

И. В. Викентьев
 Институт геологии рудных месторождений,
 минералогии, петрографии и геохимии РАН, г. Москва,
 viken@igem.ru

Условия колчеданонакопления в палеогидротермальных системах и вопросы классификации месторождений Урала

Субмаринные процессы колчеданонакопления являются одними из крупнейших по продуктивности рудообразующих систем в истории Земли. Их систематике посвящены многие зарубежные обзоры (табл. 1). Классификации колчеданных месторождений уделяли внимание В. И. Смирнов, Н. И. Еремин, Г. А. Твалчерелидзе, М. Б. Бородаевская, В. А. Прокин, Д. И. Горжевский, Н. С. Скрипченко, в современный период – Е. С. Контарь, В. В. Зайков, В. В. Масленников, И. Б. Серавкин, А. Л. Дергачев [Контарь, 2013]. Дискутируется вопрос о корреляции этих систематик с международными подходами [Серавкин, 2013] (табл. 2, 3). Сводная классификационная схема, в которой предпочтение отдано региональным типам, приведена в таблицах 3 и 4.

Таблица 1

Сопоставление классификаций колчеданных месторождений, по [Mosier et al., 2009] с упрощениями

Hutchinson, 1973	Cox, Singer, 1986	Prokin, Buslaev, 1999	Franklin et al., 2005*	Mosier et al., 2009*	Shanks, Thurston, 2012*
Куроко Zn-Pb-Cu-Ag	Куроко	Баймакский	Кремнекластически-фельзитический в зрелых эпиконтинентальных дугах	Фельзитический	Бимодальный-фельзитический
			Бимодальный-фельзитический в эпиконтинентальных дугах		
Норанда Zn-Cu		Уральский	Бимодальный-мафический в океанических дугах	Бимодальный-мафический	Бимодальный-мафический
Кипрский Cu-пиритовый	Бесси	Кипрский	Пелит-мафитовый в зрелых задуговых бассейнах	Мафический	Мафит-ультрамафитовый
	Кипрский		Мафический в примитивных задуговых бассейнах		

Примечание. * – классификация включает характеристику вмещающего вулканогенно-осадочного комплекса, а в работе [Franklin et al., 2005] – и его геодинамическую позицию.

Таблица 2

**Типы колчеданных месторождений Урала и их корреляция
с глобальными типами**

Barrie, Hannington, 1999; Franklin et al., 2005*	Типы для Урала		
	Prokin, Buslaev, 1999	Herrington et al., 2005	Серавкин, 2013
Мафитовый в океанических рифтах, примитивных задуговых бассейнах	Кипрский	Атлантический	Ивановский (Ni-Co) Cu
		Домбаровский	Домбаровский Cu
Бимодальный-мафический в океанических дугах	Уральский	Уральский	Уральский Cu-Zn
Бимодальный-фельзический в эпиконтинентальных дугах	Баймакский	Баймакский	Баймакский Au-Ba-Pb-Cu-Zn

Примечание. * – здесь и в табл. 3 классификация включает характеристику вмещающего вулканогенно-осадочного комплекса и его геодинамическую позицию.

К колчеданным месторождениям относятся стратиформные скопления сульфидных минералов, преимущественно сульфидов железа. Минеральный состав руд колчеданных месторождений как массивных («сплошных»), так и вкрапленных, отличается резким преобладанием пирита и/или пирротина, иногда марказита, с которыми ассоциируют промышленно-ценные халькопирит, сфалерит и галенит, реже другие рудные минералы [Large, 1977; Franklin et al., 2005]. Изменение боковых пород, вмещающих колчеданные залежи, проявляется в хлоритизации, серицитизации, окварцевании и пиритизации и обычно развивается со стороны лежащего бока, зонально относительно рудных тел [Shanks, Thurston, 2012]. Данные месторождения, являющиеся одним из главных источников полиметаллов (Pb, Zn, Cu, Ag), связаны с субмаринными риолит-базальтовыми формациями, слагающими различные вулканотектонические структуры – стратовулканы, экструзивные купола, кальдеры и др. [Зайков, 2006; Серавкин, 2013]. Многие колчеданные залежи ассоциируют с офиолитовыми или зеленокаменными поясами, возникающими при метаморфизме окраинно-океанических трогов, выполненных магматическими производными базальтоидных магм – находящихся в различных пропорциях пиллоу-лавами, риодацитами, кислой и средней пирокластикой и переслаивающихся с подчиненными количествами терригенных, реже терригенно-карбонатных осадков [Franklin et al., 2005; Shanks, Thurston, 2012].

Месторождения обычно ассоциированы с кислыми частями вулканогенных разрезов, реже входят в офиолитовую ассоциацию (Кипр, ВТП и САХ). На основании минерального состава и характера вмещающих пород выделяются три главных типа колчеданных месторождений [Hutchinson, 1973; Large, 1977]:

Таблица 3

**Глобальная (по [Mosier et al., 2009]) и региональная типизация
колчеданных залежей**

Типизация по [Mosier et al., 2009]*		Месторождения Урала (данная работа)			
«Переходная»		Итог	Типы	Магматические комплексы	Геодинамическая обстановка
Кремнекластический-фельзитический в зрелых эпиконтинентальных дугах	Фельзитический к среднему	Фельзитический	–		
Бимодальный-фельзитический в эпиконтинентальных дугах	Бимодальный-фельзитический		Баймакский	С преобладающими риодацитами (бимодальный базальт-риолитовый)	Зрелая океаническая дуга (кора переходного типа)
Бимодальный-мафический в океанических дугах	Бимодальный-мафический	Бимодальный-мафический	Уральский Cu >> Zn	Бимодальный риолит-базальтовый	Молодая океаническая дуга
			Уральский Zn >> Cu	Бимодальный базальт-риолитовый	Зрелая океаническая дуга, задуговой бассейн
Бимодальный-мафический в эпиконтинентальных дугах			–		
Пелит-мафитовый в зрелых задуговых бассейнах	Пелит-мафитовый	Мафический	–		
Мафический в примитивных задуговых бассейнах	Мафический		Домбаровский	Базальтовый	Молодой океанический задуговой бассейн
Мафический в срединно-океанических хребтах			Ивановский	Серпентинитовый (второстепенный базальтовый)	Преддуговой бассейн

1. Месторождения *цинково-медного, или уральского типа* (Норанда, Матагами, Матгиби и др. в Архейском зеленокаменном поясе Канады; Урал) локализируются в пределах существенно кислых частей вулканических построек, сложенных риолит-базальтовыми сериями. Рудные тела обычно приурочены к определенным стратиграфическим уровням, нередко отвечающим фазам затухания вулканизма [Зайков, 2006; Серавкин, 2013].

2. *Свинцово-цинково-медно-серебряный, или тип куроко* охватывает месторождения Иберийского Пиритового пояса (Испания, Португалия), Куроко (Япония), Розбери (Зап. Тасмания), Бучанз (Ньюфаундленд), Батерст (Нью-Брансуик), Рудный

Таблица 4

Типы колчеданных месторождений Урала и их характеристика

Тип	Возраст*	Вмещающие породы	Геохимический тип	Примеры**
Ивановский	S ₂ -D ₁	Серпентиниты, метабазаальты	Ni-Co-Cu	Маукское , Ивановское, Дергамышское, Ишкининское
		Серпентиниты, габбро, метабазаальты	Ni-Co-Cu-(Au)	Пышминско-Ключевское
Домбаровский	D _{1ems}	Метабазаальты	Cu (Zn, Co)	Коктау , Летнее, Осеннее, Весеннее, Левобережное, Бурибайское, Авангард
Уральский	O ₃ -S _{1l1}	Бимодальные риолит-базальтовые комплексы (с подч. андезитами и дацитами)	1) Cu-Zn (Au)	Сан-Донато, Тарньерское , Красногвардейское , Валенторское, Кабанское, Левихинское
			2) Cu-Zn (Au)	Комсомольское, Блявинское, Яман-Касинское
	D _{1ems}	Бимодальные риолит-базальтовые комплексы	3) Zn-Cu (Au, Ag)	Гайское , Подольское, Юбилейное, Октябрьское, Приорское, Кундызды, Лиманное
	D _{2e}	Бимодальные базальт-риолитовые комплексы (с незначит. кремнями, известняками, андезитами и дацитами)	4) Cu-Zn (Au)	Карабашское , Кузнечихинское
	D _{2e2}		5) Cu-Zn (Au, Ag)	Учалинское , Ново-Учалинское, Сибайское, Дегтярское , Сафьяновское
	D _{2e3-gv1}			Узельгинское , Талганское, Молодежное
	D _{2gv-D_{3fr1}}			Западно-Озерное, им. XIX Партсъезда
Баймакский	O ₃ -S _{1l1}	Бимодальные базальт-риолитовые комплексы с преобладающими риодацитами (с подч. андезитами и дацитами и незначит. базальтами)	1) Zn -(Cu-Pb-Ag-Au)	Галкинское
	D _{1ems}		2) Cu-Zn -(Pb-Au)	Вишневское
			3) Au -полиметал.	Майское, Бакр-Тау, Балта-Тау, Уваряжское
			4) Au-Cu -(Zn)	Таш-Тау
	D _{2e1}		5) Pb-Zn-Cu -(Au)	Джусинское
	D _{2e3}		6) Cu-Zn -(Pb-Au)	Барсучий Лог
	D _{2e2}		7) Zn -(Cu)	Таш-Яр

Примечание. * – геологический возраст вмещающих вулканогенно-осадочных горизонтов; ** – ключевые для данного исследования месторождения выделены жирным шрифтом.

Алтай (Казахстан, Россия). Месторождения этого типа обычно ассоциированы как с кислыми вулканитами известково-щелочных серий, так и с эпикластическими осадочными породами.

3. **Кипрский (пиритовый) тип** представлен часто бедными медью (без Zn, Pb) рудами в основных-ультраосновных сериях. Примеры месторождений этого типа: Кипр, Зап. Ньюфаундленд, Ю.-З. Япония, Филиппины, Карелия, Мугоджары. Месторождения обычно располагаются на контакте между двумя толщами подушечных базальтов.

Рудные тела колчеданных месторождений типов 1 и 2, особенно залегающие в кислых вулканических постройках, обычно выявляют четкую минералогическую зональность вкрест мощности рудного тела, от подошвы к кровле [Large, 1977; Зайков, 2006], выраженную в росте соотношения сфалерит(+галенит) / халькопирит+пирит(пирротин) в сплошных (массивных) рудах основных залежей. Массивные руды подстилаются штокверком или прожилковой зоной пирит-халькопиритового состава (\pm пирротин, магнетит). Cu-Zn руды часто перекрываются или фациально замещаются по простиранию тонкослоистыми кремнистыми осадками, содержащими незначительное количество пирита. Эти осадки, обычно несколько обогащенные сфалеритом, иногда называют кремнистыми туфами или туффитами. Они, в основном, являются хемогенными осадками или имеют гальмиролитическое происхождение [Масленников, 2006; Maslennikov et al., 2012]. Месторождения кипрского типа обычно азональны. Их геохимическая зональность характеризуется уменьшением вверх и(или) в стороны отношения Cu/(Cu+Zn+Pb). Месторождения 1 и 2-го типов обладают наибольшей продуктивностью на планете и обеспечивают – с доминированием уральского типа – львиную долю запасов цветных и благородных металлов на Урале (табл. 5).

Таблица 5

**Запасы руды и металлов (включая прошлую добычу)
основных колчеданоносных уровней Урала**

Колчеданоносный уровень	Запасы (доля от общих для Урала, %)					
	Руда, млн т (%)	Cu, тыс. т (%)	Zn, тыс. т (%)	Pb, тыс. т (%)	Au, т (%)	Ag, т (%)
O ₃ -S ₁	342.8 (14.6)	4 662 (14.8)	5 797 (16.4)	367 (16.3)	329.8 (13.8)	5537 (14.6)
D ₁ (в осн. D _{1ems})	884.8 (37.6)	13 870 (44.0)	8 833 (24.9)	560 (24.9)	1 081.8 (45.4)	13 266 (35.0)
D _{2e} -g _v (в осн. D _{2e})	1 126.6 (47.9)	12 986 (41.2)	20 809 (58.7)	1 322 (58.8)	973.7 (40.8)	19 121 (50.4)
Сумма	2 354.1 (100)	31 517 (100)	35 439 (100)	2 249 (100)	2 385.3 (100)	37 924 (100)

Примечание. Таблица составлена на основе [Контарь, 2013] с учетом данных по колчеданным месторождениям Западного Казахстана.

Колчеданные месторождения вулканической ассоциации были сформированы в местах разгрузки металлоносных горячих растворов, на флангах субмаринных гидротермальных систем или в их корневых частях (ниже морского дна). Большинство исследователей полагает, что источником металлов гидротермальных растворов являлись нижележащие породы, из которых выщелачивались рудные элементы. Другие, в их числе и автор [Викентьев, Еремин, 2013], указывают на преобладающий вклад магматогенных флюидов. Руды отлагались из высокотемпературного умереннокислого восстановленного рудоносного флюида в результате его охлаждения и увеличения pH и fO_2 , наступивших при его смешении с морской водой или при контакте с породами ниже дна; нередко дополнительным фактором было его вскипание в результате подъема к морскому дну. Большинство месторождений, формирующихся начиная с архея, в той или иной мере метаморфизованы [Vikentyev et al., 2016].

Литература

- Викентьев И. В., Еремин Н. И.* О природе гидротермальных растворов колчеданных месторождений // Процессы рудообразования и прикладная геохимия. Сб. трудов, посв. 100-летию чл.-корр. АН СССР Л. Н. Овчинникова. М.: ИМГРЭ, 2013. С. 186–196.
- Зайков В. В.* Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин (на примере колчеданосных зон Урала и Сибири). М.: Наука, 2006. 428 с.
- Контарь Е. С.* Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. 199 с.
- Масленников В. В.* Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 384 с.
- Серавкин И. Б.* Корреляция состава руд и рудовмещающих пород в вулканогенных колчеданных месторождениях (на примере Южного Урала) // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 3. С. 238–258.
- Barrie C. T., Hannington M. D.* Introduction: classification of VMS deposits based on host rock composition // Volcanic-associated massive sulfide deposits: processes and examples in modern and ancient settings. Review in Economic Geology. 1999. Vol. 8. P. 2–10.
- Cox D. P., Singer D. A.* (Eds.) Mineral deposit models // U.S. Geological Survey Bulletin № 1693. 1986.
- Franklin J. M., Gibson H. L., Jonasson I. R., Galley A. G.* Volcanogenic massive sulfide deposits // Economic Geology 100th Anniversary Volume. 2005. P. 523–560.
- Herrington R., Zaykov V. V., Maslennikov V. V., Brown D., Puchkov V. N.* Mineral deposits of the Urals and links to geodynamic evolution // Economic Geology 100th Anniversary Volume. 2005. P. 1069–1095.
- Hutchinson R. W.* Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance // Economic Geology. 1973. Vol. 68. P. 1223–1246.
- Large R. R.* Chemical evolution and zonation of massive sulfide deposits in volcanic terrains // Economic Geology. 1977. Vol. 72. P. 549–572.
- Maslennikov V. V., Ayupova N. R., Herrington R. J. et al.* Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals // Ore Geology Reviews. 2012. Vol. 47. P. 5–41.
- Mosier D. L., Berger V. I., Singer D. A.* Volcanogenic massive sulfide deposits of the world-database and grade and tonnage models // U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1034. 200950 p.
- Prokin V. A., Buslaev F. P.* Massive copper–zinc sulphide deposits in the Urals // Ore Geology Reviews. 1999. Vol. 14. P. 1–69.
- Shanks W. C. P., Thurston R.* Volcanogenic massive sulfide occurrence model // U.S. Geological Survey Science Investigation Report. 2010-5070-C. 2012.
- Vikentyev I. V., Belogub E. V., Novoselov K. A., Moloshag V. P.* Metamorphism of volcanogenic massive sulphide deposits in the Urals // Ore Geology Reviews. 2016. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.032.