

УДК 549.3 + 550.428 + 552.33 (470.21)

ХАЛЬКОГЕНИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ГЛИНОЗЕМИСТЫХ ФЕНИТАХ ХИБИНСКОГО ЩЕЛОЧНОГО МАССИВА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ, РОССИЯ)

О.С. Яковлева

Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, ya_olik@mail.ru

И.В. Пеков

Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова; ГЕОХИ РАН, Москва

И.А. Брызгалов

Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Ю.П. Меньшиков

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

Апоксенолитовые глиноземистые фениты в Хибинском щелочном массиве (Кольский п-ов, Россия) характеризуются разнообразной и во многом специфичной халькогенидной, в первую очередь сульфидной, минерализацией. Халькогениды развиты в основном в существенно полевошпатовых и нефелин-полевошпатовых породах с переменными количествами других минералов (биотит, рутил, герцинит, корунд, ильменит, пирофанит, графит, силлиманит, секанинаит, самородное железо и др.). Наиболее распространены члены ряда пирротин-троилит, участками обилён молибденит. Количество остальных халькогенидов незначительно, но среди них встречаются как весьма редкие минералы (джайпурит CoS и вестерведдит FeAs — первые находки в России, тунгستنит WS_2 — первая находка для Хибин), так и геохимические уникалы — эдгарит FeNb_3S_6 и Ti-содержащие сульфиды железа. Отмечены также пирит, марказит, алабандин, халькопирит, сфалерит, лёллингит, галенит, кубанит, пентландит и др. Очень неравномерное распределение сульфидов в фенитах (от 0.0 до почти 70%) определяется исходным содержанием серы в протолите (докембрийских глиноземистых сланцах), который и предполагается ее источником. Активность S^{2-} в фенитах участками достигает рекордного для земных объектов значения, в результате чего возникают уникальные минеральные ассоциации, где в сульфиды входят Mn, W, V, и даже Nb, Ti, Cr. Анализ распределения металлов (на уровне видообразующих компонентов и «макропримесей»: от 0.1 до 10^4 мас.%) между кислородными соединениями и сульфидами позволил выстроить эмпирический ряд убывания халькофильности, т.е. сродства к S^{2-} (и, соответственно, роста литофильности) металлов: $\text{Cu, Pb, Mo} \rightarrow \text{Zn} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Mn, W, V} \rightarrow \text{Nb, Cr} \rightarrow \text{Ti} \rightarrow \text{Mg, Ca} \rightarrow \text{Al, Be, REE}$. Формирование главной массы сульфидов в глиноземистых фенитах Хибин происходило при высоких температурах ($> 500 - 600^\circ\text{C}$) и высоких значениях восстановительного потенциала.

В статье 7 таблиц, 18 рисунков, список литературы из 26 названий.

Ключевые слова: сульфиды, ряд пирротин-троилит, алабандин, тунгстенит, джайпурит, вестерведдит, халькофильность, фениты, Хибинский щелочной массив, Кольский полуостров.

Хорошо известный Хибинский массив, самый крупный в мире (1327 кв. км) щелочной комплекс, находится в центре Кольского полуострова, на контакте архейских гранито-гнейсов Кольского блока и пород протерозойской вулканогенно-осадочной серии имандра-варзуга. Этот массив центрального типа сложен главным образом агпайтовыми фельдшпатоидными породами. Его ядро образовано фойяитами, а периферическая зона — хибинитами, относимыми рядом исследователей к разновидностям фойяитов. Между фойяитами и хибинитами расположена кольцевая интрузия мельтейгит-уртитов и апатит-нефелиновых пород, сопровождаемых рисчорритами (Горстка, 1971).

К контакту фойяитового ядра массива и рисчорритов приурочены многочисленные переработанные (фенитизированные) ксенолиты, размеры которых варьируют от

первых метров до нескольких километров. В основном они сосредоточены в пределах гор Эвеслогчорр, Юкспор, Кукисвумчорр, Поачвумчорр, Каскасньюнчорр, Рисчорр и Партомчорр, т.е. на южной, юго-западной и западной границах фойяитового ядра. Большинство исследователей сходится на том, что эти ксенолиты представляют собой останцы вмещающих пород в кровле Хибинского интрузива, подвергшиеся фенитизации в результате внедрения щелочной магмы. Природа их протолита по сей день дискуссионна. Исходя из текстурно-структурных признаков, мелкозернистые породы переработанных ксенолитов нередко называют роговиками, а по генезису это в подавляющем большинстве, несомненно, фениты. Они отличаются чрезвычайно широким минеральным разнообразием. Это в большинстве своем богатые

алюминием, до очень высокоглиноземистых, породы, обычно сложенные щелочными полевыми шпатами, нефелином, слюдами, андалузитом, силлиманитом, членами ряда кордиерит-секанинаит, герцинитом, корундом и др.

Результаты изучения апоксенолитовых пород Хибин и слагающих их минералов представлены в работах целого ряда исследователей (Куплетский, 1923; Бонштедт и др., 1937, Меньшиков, 1978, Костылева-Лабунцова и др., 1978_{1,2}; Шлюкова, 1986; Barkov *et al.*, 1997, 2000_{1,2}, 2006; Меньшиков и др., 1999, 2001; Yakovenchuk *et al.*, 2005; Корчак, 2008; Азарова, Шлюкова, 2008). Некоторые аспекты их минералогии и геохимии затрагивались и нами (Яковлева и др., 2006_{1,2}, 2009).

В фениitized ксенолитах Хибинского массива развита очень своеобразная, местами весьма богатая халькогенидная минерализация, однако систематические работы, направленные на ее изучение, ранее не проводились. Этому посвящена настоящая статья.

Материал для изучения отобран из ксенолитов, расположенных на горах Кукисвумчорр (в том числе на Свинцовом ручье, участке Ласточкино Гнездо, в верховьях р. Тулиок по левому борту ее долины), Эвеслогчорр (в том числе на Корундовом ручье и в ущелье Ферсмана), Каскасньюнчорр, Юкспор (верховья долины Гакмана) и Партомчорр. Привлечены, конечно же, и литературные данные.

Оптическое изучение полированных шлифов проводилось на электронном микроскопе AxioPlan 2 imaging (Carl Zeiss). РЭМ-фото в отраженных электронах и энергодисперсионные спектры минералов получены на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6480LV с комбинированной системой рентгеноспектрального микроанализа.

Количественное определение химического состава минералов выполнено с помощью электронно-зондового микроанализатора Camebax SX 50 при ускоряющем напряжении 15 кВ, токе зонда 30 нА и диаметре электронного пучка 3 мкм. Такие условия позволяют максимально корректно определить содержания всех элементов, включая серу. Эталоны: Fe, S — троилит, Mn — алабандин, Cu — ковеллин, Zn — сфалерит, Co — кобальтин, Ni — миллерит, Ti — Ti, V — сульванит, Cr — Cr₂O₃, Mo — молибденит, W — тунгстенит, Cd — CdIn₂S₄, As — арсенипитрит, Sb — антимонит.

Сульфидоносные минеральные ассоциации в глиноземистых фенитах Хибин

В составе халькогенидов апоксенолитовых глиноземистых фенитов Хибин резко преобладают сульфиды, изредка встречаются арсениды.

Сульфиды в тех или иных количествах находятся во всех типах этих пород. Обычно они присутствуют в качестве аксессуарных минералов, но встречаются и «руды», содержащие до десятков процентов пирротина (Юкспор, Ласточкино Гнездо, Каскасньюнчорр) или молибденита (Ласточкино Гнездо). Наиболее обогащены сульфидами существенно полевошпатовые и нефелин-полевошпатовые породы (и прожилки в них) с переменными количествами других минералов: ильменита, биотита, рутила (Каскасньюнчорр, Эвеслогчорр, Поачвумчорр, Ласточкино Гнездо); биотита, корунда, силлиманита, пирофанита, графита, энigmatита (Свинцовый Ручей); ильменита, биотита, ульвешпинели (верховья р. Тулиок); биотита, силлиманита, секанинаита, амфибола (верховья р. Тулиок, Ласточкино Гнездо); ильменита, герцинита, самородного железа (Партомчорр); биотита, минералов ряда ильменит-пирофанит, щелочных амфибола и пироксена (Юкспор, Ласточкино Гнездо). Как правило, в существенно оксидных и богатых бесщелочными высокоглиноземистыми силикатами породах сульфидов меньше; встречаются и практически бессульфидные ассоциации. В целом бедны сульфидами ксенолиты Свинцового и Корундового ручьев. В одном и том же проявлении могут соседствовать очень сильно различающиеся по содержанию сульфидов породы. Так, в ксенолите на г. Каскасньюнчорр на расстоянии первых метров друг от друга находятся «рудные» (до 70 об.% пирротина) и почти бессульфидные фениты, у которых минеральный состав оксидно-силикатной части близок.

Одним из самых богатых сульфидами и, несомненно, наиболее интересным в минералогическом и геохимическом отношении является фенит очень специфического типа в составе ксенолита на г. Каскасньюнчорр, впервые описанный А.Ю. Барковым с соавторами (Barkov *et al.*, 1997, 2000_{1,2}) и дополнительно изучавшийся Ю.А. Корчак (2008) и нами. Это серая мелко- до крупнозернистой порода, состоящая преимущественно из щелочных полевых шпатов и нефелина (частично замещенного содалитом), содержание каждого из которых участками достигает

75–80%. К породообразующим минералам также относятся фторфлогопит, корунд, рутил и пирротин, часто Ti-, V- и Cr-содержащий, в акцессорных количествах присутствуют монацит-(Ce), фторапатит, нейборит, хризоберилл, графит. Сульфиды здесь разнообразны и весьма необычны: это титанистые разновидности пирротина, пирита и марказита (наряду с ними встречаются и выделения этих минералов без Ti), богатый Fe алабандин, халькопирит, сфалерит, вюртцит, галенит, молибденит (в том числе вольфрамитый), тунгстенит и, наконец, эндемичные халькогениды ниобия – эдгарит FeNb_3S_6 и недоизученный сульфид Nb, W, Mg и Al. Силикаты и оксиды здесь практически лишены железа. Такая необычная сульфидная минерализация делает эту породу уникальной.

Характеристика минералов

Все исследователи фенитизированных ксенолитов Хибин отмечают, что в высокоглиноземистых образованиях из сульфидов наиболее широко распространен **пирротин** Fe_{1-x}S (Куплетский, 1923; Бонштедт и др., 1937; Костылева-Лабунцова и др., 1978_{1,2}; Шлюкова, 1986; Корчак, 2008). Этот минерал обычно формирует отдельные зерна неправильной формы или сплошные массы, реже грубо образованные кристаллы в форме шестиугольных табличек. Содержание пирротина варьирует в очень широких пределах: от отсутствия до почти 70% – это уже «рудные» ассоциации. Его индивиды изредка достигают 1 см, обычно же не превышают 1 мм. В роговикоподобных полевошпатовых, нефелин-полевошпатовых, биотит-полевошпатовых, ильменит-герцинитовых породах, в том числе корундоносных, пирротин наблюдается в виде мелкой вкрапленности, в пегматоидных же разновидностях фенитов он образует

сплошные скопления до нескольких сантиметров.

На фотографиях, сделанных под электронным микроскопом, видно, что многие зерна пирротина неоднородны, в том числе нередко индивиды с закономерно ориентированной системой более ярких в отраженных электронах ламелей в матрице более темной фазы (рис. 1). Такое строение, достаточно характерное для этого минерала в целом и иногда наблюдаемое также под оптическим микроскопом, объясняют либо двойниковым строением (Костылева-Лабунцова и др., 1978₂), либо распадом твердого раствора на две близкие по составу пирротиновые фазы (Рамдор, 1962). В нашем случае более яркая фаза пусть и незначительно, но все же богаче железом по сравнению с темной (соответственно, эмпирические формулы $\text{Fe}_{0.95}\text{S}_{1.00}$ и $\text{Fe}_{0.93}\text{S}_{1.00}$ – ан. 4 и 5 в табл. 1), а под оптическим микроскопом зерна пирротина выглядят однородными. В свете этих фактов предположение о распаде твердого раствора лучше объясняет природу такой неоднородности.

На Кукисвумчорре в альбитовой жиле, секущей глиноземистые фениты, наблюдаются обрастание и коррозия пирротином ильменита и рутила (рис. 2). В этой же породе З.В. Шлюкова (1986) отмечает обрастание ильменита пирротином, что позволяет сделать вывод о более позднем формировании сульфида по отношению к оксидам в этой ассоциации. В других случаях видны признаки совместной кристаллизации пирротина с породообразующими силикатами и оксидами.

Акцессорный **троилит** FeS более редок. Он найден нами в четырех ксенолитах на Кукисвумчорре, Каскасньончорре, Юкспоре и Партомчорре. В большинстве случаев троилит сосуществует с пирротином, образуя редкие зерна до 0.1 мм, и по оптическим свойствам они не различаются. На Каскасньончорре троилит встречается в биотит-полево-

Рис. 1. Индивид пирротина (Pyrr), сложенный двумя близкими по составу областями (светлые области отвечают более высокожелезистой), с вроском кубанита (Cub) в анортклазовой матрице (Anort), г. Кукисвумчорр (РЭМ-фото в отраженных электронах).

Рис. 2. Обрастание и коррозия пирротином (Pyrr) ильменита (Ilm) и рутила (Rut) в альбитовой (Ab) жиле, секущей фениты ксенолита Ласточкино Гнездо на г. Кукисвумчорр (РЭМ-фото в отраженных электронах).

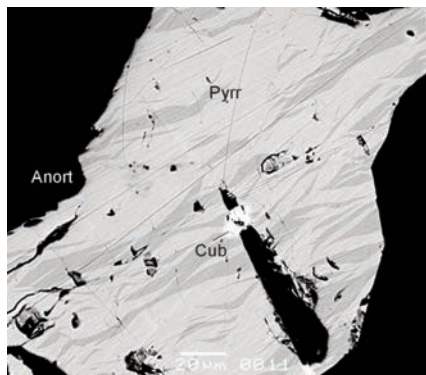


Таблица 1. Химический состав пирротина (1–21) и троилита (22–29) из глиноземистых фенитов Хибинского массива

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	мас.%														
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.91	1.60	2.87	2.93	0.43
V	—	—	н/а	н/а	н/а	—	0.89	1.44	—	—	0.46	0.19	0.64	0.22	1.16
Cr	н/а	н/а	н/а	н/а	н/а	—	0.23	0.38*	0.06	0.07	—	—	—	—	н/а
Mn	0.07	—	—	—	—	—	0.08	0.19	—	—	—	—	—	0.08	—
Fe	63.15	61.40	60.96	62.44	61.62	60.56	59.39	58.54	59.62	61.29	56.84	60.30	55.91	59.86	57.84
Co	—	0.07	0.07	—	—	—	н/а	н/а	н/а	—	н/а	н/а	н/а	н/а	0.12
Ni	—	0.06	—	0.05	—	0.12	н/а	н/а	н/а	—	н/а	н/а	н/а	0.11	—
Cu	—	—	—	—	—	—	—	—	0.14	—	—	0.06	—	0.07	—
Zn	0.12	0.16	—	—	—	0.07	—	0.24	—	—	—	0.24	—	—	0.13
S	38.26	37.70	39.34	37.89	38.10	38.49	38.22	38.47	37.82	37.14	36.31	36.91	38.47	39.46	38.59
Сумма	101.60	99.39	100.37	100.38	99.72	99.24	98.80	99.26	97.81**	98.50	97.33**	99.29	97.89	102.73	98.27
	Число атомов на формулу (а.ф.), расчет на 1 S														
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.05	0.03	0.04	0.05	0.01
V	—	—	—	—	—	—	0.01	0.02	—	—	0.01	—	0.01	—	0.02
Fe	0.95	0.94	0.89	0.95	0.93	0.90	0.89	0.87	0.90	0.95	0.89	0.94	0.83	0.87	0.86
S	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Примечание: ан. 1–6, 25, 27, 29 – г. Кукисвумчорр (в том числе 1, 24 – верховья р. Тулиок, 2–6, 25 – Ласточкино Гнездо, 27, 29 – Свинцовый ручей), ан. 7–21, 23–24 – г. Каскасньончорр, ан. 22 – г. Партомчорр, ан. 26 – г. Юкспор, ан. 28 – г. Эвслогчорр. Ан. 1–19, 22–26 – наши данные, ан. 20–21, 27–29 – литературные данные: 20 – Barkov et al., 2000;

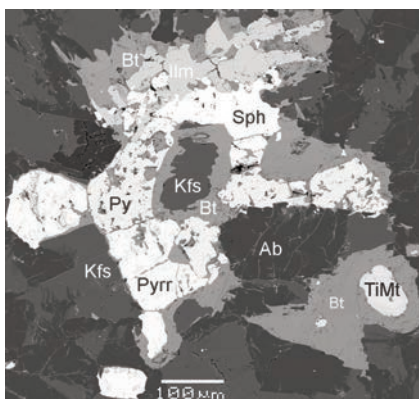
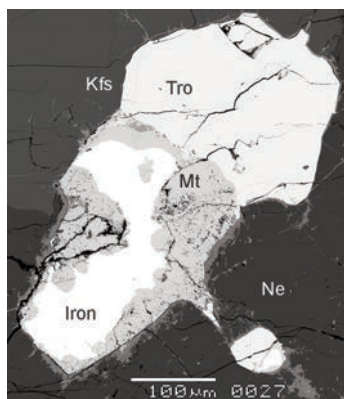


Рис. 3. Зерно троилита (Tro), тесно ассоциирующее с самородным железом (Iron) [его выделения окружены каймой магнетита (Mt)], калиевым полевым шпатом (Kfs) и нефелином (Ne), г. Партомчорр (РЭМ-фото в отраженных электронах).

Рис. 4. Срастание пирита (Py), пирротина (Pyrr) и сфалерита (Sph) в ассоциации с ильменитом (Ilm), биотитом (Bt), Ti-магнетитом (TiMt), альбитом (Ab) и калиевым полевым шпатом (Kfs) (РЭМ-фото в отраженных электронах).

шпатовых ассоциациях с переменными содержаниями нефелина, рутила, ильменита, пирротина, пирофанита, фаялита, амфибола, пироксена, мусковита, алабандина, халькопирита, сфалерита. В антит-альмандин-анортклазовом фените на г. Кукисвумчорр троилит образует мелкие (до 30 мкм) пластинчатые зерна в ассоциации с самородным железом, герцинитом, ильменитом, Ti-магнетитом и рутилом (Корчак, 2008; наши данные). В существенно калиевополевошпат-альбитовой породе с мусковитом и пирофанитом на г. Юкспор троилит сосуществует с пирротинном, значительно уступая ему по количеству. Их общее содержание в породе

достигает первых процентов. На Партомчорре троилит образует индивиды до 0.2 мм в срастании с самородным железом в матрице нефелина и калиевого полевого шпата; с ними ассоциируют ильменит, герцинит и образующий каймы вокруг железа магнетит (рис. 3), а также углеродистое вещество. З.В. Шлюкова (1986) отмечает троилит в содалит-ортоклазовом прожилке, секущем ксенолит на г. Поачвумчорр, в ассоциации с железом, магнетитом, халькопиритом, кубанитом, сфалеритом, V,Zr,Nb-содержащим рутилом, герцинитом и битуминозным веществом.

Атомное отношение Me:X в минералах серии пирротин-троилит из апоксенолито-

Таблица 1. Продолжение

	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
	мас.%													
Ti	0.30	0.92	—	—	1.4–3.7	1.2–3.9	—	—	—	0.09	—	—		
V	1.86	1.22	—	—	0.2–0.6	0.2–0.4	—	—	0.16	0.08	—	—		0.01
Cr	н/а	н/а	н/а	н/а			н/а	—	0.10	0.06	—	—		
Mn	—	—	—	—	0.0–0.1	н/а	—	0.04	—	0.09	—	н/а		
Fe	57.11	56.43	58.72	58.31	56.2–58.5	56.1–59.2	63.92	63.57	61.49	65.92	65.26	62.75	63.60	62.89
Co	0.06	—	0.11	—			—	—	—	—	0.19			0.02
Ni	—	0.11	0.71*	0.52*			—	—	—	—	—			
Cu	—	—	—	—			—	—	0.07	—	—			
Zn	—	—	—	—			—	—	—	—	—			
S	38.94	38.52	39.12	38.47	38.9–40.1	38.5–40.7	34.57	34.74	36.59	35.90	36.13	37.49	36.47	36.72
Сумма	98.27	97.20	98.66	97.30			98.49	98.34	98.41	102.14	101.58	100.24	100.07	99.64
	Число атомов на формулу (а.ф.), расчет на 1 S													
Ti	0.01	0.02	—	—	0.02–0.06	0.02–0.07	—	—	—	—	—			
V	0.03	0.02	—	—	0.00–0.01	0.00–0.01	—	—	—	—	—			
Fe	0.84	0.84	0.86	0.87	0.82–0.85	0.79–0.87	1.06	1.05	0.96	1.05	1.04	0.96	1.00	0.98
S	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

21 – Barkov et al., 1999; 27, 29 – Шлюкова, 1986; 28 – Yakovenchuk et al., 2005. * – соответствует 0.01 а.ф. ** – в сумму анализа входит также As (мас. %): 9 – 0.17 (0.00 а.ф.), 11 – 0.82 (0.01 а.ф.). Здесь и в табл. 2–7 прочерк означает величину ниже предела обнаружения, в мас. % (и, соответственно, 0.00 в формуле); н/а – компонент не анализировался; пустая ячейка – нет данных.

вых фенитов Хибин варьирует, согласно нашим и литературным данным, от 0.85 до 1.06 (табл. 1), причем наблюдается непрерывный ряд. К троилиту мы относим фазы, более железистые, чем $Fe_{0.95}S_{1.00}$. Преобладает в изученных породах пирротин состава, близкого к $Fe_{0.93}S_{1.00}$. Из значимых примесей минералы этого ряда содержат: Me = Ti, V, Ni, Cr; X = As. Необычные примеси – Ti (до 3.9 мас.%), V (до 1.9%) и Cr (до 0.4%) – характерны для пирротина из нефелин-полевошпатовой породы с практически безжелезистым фторфлогопитом, рутилом, корундом, алабандином, эдгаритом, W-содержащим молибденитом, тунгстенитом на г. Каскасньончорр. Пирротин из этой уникальной ассоциации впервые описан А.Ю. Барковым с соавторами (Barkov et al., 1997) и дополнительно изучен нами; в частности, установлены его наиболее высокованадиевая (ан. 16 в табл. 1) и хромосодержащая разновидности (ан. 8 в табл. 1). Отметим, что в других типах фенитов этого ксенолита присутствует разнообразная оксидно-силикатная хромовая минерализация (Яковлева и др., 2009).

В пирротинсодержащих фенитах нередко **пирит** и **марказит** FeS_2 , но их количество невелико: редко до 5% от объема породы. Оптическое исследование показало, что среди них значительно преобладает пирит. Дисульфиды железа образуют самостоятельные

зерна, размер которых обычно не превышает 1 мм. Иногда наблюдаются их сращения между собой, а также с пирротином или сфалеритом (рис. 4). Типично явление дисульфидизации пирротина: пирит и марказит развиваются в виде тонких каемок вокруг его индивидов и по трещинам (рис. 5). Иногда встречаются метакристаллы пирита в пирротине (изобилующие включениями последнего) и среди нерудных минералов. Нами пирит зафиксирован в фенитах гор Каскасньончорр, Кукисвумчорр, Юкспор и Эвеслогчорр, а марказит – на г. Каскасньончорр.

Специфической особенностью пирита и марказита в некоторых из описываемых пород является примесь титана. А.Ю. Барковым с соавторами (Barkov et al., 1997, 2000₂) и нами титанистые разности дисульфидов железа встречены только на г. Каскасньончорр в фенитах, содержащих Ti-пирротин, а Ю.А. Корчак (2008) отмечает их и в других ксенолитах Хибин. Зафиксированное нами содержание Ti в пирите – до 3.9 мас.% (ан. 2 в табл. 2) – значительно превышает цифры, указанные в более ранних публикациях, и является рекордным для пирита. Характерно, что если дисульфидизации подвергается Ti-содержащий пирротин, то титан наследуется пиритом, причем его содержание даже может расти по сравнению с исходным пир-

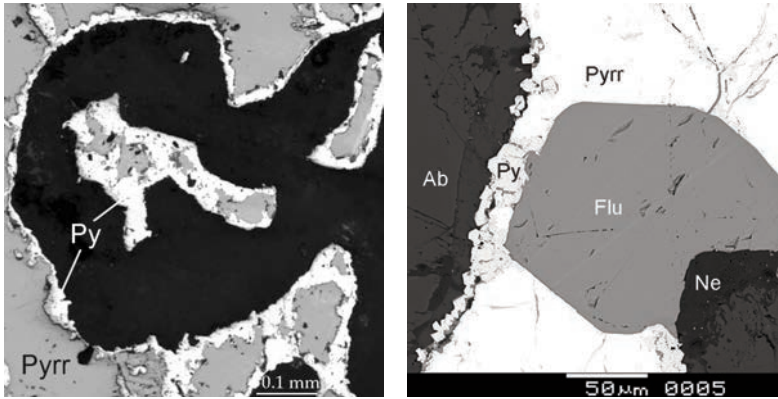


Рис. 5. Обрастание с замещением пирротина (Pyrr) пиритом (Py), в ассоциации с альбитом (Ab), нефелином (Ne) и флюоритом (Flu), г. Каскасныончорр (а – в отраженном свете, никели //, b – РЭМ-фото в отраженных электронах).

Таблица 2. Химический состав пирита (1–7) и марказита (8–12) из глиноземистых фенитов Хибинского массива

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	мас.%											
Ti	0.13	3.92	–	1.6–2.7	0.56	0.0–2.7	0.64	0.7–2.7	1.42	1.37	1.06	0.98
V	–	0.15	–	0.2–0.3	–	0.0–0.7	–	0.2–0.4	0.19	0.09	0.53	–
Mn	–	0.08	–	н/а	–	–	–	0.0–0.1	–	–	–	–
Fe	45.58	45.55	48.21	44.2–46.4	45.97	44.1–46.4	46.11	44.3–45.6	47.09	46.13	46.04	47.12
Co	н/а	н/а	0.07	н/а	–	–	–	0.00–0.03	–	–	–	–
Ni	н/а	н/а	0.10	н/а	–	0.0–0.1	0.02	0.00–0.04	–	–	–	–
As	1.36	0.74	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
S	50.51	50.91	51.05	50.5–52.7	53.34	51.5–52.8	53.14	50.6–51.7	50.84	52.26	52.16	51.72
Сумма	97.45	97.20	99.43	–	99.31	–	99.27	–	97.93	98.39	98.20	98.84
	Число атомов на формулу, расчет на 2 S											
Ti	–	0.10	–	0.04–0.06	0.01	0.00–0.07	0.02	0.02–0.07	0.04	0.03	0.03	0.03
V	–	–	–	0.00–0.01	–	0.00–0.02	–	0.01	0.01	–	0.01	–
Fe	1.04	1.03	1.08	1.00–1.02	0.99	0.97–1.03	1.00	1.00–1.01	1.06	1.01	1.01	1.05
S	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

Примечание: ан. 1–2, 4, 6, 8–9 – г. Каскасныончорр, 3 – Ласточкино Гнездо, 5, 10 – г. Эвеслогчорр, 7, 11–12 – г. пик Марченко. Ан. 1–3 – наши данные, ан. 4–12 – литературные данные: 4, 8 – Barkov et al., 20001; 5–7, 10–12 – Корчак, 2008; 9 – Yakovenchuk et al., 2005.

ротином. Так, в состав пирротина из этой ассоциации входят 0.03–0.05 атома на формулу (а.ф.) Ti, тогда как окаймляющий его пирит содержит уже 0.10 а.ф. Ti (ан. 2 в табл. 2). Из других примесей отметим (табл. 2) V (до 0.7 мас.%, в том числе в Ti-содержащем пирите с Каскасныончорра), Mn (редко до 0.1%), As (до 1.4%).

Возникшее в ходе работы предположение, что титан, фиксируемый в электронно-зондовых анализах сульфидов железа, может захватываться из субмикроскопических вростков рутила, который обычен в окружающей породе, не подтвердилось: в энергодисперсионных спектрах этих минералов, записанных с помощью высокочувствительного спектрометра INCA-Energy 350 с окном ATW-2, отсутствует пик кислорода, который должен был бы неизбежно про-

явиться при содержании Ti уже 2–3 мас.%, если бы этот элемент находился в форме TiO_2 : такие содержания Ti соответствуют 1.3–2 мас.% O. Этот спектр приведен на рисунке 6 вместе со спектром ильменита $FeTiO_3$, на котором видно, что пики кислорода и металлов хорошо разрешаются при данном масштабе записи спектра.

В ксенолите на г. Каскасныончорр нами впервые для Хибин достоверно установлен пентландит $(Fe,Ni)_9S_8$ – $(Ni,Fe)_9S_8$ (отмечавшийся ранее для этого массива «пентландит», судя по данным спектрального анализа, является кобальтпентландитом; Костылева-Лабунцова и др., 1978.). Он формирует вростки до 40 мкм в пирротине из эгирин-ильменит-нефелин-полевошпатовой породы, содержащей мусковит, энigmatит, щелочной амфибол, пирротин, халькопирит

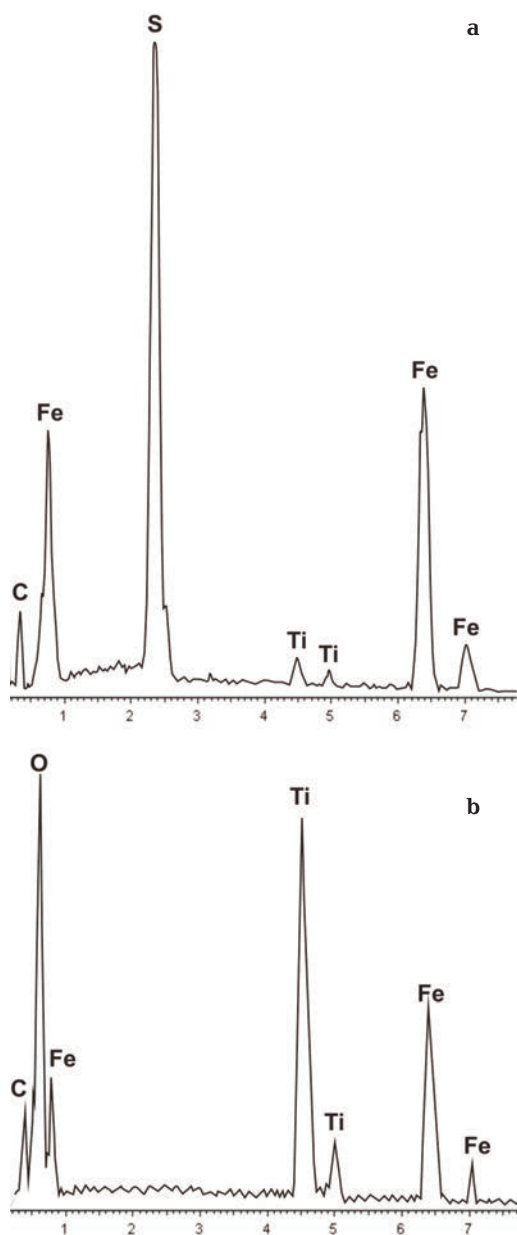


Рис. 6. Энергодисперсионные спектры Ti-содержащего пирротина (а) и ильменита (b) из ксенолита на г. Каскасньончорр. Пик С связан с углеродным напылением анилифа.

Рис. 7. Вростки пентландита (Pent) в зерне пирротина (Pyrr) в матрице калиевого полевого шпата (Kfs), г. Каскасньончорр (РЭМ-фото в отраженных электронах).

и сфалерит (рис. 7). Главная примесь в пентландите — Co (1.6–1.7 мас.%), меньше он содержит Cu (до 0.2%). В пределах изученного индивида этого минерала присутствуют участки с преобладанием как Fe, так и Ni (ан. 10–11 в табл. 3).

Молибденит MoS_2 — обычный акцессорный минерал высокоглиноземистых фенитов Хибин, а иногда его содержание таково, что он становится породо-, точнее, рудообразующим (рис. 8). Так, в районе Ласточкина Гнезда этот минерал формирует небольшие штокверковые зоны, где его концентрация доходит до 30%. Состав такого «рудного» молибденита близок к теоретическому, тогда как акцессорный вкрапленный молибденит здесь же содержит до 0.3 мас.% W (ан. 2 в табл. 4). В корунд-пирротин-анортоклазовой породе на г. Каскасньончорр встречается существенно более богатый вольфрамом молибденит, образующий зональные таблитчатые кристаллы до 60 мкм в ассоциации с Ti, V-содержащими разновидностями пирротина, пирита и марказита, алабандином, эдгаритом, тунгستنитом, фторфлогопитом, рутилом, корундом, монацитом-(Ce), графитом. А.Ю. Барковым с соавторами (Barkov *et al.*, 2000₂) здесь найден молибденит, содержащий до 5.8 мас.% W, а нами — до 22.7% W (табл. 4). В этой же ассоциации встречается и молибденит без вольфрама, причем иногда в пределах одного кристалла сосуществуют участки разного состава. На рисунке 9 видно, что W-содержащий молибденит образуется позже безвольфрамитного. Нередко в состав молибденита входит примесь Fe — до 1.3 мас.% (табл. 4). По данным Ю.А. Корчак (2008), в апоксенолитовых фенитах Хибин преимущественно распространен молибденит-2H.



Таблица 3. Химический состав халькопирита (1–4), кубанита (5–6), борнита (? (7)), джайпурита (8–9) и пентландита (10–11) из глиноземистых фенитов Хибинского массива

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	мас.%										
Mn	0.04	0.08	0.07		–			–	–	–	–
Fe	30.85	31.23	31.49	29.83	43.25	40.54	18.57	5.71	6.64	36.59	27.48
Co	–	–	–		–			56.53	56.06	1.60	1.72
Ni	–	0.08	0.09		0.05			1.90	2.18	29.34	36.38
Cu	32.70	33.09	33.64	33.76	20.77	23.78	59.35	–	0.08	0.16	–
S	34.88	32.65	34.38	35.28	35.53	35.75	24.32	33.97	33.85	32.79	32.09
Сумма	98.47	97.13	99.67	98.87	99.60	100.07	102.24	98.11	99.00*	100.48	97.67
	Число атомов на формулу, расчет на 2 S (халькопирит), 3 S (кубанит), 4 S (борнит), 1 S (джайпурит), сумму атомов = 17 (пентландит)										
Fe	1.02	1.10	1.05	0.97	2.10	1.95	1.75	0.10	0.11	5.05	3.91
Co	–	–	–		–			0.92	0.90	0.20	0.23
Ni	–	–	–		–			0.03	0.03	3.85	4.92
Cu	0.95	1.02	0.99	0.97	0.89	1.01	4.93	–	–	0.02	–
S	2.00	2.00	2.00	2.00	3.00	3.00	4.00	1.00	1.00	7.88	7.94

Примечание: ан.: 1, 4–7 – г. Кукисвумчорр, 2, 10–11 – г. Каскасньюнчорр, 3, 8–9 – г. Юкспор. Ан. 1–3, 5, 8–11 – наши данные, ан. 4, 6–7 – литературные данные: 4, 7 – Корчак, 2008; 6 – Yakovenchuk et al., 2005.

* – в сумму анализа входит также 0.19 мас. % Zn.

Таблица 4. Химический состав молибденита (1–7) и тунгстенита (8) из глиноземистых фенитов Хибинского массива

	1	2	3	4	5	6	7	8
	мас.%							
Fe	0.36	0.50	–	н/а	–	0.0–1.3	–	–
Mo	60.85	60.92	60.11	48.34	43.28	51.9–58.8	59.94	–
W	–	0.32	–	14.87	22.70	0.1–5.8	–	73.48
S	35.81	36.06	39.30	37.46	32.32	39.5–41.1	39.77	25.60
Сумма	97.02	97.80	99.41	100.67	98.30		99.71	99.08
	Число атомов на формулу, расчет на 2 S							
Fe	0.01	0.02	–	–	–	0.00–0.04	–	–
Mo	1.16	1.14	1.00	0.86	0.90	0.88–0.97	1.01	–
W	–	–	–	0.14	0.25	0.00–0.05	–	1.00
S	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

Примечание: ан.: 1–2, 7 – г. Кукисвумчорр (в том числе 1, 7 – верховья р. Тулюок, 2 – Ласточкино Гнездо), 3–6, 8 – г. Каскасньюнчорр. Ан. 1–5, 8 – наши данные, ан. 6–7 – литературные данные: 6 – Barkov et al., 20002, 7 – Корчак, 2008.

Тунгстенит WS_2 впервые для Хибин установлен нами в существенно полевошпатовой с корундом, рутилом и топазом породе фениitizedированного ксенолита на г. Каскасньюнчорр (и независимо найден там же М.М. Моисеевым: персональное сообщение), а также в ассоциации с Тi-пирротинном и эдгаритом. Он образует мягкие темно-серые с металло-видным блеском, визуально неотличимые от графита шестиугольные и неправильной формы пластинки до 1 мм. Состав минерала стехиометричный, содержание примесей ниже предела обнаружения электронно-зондовым методом (ан. 8 в табл. 4).

Алабандин MnS – характерный акцессорный минерал корунд-пирротин-ортокла-

зовых, нефелин-полевошпатовых, корунд-нефелиновых, мусковит-флогопит-анортоклазовых и содалит-альбит-анортоклазовых роговиков ксенолита на г. Каскасньюнчорр (Barkov et al., 1997; Yakovenchuk et al., 2005; наши данные). Нами он обнаружен также в корундсодержащей пирротин-полевошпатовой породе ксенолита г. Кукисвумчорр (верховья р. Тулюок) и титанит-биотит-нефелин-полевошпатовом фените г. Юкспор (долина Гакмана). Минерал формирует округлые зерна до 0.5 мм, как правило в сростании с пирротинном (рис. 10). По оптическим свойствам он соответствует алабандину. Минерал во всех случаях представлен железистой разновидностью (6.0–9.8 мас.% Fe;

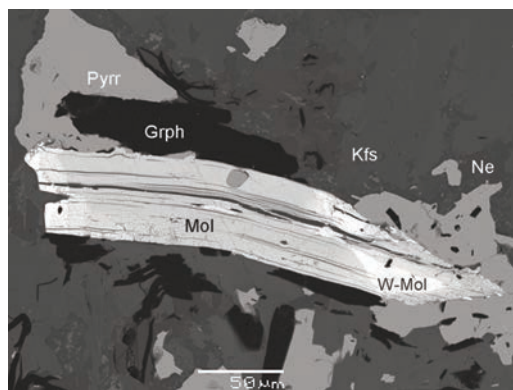
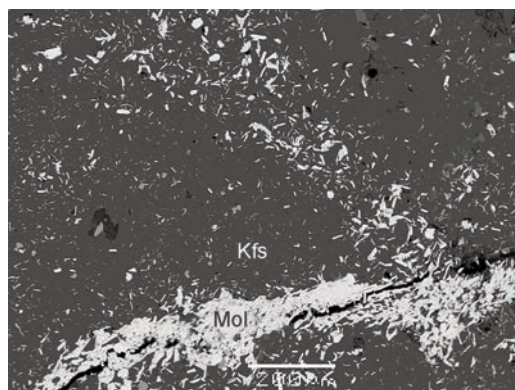


Рис. 8. Молибденит (Mol) существенно калиевополевошпатовых (Kfs) фенитах Ласточкина Гнезда: его содержание молибдена здесь достигает рудообразующего (РЭМ-фото в отраженных электронах).

Рис. 9. Кристалл молибденита с г. Каскаснынчорр, содержащий участки разного состава – с вольфрамом (W-Mol) (до 14.9 мас. % W) и без него (Mol), в ассоциации с графитом (Grph), пирротинном (Pyrr), нефелином (Ne) и калиевым полевым шпатом (Kfs) (РЭМ-фото в отраженных электронах).

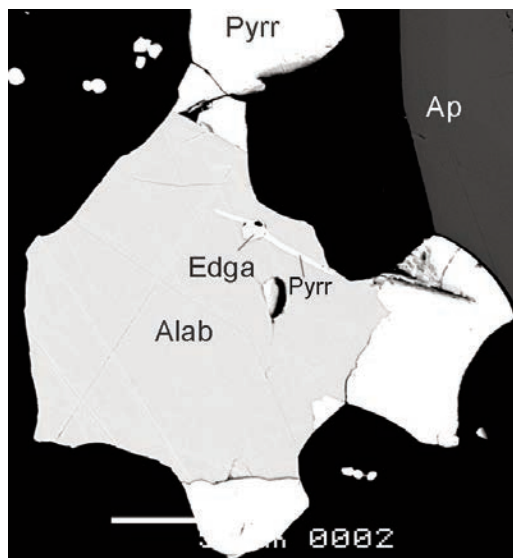
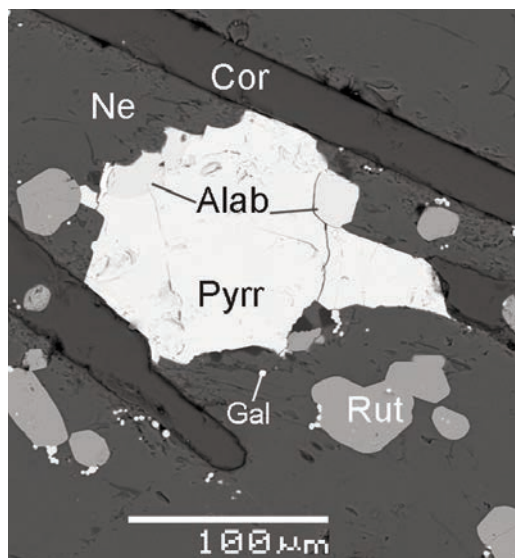


Рис. 10. Срастание алабандина (Alab) и пирротина (Pyrr) в корунг-нефелиновой (Cor, Ne) породе, в ассоциации с рутилом (Rut) и галенитом (Gal), г. Каскаснынчорр (в отраженных электронах).

Рис. 11. Пластинчатое включение эдгарита (Edga) в зерне алабандина (Alab) в тесной ассоциации с пирротинном (Pyrr) и фторапатитом (Ap), г. Каскаснынчорр (РЭМ-фото в отраженных электронах).

табл. 5), а в одном образце с Каскаснынчорра обнаружено 0.85 мас.% As.

В корунд-пирротин-анортоклазовом фените ксенолита на г. Каскаснынчорр встречается минерал-эндемик **эдгарит** FeNb_3S_6 . Этот уникальный сульфид ниобия, открытый А.Ю. Барковым с соавторами (Barkov *et al.*, 2000₁), не является здесь редкостью. Он формирует пластинчатые включения (до 0.15 мм) в титанистом пирротине и алабандине, а также агрегаты (до 1 мм) темно-серых пластинок, нарастающие на грани кристаллов пирротина (Barkov *et al.*, 1997, 2000_{1,2}; наши данные; рис. 11). Визу-

ально эдгарит напоминает темный молибденит и неотличим от встречающихся здесь же графита и тунгстенита. Химический состав эдгарита таков (мас.%): Ti до 0.09, V до 0.41, Mn до 0.13, Fe 8.84–10.60, Nb 52.33–54.10, S 35.30–37.13, что отвечает формуле $(\text{Fe}_{0.82-1.00}\text{Mn}_{0.00-0.01})(\text{Nb}_{2.95-3.17}\text{V}_{0.00-0.04}\text{Ti}_{0.00-0.01})\text{S}_6$ (Barkov *et al.*, 1997, 2000₁; Корчак, 2008).

Халькопирит CuFeS_2 — обычный акцессорный минерал глиноземистых фенитов Хибин. Сколь-либо значимых скоплений он не образует. Как правило, выделения халькопирита мелкие (до 50 мкм), неправильной

Таблица 5. Химический состав алабандина из глиноземистых фенитов г. Каскасныончорр

	1	2	3	4	5	6	7
	мас.%						
Mn	56.27	55.52	56.61	58.43	55.89	54.72	54.8–56.9
Fe	8.41	6.97	6.59	6.06	7.73	9.75	6.0–7.6
S	36.88	35.82	34.75	36.07	35.85	35.27	35.9–37.8
Сумма	101.56	99.16*	97.95	100.56	99.47	99.74	
	Число атомов на формулу, расчет на 1 S						
Mn	0.89	0.90	0.95	0.94	0.91	0.91	0.87–0.90
Fe	0.13	0.11	0.11	0.09	0.12	0.16	0.09–0.12
S	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Примечание: ан. 1–4 – наши данные, ан. 5–7 – литературные данные: 5 – Yakovenchuk et al., 2005; 6 – Корчак, 2008, 7 – Barkov et al., 20001. * – в сумму анализа входит также 0.85 мас. % As (0.01 а.ф.).

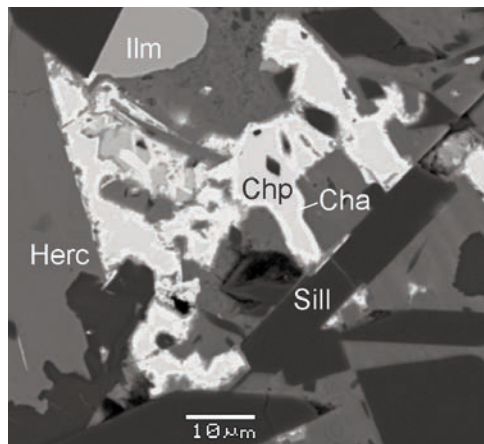
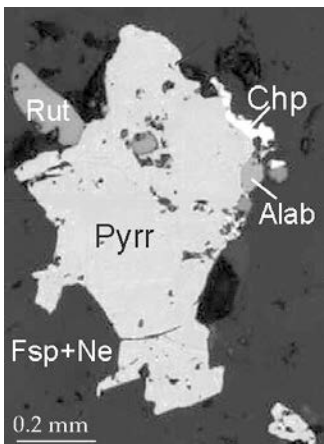


Рис. 12. Срастание халькопирита (Chp) с пирротинном (Pyrr) и алабандином (Alab) в полевошпат-нефелиновой породе (Fsp + Ne) с рутилом (Rut), г. Каскасныончорр (в отраженном свете, николи //).

Рис. 13. Кайма чисто медного сульфида (халькозина? – Cha) вокруг халькопирита (Chp) в альбит-герцинит-силлиманитовой (Herc, Sill) породе с ильменитом (Ilm), г. Кукисвумчорр (РЭМ-фото в отраженных электронах).

формы, часто тесно срастаются с зернами пирротина и других сульфидов (рис. 12). Состав минерала близок к теоретическому. Из примесей можно отметить Zn – до 0.2 мас.%, Ni, Mn, As – до 0.1 мас.% (табл. 3). Типична эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите (см. ниже). В альбит-герцинит-силлиманитовой породе с корундом и ильменитом на г. Кукисвумчорр халькопирит окружен тонкой каймой чисто медного сульфида (рис. 13), вероятно, **халькозина** Cu_2S или родственной ему фазы. Подобные образования в керне скважины 557 отмечает З.В. Шлюкова (1986).

В корундоносном пегматите, секущем ксенолит на г. Кукисвумчорр, в срастании с халькопиритом найдены скопления мелких (до 0.1 мм) зерен **борнита** Cu_5FeS_4 (Шлюкова, 1986; Корчак 2008). Состав минерала, диагностированного Ю.А. Корчак (2008) как борнит, несмотря на необычно высокое содержание Fe, приведен в таблице 3.

Кубанит $CuFe_2S_3$ очень редок. Единичные находки его отмечены в аннит-альмадин-по-

левошпатовой породе ксенолита г. Кукисвумчорр, в тесной ассоциации с пирротинном, **расвумитом** KFe_2S_3 , иногда с халькопиритом, сфалеритом (Шлюкова, 1986). Нами кубанит обнаружен в биотит-полевошпатовой породе ксенолита на Кукисвумчорре вместе с пирротинном, лёллингитом, молибденитом (рис. 1; табл. 3).

Сфалерит ZnS – характерный акцессорный минерал многих фенитизированных ксенолитов (Кукисвумчорр, Юкспор, Поачвумчорр, Каскасныончорр). Однако здесь он распространен заметно меньше, чем в пегматитах и гидротермалитах Хибин, и не дает скоплений. Сфалерит отмечается практически во всех ассоциациях глиноземистых фенитов и обычно формирует отдельные зерна до 0.2 мм или тесные срастания с пирротинном (рис. 14), пиритом, ильменитом. Он отличается значительными вариациями состава (табл. 6). Характерным для всех без исключения образцов сфалерита глиноземистых фенитов является высокое содержание Fe (11.9 – 20.9 мас.%). Количество Mn варьирует

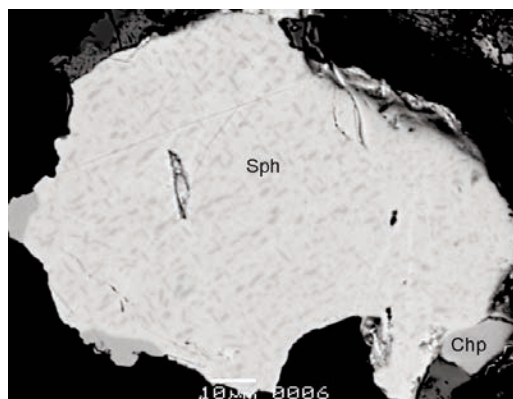
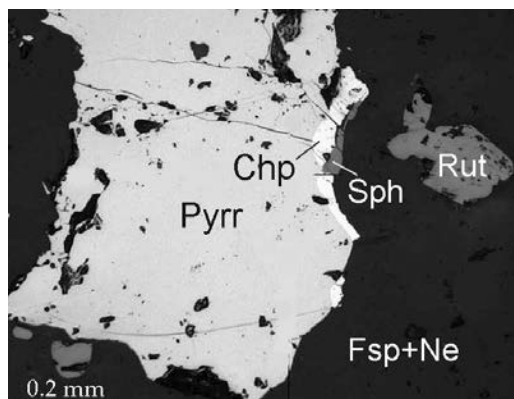


Рис. 14. Срастание сфалерита (Sph) с пирротинитом (Pyrr) и халькопиритом (Chp) в полевошпат-нефелиновой (Fsp+Ne) породе с рутилом (Rut), г. Каскасньончорр (в отраженном свете, николи //).

Рис. 15. Эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите, г. Каскасньончорр (РЭМ-фото в отраженных электронах).

Таблица 6. Химический состав сфалерита (1–14) и вюртцита (15–16) из глиноземистых фенитов Хибинского массива

	1	2	3	4	5	6**	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	мас.%															
Mn	1.17	0.06	0.15	0.30	0.05	0.02	0.14	0.08	7.47	9.97	0.63	14.07	1.08	0.28	16.12	15.94
Fe	20.94	17.46	14.23	18.27	16.69	15.69	16.82	12.90	14.08	19.27	14.73	18.75	14.81	11.89	15.57	15.47
Cu	1.67	15.00*	6.63*	0.45	14.03*	10.81*	0.27	4.88*	2.41	0.04						
Zn	41.49	31.43	43.68	46.78	32.45	36.73	46.44	46.23	39.93	37.08	50.04	33.23	48.03	53.65	33.13	33.21
Cd	н/а	н/а	н/а	н/а	1.11	1.35	0.37	н/а	н/а	—					0.13	0.12
S	33.55	33.22	32.64	33.28	32.94	32.57	33.56	33.21	34.00	36.14	32.58	33.34	33.73	34.42	34.66	34.57
Сумма	98.82	97.17	97.33	99.08	97.27	97.17	97.66***	97.40***	97.89	102.56***	97.98	99.39	97.65	100.24	99.72***	99.43***
	Число атомов на формулу, расчет на 1 S															
Mn	0.02	—	—	—	—	—	—	—	0.13	0.16	0.01	0.25	0.02	—	0.27	0.27
Fe	0.36	0.30	0.25	0.31	0.29	0.28	0.29	0.23	0.24	0.31	0.26	0.32	0.25	0.20	0.26	0.26
Cu	0.03	0.23	0.10	0.01	0.21	0.17	—	0.07	0.04	—						
Zn	0.60	0.46	0.65	0.69	0.48	0.55	0.68	0.68	0.58	0.50	0.75	0.49	0.70	0.76	0.47	0.47
Cd					0.01	0.01	—	—	—	—						
S	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Примечание: ан.: 1–7 – г. Кукисвумчорр (в том числе 1 – верховья р. Тулюок, 2–7 – Ласточкино Гнездо), 8–9, 12, 15–16 – г. Каскасньончорр, 10 – г. Юкспор, 11 – г. Эвеслогчорр, 13–14 – пик Марченко. Ан. 1–10 – наши данные, ан. 11–16 – литературные данные: 11, 14 – Корчак, 2008; 12–13, 16 – Yakovenchuk et al., 200; 15 – Barkov et al., 20001.

* – большое содержание Си вызвано тонкой эмульсионной вкрапленностью халькопирита. ** – анализ выполнен при помощи электронного зонда, расфокусированного до площади 10 x 10 мкм. *** – в сумму анализа входят также (мас. %): 7 – 0.06 Со, 8 – 0.10 Со, 10 – 0.06 Ni, 15 – 0.11 Ga, 16 – 0.12 Ga.

в широких пределах – от практически полного отсутствия до 14.1 мас.% (Каскасньончорр: Yakovenchuk et al., 2005); нами в образце с г. Юкспор установлено 10.0% Мп (табл. 6). Нередко сфалерит содержит мелкую, до субмикроскопической, эмульсионную вкрапленность халькопирита, чем и объясняется высокое содержание Си наряду с Fe в анализах некоторых образцов (до 15.0 мас.% Си; Кукисвумчорр – ан. 2 в табл. 6). Специально проводившийся анализ сфале-

рита с эмульсионной вкрапленностью халькопирита (рис. 15) из ксенолита в верховьях р. Тулюок (г. Кукисвумчорр) при помощи электронного зонда, расфокусированного до площади 10 x 10 мкм (ан. 6 в табл. 6), дает состав $(Zn_{0.55}Fe_{0.26}Cu_{0.17}Cd_{0.01})_{1.01}S_1$, соответствующий, видимо, исходному твердому раствору, распавшемуся при остывании на фазы $(Zn,Fe,Cd)S$ и $CuFeS_2$.

Вюртцит-2H ZnS в виде редких мелких зерен установлен в натролитовом прожилке,

секущем флогопит-анортоклазовый фенит с пирротином, монацитом-(Се), рутилом и алабандином на г. Каскасньончорр. Вюртцит характеризуется значительной примесью Mn (15.9–16.1 мас.%) и содержит по 0.1% Ga и Cd (табл. 6).

Галенит PbS – редкий минерал глиноземистых фенитов. Обычно он образует зерна до 50 мкм в сростании с другими сульфидами. На Каскасньончорре галенит отмечен в виде отдельных зерен в корунд-нефелиновой породе с пирротином, алабандином и рутилом (рис. 10), а в ортоклазовых прожилках, секущих анортоклаз-фрейденбергит-рути-

ловую породу, встречены его обособления до 3 мм. Состав этого минерала: Pb 86.68, S 13.43, сумма 100.11 мас.% (Корчак, 2008).

Впервые в России нами найден **джайпурит CoS**. Он образует вростки до 30 мкм в пирротине из эгирин-биотит-нефелин-полевошпатовой породы ксенолита в верховьях долины Гакмана на г. Юкспор (рис. 16). С ним ассоциируют халькопирит и иногда галенит. В составе джайпурита (табл. 3) существенны примеси Fe (5.7–6.6 мас.%) и Ni (1.9–2.2%).

Также первой находкой для России стало обнаружение нами **вестервелдита FeAs** в

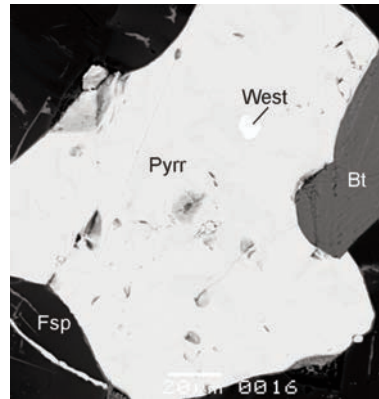
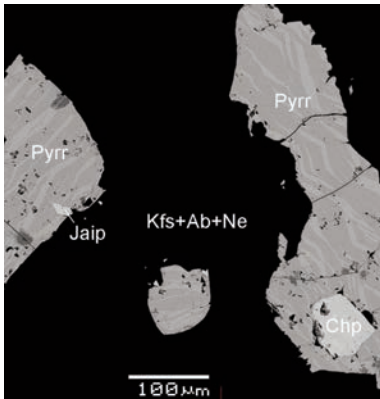


Рис. 16. Вросток джайпурита (Jaip) в пирротине (Pyrr) в ассоциации с халькопиритом (Chp) в калиевополевошпат-альбит-нефелиновой (Kfs+Ab+Ne) породе, г. Юкспор (РЭМ-фото в отраженных электронах).

Рис. 17. Включение вестервелдита (West) в пирротине (Pyrr) в ассоциации с биотитом (Bt) и полевым шпатом (Fsp), г. Кукуисвумчорр (РЭМ-фото в отраженных электронах).

Таблица 7. Химический состав лёллингита (1–6), вестервелдита (7–9) и арсенипирита (10) из глиноземистых фенитов Хибинского массива

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	мас.%									
Mn	–	–	–	–			0.13	0.09	–	
Fe	26.25	26.66	23.52	24.44	25.7–27.0	26.74	44.75	44.93	45.38	34.02
Co	2.66	2.89	2.88	3.22	1.1–1.2	0.33	–	–	–	0.11
Ni	–	–	0.12	1.70	0.3–0.4	0.63	0.08	–	0.14	0.40
Cu	–	–	–	0.14			–	–	–	0.28
As	71.25	70.31	70.46	69.11	70.3–71.3	71.97	56.04	52.81	50.81	46.62
Sb	–	–	0.48	2.83			–	–	–	
S	0.57	0.65	0.48	1.06	0.2–0.5	0.33	0.96	3.26	4.57	18.59
Сумма	100.73	100.51	97.94	102.50		100.00	101.96	101.09	100.90	100.02
	Число атомов на формулу, расчет на сумму атомов = 3 (лёллингит), As+S = 1 (вестервелдит), As+S = 2 (арсенипирит)									
Fe	0.95	0.96	0.88	0.92	0.95–1.02	0.99	1.03	1.00	0.99	0.98
Co	0.09	0.10	0.10	0.11	0.04	0.01	–	–	–	–
Ni	–	–	–	0.06	0.01	0.02	–	–	–	0.01
Cu	–	–	–	–			–	–	–	0.01
As	1.92	1.90	1.97	1.93	1.97–1.99	1.98	0.96	0.87	0.83	1.00
Sb	–	–	0.01	0.05			–	–	–	
S	0.04	0.04	0.03	0.07	0.01–0.03	0.02	0.04	0.13	0.17	1.00

Примечание: ан. 1–5, 7–9 – г. Кукуисвумчорр (в том числе 1, 5, 7–9 – верховья р. Тулиок, 2–4 – Ласточкино Гнездо), 6 – г. Каскасньончорр, 10 – г. Эвеслогчорр. Ан. 1–4, 7–9 – наши данные, ан. 5–6, 10 – литературные данные: 5 – Шлюкова, 1986; 6, 10 – Yakovenchuk et al., 2005.

ксенолите на г. Кукисвумчорр (верховья р. Тулиоук). Минерал найден в ильменит-биотит-полевошпатовом фените с пирротинном, молибденитом, цирконом и бритолином-(Ce). Он формирует округлые вросстки до 10 мкм в пирротине (рис. 17). Примесь серы в хибинском вестервелдите колеблется от 1.0 до 4.6 мас.% (табл. 7).

Лёллингит FeAs_2 встречается в глиноземистых фенитах Хибин намного чаще, чем вестервелдит. Он распространен в качестве акцессорного минерала в разных ассоциациях, в основном в ксенолитах Кукисвумчорра и Каскасньончорра (Шлюкова, 1986; Корчак, 2008; наши данные). Обычно этот арсенид тесно ассоциирует с сульфидами — халькопиритом, сфалеритом, молибденитом, галенитом и особенно с пирротинном, часто формируя в нем удлиненные вросстки до 50 мкм (рис. 18). Встречаются и более крупные (до 0.3 мм) индивидуальные выделения лёллингита в оксидно-силикатных агрегатах (мало-сульфидные до бессульфидных ассоциации: возможно, здесь появление диарсенида железа связано с дефицитом серы). Для лёллингита хибинских глиноземистых фенитов характерна ощутимая примесь Co — до 3.2 мас.% (табл. 7), а из других примесей можно отметить (мас.%): Ni (до 1.7), Cu (до 0.1), Sb (до 2.8), S (до 1.1).

В секанинаит-корунд-кварц-альмандин-ортоклазовой жиле в фенитах ксенолита на г. Эвеслогчорр В.Н. Яковенчук с соавторами (Яковенчук *et al.*, 2005) обнаружили изометричное обособление **арсениопирита** FeAsS размером 1 мм среди ортоклаза (табл. 7).

Очень интересно сообщение Ю.А. Корчак (2008) о двух недоизученных сульфидах, найденных в глиноземистых фенитах ксенолита на г. Каскасньончорр.

Так, фаза $\text{Mg}_2\text{AlNb}_2\text{S}_4$ дает слюдоподобные свилеватые выделения до 0.1 мм в анортоклазовой породе, где ассоциирует с пирритом, пирротинном, алабандином, Ва-ортоклазом, хризобериллом, монацитом-(Ce) и ближе не определенными Al, Ti-оксидом и Ca, Mg, Al-фторидом. Эмпирическая формула, рассчитанная на 4 атома серы, такова: $(\text{Mg}_{1.63}\text{Ca}_{0.03}\text{Fe}_{0.03}\text{Mn}_{0.01})_{1.70}(\text{Al}_{1.05}\text{V}_{0.03})_{1.08}(\text{Nb}_{1.66}\text{W}_{0.22}\text{Si}_{0.17})_{2.05}\text{S}_4$ (Корчак, 2008). К сожалению, в работе Ю.А. Корчак не приведено данных по возможному содержанию кислорода в этой фазе. Судя по набору компонентов и характеру индивидуальных и агрегативных представлений весьма вероятным, что она принадлежит к семейству гибридных слоистых гидроксидо-сульфидов, в структурах которых перемежаются, сочетаясь в раз-

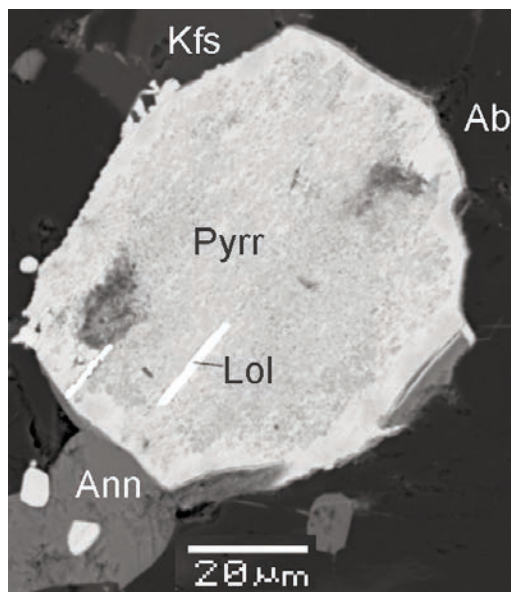


Рис. 18. Вросстки лёллингита (Lol) в пирротине (Pyrr) в анит-калиевополевошпат-альбитовой породе (Ann, Kfs, Ab), Ласточкино Гнездо (РЭМ-фото в отраженных электронах).

ных соотношениях, сульфидные модули M_xS ($\text{M} = \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Ni}, \text{V}$) и бруситоподобные пакеты $\text{A}(\text{OH})_y$ ($\text{a} = \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Fe}, \text{Al}; y = 2 - 3$) (Органова, 1989). К этому семейству относятся валлерит $4(\text{Fe}, \text{Cu})\text{S} \cdot 3(\text{Mg}, \text{Al})(\text{OH})_y$, хаапалаит $4(\text{Fe}, \text{Ni})\text{S} \cdot 3(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{OH})_2$, точилинит $6\text{FeS} \cdot 5\text{Mg}(\text{OH})_2$, вьяльсовит $\text{FeS} \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Al}(\text{OH})_3$ и юшкинит $\text{V}_{0.4}\text{S} \cdot 0.6(\text{Mg}, \text{Al})(\text{OH})_y$. Не исключено, что «фаза $\text{Mg}_2\text{AlNb}_2\text{S}_4$ » на самом деле отвечает формуле, близкой к $2(\text{Nb}, \text{W})\text{S}_2 \cdot 2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{Al}(\text{OH})_3$.

Фаза $\text{Fe}(\text{V}, \text{Cr})\text{S}_2$ найдена во флогопит-нефелин-альбитовом фените в виде тонкой (до 10 мкм) каемки между пиритизированным пирротинном и вуорелайненитом MnV_2O_4 . В ассоциации с ней отмечены алабандин, кричтонит, рутил, ренгеит и родохрозит. Эмпирическая формула, рассчитанная на 2 атома серы, такова: $(\text{Fe}_{0.79}\text{Zn}_{0.04}\text{Mn}_{0.03})_{0.86}(\text{V}_{1.20}\text{Cr}_{0.56})_{1.76}\text{S}_2$ (Корчак, 2008).

Обсуждение результатов и выводы

Сульфидная минерализация широко развита в апоксенолитовых высокоглиноземистых фенитах Хибинского массива, тогда как другие халькогениды, представленные арсенидами, редки. Минералогический анализ сульфидсодержащих парагенезисов говорит о трех главных чертах обстановки минералообразования в этих условиях: 1) обогащение

серой; 2) сильно восстановительные условия; 3) высокие температуры. Две последних особенности в целом характерны для глиноземистых фенитов Хибин. Сформировавшиеся в результате воздействия огромных объемов фойзитовой магмы, эти породы даже в центральных частях крупных ксенолитов содержат силлиманит, часто с андалузитом (но не кианит), анортоклаз (обычно распавшийся) и имеют ряд других признаков высокотемпературного ($> 600 - 800^\circ\text{C}$) происхождения. Тесная ассоциация самородного железа с троилитом на Партомчорре (рис. 3) демонстрирует признаки расплавной кристаллизации, что может говорить о температуре не ниже точки эвтектики Fe-FeS: около 990°C (Минералы, 1974). О высокотемпературной кристаллизации говорят и особенности сфалерита: значительная железистость и присутствие эмульсионной вкрапленности халькопирита. О том, что подавляющее большинство минеральных ассоциаций описываемых фенитов сформировалось в резко восстановительных условиях, свидетельствуют в первую очередь набор и особенности состава минералов железа. Так, типоморфными, а нередко и породообразующими минералами здесь являются биотит и герцинит, содержащие крайне мало Fe^{3+} (Яковлева и др., 2006_{1,2}), достаточно обычно самородное железо (Yakovenchuk *et al.*, 2005; наши данные), тогда как фазы с Fe^{3+} , в том числе магнетит, редки. В глиноземистых фенитах Хибин довольно широко развит графит, но практически нет карбонатов и не встречены окисленные формы других элементов с переменной валентностью, в первую очередь S и Mn.

Сера входит в описываемых образованиях исключительно в состав сульфидов, которые распределены, согласно нашим наблюдениям, крайне неравномерно, как между разными ксенолитами, так и в пределах каждого из них. Содержание пирротина в породе может колебаться от нуля (Свинцовый ручей; Эвеслогчорр) до почти 70 об.% («рудные» участки фенитов: Каскасьончорр; долина Гакмана), а концентрация молибденита иногда достигает 30 об.% (Ласточкино гнездо). При этом буквально в нескольких метрах от таких скоплений содержание сульфидов в аналогичной породе может снижаться до минимального. Такая неравномерность скорее всего указывает на то, что источником серы был не фенитизирующий флюид, а протолит ксенолитов, и распределение сульфидов в фенитах в целом отвечает распределению S-содержащих минералов в исходной поро-

де. Этот вывод хорошо согласуется с данными по изотопии серы в сульфидах Хибин: минералы фенитизированных ксенолитов обогащены легким изотопом (-1.2 до -8.4 ‰ ^{34}S), что соответствует преимущественно экзогенному источнику серы, тогда как минералы магматических пород и пегматитов массива — тяжелым (-0.8 до $+2.2$ ‰ ^{34}S), что говорит о ее глубинном источнике (Шлюкова и др., 1967; Шлюкова, 1986).

Отдельного обсуждения заслуживает отмеченная выше крайне необычная минеральная ассоциация в ксенолите на г. Каскасьончорр, где открыт эндемичный сульфид ниобия — эдгарит, пирротин и дисульфиды Fe содержат целые проценты Ti (что впервые отмечено для земных объектов), V и до 0.4 мас.% Cr, молибденит часто обогащен W (до 22.7 мас.%), а также присутствуют алабандин, тунгстенил, сфалерит, вюрцит и недоизученный сульфид (возможно, гидроксидо-сульфид) Nb, Mg и Al. Впервые описавшие эту ассоциацию А.Ю. Барков с соавторами (Barkov *et al.*, 1997, 2000_{1,2}) отмечают ее уникальность, связанную с экстремально высокой активностью S^{2-} . Добавим, что кислородные соединения железа в этой породе отсутствуют, а примесь Fe в силикатах и оксидах незначительна. Так, самый железистый из них, фторфлогопит, здесь содержит 0.04 — 1.3 мас.% FeO. Таким образом, в сульфидной форме находятся не только Fe, Zn, Mo, но и Mn, Nb, V, Cr, W, а также часть Ti.

По нашему мнению, находка такой замечательной ассоциации заслуживает внимания и с точки зрения общей геохимии, для развития представлений о сравнительной халькофильности металлов, т.е. их сродства к S^{2-} . Очень важно здесь то, что наблюдаемые закономерности распределения элементов между фазами, в первую очередь кислородсодержащими и бескислородными, проявляются на уровне не микропримесей, как для многих из этих компонентов в метеоритах, а минералообразующих компонентов и «макропримесей» — от десятых долей процента до десятков процентов. Основываясь на характере распределения металлов между кислородными соединениями и сульфидами в описанной породе, а также в прочих ассоциациях глиноземистых фенитов Хибин, и, конечно же, привлекая данные по другим земным формациям и метеоритам, можно выстроить следующий эмпирический ряд убывания халькофильности (и, соответственно, возрастания литофильности) металлов: Cu, Pb, Mo → Zn → Fe → Mn, W, V → Nb, Cr → Ti → Mg, Ca → Al, Be, REE.

Кратко обсудим этот ряд. Так, Al, Be и REE в виде халькогенидов в природе неизвестны, а сульфиды Mg и Ca характерны лишь для энстатитовых хондритов — обогащенного серой крайне восстановленного типа метеоритов (Leitch, Smith, 1982). Щелочные и тяжелые щелочноземельные металлы мы здесь не рассматриваем: закономерности их распределения между сульфидами и кислородными/галлоидными соединениями совершенно специфичны (Урусов, 1975; Пекон, 2005). Другой край ряда (Cu, Pb, Mo, Zn, Fe) тоже не вызывает вопросов. Сульфиды Mn, W и V, пусть и не будучи широко распространены, тем не менее, не очень экзотичны для земных условий. Наиболее интересна промежуточная часть ряда, ранее не изучавшаяся.

Набор и химический состав минералов эдгаритового парагенезиса свидетельствуют о том, что при данной величине активности S^{2-} не только Cu, Pb, Mo, Zn и Fe, но уже Mn, W, V, Cr и даже Nb проявляют халькофильные свойства, образуя только сульфиды, тогда как Mg, Al, Ca, Be, REE «остаются литофильными», а Ti занимает промежуточное положение, распределяясь между кислородным соединением (рутилом) и халькогенидом (пирротин). Из этого следует, что Nb и Cr более халькофильны, чем Ti. Этот вывод особенно важен для Nb, содержание которого в метеоритах очень мало, и оценить относительную степень его сродства к S^{2-} по метеоритным данным не представляется возможным. В других наблюдавшихся нами ассоциациях глиноземистых ксенолитов Хибин (Каскасньюнчорр, Кукисвумчорр, Юкспор) сосуществуют сульфиды с Mn (алабандин, высокомарганцовистый сфалерит), W (вольфрамит молибденит) V (ванадийсодержащий пирротин) и кислородные соединения с Cr (хромсодержащие шпинелиды и другие оксиды, разнообразные силикаты) и Nb (пиррохлор, ниобийсодержащие ильменит, цирконолит, титанит). Это говорит о большем сродстве к S^{2-} (халькофильности) Mn, W и V по сравнению с Cr и Nb.

Еще раз подчеркнем, что уникальность обстановки, в которой стало возможным образование эдгарита, обусловлено сочетанием очень высоких значений активности серы и восстановительного потенциала. Четкими индикаторами таких условий являются сульфиды, содержащие типичные литофильные металлы как видообразующие компоненты (эдгарит, тунгстенит, алабандин, а в других объектах также патронит, добреелит, ольдгамит, найнинджерит) или же существенные примеси (в наших фенитах — сульфиды же-

леза с Ti, V, Cr, молибденит с W, высокомарганцовистый — до 14 мас.% Mn — сфалерит). Чем правее расположен металл в предложенном эмпирическом ряду халькофильности, тем о более высокой активности серы говорит его вхождение в сульфиды. Присутствие металлов из левой части ряда в форме кислородных соединений, наоборот, свидетельствует о низкой активности S^{2-} : это хорошо известно на примере Zn, входящего в таких обстановках в шпинелиды и/или силикаты. В рассматриваемых фенитах это в первую очередь Zn-содержащий герцинит $(Fe, Zn)Al_2O_4$.

В описываемых фенитах с ростом активности S^{2-} , сопровождаемого увеличением количества сульфидов, возрастает и содержание Mn (точнее, падает содержание Fe, «отбираемого» сульфидами) в ильмените, вплоть до появления его марганцевого аналога пиррофанита $MnTiO_3$. При дальнейшем повышении потенциала S^{2-} пиррофанит вытесняется алабандином MnS. Таким образом, Mn/Fe-отношение в минералах ряда ильменита может служить индикатором активности S^{2-} в этих породах, характеризующихся в целом весьма значительным преобладанием Fe над Mn.

Восстановительная обстановка минералообразования в глиноземистых фенитах Хибин скорее всего обусловлена присутствием углеродистого вещества в исходных породах ксенолитов. Таким протолитом нам представляются докембрийские метapelиты, распространенные в окружении Хибинского массива. Это могли быть глиноземистые метаморфиты протерозойского возраста, входящие в виде отдельных горизонтов в состав сложной серии имандра-варзуга (Шлюкова, 1986; Азарова, Шлюкова, 2008), или же более древние мусковитовые и кианитовые сланцы с альмандином, ставролитом, рутилом и др. (Яковлева и др., 2006, 2009). В пользу последнего предположения говорит значительное обогащение архейских высокоглиноземистых сланцев Кольского полуострова углеродистым веществом (Бельков, 1963), тогда как в составе серии имандра-варзуга развиты, наряду с глиноземистыми породами, карбонатные, содержащие углерод в окисленной форме. Вывод же Ю.А. Корчак (2008) о том, что протолитом глиноземистых апоксенолитовых фенитов Хибин были терригенные породы и метабазиты ловозерской свиты палеозойского возраста, представляется нам ошибочным, в первую очередь исходя из обедненности их Al при высоких содержаниях Ca и Mg: это находится в резком противоречии с главными геохимическими чертами

фенитизированных ксенолитов. За то, что протолитом были глиноземистые метапелиты, но не metabазиты, говорит и тот факт, что фениты обогащены Cr и V (компонентами, входящими как примеси по Al в глиноземистые минералы мусковитовых и кианитовых сланцев; см. Яковлева и др., 2009) относительно Ni: его содержание в сульфидах незначительно, а находка собственного минерала — пентландита — единична.

Резюмируем основные результаты.

1. В апоксенолитовых глиноземистых фенитах Хибинского массива развита разнообразная и во многом специфичная халькогенидная минерализация, в составе которой резко преобладают сульфиды, в первую очередь члены ряда пирротин-троилит, местами молибденит. Количество остальных халькогенидов незначительно, но среди них встречаются как весьма редкие минералы (джайпурит CoS и вестервудит FeAs — первые находки в России, тунгстенит WS_2 — первая находка для Хибин), так и геохимические уникалы — эдгарит $FeNb_3S_6$ и Ti-содержащие сульфиды железа: пирротин, пирит, марказит.

2. Активность S^{2-} в хибинских глиноземистых фенитах участками достигает рекордного для земных объектов значения, и в результате возникают уникальные минеральные ассоциации, где в сульфиды входят Mn, W, V, и даже Nb, Ti, Cr. Анализ распределения металлов между кислородными соединениями и сульфидами в этих образованиях (на уровне видообразующих компонентов и «макропримесей»: от 0.1 до $n \cdot 10$ мас.%) с привлечением данных по другим земным формациям и метеоритам позволяет выстроить следующий эмпирический ряд убывания халькофильности, то есть сродства к S^{2-} (и, соответственно, возрастания литофильности) металлов: Cu, Pb, Mo → Zn → Fe → Mn, W, V → Nb, Cr → Ti → Mg, Ca → Al, Be, REE.

3. Содержание сульфидов в глиноземистых фенитах Хибин очень широко варьирует — от 0.0 до почти 70%, причем иногда богатые («рудные») и крайне бедные сульфидами участки соседствуют в одной и той же породе. Это связывается нами с неоднородным распределением серы в протолите, который и предполагается ее источником (что согласуется и с изотопными данными: Шлюкова, 1986).

4. Формирование главной массы сульфидов в глиноземистых фенитах Хибин происходило при высоких температурах (> 500–600°C) и высоких значениях восстановительного потенциала, что обеспечивалось, соответственно, большим объемом воз-

действующей горячей фойзитовой магмы и присутствием в наиболее вероятном протолите — докембрийских глиноземистых сланцах — значительного количества углеродистого вещества.

Благодарности

Авторы признательны Д.В. Лисицину, предоставившему ряд образцов для изучения, В.О. Япаскурту, Е.В. Гусевой и Н.Н. Коротяевой за помощь в электронно-микроскопических исследованиях, а С.Н. Ненашевой за обсуждение материала.

Литература

- Азарова Ю.В., Шлюкова З.В. О корундсодержащих пегматитах «линии скрещения» Хибинского массива и их роли в реконструкции состава вмещающих его протопротерозойских пород // Новые данные о минералах. 2008. В. 43. С. 31–36.
- Бельков И.В. Кианитовые сланцы свиты кейв (геологическое строение, кристаллические сланцы и кианитовые руды). М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1963. 321 с.
- Бонштегт Э.М., Борнеман-Старынкевич И.Д., Влогавец В.И., Воробьева О.А., Герасимовский В.И., Гуткова Н.Н., Каган Б.И., Костылева Е.Е., Куплетский Б.М., Лабунцов А.Н., Ферсман А.Е., Чирвинский П.Н. Минералы Хибинских и Ловозерских тундр. М.-Л. 1937. 563 с.
- Горстка В.Н. Контактная зона Хибинского щелочного массива (Геолого-петрографические особенности, химизм и петрология). Л.: Наука. 1971. 97 с.
- Костылева-Лабунцова Е.Е., Боруцкий Б.Е., Соколова М.Н., Шлюкова З.В., Дорфман М.Д., Дудкин О.Б., Козырева Л.В., Икорский С.В. Минералогия Хибинского массива. Т. 1. М.: Наука. 1978₁. 228 с.
- Костылева-Лабунцова Е.Е., Боруцкий Б.Е., Соколова М.Н., Шлюкова З.В., Дорфман М.Д., Дудкин О.Б., Козырева Л.В. Минералогия Хибинского массива. Т. 2. М.: Наука. 1978₂. 586 с.
- Корчак Ю.А. Минералогия пород ловозерской свиты и продуктов их контактово-метасоматического преобразования в щелочных массивах. Дисс. к. г.-м. н. Апатиты. 2008. 328 с.
- Куплетский Б.М. Пирроотиновая жила на Рисчорре в Хибинских тундрах // Докл. Рос. АН, январь-июнь. 1923. С. 7–9.
- Меньшиков Ю.П., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н. Бериллиевая минерализация в жиль-

- ных образованиях Хибинского массива // Записки ВМО. **1999**. № 1. С. 3 – 14.
- Меньшиков Ю.П. Корундовая минерализация в Хибинском массиве // ДАН СССР. **1978**. Т. 243. № 5. С. 1247 – 1249.
- Меньшиков Ю.П., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н. Кордиерит и секанинаит из ксенолитов Хибинского массива // Записки ВМО. № 1. **2001**. С. 91 – 99.
- Минералы. Справочник. Диаграммы фазовых равновесий. М.: Наука. **1974**. В. 1. 514 с.
- Органова Н.И. Кристаллохимия несоизмерных и модулированных смешаннослойных минералов. М.: Наука. **1989**. 144 с.
- Пеков И.В. Генетическая минералогия и кристаллохимия редких элементов в высокощелочных постагматических системах. Дисс. д. г.-м. н. **2005**. М.: МГУ. 652 с.
- Рамгор П. Рудные минералы и их сростания. М.: Изд. иностранной литературы. **1962**. 1132 с.
- Урусов В.С. Энергетическая кристаллохимия. М.: Наука. **1975**. 335 с.
- Шлюкова З.В., Боруцкий Б.Е., Соколова М.Н., Виноградов В.И. Об изотопном составе серы в минералах Хибинского массива нефелиновых сиенитов // Изотопы серы и вопросы рудообразования. М.: Наука. **1967**. С. 106 – 108.
- Шлюкова З.В. Минералогия контактовых образований Хибинского массива. М.: Наука. **1986**. 97 с.
- Яковлева О.С., Пеков И.В., Брызгалов И.А. О составе слюд из щелочно-глиноземистых пород фенитизированных ксенолитов в Хибинском массиве // Тр. III Ферсмановской научной сессии Кольского отделения РМО. Апатиты. **2006**₁. С. 200 – 202.
- Яковлева О.С., Пеков И.В., Кононкова Н.Н. Герцинит из щелочно-глиноземистых пород фенитизированных ксенолитов в Хибинском массиве (Кольский полуостров) как минералогический индикатор // Тр. Всероссийского совещания «Геохимия, петрология, минералогия и генезис щелочных пород». Миасс. **2006**₂. С. 310 – 313.
- Яковлева О.С., Пеков И.В., Брызгалов И.А. Хромовая минерализация в Хибинском щелочном массиве (Кольский полуостров, Россия) // Вестник МГУ. Сер. 4. Геол. **2009**. №4. С. 20 – 29.
- Barkov A.Yu., Laajoki K.V.O., Men'shikov Yu.P., Alapieti T.T., Sivonen S.J. First terrestrial occurrence of titanium-rich pyrrhotite, pyrite and marcasite in a fenitized xenolith from the Khibina alkaline complex, Russia // Can. Miner. **1997**. Vol. 35. P. 875 – 885.
- Barkov A.Yu., Martin R.F., Men'shikov Yu.P., Savchenko Ye.E., Thibault Y., Laajoki K.V.O. Edgarite, FeNb₃S₆, first natural niobium-rich sulfide from the Khibina alkaline complex, Russian Far North: evidence for chalcophile behavior of Nb in a fenite // Contrib. Miner. Petr. **2000**₁. Vol. 138. P. 229 – 236.
- Barkov A.Yu., Martin R.F., Poirier G., Men'shikov Yu.P. Zoned tungstenoan molybdenite from a fenitized megaxenolith in the Khibina alkaline complex, Kola Peninsula, Russia // Can. Miner. **2000**₂. Vol. 38. P. 1377 – 1385.
- Leitch C.A., Smith J.V. Petrography, mineral chemistry and origin of type I enstatite chondrites // Geochem. Cosmochem. Acta. **1982**. Vol. 46. P. 2083 – 2097.
- Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Yu., Pakhomovskiy Ya.A., Men'shikov Yu.P. (Ed. F. Wall) Khibiny. Laplandia Minerals. Apatity. **2005**. 468 p.