

УДК 553.44

А.Л. Дергачёв¹, Н.И. Ерёмин², Н.Е. Сергеева³

РАЗНОМАСШТАБНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ЭВОЛЮЦИИ СОСТАВА РУД ВУЛКАНОГЕННЫХ КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В изменении содержания и соотношения некоторых главных и второстепенных элементов в составе руд вулканогенных колчеданных месторождений выявлены особенности масштаба их проявления в геологическом времени и пространстве. Одна из них выражена в эволюции геохимических отличий руд месторождений в относительно непродолжительные периоды активного колчеданообразования в некоторых рудных провинциях и обусловлена сменой этапов их тектонического развития и соответствующими изменениями состава магм в пределах провинций. Другая особенность — глобальная, она выражена в вековых изменениях геохимических особенностей руд месторождений, формировавшихся в разные эпохи колчеданообразования на протяжении последних 3,5 млрд лет, вероятно, в результате дифференциации вещества Земли, постепенного снижения температуры в верхней мантии и связанного с этим развития тектонических режимов и механизмов магмообразования.

Ключевые слова: цветные металлы, вулканогенные колчеданные месторождения, эволюция процессов рудообразования.

Changes in average grades and ratios of major and minor elements of volcanogenic massive sulfide ores reveal two tendencies differing in scale of their manifestation in geological time and space. One of them is expressed by evolution of geochemical features of deposits formed in relatively short periods of ore formation in some separately taken ore provinces. It results from evolution of tectonic regime and corresponding changes in composition of magmas. Tendency of another kind is manifested globally and expressed by secular changes in ore chemistry of deposits formed in the last 3.5 Ga during various epochs of massive sulfide ore formation. Its plausible reason is density differentiation of the matter of the Earth, gradual decrease of temperature in the upper mantle, and concerned evolution of tectonic regimes and processes of magma generation.

Key words: non-ferrous metals, volcanic-associated massive sulfide deposits, evolution of ore-formation processes.

Введение. Колчеданные месторождения вулканической ассоциации составляют один из важнейших геолого-промышленных типов месторождений меди, свинца, цинка, а также в переменных количествах содержат Au, Ag, Ba, Cd, Se, Te, Bi и другие элементы, извлекаемые попутно. Состав руд — одна из наиболее изменчивых характеристик месторождений этой группы. Факторы, определяющие содержание главных и второстепенных компонентов в рудах месторождений и их соотношение, многообразны, а направленность их изменений далеко не очевидна.

Для рассмотрения этих факторов была использована оригинальная база данных по колчеданным месторождениям мира, включающая сведения о 1240 колчеданных месторождениях, которые известны на всех континентах (кроме Антарктиды), в нескольких десятках рудных провинций. Месторождения имеют возраст от палеоархейского до плиоценового и предварительно на основе комплекса признаков отнесены к одному из четырех мировых типов колчеданных месторождений [Ерёмин и др., 2000].

Кроме того, информация о месторождениях включала сведения о запасах руд, содержании металлов и возрасте месторождений. Эти данные использованы для построения диаграмм, демонстрирующих изменение во времени геохимических характеристик руд месторождений важнейших типов. При усреднении этих характеристик для крупных рудных районов или провинций, важных этапов их развития, продолжительных периодов геологического времени были выявлены две важные тенденции.

Эволюция состава руд колчеданных месторождений уральского типа в отдельных колчеданоносных провинциях. Одна из тенденций проявляется в отдельно взятых колчеданоносных провинциях или крупных рудных районах, и ее влияние ограничено их пределами. Ее можно установить при сравнении колчеданных месторождений, которые отвечают разным возрастным уровням и формировались в различных геодинамических обстановках. Состав их руд эволюционировал вместе с составом рудовмещающих вулканогенных комплексов. Во многих провинциях, где

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, докт. геол.-минер. н., профессор; *e-mail:* alderg@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, докт. геол.-минер. н., профессор, чл.-корр. РАН; *e-mail:* eremin@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, канд. геол.-минер. н., ст. науч. с.; *e-mail:* nat45326@yandex.ru

распространены колчеданные месторождения уральского типа, эта тенденция выражена в постепенном обогащении колчеданных руд Zn относительно Cu, Pb — относительно Zn и Ag — относительно Au (т.е. в увеличении отношений Zn/Cu, Pb/Zn и Ag/Au) от более древних к более молодым месторождениям по мере эволюции вулканизма.

Этой закономерности подчиняются месторождения разного возраста — от неогархейского до палеопротерозойского и фанерозойского. Эволюционные изменения состава руд в разных районах не синхронизированы, что указывает на их локальную причину, а время, за которое они протекают, в разных провинциях (рудных районах) изменяется от 1 до 10–15 млн лет. Независимо от того, имело ли место при образовании колчеданных месторождений взаимодействие металлов из вмещающих пород (рециклинг), или же они привносились из магматического очага, либо реализовывались обе эти возможности, изменения геохимических особенностей руд, очевидно, обусловлены эволюцией состава вулканогенных формаций.

Так, в палеопротерозойском поясе Флин-Флон (Канада) ряд вулканогенных колчеданных месторождений приурочен к мощной (2–8 км) толще островодужных толеитовых базальтов, низкотитанистых базальтов, бонинитов и ассоциирующих с ними субвулканических силлов [Galley et al., 2007]. В разрезе этой толщи, соответствующей протодуге, почти отсутствуют пирокластические породы и кислые вулканиды. Относительно немногочисленные колчеданные месторождения (Корнейшн, Берч, Флексар, Конуго) залегают на контактах потоков массивных и подушечных лав и характеризуются существенно медным составом руд (отношение Zn/Cu не превышает 0,35), низким содержанием серебра (в среднем 7 г/т) и небольшими значениями Ag/Au (3,6).

Большинство колчеданных месторождений пояса Флин-Флон залегают в бимодальных вулканогенных толщах с преобладанием толеитовых базальтов, лав и туфов андезитобазальтов при подчиненной роли риолитовых потоков и экструзивных куполов, а также тонкослоистых турбидитов. Последние наряду с обилием пирокластических пород, наличием изолированных центров кислого вулканизма и прерывистыми поясами даек, пространственно связанных с центрами гидротермальной деятельности на морском дне, служат признаками образования месторождений в обстановках грабенов растяжения или кальдер.

Месторождения этой группы (Флин-Флон, Трипл-Севен, Калинан, Шист, Манди, Вест-Арм, Купрус и Уайт-Лейк в районе Флин-Флон, а также Линда, Стал, Андерсон, Спрус-Пойнт, Дикстоун, Род и Пот в районе Сноу-Лейк) формировались в обстановках расщепленных островных дуг. Их характеризует обогащение руд цинком относительно меди (отношение Zn/Cu составляет в среднем 1,58), повышенное среднее содержание серебра (в среднем

34 г/т), высокое отношение Ag/Au (13,9), а в исключительных случаях, кроме того, заметное содержание Pb (0,2–0,5%), а также повышенная величина Pb/Zn (0,030 в суммарных запасах перечисленных выше месторождений).

В районе Сноу-Лейк вулканиды юной островной дуги (подушечные и массивные лавы базальтов и андезитобазальтов с подчиненными бонинитами, риолитовыми лавами и гиалокластитам) перекрыты вулканогенными образованиями, в разрезе которых кислые и основные вулканогенные породы пользуются уже равным распространением, причем основные различия характеризуются более высокой степенью дифференциации. Колчеданные месторождения Чисел, Чисел-Норт, Бомбер, Фото-Лейк, Хост, Лост, Морган-Лейк пространственно связаны с кислыми вулканогенными комплексами, ниже которых по разрезу залегают дифференцированные толеитовые и переходные между толеитовыми и известково-щелочными базальт-андезит-дацитовые ассоциации, отвечающие, как считается, зрелой островной дуге. В близких условиях локализованы и месторождения Вестерн-Ньюклеар, Макильвенна-Бей в блоке Хэнсон пояса Флин-Флон. Руды перечисленных месторождений обогащены Pb (в среднем 0,5%), характеризуются наивысшими для пояса Флин-Флон значениями отношений Pb/Zn (0,093), Zn/Cu (6,4) и Ag/Au (33,7).

Таким образом, по мере перехода от стадии примитивной энсиматической островной дуги к стадиям расщепленной, а затем зрелой островной дуги в разрезе формации океанические толеитовые базальты, андезитобазальты, бониниты с возрастом около 1903–1886 млн лет сменялись известково-щелочными и щелочными породами (шошонитами) с возрастом 1888–1881 млн лет и увеличением доли кислых вулканидов в разрезе формации [Galley et al., 2007; Corrigan et al., 2007; Syme et al., 1999]. При этом в рудах месторождений, расположенных на трех рудостных уровнях и отвечающих трем стадиям развития островной дуги, среднее содержание Cu закономерно снижается с 4,3 до 0,8%, Zn — возрастает с 0,9 до 5,3%, а содержание Pb практически с нулевого уровня увеличивается до 0,5%. От более древних к более молодым месторождениям происходит постепенное обогащение колчеданных руд Zn относительно Cu, Pb относительно Zn и Ag относительно Au (рис. 1).

Аналогичные соотношения устанавливаются в неогархейских и палеозойских колчеданоносных провинциях. Так, в рудном районе Норанда (зеленокаменный пояс Абитибби, Канада) на фоне нормальной гомодромной эволюции вулканизма снизу вверх по разрезу происходит закономерное повышение роли Zn в составе руд и снижение отношения Cu/Zn [Авдонин, 1998]. На Южном Урале постепенное изменение отношения среднего содержания металлов в рудах месторождений, причем и раннедевонско-эйфельского, и среднедевонского возрастных уровней, сопровождается сменой в разрезе в наиболее общем случае

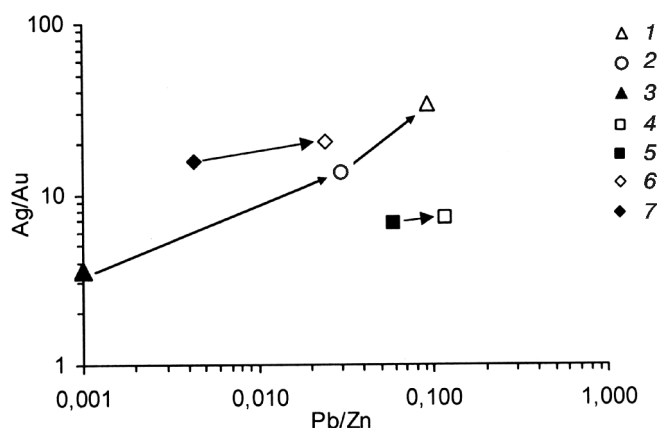


Рис. 1. Эволюция состава руд месторождений в энзиматических обстановках (месторождения уральского типа и их докембрийские аналоги): 1–3 — месторождения пояса Флин-Флон–Сноу-Лейк, формировавшиеся в обстановках примитивной (1), расщепленной (2) и зрелой островной дуги (3); 4–7 — месторождения Магнитогорской зоны Урала: 4–5 — месторождения раннедевонско-эйфельского рудоносного уровня: 4 — в последовательно дифференцированном комплексе (баймак-бурибаевская свита, верхняя часть), 5 — в контрастном комплексе (баймак-бурибаевская свита, нижняя часть); 6–7 — месторождения среднедевонского рудоносного уровня: 6 — в последовательно дифференцированном комплексе (улугтауская свита), 7 — в контрастном комплексе (карамалыташская свита)

базальтового комплекса базальт-риолитовым, затем базальт-андезит-риолитовым и наконец базальт-андезитбазальт-андезит-риодацитовым комплексом [Серавкин, 2010]. Состав руд месторождений каждого рудоносного уровня усложнялся по мере повышения степени дифференцированности рудоносных комплексов — увеличивалось содержание свинца, бария, благородных металлов (особенно Ag) и редких элементов, возрастали значения отношений Ag/Au (в 2–2,5 раза) и Pb/Zn (в 2–6 раз).

Вековые изменения состава руд колчеданных месторождений разных типов. Вторая тенденция проявляется в эволюции состава руд колчеданных месторождений на протяжении всей истории колчеданообразования, т.е. в течение последних почти 3,5 млрд лет геологической истории Земли. По масштабам проявления эта тенденция сильно отличается от рассмотренной выше, так как ей, видимо, подчиняются месторождения не только любого возраста, разных рудных провинций, но и разных мировых типов. Это служит признаком существования единой, глобально проявленной причины такой эволюции.

Из-за различий в составе руд между разными типами колчеданных месторождений [Ерёмин и др., 2000; Дергачёв и др., 2009] для выявления этой тенденции требуется рассмотреть их отдельно. Кроме того, с учетом существенно более позднего появления древнейших месторождений типов бесси и кипрского (в палеопротерозое, около 1,8 млрд л.н. [Дергачёв и др., 2010, 2011]) в наиболее полном виде эта тенденция проявлена и изучена авторами на месторождениях типов куроко и уральского и их раннедокембрийских аналогах.

Вулканогенное колчеданообразование, сопровождающее процессы субмаринного вулканизма, — один из древнейших процессов рудообразования. Известны колчеданные месторождения с возрастом 3,46 млрд лет и современные сульфидные скопления, формирующиеся на дне Мирового океана. Однако развитие процессов колчеданообразования, как и вулканических процессов, в течение 3,5 млрд лет было неравномерным. В истории колчеданообразования выделены три важнейшие эпохи, отвечающие трем крупным циклам тектонического развития планеты: 2950–2200, 2200–1350 и 900–200 млн лет. Последние 200 млн лет геологической истории Земли отвечают четвертой, незавершенной эпохе колчеданообразования.

В каждой из этих эпох выделяются относительно непродолжительные периоды времени, когда интенсивность рудообразования этого типа достигала максимума и возникали многочисленные колчеданосные провинции, формировались многие десятки и сотни месторождений и основная масса запасов колчеданных руд и металлов. Такие пики колчеданообразования выявлены для интервалов 2720–2690, 1890–1850 и 416–330 млн лет (значительно более слабо выраженный пик в кембрии–раннем ордовике, до 470 млн лет) [Ерёмин и др., 2002].

В дальнейшем речь пойдет о средних для каждой из эпох колчеданообразования значениях геохимических характеристик месторождений. В исключительных случаях в силу разных причин (например, малочисленности мезо- и неогархейских месторождений — аналогов типа куроко, незавершенности эпохи колчеданообразования, начавшейся 200 млн л.н. и т.д.) при построении геохимических диаграмм усреднялись данные за более продолжительные периоды времени (в приведенных примерах для архея в целом и неопротерозоя–фанерозоя соответственно). В некоторых случаях для большей иллюстративности усреднялись также данные о месторождениях с возрастом древнее 2950 млн лет, хотя относительная малочисленность таких месторождений не дает оснований для выделения каких-либо особых эпох колчеданообразования.

Тенденция, о которой пойдет речь, выражена изменением во времени — от ранних к более поздним эпохам колчеданообразования — соотношений между главными (Cu, Zn, Pb) и некоторыми второстепенными (Ag) компонентами в составе колчеданных руд. Эти соотношения — важнейшие геохимические характеристики колчеданных руд и, как правило, учитываются при типизации колчеданных месторождений.

В рудах месторождений обоих типов и их раннедокембрийских аналогов эта тенденция проявляется в обогащении Cu относительно Zn, Pb относительно Ag (снижением значений отношений Zn/Cu и Ag/Pb соответственно), а для месторождений типа куроко и их древнейших аналогов — еще и в обогащении Pb

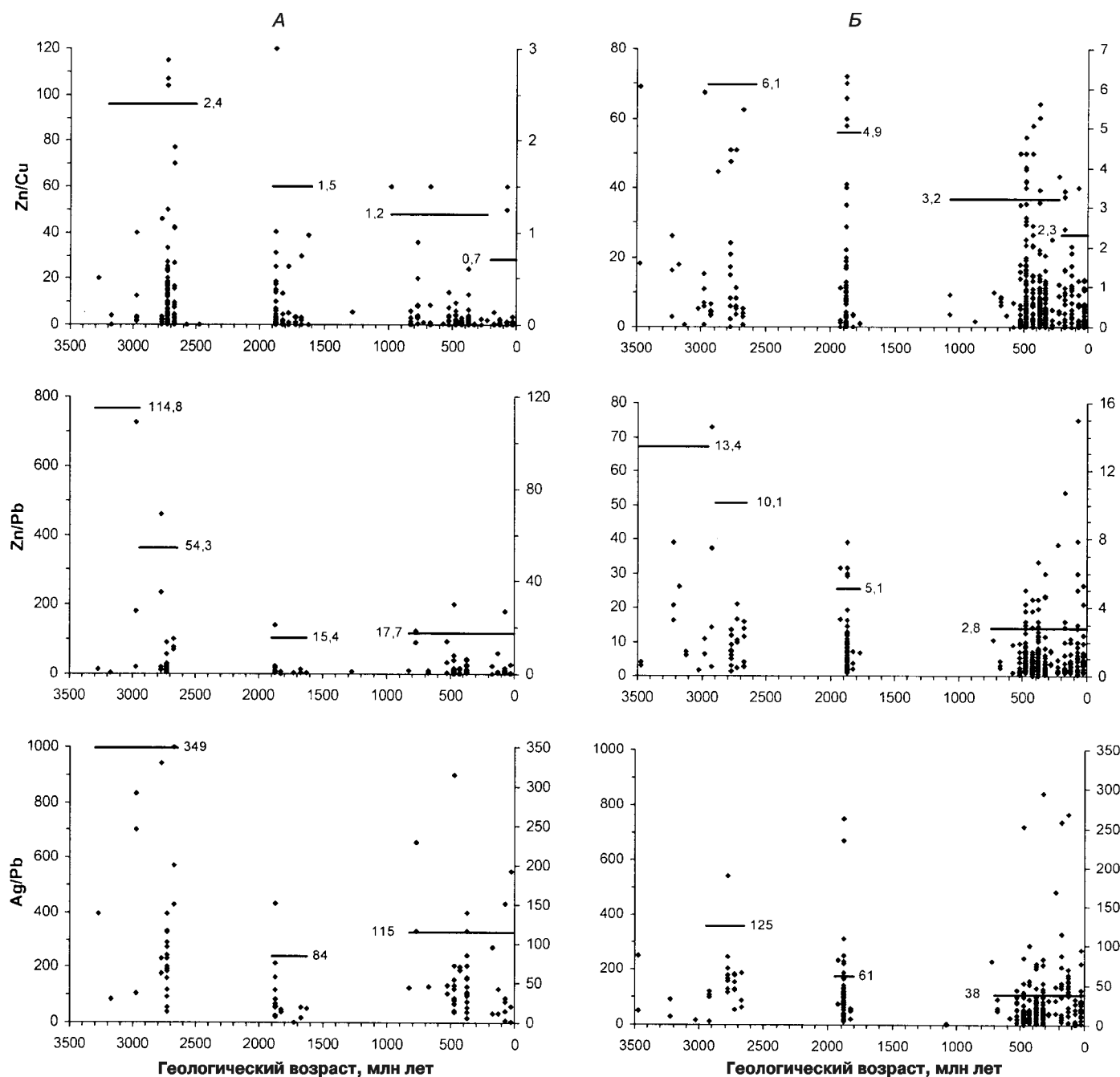


Рис. 2. Изменение соотношения главных и второстепенных элементов в составе руд колчеданных месторождений разных эпох колчеданообразования: А — месторождения уральского типа и их раннедокембрийские аналоги; Б — месторождения типа куроко и их раннедокембрийские аналоги

относительно Zn (снижаются значения отношения Zn/Pb) (рис. 2). Анализ показывает, что для месторождений обоих типов причиной таких изменений стало вековое снижение средних для разных эпох колчеданообразования значений содержания Ag и особенно Zn, а также повышение содержания Pb в рудах месторождений типа куроко и их докембрийских аналогов.

Месторождения уральского типа и их раннедокембрийские аналоги. Составленная база данных содержит сведения о 473 месторождениях этой группы. Единственный известный в настоящее время палео-

архейский аналог месторождений уральского типа, видимо, — месторождение Бьен-Веню (3259 млн лет) в зеленокаменном поясе Барбертон (Каапваальский кратон, ЮАР). Среднее содержание Cu и Zn в его рудах составляет 0,2 и 4% соответственно ($Zn/Cu = 20$).

Более многочисленная группа месторождений мезоархейского возраста (3200–2950 млн лет) в зеленокаменном поясе Мурчисон (Каапваальский кратон) и на северной окраине Северо-Китайского кратона среди всех групп месторождений, выделенных по возрасту формирования, отличается наиболее широким

диапазоном содержания Zn, которое нередко превышает 25%, а в среднем составляет 3,69% (рис. 3).

В мезо-неоархейскую эпоху колчеданообразования (после 2950 млн лет), одну из главнейших в истории Земли, многочисленные месторождения — аналоги уральского типа — сформировались главным образом в зеленокаменных поясах кратонов Слейв (зеленокаменные пояса Кариджис-Лейк, Напактулик-Лейк, Хай-Лейк), Сьюпериор (Абитиб, Вава, Учи) и Херн (Ранкин-Эннадаи) в Канаде. Эта группа месторождений относительно предыдущей характеризуется несколько более узким диапазоном содержания Zn (не превышает 18%) и пониженным средним содержанием этого металла в рудах (3,40%).

Если медноколчеданные месторождения формировались во все эпохи колчеданообразования, то возникновение цинковоколчеданных месторождений представляло большую редкость, их наличие — неповторимая особенность группы архейских месторождений. Около 10 таких месторождений известно, например, в зеленокаменном поясе Абитиб (в том числе Галлен, Фребер, Ньюконекс и др.). В их рудах при очень высоком содержании Zn практически отсутствует промышленное содержание Cu, а значение отношения Zn/Cu достигает 115. В среднем в запасах руд месторождений мезо- и неоархея это отношение составляет 2,4, наивысшее среди всех основных эпох колчеданообразования.

Известно, что одна из важнейших геохимических особенностей неопротерозойско-фанерозойских месторождений уральского типа, отличающих их от месторождений типа куроко, — пониженное содержание Ag в рудах последних [Ерёмин и др., 2000]. Однако обращает на себя внимание чрезвычайно высокое содержание этого металла в архейских месторождениях — аналогах уральского типа. В отдельных случаях оно достигает 275 г/т, а в среднем составляет 46 г/т, т.е. достигает уровня в фанерозойских месторождениях типа куроко.

Значительно более существенные и резкие изменения усредненных геохимических особенностей руд колчеданных месторождений имели место в палеопротерозойскую эпоху колчеданообразования, когда сформировались многочисленные месторождения Трансгудзонского пояса, а также более редкие месторождения Свекофеннского пояса, района Джером в Аризоне и пояса Куан-Дянь в провинции Верхняя Янцзы. Среднее содержание Zn на 98 месторождениях с возрастом 1900–1640 млн лет составляет 2,25% при более низком (12%) верхнем пределе диапазона его изменения. На границе между археем и палеопротерозоем, по-видимому, произошли важные геологические события, которые при отсутствии значительного изменения содержания Cu по сравнению с архейскими месторождениями повлекли снижение отношения Zn/Cu до 1,5, а также более чем двукратное (до 20 г/т) уменьшение среднего содержания Ag в запасах руд палеопротерозойского возраста.

Дальнейшее снижение отношения Zn/Cu отмечается в неопротерозойско-среднемезозойскую эпоху, которая ознаменовалась формированием 215 месторождений Урала, Аппалачей, Норвежских Каледонид, Кавказа, Кордильер, Филиппин, Тасмании, Салаира и других провинций с возрастом от 1000 до 200 млн лет. Свойственное им среднее содержание Zn в суммарных запасах снизилось до 1,71%, произошло дальнейшее обогащение руд Cu относительно Zn (отношение Zn/Cu в суммарных запасах снизилось до 1,2). Хотя в эту эпоху колчеданообразования тенденция к снижению среднего содержания Ag для месторождений уральского типа и их докембрийских аналогов сохранялась, после рубежа 1000 млн л.н. оно уже не было таким радикальным, как на границе архея и протерозоя.

Лишь для группы месторождений с возрастом менее 200 млн лет среднее содержание Cu превосходит содержание Zn ($Zn/Cu = 0,7$). Главным фактором при этом стало, как и в предыдущих случаях, дальнейшее понижение среднего содержания Zn (до 0,94%) в запасах руды месторождений, возраст которых варьирует от позднемеозойского до плиоценового (месторождения Северных и Южных Кордильер, Филиппинской дуги, Кавказа, дуги Банда, Фиджи и других районов). Действительно, различия между разновозрастными группами месторождений по среднему содержанию Cu в запасах (от 1,39 до 1,52%) в течение последних 3,28 млрд лет оставались практически на уровне статистической погрешности. За то же время среднее содержание Zn снизилось в 4 раза, а Ag — в 3 раза. В этот же период имело место и относительное изменение содержания Pb, однако оно было разнонаправленным, а выраженное в абсолютных величинах содержания — крайне незначительным (от 0,03% в месторождениях древнее 2950 млн лет до 0,15% для месторождений с возрастом 1900–1625 млн лет и моложе 200 млн лет, т.е. 0,12% за 3,28 млрд лет). Кроме того, причина этих различий между эпохами колчеданообразования, возможно, кроется в неполноте данных, так как при очень низком, непромышленном уровне содержания Pb в рудах его не всегда указывают при характеристике месторождений.

Месторождения типа куроко и их раннедокембрийские аналоги. В этой группе, включающей 510 месторождений, древнейшими являются палеоархейские месторождения — аналоги типа куроко, которые встречаются в блоке Пилбара (Австралия). Они характеризуются наивысшим содержанием Zn (в некоторых из них содержание металла достигает почти 14%, а в среднем составляет 7,36%). Хотя руды всех этих месторождений содержат переменное количество Cu, однако в подавляющем большинстве из них содержание этого металла в 15–70 раз меньше, чем Zn.

Для этих месторождений, как и для месторождений уральского типа, установлена тенденция к снижению среднего содержания Zn от одной эпохи колчеданообразования к другой. В мезо- и неоархей-

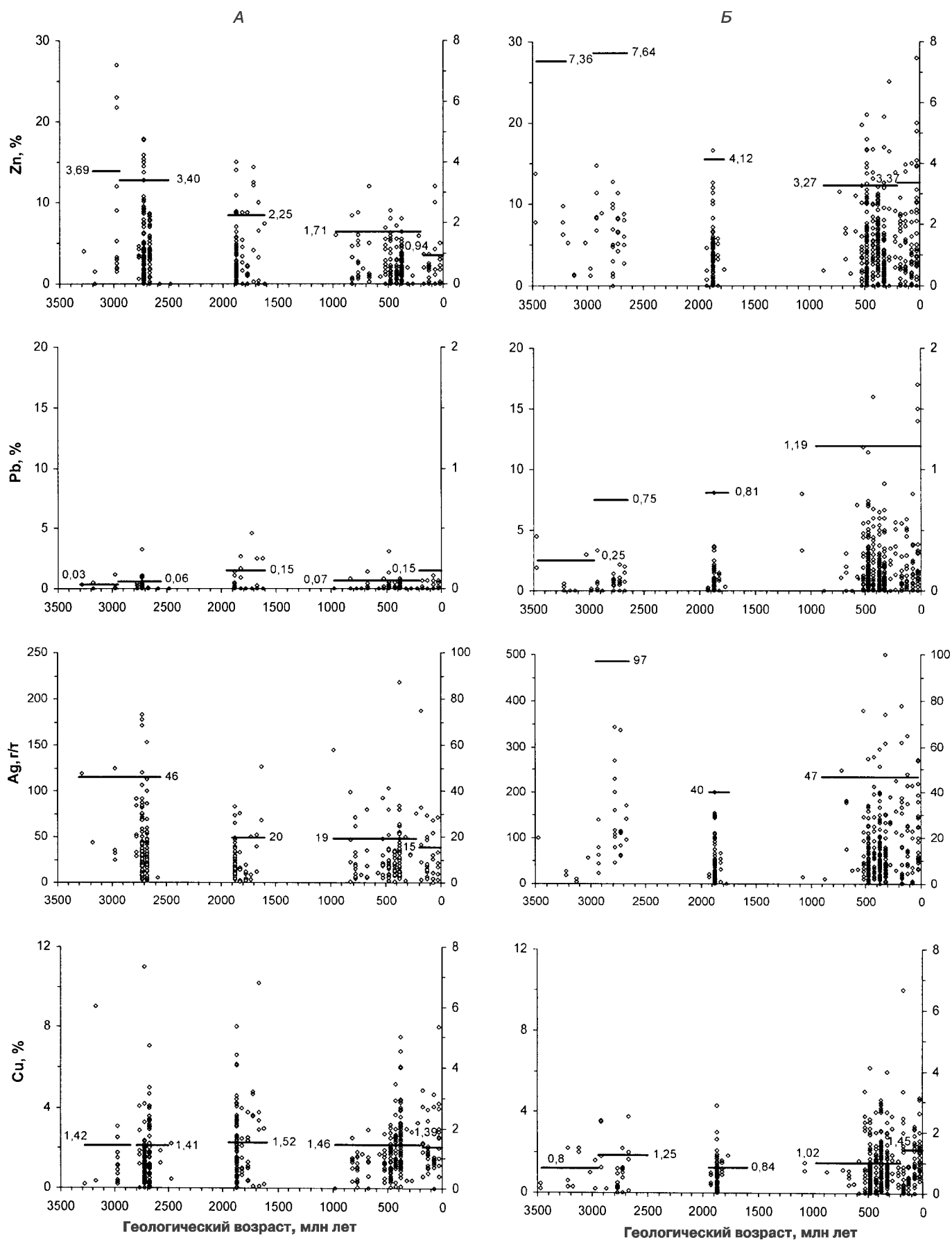


Рис. 3. Изменение среднего значения содержания цветных и благородных металлов в колчеданных рудах в истории колчеданообразования: *A* — месторождения уральского типа и их раннекембрийские аналоги; *B* — месторождения типа куроки и их раннекембрийские аналоги

ское время довольно многочисленные месторождения — аналоги типа куроко — формировались сначала в блоках Пилбара и Йилгарн (Западно-Австралийский кратон), а после 2800 млн лет — в зеленокаменных поясах кратонов Сьюпериор (Вабигун), Слейв (Хакетт-Ривер, Индиан-Маунтин, Олга и др.). Среднее содержание Zn в запасах, подсчитанное для месторождений этого возраста, остается практически на том же высоком уровне (7,64%), кроме того, они характеризуются самым большим значением Zn/Cu в суммарных запасах руды (6,1).

Уже для древнейших аналогов месторождений типа куроко характерно повышенное содержание Pb в рудах, которое отличает их от колчеданных месторождений всех других типов (уральский, кипрский, бесси). На месторождениях с возрастом древнее 2950 млн лет, а также в мезо- и неогархе (2950–2690 млн лет) среднее содержание этого металла составляло 0,25 и 0,75% соответственно. Таким образом, уже в мезо-неогархейскую эпоху колчеданообразования проявилась тенденция к росту среднего содержания Pb в рудах месторождений типа куроко и их раннедокембрийских аналогов.

Радикальные изменения, видимо, произошли на границе архея и протерозоя. В палеопротерозойскую эпоху колчеданообразования сформировались месторождения Свекофеннского пояса (рудные провинции Шеллефте, Бергслеген, пояса Виханти–Пюхясалми и Эйяля–Ориярви) и сравнительно немногочисленные месторождения в Трансгудзонском поясе. В эту эпоху среднее содержание Zn снизилось в 1,9 раза (до 4,12%) по сравнению с предыдущей, отношение Zn/Cu уменьшилось до 4,9. К этому же времени относится уменьшение почти в 2,5 раза среднего содержания Ag (с 97 до 40 г/т), которое в последующем (в неопротерозойское и фанерозойское время) подверглось лишь несущественной корректировке. В палеопротерозойскую эпоху колчеданообразования сохранялась тенденция к росту среднего содержания Pb, которое в палеопротерозое достигло 0,81%, а в неопротерозое–фанерозое возросло еще в 1,5 раза (до 1,19%).

В последние 1000 млн лет истории колчеданообразования темп снижения среднего содержания Zn в рудах замедлился. Неопротерозойско-среднемезозойская эпоха колчеданообразования отличалась необыкновенно широким проявлением рудообразования типа куроко, когда свыше 300 месторождений возникло в пределах Нубийско-Аравийского щита, Иберийского колчеданного пояса, Рудного Алтая, Аппалачей, Северных Кордильер, Тасманского и Вариссийского поясов, Антиатласа, Скандинавских Каледонид и ряда других провинций. Среднее содержание Zn в запасах месторождений, возникших в эту эпоху, снизилось по сравнению с предыдущей в 1,3 раза, а в последние 200 млн лет в ходе продолжающейся ныне эпохи колчедано-

образования оно практически не изменилось (месторождения в Северных и Южных Кордильерах, поясе Тетис, Японской дуге и других районах). По этой причине дальнейшее снижение среднего отношения Zn/Cu в последние 200 млн лет было обусловлено, скорее, не уменьшением содержания Zn в рудах, как в более ранние эпохи колчеданообразования, а некоторым возрастанием среднего содержания Cu, которое в целом в истории колчеданообразования типа куроко изменялось незначительно и разнонаправленно. В совокупности эти причины обусловили в неопротерозое–фанерозое дальнейшее обеднение руд месторождений типа куроко Zn относительно Pb и Cu (отношение Zn/Pb понизилось в 1,8 раза (до 2,8), Zn/Cu — сначала до 3,2, а в последние 200 млн лет — до 2,3), а также Ag относительно Pb (отношение Ag/Pb уменьшилось в 1,6 раза, до 3,8).

Вековые изменения состава руд колчеданных месторождений в контексте эволюции Земли. Следует отметить, что при усреднении геохимических параметров месторождений неопротерозоя–фанерозоя проанализированы данные о многочисленных и далеко отстоящих рудных провинциях, среди которых не было одной резко доминирующей по численности месторождений и запасам руды и металлов. Это позволило свести к минимуму влияние существующих между разновозрастными провинциями латеральных геохимических различий, обусловленных специфическими для каждой провинции обстановками проявления вулканизма и колчеданообразования. В то же время докембрийские колчеданосные провинции относительно немногочисленны и довольно сильно отличаются по числу колчеданных месторождений в их пределах. Так, из 98 палеопротерозойских месторождений — аналогов уральского типа — лишь 16 расположено за пределами Трансгудзонского пояса, причем 60 находится в границах пояса Флин-Флон — Сноу-Лейк. Аналогично из 76 месторождений — аналогов типа куроко того же возраста большинство расположено в пределах Свекофеннского пояса. В силу этого какая-нибудь одна или немногие провинции могут сильно влиять на средние значения геохимических параметров месторождений той или иной эпохи колчеданообразования.

Однако отмеченные выше временные изменения состава руд колчеданных месторождений нельзя свести только к латеральным различиям между провинциями. Они установлены как для месторождений типа куроко, так и уральского типа и их раннедокембрийских аналогов и основаны на больших выборках месторождений, что исключает влияние случайных ошибок. Наконец, они выражены весьма заметными изменениями геохимических параметров, как правило, значительно превосходящими латеральные изменения, связанные с различиями между провинциями, формировавшимися в одну эпоху колчеданообразования, но в разных обстановках. Так, среднее

содержание Zn при переходе от более древней эпохи колчеданообразования к более молодой (начиная с неогархея) на месторождениях уральского типа и их древних аналогах снижаются на 25–45%. На важном рубеже архея и протерозоя оно снизилось более чем на 1/3 (с 3,40 до 2,25% Zn). Хотя латеральные (от провинции к провинции) колебания содержания цинка в неогархее несомненно имели место (отклонение от среднего для этой эпохи составляло от –3 до +59%), среднее содержание Zn в запасах руды во всех без исключения колчеданоносных неогархейских зеленокаменных поясах (Абитибиде, Вава, Учи, Хай-Лейк и т.д.) было выше, чем среднее для палеопротерозойской эпохи. Наконец, направленность изменения геохимических особенностей месторождений разных эпох одинакова как для докембрийских, так и для фанерозойских месторождений, которые встречаются в десятках провинций. Все это позволяет считать, что главная причина изменения усредненных геохимических характеристик колчеданных месторождений различных эпох колчеданообразования заключается именно в эволюции состава их руд во времени.

Самое заметное ее проявление для обоих важнейших типов колчеданных месторождений и их раннедокембрийских аналогов — постепенное снижение среднего содержания Zn и Ag и увеличение среднего содержания Pb (только для месторождений типа куроко и их аналогов) в запасах колчеданных руд, возникавших в разные эпохи колчеданообразования. Наиболее существенное снижение среднего содержания Zn и Ag для обоих типов месторождений имело место на границе архея и протерозоя, что может быть связано с изменениями в развитии планеты на этом рубеже, важность которого подчеркивают многие исследователи (в частности, [Хаин, 2000; Шарков, 2004]).

Мезо- и неогархейские колчеданные месторождения расположены в пределах зеленокаменных поясов, в строении которых резко доминируют вулканогенные породы мантийного происхождения: высокомагнезиальные породы — коматииты (слагают от 20–30 до 70% вулканогенного разреза), а также связанные с ними более низкомагнезиальные коматиитовые и толеитовые базальты (например, [De Wit, Ashwal, 1997; Sharkov, Bogina, 2009; Dostal, 2008]). Подчиненную роль в составе зеленокаменных поясов играют известково-щелочные (или промежуточные между известково-щелочными и толеитовыми) породы основного, среднего и кислого состава, которые иногда развиты в основании, но в основном в верхней части вулканогенного разреза. Именно с ними, как правило, и связаны вулканогенные колчеданные месторождения.

Механизмы образования континентальной коры в архее оживленно обсуждаются. Одна из крайних позиций в этом вопросе — представление о том, что в раннем докембрии процессы, протекавшие на

окраинах плит, играли крайне незначительную роль, и режим плейт-тектоники в современном виде установился около 2 млрд л.н. [Hamilton, 1998; Bogatikov et al., 2000; Шарков, 2004]. На другом полюсе — актуалистическая точка зрения, согласно которой в архее образование континентальной коры происходило в основном за счет аккреции вулканических дуг, как это происходит сейчас, и механизмы плейт-тектоники были запущены по крайней мере около 3,1 млрд л.н. [Lowe, 1994; Kusky, Polat, 1999; Sawood et al., 2006].

В настоящее время большинство исследователей признают пространственные и временные вариации в переходе от плюм-тектоники к плейт-тектонике, а также существование периода, когда действовали оба этих механизма (в частности, [Muhlhaus, Regenauer-Lieb, 2005]). Эти авторы исходят из того, что первые признаки горизонтальных перемещений литосферных плит проявились уже при формировании зеленокаменных поясов архея [De Wit, 1997; Хаин, 2000; Сорохтин и др., 2001], хотя процессы субдукции в архее и отличались от современных.

Практически все ученые сходятся во мнении, что в архее верхняя мантия имела более высокую температуру и на обширных участках могла подвергаться плавлению с образованием коры океанического типа. Последняя в архее отличалась повышенной мощностью (в среднем 20–25 км против 6–7 км в настоящее время), была более горячей (из-за перегрева верхней мантии) и обладала повышенной плавучестью. Почти все авторы едины во мнении, что в архее эти обстоятельства обусловили пологую, близкую к горизонтальной субдукцию или обдукцию [De Wit, 1997; Сорохтин и др., 2001] коматиит-базальтовых плит и важную роль процессов переплавления гидратированной протоокеанической коры без участия мантийного клина. Извержения образовавшихся при этом толеитовых или промежуточных между толеитовыми и известково-щелочными магм могли сопровождаться образованием колчеданных месторождений прежде всего тех металлов, которые претерпели предварительное обогащение при выплавке самих коматиитов и связанных с ними пород.

Сведения о содержании халькофильных элементов в них приводятся довольно редко (в частности, [Riganti, Wilson, 1995; Papunen et al., 1998; Rollinson, 1999; Sprule et al., 2002; Kareem, Byerly, 2003; Malviya et al., 2006; Polat et al., 2006]).

В известном колчеданоносном неогархейском зеленокаменном поясе Абитибиде (кратон Сьюпериор) и поясе Таишань того же возраста (Северо-Китайский кратон), мезопротерозойских поясах Сула-Маунтин (Западно-Африканский кратон) и Кумо (Восточная Финляндия), палеогархейских зеленокаменных поясах Барбертон, Нондвени (Каапваальский кратон) и Мауранипур (кратон Бунделханд) коматиитовые лавы из халькофильных элементов в заметном количестве содержат лишь Zn (0,0021–0,0328%), в то время как

содержание Cu (0,0001–0,025%) было в разных архейских провинциях в среднем в 1,9–9,4 раза ниже.

Таким образом, коматиитовые магмы, очевидно, были обеднены Cu относительно Zn. При их переплавлении с образованием базальтовых, андезитовых и риолитовых лав, состав которых изменялся от толеитового до известково-щелочного в верхней части разреза вулканогенных формаций, руды формировавшихся архейских вулканогенных колчеданных месторождений — аналогов уральского типа — наследовали обогащение Zn и высокое отношение Zn/Cu. Аналогичные причины, вероятно, действовали и в отношении месторождений — аналогов типа куроко.

Однако по мере дифференциации вещества Земли и образования около 2600 млн л.н. жидкого железоникелевого ядра выделение энергии в результате гравитационно-плотностной дифференциации сократилось, произошло постепенное снижение температуры в верхней мантии. Вследствие этого стала снижаться скорость субдукции, увеличились углы погружения слэбов и усилилась роль частичного плавления пород мантийного клина в процессах магмообразования на активных окраинах плит. Обильные в архее (особенно в период 3000–2500 млн л.н.) излияния коматиитов и коматиитовых базальтов из-за остывания и консолидации литосферы постепенно сменились намного более редкими их извержениями в протерозое, после чего образование коматиитовых магм практически прекратилось [Sharkov, Vogina, 2009]. Формирование ювенильной океанической коры стало все больше происходить за счет образования более легкоплавких базальтов, характеризовавшихся более высоким содержанием Cu и пониженным отношением Zn/Cu. В результате произошло необратимое изменение состава руд колчеданных месторождений — аналогов типов уральского и куроко, что наиболее отчетливо проявилось на границе архея и протерозоя, но с некоторым замедлением продолжилось и в дальнейшем.

Примечательно, что среднее содержание Pb в рудах возрастает только на месторождениях, образовавшихся в энциалических обстановках, тогда как на месторождениях уральского типа и их древних аналогах оно остается почти неизменным в течение последних почти 2,8 млрд лет. Это указывает на эволюцию состава образующейся континентальной коры как на возможную причину обогащения Pb руд месторождений типа куроко и их аналогов, при формировании которых важную роль играли кислые магмы, связанные с частичным плавлением вещества сиалической коры.

Наиболее древние из таких месторождений возникали в пределах неоархейских зеленокаменных

поясов неполного развития, где протосиалическая кора сформировалась в результате частичного плавления нижней части базальт-коматиитовой коры и отвечала по составу натриевым гранитоидам тоналит-трондьемит-гранодиоритовой ассоциации, относительно бедным литофильными элементами с большим ионным радиусом, в том числе свинцом. Колчеданные месторождения, образывавшиеся в энциалической обстановке, стали, по существу, первыми в истории Земли месторождениями свинецсодержащих руд. Однако содержание Pb в них было исключительно низким, а отношение Zn/Pb очень высоким.

В дальнейшем континентальная кора разрасталась за счет присоединения к кратонам островных дуг, сложенных известково-щелочными вулканитами. Последние возникли в результате частичного плавления метасоматизированной мантии при участии летучих, отделявшихся при дегидратации погружающегося слэба. Известково-щелочным магмам было свойственно повышенное содержание элементов с крупными ионными радиусами, в том числе K, Rb, Cs, Pb, U, Th, Ba. Со временем состав континентальной коры постепенно менялся, и в ходе каждой следующей эпохи колчеданообразования в процессах магмообразования участвовала континентальная кора, обогащенная свинцом по сравнению с таковой в предыдущую эпоху. Это обусловило увеличение среднего содержания Pb и стало одной из причин снижения отношений Zn/Pb и Ag/Pb в рудах месторождений, при образовании которых кора континентального типа служила одним из источников рудного вещества (месторождения типа куроко).

Таким образом, вторая тенденция в эволюции составов руд вулканогенных колчеданных месторождений была обусловлена дифференциацией вещества Земли, постепенным снижением температуры в верхней мантии и связанным с этим развитием тектонических режимов и механизмов магмообразования.

Заключение. В эволюции состава руд вулканогенных колчеданных месторождений разных типов устанавливаются две разномасштабные тенденции. Одна из них проявляется в непродолжительные периоды интенсивного вулканизма и связанного с ним колчеданного рудообразования. Эта тенденция обусловлена эволюцией тектонических режимов и соответствующими изменениями состава магм в пределах отдельных колчеданосных провинций или рудных районов. Вторая тенденция выражена вековыми изменениями геохимических особенностей руд месторождений и связана с общей направленностью развития Земли на протяжении последних 3,5 млрд лет геологической истории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдонин В.В.* Формационный анализ и вопросы генезиса колчеданно-полиметаллических месторождений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1998. № 2. С. 17–23.
- Дергачёв А.Л., Ерёмин Н.И., Сергеева Н.Е.* Докембрийские колчеданные месторождения вулканической ассоциации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 3. С. 3–13.
- Дергачёв А.Л., Ерёмин Н.И., Сергеева Н.Е.* Вулканогенные колчеданные месторождения офиолитовой ассоциации // Там же. 2010. № 3. С. 3–13.
- Дергачёв А.Л., Ерёмин Н.И., Сергеева Н.Е.* Вулканогенные колчеданные месторождения типа бесси // Там же. 2011. № 4. С. 53–60.
- Ерёмин Н.И., Дергачёв А.Л., Позднякова Н.В., Сергеева Нат.Е.* Эпохи вулканогенного колчеданообразования в истории Земли // Геология руд. месторождений. 2002. Т. 44, № 4. С. 259–275.
- Ерёмин Н.И., Дергачёв А.Л., Сергеева Нат.Е., Позднякова Н.В.* Типы колчеданных месторождений вулканической ассоциации // Геология руд. месторождений. 2000. Т. 42, № 2. С. 177–190.
- Серавкин И.Б.* Металлогения Южного Урала и Центрального Казахстана. Уфа: Гилем, 2010.
- Сорохтин О.Г., Старостин В.И., Сорохтин Н.О.* Эволюция Земли и происхождение полезных ископаемых // Изв. секции наук о Земле РАЕН. 2001. Вып. 6. С. 5–25.
- Хаин В.Е.* Проблемы тектоники раннего докембрия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2000. № 4. С. 13–24.
- Шарков Е.В.* Палеопротерозой — главный поворотный пункт в развитии Земли // Изв. секции наук о Земле РАЕН. 2004. Вып. 12. С. 17–26.
- Vogatikov O.A., Kovalenko V.I., Sharkov E.V., Yarmolyuk V.V.* Magmatism and geodynamics: Terrestrial magmatism throughout the Earth's history. Amsterdam, 2000.
- Cawood P.A., Kröner A., Pisarevsky S.* Precambrian plate tectonics: criteria and evidence // GSA Today. 2006. Vol. 16, N 7. P. 4–11.
- Corrigan D., Galley A., Pehrsson S.* Tectonic evolution and metallogeny of the southwestern Trans-Hudson Orogen // Geol. Ass. of Canada. Mineral Dep. Division. Spec. Publ. 2007. Vol. 5. P. 881–902.
- De Wit M.J., Ashwal L.D.* Preface: Convergence towards divergent models of greenstone belts // Greenstone belts. Oxford University Press, 1997. P. 9–17.
- Dostal J.* Komatiites // Geoscience Canada. 2008. Vol. 35, N 1. P. 21–31.
- Galley A.G., Syme E.C., Bailes A.H.* Metallogeny of the Paleoproterozoic Flin Flon Belt, Manitoba and Saskatchewan // Geol. Ass. of Canada. Mineral Dep. Division. Spec. Publ. 2007. Vol. 5. P. 509–531.
- Kareem K.M., Byerly G.R.* Petrology and geochemistry of 3.3 Ga komatiites — Weltevreden Formation, Barberton Greenstone Belt // Luna and Planetary Sci. Conf. 2003. Pap. 2071.
- Malviya V.P., Arima M., Pati J.K., Kaneko Y.* Petrology and geochemistry of metamorphosed basaltic pillow lava and basaltic komatiites in the Mauraipur area: subduction related volcanism in the Archean Bundelkhand craton, Central India // J. Mineral. Petrol. Sci. 2006. Vol. 101. P. 199–217.
- Muhlhaus H.-B., Regenauer-Lieb K.* Towards a self-consistent plate mantle model that includes elasticity: Simple benchmarks and application to basic modes of convection // Geophys. J. Intern. 2005. Vol. 163. P. 788–800.
- Papunen H., Halkoaho T., Liimatainen J., Tulenheimo T.* Komatiite geology of the Siivikkovaara and Kellojarvi areas of the Kuhmo greenstone belt. Turku: Turku University, 1998.
- Polat A., Li J., Fryer B. et al.* Geochemical characteristics of the Neoproterozoic (2800–2700 Ma) Taishan greenstone belt, North China craton: Evidence for plume-craton interaction // Chem. Geol. 2006. Vol. 230. P. 60–87.
- Riganti A., Wilson A.H.* Geochemistry of the mafic/ultramafic volcanic associations of the Nondweni greenstone belt, South Africa, and constraints on their petrogenesis // Lithos. 1995. Vol. 34. P. 235–252.
- Rollinson H.* Petrology and geochemistry of metamorphosed komatiites and basalts from the Sula Mounains greenstone belt, Sierra Leone // Contrib. Mineral. Petrol. 1999. Vol. 134. P. 86–101.
- Sharkov E.V., Bogina M.M.* Mafic-ultramafic magmatism of the Early Precambrian (from the Archean to Paleoproterozoic) // Stratigr. and Geol. Correl. 2009. Vol. 17, N 2. P. 117–136.
- Sproule R.A., Leshner C.M., Ayer J.A. et al.* Spatial and temporal variations in the geochemistry of komatiites and komatiitic basalts in the Abitibi greenstone belt // Precamb. Res. 2002. Vol. 115. P. 153–186.
- Syme E.C., Lucas S.B., Bailes A.H., Stern R.F.* Contrasting arc and MORB-like assemblages in the Paleoproterozoic Flin Flon Belt, Manitoba, and the role of intra-arc extension in localizing volcanic-hosted massive sulfide deposits // Can. J. Earth Sci. 1999. Vol. 36 (11). P. 1767–1788.

Поступила в редакцию
18.02.2013