АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

№ 6 1968

УДК 550.84(571.5)

Б. В. ОЛЕЙНИКОВ, С. Л. ШВАРЦЕВ

СОВРЕМЕННОЕ СУЛЬФАТООБРАЗОВАНИЕ В ЗОНАХ ОКИСЛЕНИЯ ПИРРОТИН-ХАЛЬКОПИРИТОВЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РУДОПРОЯВЛЕНИЙ

(северо-запад Сибирской платформы)

В настоящее время вопрос о наличии современных процессов выветривания в северных районах привлекает все более пристальное внимание исследователей. Это связано с развитием и внедрением в практику поисков геохимических методов, основанных на знании закономерностей образования вторичных ореолов и потоков рассеяния. Для северных районов этот вопрос изучен недостаточно и вызывает значительные разногласия. Трудность здесь связана с наличием многолетней мерзлоты, в пределах которой характер выветривания резко изменяется в силу весьма затрудненного водообмена. Принципиальная возможность развития процессов выветривания в толще мерзлых пород показана А. И. Тютюновым [13].

Нами на ряде сульфидных рудопроявлений северо-запада Сибирской платформы были получены материалы, которые позволяют рассмотреть некоторую специфику образования и накопления сульфатных минералов в зонах окисления северных районов. Знание этих закономерностей поможет правильно организовать геохимические поиски по вторичным потокам рассеяния в этих условиях.

Исследования велись в бассейнах рек Северной, Курейки, Горбиячин, Кулюмбэ и Фокиной. Зоны минерализации здесь располагаются в экзоконтактовых ореолах трапповых интрузивов, внедренных либо в верхнепалеозойские угленосные отложения, либо в эффузивно-туфогенные образования триаса. Зона окисления на участках развития сульфидов, как правило, имеет небольшую мощность (первые метры) и представлена гидроокислами и окислами железа, скоплениями сульфатов кальция, магния, железа, натрия, алюминия, редкими налетами карбонатов меди. В небольшом количестве в нижней части зоны окисления фиксируется агрегат мельниковита. Остатки первичных сульфидов наблюдаются по всему разрезу зоны окисления. Рассмотрим условия образования, свойства и состав гипса, мелантерита и продуктов его дегидратации, галотрихита, магнистого рёмерита, копиагита, эпсомита, алуногена и натровых квасцов, обнаруженных в изученных зонах окисления.

Гипс наблюдается повсеместно и иногда образует корки толщиной до 1,0 *см*. Фиксировались случаи, когда площади в 100—200 $м^2$ сульфидсодержащих пород с поверхности были полностью покрыты налетами и корками гипса, на которых неоднократно наблюдались игольчатые образования эпсомита, измененного мелантерита.

Таблица 1

Результаты химических анализов сульфатных минералов (вес. %)
(анал. Н. Н. Оленникова)

Компоненты	Гипс		Продукт изменения мелантерита, обр. 134а	Магнистый рёмерит, обр. 134б	Эпсомит, обр. 140	Смесь эпсомита, алуногена и натровых квасцов, обр. 102
	Обр. 154	Обр. 78				
Al_2O_3	—	—	—	—	—	10,40
Fe_2O_3			15,59	19,94	—	Не обн.
FeO	Не обн.	Не обн.	15,02	4,33	Не обн.	„
MnO	„	„	0,09	—	„	0,64
CaO	32,49	32,50	Не обн.	—	0,49	Не обн.
MgO	Не обн.	Не обн.	4,90	2,55	16,01	2,80
NiO	—	—	Сл.	—	Не обн.	0,41
CoO	—	—	„	—	„	0,05
CuO	—	—	0,14	—	—	0,03
Na_2O	—	—	—	—	—	2,81
K_2O	—	—	—	—	—	0,02
$(NH_4)_2O$	—	—	—	—	—	0,06
SO_3	46,30	46,40	38,39	38,39	35,50	35,75
H_2O	21,12	20,48	[25,87]	34,25	47,72	[47,03]
Сумма	99,91	99,38	100,00	99,44	99,72	100,00

В табл. 1 приведены результаты химических анализов гипса, величины показателей преломления даны в табл. 2, а на рис. 1 показана кривая нагревания сульфата. Все перечисленные виды исследования не обнаружили каких-либо отклонений от стандартных данных [4, 15].

Таблица 2

Показатели преломления сульфатов

Минерал	*Ng*	*Np*	*Ng—Np*	Минерал	*Ng'*	*Np'*	*Ng'—Np'*
Гипс	1,530	1,521	0,009	Копиапит	1,585	1,530	0,055
Мелантерит . . .	1,478	1,466	0,012	Гексагидрит	1,457	1,426	0,031
Магнистый рёмерит	1,570	1,526	0,044	Алуноген	1,478	1,470	0,008
Галотрихит . . .	1,485	1,478	0,007				
Эпсомит	1,460	1,470	0,008				

Примечание. Определения выполнены с точностью ±0,002.

Мелантерит и продукты его дегидратации. Неизмененный мелантерит установлен лишь в зоне окисления халькопирит-пирротин-пиритовой жилы берегового обрыва нижнего течения руч. Серебряного (среднее течение р. Фокиной). Здесь на дневной поверхности и в полосе деятельного слоя зоны окисления образуются гетит, гидрогетит, лимонит, гипс и малахит (рис. 2). На границе деятельного слоя и многолетнемерзлых пород в пределах последних наблюдается магнистый рёмерит с реликтами первичных сульфидов. Более глубокие горизонты зоны окисления сложены мелантеритом с небольшим количеством галотрихита в ассоциации с неокисленными сульфидами и

льдом. Заметим, что в нижней части зоны окисления, где развит мелантерит, не установлено даже малейших признаков пленок окисного железа. Следовательно, весьма затрудненный водообмен в толще мерзлых пород предохраняет двухвалентное железо от окисления и последующего выпадения в виде гидроокиси.

Волокнистые агрегаты светло-зеленого мелантерита обладают шелковистым блеском. Показатели преломления минерала приведены в табл. 2. На воздухе мелантерит теряет воду и переходит в новые минералы. Окраска его изменяется от светло-зеленой до желтовато-белой.

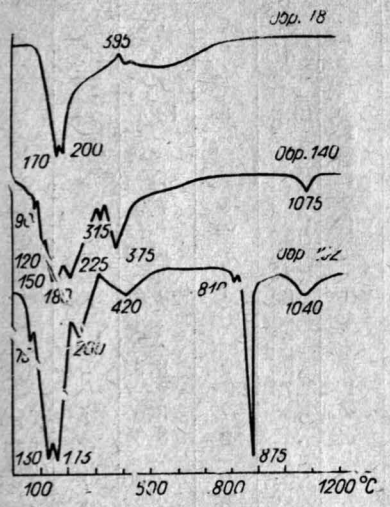

Рис. 1. Кривые нагревания гипса (обр. 78), эпсомита (обр. 140) и смеси эпсомита, алуногена и натровых квасцов (обр. 102). Аналитик Г. В. Белобородова (СНИИГГИМС).

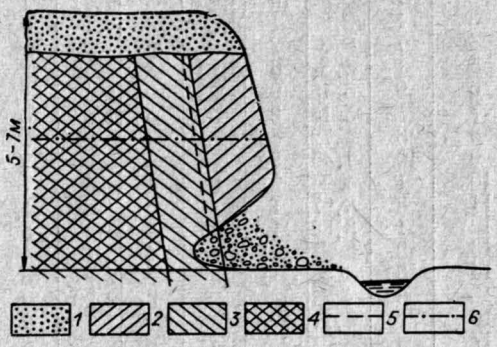

Рис. 2. Схематический разрез по сульфидной жиле на ручье Серебряном.

1 — наносы; *2* — зона развития окислов и гидроокислов железа и карбонатов меди; *3* — зона сульфатных минералов с реликтами пирита; *4* — первичные сульфиды; *5* — граница многолетнемерзлых пород; *6* — уровень паводковых вод.

Хранившийся в комнатных условиях мелантерит превратился в порошковидный желтовато-белый агрегат мельчайших кристалликов ($N_{ср}=1{,}534\pm0{,}001$). Химический анализ (см. табл. 1, обр. 134а) показывает, что половина ионов Fe^{+2} в мелантерите окислилась. После пересчета окисного железа в закисное по методу В. С. Соболева [12] рассчитана кристаллохимическая формула обезвоженного сульфата железа:

$$(Fe_{0,820}\,Mg_{0,244}\,Cu_{0,004}\,Mn_{0,002})\,[SO_4]_{0,978}\cdot 3{,}09\,H_2O.$$

Результаты химического анализа позволяют утверждать, что изученный нами минерал принадлежал к магнийсодержащей разновидности мелантерита — кировиту. В процессе естественного обезвоживания он потерял четыре молекулы кристаллизационной воды. Это также подтверждают и данные рентгеноструктурного анализа измененного кировита (табл. 3), для которого межплоскостные расстояния и величины интенсивности линий аналогичны таковым для $FeSO_4\cdot 3H_2O$ [6].

В зоне окисления ряда других железоколчеданных рудопроявлений неоднократно наблюдались продукты изменения мелантерита. На подернутых пленкой гидроокислов железа сплошных сульфидных сегрегациях обнаруживаются волокнистые налеты желтовато-белого сульфата, микрохимическое испытание которого подтверждает, что ведущим катионом его является двухвалентное железо и иногда присутствует магний. В иммерсии отчетливо видно, что отдельные игольчатые

Таблица 3

Рентгенограммы некоторых сульфатов железа, магния, алюминия и натрия

№ п. п.	Продукт изменения мелантерита, обр. 134а		Магнистый рёмерит, обр. 134б		Эпсомит, обр. 140а		Гексагидрит, обр. 140б		Смесь алуногена, натровых квасцов и эпсомита, обр. 102		Алуноген [8]		Натровые квасцы [8]	
	I	$\frac{d\alpha}{n}$	I	$\frac{d\alpha}{n}$	I	$\frac{d\alpha}{n}$	I	$\frac{d\alpha}{n}$	I	$\frac{d\alpha}{n}$	I	$\frac{d\alpha}{n}$	I	$\frac{d\alpha}{n}$
1	—	—	10	19,5	7	6,00	—	—	2	13,65	5	13,7	—	—
2	1	20,5	10	9,3	8	5,41	1	5,97	1	9,57	—	—	—	—
3	1	9,3	1	8,3	3	5,14	6	5,44	3	8,46	—	—	—	—
4	7	6,8	2ш	7,2	3	4,90	7	5,10	1	7,70	—	—	—	—
5	1	6,3	6	6,14	6	4,48	7	4,90	3	7,22	5	7,2	—	—
6	9	5,45	9	5,63	10	4,22	1/2	4,55	1	6,49	—	—	—	—
7	1/2	5,14	2	5,37	4	4,07	10	4,40	5	6,00	—	—	—	—
8	3	4,72	4ш	4,68	3	3,91	2	4,17	5	5,41	—	—	—	—
9	10	4,46	5р	4,24	5	3,78	7	4,07	6	4,90	1	4,95	—	—
10	1	4,24	2	4,04	4	3,60	1	3,91	4	4,48	10	4,42	—	—
11	8	3,97	1	3,86	6	3,45	1/2	3,73	10	4,22	—	—	10	4,23
12	1	3,82	1	3,77	2	3,32	5	3,59	3	3,95	9	9,95	5	3,98
13	2	3,57	9*	3,56	4	3,19	4	3,45	1	3,78	—	—	—	—
14	6	3,38		3,47	7	2,97	5	3,20	4	3,65	7	3,67	7	3,65
15	6	3,23	2	3,32	8	2,89	2	3,03	2	3,45	6	3,37	—	—
16	1	3,11	3	3,23	4	2,74	9	2,94	4	3,15	—	—	1	3,15
17	9	2,97	2	3,11	9	2,67	6	2,78	7	2,97	8	3,00	1	3,05
18	1	2,89	4	3,04	1	2,60	6	2,68	7	2,89	3	2,84	1	2,90
19	4	2,75	4	2,93	2	2,53	3	2,58	5	2,73	2	2,75	2	2,72
20	1	2,66	3р	2,81	2	2,48	4	2,54	7	2,67	5	2,62	—	—
21	5	2,56	3	2,66	4	2,38	1/2	2,47	2ш	2,56	—	—	1	2,60
22	2	2,77	1р	2,54	3	2,26	1	2,33	2	2,46	9	2,48	2	2,47
23	4	2,42	3р	2,49	5	2,20	5	2,98	1	2,38	—	—	—	—
24	5	2,36	2р	2,37	2	2,12	2	2,21	1	2,34	4	2,34	2	2,32
25	6	2,27	2	2,28	4	2,10	1	2,14	3	2,19	—	—	2	2,19
26	1/2	2,24	2р	2,20	1	2,04	3	2,07	1	2,18	3	2,18	—	—
27	1	2,18	1	2,16	3	2,01	4	1,992	2	2,12	—	—	—	—
28	1/2	2,14	3	2,09	3	1,956	2	1,933	3	2,10	—	—	—	—
29	1	2,11	5	2,05	5	1,874	7	1,871	2	2,04	4	2,02	1	2,04
30	1	2,04	1	2,00	4	1,796	2	1,791	2	2,01	3	1,97	—	—
31	4	1,966	1	1,973	2	1,759	2	1,761	1	1,956	4	1,91	—	—
32	1	1,956	1	1,904	4	1,713	1	1,731	3	1,874	4	1,86	3	1,90
33	3	1,892	1	1,880	5	1,655	3	1,696	1	1,838	5	1,82	2	1,82
34	1	1,873	4р	1,816	5	1,630	1	1,650	2	1,799	—	—	—	—
35	1/2	1,791	1	1,754	—	—	2	1,622	3	1,759	3	1,76	2	1,75
36	3	1,754	3р	1,732	—	—	1	1,580	1ш	1,704	2	1,71	2	1,69
37	3	1,723	3р	1,670	—	—	—	—	3	1,657	2	1,67	—	—
38	2	1,668	1р	1,621	—	—			4	1,624	—	—	4	1,62
39	2	1,652	3р	1,613	—	—					—	—	2	1,50
40	2	1,635	2	1,568	—	—								
41	1	1,598	1	1,541										
42	1	1,574	1/2	1,524										
43	3	1,510	1	1,483										
44	2	1,487	1р	1,450										
45	4	1,450	1	1,425										
46	1	1,434	1р	1,408										
47	2	1,386	1р	1,400										
48	1/2	1,338	1	1,377										
49	1	1,309												
50	4	1,285												

Условия съемки: Co — антикатод, Fe — фильтр, V=35 *кв*, I=9 *ма*, D=57,3 *мм*, d=0,3 *мм*. ш — широкая линия, р — размытая линия, * — края широкой линии. Анализы выполнены М. Т. Мандриковой (СНИИГГИМС).

кристаллы сульфата на самом деле имеют тонкокристаллическое мелкочешуйчатое сложение с размером зерен не более 0,001—0,003 *мм*. Средний показатель преломления чешуек равен 1,534±0,002. Он близок к константам синтезированного $FeSO_4 \cdot 4H_2O$, для которого $Nm=1{,}535$, $Np=1{,}533$ [2]. Наблюдаемые псевдоморфозы аналогичны таковым продуктам изменения мелантерита из терригенных отложений нижнего карбона Татарии [3]. Белые налеты $FeSO_4 \cdot 4H_2O$ недавно были описаны Я. Кибицом (цитируется по Э. М. Бонштедт-Куплетской [1]) в Польше и названы роценитом. Роценит образовался в виде налета на марказито-пиритовой руде в заброшенной выработке, температура которой приближалась к 30°.

В пределах района исследования псевдоморфозы мелкочешуйчатого сульфата по игольчатым кристаллам мелантерита фиксировались нами на участках, поверхность которых в дневное время под влиянием солнца нагревалась до температуры 25—40°. Итак, в пределах деятельного слоя зоны окисления мелантерит является весьма неустойчивым минералом. Он легко обезвоживается и переходит в трех- и четырехводный сульфат железа.

Магнистый рёмерит слагает внешнюю часть сульфатной зоны гипергенных образований. Мелкозернистые почкообразные до землистых массы минерала содержат реликты пирита. Окраска желтая, блеск жирный, вкус солоноватый, вяжущий. Рассматриваемый сульфат легко растворим в воде. В иммерсионном препарате хорошо виден микротаблитчатый облик кристаллов, обладающих косым погасанием. Окраска корочек сросшихся кристаллов бледно-желтая, а отдельные таблички практически бесцветны. Показатели преломления (см. табл. 2) несколько ниже таковых величин для обычного рёмерита [4].

Данное отклонение может быть вполне объяснено особенностями химического состава рёмерита. Анализ водного раствора минерала (см. табл. 1, обр. 134б) показал присутствие значительных количеств магния, который изоморфно замещает двухвалентное железо. Кристаллохимическая формула исследуемого сульфата, рассчитанная по данным анализа, имеет вид

$$(Mg_{0,56}\,Fe^{+2}_{0,49})\,Fe^{+3}_{2,03}\,[SO_4]_{3,97} \cdot 15{,}5\,H_2O.$$

Повышенное содержание магния позволяет рассматривать сульфат как магнистую разновидность рёмерита.

Спектральным анализом в магнистом рёмерите обнаружены сотые доли процента кальция, натрия, марганца, меди, кобальта, олова и мышьяка, тысячные — алюминия, никеля и свинца. Все вышеперечисленные элементы, за исключением двух первых, присутствуют в пирите, который является исходным продуктом для образования магнистого рёмерита.

На рентгенограмме магнистого рёмерита много линий размыто, и она имеет значительный общий фон (см. табл. 3). Одной из причин увеличенного фона может быть присутствие большого количества кристаллизационной воды. Этим же может быть обусловлено присутствие линий с большими межплоскостными расстояниями и высокой интенсивности — 19,5 и 9,3 *kX*. В опубликованной литературе нет рентгенограммы рёмерита. Сравнение рентгенограмм исследуемого минерала и измененных кировита, эпсомита и гексагидрита показывает, что на первой отсутствуют линии вышеперечисленных магнийсодержащих сульфатов. Следовательно, магний присутствует в изучаемом рёмерите в виде изоморфной примеси к двухвалентному железу.

На рис. 3 помещена кривая нагревания магнистого рёмерита, полученная Г. В. Белобородовой. Сравнение термограмм рёмерита [15] и магнистого рёмерита показывает, что последний теряет всю воду при более высоких температурах (около 350°), чем обычный рёмерит (220°). Сложный эффект, начинающийся при 400°, по данным А. И. Цветкова и Е. П. Вальяшихиной [15], отвечает распаду двойной соли на составляющие сульфаты (в нашем случае это $MgSO_4$, $FeSO_4$ и $Fe_2(SO_4)_3$) и одновременному началу окисления железа и диссоциации $FeSO_4$. Эндотермический минимум при 305° обусловлен разложением Fe_2SO_4 на Fe_2O_3 и SO_3. Эндоэффект при 1015°, отсутствующий на термограмме обычного рёмерита, обусловлен полиморфным превращением сернокислого магния [15].

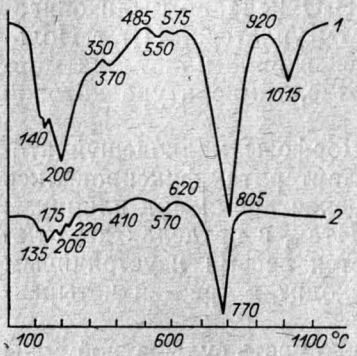

Рис. 3. Кривые нагревания магнистого ремерита [1] и рёмерита [15].

Условия нахождения магнистого рёмерита позволяют утверждать, что он образуется в пределах многолетнемерзлых пород вблизи границы последних с деятельным слоем. Эта внешняя часть многолетнемерзлых пород характеризуется по сравнению с внутренними зонами повышенным присутствием кислорода и более высокой влажностью. Первое создает благоприятную обстановку для окисления части двухвалентного железа, второе — для кристаллизации сульфата с высоким содержанием кристаллизационной влаги. В глубоких частях зоны окисления эти условия не соблюдаются, и там вместо магнистого рёмерита возникает кировит-магнистая разновидность мелантерита.

Копиапит образует желтоватые налеты на покрытых гидроокислами железа пирит-пирротиновых массивных сегрегациях в участках, защищенных от воздействия солнечных лучей и имеющих вследствие этого относительно избыточное увлажнение. Агрегаты минерала обладают мелкочешуйчатым сложением. Размер чешуек 0,002—0,004 *мм*. В иммерсионном препарате видно, что копиапит слабо плеохроирует в желтовато-зеленоватых тонах, угол погасания с осью *Ng* большой. Полученные показатели преломления (см. табл. 2) позволяют отнести сульфат к окисленной разности копиапита, в котором Fe^{+2} частично или полностью окислилось до Fe^{+3} [4]. Копиапит имеет ограниченное распространение и, вероятно, во всех установленных случаях представляет собой первичный минерал, а не продукт изменения других сульфатов железа, в частности мелантерита.

Галотрихит установлен лишь в зоне окисления сульфидной жилы в нижнем течении руч. Серебряного (р. Фокина), где он совместно с мелантеритом образуется при разложении пирита и пирротина. Волокнистые белые массы галотрихита приурочиваются к границе последней с вмещающими алевролитами и аргиллитами. Спектральный анализ обнаружил наличие в нем сильных линий Fe и Al, менее сильной линии Mg, а также присутствие небольшого количества Mn — 0,6%, Ca и Na — по 0,1%. Данные оптического (см. табл. 2) и спектрального изучения свидетельствуют о том, что в составе двухвалентных катионов присутствует изоморфная примесь магния и (меньше) марганца.

Условия нахождения галотрихита показывают, что его образование происходит в условиях затрудненного водообмена, создаваемого обстановкой многолетнемерзлых пород, но все-таки в среде с несколько

повышенной влажностью, наблюдаемой в зальбанде сульфидной жилы, по сравнению с ее центральной частью, где возникает мелантерит, в составе которого присутствует лишь семь молекул воды. Необходимое количество алюминия заимствуется из вмещающих алевролитов.

Эпсомит чрезвычайно широко распространен в зоне окисления железоколчеданных рудопроявлений района. Кроме того, он иногда образует налеты на пластах каменного угля, содержащих пирит. Так, на одном из угольных пластов в среднем течении р. Фокиной на высоте 2—3 *м* от меженного уровня воды наблюдались многочисленные корки и налеты белого эпсомита (см. рис. 1, табл. 2 и 3). Химический анализ эпсомита, хранившегося в комнатных условиях, приведен в табл. 1. После вычета небольшого количества гипса была рассчитана кристаллохимическая формула минерала: $Mg_{0,94}[SO_4]_{1,03} \cdot 6,3\,H_2O$. Она показывает, что эпсомит потерял часть воды. Рентгенометрические данные говорят, что в данном примере мы имеем дело со смесью эпсомита и гексагидрита (см. табл. 3).

Алуноген и натровые касцы встречены совместно с эпсомитом и гипсом в виде белых корок на выветрелых пойкилоофитовых габбро-долеритах, залегающих среди метаморфизованных туфогенных пород, содержащих обильную мелкую вкрапленность сульфидов железа. В нашем примере сульфаты образуют многочисленные корки на почти отвесном обнажении. Минералы наблюдались в начале лета. Заметим, что после трехдневных дождей скопления сульфатов резко уменьшились в размерах. Агрегаты вышеперечисленных сульфатов имеют мелкозернистое или ватовидное тонковолокнистое сложение. Показатели преломления алуногена приведены в табл. 2. Мельчайшие зерна натровых квасцов в иммерсионном препарате бесцветны, показатель преломления их $N = 1,460 \pm 0,002$; двупреломление очень слабое. Возможно, часть натровых квасцов должна быть отнесена к группе мендоцита.

В табл. 1 приведены результаты химического анализа белых корок сульфатов, сложенных эпсомитом, алуногеном и натровыми квасцами (обр. 102). Данные показывают, что смесь состоит на 21,5% из минералов группы эпсомита — $(Mg, Mn, Ni, Cu)SO_4 \cdot 7H_2O$, 38,7% натровых квасцов — $(Na, K, NH_4)Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ и 40,1% алуногена — $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$. Рентгенометрическое изучение подтверждает наличие в смеси эпсомита, алуногена и натровых квасцов (см. табл. 3, обр. 102).

На рис. 1 показана кривая нагревания смеси эпсомита, алуногена и натровых квасцов. В низкотемпературной области кривой наблюдается пять эндотермических эффектов, отражающих удаление воды. Известно, что квасцы не дают на термограмме строго определенной конфигурации эффекта удаления кристаллизационной воды [15] и, следовательно, наблюдаемые первые пять эндотермических пиков принадлежат эпсомиту и алуногену. Крупный эндоэффект при 875° обусловлен диссоциацией алюмосульфатного компонента алуногена и квасцов, а высокотемпературный эффект при 1040° характеризует полиморфное превращение сульфата магния [15].

Генезис охарактеризованной ассоциации сульфатов можно представить себе в следующем виде. Кислые воды зоны окисления сульфидных руд весьма активно разрушают силикатные минералы туфов и долеритов. В процессе кислотного выщелачивания эти воды обогащаются кальцием, алюминием, железом, магнием, натрием, ввиду того, что туфогенные породы достаточно пористы, а интрузивные траппы трещиноваты, они легко доступны кислороду воздуха, который окисляет ион

двухвалентного железа. Образующиеся гидроокиси железа выпадают, покрывая породы бурым налетом. При испарении вод зоны окисления, достигших поверхности обнажения, из них вначале выпадают кристаллы гипса, затем эпсомит и, наконец, сульфаты алюминия и натрия. Присутствующие в небольшом количестве в водах марганец, никель, кобальт и медь изоморфно замещают магний в эпсомите, а калий замещает натрий в квасцах. Полная окисляемость иона Fe^{+2} и выпадение железа из вод подтверждаются химическим анализом смеси сульфатов, который показывает отсутствие как окисного, так и закисного железа, а также анализами вод данной зоны окисления, в которых, как правило, железо отсутствует.

Полученные материалы позволяют рассмотреть вопрос о причинах большого количества сульфатных минералов в пределах зон окислений сульфидных месторождений северных районов. В настоящее время в геокриологии твердо установлено, что в процессе промерзания горных пород и почв происходит подтягивание влаги из нижних горизонтов в зону охлаждения. Это движение влаги происходит также в толще мерзлых пород в сторону более низких температур. А так как в течение долгих полярных зим верхние горизонты почв и горных пород охлаждаются намного быстрее, чем нижние, миграция влаги происходит из нижних горизонтов в верхние [10, 14]. Влага переносит в растворенном виде различные химические элементы. Последние передвигаются также и в результате диффузии. В верхних частях зон окислений сульфидных месторождений подземные воды имеют низкие величины *pH*, высокие концентрации сульфат-иона и различных тяжелых металлов [16]. Около поверхности, где температура горных пород быстро падает, количество незамерзшей воды резко сокращается, что ведет к образованию различных минералов. При этом выпадение сульфатов из раствора может происходить и ниже деятельного слоя. Об этом свидетельствует нахождение мелантерита, галотрихита и магнистого рёмерита в толще мерзлых пород. Дефицит кислорода и замедленный водообмен в этих условиях способствуют сохранению названных минералов. Приведенные факты позволяют сделать вывод, что сульфатообразование в настоящее время происходит как в деятельном слое, так и толще мерзлых пород. Возможность образования сульфатов в зоне многолетнемерзлых пород показана авторами на примере нового минерала — никель-гексагидрита, установленного в зоне окисления Норильского месторождения [9]. Аналогичная точка зрения была высказана еще в 1941 г. при изучении Эге-Хайского месторождения [11]. Весьма убедительные данные об образовании мелантерита в мерзлых породах приводятся также в работе Л. Д. Мирошникова и О. Е. Щегловой [7].

В силу весьма затрудненного водообмена в толще мерзлых пород в пределах небольших глубин зоны окисления физико-химическая и термодинамическая обстановка может существенно отличаться даже на небольших участках, что находит отражение в образовании разнообразных вторичных минералов. При низком окислительно-восстановительном потенциале и малых величинах *pH* образуются мелантерит, галотрихит и другие сульфаты, содержащие двухвалентное железо. На участках, где окислительно-восстановительный потенциал вод несколько повышен и создаются благоприятные условия для частичного окисления железа, возникают копиапит, магнистый рёмерит и другие сульфаты закисного и окисного железа. При высоком окислительно-восстановительном потенциале вод и нейтральной или слабощелочной среде железо полностью выпадает в виде окислов и гидроокислов, а сульфаты представлены гипсом, алуногеном, эпсомитом, квасцами.

Верхняя часть мерзлых пород, в которой температурные условия весьма непостоянны и где происходит периодическое промерзание и оттаивание, на наш взгляд, наиболее благоприятна для образования сульфатов, особенно в зимнее время. Весной, когда начинается таяние снега и мерзлоты в пределах деятельного слоя, бо́льшая часть образовавшихся сульфатов уносится водными потоками. Сохраняются они только на склонах, где снег не задерживается зимой, и особенно на крутых обнажениях, обращенных на юг, где в феврале — марте снег испаряется. Нагревание южных склонов и испарение воды уже при положительных температурах приводят к усилению притока воды из мерзлых горизонтов к поверхности. А это также способствует образованию и сохранению сульфатов. И только периодически выпадающие атмосферные осадки уничтожают накопившиеся сульфаты, поэтому наибольшее количество их наблюдается весной, когда деятельный слой еще не промыт.

Изложенные соображения в отношении образования сульфатов в северных районах подтверждаются и гидрогеохимическими исследованиями. Последние показали, что воды деятельного слоя в пределах зон окисления, хотя и богаты тяжелыми металлами и сульфат-ионами, но их количество далеко не достаточно для того, чтобы началась кристаллизация минералов. И только воды, образующиеся непосредственно при таянии мерзлоты (капеж из мерзлых пород), содержат резко повышенные количества этих элементов [16]. При этом следует учитывать, что воды представляют смесь жидкой фазы и льда.

Таким образом, процессы выветривания сульфидных минералов в верхних горизонтах зон окислений северных районов приводят к своеобразному распределению сульфатов. Последние распространены по всей зоне окисления, а не только в нижних ее горизонтах, как это наблюдается вне районов развития многолетнемерзлых пород. При этом значительные массы их концентрируются в самих верхних горизонтах зон окислений. Атмосферные осадки, выпадающие в течение короткого лета, не всегда и не везде приводят к интенсивному промыванию верхних горизонтов зон окислений. Это обстоятельство должно учитываться при геохимических поисках рудных месторождений по вторичным ореолам и потокам рассеяния в районах полярных и субполярных широт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бонштедт-Куплетская Э. М. Новые минералы XI. Зап. Всес. минерал. об-ва, ч. 90, вып. 4, 1961.
2. Винчелл А. Н. Оптика и микроскопия искусственных минералов. Госхимтехиздат, 1933.
3. Власов В. В., Кузнецов А. В. О мелантерите и продуктах его изменения. Зап. Всес. минерал. об-ва, ч. 91, вып. 4, 1962.
4. Дэна Дж. Д. и др. Система минералогии, т. II, полутом I. ИЛ, 1953.
5. Елисеев Э. Н. Вопросы геохимии никеля. Сб. Ультраосновные и основные интрузии Печенги. Изд-во АН СССР, 1961.
6. Китайгородский А. И. Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел. Гостехиздат, 1952.
7. Мирошников Л. Д., Щеглова О. С. О концентрации водорастворимых сульфатов на полуострове Челюскина. Зап. Всес. минерал. об-ва, ч. 88, вып. 6, 1959.
8. Михеев В. И. Рентгенометрический определитель минералов. Госгеолтехиздат, 1957.
9. Олейников Б. В., Шварцев С. Л., Мандрикова Н. Т., Олейникова Н. Н. Никельгексагидрит — новый минерал. Зап. Всес. минерал. об-ва, ч. 94, вып. 5, 1965.
10. Основы геокриологии, ч. I. Изд-во АН СССР, 1959.

11. Смирнов С. С. и др. Минералогический очерк Яно-Адыгчанского района. Тр. ИГН АН СССР, вып. 46, минер. сырье, № 9, 1941.
12. Соболев В. С. Введение в минералогию силикатов. Изд-во Львов. ун-та, 1949.
13. Тютюнов И. А. Процессы изменения и преобразования почв и горных пород при отрицательной температуре. Изд-во АН СССР, 1960.
14. Тютюнов И. А., Нерсесова З. А. Природа миграции воды в грунтах при промерзании и основы физико-химических приемов борьбы с пучением. Изд-во АН СССР, 1963.
15. Цветков А. И., Вальяшихина Е. П. Материалы по термическому исследованию минералов, Тр. ИГН, вып. 157, сер. петрогр., № 45, 1955.
16. Шварцев С. Л. Некоторые результаты гидрогеохимических исследований в условиях многолетней мерзлоты. Геол. рудн. месторожд., 1963, № 2.

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск
Томский политехнический институт
Якутского филиала СО АН СССР

Статья поступила в редакцию 27 января 1967 г.