

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ Cu-Ni МЕСТОРОЖДЕНИЯ КЕЙВИТСА, СЕВЕРНАЯ ФИНЛЯНДИЯ, ПО ИЗОТОПНЫМ ДАННЫМ СЕРЫ И УГЛЕРОДА

© 2003 г. Л. Н. Гриненко*, Е. Хански**, В. А. Гриненко***

*Московский государственный университет им. Ломоносова
Геологический факультет
119899 Москва, Воробьевы горы

**Геологическая служба Финляндии, P.O. Box 77, FIN-96101 Rovaniemi, Finland

***Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
119991, ГСП-1, Москва, ул. Косыгина, 19

Поступила в редакцию 18.06.2001 г.

Специфической особенностью сульфидного Cu-Ni-PGE-Au месторождения Кейвитса является приуроченность его к верхней части ультрамафитовой зоны расслоенной интрузии, содержащей большое количество первичных магматических минералов с ОН-группой, хлором, фтором и редкими землями. Проведено комплексное изучение изотопного состава и содержания серы и углерода в разных типах руд месторождения, породах интрузии, ксенолитах коматиитов в ней, а также в породах вмещающей толщи. Установлено, что все изученные объекты обогащены тяжелым изотопом серы ^{34}S , но различаются по степени обогащения и гомогенизации. Содержание изотопа ^{34}S в различных типах руд возрастает в направлении: обычная руда – промежуточная руда – Ni-PGE руда – фальшивая руда и составляет ($\delta^{34}\text{S}$ среднее, в ‰): 3.8 – 6.1 – (6.1) – 8.2, соответственно. Оливиновые пироксениты интрузии как безрудные, так и в пределах рудного тела в среднем до 9.3‰ обогащены изотопом ^{34}S . Вмещающие интрузию осадочные породы показали наибольшее обогащение ^{34}S (в среднем до 18‰). Содержание общего, низко- и высокотемпературного углерода, а также значения $\delta^{13}\text{C}$ в различных типах руд и безрудных оливиновых пироксенитах близки, различия не превышают 5‰. На основании полученных данных сделан вывод, что главным источником изотопно-тяжелой серы интрузива Кейвитса и приуроченных к нему руд, являлась коровая сера осадочных пород, ассимилированная магмой на более глубоком уровне, чем современное залегание интрузии. Порция магмы оливиновых пироксенитов на пути подъема из промежуточной камеры была дополнительно контаминирована коровой серой, что привело к ликвации сульфидной жидкости и образованию фальшивых руд. Различие изотопного состава серы оливиновых пироксенитов и продуктивных типов руд указывает на наложенный характер оруденения. Образование его происходило из газообразных соединений, содержащих летучие комплексы с никелем, медью и платиновыми металлами, возможно, по механизму автосульфурзации.

В начале 90-х годов в северной Финляндии было обнаружено крупное низкосортное сульфидное Cu-Ni-PGE-Au месторождение Кейвитса, приуроченное к мафитовой расслоенной интрузии нижнепротерозойского возраста. Специфической особенностью месторождения является его локализация в верхней части ультрамафитовой зоны в нескольких сотнях метров выше базального контакта интрузии. Для рассеянных в ультрабазитах руд характерны значительные вариации состава в пространственно близких рудных массах. В самой интрузии широко проявлены процессы контаминации материалом осадочных и магматических пород, выражающиеся в присутствии ксенолитов разного состава: коматиитов, пелитов, графита и др. Наличие же в интрузии Кейвитса большого количества первичных магматических минералов с ОН-группой, хлором, фтором и редкими землями является нетипичным для ба-

зит-гипербазитовых массивов, с которыми ассоциируются крупные сульфидные медно-никелевые месторождения.

Поскольку сульфидные Cu-Ni-PGE месторождения в верхних горизонтах ультрамафитовых расслоенных массивов крайне редки, для получения информации об особенностях формирования месторождения Кейвитса было предпринято комплексное изучение изотопного состава и содержания серы и углерода в разных типах руд, породах интрузии, ксенолитах коматиитов, а также в породах вмещающей толщи.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНТРУЗИИ И МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Вопросы геологии и рудной петрологии мафических слоистых интрузий Северной Финляндии

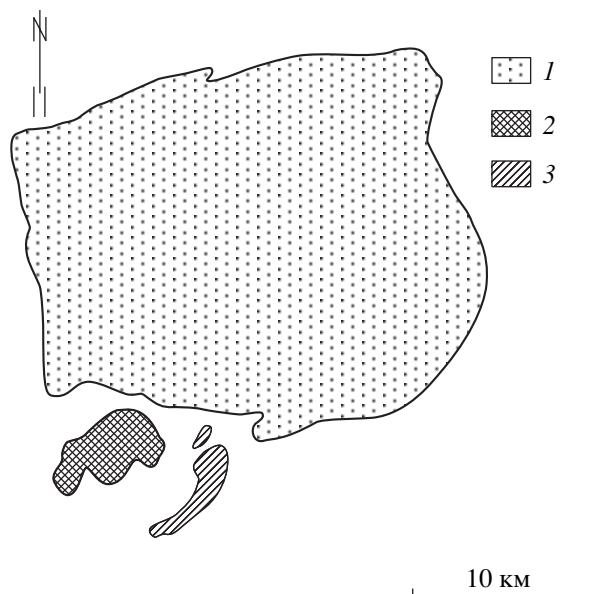


Рис. 1. Пространственное положение: 1 – интрузии Коителайнен, 2 – интрузии Кейвитса, 3 – Сатоваара комплекса.

детально освещены в ряде работ [1–4], из которых заимствованы приводимые ниже геологические данные. Интрузия Кейвитса (на западе) и интрузия Сатоваара (на востоке), возможно, представляют собой блоки единого тела, отделенные зоной северо-восточных нарушений. К северу от них находится крупная (26 × 29 км) расслоенная мафическая интрузия Коителайнен более древнего (2,44 млрд. лет) возраста. Кратчайшее расстояние между верхним контактом этой интрузии и основанием интрузии Кейвитса составляет около 500–600 м (рис. 1). Интрузия Кейвитса имеет чашеобразную с крутыми стенками форму. Поверхность ее около 16 км², мощность 1–2 км. В середине интрузии находится крупное тело дунита, размером 0,6–1,5 км. К базальной части его приурочено “хондритовое платиновое месторождение”. Предполагается, что дунитовое тело представляет собой перидотитовый коматиит, внедрившийся ранее интрузии Кейвитса.

Контакты интрузии Кейвитса несогласные по отношению к слоистости вмещающей толщи. Последняя сложена метавулканическими (коматииты, низкотитанистые базальты, кислые вулканисты, мафит-ультрамафитовые силлы) и метаосадочными (аркозовые кварциты, пелиты) породами. Мощная пачка пелитов изменчива по содержанию сульфидов и графита. Нижние пелиты бедны сульфидами. Выше содержание их и графита возрастает, причем количество последнего иногда достигает 32%. Самые верхние пелиты богаты сульфидами, но бедны графитом. Интрузия Кейвитса внедрилась в осадочную пачку

на уровне, где количество сульфидов и графита увеличено. Черные сланцы фиксируются как ниже, так и выше ее. Геологическое строение интрузии показано на рис. 2.

Интрузия формально подразделяется на ряд зон:

1. Базальная закалочная зона, мощностью 0–8 м. Состоит из микрогаббро или кварцевого габбро и пироксенитов с кварцем. Обычны ксенолиты пелитов.

2. Ультраосновная зона выклинивается к западу. Наиболее мощная она (более 2 км) в районе месторождения. Состоит из оливиновых пироксенитов, среди которых присутствуют прерывистые слои пироксенитов и габбро. Широко распространены ксенолиты коматиитовых пород, особенно в районе месторождения. В верхней части ультрамафитовой зоны, непосредственно над верхним рудным пластом находится специфическая порода – “рябой перидотит”. “Рябь” – выветрелая часть – состоит из оливинового вебстерита, содержит биотит-флогопит и рассеянные сульфиды. Фон или основная масса представлены авгитом, слюда и сульфиды отсутствуют.

3. Габбровая зона состоит из пироксенового габбро, феррогаббро, магнетитового габбро и их уралитизированных эквивалентов. В юго-восточной части интрузии присутствует графитовое габбро. В верхней части габбровой зоны встречаются прерывистые обособления оливиновых пироксенитов. Широко распространены пелитовые роговики, количество коматиитовых ксенолитов незначительно. Мощность зоны неизвестна, в осевой части интрузии она более 500 м.

4. Гранофир представляет самую верхнюю зону интрузии, мощность которой на юго-востоке последней более 20 м. Встречаются мелкие ксенолиты пелитовых роговиков.

Специфической особенностью интрузии является широкое развитие необычных первичных интеркумулусных минералов в ультрамафитовой зоне, таких как биотит-флогопит, коричневая роговая обманка, дашкесанит, хлорапатит (фторапатит), монацит, графит. Количество первичных минералов с ОН-группой сильно варьирует. Вторичные изменения мафических минералов (гидратация) проявлены в основном вдоль трещин, прожилков и контактов даек, но иногда порода изменена и без видимого флюидного воздействия. Большие же объемы ультрамафитов на месторождении относительно свежие. Интрузия окружена широким ореолом роговиков. В породах ее и во вмещающей толще проявлен региональный метаморфизм амфиболитовой фации.

Cu–Ni–PGE–Au месторождение, ассоциирующееся с интрузией Кейвитса, представлено несколькими рудными телами вкрапленных сульфидов в оливиновых пироксенитах и метаперидотитах. Используя в качестве критерия содержание

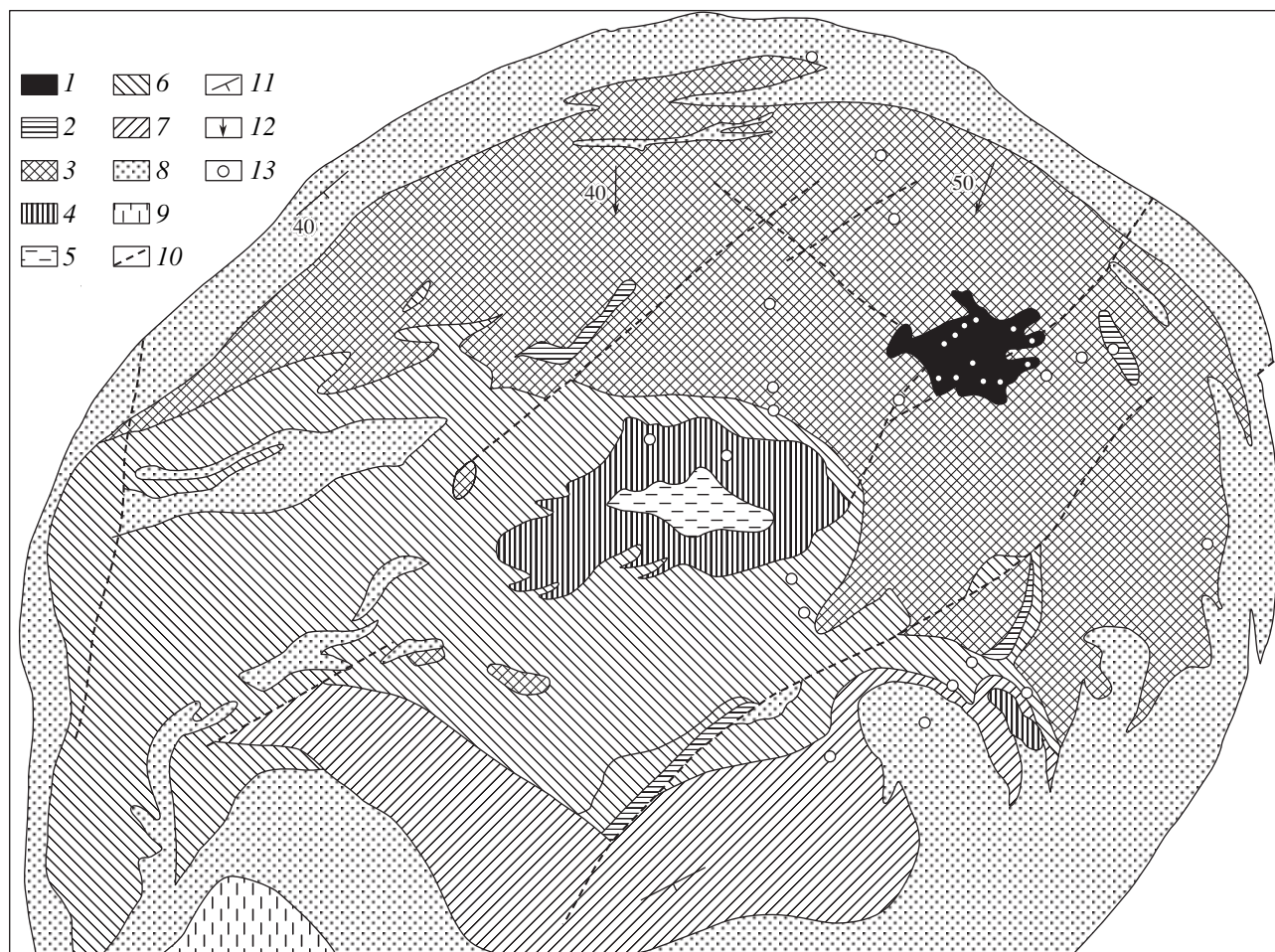


Рис. 2. Расслоенная интрузия Кейвитса и местоположение точек отбора проб для изотопного анализа. Условные обозначения: 1 – руда, 2 – фальшивая руда, 3 – оливковый пироксенит, 4 – перидотит, 5 – серпентинит, 6 – габбро, 7 – гранофир, 8 – сланцы, пелитовые и черные роговики; 9 – сланцы слюдяные и пелитовые породы; 10 – зоны нарушений, 11 – слоистость, 12 – погружение базального контакта, 13 – точки отбора проб.

Ni, рассчитанное на 100% сульфидов (Ni100S), выделено несколько типов руд: 1) наиболее распространенные Cu-Ni-PGE-Au руды или обычные руды (Ni100S – 4–7%); 2) бедные серой Ni-PGE руды (Ni100S > 25%); 3) промежуточные руды между обычными и Ni-PGE рудами; 4) богатые серой фальшивые руды (Ni100S – 1–4%). В направлении от фальшивых руд к Ni-PGE типу увеличиваются содержания PGE и отношения PGE/(Ni + Cu), Pt/Rh и Pt/Au, а отношения S/Se, S/Te, Re/PGE и содержание Re уменьшаются.

Главными сульфидами в рудах являются: тропилит, гексагональный пирротин, халькопирит, пентландит, талнахит, кубанит. Пирит и моноклинный пирротин редки и встречаются только в ассоциации с ретроградным изменением – в карбонатных и альбит-карбонатных прожилках. Массивные сульфидные жилы по объему незначительны и представлены обычно фальшивыми рудами.

Обычные руды образуют основную массу месторождения. Главное рудное тело представляет собой монотонную вкрапленность сульфидов в породах, прослеживаемую на сотни метров. Главная руда сверху постепенно переходит в пустую породу, а на востоке – в фальшивую руду. На севере нижний контакт ее резкий и контролируется тектоническими нарушениями. Агрегаты сульфидных зерен интерстиционны по отношению к силикатам. Содержание сульфидов изменяется от 2 до 6%. Отмечаются локальные колебания в составе руд, особенно от центральных к периферическим участкам. Сумма PGE + Au обычно положительно коррелирует с Ni + Cu, но есть и обратные случаи.

Объем Ni-PGE руд небольшой. Они встречаются в верхней части месторождения примерно на уровне Верхнего рудного тела, сложенного обычной рудой. Содержание сульфидов в этом типе руд очень низкое, а отношения Ni/Co, Ni/Cu,

PGE/Au и содержания PGE самые высокие по сравнению с другими типами руд. Рудный парагенезис Ni-PGE руд отличается специфическими особенностями. Здесь повсеместно распространены графит. Необычно присутствие низкотемпературного сульфид-арсенид-сульфаарсенидного парагенезиса, ассоциирующегося с высокотемпературным силикатным парагенезисом (оливин, авгит, плагиоклаз). Пирротин отсутствует, а сульфиды не интерстиционны по отношению к силикатам. Коматиитовые ксенолиты во вмещающих породах Ni-PGE рудного типа редки.

Промежуточный тип руд встречается в верхней части месторождения, между обычной рудой и Ni-PGE рудами. Мощная промежуточная руда отмечена в Главном рудном теле, ниже обычной руды. Она отличается от промежуточной руды в верхней части месторождения более высоким Pt/Rh отношением. Сульфиды промежуточного типа руд интерстиционны по отношению к силикатам, они богаты пентландитом, пирротин редок, миллерит встречается в свободных от пирротина ассоциациях. От Ni-PGE руды промежуточная руда отличается более высоким содержанием сульфидов, более низкими Ni/Cu и немного более высокими S/Se и S/Te отношениями. Коматиитовые ксенолиты очень редки во вмещающих породах промежуточных руд.

Фальшивые руды – наиболее распространенные сульфиды на месторождении. Они встречаются в приподожвенных участках интрузии, на базальном контакте, в породах габбровой зоны и в измененных пелитовых ксенолитах. Основная масса фальшивой руды сосредоточена восточнее Главного рудного тела, в руды которого она быстро переходит с востока на запад. Линзы фальшивой руды наблюдаются также далеко выше Верхней обычной руды. Силикатная часть большинства фальшивых руд по составу сходна с таковой вмещающих оливиновых пироксенитов обычных руд. Содержание Ni в породах фальшивых руд низкое, в основном меньше 0.1%. Общее содержание PGE-Au также незначительное. Содержание Re отчетливо выше, чем в других типах руд.

Месторождение сечется дайками диабазов, оливиновых габбро-диабазов и зонами нарушений восточного-северо-восточного направлений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА И СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ И УГЛЕРОДА

Изотопный состав серы и углерода, а также содержания углерода были определены в пробах, представляющих: 1) различные типы руд, 2) безрудные оливиновые пироксениты, габбро и графиты интрузии, 3) ксенолиты ультраосновных пород в интрузии, 4) породы вмещающей толщи. Изучались изотопный состав общей серы пород

[5], изотопный состав и содержания низкотемпературного (C_1^1) и высокотемпературного (C_2^2) углерода [6]. В отдельных случаях (массивная руда) анализировались сульфиды. Предварительные данные по изотопному составу серы в различных типах руд приводились ранее [7]. Результаты содержания и изотопного состава серы и углерода для изученных руд и пород представлены в табл. 1–5 и рис. 3–6.

РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ РУД

Обычная (Cu-Ni-PGE-Au) руда представлена пробами оливиновых пироксенитов с вкрапленностью сульфидов, отобранных из различных участков Главного рудного тела.

Значения $\delta^{34}S$ для обычной руды в целом изменяются от +2.0 до +4.6‰, для большинства проб они находятся в более узком диапазоне, от +3.8 до +4.6‰, среднее $+3.8 \pm 0.2\text{‰}$ (11³). Не выявлено закономерных вариаций величин $\delta^{34}S$ по глубине отбора проб, а также в зависимости от содержания серы (рис. 3, 5).

Содержания общего углерода (C_{1+2}) в пробах довольно высокие, от 0.135 до 0.39%, среднее $-0.22 \pm 0.03\%$ (9). Количества низкотемпературного углерода (C_1) и высокотемпературного углерода (C_2) в среднем близки и составляют 0.11 ± 0.02 (11) и $0.1 \pm 0.01\%$ (11), соответственно, но для C_1 максимум содержаний приходится на диапазон 0.06–0.1%, а для C_2 – 0.1–0.15%. Повышенные до 0.2–0.3% содержания C_1 наблюдаются в единичных пробах.

Изотопный состав C_1 в обычных рудах варьирует в широком диапазоне, от –4.3 до –23.4‰, среднее $\delta^{13}C_1 = -16.2 \pm 2.0\text{‰}$ (11). Большинство значений $\delta^{13}C_1$ группируются в диапазоне –17.7...–18.8‰ (рис. 4). Изотопный состав C_2 также неоднороден. Значения $\delta^{13}C_2$ в большинстве проб более низкие, чем $\delta^{13}C_1$, они изменяются от –14.1 до –28.2‰, среднее $-21.2 \pm 1.8\text{‰}$ (9).

Для большинства проб рудоносных оливиновых пироксенитов намечается тенденция повышения значений $\delta^{13}C$ с повышением содержаний углерода, наиболее отчетливо она проявлена между величинами содержаний C_2 и $\delta^{13}C_2$ (рис. 6). Распределение изотопов и содержаний углерода по вертикальному разрезу рудоносных пород неравномерно. Не наблюдается корреляции между изотопным составом серы и содержаниями и изо-

¹ Углерод карбонатов и органического вещества; выделяется при 600°C.

² Графит, углерод газово-жидких включений в минералах, выделяется при 1000°C.

³ В скобках указано число анализов.

Таблица 1. Изотопный состав серы и содержание низко- и высокотемпературного углерода в рудах месторождения Кейвитса

NN п.п.	$\delta^{34}\text{S}, \text{‰}$	$\text{C}_1, \%$	$\delta^{13}\text{C}_1, \text{‰}$	$\text{C}_2, \%$	$\delta^{13}\text{C}_2, \text{‰}$	$\Sigma\text{C}, \%$	$\Sigma\delta^{13}\text{C}, \text{‰}$	NN образца
<i>Cu-Ni-PGE-Au руда</i>								
1	3.9	0.078	-8.8	0.06	-28.2	0.138	-17.2	360/186.7-186.9
2	4.0	0.09	-18.1	0.102	-	0.192	-	360/194.4
3	4.1	0.06	-18.3	0.138	-19.5	0.198	-19.1	326/75.6-75.8
4	4.1	0.192	-23.4	0.162	-18.6	0.354	-21.2	326/81.6-81.8
5	4.0	0.09	-17.7	0.06	-22.5	0.15	-19.6	679/120.65-120.85
6	4.6	0.06	-23.4	0.075	-27.5	0.135	-25.7	679/140.8-140.85
7	2.0	0.3	-18.1	0.09	-23.4	0.39	-21.4	679/156.6-156.75
8	3.8	0.06	-4.3	0.135	-	0.195	-	679/198.0-198.2
9	4.4	0.15	-11.3	0.12	-14.1	0.27	-12.5	679/203.0-203.3
10	4.6	0.072	-18.8	0.10	-16.1	0.172	-17.2	696/375.9-376.0
11	2.8	0.084	-30.1	0.024	-23.0	0.108	-28.5	650/31.5-33.0
<i>Ni-PGE руда</i>								
12	6.7	0.078	-6.9	0.054	-18.4	0.132	-11.6	333/49.7-49.95
13	6.4	0.03	-23.1	0.192	-12.0	0.22	-13.5	333/77.05-77.3
14	8.8	0.036	-22.1	0.126	-13.4	0.162	-15.3	713/8.05-8.5
15	6.5	0.072	-16.2	0.06	-15.5	0.132	-15.9	713/36.6-37.0
16	4.2	0.06	-22.8	0.126	-16.6	0.185	-18.6	713/38.9-39.0
17	3.7	0.08	-18.6	0.07	-16.7	0.15	-17.7	695/67.65-67.8
<i>Руда промежуточная между Cu-Ni-PGE-Au и Ni-PGE типами</i>								
18	4.2	0.144	0.8	0.096	-22.7	0.24	-8.6	679/545.35-545.45
19	5.7	0.12	-11.4	0.045	-22.4	0.165	-14.4	679/574.7-574.9
20	8.8	0.192	-8.4	0.084	-16.3	0.276	-10.2	679/579.5-579.7
21	3.0	-	-	-	-	-	-	695/73.85
<i>Фальшивая руда</i>								
22	7.4	0.15	-22.1	0.12	-25.1	0.27	-23.4	688/34.25-34.55
23	7.4	0.06	-9.4	0.06	-22.5	0.12	-15.9	688/52.6
24	11.7	0.144	-21.8	0.168	-22.8	0.312	-22.3	688/59.2
25	10.3	0.03	-19.6	0.09	-17.9	0.12	-18.3	688/65.7-65.9
26	9.2	0.12	-19.1	0.048	-19.5	0.168	-19.2	802/67.4-67.6
27	8.4	0.078	-26.3	0.09	-27.2	0.168	-26.8	802/79.7-79.9
28	9.2	0.132	-18.0	0.084	-20.6	0.216	-19.0	802/81.35-81.55
29	7.5	0.036	-23.0	0.387	-17.4	0.423	-17.9	691/328.8-329.0
30	8.1	0.035	-20.7	0.153	-24.0	0.188	-23.4	691/339.2-339.4
31	7.6	-	-	-	-	-	-	696/454.45-454.55
32	10.9	-	-	-	-	-	-	686/50.73-50.78
33	6.8	0.066	-18.7	0.234	-16.3	0.3	-	687/299.5-299.55
34	3.4	-	-	-	-	-	-	687/301.9-302.0
35	11.4	0.084	-22.5	0.06	-	0.144	-	365/71.55-71.75
36	10.4	0.12	-24.5	0.054	-24.7	0.174	-24.6	363/20.35-20.5
37	10.8	0.036	-19.2	0.078	-9.6	0.114	-12.6	363/37.2-37.4
38	5.5	0.057	-15.7	0.105	-19.0	0.162	-17.8	699/480.9-481.0
39	6.1	0.042	-4.2	0.18	-	0.222	-	699/486.0-486.1
40	8.2	0.066	-22.2	0.15	-18.3	0.216	-19.5	699/488.6-488.8
41	18.6	0.12	-25.8	0.108	-28.6	0.228	-27.1	699/507.0-508.45
42	7.0	-	-	-	-	-	-	800/453.4-453.5
43	6.0	-	-	-	-	-	-	307/100.05-100.15

Таблица 2. Изотопный состав и содержание серы и углерода в безрудных оливиновых пироксенитах

N.N. п.п.	S, %	$\delta^{34}\text{S}$, ‰	C_1 , %	$\delta^{13}\text{C}_1$, ‰	C_2 , %	$\delta^{13}\text{C}_2$, ‰	$\Sigma\text{C}_1 + \text{C}_2$, %	$\Delta\delta^{13}\text{C}_{1+2}$, ‰	N.N. образца
1	0.08	5.8	0.033	-10.3	0.021	-23.0	0.054	-15.2	7.1-ТМ-86
2	0.22	5.4	0.054	-25.4	0.054	-25.4	0.108	-25.4	337/19.0-19.2
3	0.16	9.6	0.047	-	0.154	-25.0	0.201	-	337/20.3
4	0.34	6.4	0.06	-5.6	0.034	-3.4	0.094	-4.8	6.1-ТМ-93
5	0.296	9.0	0.043	-18.8	0.016	-17.9	0.059	-18.7	18.5В-НН-92
6	много	6.0	0.02	-18.5	0.015	-16.3	0.038	-17.4	R-705/20.3
7	0.31	8.9	0.02	-24.8	0.033	-9.7	0.052	-15.3	R-705/20.85
8	0.14	15.8	0.022	-22.3	0.024	-12.8	0.046	-17.3	702/20.25
9	0.255	13.2	0.045	-12.8	0.015	-21.7	0.06	-15.2	399/25.4-27.5
10	0.2	12.2	0.075	-16.7	0.01	-14.3	0.085	-16.4	685/62.0-64.0
11	0.3	6.2	-	-	-	-	-	-	679/103.0-103.25
12	0.18	14.2	-	-	-	-	-	-	679/480
13	0.36	10.2	-	-	-	-	-	-	679/41.7
14	1.27	7.3	-	-	-	-	-	-	679/410.25-410.40

Таблица 3. Ксенолиты коматитового состава в интрузии Кейвитса

N N п.п.	Порода, местоположение	S, %	$\delta^{34}\text{S}$, ‰	C_1 , %	$\delta^{13}\text{C}_1$, ‰	C_2 , %	$\delta^{13}\text{C}_2$, ‰	$\Sigma\text{C}_1 + \text{C}_2$, %	$\Delta\delta^{13}\text{C}_{1+2}$, ‰	N.N. образца
1	Дунит, ксенолит в главном рудном теле	0.11	5.0	0.059	-8.8	0.043	-13.2	0.102	-10.6	679/140.95-141.0
2	»	0.056	8.7	0.21	-10.7	0.12	-27.3	0.33	-16.7	679/388.5-388.7
3	»	0.374	8.4	0.042	-11.3	0.048	-21.9	0.09	-16.9	679/397.7-397.9
4	»	1.7	6.8	0.114	-9.5	0.12	-6.7	0.234	-8.1	365/61.85-62.05
5	Дунит, небольшие включения в рудноносном оливиновом пироксените	0.42	5.4	-	-	-	-	-	-	679/103.0-103.25
6	»	0.17	9.4	-	-	-	-	-	-	679/480
7	»	1.24	10.0	-	-	-	-	-	-	679/41.70
8	»	0.04	11.7	-	-	-	-	-	-	679/95.10
9	»	0.13	9.5	-	-	-	-	-	-	679/410.25-410.40
10	Дунит, массив внутри интрузива	0.055	7.4	-	-	-	-	-	-	304/71.0-71.25
11	»	0.04	13.0	-	-	-	-	-	-	342/64.70
12	»	0.048	10.3	-	-	-	-	-	-	343/42.55-42.80

топным составом углерода. В одном случае пониженное значение $\delta^{13}\text{S}$ (+2.0‰) соответствует высокому содержанию в пробе C_1 .

Ni-PGE руды и промежуточные между ними и обычными рудами показали близкий изотопный состав серы, но более тяжелый по сравнению с последними (рис. 3, табл. 1). Величины $\delta^{13}\text{S}$ для Ni-PGE руд изменяются от +3.7 до +8.8‰, среднее $6.1 \pm 0.8\%$ (6), для промежуточных руд – от +3.0 до +8.8‰, среднее $-5.4 \pm 1.3\%$ (4). Не наблюдается закономерных вариаций изотопного состава серы руд по вертикальному разрезу (рис. 5). На фоне повышенных до 6–9‰ значений $\delta^{13}\text{S}$ для

Ni-PGE и промежуточных руд отмечаются отдельные величины, типичные для обычных руд.

Содержание общего углерода в Ni-PGE рудах довольно однородное, от 0.13 до 0.22%, среднее $0.16 \pm 0.01\%$. Количество низкотемпературного углерода примерно в два раза ниже, чем высокотемпературного. Содержания C_1 изменяются от 0.03 до 0.08%, среднее $0.06 \pm 0.01\%$ (6). Содержания C_2 – от 0.13 до 0.22%, среднее $0.16 \pm 0.01\%$. Изотопный состав C_1 варьирует от -6.9 до -23.1‰, среднее $-18.2 \pm 2.5\%$. Значения $\delta^{13}\text{C}_2$ изменяются от -12.0 до -18.4‰, среднее $-15.4 \pm 0.96\%$ (6). Проявляется тенденция зависимости между C_1 и $\delta^{13}\text{C}_1$ и C_2 и $\delta^{13}\text{C}_2$: с повышением содержания угле-

Таблица 4. Изотопный состав серы и углерода и содержание углерода в габброидных породах и гранофирах интрузии Кейвитса

N.N. п.п.	$\delta^{34}\text{S}, \text{‰}$	$\text{C}_1, \%$	$\delta^{13}\text{C}_1, \text{‰}$	$\text{C}_2, \%$	$\delta^{13}\text{C}_2, \text{‰}$	$\Sigma\text{C}_{1+2}, \%$	$\Delta\delta^{13}\text{C}_{1+2}, \text{‰}$	Порода	N.N. образца
1	4.7	0.016	-25.5	0.12	-26.5	0.0285	-25.9	габбро	18.2-НН-92
2	24.4	0.054	-24.0	1.8	-32.6	1.85	-32.3	»	314/67.2-67.3
3	16.9	0.096	-24.1	1.69	-37.4	1.78	-36.7	»	314.64.2-64.3
4	18.9	0.066	-20.5	0.09	-	0.156	-	феррогаббро	728/80.0-80.1
5	19.5	0.06	-24.5	0.09	-14.9	0.15	-18.7	»	728/85.35-85.45
6	8.8	0.028	-10.5	0.01	-	0.038	-	Габброидная порода	18.4-НН-92
7	8.7	-	-	-	-	-	-	Гранофир с сульфидами	728/57.75-57.85
8	8.8	-	-	-	-	-	-	»	728/59.0-64.0
9	13.7	-	-	-	-	-	-	»	728/64.0-64.1

Таблица 5. Изотопный состав серы и содержание углерода в породах вмещающей толщи интрузии Кейвитса

N.N. п.п.	Характеристика образца	$\delta^{34}\text{S}, \text{‰}$	$\text{C}_1, \%$	$\delta^{13}\text{C}_1, \text{‰}$	$\text{C}_2, \%$	$\delta^{13}\text{C}_2, \text{‰}$	$\Sigma\text{C}_{1+2}, \%$	$\Delta\delta^{13}\text{C}_{1+2}, \text{‰}$	N.N. образца
1	Роговик по пелиту	14.3	0.012	-17.5	0.03	-20.1	0.042	-19.4	18.3-НН-92
2	Слюдяной сланец по пелиту из кровли интрузии	18.6	0.048	-25.1	0.12	-16.2	0.168	-18.7	728/15.0-15.10
3	»	18.7	0.054	-20.7	0.09	-26.3	0.144	-24.2	728/29.6-29.8
4	»	18.1	0.048	-22.8	0.07	-23.0	0.118	-22.9	728/46.0-46.15
5	Роговик по пелиту, ксенолит из всячего бока рудного тела	12.4	0.12	-22.4	0.1	-20.1	0.22	-21.4	332/82.0-83.0
6	Слюдяной сланец из подстилающих интрузию осадков	10.3	0.102	-24.6	0.24	-20.9	0.342	-22.0	308/166.65-166.70
7	»	19.4	0.156	-21.5	1.33	-32.5	1.486	-31.3	308/184.2-184.4
8	»	17.4	0.06	-26.1	0.366	-37.6	0.426	-36.0	308/184.8-184.9
9	»	17.1	0.045	-20.3	0.312	-40.8	0.357	-38.2	308/195.3-195.4
10	»	27.0	0.03	-25.1	1.17	-37.4	1.2	-37.1	308/224.75-224.95
11	»	15.2	0.024	-26.6	0.234	-26.1	0.258	-26.1	308/244.2-244.3
12	Черный сланец	18.6	0.06	-	1.4	-39.2	1.46	-	308/209.95-210.05
13	»	26.4	0.072	-32.4	2.93	-41.4	3.0	-41.2	308/219.3-219.35
14	Сульфид из черного сланца	19.7	-	-	-	-	-	-	308/276.75-277.0
15	Сульфид-графитовый сланец ниже северного контакта интрузии	16.6	0.066	-24.6	1.05	-28.5	1.116	-28.3	305/106.65-106.75

рода величины $\delta^{13}\text{C}$ его типичные для обычных руд (рис. 6).

В промежуточных рудах содержания общего углерода от 0.16 до 0.28%, среднее $0.23 \pm 0.3\%$. Содержания C_1 превышают содержания C_2 . Первые находятся в диапазоне 0.12-0.19%, среднее $0.15 \pm 0.02\%$, вторые - от 0.045 до 0.096%, среднее $0.08 \pm 0.02\%$. Изотопный состав C_1 варьирует от +0.8 до -11.4‰, среднее $-6.9 \pm 3.1\%$, величины $\delta^{13}\text{C}_2$

изменяются в более узких пределах, от -16.3 до -22.7‰, среднее $-20.5 \pm 2.1\%$.

Фальшивая руда оказалась в большей степени обогащена тяжелым изотопом серы по сравнению с обычной, Ni-PGE и промежуточной рудой (рис. 3). Значения $\delta^{34}\text{S}$ для нее в целом изменяются от +3.4 до +18.6‰, если исключить два крайних значения, то диапазон сужается до +5.5...+11.7‰, среднее $+8.2 \pm 0.5\%$ (21). Не наблюдается зави-

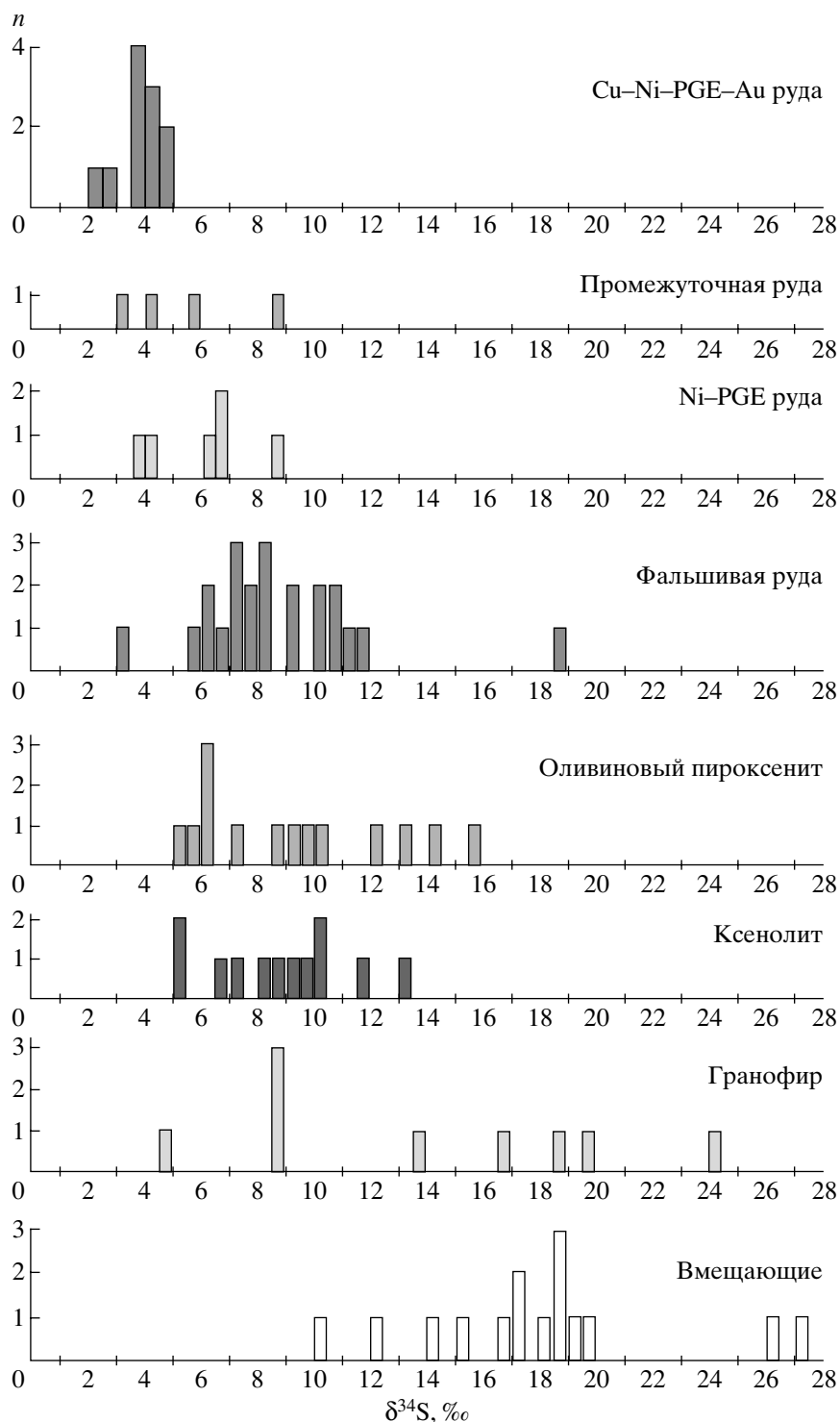


Рис. 3. Изотопный состав серы различных типов руд, интрузивных и вмещающих осадочных пород месторождения Кейвитса.

симости изотопного состава и содержаний серы в оливиновых пироксенитах с фальшивыми рудами. Проявляется тенденция некоторого понижения величин $\delta^{34}\text{S}$ по вертикальному разрезу, соответствующее преимущественному распространению

на глубоких горизонтах фальшивых руд II и III типов (рис. 5).

Содержания общего углерода в породах, содержащих фальшивую руду, довольно высокие. Они колеблются от 0.11 до 0.42%, среднее $0.2 \pm 0.02\%$ (16).

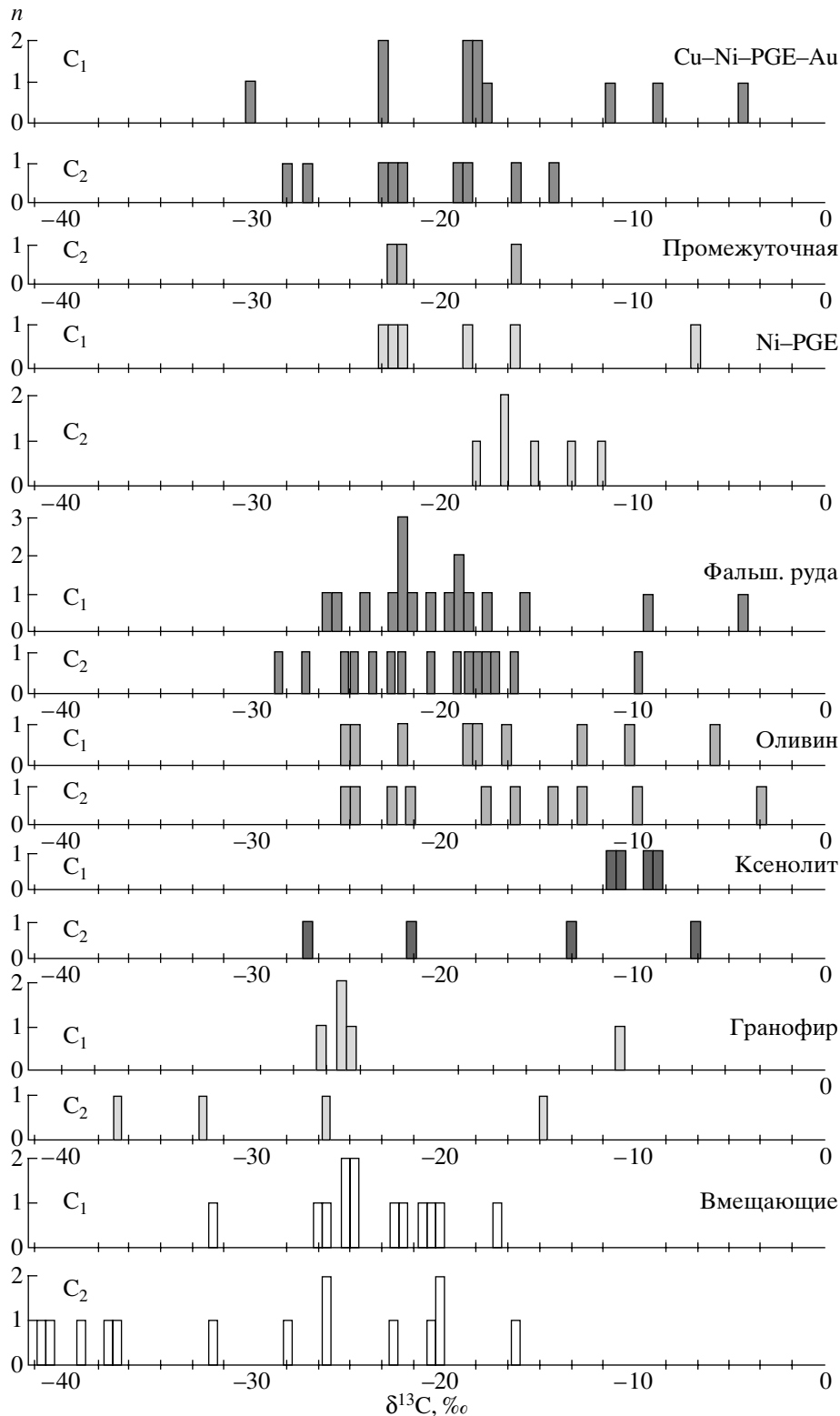


Рис. 4. Изотопный состав углерода различных типов руд, интрузивных и вмещающих осадочных пород месторождения Кейвитса.

Содержания C_1 несколько меньше, чем C_2 . Количество C_1 изменяются от 0.03 до 0.15%, среднее – $0.08 \pm 0.01\%$ (17), C_2 – от 0.05 до 0.39%, среднее – $0.13 \pm 0.02\%$ (17).

Изотопный состав C_1 фальшивых руд изменяется от -4.2 до -26.3% , среднее – $-20.2 \pm 1.0\%$ (15). Значения $\delta^{13}C_2$ колеблются от -9.6 до -28.6% , среднее – $-20.9 \pm 1.3\%$ (15). На вариационной ги-

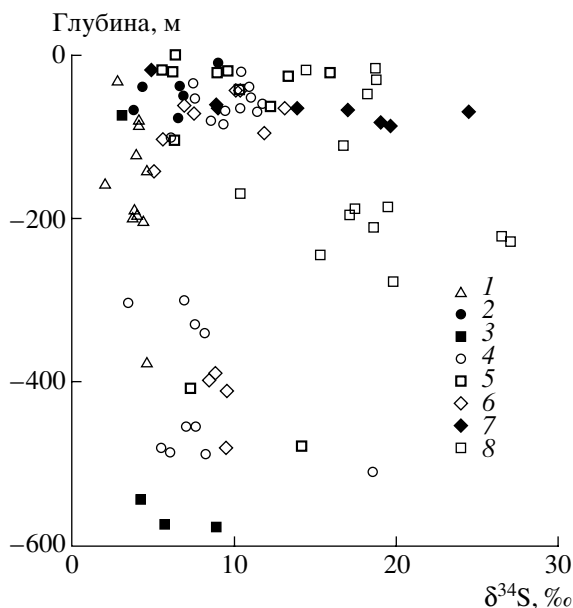


Рис. 5. Распределение величин $\delta^{34}\text{S}$ в рудах и породах месторождения Кейвитса по глубине.

1 – Cu–Ni–PGE–Au руда, 2 – промежуточная руда, 3 – Ni–PGE руда, 4 – фальшивая руда, 5 – оливковый пироксенит, 6 – ксенолиты коматиитов, 7 – габбро, граунофир; 8 – вмещающие осадочные породы.

стограмме максимум значений $\delta^{13}\text{C}_1$ приходится на диапазон $-20 \dots -25\%$, а $\delta^{13}\text{C}_2$ – $-15 \dots -20\%$ (рис. 4). Не наблюдается корреляции между содержанием C_1 и C_2 и величинами $\delta^{13}\text{C}_1$ и $\delta^{13}\text{C}_2$, соответственно. Вариации содержания и изотопного состава углерода по вертикальному разрезу носят несистематический характер. Иногда наблюдаются локальные повышения содержаний C_2 , в 2–3 раза превышающие среднее значение.

ПОРОДЫ ИНТРУЗИИ

Оливиновые пироксениты интрузии представлены в основном пробами безрудных пород, отобранных вдали от рудного тела и, в меньшей степени, – в пределах последнего. Результаты изотопного состава и содержания серы и углерода представлены в табл. 2. Большинство проб оказались существенно обогащены тяжелым изотопом серы. Значения $\delta^{34}\text{S}$ в целом варьируют от 5.4 до 15.8‰, среднее $-9.3 \pm 0.9\%$ (14). Не наблюдается систематических вариаций изотопного состава серы пород по вертикальному разрезу, но три anomalously высокие величины $\delta^{34}\text{S}$ отмечены в верхней и глубокой частях разреза (рис. 5).

Содержания серы в оливиновых пироксенитах вдали от рудного тела в большинстве проб варьируют от 0.08 до 0.34%, среднее для девяти проб, исключая одну anomalously высокую величину, – $0.22 \pm 0.03\%$. В оливиновых пироксенитах в пределах рудного тела содержания серы более высокие, от 0.18 до 1.27%, в большинстве случаев они

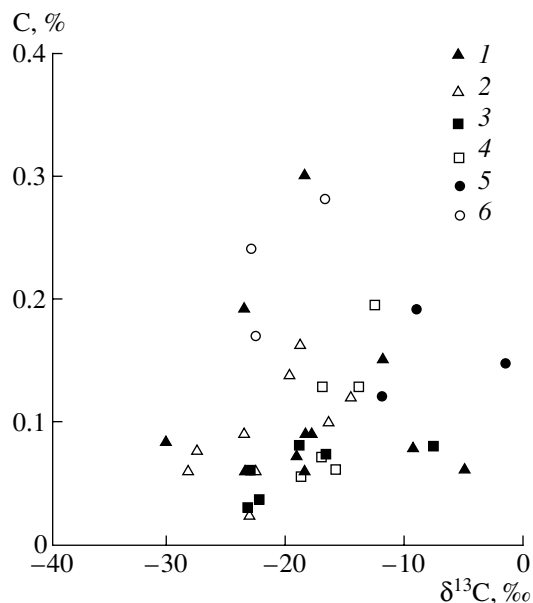


Рис. 6. Зависимость содержаний и изотопного состава углерода в рудах месторождения Кейвитса.

1 – обычная руда C_1 , 2 – обычная руда C_2 , 3 – Ni–PGE руда C_1 , 4 – Ni–PGE руда C_2 , 5 – промежуточная руда C_1 , 6 – промежуточная руда C_2 .

колеблются от 0.18 до 0.36%. Не выявляется зависимости содержаний и изотопного состава серы.

Содержания общего углерода в оливиновых пироксенитах в целом варьируют от 0.04 до 0.46%. Если исключить одно anomalously высокое значение, то диапазон сужается до 0.04–0.26%. Оливиновые пироксениты вдали от рудного тела имеют более низкие содержания общего углерода, чем таковые в пределах последнего. Содержания C_{1+2} в первых изменяются от 0.04 до 0.2%, среднее $-0.08 \pm 0.015\%$ (10), во вторых – от 0.11 до 0.46%, среднее $-0.26 \pm 0.07\%$ (4). Содержания C_1 и C_2 в оливиновых пироксенитах вне рудного тела близки и довольно низкие, в среднем $0.04 \pm 0.01\%$. Значения $\delta^{13}\text{C}_1$ варьируют от -5.6 до -25.4% , среднее $-17.2 \pm 2.2\%$ (9). Значения $\delta^{13}\text{C}_2$ изменяются от -3.4 до -25.4% , среднее $-16.9 \pm 2.2\%$ (10).

В ксенолитах коматиитов из оливиновых пироксенитов изотопный состав серы оказался близким к последним (табл. 3, рис. 3). Значения $\delta^{34}\text{S}$ в дунитовых ксенолитах изменяются от 5.0 до 13.0‰, среднее $8.8 \pm 0.69\%$ (12). Содержания серы в ксенолитах в целом колеблются от 0.04 до 1.7%, для большинства проб, за исключением двух anomalously, они находятся в диапазоне 0.04–0.56%, среднее $0.19 \pm 0.06\%$ (10).

Содержания общего углерода в ксенолитах дунита изменяются от 0.07 до 0.34%, среднее $0.18 \pm 0.03\%$ (12). Содержания C_1 и C_2 в четырех пробах ксенолитов близки и в среднем составляют $0.11 \pm 0.04\%$ и $0.08 \pm 0.02\%$, соответственно. Зна-

чения $\delta^{13}\text{C}_1$ в этих же пробах находятся в пределах $-8.8 \dots -11.3\%$, среднее $-10.1 \pm 0.6\%$, а величины $\delta^{13}\text{C}_2 - -6.7 \dots -27.3\%$, среднее $-17.3 \pm 4.6\%$ (4). Интересно отметить, что изотопный состав серы трех проб дунитов из крупного серпентин-дунитового массива внутри интрузии Кейвитса оказался близок к изотопному составу серы мелких дунитовых ксенолитов в пределах Главного рудного тела. Близки те и другие и по содержаниям серы и общего углерода (табл. 3).

Габбро, пижонитовое, графитовое, феррогаббро из верхних горизонтов интрузии показали широкие вариации изотопного состава серы при существенном обогащении большинства проб тяжелым изотопом (табл. 4). Значения $\delta^{34}\text{S}$ в породах габбрового состава изменяются в целом от 4.7 до 24.4‰, причем в четырех из шести проб они находятся в диапазоне 16.9–24.4‰. Содержания серы в габбро довольно высокие, от 0.12 до 4.33%, корреляция между ними и изотопным составом серы отсутствует. Следует отметить, однако, что наиболее низкой величине $\delta^{34}\text{S} - +4.7\%$ соответствует наиболее низкое содержание серы.

Содержания общего углерода в пижонитовом габбро, феррогаббро и габброидной породе невысокие, от 0.03 до 0.16%, но в пробах графитового габбро они достигают 1.8%. Содержания C_1 в габброидных породах невысокие, от 0.016 до 0.096%, среднее $-0.05 \pm 0.01\%$ (6). Содержания C_2 , за исключением графитового габбро, колеблются от 0.01 до 0.09%, в двух пробах последнего они достигают 1.7–1.8%. Изотопный состав C_1 в габбровых породах изменяется от -10.5 до -25.5% , для большинства проб он находится в диапазоне от -20.5 до -25.5% , среднее $-23.7 \pm 0.85\%$ (5). Значения $\delta^{13}\text{C}_2$ в трех пробах пород колеблются от -26.5 до -37.4% , причем наиболее низкие они в графитовом габбро.

В трех пробах гранофира, содержащих сульфиды, изотопный состав серы варьирует от 8.7 до 13.7‰.

Во вмещающих породах, представленных роговиками, пелитами, слюдяными и черными сланцами, пробы которых были отобраны как из кровли интрузии, так и подстилающих ее пород, изотопный состав серы существенно обогащен ^{34}S , при вариациях значений $\delta^{34}\text{S}$ от 10.3 до 27.0‰ (табл. 5, рис. 3). Для большинства проб последние находятся в диапазоне 15.2–27.0‰. Не наблюдается определенных различий в изотопном составе серы пород из кровли интрузии и ее подстилающих. Содержания серы во вмещающих породах высокие, в большинстве проб они колеблются от 1 до 6%, среднее $2.34 \pm 0.44\%$ (13). Содержания серы в породах кровли в среднем составляют $1.5 \pm 0.2\%$ и ниже таковых в породах подошвы $-2.8 \pm 0.7\%$ (8).

Содержания общего углерода во вмещающих породах варьируют от 0.042 до 3.0%, среднее $0.73 \pm 0.22\%$ (14). Содержания C_1 изменяются от 0.012

до 0.156%, среднее $0.06 \pm 0.01\%$ (14), C_2 – от 0.03 до 2.93%, среднее $0.67 \pm 0.22\%$ (14). Значения $\delta^{13}\text{C}_1$ в целом колеблются от -17.5 до -32.4% , для большинства проб – от -20.3 до -26.6% , среднее -23.8 ± 1.02 (13). Значения $\delta^{13}\text{C}_2$ варьируют от -16.2 до -41.4% , среднее $-29.7 \pm 2.25\%$. Содержание C_2 выше в породах подошвы интрузии, и он в большей степени обогащен легким изотопом ^{12}C по сравнению с C_2 из пород кровли.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные выше фактические данные по изотопному составу и содержаниям серы и углерода в рудах, интрузивных и вмещающих породах месторождения Кейвитса обобщены в табл. 6. Суммируем основные положения, вытекающие из этих данных.

1. Руды, интрузивные породы, ксенолиты ультраосновного состава в них, осадочные породы вмещающей толщи обогащены тяжелым изотопом серы ^{34}S , но степень такого обогащения и гомогенизация изотопов различна в отдельных объектах.

2. Различные типы руд отличаются по изотопному составу серы, причем степень обогащения изотопом ^{34}S возрастает в направлении: обычная руда – промежуточная руда – Ni-PGE руда – фальшивая руда и составляет ($\delta^{34}\text{S}$ среднее, в ‰): 3.8 – 6.1 – (6.1) – 8.2, соответственно.

3. Оливиновые пироксениты интрузии как безрудные, так и в пределах рудного тела значительно, в среднем до 9.3‰, обогащены изотопом ^{34}S при диапазоне вариаций величин $\delta^{34}\text{S}$ около 10‰.

4. Ксенолиты дунитов, находящихся в виде включений различных размеров в оливиновых пироксенитах, по среднему значению $\delta^{34}\text{S}$ (8.8‰) и диапазону вариаций этих величин близки к таковым для вмещающих их пород.

5. Габбровые породы и гранофир – верхние дифференциаты интрузива – показали наиболее широкие вариации изотопного состава серы, в пределах 20‰, при среднем обогащении изотопом ^{34}S до 13.8‰.

6. Вмещающие интрузию осадочные породы как из кровли, так и из ее подошвы показали наибольшее обогащение тяжелым изотопом серы по сравнению со всеми изученными образованиями, в среднем до 18‰, при диапазоне вариаций величин $\delta^{34}\text{S}$ до 17‰.

7. Содержания общего, низко- и высокотемпературного углерода в различных типах руд близки, но они в 2–3 раза превышают таковые в безрудных оливиновых пироксенитах.

8. Изотопные составы C_1 и C_2 в различных типах руд и безрудных оливиновых пироксенитах близки, различия в большинстве случаев не превышают 5‰.

Таблица 6. Изотопный состав серы и углерода и содержание углерода в рудах и породах месторождения Кейвитса

Тип руды, порода	$\delta^{34}\text{S}$ ср., ‰	C_1 ср., %	$\delta^{13}\text{C}$, ‰, пределы вариаций	C_2 , ср., %	$\delta^{13}\text{C}_2$, ‰, пределы вариаций
Cu–Ni–PGE–Fu руда	4.0 ± 0.2	0.1 ± 0.02	–4.4...–23.4	0.1 ± 0.01	–14.1...–28.2
Ni–PGE руда	6.1 ± 0.8	0.06 ± 0.9	–6.9...–23.1	0.1 ± 0.02	–12.0...–18.4
Промежуточная руда	6.2 ± 1.3	0.15 ± 0.02	–8.4...–11.4	0.08 ± 0.02	–16.3...–22.7
Фальшивая руда	8.2 ± 0.5	0.08 ± 0.01	–9.4...–26.3	0.13 ± 0.02	–9.6...–28.6
Оливиновый пироксенит	8.8 ± 1.1	–	–5.6...–25.4	–	–9.7...–25.4
Ксенолиты коматиита	8.6 ± 0.5	–	–8.8...–11.3	–	–21.9...–27.3
Габбро, гранофир	15.7 ± 2.2	0.05 ± 0.007	–17.5...25.5	0.44 ± 0.25	–6.2...–37.4
Пелиты, черные сланцы	18.0 ± 1.1	0.07 ± 0.01	–20.3...32.4	0.91 ± 0.27	–20.1...41.4

9. В ксенолитах дунитов содержание углерода более чем в два раза выше, чем в безрудных оливиновых пироксенитах. Изотопные составы C_2 в тех и других близки. C_2 в первых в большей степени обогащен ^{13}C , чем во вторых.

10. Габбровые породы интрузии характеризуются высоким содержанием C_2 , которое в 15 раз превышает таковое в безрудных оливиновых пироксенитах и примерно в шесть раз – в различных типах руд. Значения $\delta^{13}\text{C}_1$ и особенно $\delta^{13}\text{C}_2$ несколько ниже соответствующих величин для руд и оливиновых пироксенитов.

11. Осадочные породы вмещающей толщи имеют высокое содержание C_2 , близкое к таковому в габброидных породах. Содержания C_1 и величины $\delta^{13}\text{C}_1$ и $\delta^{13}\text{C}_2$ также близки в тех и других.

Рассмотрим эти данные с точки зрения источников рудного вещества, в частности, серы и условий его отложения. Повышенные величины $\delta^{34}\text{S}$ в различных типах руд, вмещающих их и безрудных оливиновых пироксенитах, а также в габбровых породах интрузии, выходящие за пределы диапазона таковых значений для не контаминированных коровым материалом мантийных базит-гипербазитов (–0.5...+1.5‰) [5], свидетельствуют о присутствии в их составе изотопно тяжелой серы корового происхождения.

Осадочные породы, непосредственно вмещающие и подстилающие интрузию Кейвитса, очевидно, не являлись главным источником серы для руд и оливиновых пироксенитов. На это указывают существенные различия изотопного состава серы пород вмещающей толщи, с одной стороны, руд и оливиновых пироксенитов – с другой. Сера осадочных пород при значительной неомогенности своего изотопного состава в гораздо большей степени (в среднем в 2–5 раза) обогащена ^{34}S по сравнению с рудами и оливиновыми пироксенитами. Оливиновые пироксениты не были также существенно контаминированы и углеродом из непосредственно вмещающих интрузию осадочных пород, что подтверждается низким (почти в 10 раз) содержанием углерода в них по сравнению с последними и различием его изотопного состава в тех и других (табл. 6). Для габбровых же пород

интрузии Кейвитса осадочные породы вмещающей толщи были основным источником серы и углерода, что подтверждается как близкими значениями и характером вариаций величин $\delta^{34}\text{S}$, так и высокими содержаниями углерода и сходным изотопным составом его в первых и вторых.

Главным источником изотопно тяжелой серы для оливиновых пироксенитов интрузива Кейвитса и приуроченных к нему руд являлась, по-видимому, коровая сера осадочного происхождения, ассимилированная магмой на более глубоких уровнях, чем современное залегание интрузии. Судя по среднему содержанию серы – 0.22% в пробах безрудных оливиновых пироксенитов, количество контаминированной серы было относительно невысоким. Степень гомогенизации коровой и собственно магматической серы в оливиновых пироксенитах была недостаточно хорошей, о чем свидетельствует довольно широкий диапазон вариаций изотопного состава ее в этих породах. Некоторая, небольшая часть серы, наиболее обогащенной тяжелым изотопом, могла быть вовлечена в оливиновые пироксениты непосредственно из вмещающих осадочных толщ. Наряду с серой магма оливиновых пироксенитов на глубоких горизонтах была контаминирована небольшим количеством углерода (содержание которого в последних примерно в три раза выше среднего для интрузивных пород). Довольно широкий диапазон вариаций изотопного состава углерода в оливиновых пироксенитах также указывает на недостаточно высокую степень гомогенизации контаминированного осадочного материала в магматических условиях.

Как отмечалось выше, различные типы руд на месторождении Кейвитса отличаются друг от друга по величинам $\delta^{34}\text{S}$ и характеру их вариаций, причем продуктивные типы руд – обычные, Ni–PGE и промежуточные существенно отличаются по этим характеристикам серы от безрудных оливиновых пироксенитов. Особенно наглядно это проявлено на вариационных гистограммах распределения величин $\delta^{34}\text{S}$ (рис. 7). Как видно, наиболее близки по изотопному составу серы фальшивые руды и безрудные оливиновые пироксениты. Для тех и других при достаточно

широких диапазонах вариаций изотопного состава серы (8–10‰) наблюдается по два соответственно близких максимума распределения величин $\delta^{34}\text{S}$ в областях 6–8 и 9–11‰.

В нормальных или обычных рудах обогащение серы тяжелым изотопом ^{34}S в 2–3 раза меньше, а диапазон вариаций величин $\delta^{34}\text{S}$ в 4–5 раз уже по сравнению с безрудными оливинowymi пироксенитами и фальшивыми рудами. Ni-PGE и промежуточные руды по изотопному составу серы, как видно из рис. 7, являются промежуточными между обычными рудами, с одной стороны, и безрудными оливинowymi пироксенитами и фальшивыми рудами – с другой. По сравнению с двумя последними они имеют в два раза меньший диапазон вариаций величин $\delta^{34}\text{S}$. Интересно отметить, что максимум значений величин $\delta^{34}\text{S}$ для Ni-PGE руд совпадает с таковыми максимумами для безрудных оливинowych пироксенитов и фальшивых руд. Это может указывать на преимущественное заимствование серы при отложении Ni-PGE руд из оливинowych пироксенитов и фальшивых руд.

Различие изотопного состава серы безрудных оливинowych пироксенитов и обычных руд свидетельствует о наложенном характере сульфидного Cu-Ni-PGE-Au оруденения на интрузивные базит-гипербазиты, т.е. на образование его не за счет ликвации сульфидной жидкости из магмы оливинowych пироксенитов, сера которой была обогащена изотопом ^{34}S примерно на 9‰, а при каком-то другом процессе. В то же время обогащение нормальных руд изотопом ^{34}S в среднем до 4‰ указывает на примесь в их составе изотопно тяжелой коровой серы.

В связи с вышеизложенным возникает вопрос об общности или различии источников вещества (серы, металлов) для оливинowych пироксенитов и обычных руд, месте и времени вовлечения корового материала в магму интрузива и руды и механизме образования последних.

Представляется возможной следующая схема становления интрузива Кейвитса и формирования связанного с ним оруденения. В промежуточной магматической камере, где находилось довольно большое количество магмы оливинowych пироксенитов, происходила ассимиляция корового материала: серы, углерода, воды и других компонентов пород вмещающей преимущественно осадочной толщи, а также ксенолитов коматиитов. Отделившаяся из этой камеры порция магмы оливинowych пироксенитов на пути подъема была дополнительно контаминирована коровым материалом, в частности серой, обогащенной изотопом ^{34}S до 5–10‰. Вследствие добавки серы произошла ликвация сульфидной жидкости с последующим образованием в интрузии фальшивых руд. Условия гомогенизации вещества в контаминированной магме на путях подъема и месте кристаллизации были недостаточно хорошими, что

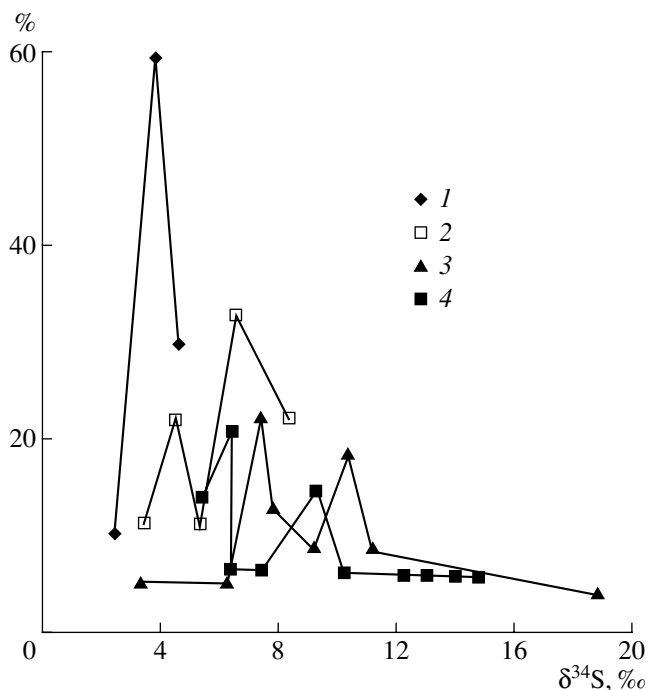


Рис. 7. Вариационные гистограммы распределения величин $\delta^{34}\text{S}$ в различных типах руд и оливинowych пироксенитах месторождения Кейвитса.

1 – обычная руда, 2 – Ni-PGE и промежуточная руда, 3 – фальшивая руда, 4 – оливиновый пироксенит.

отразилось на широкой дисперсии изотопного состава серы как в самих базит-гипербазитах, так и в фальшивых рудах. Небольшая часть наиболее изотопно тяжелой серы могла быть привнесена из осадочных пород на месте кристаллизации оливинowych пироксенитов.

В наибольшей степени контаминация материалом непосредственно вмещающих осадочных толщ проявлена в габбровых породах интрузии, что подтверждается близостью изотопного состава и содержания серы и углерода в тех и других. Можно предположить, что габбровые породы интрузии образовались при метасоматозе за счет взаимодействия фронтальных, насыщенных летучими компонентами порций магмы оливинowych пироксенитов и пород вмещающей осадочной толщи.

Как уже отмечалось, различие изотопного состава серы безрудных оливинowych пироксенитов и обычной руды, приуроченной к породам аналогичного состава, свидетельствует о наложенном характере оруденения. Возможным механизмом образования последнего мог быть процесс аутосульфуризации [8]. Он заключается в следующем. При повышении окислительного потенциала в промежуточном магматическом очаге вследствие ассимиляции воды и других компонентов из вмещающих толщ восстановленные соединения серы магматического расплава окислялись до SO_2 . Этот газ вместе с другими летучими соединениями, среди которых могли быть и летучие ком-

плексы с никелем, медью и платиновыми металлами, покидали расплав. Т. Мутанен предполагает перенос металлов платиновой группы в составе галогенных комплексов [9]. Не исключается перенос металлов в виде газообразных соединений с карбонилем [8]. На геохимическом барьере, где SO_2 восстанавливался до H_2S , отлагались сульфиды и минералы платиновой группы. На месторождении Кейвитса таким геохимическим барьером могли быть оливиновые пироксениты рудного поля, в которых отмечается повышенное (в 2–3 раза) содержание углерода по сравнению с безрудными породами. При образовании сульфидных руд в процессе автосульфуризации они обедняются тяжелым изотопом серы по сравнению с серой материнской интрузивной породы, что подтверждается как расчетными данными [8], так и природными наблюдениями [10]. Несколько повышенное содержание изотопа ^{34}S в сульфидных Ni – PGE руд по сравнению с обычными рудами на месторождении Кейвитса может объясняться большей степенью контаминации их изотопно тяжелой серой из вмещающих пород в связи мало-сернистой природой этих руд. Соблазнительно предположить, что роль “промежуточного” магматического очага при формировании продуктивных типов руд месторождения Кейвитса могла играть огромная по размерам ранее внедрившаяся интрузия Коителайнен, находящаяся вблизи рудоносной интрузии.

ВЫВОДЫ

1. Повышенное содержание изотопа ^{34}S в сере пород интрузии Кейвитса и связанных с ней рудах свидетельствует о контаминации тех и других изотопно тяжелой коровой серой.
2. Сера осадочных пород, вмещающих интрузию Кейвитса, существенно, в среднем до 18‰, обогащена тяжелым изотопом ^{34}S , что указывает на образование сульфидов при восстановлении ограниченного количества сульфатов.
3. Сера оливиновых пироксенитов интрузии Кейвитса и ассоциирующихся с ними руд отличается по изотопному составу от серы непосредственно вмещающих осадочных пород гораздо меньшим содержанием изотопа ^{34}S , что предполагает вовлечение коровой серы в магму в промежуточном очаге или на путях ее подъема.
4. Контаминация серой и углеродом из непосредственно вмещающих осадочных пород отчетливо проявлена в верхних более кислых дифференциатах интрузии – габбро и гранофирах.
5. Установлены различия изотопного состава серы различных типов руд, что не характерно для сульфидных медно-никелевых месторождений с придонными рудными залежами в базит-гипербазитах.
6. Отличие изотопного состава серы оливиновых пироксенитов и продуктивных типов руд указывает на наложенный характер формирования последних.
7. Фальшивые руды были образованы при ликвационном процессе при добавке дополнительной серы на путях подъема магмы или в глубинных условиях.
8. Образование продуктивных типов руд происходило при воздействии серо- и углерод-несущих рудоносных флюидов, отделяющихся из глубинного магматического источника, на оливиновые пироксениты ранее внедрившейся интрузии Кейвитса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mutanen T.* Koitelainen intrusion and Keivitsa-Satovaara complex. Excursion guide to the 5th International Platinum Symposium // Geological Survey of Finland. 1989. P. 49.
2. *Mutanen T.* The Akanvaara and Koitelainen intrusions and the Keivitsa-Satovaara complex. IGCP 336 project, Field Conference on Layered Mafic Complexes and Related Ore Deposits of Northern Fennoscandia, Guide to the Pre-Symposium Field Trip in Finland, August 20–21 // Geological Survey of Finland, 1996. 113 p.
3. *Huhma H., Mutanen T., Hanski E., Walker R.J.* Sm-Nd, U-Pb and Re-Os isotopic study of the Keivitsa Cu-Ni-bearing intrusion, Northern Finland. 22nd Nordic Geol. Winter Meeting, Turku, 1996. Abstracts. P. 72.
4. *Mutanen T.* Geology and ore petrology of the Akanvaara and Koitelainen mafic layered intrusions and the Keivitsa-Satovaara layered complex, northern Finland. Academic dissertation // Geol. Survey of Finland, Bulletin 395. 1997. 232 p.
5. *Гриненко Л.Н.* Источники серы базит-гипербазитовых пород и связанных с ними сульфидных медно-никелевых месторождений. Автореферат. диссертации. докт. геол.-мин. наук. М.: ГЕОХИ РАН, 1986. 37 с.
6. *Гриненко Л.Н., Лайтфут П., Кроуз Р.* Необычный изотопный состав углерода и содержание в мафических вулканитах Зап. Гренландии // Геохимия. 1996. № 11. С. 1063.
7. *Hanski E.J., Grinenko L.N., Mutanen T.* Sulfur isotopes in the Keivitsa Cu-Ni-bearing intrusion and its country rocks, northern Finland: evidence for crustal sulfur contamination. IGCP project 336 symposium in Rovaniemi, Finland, August 21–23, 1996. Abstracts. P. 15.
8. *Гриненко Л.Н., Минеев С.Д., Гриненко В.А.* Автосульфуризация один из механизмов образования сульфидов // ДАН СССР. 1986. Т. 288. № 5. 1223.0
9. *Mutanen T., Tornroos R., Johanson B.* The significance of cumulus chlorapatite and high-temperature dashkasanite to the genesis of PGE mineralizations in the Koitelainen and Keivitsa-Satovaara complexes, northern Finland. In: Geo-Platinum Symposium, The Open University, Milton Keynes, Buckinghamshire, U.K., April 23–24. 1987. Abstracts. Paper T9.
10. *Гриненко Л.Н., Чернышов Н.М.* Особенности формирования сульфидной никелевой минерализации в норит-диоритовых интрузивах Воронежского кристаллического массива // Геохимия. 1988. № 10. С. 1421.