

Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Артемьев Д.А., Целуйко А.С. Микропохимия марказит-пиритовой конкреции в иллит-гематитовых госсанитах медно-цинково-колчеданного месторождения Лаханос (Понтиды, Турция) по данным ЛА-ИСП-МС // *Минералогия*. 2017. № 3. С. 48–70.

Мелекестева И.Ю., Масленников В.В., Сафина Н.П., Артемьев Д.А. Типохимизм и микропохимия пирротин-пиритовой конкреции Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения, Южный Урал // *Минералогия*. 2018. № 4. С. 93–107.

Сафина Н.П., Масленников В.В., Артемьев Д.А., Архиреева Н.С. Микропохимия и типохимизм пиритовой конкреции из углеродистых алевропелитов Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал) // *Минералогия*. 2017. № 4. С. 22–36.

Третьяков Г.А. Минеральные ассоциации и поведение рудообразующих элементов при взаимодействии пород с морской водой в гидротермальных условиях // *Литосфера*. 2015. № 6. С. 142–147.

Целуйко А.С., Масленников В.В., Артемьев Д.А. Микропохимия конкреций пирита в кремнистых алевропелитах Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал) по данным ЛА-ИСП-МС // *Литосфера*. 2018. № 4. С. 621–641.

Целуйко А.С., Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Данюшевский Л.В. Теллуридная минерализация в обломочных рудах медноколчеданного месторождения Юбилейное (Южный Урал) // *Геология рудных месторождений*. 2019. Т. 61. № 2. С. 40–71.

Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tessalina S.G. Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia // *Minerals*. 2019. Vol. 9(3). 150.

Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R., Danyushevsky L., Herrington R.J., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Lein A.Yu., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Tessalina S.G. Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers // *Ore Geology Reviews*. 2017. Vol. 85. P. 64–106.

Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy VHMS (the Southern Urals, Russia) using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS) // *Economic Geology*. 2009. Vol. 104(8). P. 1111–1141.

Safina N.P., Melekestseva I.Yu., Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Artemyev D.A., Blinov I.A. Authigenesis at the Urals massive sulfide deposits: insight from pyrite nodules hosted in ore diagenites // *Minerals*. 2020. Vol. 10. 193.

А.М. Косарев

*Институт геологии УФИЦ РАН, г. Уфа
amkosarev@mail.ru*

Стадийная модель формирования колчеданоносных вулканических комплексов Южного Урала

Главной причиной формирования колчеданоносных комплексов Южного Урала стало поступательное движение субдукционной плиты (слэба) в верхнюю мантию, формировавшее градиентную по РТ условиям структурную зону. Колчеданные месторождения Магнитогорской палеоостроводужной системы имеют различный состав руд и вмещающих вулканических пород. Месторождения варьируют по составу и, прежде всего, по соотношениям главных рудообразующих элементов: 1 – ивановский тип, (Co-Ni)-Cu>Zn; 2 – уральский тип-I, Cu>Zn; 3 – баймакский тип, колчеданные барит-полиметаллические, Zn>Cu (при составе руд Zn+Cu+Pb+Ba); 4 – уральский тип-II,

Zn>Cu; 5 – домбаровский тип, Cu>>Zn. Каждый тип оруденения занимает особую геодинамическую позицию, а рудно-магматические системы развиваются автономно.

Обобщенная схематическая колчеданообразующая рудно-магматическая система в своей эволюции имеет стадийный характер и следующий вид:

1. Дегидратация пород субдукционной плиты в условиях сжатия и формирования субдукционного водного флюида, который мигрирует в мантийный клин. На разной глубине объем и состав субдукционных флюидов меняются, что ведет к отличиям выплавляющихся в мантийном клине магм;

2. Неравномерность РТ условий при погружении слэба в верхнюю мантию приводит к разрыву субдукционной плиты, образованию окон в слэбе разной проницаемости и внедрению в них подсубдукционных астеносферных диапиров (АД);

3. Выплавление магм надсубдукционного типа из ультрабазитов мантийного клина при участии субдукционных флюидов и различном влиянии АД;

4. Экстракция из ультрабазитов мантийного клина рудогенных элементов, которые на разной глубине имеют различную подвижность;

5. Подъем магм и флюидов мантийного диапира с образованием в краевой части последнего горнблендитов, обогащенных Cu;

6. Достижение мантийным диапиром уровня Мохо – нижняя кора, андерплейтинг надсубдукционных магм;

7. Повышение температуры в области подслаивания магм в нижней коре, наращивание ее мощности снизу;

8. Выплавление из амфиболитов базитов кислых магм с флюидными включениями в кварце кислых пород, обогащенных Cu, Zn, Pb, Ba, Sn, B, Au и Ag [Викентьев и др., 2012];

9. Миграция магм и флюидов в кору, образование габбро-диорит-плагиогранитных интрузий;

10. Формирование рециклинговой придонной гидротермально-метасоматической ячейки и отложение колчеданных рудных залежей, изотопный состав серы в сульфидных породах указывает на преобладание мантийного источника [Медноколчеданные..., 1992];

11. Формирование коры океанического типа в зонах задугового и внутридугового спрединга. Базальтовый слой в океанах постоянно наращивается, и из базальтов могут удаляться Fe, Mn, P, Ni, Zn, Cu (Zn>Cu), Co [Фролова, Бурикова, 1997].

Влияние астеносферных диапиров на процесс магмообразования в мантийном клине и интенсивность экстракции и состав рудогенных элементов изучены недостаточно. Колчеданоносные рудные районы и вулканические комплексы не обнаруживают явных признаков участия в петро- и рудогенезе вещества астеносферных диапиров, что позволяет предполагать значительную переработку их субдукционными флюидами. Астеносферные диапиры могли воздействовать на субдукционный процесс в качестве катализатора, усиливающего процесс дегидратации слэба, возрастание объема субдукционных флюидов и степени плавления мантийного субстрата и, в конечном счете, усиление экстракции рудогенных элементов из мантийных ультрабазитов. В пользу участия вещества астеносферных диапиров в формировании колчеданоносных комплексов свидетельствует химизм кислых пород этих комплексов. По соотношениям Yb и Al₂O₃ [Арт, 1983] кислые породы принадлежат океаническому типу. Не исключено, что базальты типа ОРВ и ОІВ участвуют при выплавлении кислых пород в зоне МОХО-нижняя кора.

Колчеданные месторождения ивановского типа ($\text{Cu} > \text{Zn} + \text{Co} + \text{Ni}$) залегают в толще серпентинитокластовых эдафогенных брекчий. На Ишкининском и Ивановском месторождениях [Мелекесцева, 2007] в колчеданных пирит-пирротиновых рудах установлены повышенные концентрации Co (0.01–0.14 %), Ni (0.13–0.45 %), Cu (0.36–10 %), Zn (0.02–0.15 %), Au до 4 г/т. Высокие концентрации в рудах Co и Ni связываются с повышенными содержаниями этих элементов во вмещающих руды эдафогенных брекчиях серпентинизированных ультрабазитов. Следует отметить, что повышенные концентрации Co содержатся и в рудах колчеданных месторождений домбаровского типа, на рудных полях которых ультрабазиты отсутствуют, но преобладают базальты.

Колчеданные месторождения уральского-I типа ($\text{Cu} > \text{Zn}$) располагаются в надсубдукционной зоне в пределах фронтальной и развитой островной дуги в разрезах бурибайского (D_{1e2}^1), верхнетаналыкского (D_{1e2}^2) и южноирендыкского (D_{1ef1}^{1-4}) палеовулканических комплексов. Геодинамические реконструкции показывают, что глубина залегания кровли слэба располагалась в интервале от 40 до 120 км. РТ параметры определяли условия дегидратации слэба и состав субдукционных флюидов [Авдейко и др., 2006], высокую степень плавления ультрабазитов мантийного клина и активную экстракцию рудогенных элементов в соотношении $\text{Cu} > \text{Zn}$, при повышенной подвижности Cu по сравнению с Zn .

Колчеданные месторождения баймакского типа ($\text{Zn} > \text{Cu} + \text{Pb} + \text{Ba}$) формируются в условиях более глубоко погруженного слэба. На глубине 120 км [Рингвуд, 1981; Авдейко и др., 2006] в слэбе идут процессы эклогитизации и глаукофанового высокобарического метаморфизма, ведущие к увеличению плотности пород слэба, изменению состава субдукционных флюидов, уменьшению степени плавления ультрабазитов мантийного клина, выплавлению магм шошонитовой серии с высоким содержанием K и других элементов КИР, U и Th в условиях СП 7–20 %. В петрогенезе магм шошонитовой серии могли участвовать гранатовые пироксениты и эклогиты [Барсуков, Дмитриев, 1976; Рингвуд, 1981], часть которых была обогащена Zn [Косарев и др., 2014]. В результате формируются средние по запасам рудные месторождения с $\text{Zn} > \text{Cu} + \text{Pb} + \text{Ba}$ колчеданного барит-полиметаллического типа (Восточно-Подольское, Джусинское, Барсучий Лог). Глубина погружения кровли слэба составляла [Рингвуд, 1981; Авдейко и др., 2006] 120–150 км при образовании надлома субдукционной плиты вблизи границы (развитая ОД) – (тыловая ОД) и возрастании угла наклона погружающейся субдукционной плиты.

Колчеданные месторождения уральского типа-II ($\text{Zn} > \text{Cu}$) распространены во внутридуговой спредингово-рифтовой и надсубдукционной карамалыташко-шуулдакской зоне верхнего эйфеля (D_{2ef2}). Начальный этап формирования этой зоны проявился в расщеплении Ирендыкско-Джусинской развитой и тыловой островной дуги и разрыве слэба, сопровождавшемся внедрением в окно слэба астеносферного диапира, продуцировавшего океанические породы гавайитовой серии, сохранившиеся в большекумакском, шуулдакском, юлдашевском, савельевско-калиновском, кульбердинском и других комплексах. После закрытия окна слэба возобновляется субдукция. Состав флюидов, формирующихся при дегидратации субдукционной плиты и прилегающих ультрабазитов, где дегидратируются серпентин, клинохлор, тальк и форстерит [Авдейко и др., 2006], иной, чем в предшествующей стадии под фронтальной островной дугой. Совокупность условий, включающих формирование океанической коры в зоне спрединга, создает возможность для более подвижного поведения Zn , по сравнению с Cu и формирования флюидов, а затем и руд с рудогенными элементами $\text{Zn} > \text{Cu}$.

К положительным факторам, способствовавшим образованию таких руд относятся также присутствие в мантийном клине магм океанического типа астеносферного диапира, выплавление в надсубдукционной зоне островодужных магм толеитовой серии, имеющей положительную геохимическую специализацию на Zn [Маракушев, 1979; Шарапов и др., 2000]. В колчеданосных вулканических комплексах Карамалыташской спрединговой зоны, как правило, присутствуют большие объемы кислых пород полифациального состава, которые визуальнo обнаруживают корреляционные связи с рудогенными элементами (Zn, Cu, Pb, Ba, Au, Ag), что установлено при изучении флюидных включений в кварце кислых пород Верхнеуральского рудного района [Викентьев и др., 2012]. Обогащение рудно-магматической системы Zn может произойти также в процессе выплавления кислых магм из амфиболизированных базитов нижней коры и последующем переносе этого металла высокотемпературными флюидами [Рябчиков, 1970] к поверхности.

Колчеданные месторождения домбаровского типа (Cu>>Zn) формировались в зоне задугового спрединга синхронно с месторождениями Cu>Zn фронтальной островной дуги (D_{1e2}). Такой состав оруденения определялся составом и небольшим объемом субдукционных флюидов, способствовавших значительно более подвижному поведению Cu по сравнению с Zn.

Таким образом, формирование колчеданосных комплексов Магнитогорской мегазоны характеризовалось стадийным характером и большим диапазоном РТ условий, обусловленных погружением слэба, меняющимся объемом и составом субдукционных флюидов, участием в петрогенезе вещества астеносферных диапиров и значительным колебанием степени плавления мантийного субстрата мантийного клина при выплавлении островодужных базальтов, влиявшем на состав и объемы экстрагированного рудного вещества.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГ УФИЦ РАН (№ 0246-2019-0078) и программы РАН-№ 8.

Литература

Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А. Геодинамические условия вулканизма и магнообразования Курило-Камчатской островодужной системы // *Петрология*. 2006. Т. 14. № 3. С. 248–265.

Арт Дж. Г. Некоторые элементы-примеси в трондьемитах – их значение для выяснения генезиса магмы и палеотектонических условий // *Трондьемиты, дациты и связанные с ними породы*. М.: Мир, 1983. С. 99–105.

Барсуков В.Л., Дмитриев Л.В. О мантийном источнике рудного вещества и его роли в формировании и размещении некоторых месторождений полезных ископаемых // *Источники рудного вещества эндогенных месторождений*. М.: Наука, 1976. С. 12–30.

Викентьев И.В., Борисова А.Ю., Карпухина В.С., Наумов В.Б., Рябчиков И.Д. Прямые данные о рудоносности кислых магм Узельгинского рудного поля (Южный Урал, Россия) // *Доклады академии наук*. 2012. Т. 443. № 3. С. 347–351.

Косарев А.М., Серавкин И.Б., Холоднов В.В. Геодинамические и петролого-геохимические аспекты зональности Магнитогорской колчеданосной мегазоны на Южном Урале // *Литосфера*. 2014. № 2. С. 3–25.

Маракушев А.А. Петрогенезис и рудообразование. М.: Наука, 1979. 261 с.

Медноколчеданные месторождения Урала: Условия формирования / В.А. Прокин, И.Б. Серавкин, Ф.П. Буслаев и др. Екатеринбург: УрО РАН, 1992. 307 с.

Мелекесцева И.Ю. Гетерогенные кобальт-медноколчеданные месторождения в ультрамафитах палеостроводужных структур. М.: Наука, 2007. 245 с.

Рингвуд А.Е. Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981. 584 с.

Рябчиков И.Д. Содержание цинка в хлоридных растворах, равновесных с минералами гранитоидов в условиях повышенных температур и давлений // Доклады АН СССР. 1970. Т. 194. № 6. С. 1418–1420.

Фролова Т.И., Бурикова И.А. Магматические формации современных геотектонических обстановок. М.: МГУ, 1997. 320 с.

Шарапов В.Н., Акимцев В.А., Доровский В.Н., Перепечко Ю.В., Черепанов А.Н. Динамика развития рудно-магматических систем зон спрединга. Новосибирск: НИЦ ОИГТМ, 2000. 405 с.

В.А. Симонов^{1, 2, 3}, А.В. Котляров^{1, 3}

¹ – *Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск
kotlyarov@igm.nsc.ru, simonov@igm.nsc.ru*

² – *Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет, г. Новосибирск*

³ – *Казанский федеральный университет, г. Казань*

Физико-химические параметры кристаллизации минералов из магматических комплексов, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Сибири

Хорошо известна тесная связь колчеданных месторождений Урала и Сибири с базальт-риолитовыми толщами, при этом обращают на себя внимание контрастные составы пород, входящих в эти комплексы. Данные особенности вмещающих сульфидные руды магматических ассоциаций могут быть следствием целого ряда процессов, крайними вариантами которых можно предположить либо совершенно случайное совмещение базальтоидных и гранитоидных магм, либо развитие этих контрастных расплавов из единого глубинного источника. Большую помощь в решении проблем магмогенеза могут оказать исследования расплавных включений, несущих прямую информацию о магматических системах, из которых кристаллизовались минералы вмещающих колчеданные месторождения Сибири и Урала базальтовых толщ. В частности, нами были изучены расплавные включения в клинопироксене из базальтов месторождений Кызыл-Таштыг в Южной Сибири [Симонов, Котляров, 2019] и Валенторского на Северном Урале [Симонов и др., 2009; Симонов, Масленников, 2018]. Дальнейшие исследования магматических процессов при формировании этих месторождений проводились с широким использованием расчетного моделирования на основе данных по расплавным включениям.

Необходимо отметить, что колчеданное месторождение Кызыл-Таштыг (Восточная Тува) располагается среди нижнекембрийских вулканогенных пород, представленных преимущественно базальтовыми лавами и реже базальтовыми и андезитовыми брекчиями. Большую роль играет комплекс, сложенный дацитовыми порфиритами, перемежающимися с базальтовыми и андезибазальтовыми порфиритами, туфами и сланцами [Зайков, 2006].

Рудные тела Валенторского месторождения (Северный Урал) находятся в тесной ассоциации с силурийским риолит-базальтовым комплексом. В разрезе месторождения