ВЗЭ) и РЗЭ, которые считаются относительно мало подвижными в гидротермальных флюидах (Winchester, Floyd, 1977; Goddard, Evans, 1995; Zulauf et al., 1999). Считается, что содержание большинства главных элементов, так же, как ВЗЭ, РЗЭ и переходных элементов, отражает их первично-магматическое распределение. Эти образцы далее использовались для петрогенетического анализа и определения тектонической обстановки.

3. Геология

Кольская сверхглубокая скважина около Заполярного является до сих пор самой глубокой в мире. Она вскрыла 7 км разреза протерозойских пород Печенгской структуры и 5 км разреза архейского фундамента Балтийского щита возрастом 2830-2900 Ма (Бибилова и др., 1993; Vetrin et al., 2000).

Протерозойские породы Печенгского комплекса (0-6840 м) представляют ритмическое чередование вулканических и осадочных пород с комагматичными телами габбро-верлитов, интрузиями габбро-диабазов и дацит-андезитовых порфиритов. В разрезе пород СГ-3 были выделены следующие фации и субфации регионального метаморфизма: пренит-пумпеллиитовая фация – 0-1.4 км, зеленосланцевая фация – 1.4-4.9 км (эпидот-хлоритовая субфация – 1.4-3.2 км, биотит-актинолитовая субфация – 3.2-4.9 км), эпидот-амфиболитовая фация – 4.9-6.0 км, амфиболитовая фация – 6.0-6.84 км.

Более глубокие породы метаморфизованы также до амфиболитовой фации. Однако некоторые исследователи (Кольская сверхглубокая, 1984; Дук и др., 1989) полагают, что метаморфизм пород архейского комплекса мог достигать параметров гранулитовой фации. Кольская скважина СГ-3 до глубины 6842 м вскрывала осадочно-вулканогенные образования раннепротерозойской Печенгской структуры, метаморфизованные от зеленосланцевой до амфиболитовой фации. Их формирование охватывает длительный период времени – от 2500 до 1800 Ма, в течение которых шли процессы седиментации осадочных пород, вплоть до эвапоритов и карбонатов, а также извержения лав от коматиитовых до щелочных разновидностей и внедрение интрузий мафических плутонов. Ниже 6842 м эти породы с угловым несогласием контактируют с архейскими, частично мигматизированными гнейсами, амфиболитами и гранитоидными породами.

Возраст гнейсового протолита составляет 2950-2850 Ма. Возраст интрузий габбро и комплекса амфиболит-тоналит-плаггиогранитов – около 2835-2832 Ма, а гранитных жил и пегматитов – около 2740 Ма. В конце этой цепочки событий было формирование метасоматических пород, обогащенных К и Si (возраст 2225 Ма) и жил порфириновых гранитов (возраст 1766 Ма) (Бибилова и др., 1993; Chen et al., 1994; 1998; Melezhik, Sturt, 1994; Bayanova, Balashov, 1995; Timmerman, Daly, 1995; Vetrin et al., 1999). Печенгский комплекс, вскрытый скважиной СГ-3, подразделяется на две серии: никельскую (0-4884 м) и луостаринскую (4884-6842 м). Никельская серия (в финской литературе она соответствует колосйокской и пильгуярвинской свитам (Hanski, 1992)) формирует центральную часть Печенгского грабена и наиболее широко распространена на поверхности. Никельская серия сложена диабазами, диабазовыми порфиритами и туфами. Ультрамафические вулканы пикритового типа редки. Расчленение никельской серии по литостратиграфическим данным на более мелкие подразделения позволило выделить в ее верхней части матертскую (9-1059 м) и ждановскую (1059-2805 м) свиты (Кольская сверхглубокая, 1984) (рис. 2А).

Матертская свита формирует центральную часть Печенгской структуры, причем на поверхности породы этого возраста распространены на большой территории – примерно 600 км² (Кольская сверхглубокая, 1984). Свита состоит из диабазов, диабазовых порфиритов и их туфов и, в меньшей степени, ультраосновных вулканических пород – кварцевых порфиров и их туфов. Скважина СГ-3 вскрыла в разрезе свиты более 50 покровов подушечных лав. Матертская свита характеризуется ритмическим строением, каждый ритм начинается с мелкоскладчатых покровов основных эффузивов и заканчивается пластом туфов базитового состава.

Ждановская свита образована туфогенными осадочными породами – пелитами, алевролитами, песчаниками и конгломератами. Кроме того, в ее составе имеются конгломерато-брекчии, туфы и туффиты с карбонатами (Кольская сверхглубокая, 1984). Менее распространены габбродиабазы, габбро и гипербазиты.

Нами исследованы тела метапикритовых пород матертской и ждановской свит никельской серии. Исследованные разноглубинные метапикриты являются частью протерозойского разреза СГ-3. В матертской свите СГ-3 вмещающими породами для пикритов были метадиабазы, пироксеновые метапорфириты и туфы (рис. 2В), а в ждановской свите – метагаббро, диабазы, серпентинизированные перидотиты, филлиты и метаалевролиты (рис. 2С).

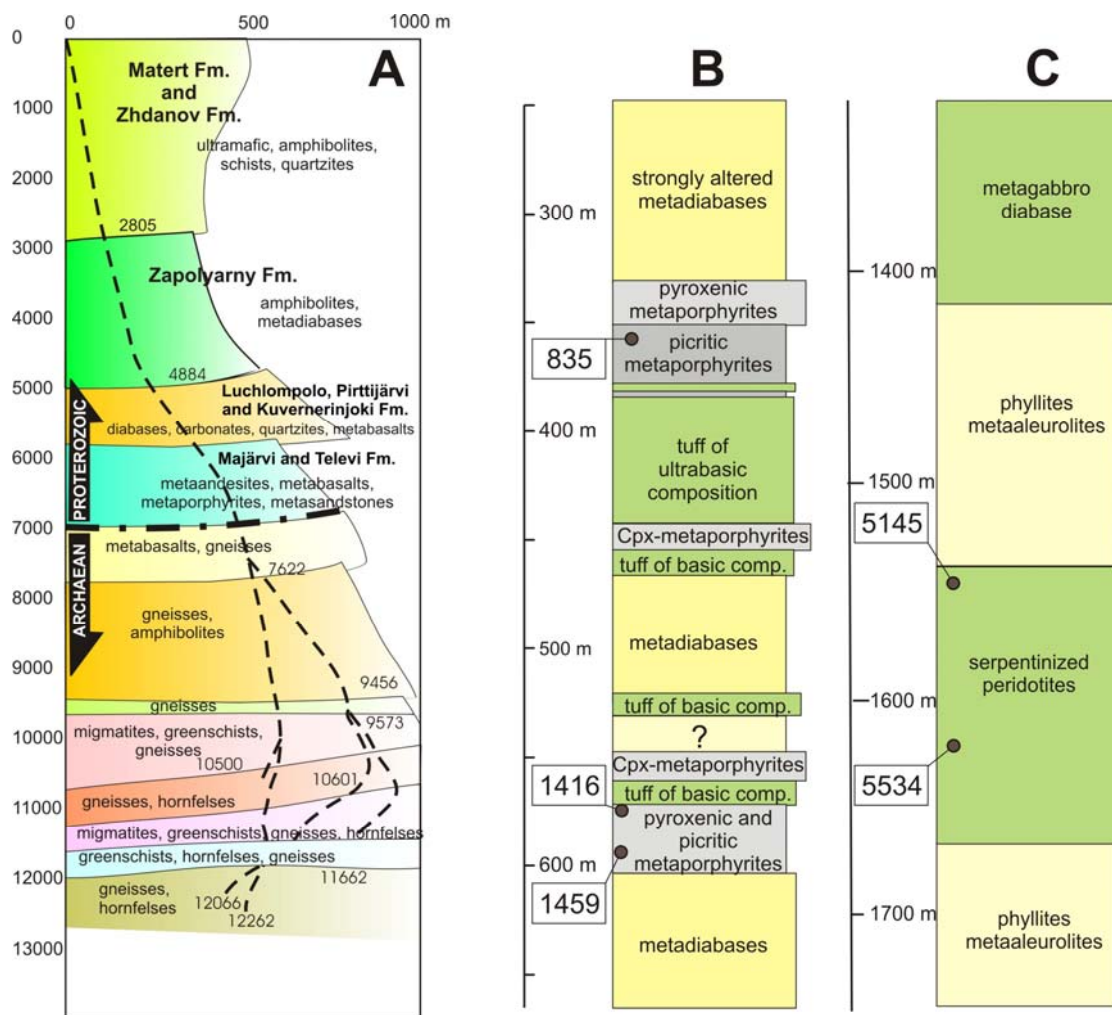


Рис. 2. Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3). А – сводный литологический профиль, В – свита матерт, часть литологического профиля с местонахождением изученных пикритов (835, 1416, 1459 – номера образцов), С – ждановская свита, часть литологического профиля с местонахождением изученных пикритов (5145, 5534 – номера образцов)

4. Минералогия

Исследованные метапикриты являются среднезернистыми породами, в различной степени измененными. Некоторые из них метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации. В серпентиновом матриксе часто сохраняются псевдоморфозы серпентина по кристаллам оливина. Иногда сохраняются также серпентиновые псевдоморфозы по оригинальной спинифекс структуре первичных пород. Размеры кристаллов реликтового пироксена (Срх) варьируют от 0.1 мм до 2-3 мм. Некоторые пироксены обладают оптической зональностью. В метапикритах Срх по краям замещен эденитом и ферроактинолитом. Минералы серпентиновой группы, хлорит, тальк и плагиоклаз встречаются спорадически. Кроме того, в исследованных образцах имеются титанит, шпинель, карбонат и ильменит.

Клинопироксены и амфиболы изучались с помощью электронного микроскопа. Для сравнительных характеристик и оценки амфиболов и Срх была использована IMA классификация (Leake et al., 1997; Morimoto et al., 1988).

Амфиболы встречаются в нескольких генерациях. Амфиболы первой генерации сосуществуют с Срх и по классификации IMA соответствуют керсутиту (табл. 2, рис. 4). Зачастую можно наблюдать каемку амфиболов вокруг пироксенов. Эти амфиболы представлены эденитом и ферроэденитом и были образованы при более высоких температурах – скорее всего, во время охлаждения магмы. Вторичные амфиболы, возникшие при последующем метаморфизме в условиях зеленосланцевой фации, соответствуют актинолитам, ферроактинолитам и тремолитам. Плагиоклазы встречаются очень редко в форме сложных таблитчатых прорастаний. Из рудных минералов в изученных образцах имеются титанит, шпинель и ильменит.

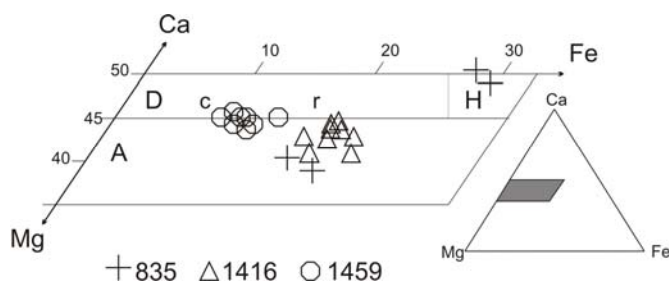


Рис. 3. Классификационные диаграммы клинопироксена из протерозойских метапикритов (Кольская сверхглубокая скважина).

IMA классификация по *Morimoto et al.* (1988).

A – авгит, D – диопсид, H – геденбергит, c – kern, r – край, 835, 1416, 1459 – номера образцов

Таблица 4. Выборочные анализы ферропикрита Печенгской группы (*Hanski, 1992*)

Образец, №	1	2	4	5	11	13
SiO ₂	46.00	47.64	44.47	49.31	46.00	46.83
TiO ₂	2.48	2.00	2.59	2.31	2.36	2.48
Al ₂ O ₃	8.10	6.66	6.52	8.59	8.55	9.27
Fe ₂ O ₃	16.92	15.03	16.7	15.22	15.12	14.96
MnO	0.30	0.24	0.21	0.19	0.19	0.23
MgO	12.6	13.33	14.13	12.5	14.37	13.88
CaO	12.33	14.33	14.43	10.94	12.69	11.62
Na ₂ O	0.73	0.14	0.14	0.13	0.15	0.16
K ₂ O	0.18	0.09	0.15	0.28	0.05	0.13
P ₂ O ₅	0.26	0.20	0.30	0.22	0.22	0.22
LOI	3.77	10.65	9.96	9.28	10.83	10.76
Mg#	59.59	63.72	62.63	61.93	65.3	64.76
Cr	1140	933	1432	1220	1186	737
Ni	552	567	855	782	728	605
Co	96	73	101	87	83	n
V	310	270	340	290	320	308
Zn	n	n	n	n	n	n
Rb	6.3	6	11	3	1	11.9
Ba	31.8	35	20	106	21	51.3
Sr	60	270	250	180	210	256
Ga	n	n	n	n	n	n
Ta	n	0.8	1.03	0.8	0.83	n
Nb	18.4	18	22	17	n	19.6
Hf	n	n	n	n	n	n
Zr	141	97	124	117	121	182
Y	n	n	n	n	n	n
Th	2.57	2.13	2.41	2.01	2.11	2
La	21.91	16.23	10.44	14.73	21.55	17.83
Ce	54.27	38.85	26.85	36.91	46.6	43.71
Pr	n	n	n	n	n	n
Nd	29.66	20.32	18.68	22.3	24	26.22
Sm	6.56	4.7	5.66	5.68	5.55	5.87
Eu	2.29	1.47	1.72	1.81	1.52	1.97
Gd	n	n	n	n	n	n
Tb	0.89	0.59	0.71	0.74	0.78	0.81
Dy	n	n	n	n	n	n
Ho	n	n	n	n	n	n
Er	n	n	n	n	n	n
Tm	n	n	n	n	n	n
Yb	1.59	1.05	1.36	1.59	1.64	1.79
Lu	0.19	0.18	0.23	0.23	0.25	n

(основной элемент, пересчитанный на 100 % без учета воды, Mg# 100xMgO/MgO+FeO* в мол.%; п.п.п. – потери при прокаливании; Fe₂O₃* суммарный Fe в виде Fe₂O₃).

5. Геохимия

Все изученные породы в разной степени подверглись воздействию вторичных процессов, которые изменили их химический состав (табл. 3). Например, повышенные и варьирующие показатели потерь от прокаливании (до 10.3 вес.%) вызваны, в основном, вторичными процессами. Большая часть

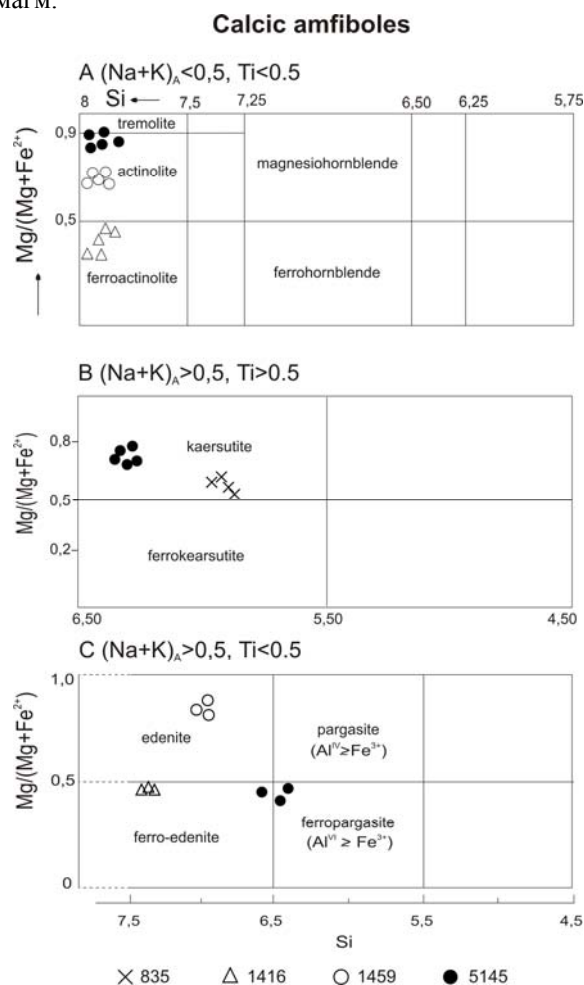
концентраций главных элементов, высокозарядных элементов (ВЗЭ), РЗЭ, переходных элементов и Th в исследованных образцах, вероятно, не была ремобилизована. Можно полагать, что эти концентрации отражают первичное магматическое распределение.

Изученные протерозойские метапикриты из ждановской свиты характеризуются низким содержанием SiO₂ – от 43.28 до 42.19 вес.%, CaO – от 1.14 до 1.31 вес.%, TiO₂ – от 1.25 до 0.85 вес.% и Al₂O₃ – от 3.26 до 2.64 вес.% и высоким содержанием Fe₂O₃ – от 19.58 до 19.76 вес.% и MgO – от 31.06 до 33.94 вес.%. Содержание Mg# в этих образцах составляет от 75.86 до 77.29 вес.%, а потери от прокаливания – от 8.6 до 10.3 вес.%. Эти образцы характеризуются высоким содержанием когерентных элементов, например, Cr – от 2659 до 31133 г/т, Ni – от 1164 до 2264 г/т, Co – от 130 до 128 г/т, а содержание в них Σ REE было самым низким из всех изученных метапикритов (табл. 3).

Изученные протерозойские метапикриты из свиты матерт содержат SiO₂ от 38.69 до 48.2 вес.%, MgO от 10.53 до 22.36 вес.% (в метапикритах ждановской свиты содержание MgO более высокое). Содержание Al₂O₃, TiO₂ и CaO в исследованных образцах выше, чем в метапикритах ждановской свиты. Содержание Al₂O₃ варьирует от 4.28 до 11.28 вес.%, TiO₂ – от 1.44 до 4.18 вес.%, а CaO – от 7.41 до 13.99 вес.%. Содержание Fe₂O₃ варьирует от 16.06 до 20.73 вес.%, Mg# – от 50.16 до 73.39 вес.%, потери при прокаливании – от 3.90 до 5.30 вес.% (табл. 3). Образец 14116 имеет довольно своеобразный состав. Из всех исследованных метапикритов он содержит наибольшее количество Al₂O₃, TiO₂, Hf, Zr, Y, Ba, Th, Nb, Ta, и Σ REE и наименьшее MgO, Cr и Ni.

Изученные пикриты из матертской и ждановской свит характеризуются пологим спектром REE, с постепенным снижением от более высоких значений LREE (обогащение) до более низких HREE (обеднение). Ее аномалия выражена слабо, иногда отсутствует. Спектры некогерентных элементов, нормализованные по первичной мантии, для пород матертской и ждановской свит отличаются от спектров различных типов MORB. Изученные пикриты обогащены большинством некогерентных элементов и обеднены HREE. Типичными являются отрицательные пики Rb и Sr и положительные пики Ti. Высокое содержание когерентных элементов Ni, Co и Cr в метапикритах матертской и ждановской свит указывает на мантийный источник пикритовых магм.

Рис. 4. Классификационные диаграммы амфиболов из протерозойских метапикритов (Кольская сверхглубокая скважина). IMA классификация по *Leake et al.* (1997). 835, 1416, 1459, 5145 – номера образцов



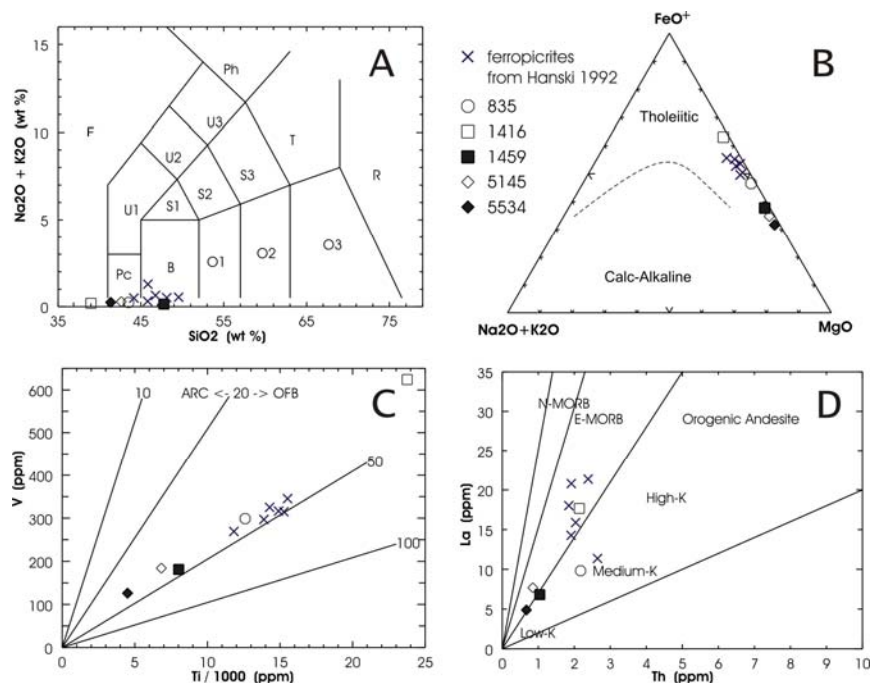
6. Дискуссия

Пикриты из СГ-3 сравнивались с пикритами, отобранными на поверхности, имеющими идентичное литостратиграфическое положение (Hanski, Smolkin, 1989; Hanski, 1992). Ферропикриты с поверхности (Печенгский комплекс) зачастую сохранили структуру спинифекс, реже – первичные оливины (Fo_{74.1-84.2}). В отличие от оливинов, Crx сохранились в основном хорошо. Местами они зональны, но зональность детально не изучалась. Ферропикриты содержат лишь один тип Crx, который варьирует по составу от диопсида до авгита по классификации Моримото (Morimoto et al., 1988). Из других основных первичных фаз присутствуют амфиболы, соответствующие керсутитам (Leake et al., 1997). Метаморфическая рекристаллизация привела к развитию эденита, вплоть до тремолит-актинолита. Пикриты редко содержат коричневые флогопиты и Cr-шпинели. Изученные пикриты лишь в незначительной степени подверглись вторичному изменению.

Состав изученных первичных минералов (оливинов, клинопироксенов и амфиболов) матертской и ждановской свит аналогичен составу пикритов с поверхности (Hanski, 1992). На основе дискриминационных диаграмм Le Bas (1962), Leterrier et al. (1982) и других мы можем сравнить Crx из изученных метапикритов с этим минералом на переходной стадии с Crx из щелочных пород и субщелочных базальтов (Spišiak et al., 2001).

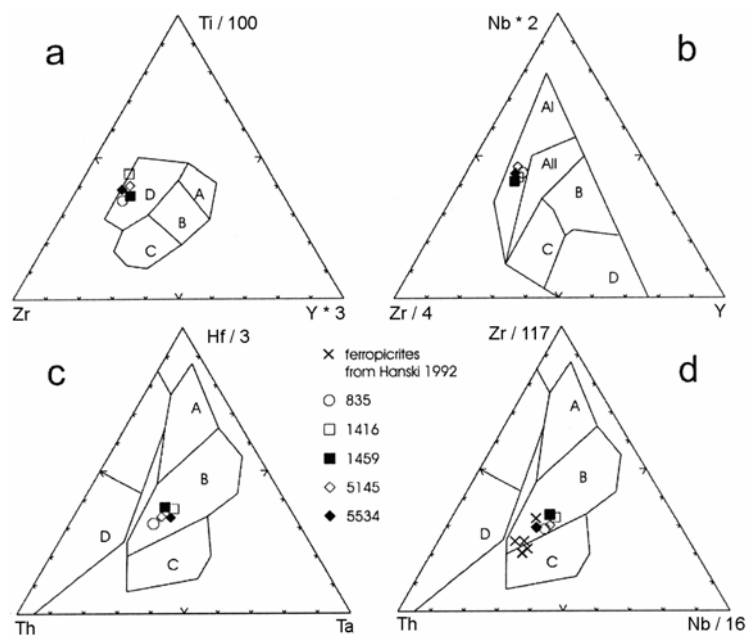
Высокожелезистые магнезиальные расплавы обычно имеют положительные значения ϵ_{Nd} , которые аналогичны или немного ниже этих значений для сосуществующих пикритов и коматитов. Это указывает на то, что связанная с ними мантия была доминирующим источником расплава в регионе. Высокожелезистые магнезиальные расплавы обычно встречаются в архее (например, Южная Африка, Канада) и фанерозое (Сибирь, Парана) и представляют древнейшие магмы, возникшие в процессе плавления поднимающихся головных частей мантийного плюма (Gibson, 2002). В поясе Печенга-Варзуга на Кольском полуострове имели место две основные стадии тектономагматической активности: 1) (сумийские и сариолийские эпизоды) \cong 2.45-2.3 млрд лет; для этой стадии характерна базальная кремнистая высокомагнезиальная вулканическая серия; 2) (ятулийские, людиковийские и калевийские эпизоды) \cong 2.2-1.95 млрд лет. Для второй стадии характерны толеитовые подушечные лавы, гиалокластиты и ферропикрит-базальтовые покровы, ассоциирующие с глубоководными осадками. Распределение REE в толеитах аналогично их распределению в MORB, тогда как ферропикритовые базальты имеют сходство с внутриплитными оливиновыми базальтами континентальной и океанической обстановок (Sharkov, Smolkin, 1997).

Рис. 5. Химический состав изученных протерозойских метапикритов из Кольской сверхглубокой (СГ-3) – матертской и ждановской свит и ферропикритов с поверхности (Hanski, 1992) на различных дискриминационных диаграммах.



- A) Классификационная диаграмма TAS (Le Maitre, 1989). F – фойдит, Pc – пикробазальт, B – базальт, O1 – базальтовый андезит, O2 – андезит, O3 – дацит, S1 – трахибазальт, S2 – базальтовый трахиандезит, S3 – трахиандезит, T – трахит (q < 20 %), трахидацит (q > 20 %), R – риолит, U1 – тефрит (ol < 10 %), базанит (ol > 10 %), U2 – фонотефрит, U3 – тефрифенолит, Ph – фонолит.
- B) Дискриминационная диаграмма AFM (Irvine, Baragar, 1971).
- C) Дискриминационная диаграмма Ti-V (Shervais, 1982).
- D) Дискриминационная диаграмма La-Th (Gill, 1981).

Рис. 6. Химический состав исследованных протерозойских метапикритов матертской и ждановской свит из Кольской сверхглубокой (СГ-3) и ферропикритов с поверхности (Hanski, 1992) на различных дискриминационных диаграммах.



- a) Дискриминационная диаграмма $Ti/100-Zr-Y^*3$ (Pearce, Cann, 1973). A, B = LKT (толеиты с низким содержанием калия), B = OFB (океанические базальты дна), B, C = CAB (известково-щелочные базальты), D = WPB (внутриплитные базальты).
- b) Дискриминационная диаграмма $Nb^*2-Zr/4-Y$ (Meschede, 1986). AI, AII = WPA (внутриплитные щелочные базальты), AI, C = WPT (внутриплитные толеиты), B = обедненные MORB (базальты срединно-океанического хребта), C, D = VAB (базальты вулканической дуги), D = нормальные MORB (базальты срединно-океанического хребта).
- c) Дискриминационная диаграмма $Th-Hf/3-Ta$ (Wood, 1980). A = нормальные MORB (базальты срединно-океанического хребта), B = обогащенные MORB (базальты срединно-океанического хребта) и толеитовые WPB (внутриплитные базальты) и дифференциаты, C = щелочные WPB (внутриплитные базальты) и дифференциаты, D = базальты деструктивных окраин континентов и дифференциаты.
- d) Дискриминационная диаграмма $Th-Zr/117-Nb/16$ (Wood, 1980). Примечание: см. в тексте.

Для более детальной геохимической и геотектонической классификации изученных пикритов использовались различные дискриминационные диаграммы. На дискриминационной диаграмме TAS (рис. 5А) большинство точек изученных образцов попадают в поле пикробазальтов и базальтов. Все фигуративные точки на диаграмме сдвинуты в сторону низких содержаний Na_2O и K_2O . Пикриты с поверхности печенгского комплекса (Hanski, 1992) занимают на диаграмме такую же позицию.

На дискриминационной диаграмме $FeO - Na_2O + K_2O - MgO$ (Irvine, Baragar, 1971) (рис. 5В) оба образца метапикрита попадают в поле толеитов. Низкое содержание $Na_2O + K_2O$ отодвигает их на линию между FeO и MgO . Изученные пикриты с поверхности расположены на той же линии. Положение фигуративных точек также подтверждает разницу в содержании MgO и FeO . В пикритах ждановской свиты содержание MgO выше, чем в пикритах матертской свиты и в пикритах с поверхности (Hanski, 1992). На дискриминационной диаграмме $V-Ti$ (Shervais, 1982) (рис. 5С) фигуративные точки анализов пикрита показывают хорошую корреляцию и находятся на корреляционной линии 50. Такие отношения являются типичными для океанических базальтов дна. Точки пикритов с поверхности лежат на той же линии, но они сдвинуты в сторону повышенных содержаний V и Ti .

Отношение La/Th (рис. 5D) в метапикритах Кольской сверхглубокой скважины соответствует этому отношению в обогащенных MORB (Gill, 1981), отличаясь несколько повышенным содержанием Th . Пикриты с поверхности занимают на диаграмме такую же позицию. Пониженное содержание Th соответствует обогащенным MORB. На тройной диаграмме $Zr - Ti - Y$ (рис. 6а) (Pearce, Cann, 1973), метапикриты из СГ-3 попадают в поле D, т.е. они соответствуют внутриплитным базальтам (ВПБ). На дискриминационной диаграмме $Nb^*2 - Zr/4 - Y$ (рис. 6б) (Meschede, 1986) метапикриты из СГ-3 соответствуют ВПБ. Однако это положение отражает их слабое обогащение Nb и Zr и обеднение Y , а не их геотектоническое положение. На других дискриминационных диаграммах: $Hf/3 - Th - Ta$ и $Zr/117 - Th - Nb/16$ (Wood, 1980) (рис. 6с, d) метапикриты из СГ-3 соответствуют обогащенным MORB и толеитовым ВПБ. Ферропикриты с поверхности занимают такое же положение (Hanski, 1992).

Спектры REE этих пород, нормализованные по хондриту, отличаются от спектров типичных MORB (рис. 7). Они обогащены LREE с монотонным снижением от La до Lu . Спектры субпараллельны и имеют очень слабые Eu аномалии или вообще их не имеют. Ни в спектрах REE пород из свит

(матертская, ждановская), нормализованных по хондриту, ни в спектрах REE изученных пикритов с поверхности не было найдено различий.

Спектры, нормализованные по примитивной мантии, для некогерентных элементов протерозойских пород из матертской и ждановской свит идентичны, что указывает на их геохимическое сходство (рис. 7B и D). Изученные метапикриты отличаются от различных типов MORB – они обогащены некогерентными элементами и обеднены HREE. Типичны отрицательные пики Rb и Sr и положительные Ti.

Спектры REE этих пород сравнивали со спектрами REE, нормализованными по примитивной мантии, океанических островных базальтов, нормальных MORB и обогащенных MORB (Sun, McDonough, 1989). По содержанию REE изученные пикриты ближе к обогащенным MORB. Их спектры обогащены LREE, с постепенным снижением от La до постоянно низкого Lu. Спектры субпараллельны, а Eu аномалии очень слабые или вообще отсутствуют. Спектры, нормализованные по первичной мантии, для некогерентных элементов протерозойских пород из матертской и ждановской свит и ферропикритов, представленных Hanski (1992), идентичны, что указывает на их геохимическое сходство (рис. 7B и D).

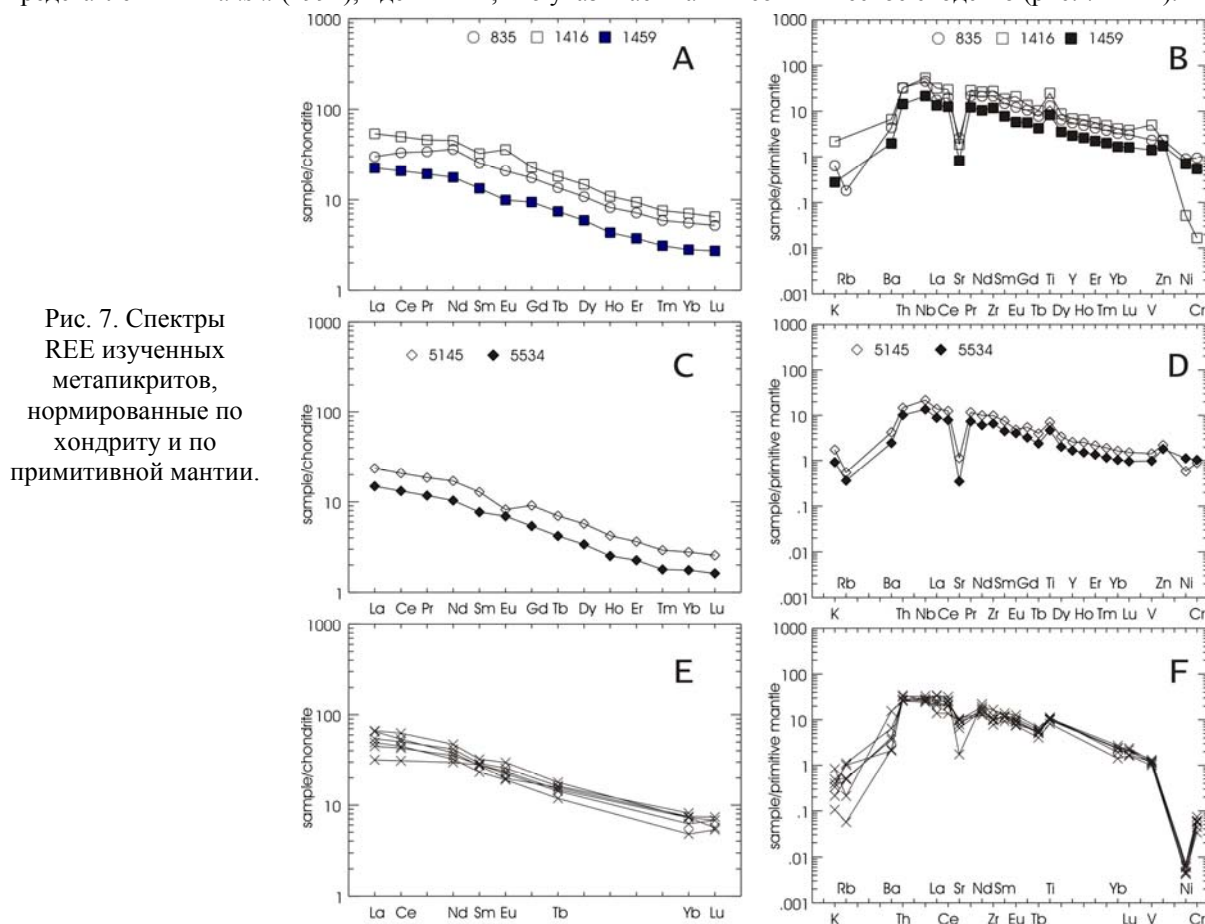


Рис. 7. Спектры REE изученных метапикритов, нормированные по хондриту и по примитивной мантии.

А) и В) Метапикриты из Кольской сверхглубокой (СГ-3) – свита матерт.

С) и D) Метапикриты из Кольской сверхглубокой (СГ-3) – ждановская свита.

Е) и F) Ферропикриты с поверхности (Hanski, 1992).

Нормированные значения хондрита даны по Sun (1982), первичной мантии – по Taylor, McLennan (1985).

7. Заключение

Изученные метапикриты из СГ-3 являются в различной степени измененными породами. Некоторые из них метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации. Содержание большей части главных элементов, высокозарядных, редкоземельных и переходных элементов и Th в исследованных образцах не было нарушено в значительной степени и отражает их первичное магматическое распределение.

В изученных породах оливины были полностью изменены. Сrx обычно имеет гомогенный состав, но иногда наблюдается осцилляционная зональность. Клинопироксены соответствуют авгиту, реже геденбергиту.

Амфиболы встречаются в нескольких генерациях. Первичные керсутиты сосуществуют с клинопироксеном. Амфиболы в каемках вокруг клинопироксенов соответствуют эдениту и ферроэдениту, они сформировались при высоких температурах, по всей вероятности, в процессе остывания магмы.

Вторичные амфиболы, которые образовались при последующем метаморфизме в условиях зеленосланцевой фации, соответствуют актинолитам, ферроактинолитам, вплоть до тремолитов.

В изученных протерозойских метапикритах матертской и ждановской свит содержание SiO₂ варьирует от 38.69 до 48.2 вес.%, MgO – от 10.53 до 33.94 вес.%, Al₂O₃ – от 2.64 до 11.28 вес.%, TiO₂ – от 1.25 до 4.18 вес.%, CaO – от 1.14 до 13.99 вес.%, Fe₂O₃ – от 16.06 до 20.73 вес.%, Mg# – от 50.16 до 77.29 вес.%, и потери при прокаливании – от 3.90 до 10.30 вес.%

По геохимическому критерию пикриты из Кольской сверхглубокой скважины (матертская и ждановская свиты) ближе всего к обогащенным MORB, но, в отличие от последних, они обогащены некогерентными элементами и обеднены HREE. Для них характерны негативные пики Rb и Sr и позитивные Ti.

Спектры REE некогерентных элементов протерозойских пород матертской и ждановской свит и ферропикритов печенгского комплекса с поверхности (*Hanski, 1992*), нормализованные по первичной мантии, идентичны и указывают на их геохимическое сходство.

Исследование выполнено в рамках проекта No. 408 ЮНЕСКО/МПГК и при финансовой поддержке VEGA, грант No. 2/3179/23 и APVT, грант 20-020002.

Литература

- Ayer J.A., Davis D.W.** Neoproterozoic evolution of differing convergent margin assemblages in the Wabigoon Subprovince: Geochemical and geochronological evidence from the Lake of the Woods greenstone belt, Superior Province, Northwestern Ontario. *Precambrian Res.*, v.81, p.155-178, 1997.
- Bayanova T.B., Balashov Yu.A.** Geochronology of paleoproterozoic layered intrusions and volcanites of the Baltic Shield. *Norsk. geol. unders. Special Publ.*, v.7, p.75-80, 1995.
- Chen Y.D., Krogh T.E., Vetrin V.R., Mitrofanov F.P.** Precise zircon geochronology of Archaean rocks samples by the world's deepest continental borehole, SD-3 superdeep well, Kola Peninsula, Russia. *In: Abstracts 8th International Conference on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology, California, 1994*, p.56, 1994.
- Chen Y.D., Krogh T.E., Vetrin V.R., Mitrofanov F.P.** U-Pb geochronology of rocks from the Archaean part of the section through the Kola Superdeep Well. *In: Kola Superdeep. Scientific Results and Research Experience. Moscow, Tekhnoneft'gaz*, 260 p., 1998.
- Dostal J., Baragar W.R.A., Dupuy C.** Petrogenesis of the Natkusiak continental basalts, Victoria Island, NWT. *Can. J. Earth Sci.*, v.23, p.622-632, 1986.
- Gibson A.S.** Major element heterogeneity in Archean to recent mantle plume starting-heads. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v.195, p.59-74, 2002.
- Gill J.B.** Orogenic andesites and plate tectonics. *Springer-Verlag, Berlin*, 389 p., 1981.
- Goddard J.V., Evans J.P.** Chemical changes and fluid-rock interaction in faults of crystalline thrust sheets, northwestern Wyoming, USA. *J. Struct. Geol.*, v.17, p.533-547, 1995.
- Hanski E.J.** Petrology of the Pechenga ferropicrites and cogenetic, Ni-bearing gabbro-wehrlite intrusions, Kola Peninsula, Russia. *Geol. Survey Finland. Bulletin 367. Espoo*, 195 p., 1992.
- Hanski E.J., Smolkin V.F.** Iron- and LREE-enriched mantle source for early Proterozoic intraplate magmatism as exemplified by the Pechenga ferropicrites, Kola Peninsula, Russia. *Lithos.*, v.34, N 1-3, p.107-125, 1995.
- Hanski E.J., Smolkin V.F.** Pechenga ferropicrites and other early Proterozoic picrites in the eastern part of the Baltic Shield. *Precambrian Res.*, v.45, p.63-82, 1989.
- Irvine T.N., Baragar W.R.A.** A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, v.8, p.523-548, 1971.
- Le Bas M.J.** The role of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *Amer. J. Sci.*, v.260, p.267-288, 1962.
- Le Maitre R.W.** A classification of igneous rocks and glossary of terms. *Blackwell, Oxford*, 193 p., 1989.
- Leake B.E., Woolley A.R., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G.** Nomenclature of amphiboles. *Eur. J. Mineral.*, v.9, p.623-651, 1997.
- Leterrier J., Maury R.C., Thonon C., Girard I., Marche L.M.** Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v.59, p.139-154, 1982.
- Melezhik V.A., Sturt B.A.** Discussion. The early Proterozoic Pechenga-Varzuga Belt: A case of Precambrian back-arc spreading by Evgenii V. Sharkov and Valery F. Smolkin (*Precambrian Res.*, v.82, p.133-151, 1997): Comments. *Precambrian Res.*, v.92, p.215-218, 1998.

- Melezhik V.A., Sturt B.A.** General geology and evolutionary history of the Early Proterozoic Polmak-Pasvik-Pechenga-Imandra/Varzuga-Ust'Ponoy Greenstone Belt in the north-eastern Baltic Shield. *Earth Science Reviews*, v.36, p.205-241, 1994.
- Meschede M.** A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chem. Geol.*, v.56, p.207-218, 1986.
- Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginzburg I.V., Ross M., Seifert F.A., Zussman J., Aoki K., Gottardi G.** Nomenclature of pyroxenes. *Amer. Mineralogist*, v.73, p.1123-1133, 1988.
- Pearce J.A., Cann J.R.** Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v.19, p.290-300, 1973.
- Rocks and minerals at great depth and on the surface: Subprojects. Eds.: Mitrofanov F.P., Gorbatshevich F.F. *Apatity, Geological Institute of Kola Science Centre RAS*, 162 p., 1999 (in Russian and English).
- Sharkov E.V., Smolkin V.F.** The early Proterozoic Pechenga-Varzuga Belt: As case of Precambrian back-arc spreading. *Precambrian Res.*, v.82, p.131-151, 1997.
- Shervais J.W.** Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v.59, p.101-118, 1982.
- Smolkin V.F.** The Paleoproterozoic (2.5-1.7 Ga) Midcontinent Rift System of the northeastern Fennoscandian Shield. *Can. J. Earth Sci.*, v.34, N 4, p.426-443, 1997.
- Spišák J., Dostal J., Hovorka D., Meres S., Smirnov Yu.P.** Clinopyroxenes composition of the picrites from the Kola Superdeep Borehole KSDB-3 (Proterozoic Group, Pechenga Complex). *EUG XI Strasbourg-France, 8-12 April 2001, Journal of Conference Abstracts, Cambridge Publ.*, v.6, N 1, p.581, 2001.
- Spišák J., Dostal J., Hovorka D., Méres Š., Smirnov Yu.P.** Clinopyroxenes from the rocks of the picrite family from the Kola Superdeep Borehole (KSDB-3). In: *The results of the study of the deep substance and physical processes in the Kola Superdeep Borehole section down to a depth of 12 261 m. Apatity, Poligraph*, v.153, p.38-41, 2000.
- Sun S.S.** Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.46, p.179-192, 1982.
- Sun S.S., McDonough W.F.** Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the Ocean Basins, Spec. Publ. Vol. Geol. Soc. Lond.*, v.42, p.313-345, 1989.
- Taylor S.R., McLennan S.M.** The continental crust: Its composition and evolution. *Blackwell, Oxford*, 312 p., 1985.
- The Superdeep Well of the Kola Peninsula. Ed.: Kozlovsky Ye.A. *Springer-Verlag, Berlin*, 558 p., 1987.
- Timmerman M.J., Daly J.S.** Sm-Nd evidence for late Archaean crust formation in the Lapland-Kola Mobile Belt, Kola Peninsula, Russia and Norway. *Precambrian Res.*, v.72, p.97-107, 1995.
- Vetrin V.R., Turkina O.M., Kremenetsky A.A., Nordgulen O.** Correlation and petrology of Archaean rocks from the Kola Superdeep Borehole. The results of the study of the deep substance and physical processes in the Kola Superdeep Borehole section down to a depth of 12261 m. *IGCP Project No 408, Apatity*, p.52-57, 2000.
- Vetrin V.R., Turkina O.M., Nordgulen O.** Surface analogues of "grey gneiss" among the Archaean rocks in the Kola Superdeep Borehole. *Kola Science Centre RAS, Apatity*, 81 p., 1999 (in English and Russian).
- Winchester J.A., Floyd P.A.** Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem. Geol.*, v.20, p.325-343, 1977.
- Wood D.A.** The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v.50, p.11-30, 1980.
- Zulauf G., Palm S., Petschick R., Spies O.** Element mobility and volumetric strain in brittle and brittle-viscous shear zones of the superdeep well KTB (Germany). *Chem. Geol.*, v.156, p.135-149, 1999.
- Архейский комплекс в разрезе Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). Под ред. Митрофанова Ф.П. *Апатиты, КНЦ РАН*, 187 с., 1991.
- Бибикова Е.В., Ветрин В.Р., Кирилова Т.И., Макаров В.А., Смирнов Ю.П.** Геохронология и корреляция пород с нижних частей разреза Кольской сверхглубокой скважины. *ДАН*, т.332(33), с.360-363, 1993.
- Дук Г.Г., Кольцова Т.В., Бибикова Е.В., Левченков О.А., Морозова И.М., Яковлева С.З., Богомолов Е.С., Федосенко А.М., Друбецкой Е.П.** Глубинный парагенез и возраст пород Кольской сверхглубокой скважины. В кн.: *Изотопная геохронология докембрия. Л., Наука*, с.72-85, 1989.
- Кольская сверхглубокая. Исследование глубинной структуры континентальной коры бурением Кольской сверхглубокой скважины. Под ред. Е.А. Козловского. *М., Недра*, 490 с., 1984.
- Предовский А.А., Мележик В.А., Болотов В.И.** Вулканизм и седиментогенез докембрия северо-востока Балтийского щита. *Л., Наука*, 185 с., 1987.