

УДК 552.323 (576.645 + 571.66)

## СУЛЬФИДНЫЕ МИКРОВКЛЮЧЕНИЯ В КИСЛЫХ И СРЕДНИХ ВУЛКАНИТАХ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

© 1996 г. Б. В. Федоров\*, О. Н. Волынец\*\*, В. С. Попов\*

\*Московская государственная геологоразведочная академия, кафедра петрографии  
117873 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Россия

\*\*Институт вулканологии ДВО РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, бульв. Пийпа, 9, Россия

Поступила в редакцию 01.06.95 г.

Первичные сульфидные микровключения во вкрапленниках из четвертичных андезидацитов, дацитов и риодацитов Камчатки и Курильских островов состоят из пирротина и медьсодержащей фазы. Включения представляют капли сульфидного расплава, захваченные растущими вкрапленниками в жидком состоянии или после затвердевания. Средний химический состав включений, мас. %: S - 38.42, Fe - 55.28, Cu - 6.03, Ni - 0.13, Co - 0.14. Судя по этому составу, кислые и средние магмы содержали 50 - 230 г/т меди, что примерно на порядок выше количества этого металла в затвердевших вулканических породах.

Первичные сульфидные микровключения магматического происхождения обнаружены в породообразующих и акцессорных минералах различных изверженных пород (Вахрушев, 1988; Newhouse, 1936). Состав таких включений обычно ограничен сульфидными фазами системы Fe-Ni-Cu-S. В мафических и ультрамафических породах сульфидные микровключения состоят из пирротина, пентландита и других никельсодержащих фаз, а также из сульфидов меди, которые встречаются в подчиненном количестве (Буланова и др., 1990; Гаранин и др., 1988; Andersen et al., 1987; Lorand, 1989b; Skinner, Peck, 1969). По мере снижения магнезиальности магматических пород и увеличения их кремнекислотности соотношение минеральных фаз в сульфидных микровключениях закономерно меняется: включения обедняются пентландитом, относительное количество пирротина увеличивается, а доля медьсодержащих фаз остается примерно постоянной (Альмухамедов, Медведев, 1982; Муравьева, Сенин, 1993; Logand, 1989a). В вулканических породах среднего и кислого составов сульфидных микровключений обычно состоят только из пирротина и медьсодержащих фаз: халькопирита, кубанита и промежуточного твердого раствора (iss), или изокубанита, устойчивого при высокой температуре и содержащего меньше серы по сравнению с халькопиритом и кубанитом (Kullerud et al., 1969; Lowenstern, 1993). Именно такой состав сульфидных микровключений был установлен во вкрапленниках андезитов, дацитов и риолитов Кавказа (Попов, Федоров, 1995; Федоров, 1994).

В данной статье приведены новые данные о составе и строении сульфидных микровключений в четвертичных средних и кислых вулканитах Курило-Камчатской островной дуги, а также одного из подводных вулканов Командорских островов. Исследовались образцы из коллекции О.Н. Волынца и образцы, любезно предоставленные Т.И. Фроловой и И.А. Буриковой (кафедра петрографии МГУ). Сульфидные микровключения были обнаружены при изучении прозрачных полированных шлифов под микроскопом в отраженном свете в фенокристаллах и основной массе изверженных пород вулканов Теклетунуп, Кекукнайский, Большой, Безымянный, Хангар, Дикий Гребень на Камчатке, вулкана Черного, кальдер Тао-Русь (пик Креницына), Головина и Медвежья, подводного вулкана Рашидова, подводного склона вулкана Броутона, подводного вулкана в тылу острова Итуруп на Курильских островах, а также подводного вулкана Пийпа близ острова Беринга, Командорские острова. Сведения о геологическом строении этих вулканов и составе продуктов их извержений приведены в специальных работах (Петрология и геохимия..., 1987; Подводный вулканизм..., 1993 и др.).

Если в новейших вулканитах Кавказа преобладают пирротиновые микровключения, а доля сульфидных микровключений, содержащих сульфиды меди, невелика (Попов, Федоров, 1995), то в близких по валовому составу породах Камчатки и Курильских островов почти все включения состоят из пирротина и медьсодержащей фазы. Соотношения между этими фазами оказались более

## СУЛЬФИДНЫЕ МИКРОВКЛЮЧЕНИЯ В КИСЛЫХ И СРЕДНИХ ВУЛКАНИТАХ

определенными, нежели в ранее изученных сульфидных микровключениях из изверженных пород Кавказа.

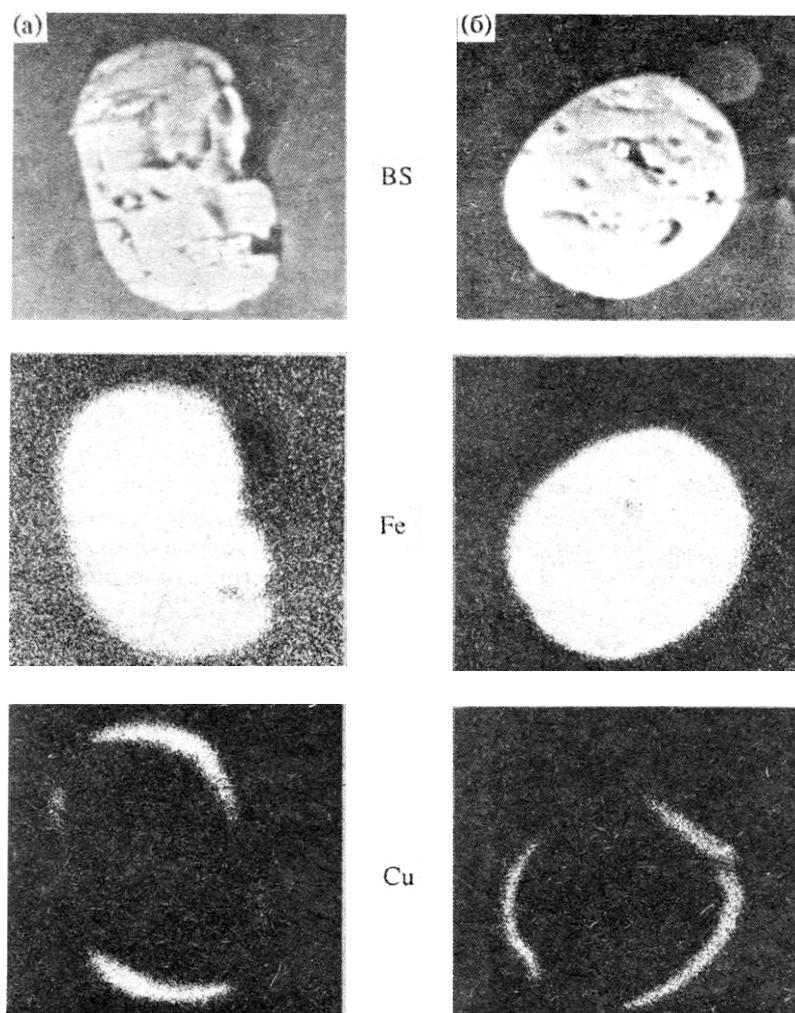
### СОСТАВ И СТРОЕНИЕ СУЛЬФИДНЫХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ

Первично-магматические сульфиды образуют мельчайшие включения во вкрапленниках, а также в полукристаллической или стекловатой основной массе вулканитов среднего и умеренно кислого составов (61.0 - 68.4 мас. %  $\text{SiO}_2$ ). В результате просмотра около 100 шлифов из 42 образцов было обнаружено более 80 сульфидных микровключений. С помощью электронного микронзонда CAMSCAN определен состав 28 первичных сульфидных включений в плагиоклазе, 16 - в орто- и клинопироксене, роговой обманке и биотите и 7 сульфидных глобуль в основной массе

(аналитик В.А. Батырев, НПО ЦНИИТМАШ). Наиболее обильные сульфидные микровключения содержатся в плагиоклазе, где они распределены по всему объему вкрапленников; в цветных минералах, особенно в роговой обманке и биотите, сульфидные микровключения встречаются только в краевых частях кристаллов, нередко на границе с основной массой.

Обычно сульфидные микровключения не превышают 0.01 - 0.03 мм в поперечнике; реже встречаются включения размером 0.03 - 0.1 мм. Почти все относительно крупные сульфидные микровключения наблюдались во внешних зонах вкрапленников. Их форма округлая, каплеобразная (рис. 1) либо вытянутая (рис. 2); последняя соответствует очертаниям негативных кристаллов минерала-хозяина.

Почти все сульфидные микровключения являются двухфазными: пирротин-халькопиритовыми



**РИС. 1.** Каплеобразные сульфидные микровключения из дацитов вулкана Дикий Гребень. (а) - в клинопироксене (диаметр включения 0.02 мм); (б) - в стекловатом базисе (0.03 мм).

Здесь и на рис. 2: BS - снимки в обратнорассеянных электронах, Fe - в характеристическом излучении Fe, Cu - в характеристическом излучении Cu. На микрофотографии (б) видно, что медьсодержащая фаза не только образует внешнюю кайму, но и проникает внутрь пирротина по трещине.

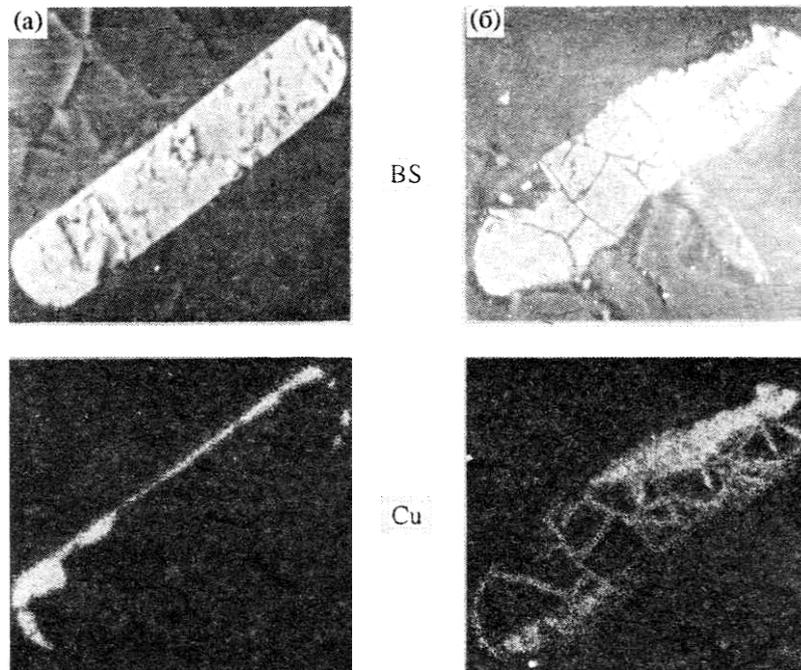


Рис. 2. Вытянутые сульфидные микровключения в плагиоклазе.

(а) - из андезита пика Креницына (длина 0.07 мм), (б) - из дацита подводного вулкана Пийпа (0.1 мм). Во включении (а) сульфид меди образует внешнюю кайму вокруг пирротина, а во включении (б), кроме того, проникает в раздробленное зерно пирротина по трещинам.

или пирротин-кубанитовыми. Редко встречаются однофазные халькопиритовые или кубанитовые включения. Мономинеральные пирротиновые включения скорее всего являются результатом случайного среза двухфазных включений.

Медьсодержащая фаза концентрируется в крайних частях округлых и вытянутых включений

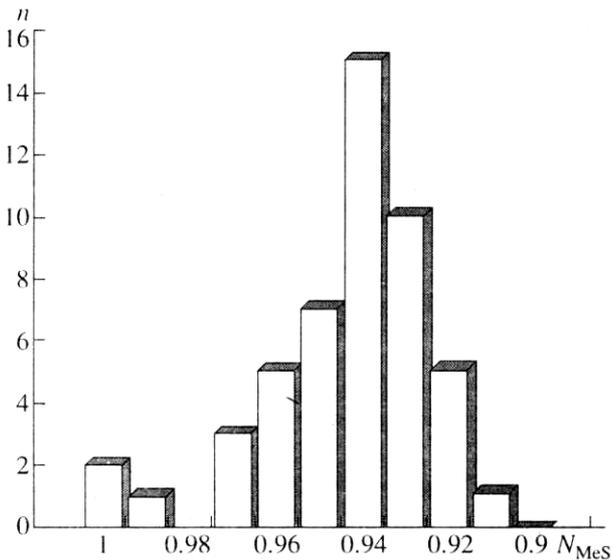


Рис. 3. Частота встречаемости пирротинов с разной мольной долей MeS.

$N_{MeS}$  - мольная доля MeS,  $n$  - количество сульфидных микровключений здесь и на рис. 4.

(рис. 1 и 2), реже выделяется в виде тонких пластинок в пирротине. В крупном включении из дацитов вулкана Пийпа медьсодержащая фаза цементирует раздробленное зерно пирротина (рис. 2б). Обычно доля этой фазы составляет до 10 - 20% объема сульфидного включения, в редких случаях - до половины его объема. В большинстве двухфазных сульфидных микровключений удалось определить химический состав лишь пирротиновой части (таблица). Медьсодержащие фазы имеют столь малые размеры, что луч микрозонда неизбежно захватывает и прилегающую часть пирротина. При этом состав медьсодержащей фазы, близкий по стехиометрии к кубаниту или халькопирротину, может быть результатом случайной суперпозиции составов халькопиритовой каймы и пирротина, попавшего в зону возбуждения. Более или менее точно состав медьсодержащей каймы определен лишь для двух включений (в таблице эти составы отмечены звездочкой).

Состав пирротина характеризуется мольной долей  $MeS = FeS + CoS + NiS + CuS$  (Попов, Федоров, 1995). Пирротиновая часть изученных сульфидных микровключений представлена главным образом смесью моноклинного ( $N_{MeS} = 0.93$ ) и гексагонального ( $N_{MeS} = 0.95$ ) пирротинов (рис. 3), образующих субмикроскопические прорастания при низкотемпературных превращениях твердого раствора  $Fe_{1-x}S$  (Новиков и др., 1988). Все пирротины содержат мало Ni и Co; низкие содержа-

## Химический состав сульфидных микровключений

Вулканы	Порода	Образец	Минерал- хозяйин	Количество сульфидных микровключений	Сульфидная фаза	Состав сульфидов, мас. %					Молярная доля MeS	Сумма
						S	Cu	Fe	Ni	Co		
<b>Камчатка</b>												
Теклетунуп	Дацит	ТТ-1004	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	39.69	0.04	60.18	0.03	0.06	0.93	97.13
	»	ТТ-1004	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	39.3	0	60.59	0	0.11	0.94	97.97
Кекукнайский	Кварцевый трахит	6766	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	39.85	0.36	59.65	0.02	0.12	0.93	97.9
Большой	Риодацит	6808/1	<i>Pl</i>	2	<i>Po</i>	38.96	0.49	60.38	0.04	0.13	0.95	98.35
	»	6808/1	<i>Hbl</i>	1	<i>Po</i>	39.76	1.39	58.55	0.16	0.14	0.93	96.16
	»	6808/1	<i>Gm</i>	2	<i>Po</i>	39.83	0.13	59.73	0.22	0.09	0.93	97.89
Безымянный	Андезит	574	<i>Pl</i>	3	<i>Po</i>	39.12	0.25	60.45	0.05	0.13	0.94	96.74
	»	574	<i>Hbl</i>	1	<i>Po</i>	39.65	0.97	58.7	0.46	0.22	0.93	96.02
	»	574	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	38.56	0.29	60.86	0.11	0.18	0.96	93.85
	»	578	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	36.82	0.18	62.76	0.07	0.17	0.99	99.44
	»	578	<i>Pl</i>	3	<i>Po</i>	39.15	0.22	60.42	0.09	0.12	0.94	97.34
	»	578	<i>Pl</i>	1	<i>Cub</i>	37.09	20.31	42.44	0.08	0.08		94.21
	»	578	<i>Hbl</i>	2	<i>Po</i>	39.62	0.04	60.01	0.23	0.1	0.93	96.28
Хангар	Дацит	X-4	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	39.45	0.05	60.33	0.08	0.09	0.94	98.82
Дикий Гребень	»	5874	<i>Hbl</i>	1	<i>Po</i>	39.64	0.19	59.84	0.2	0.13	0.93	96.78
	»	5874	<i>Gl</i>	1	<i>Po</i>	39.29	0.34	60.14	0.13	0.1	0.94	97.14
	»	5874	<i>Gl</i>	1	<i>Po</i>	39.06	0.41	60.13	0.27	0.13	0.94	98.16
<b>Курильские острова</b>												
Подводный вулкан Рашидова	Андезит	B40-32/4	<i>Hbl</i>	2	<i>Po</i>	40.33	0.52	58.87	0.14	0.14	0.92	96.94
»	»	B40-32/4	<i>Vt</i>	1	<i>Po</i>	39.35	0.33	60.07	0.13	0.12	0.94	97.62
Пик Креницына, о-в Онекотан	»	8321	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	39.29	0.18	60.36	0.04	0.13	0.94	98.57
»	»	8321	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	39.24	0.16	60.37	0.03	0.2	0.94	98.98
Подводный склон вулкана Броугтона	Андезидацит	B40-8/3	<i>Pl</i>	2	<i>Po</i>	38.58	0.66	60.43	0.2	0.13	0.95	97.89
»	»	B40-8/3	<i>Pl</i>	1	<i>Ccp*</i>	35.63	32.19	32.12	0.02	0.04		94.88
Черного, о-в Чирпой	Дацит	B15-323/1	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	40.01	0.3	59.28	0.26	0.15	0.92	96.82
	»	B15-323/1	<i>Gl</i>	1	<i>Cub</i>	32.23	26.03	41.47	0.21	0.06		95.01
	»	B15-323/1	<i>Cpx</i>	1	<i>Po</i>	37.99	0.26	61.37	0.23	0.15	0.97	100.6
Кальдера Медвежья, о-в Итуруп	Андезит	B17-671	<i>Pl</i>	2	<i>Po</i>	37.25	0.41	62.07	0.13	0.14	0.98	98.27
	»	B17-671	<i>Gl</i>	1	<i>Po</i>	36.29	2.76	60.57	0.17	0.21	1	96.89
	»	B17-671	<i>Cpx</i>	1	<i>Po</i>	38.1	2.17	59.52	0.11	0.1	0.96	99.42
Подводный вулкан, в тылу о-ва Итуруп	Дацит	B40-5/4	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	40.22	0.03	59.55	0.05	0.15	0.92	98.25
	»	B40-5/4	<i>Hbl</i>	1	<i>Po</i>	39.36	1.33	59.15	0	0.16	0.94	95.49
Кальдера Головинина, о-в Кунашир	Андезидацит	5931	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	38.35	0.17	61.26	0.07	0.15	0.96	98.01
	»	5931	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	39.07	0.36	60.38	0.08	0.11	0.94	91.72
	»	5931	<i>Pl</i>	1	<i>Po</i>	38.69	8.5	52.61	0.09	0.11		98.21
	»	5931	<i>Opx</i>	2	<i>Po</i>	38.09	0.48	61.26	0.04	0.13	0.96	96.81
<b>Командорские острова</b>												
Подводный вулкан Пийпа, экструзия у западного подножья	Дацит	B35-4	<i>Pl</i>	3	<i>Po</i>	39.45	0.12	60.13	0.15	0.15	0.94	98.83
	»	B35-4	<i>Pl</i>	1	<i>Cub*</i>	36.01	24.32	39.57	0.04	0.06		96.55
	»	B35-4	<i>Opx</i>	2	<i>Po</i>	39.75	0.12	59.9	0.1	0.13	0.93	98.6
	»	B35-4	<i>Hbl</i>	1	<i>Po</i>	40.05	0.06	59.44	0.3	0.15	0.92	98.58
Центральный купол	»	B38-50	<i>Pl</i>	1	<i>Ccp</i>	33.99	33.46	32.2	0.3	0.05		92.05

Примечание. Символы минералов: *Pl* - плагиоклаз, *Hbl* - роговая обманка, *Gm* - основная масса, *Gl* - вулканическое стекло, *Vt* - биотит, *Cpx* - клинопироксен, *Po* - пирротин, *Cub* - кубанит, *Ccp* - халькопирит. Звездочкой отмечены медьсодержащие фазы, образующие внешнюю кайму в двухфазных включениях. Содержания S, Cu, Fe, Ni и Co пересчитаны на 100 мас. %; реальные суммы анализов приведены в последнем столбце.

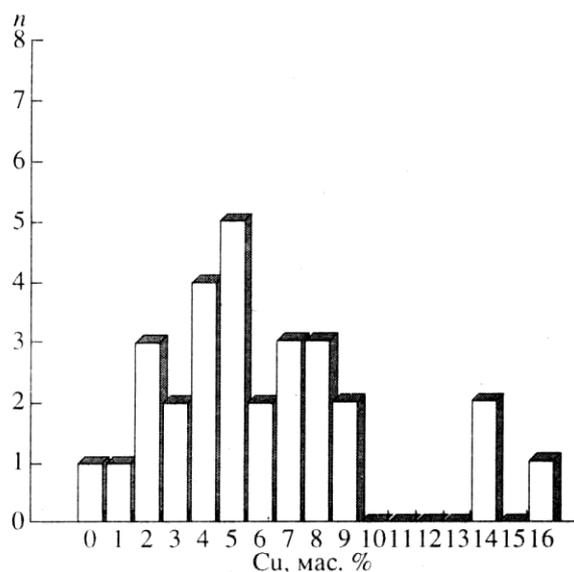


Рис. 4. Частота встречаемости сульфидных глобул с разным содержанием меди.

ния этих металлов характерны и для медьсодержащих фаз (таблица).

Исходя из объемных соотношений между пирротинном и медьсодержащей фазой, был рассчитан валовый состав сульфидных микровключений. При этом допускалось, что медьсодержащая фаза представлена только халькопиритом, и следовательно расчетное содержание меди является максимально возможным. Частота встречаемости сульфидных микровключений с разным количеством меди показана на рис. 4. Средний состав, мас. %, рассчитанный по 43 включениям из 15 образцов, выглядит так: S - 38.42, Fe - 55.28, Cu - 6.03, Ni - 0.13, Co - 0.14. Для сравнения отметим, что сульфидные включения в базальтах Гавайских островов, близкие по структуре к тем, которые были обнаружены в дацитах вулкана Пийпа (рис. 2б), имеют состав, мас. %: S - 35, Fe - 53, Cu - 9, Ni - 3 (Skinner, Peck, 1969).

На микрофотографиях, сделанных в характеристическом излучении, видно, что концентрация меди в пирротине, как правило, такая же низкая, как и в окружающей его силикатной матрице (рис. 1 и 2). Согласно микронзондовым анализам, в отдельных включениях пирротина содержатся до 2 - 2.7 мас. % Cu (в одном случае - 8%). Повышенное содержание меди в пирротинах скорее всего обусловлено неточностью локального микроанализа. Действительно, максимальные концентрации меди в пирротине отмечены для самых мелких сульфидных микровключений (<0.02 мм), значительная часть которых занята сульфидами меди. Среднеквадратичные отклонения при определении концентрации меди в разных точках одного и того же пирротинового зерна оказались выше допустимых погрешностей метода именно в

пирротинах с содержанием меди более 0.3 мас. %. В то же время для никеля, не образующего самостоятельных фаз, среднеквадратичные отклонения не превышали допустимых. Более высокое по сравнению с другими элементами стандартное отклонение для меди, причиной которого является неоднородность ее распределения, отмечается и в экспериментальных работах (Fleet, Pan, 1994).

#### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СУЛЬФИДНЫХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ

Морфологические особенности сферических двухфазных сульфидных микровключений ясно указывают на то, что первоначально это были капли сульфидного расплава, захваченные растущими вкрапленниками в жидком или затвердевшем состоянии (Попов, Федоров, 1995). Состав и строение сульфидных микровключений иной формы не противоречат этому выводу. При магматических температурах валовые составы сульфидных микровключений попадают в область гомогенного сульфидного расплава в системе Cu-Fe-S (рис. 5а). По экспериментальным данным, из такого расплава первым кристаллизуется моносульфидный твердый раствор (Fe,Cu)S (*mss*), т.е. пирротин с примесью Cu, а содержание меди в остаточном расплаве возрастает; ранний *mss* содержит до 5.0 - 7.5 мас. % меди (Арутюнян и др., 1992; Kullerud et al., 1969). Температура ликвидуса пирротина, лишенного меди, достигает 1192°C и снижается с ростом содержания Cu. Соотношение железа и меди в остаточном расплаве, равное 1 : 1 и соответствующее составу халькопирита, достигается при 900°C и изменяется в сторону обогащения медью при дальнейшем охлаждении (Fleet, Pan, 1994). Остаточный расплав затвердевает при температуре 800 - 850°C с образованием халькопирита или *iss* (Арутюнян и др., 1992; Fleet, Pan, 1994), рис. 5б.

Температуры ликвидуса и солидуса сульфидного расплава, отвечающего валовому составу изученных сульфидных микровключений, были рассчитаны по уравнениям Флита и Пэна (Fleet, Pan, 1994). Согласно полученным результатам (рис. 6), микровключения с содержанием меди от нуля до 16 мас. % Cu (рис. 4) начинали затвердевать при температуре от 1192 до 1070°C соответственно. Расчетная температура солидуса *mss*, содержащего от нуля до максимально возможных 7.5 мас. % Cu (Арутюнян и др., 1992; Kullerud et al., 1969), составляет 1192 - 900°C.

Фазовые соотношения в системе Fe-Cu-S вблизи солидуса остаются мало изученными. Не ясно, завершается ли кристаллизация сульфидных микровключений образованием твердого раствора *mss*, обогащенного медью, или же в конце кристаллизации возникает эвтектическая

смесь твердых растворов *mss* и *iss* предельной концентрации, а последний превращается затем в халькопирит. Соотношения фаз в реальных сульфидных микровключениях не соответствуют ни тому, ни другому варианту. В изученных сульфидных микровключениях суммарная концентрация примесей в пирротине обычно не превышает 0.8 мас.%, причем достоверно установленное содержание Cu - 0.05 - 0.5 мас. %. Пирротин и богатый медью сульфид представлены четко обособленными фазами. Медьсодержащая фаза почти всегда занимает краевое положение по отношению к пирротину и не образует в нем эвтектоидных прорастаний.

Если наблюдаемые фазовые соотношения первичны, то их можно объяснить равновесным затвердеванием, при котором бедный медью пирротин сохраняется во всем интервале кристаллизации, а остаточный расплав максимально обогащается медью и затвердевает в виде *iss* или халькопирита: при этом возможна перитектическая реакция:

пирротин + остаточный расплав = халькопирит.

Такая интерпретация подразумевает, что богатый медью *mss*, полученный в кратковременных опытах, является метастабильной фазой (Попов, Федоров, 1995).

Нельзя исключать и эпигенетического перераспределения меди в субсолидных условиях, приводящего к ее концентрации в халькопиритовых или кубанитовых каймах по краям микровключений. Механизм такого перераспределения остается проблематичным, однако обращает внимание, что рассчитанное среднее содержание меди в сульфидных микровключениях, равное 6 мас. %, соответствует количеству меди, которое может удерживать *mss* при температуре, близкой к солидусу.

В некоторых сульфидных микровключениях из клинопироксена, ортопироксена и роговой обманки медьсодержащая фаза выделяется в виде тонких пластин, природа которых неясна. Возможно, подобные структуры явились результатом распада обогащенного медью *mss* при быстром охлаждении. По-видимому, не случайно, что сульфидные микровключения с такими структурами встречаются в закаленных породах со стекловатым базисом (кальдера Медвежья, вулкан Черного).

#### ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЙ МЕДИ В РАСПЛАВЕ

Если принять, что капли сульфидного расплава, затвердевшие в виде сульфидных микровключений, содержали 6 мас. % меди, а коэффициент распределения Cu между сульфидным и силикатным расплавами равен 260 - 1200 (Никогосян, Со-

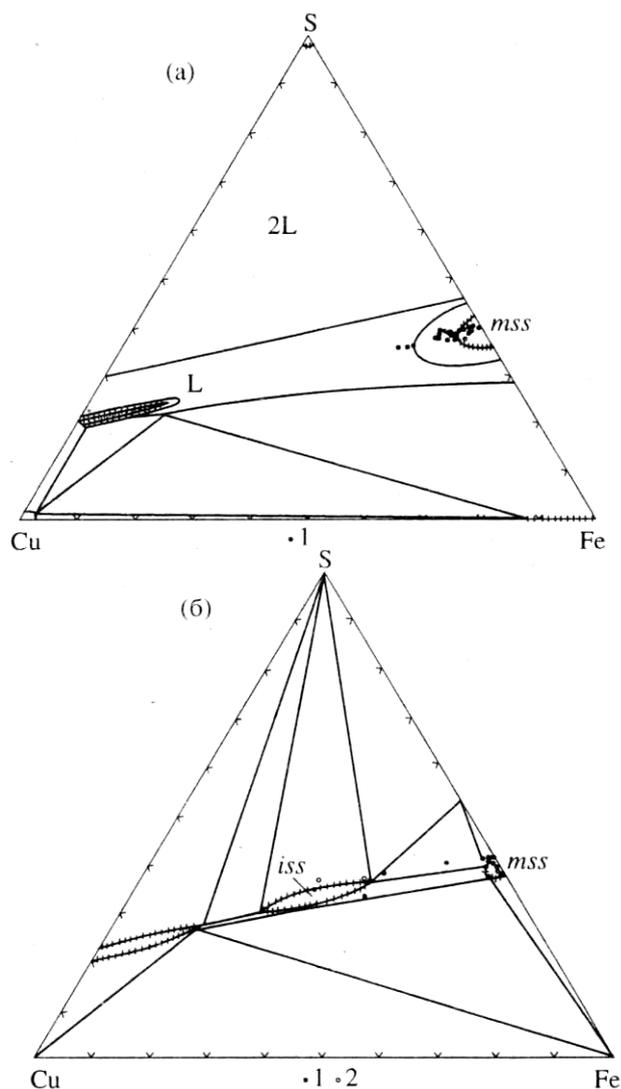


Рис. 5. Диаграмма состояния Cu-Fe-S по Куллеруду (Kullerud et al., 1969) с упрощениями.

(а) - 1100° С, 1 - расчетный валовой состав сульфидных глобул; (б) - 700° С, 1 - пирротины в двухфазных сульфидных микровключениях и мономинеральные сульфидные микровключения, 2 - медьсодержащая кайма в двухфазных включениях.

Линии со штрихами - твердые фазы переменного состава.

болев, 1994; Francis, 1990), то первичное содержание меди в силикатной магме среднего и умеренно кислого составов будет равно 50 - 230 г/т, что превышает концентрацию меди в исследованных вулканических породах (10-40 г/т). Оценки первичного содержания Cu в средних и кислых магмах, учитывающие размеры продуктивных интрузивов и запасы руд в меднопорфировых месторождениях, также превосходят фоновые содержания меди в магматических породах (Попов, 1988). Следовательно, большая часть меди удаляется из средних и кислых магм при их затвердевании и переходит во флюидную фазу, что

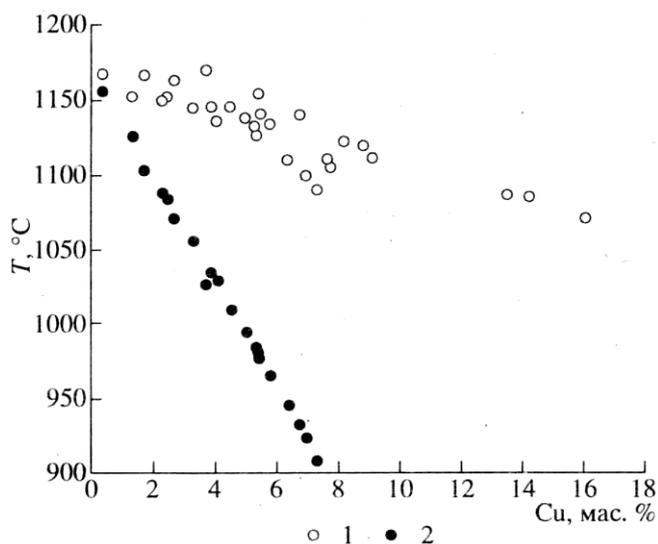


Рис. 6. Температуры ликвидуса (1) и солидуса (2) сульфидной жидкости, отвечающей валовому составу сульфидных микровключений, рассчитанные по уравнениям Флита и Пэна (Fleet, Pan, 1994).

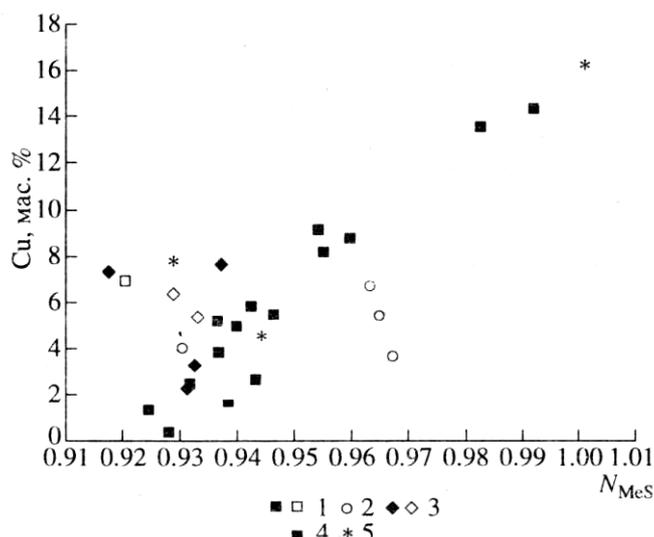


Рис. 7. Зависимость содержания меди в сульфидных глобулах от величины  $N_{MeS}$  пирротина. Минералы, содержащие сульфидные микровключения: 1 - плагиоклаз; 2 - пироксен; 3 - роговая обманка; 4 - биотит; 5 - основная масса. Залитые знаки - включения с каймой медьсодержащей фазы; незалитые знаки - включения с ламеллями этой же фазы внутри пирротина.

подтверждается интенсивным выносом меди в ходе вулканических извержений (Hedenquist, Lowenstern, 1994). Например, концентрация меди во флюиде, который выделялся во время извержения 1912 г. в долине Десяти тысяч дымов на Аляске, оценивается в 225 г/т (Lowenstern, 1993). Еще одним доказательством преимущественного фракционирования меди во флюидную фазу служат высокие содержания этого металла в микровключениях хлоридных рассолов из минералов

изверженных пород, достигающие 250 - 5000 г/т (Hedenquist, Lowenstern, 1994).

Наиболее богатые медью сульфидные микровключения скорее всего образуются до момента отделения флюида от расплава. Положительная корреляция между содержанием меди в сульфидных микровключениях и мольной долей  $MeS$  в пирротине, особенно отчетливо выраженная для этих микровключений, заключенных в плагиоклазе (рис. 7), подтверждает прямую зависимость между содержанием меди в каплях сульфидной жидкости и температурой обособления таких капель, что согласуется и с экспериментальными данными (Альмухамедов, Медведев, 1982). Наибольшие отклонения от общего тренда, показанного на рис. 7, обнаруживают отмеченные выше сульфидные микровключения с пластинчатыми вростками медьсодержащей фазы в пирротине.

При изучении сульфидных микровключений в новейших вулканиках Кавказа были выявлены заметные вариации содержания  $Ni$  в пирротине, которые позволили установить генетическую неоднородность сульфидных включений и связать их формирование как со смешением основных и кислых магм, так и с локальным насыщением сульфидной серой на фронте кристаллизации вкрапленников плагиоклаза (Попов, Федоров, 1995). В том и другом случаях кислый силикатный расплав изначально мог быть ненасыщенным серой. Сульфидные микровключения из четвертичных андезитов, дацитов и риодацитов Камчатки и Курильских островов отличаются однообразно низкими содержаниями  $Ni$  (таблица), что заставляет отбросить предположение о связи сульфидных микровключений с базитовым источником. Поскольку самые ранние сульфидные микровключения содержат и наибольшее количество меди (рис. 7), следует полагать, что насыщение сульфидной серой достигалось в близкидусных условиях. Если это так, то средние и кислые расплавы, давшие начало четвертичным вулканикам Камчатки и Курильских островов, были изначально богаче серой и медью, чем одновозрастные и близкие по составу магмы Кавказа. Поскольку плиоцен-четвертичные вулканики Камчатки и Курильских островов являются раннеорогенными (Шапиро, 1981), а одновозрастные вулканики Кавказа - позднеорогенными образованиями (Попов и др., 1987), можно говорить об обогащении раннеорогенных кислых магм серой и медью. Систематическая сопряженность промышленных меднопорфировых месторождений именно с раннеорогенными умеренно кислыми магматитами (Попов, 1975) показывает, что эта закономерность имеет общий характер и отражает геохимическую специфику корового субстрата, вовлеченного в частичное плавление. С позиций тектоники плит, обогащение островодужных средних и кислых магм указанными выше элемен-

тами обусловлено частичным плавлением гидротермальноизмененной океанической коры в зонах субдукции (Hedenquist, Lowenstern, 1994). Возможны и иные модели, требующие специального обоснования.

### ВЫВОДЫ

1. Почти все сульфидные микровключения, обнаруженные в изверженных породах Курило-Камчатской вулканической дуги, помимо пирротина содержат в том или ином количестве медьсодержащую фазу.

2. Халькопиритовая (кубанитовая) кайма вокруг пирротина в двухфазных сульфидных микровключениях может быть результатом перитектической кристаллизации капель сульфидного расплава либо следствием эпигенетического перераспределения меди в моносульфидном твердом растворе.

3. Судя по составу сульфидных микровключений, средние и умеренно кислые магмы содержали от 50 до 230 г/т меди, что превышает концентрацию этого металла в затвердевших магматических породах. Если исходить из состава сульфидных включений в базальтах (Skinner, Peck, 1969), то содержание меди в основных магмах примерно в полтора раза больше.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного комитета российской федерации по высшему образованию (грант № 1-2, 3-1).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альмухамедов А.И., Медведев А.Я. Геохимия серы в процессах эволюции основных магм. М.: Наука, 1982. 148 с.
- Арутюнян Л.А., Нерадовский Ю.Н., Савченко А.Н. О дифференциации вещества при кристаллизации рудосульфидных расплавов // Геохимия. 1992. № 9. С. 1270 - 1281.
- Буланова Г.П., Спецус З.В., Лескова Н.В. Сульфиды в алмазах и ксенолитах из кимберлитовых трубок Якутии. Новосибирск: Наука, 1990. 120 с.
- Вахрушев В.А. Рудные минералы изверженных и метаморфических пород. М.: Недра, 1988. 199 с.
- Гаранин В.К., Крот А.И., Кудрявцева Г.П. Сульфидные включения в минералах из кимберлитов. М.: Изд-во МГУ, 1988. 48 с.
- Муравьева Н.С., Сенин В.Г. Геохимия сульфидов из базальтоидов Байкальской рифтовой зоны и некоторые особенности их генезиса // Геохимия. 1993. № 8. С. 1219 - 1235.
- Никогосян И.К., Соболев А.В. Ликвационные явления в магмах острова Гавайи (Тихий океан) и острова Реюньон (Индийский океан) // Докл. РАН. 1994. Т. 338. №2. С. 214-218.

- Новиков Г.В., Егоров В.К., Соколов Ю.А. Пирротины. М.: Наука, 1988. 184 с.
- Петрология и геохимия островных дуг и окраинных морей. М.: Наука, 1987. 336 с.
- Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги. М.: Наука, 1993. 528 с.
- Попов В.С. Место медно-порфировых месторождений в металлогеническом мегацикле // Труды ЦНИГРИ. 1975. Вып. 141. С. 28 - 39.
- Попов В.С. О магматических источниках рудного вещества молибден- и медно-порфировых месторождений // Геология руд. месторождений. 1988. № 4. С. 38 - 47.
- Попов В.С., Семин В.А., Николаенко Ю.С. Геохимия новейших вулканитов Кавказа и их происхождение // Геохимия континентального вулканизма. М.: Наука, 1987. С. 143 - 237.
- Попов В.С., Федоров Б.В. Сульфидные микровключения в плиоцен-четвертичных вулканических породах Кавказа // Геохимия. 1995. № 3. С. 386 - 403.
- Федоров Б.В. Условия формирования сульфидных микровключений в кислых и средних вулканических породах Кавказа // Проблемы магматической и метаморфической петрологии. М.: Изд-во МГГА, 1994. С. 19.
- Шануро М.И. Соотношение геосинклиального режима и режима островной дуги (на примере Камчатки) // Геотектоника. 1981. № 4. С. 104 - 119.
- Andersen T., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. Primary sulphide melt inclusions in mantle-derived megacrysts and pyroxenites // Lithos. 1987. V. 20. P. 279 - 294.
- Fleet M.E., Pan Y. Fractional crystallizations of anhydrous sulfide liquid in the system Fe-Ni-Cu-S, with application to magmatic sulfide deposits // Geochim. Cosmochim. Acta. 1994. V. 58. № 16. P. 3369 - 3377.
- Francis R.D. Sulfide globules in mid-ocean ridge basalts (MORB), and the effect of oxygen abundance in Fe-S-O liquids on the ability of those liquids to partition metals from MORB and komatiite magmas // Chemical Geology. 1990. V. 85. P. 199 - 213.
- Hedenquist J.W., Lowenstern J.B. The role of magma in the formation of hydrothermal ore deposits // Nature. 1994. V. 370. № 6490. P. 519-527.
- Kullerud G., Yund R.A., Moh G.H. Phase relations in the Cu-Fe-S, Cu-Ni-S, and Fe-Ni-S systems // Econ. Geol. 1969. Mon. 4. P. 323 - 343.
- Lorand J.P. Abundance and distribution of Cu-Fe-Ni sulfides, sulfur, copper and platinum-group elements in orogenic-type spinel ilmenite massifs of Ariège (northeastern Pyrenees, France) // Earth and Planet. Sci. Lett. 1989a. V. 93. P. 50 - 64.
- Lorand J.P. Sulfide petrology of spinel and garnet pyroxenite layers from mantle-derived spinel ilmenite massifs of Ariège, northeastern Pyrenees, France // J. Petrol., 1989b. V. 30. P. 4. P. 987 - 1015.
- Lowenstern J.B. Evidence for a copper-bearing fluid in magma erupted at the Valley of Ten Thousand Smokes, Alaska // Contrib. Mineral. Petrol. 1993. V. 114. P. 409 - 421.
- Newhouse W.H. Opaque oxides and sulphides in common igneous rocks // Geol. Soc. Amer. Bull. 1936. V. 47. P. 1 - 52.
- Skinner B J., Peck D.L. An immiscible sulfide melt from Hawaii // Econ. Geol. 1969. Mon. 4. P. 310 - 322.