

Особенности никелевой минерализации в мезоархейских коматиитах Золотых порогов (Каменноозерская структура)

Кучеровский Г. А.^{ID}, Арестова Н. А.^{ID}, Климова Е. В.

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, gleb.kuchеровskiy@yandex.ru

Аннотация. Изучена толща мезоархейских коматиитов Каменноозерской зеленокаменной структуры в районе Золотых Порогов. Установлено сложное строение потоков коматиитов: потоки включают автомагматическую брекчию, закалочную (спинифекс-структурную) и, при мощности потока более 0.5 м, кумулятивную части. Закалочная часть потоков содержит 1200–1300 ppm Ni, который входит в состав серпентина и магнетита. Кумулятивная часть потоков коматиитов отличается более высоким содержанием Ni (1600–1900 ppm), который входит в состав сульфидных фаз – миллерита и зигенита. Сульфиды замещаются гарниеритом – силикатным агрегатом гипергенного происхождения. В исследованных коматиитах установлены пониженные (относительно примитивной мантии и типичных содержаний в коматиитах) содержания Ni, Cu и Au, что указывает на ликвацию расплава в процессе эволюции с последующим отделением сульфидной фазы.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит, Карельская провинция, мезоархей, зеленокаменный пояс, коматииты, никель.

Features of Ni-mineralization in Mesoarchean komatiites of the Zoloty Porogi area (Kamennoozerskaya structure)

Kucherovsky G. A.^{ID}, Arestova N. A.^{ID}, Klimova E. V.

IGG RAS, St. Petersburg, gleb.kuchеровskiy@yandex.ru

Abstract. The Mesoarchean komatiite sequence of the Kamennoozerskaya greenstone structure in the Zoloty Porogi area was studied. A complex structure of komatiite flows was established: the flows include automagmatic breccia, quench (spinfex-structural) and, if the flow thickness is more than 0.5 m, cumulative parts. The quench part of the flows contains 1200–1300 ppm Ni, which is part of serpentine and magnetite. The cumulative part of komatiite flows is distinguished by a higher Ni content (1600–1900 ppm), which is part of sulfide phases – millerite and siegenite. Sulfides are replaced by garnierite – a silicate aggregate of supergene origin. In the studied komatiites, reduced (relative to the primitive mantle and typical contents in komatiites) contents of Ni, Cu and Au were established. This indicates the liquation of the melt during the evolution process with subsequent separation of the sulfide phase.

Key words: Fennoscandian Shield, Karelian Province, Mesoarchean, greenstone belt, komatiites, nickel.

Введение

Каменноозерская зеленокаменная структура – часть мезоархейского Сумозерско-Кенозерского зеленокаменного пояса – расположена в северной части Водлозерского домена. Эта структура сложена вулканическими и вулканогенно-осадочными породами различного состава: дацитами, андезитами, базальтами, коматиитами (Ранний докембрий..., 2005). Коматииты архейских зеленокаменных поясов являются одними из важнейших пород, ассоциирующих с медно-никелевыми и платинометалльными месторождениями. Коматииты Каменноозерской структуры связаны как с медно-никель-кобальтовой, так и с рассеянной платинометалльной минерализацией (Кулишевич, 2018). Несмотря на хорошую изученность коматиитов, значительный интерес представляет непосредственный механизм возникновения рудной минерализации и её распределение в толще коматиитов.

Коматииты Каменноозерской структуры обнажены в районе Золотых порогов – участка, расположенного в нижнем течении реки Кумбуксы (рис. 1). Возраст коматиитов был определён Sm-Nd методом равным 2916 ± 117 млрд лет (Puchtel et al., 1999). В обнажениях наблюдаются моноклинально залегающие покровы коматиитов, в которых можно выделить отдельные потоки и их части: закалочные зоны со спинифекс-структурами, массивные зоны, и зоны вулканической брекчии. Несмотря на то, что породы преобразованы в условиях зеленосланцевой фации (Ранний докембрий..., 2005), реликты первично-магматических структур сохранились и наблюдаются непо-

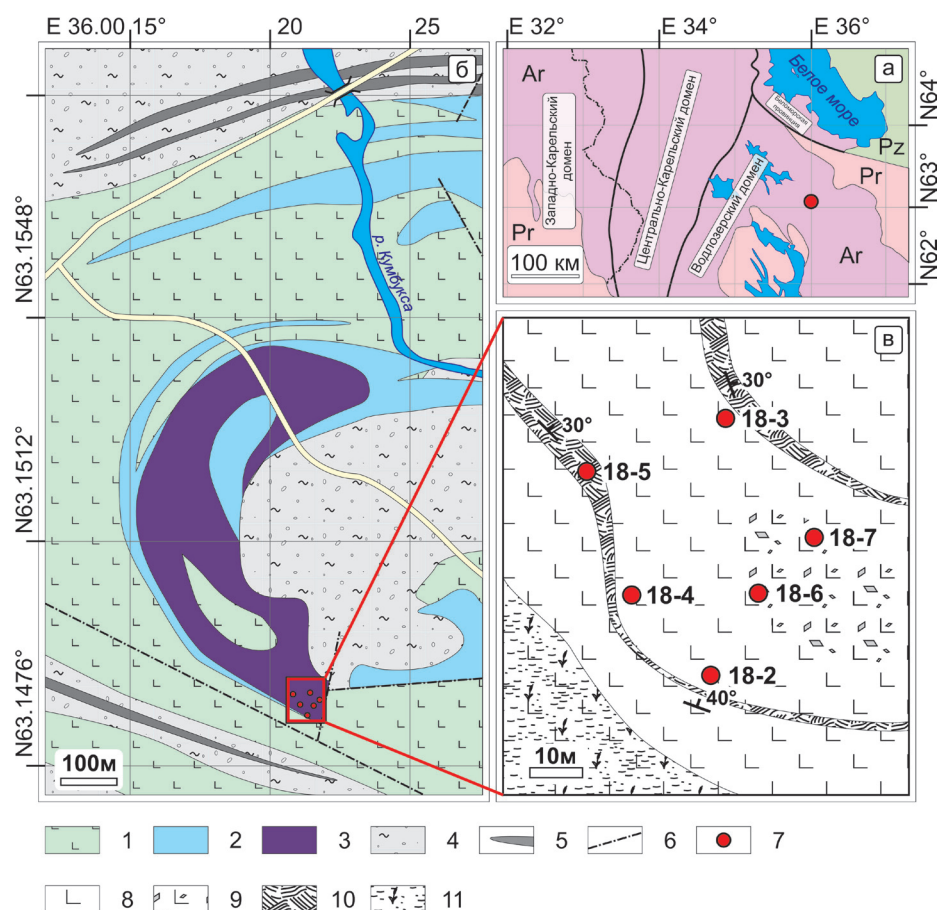


Рис. 1. Схемы: а – расположения участка «Золотые пороги»; б – геологического строения участка «Золотые пороги», составленная по материалам (Кожевников и др., 1983; Кулешевич и др., 2005), с привлечением материала авторов; в – точки отбора образцов. Условные обозначения: 1 – метабазальты; 2 – серпентинитовые сланцы; 3 – метакоматииты; 4 – вулканогенно-осадочная толща; 5 – колчеданы; 6 – тектонические нарушения; 7 – точки отбора образцов; 8 – массивные части потоков коматиитов; 9 – карбонатизация; 10 – спинефкс-структурные части потоков коматиитов; 11 – четвертичные отложения

Fig. 1. Maps: а – location of the Zolotyie Porogi area; б – geological structure of the Zolotyie Porogi area, compiled based on materials (Kozhevnikov et al., 1983; Kuleshevich et al., 2005), with the involvement of the authors' material; в – sampling points. Legend: 1 – metabasalts; 2 – serpentinite schists; 3 – metakomatiites; 4 – volcanogenic-sedimentary mass; 5 – pyrites; 6 – tectonic faults; 7 – sampling points; 8 – massive parts of komatiite flows; 9 – carbonatization; 10 – spinefex-structural parts of komatiite flows; 11 – Quaternary deposits

средственно в обнажениях. Покровы коматиитов секутся редкими серпентиновыми прожилками и линзами. Породы коматиит-базальтовой ассоциации перекрыты вулканогенно-осадочной толщей, метаморфизованной в условиях эпидот-амфиболитовой фации. На контакте пород коматиит-базальтовой и вулканогенно-осадочной толщ расположены горизонты колчеданных руд, сложенных преимущественно пиритом.

В процессе изучения геологического строения толщи коматиитов было установлено гетерогенное строение отдельных лавовых потоков. Кровля каждого потока сложена автомагматической брекчией, далее расположена зона спинефкс-структурных коматиитов и, ближе к подошве потока, находится массивная часть. Мощность потоков варьирует он нескольких десятков сантиметров до первых метров, причём в потоках мощностью менее полуметра массивной части не наблюдается.

Материалы и методы

Химический состав петрогенных (главных) элементов в породах определен в ЦЛ ВСЕГЕИ методом XRF на спектрометре ARL-9800, содержание редких и редкоземельных элементов в породе проанализировано методом ICP-MS на масс-спектрометре ELAN-DRC-6100 по стандартным методикам (ВСЕГЕИ) (табл. 1). Содержание главных элементов приведено в массовых процентах,

Таблица 1. Химический состав коматиитов Золотых Порогов
 Table 1. Chemical composition of komatiites of the Zolotyie Porogi area

Структура	Спинифекс			Массивная	
№ пробы	18-2	18-2а	18-5	18-6	18-2г
SiO ₂ %	41.81	41.39	41.35	36.72	40.77
Al ₂ O ₃ %	5.84	6.21	6.91	3.40	5.11
TiO ₂ %	0.29	0.26	0.23	0.13	0.16
Fe ₂ O ₃ общ %	11.77	11.21	10.93	8.32	10.3
MnO %	0.18	0.19	0.23	0.16	0.29
MgO %	26.62	27.22	26.88	34.33	30.63
CaO %	5.94	5.48	5.78	2.47	3.34
Na ₂ O %	0.13	<. 1	0.25	<. 1	<.1
K ₂ O %	0.016	0.014	0.021	0.013	0.021
ППП %	7.05	7.66	7.4	14.3	9.2
Сумма %	99.66	99.76	99.99	99.87	99.86
Li	4.43	3.88	3.54	3.65	2.55
Sc	19.80	18.00	16.60	10.90	13.30
V	109	104	104	62.10	96.70
Cr	2330	2170	2060	2500	1730
Co	88.10	89.20	89.80	100	96.20
Ni	1300	1180	1330	1870	1620
Cu	5.37	9.22	55.50	3.47	6.29
Sr	2.88	2.51	2.41	11.70	1.54
Y	5.94	4.89	3.99	2.27	3.15
Zr	9.37	16.70	9.15	7.38	5.17
Nb	0.72	0.58	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Ba	5.17	6.61	5.34	4.59	3.88
La	1.25	1.04	0.93	0.27	0.55
Ce	3.00	2.63	1.88	0.77	1.20
Pr	0.44	0.38	0.27	0.11	0.16
Nd	2.10	1.81	1.37	0.65	0.80
Sm	0.69	0.58	0.45	0.25	0.30
Eu	0.30	0.30	0.41	0.12	0.09
Gd	0.93	0.75	0.58	0.30	0.43
Tb	0.17	0.13	0.11	0.05	0.08
Dy	1.05	0.92	0.72	0.44	0.53
Ho	0.23	0.19	0.16	0.09	0.11
Er	0.64	0.56	0.42	0.26	0.34
Tm	0.09	0.07	0.07	0.04	0.05
Yb	0.58	0.52	0.43	0.24	0.33
Lu	0.09	0.07	0.06	0.04	0.06
Hf	0.27	0.35	0.24	0.16	0.11

содержание редких и редкоземельных элементов приведено в ppm. Состав минералов исследован в ИГГД РАН на сканирующем электронном микроскопе JEOL-JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) (табл. 2, 3). Результаты приведены к 100 %. Измерения проводились с использованием нейтронно-активационного анализа в Лаборатории нейтронной физики

им. Франка Объединённого института ядерных исследований. Измерения производились на установке ИБР-2, с помощью инструмента REGATA. Пределы обнаружения, определённые с использованием стандарта, составили для Au – 0.5 ppb, Re – 6 ppb, Ag – 0.15 ppm, Ir – 9 ppm, Pd – 30 ppm.

Таблица 2. Химический состав минералов (за исключением сульфидов),
 слагающих коматииты Золотых Порогов

Table 2. Chemical composition of minerals (except for sulfides)
 composing the komatiites of the Zolotyie Porogi area

Обр.	Минерал	тчк.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	ZnO	NiO	P ₂ O ₅	Cl	CoO	CuO
18-5	Тремолит	2	60	0	0.2	0.3	3.1	0	22.3	14.1	0	0	0	0	0	0
18-5	Апатит	7	0.3	0	0	0	0.5	0	0	55.3	0	0	43.9	0.1	0	0
18-4	Гарниерит	11	41.5	0	5.2	0.8	3.2	0	26.3	0	0	23.0	0	0	0	0
18-4	Гарниерит	13	36.3	0	0.4	0	0.5	0	4.8	0	0	56.0	0	0.1	0.6	1.4
18-4	Гарниерит	15	38.8	0	3.1	0.4	2.0	0	18.5	0	0	36.9	0	0.1	0.2	0
18-4	Гарниерит	17	40.1	0	3.2	1.3	1.9	0	18.3	0	0	34.0	0	0	0	1.1
18-4	Гарниерит	19	44.6	0	3.9	0	1.7	0	19.9	0	0	23.3	0	0	0	6.7
18-4	Гарниерит	21	39.5	0	4.2	0	6.1	0	20.6	0	0	28.3	0	0.2	1.1	0
18-4	Гарниерит	27	38.4	0	2.4	0	1.5	0	14.6	0	0	43.1	0	0	0	0
18-4	Гарниерит	28	33.9	0	0	0	0.5	0	2.3	0	0	61.4	0	0	0	1.5
18-4	Гарниерит	29	41.8	0	2.4	0.6	1.4	0	16.4	0	0	35.4	0	0	0	2.1
18-2v	Пирофанит	11	0.8	54.6	0	0	8.9	30.6	5.1	0	0	0	0	0	0	0
18-2v	Пирофанит	13	1.1	52.6	0	0	7.2	36.1	3.0	0	0	0	0	0	0	0
18-4	Пирофанит	2	1.5	53.5	0	0	11.4	27.8	5.9	0	0	0	0	0	0	0
18-4	Пирофанит	6	0	55.4	0	0	10.3	31.0	3.3	0	0	0	0	0	0	0
18-4	Пирофанит	22	0	54.4	0	0	11.6	30.8	3.3	0	0	0	0	0	0	0
18-2v	Магнетит	1	0	0	0	2.5	95.5	0.6	0.6	0	0	0.8	0	0	0	0
18-2v	Магнетит	12	0	0	0	0.6	97.0	0.8	0.8	0	0	0.8	0	0	0	0
18-2v	Магнетит	4	0	0	0	1.2	97.5	0.7	0	0	0	0.7	0	0	0	0
18-4	Магнетит	1	0	0	0	0.9	96.9	0.4	0.9	0	0	0.9	0	0	0	0
18-4	Магнетит	5	0	0	0	2.0	96.5	0.7	0	0	0	0.9	0	0	0	0
18-4	Магнетит	23	0	0	0	2.0	96.5	0.4	0	0	0	1.2	0	0	0	0
18-4	Магнетит	25	0	0	0	2.7	95.7	0.7	0	0	0	0.9	0	0	0	0
18-5	Магнетит	5	0.8	0	0	0.4	98.1	0	0.7	0	0	0	0	0	0	0
18-5	Магнетит	12	0.7	0	0	1.3	97.1	0	0.3	0	0	0.6	0	0	0	0
18-5	Магнетит	8	0.5	0	0	0	98.7	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0
18-5	Магнетит	9	0	0	0	0	99.4	0	0	0	0	0.6	0	0	0	0
18-5	Клинопироксен	6	55.0	0	0.1	0.2	10.9	0	21.1	12.6	0	0	0	0	0	0
18-2v	Рутил	2	0	98.5	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18-4	Хромит	4	0.7	0.4	11.6	55.1	19.1	0	7.4	0	5.7	0	0	0	0	0
18-5	Хромит	11	0.6	0.3	10.9	49.4	25.4	6.9	1.4	0.2	4.9	0	0	0	0	0
18-2v	Серпентин	3	50.1	0	3.0	0.3	2.2	0	44.4	0	0	0	0	0	0	0
18-2v	Серпентин	5	43.2	0	11.2	0	4.0	0	41.7	0	0	0	0	0	0	0
18-2v	Непуит	9	42.2	0	1.8	0	1.4	0	19.9	0	0	34.2	0	0	0.5	0
18-2v	Серпентин	10	44.1	0	8.2	0.8	3.2	0	42.5	0	0	1.3	0	0	0	0
18-4	Серпентин	3	49.0	0	4.1	0.4	2.7	0.3	43.6	0	0	0	0	0	0	0
18-4	Серпентин	10	45.6	0	8.1	0.8	2.7	0.1	42.8	0	0	0	0	0	0	0
18-4	Серпентин	16	51.7	0	1.5	0	1.8	0	45.1	0	0	0	0	0	0	0
18-5	Серпентин	1	46.7	0	7.1	0.3	6.2	0.1	39.6	0	0	0.1	0	0	0	0
18-5	Серпентин	3	42.8	0	12.1	0.7	6.1	0.3	38.0	0	0	0.1	0	0	0	0
18-5	Титанит	4	30.5	40.5	0	0	1.1	0	0	27.9	0	0	0	0	0	0

Таблица 3. Химический состав сульфидов, содержащихся в коматиитах Золотых Порогов
 Table 3. Chemical composition of sulfides contained in the komatiites of the Zolotyie Porogi area

Обр.	Минерал	тчк	Fe	Ni	S	Co	Cu
18-2v	Миллерит	6	0.2	64.9	34.4	0.5	0
18-2v	Миллерит	8	0.2	64.8	34.8	0.3	0
18-4	Миллерит	8	0.5	64.2	35.3	0	0
18-4	Миллерит	9	0.7	64.1	35.0	0.1	0
18-4	Зигенит	7	0.4	42.6	41.7	15.3	0
18-4	Зигенит	12	0.5	45.6	41.3	11.9	0.6

Результаты и обсуждение

Минеральный состав массивных и спинифекс-структурных частей потоков заметно отличаются. Спинифекс-структурные разности сложены игольчатыми скелетными кристаллами оливина, замещёнными мелкозернистым серпентин-магнетитовым агрегатом (рис. 2 а). Серпентин представлен антигоритом с существенным содержанием Al_2O_3 (2–14.5 %) и FeO (1.8–13.6 %). Содержание NiO и MnO не превышает 0.5 %. Интерстиции между «иголками» были заполнены, авгитом, на что указывает его реликт, сохранившийся в крупном зерне магнетита (рис. 2 в). В настоящее время авгит замещён тремолитом. В качестве аксессуарных минералов в спинифекс-структурных разностях содержатся апатит, титанит и хромит, по краям замещённый магнетитом (рис. 2 б). Размер ске-

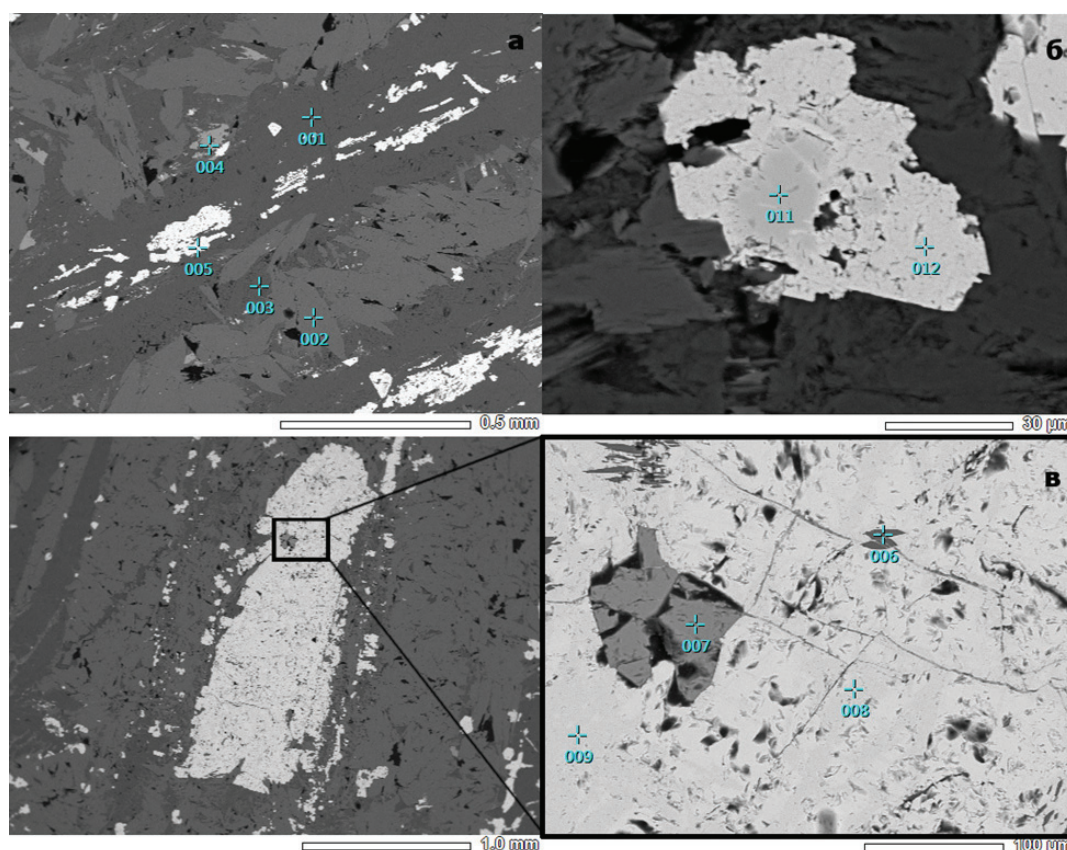


Рис. 2. Изображение спинифекс-структурного коматиита (обр. 18-5) в отраженных электронах: а – реликты первично-магматической структуры; б – зерно хромита, замещающее магнетитом; в – реликты пироксена, сохранившиеся внутри крупного зерна магнетита. Цифрами обозначены минералы, название и химический состав которых указаны в табл. 2

Fig. 2. Image of spinifex-structured komatiite (sample 18-5) in reflected electrons: а – relics of the primary magmatic structure; б – chromite grain replaced by magnetite; в – pyroxene relics preserved inside a large magnetite grain. The numbers indicate minerals whose names and chemical compositions are given in Table 2

летных кристаллов вариативен: у кровли потока иголки могут достигать размера 10 мм длиной и 1 мм шириной, увеличивая свой размер по мере приближения к центру потока. Для наиболее крупнозернистых разностей длина «иголок» может достигать 50 мм при ширине около 5 мм. Ориентация «иголок» может быть как хаотичной, так и складываться в однонаправленные кластеры размером 50–100 мм. Автомагматическая брекчия сложена обломками спинифекс-структурных коматиитов и микроскопически им идентична.

Массивные разности коматиитов сложены преимущественно серпентином и магнетитом. Основная масса серпентина представлена антигоритом с существенной примесью Al_2O_3 (1.5–11.2 %) и FeO (1.8–13.6%). Содержание MnO не превышает 0.5 %. Содержание NiO может достигать 2.5 %, но в большинстве зёрен никель не определяется. Антигорит образует мелкозернистую, хаотично ориентированную массу. Массивные коматииты часто пронизаны прожилками хризотила и амезита. Химический состав этих минералов не отличается от состава основной массы серпентина, диагностировать их позволяет габитус и оптические свойства. Также в сростании с миллеритом диагностировано единичное зерно непуита. Магнетит образует скопления, проявляющие первично-магматическую идеоморфнозернистую структуру. Так скопления зёрен магнетита трассируют контуры зёрен оливина, в настоящее время полностью замещенного серпентином. Вероятно, размер зёрен оливина варьировал от 2–3 до 10 мм. Для массивных разностей характерен широкий набор аксессуарных минералов: хромит, пирофанит, ильменит, рутил, барит, моноцит, гематит, халькозин, зигенит, миллерит и гарниерит. Также было обнаружено единичное включение теллурида палладия. В массивных разностях коматиитов иногда наблюдаются прожилки, трещины и линзы, выполненные волокнистым агрегатом серпентина.

Химический состав спинифекс-структурных и массивных коматиитов в целом сходен, но имеет некоторые различия. Так содержание кремнезёма в спинифекс-структурных разностях несколько выше (41.4–41.8 %), чем в массивных (36.7–40.7 %). Также в спинифекс-структурных разностях выше содержание CaO (5.5–5.9 % против 2.5–3.3 % в массивных), TiO_2 (0.23–0.29 % против 0.13–0.16 % в массивных) и Al_2O_3 (5.8–6.9 % против 3.4–5.1 % в массивных разностях). Содержание MgO наоборот выше в массивных разностях: 30.6–34.3 % против 26.6–27.2 % в спинифекс-структурных разностях. Содержание Na_2O K_2O крайне низкое для обеих разностей и лежит ниже 0.3 %.

Содержание редких элементов в коматиитах примерно соответствует составу примитивной мантии (рис. 3). Для всех разностей породы характерна отрицательная стронциевая аномалия ($\text{Sr}/\text{Sr}^* = 0.1$), которая не наблюдается только в одной пробе массивных коматиитов, содержащей значительное количество вторичного карбоната. Также в породах наблюдаются как положительные, так и отрицательные европиевые аномалии ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.7\text{--}2.5$), причём как в массивной, так и в спинифекс-структурной разностях преобладает положительная европиевая аномалия.

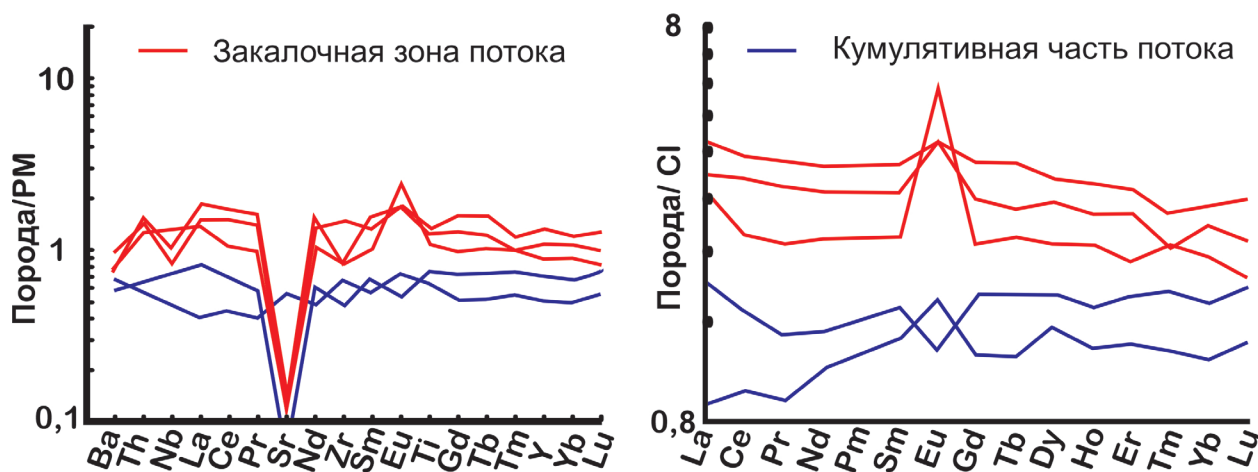


Рис. 3. Распределение редких и редкоземельных элементов в коматиитах

Fig. 3. Distribution of rare and rare earth elements in komatiites

Распределение РЗЭ для спинифекс-структурных разностей имеет слегка обогащённый ЛРЗЭ характер ($\text{La/Yb} = 1.1\text{--}1.5$), массивные разности, наоборот показывают деплитированное распределение ЛРЗЭ ($\text{La/Yb} = 0.8$). Содержание никеля в породе варьирует от 1180 до 1870 ppm. Содержание хрома – от 1300 до 2600, $\text{Cr/Ni} = 1.1\text{--}1.8$. Наиболее высокие содержания Ni и Cr наблюдаются в массивной разности породы.

Никель в коматиитах присутствует, как в виде изоморфной примеси в породообразующих минералах, так и в виде собственной фазы. Изоморфные примеси никеля определяются во всех типах коматиитов в серпентине и магнетите. В серпентине содержание NiO варьирует от 0.07 до 2.5 % в отдельных зёрнах (за исключением единственного обнаруженного зерна непюита, где содержание NiO = 34.2 %). Магнетит может содержать от 0.3 до 1.5 % NiO. При этом в одном образце разные генерации магнетита могут содержать различное количество никеля. В образце 18-3а 0.5 % NiO содержит ильменит.

В массивных разностях коматиитов никель не только входит в состав серпентина и магнетита, но и может образовывать собственные фазы, как сульфидные, так и силикатные. Из пяти исследованных образцов массивных разностей коматиитов сульфиды никеля были обнаружены в трёх. Сульфидные фазы представлены миллеритом и зигенитом. По миллериту развивается гипергенный силикатный агрегат переменного состава (гарниерит). Как правило, зёрна сульфидов встречаются среди скоплений магнетита, трассирующих реликты оливина.

Содержание Ni в кумулятивных частях потока в 1.2–1.6 раз выше, чем в закалочной зоне. Такое распределение может быть связано с процессами кристаллизационной дифференциации внутри потока. Первой начинает кристаллизоваться закалочная – спинифекс-структурная часть потока. При этом кристаллизуется эвтектический состав, представленный пироксеном и оливином. Никель, как несовместимый элемент, распределяется преимущественно между оливином и остаточным расплавом, при кристаллизации которого также входит в состав оливина и магнетита. Модель внутривещного дифференциации никеля в коматиитах была обоснована А. Б. Вревским (Вревский и др., 2003). Он предложил модель, согласно которой спинифекс-структурные части потока содержат меньше никеля, чем кумулятивные в связи с кристаллохимическими особенностями скелетных кристаллов оливина. Ввиду того, что первичных оливинов не сохранилось, невозможно сказать какой из процессов внёс больший вклад в фракционирование Ni внутри потока.

Определяющую роль в образовании медно-никелевых месторождений и месторождений ЭПГ играет наличие в расплаве сульфидной фазы. Как было показано Барнесом и Майером (Barnes, Maier, 1999), в присутствии сульфидного расплава медь, никель и благородные металлы будут входить преимущественно в сульфидную фазу. Между сульфидным и силикатным расплавом медь, никель и ЭПГ также будут распределяться неравномерно. Из-за различия коэффициентов распределения в два порядка в случае сосуществования сульфидного и силикатного расплава, силикатная фаза будет значительно обеднена ЭПГ по сравнению с медью и никелем.

Чтобы проверить предположение, происходила ли ликвация в процессе эволюции расплава для двух образцов (18-5, 18-6) был сделан измерение содержаний благородных металлов. Содержания благородных металлов оказались ниже пределов обнаружения прибора.

Как показано на рис. 3 распределение редких элементов образцах 18-5 и 18-6, кроме Eu и Sr в целом соответствует их распределению в примитивной мантии. Этот факт позволяет предположить, что в случае отсутствия ликвации, распределение Cu, Au и ЭПГ также будут соответствовать значениям в мантии. Содержание Ni, вероятно, будет несколько ниже, поскольку коэффициент распределения Ni между силикатным расплавом и оливином рестита достаточно высокий – 5.9 (Gaetan, Grove, 1997). В случае разделения расплава на сульфидную и силикатную часть, концентрации Ni, Cu и Au будут снижаться пропорционально их коэффициентам распределения. Нормированные на примитивную мантию (Barnes, Maier, 1999) содержания Ni составляют 0.65–0.94, Cu – 0.12–0.33 (кроме одного анализа), Au – менее 0.47. Такое распределение этих элементов вполне соответствует предположению, что в процессе эволюции расплава от него отделилась сульфидная фаза. Далее, после излияния на поверхность, коматиитовая лава при контакте с водой абсорбирует атмосферную

серу, в результате чего образуются низкотемпературные гидротермальные минералы – миллерит и зигенит. С таким предположением хорошо согласуется результат изучения изотопного состава серы в колчеданных рудах исследованного района (Высоцкий и др., 2023). Согласно выводам С. В. Высоцкого и коллег, источником серы, входящей в сульфиды колчеданных руд района Золотых Порогов, были сульфаты морской воды, несущие изотопные метки, характерные для атмосферной серы фотолитического генезиса.

Заключение

Изучив распределение никеля и его минералов в коматиитах можно предложить следующую модель формирования никелевой минерализации. При плавлении мантийного источника образуется магма, богатая Ni. В процессе подъёма происходит разделение расплава на сульфидную и силикатную фазы, в результате чего силикатный расплав получается обеднённым ЭПГ, Au, Cu и в меньшей степени Ni. Далее, при излиянии лав на поверхность Ni распределяется преимущественно в центральных частях потоков. На следующей стадии происходит низкотемпературное метаморфическое преобразование породы при участии богатых серой флюидов. В результате этого процесса оливин преобразуется в серпентин и магнетит, часть никеля связывается с атмосферной серой, образуя миллерит и зигенит. В дальнейшем, при выведении пород на дневную поверхность, сульфиды разрушаются, образуя гарниерит.

Благодарности

Работа выполнена по теме НИР-FMUW-2025-0003 с использованием оборудования ЦКП «АИРИЗ».

Литература

1. Вревский А. Б., Матреничев В. А., Ружьева М. С. Петрология коматиитов Балтийского щита и изотопно-геохимическая эволюция их мантийных источников // Петрология. 2003. Т. 11, № 6. С. 587–617.
2. Высоцкий С. В., Веливецкая Т. А., Игнатьев А. В., Асеева А. В., Яковенко В. В. Влияние архейской атмосферы на формирование вулканогенно-осадочных сульфидных руд (по данным мультиизотопного состава серы) // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2023. № 4 (230). С. 70–81. doi:10.37102/0869-7698_2023_230_04_5.
3. Кожевников В. Н., Кулешевич Л. В., Фурман В. Н. Структурный анализ архейских образований участка Золотые Пороги (Восточная Карелия) // Операт.-информ. материалы. Петрозаводск, 1983. С. 47–51.
4. Кулешевич Л. В. Благоприятная минерализация в коматиитах и интрузивных ультрабазитах в архейских зеленокаменных поясах Карелии (обрамление Водлозерского блока) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 226–229.
5. Кулешевич Л. В., Фурман В. Н., Федюк З. Н. Перспективы золотоносности Каменоозерской структуры Сумозерско-кенозерского зеленокаменного пояса // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск. Изд-во: КарНЦ РАН, 2005. С. 50–67.
6. Ранний докембрий Балтийского щита / Ред. В. А. Глебовицкий. СПб. Изд-во: Наука, 2005. 711с.
7. Barnes S. J., Maier W. D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids // Short Course Notes-Geological Association of Canada. 1999. V. 13. P. 69–106.
8. Gaetani G. A., Grove T. L. Partitioning of moderately siderophile elements among olivine, silicate melt, and sulfide melt: constraints on core formation in the Earth and Mars // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1997. V. 61, No. 9. P. 1829–1846.
9. Puchtel I. S., Hofmann A., Amelin Y., Garbe-Schönberg C., Samsonov A., Shchipansky A. Combined mantle plume-island arc model for the formation of the 2.9 Ga Sumozero-Kenozero greenstone belt, SE Baltic Shield: Isotope and trace element constraints // Geochimica et cosmochimica acta. 1999. V. 63, No. 21. P. 3579–3595.