

УДК 549.3+551.263.037

**СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ МАЯРВИНСКОЙ ВУЛКАНОГЕННОЙ
ТОЛЩИ (ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ
СКВАЖИНЫ)**

Ю.В. Ерохин

Институт геологии и геохимии УрО РАН

Маярвинская вулканогенная толща слагает основание протерозойского разреза в СГ-3 (Кольской сверхглубокой скважине). Граница между протерозойскими и архейскими породами в скважине расположена на глубине 6842 метра. Подстилающая вулканиты маярвинской толщи телевинская свита, вскрыта скважиной в интервале 6835-6842 м более чем в 10 км от поверхности по падению (рис. 1). Небольшая мощность свиты по разрезу СГ-3 (примерно 7 м) подтверждает ее крайнюю изменчивость, как по простиранию, так и по падению, колеблющуюся от 7 до 200 м. Из-за низкого выхода керна охарактеризованной оказалась лишь часть разреза свиты, сложенная конгломератами, слюдистыми метапесчаниками с прослоями слюдистых метагравелитов. Породы, несмотря на метаморфизм в условиях эпидот-амфиболитовой фации, сохраняют реликты псаммитовой и грубообломочной структур, слоистой, ритмичной и нечетко выраженной градационной текстур, следы размывов. Иногда в линзовидных телах конгломератов телевинской свиты отмечаются обломки основных и ультраосновных пород [2].

Перекрываются вулканиты маярвинской толщи осадочными породами кувернеринйокской свиты, мощность которой достигает 75 м. Она состоит из двух пачек (мезоритмов) в разрезе скважины и удалена на 9 км по падению от аналогов на поверхности, при этом отличается более высокой степенью метаморфизма, соответствующей эпидот-амфиболитовой фации. Свита залегает полого под углом 10-30°. Пачки переслаивающихся пород сформировались в прибрежно-морских условиях и мелких морских водоемах в обстановке повышенной солености вод и высокой степени окисления. Кувернеринйокская свита, представлена терригенными породами (в значительной степени красноцветными аркозовыми и кварцевыми метапсаммитами), перекрывающимися существенно карбонатными породами, обычно доломитовыми метапесчаниками и метадоломитами [2].

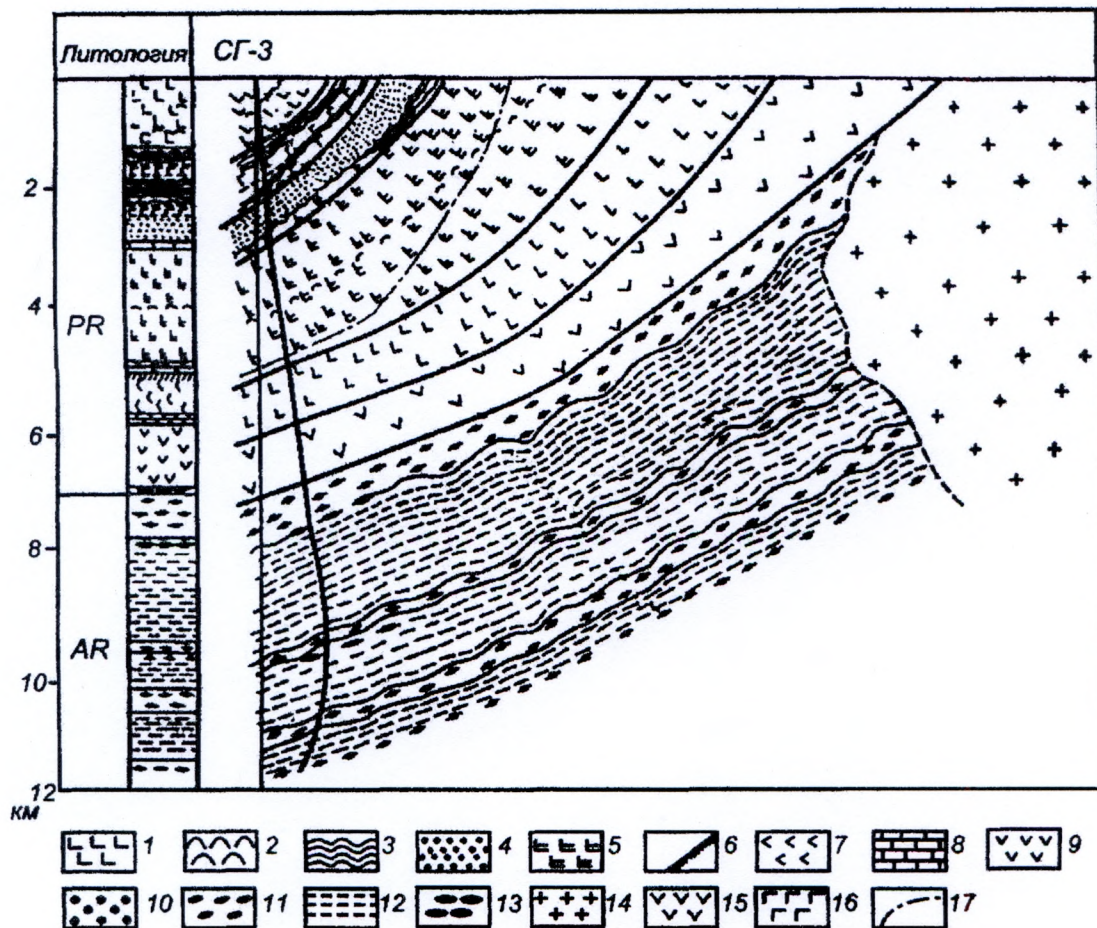


Рис. 1. Геологический разрез по Кольской сверхглубокой скважине [1].

1 – авгитовые диабазы и порфириды; 2 – основные туфы и туффиты; 3 – пелиты и алевролиты; 4 – ритмичное чередование (песчаники, алевролиты, пелиты); 5 – актинолитовые диабазы; 6 – серицитовые сланцы; 7 – метадиабазы; 8 – доломиты, полимиктовые песчаники; 9 – диабазовые порфириды и сланцы; 10 – конгломераты, гравелиты; 11 – гнейсы; 12 – мигматиты; 13 – магнетит-амфиболитовые сланцы; 14 – граниты; 15 – верлиты; 16 – габбро-диабазы; 17 – разломы.

Маярвинская толща, в составе которой преобладают мафитовые лавы и габброиды, сформировалась в континентальных условиях и согласно перекрывает подстилающие конгломераты телевинской свиты [1]. Однако преобладание андезитов-базальтов и их петро- и геохимические характеристики: умеренная и низкая титанистость (TiO_2 0,6-1,04), дифференцированное распределение РЗЭ, демонстрирующее обогащение легкими РЗЭ [$La - 17-35 (45-93)_n$] при умеренном обеднении тяжелыми РЗЭ [$Yb - 1,6-8,2 (6,5-33)_n$] с умеренной Eu аномалией (Eu/Eu^* 0,5-0,8); умеренные или пониженные концентрации циркония и особенно ниобия (соответственно, 90-230 и 2,9-5,6 г/т) – с большой вероятностью свидетельствуют об их формировании в результате вулканической активности островодужного или окраинно-континентального типа. Мощность

маярвинской свиты составляет 1200-1500 метров. Возраст андезито-базальтов из этой свиты оценивается Rb-Sr изохронной датой 2324 ± 28 млн. лет, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70412$ [4].

Нами изучалась сульфидная минерализация из метагабброидов и metabазальтов маярвинской свиты, образцы которой любезно предоставлены главным геологом СГ-3 Ю.Н. Яковлевым. Всего было передано четыре образца: два из Кольской сверхглубокой скважины (обр. 20494, гл. 6353,5 м, габбро меланократовое; обр. 20578, гл. 6372,9 м, андезито-базальт) и два из дублирующей скважины X (гл. 699,8 м, базальт; 710,6 м, андезито-базальт).

Достаточно полные сведения о рудной минерализации в породах вскрытого СГ-3 разреза приведены в работах [1, 2]. На основании многочисленных данных весь разрез был поделен на зоны минерализации. Так, для маярвинской свиты, представленной амфибол-плагиоклазовыми сланцами, характерна зона медистой (халькопиритовой) минерализации. Халькопирит с примесью борнита и других редких минералов (кобальтина, зигенита) развит по всему разрезу свиты. Часто встречается пирит, а пирротин редок. Нами в вулканитах и габброидах маярвинской свиты, исследовано четыре сульфидных минерала: халькопирит, кубический халькопирит (?), пирит и сфалерит. Составы минералов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав (в мас.%) сульфидов из Маярвинской вулканогенной свиты скв. X.

NN	Гл. 699,8 м, базальт					гл. 710,6 м, андезито-базальт		
	1	2ц	2кр	3	4	5ц	5кр	6
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	3-1ц	3-1к	3-2
Fe	29,94	29,89	29,95	46,26	45,18	41,28	44,60	30,80
S	33,31	34,09	34,02	51,50	51,20	52,96	53,22	35,50
Cu	33,72	33,81	33,57	-	-	-	-	33,92
Ni	0,03	0,03	0,03	0,09	1,59	-	0,16	0,05
Co	0,05	0,05	0,07	0,06	0,06	3,82	0,06	0,07
Zn	0,12	0,15	0,10	0,02	0,02	0,02	-	0,16
Cd	0,09	0,07	0,04	0,01	0,01	0,04	-	0,11
As	0,30	0,21	0,13	-	-	-	-	0,29
Pb	-	0,17	-	-	-	-	-	0,03
Ag	0,09	0,07	0,07	-	-	-	-	0,04
Сумма	97,67	98,54	97,98	97,94	98,07	98,13	98,04	100,97

Примечание: микроанализатор JXA-5, ИГГ УрО РАН, аналитик Е.С. Шагалов; 3-5 – пирит, 1-2,6 – халькопирит.

Халькопирит широко распространен в породах СГ-3 и в пределах маярвинской толщи считается главным халькогенидом [2]. Он слагает крупные до нескольких мм зерна, обычно неправильной формы, часто выполняя интерстиции между породообразующими

Таблица 2

Химический состав (в мас.%) сульфидов из Маярвинской вулканогенной свиты в разрезе скважины СГ-3

NN	Обр. 20494, гл. 6353,5 м, габбро меланократовое						
	1	2ц	2кр	2кр-1	3ц	3кр	3кр-1
	1-2	2-1	2-2	2-2-1	2-3	2-4	2-5
Fe	30,47	47,12	46,39	36,99	30,22	30,32	30,15
S	34,78	53,50	53,86	54,12	34,62	34,62	34,21
Cu	34,51	-	-	-	34,83	34,97	34,38
Ni	-	0,05	-	0,35	-	-	-
Co	-	0,01	0,08	8,29	-	-	-
Zn	0,19	0,07	0,08	0,07	0,20	0,22	0,24
Cd	0,13	0,06	0,08	0,04	0,16	0,15	0,15
As	0,55	0,22	0,20	0,27	0,60	0,53	0,63
Pb	0,17	-	-	0,02	0,60	0,75	0,60
Ag	0,05	-	0,01	0,07	0,09	0,09	0,08
Сумма	100,85	101,02	100,71	100,23	101,34	101,65	100,43

Продолжение таблицы 2.

NN	Обр. 20578, гл. 6372,9 м, андезит-базальт					
	4ц	4кр	5	6кр	6ц	7
	1-1	1-2	1-3	1-6	1-7	2-1
Fe	29,99	29,83	5,03	29,75	30,11	6,47
S	34,33	34,50	33,21	34,29	34,40	34,10
Cu	32,95	33,09	0,40	33,66	33,70	0,71
Ni	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,05
Co	0,05	0,07	0,24	0,06	0,06	0,22
Zn	0,16	0,42	60,13	0,16	0,18	58,73
Cd	0,08	0,08	0,20	0,08	0,07	0,34
As	0,27	0,35	0,49	0,39	0,39	0,51
Pb	-	-	0,07	0,13	0,13	0,12
Ag	0,11	0,11	0,05	0,11	0,11	0,10
Сумма	98,05	98,50	99,88	98,70	99,26	101,35

Окончание таблицы 2.

NN	Обр. 20578, гл. 6372,9 м, андезит-базальт									
	10ц	10кр	11кр	11ц	11кр-1	12	13	14	15ц	15кр
	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2
Fe	46,89	46,42	30,43	31,03	30,85	30,45	30,67	30,57	46,20	42,92
S	52,81	52,72	34,07	34,77	35,33	34,87	34,60	34,60	52,30	51,94
Cu	-	-	33,72	34,34	33,93	33,59	34,02	34,05	-	-
Ni	0,03	0,01	0,08	0,06	0,04	0,04	0,08	0,08	-	-
Co	0,07	2,03	0,13	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	1,88	4,72
Zn	0,01	0,07	0,19	0,16	0,15	0,16	0,15	0,16	0,04	0,02
Cd	0,01	0,03	0,07	0,07	0,11	0,08	0,08	0,05	0,01	0,04
As	0,05	0,27	0,40	0,24	0,32	0,38	0,33	0,32	0,03	-
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ag	0,04	0,01	0,08	0,09	-	-	-	-	-	0,01
Сумма	99,93	101,57	99,18	100,84	100,79	99,64	99,99	99,91	100,47	99,66

Примечание: микроанализатор JXA-5, ИГГ УрО РАН, аналитик Е.С. Шагалов; 1, 3-4, 6, 8 – халькопирит, 2,9 – пирит, 5,7 – сфалерит; 10,15 – пирит, 11-14 – халькопирит.

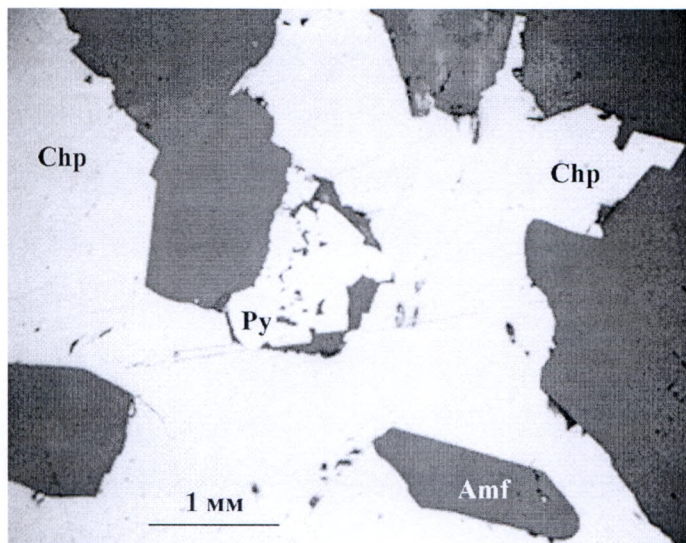


Рис. 2. Интерсертальный халькопирит (Ch) с пиритом (Py) в силикатной матрице. Габбро меланократовое, обр. 20494, гл. 6353,5 м. Отраженный свет.

минералами. Вследствие этого содержит многочисленные включения сульфидов и силикатов (рис. 2). Халькопирит ассоциирует с пиритом и сфалеритом. На основании их взаимоотношений можно сказать, что первым кристаллизовался пирит, а затем последовательно халькопирит и сфалерит. В отраженном свете халькопирит имеет стандартные оптические характеристики [3], правда халькогенид из габбро может отвечать кубической модификации, так как изотропен. Химический состав минерала достаточно стабилен и очень близок стехиометричному. Некоторые различия установлены для халькопиритов из габброидов и базальтов. В интрузивных породах халькогенид характеризуется существенным избытком металлов над серой, $\Sigma Me/S > 1$ (табл. 2, ан. 1, 3). Такие данные в совокупности с возможной кубической сингонией минерала, позволяет нам относить его к высокотемпературному *кубическому халькопириту (?)*. К сожалению, подтвердить это предположение можно только рентгеноструктурным анализом, но сказывается нехватка исследуемого материала. Интересной особенностью кубического халькопирита (?) является повышенное содержание свинца (до 0,75 мас.%), кадмия (до 0,20 мас.%) и мышьяка (до 0,65 мас.%) по сравнению с халькопиритом из базальтов. В вулканитах сульфид характеризуется небольшим недостатком металлов к сере, $\Sigma Me/S \leq 1$ (табл. 1, ан. 1-2, 6; табл. 2, ан. 4, 6, 8, 11-14), что отвечает нормальному низкотемпературному тетрагональному халькопириту. Этот халькопирит постоянно содержит примеси никеля (до 0,10 мас.%) и кобальта (до 0,15 мас.%), чего не отмечалось в халькогениде габброидов. Интересно, что по простиранию вулканогенной толщи состав халькопирита в андезито-базальтах остается неизменным.

Пирит распространен по всему разрезу скважины, но более широко развит в архейских породах [2]. Он слагает изометричные индивиды размером не более 0,5 мм, обычно в ассоциации с халькопиритом (рис. 2). По времени образования является самым ранним сульфидом. Часто содержит многочисленные включения силикатов. По составу варьирует от чистого пирита до высоко кобальтовой и никелевой разновидностей (табл. 1, ан. 3-5; табл. 2, ан. 2, 9, 10, 15). Ранее утверждалось, что в протерозойских породах разреза примеси никеля и кобальта в пирите не фиксируются (при чувствительности определения 0,01%) [2]. Нами в пирите маярвинской свиты, установлены содержания никеля до 1,6 мас.% (табл. 1, ан. 4) и кобальта до 8,3 мас.% (табл. 2, ан. 2кр-1). В последнем случае количество растворенного катьерита (CoS_2) в пирите достигает 20%. Кстати, максимальное содержание кобальта в пирите СГ-3 не превышало 6 мас.% [2]. В минерале постоянно отмечается зональность по кобальту, который стремительно нарастает в краевых зонах до ураганных концентраций. В одном случае для пирита установлена обратная зональность с падением кобальта от 4 мас.% до 0,1 мас.% (табл. 1, ан. 5). Проследить поведение никеля нам не удалось, в одном случае он совместно с кобальтом нарастает к краю зерен, а в другом наоборот падает. В зерне с максимальным содержанием никеля зональность не мерилась.

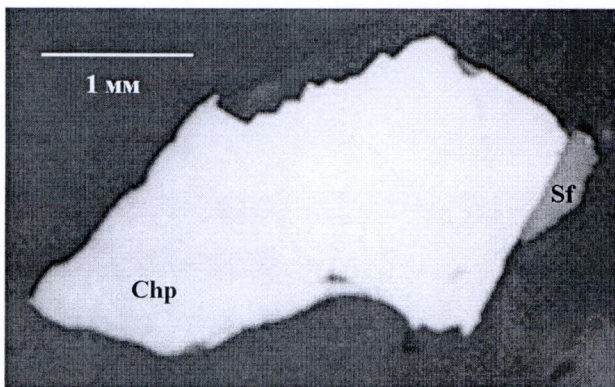


Рис. 3. Срастание зерен халькопирита и сфалерита. Андезито-базальт, обр. 20578, гл. 6372,9 м. Отраженный свет.

Сфалерит является «сквозным» минералом для пород разреза СГ-3 и встречается в разных ассоциациях [2]. Нами он обнаружен в срастаниях с халькопиритом (обычно приурочен к краевым зонам) в андезито-базальтах с глубины 6372,9 метров. Граница между минералами ровная и четкая, что говорит об их совместном образовании и кристаллизации сфалерита на заключительной стадии формирования халькопирита. Форма зерен сфалерита слабо вытянутая до изометричной (рис. 3). Размер индивидов не превышает 1 мм. По оптическим свойствам резко отличается от сопутствующих ему сульфидов своей светло-серой окраской. Содержание железа в сфалерите достигает 6,5 мас.% (табл. 2, ан. 5,7), что позволяет относить его к клейофану. Среди примесей

выделяются мышьяк (до 0,5 мас.%), медь (до 0,7 мас.%, возможно это фон от зерна халькопирита) и кадмий (до 0,35 мас.%).

Температура образования сульфидной минерализации оценивалась нами по двум геотермометрам: по содержанию кобальта и никеля в пирите [6] и по содержанию FeS в сфалерите [5]. В первом случае кобальтистые пириты попали в область 500-600°C, а чистые в 400-500°C, во втором – количество сульфида железа растворенного в сфалерите соответствует 710-730°C. Если учесть, что пирит является самым ранним сульфидом в изученной нами ассоциации, а сфалерит – самым поздним, то полученные температуры можно признать сомнительными.

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS (грант 01-0314).

Литература

1. *Кольская сверхглубокая*. М.: Недра, 1984. 490 с.
2. *Кольская сверхглубокая*. Научные результаты и опыт исследований. М.: МФ «ТЕХНОНЕФТЕГАЗ», 1998. 260 с.
3. *Рамдор П.* Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во «Иностранной литературы», 1962. 1132 с.
4. *Смолькин В.Ф., Митрофанов Ф.П., Аведисян А.А., Балашов Ю.А., Балаганский В.В., Борисов А.Е., Борисова В.В., Волошина З.М., Козлова Н.Е., Кравцов Н.А., Негруца В.З., Мокроусов В.А., Петров В.П., Радченко А.Т., Скуфьин П.К., Федотов Ж.А.* Магматизм, седиментогенез и геодинамика Печенгской палеорифтогенной структуры. Апатиты: КНИЦ РАН, 1995. 256 с.
5. *Hutchison M.N., Scott S.D.* Sphalerite geobarometry in the Cu-Zn-S system // *Economic Geology*. Vol. 76. 1981. P. 143-153.
6. *Klemm D.D.* // *Neues Jahr. fur Miner.* 1965. Abh. 103. P. 205-255.