

УДК 553.435.001.57

© Е.Е.Абрамова, 2006

ФОРМИРОВАНИЕ КОЛЧЕДАННЫХ ЗАЛЕЖЕЙ В УСЛОВИЯХ КОНВЕКТИВНО-РЕЦИКЛИНГОВОЙ МОДЕЛИ

Е.Е.Абрамова (ЦНИГРИ Роснедра МПР России)

Конвективно-рециклинговая модель рудогенеза, изначально разработанная для субмаринных месторождений колчеданного семейства [1], в дальнейшем оказалась применимой и к другим месторождениям.

Модель гидротермальной системы разделяется на три части: нисходящую ветвь — область мобилизации рудных компонентов; восходящую («подрудный канал») — транспортирующую рудоносные растворы; зону рудоотложения (рудное тело на дне бассейна) на участке излияния горячих растворов в толщу холодной морской воды. В нисходящей ветви морская вода нагревается, реагирует с омываемыми породами и за счет этого меняет свой состав, обогащаясь, в частности, рудными элементами. В восходящей ветви в результате взаимодействия гидротермального раствора (поступившего из нисходящей ветви или эндогенного) с породами стенок питающего канала образуются подрудные метасоматические минеральные ассоциации. Восходящая ветвь в зависимости от геологической ситуации может реализовываться по-разному. Излияние высокотемпературных растворов на дно моря приводит к быстрому формированию гидротермально-осадочного рудного тела, главным образом из-за смешения с холодной морской водой. Дальнейшее разрастание этого тела происходит за счет отложения рудных минералов из просачивающихся через него новых порций раствора и смешения этих уже частично «отработанных» растворов с окружающей морской водой на поверхности рудного тела.

Эволюция внутреннего строения (зональности) рудной залежи зависит от двух факторов: изменения со временем состава питающего флюида и переложения вещества внутри залежи при просачивании гидротермальных флюидов через ее тело [5]. Термодинамическая модель этого процесса вклю-

чает две составляющих. Первая описывает процессы рудоотложения при фильтрации раствора внутри рудного тела, вторая — отложение вещества на поверхности тела при смешении истекающих растворов с окружающей морской водой. Для расчета такой модели необходимо знать распределение температур внутри рудного тела, температуру его поверхности и скорость роста тела. От распределения температур внутри тела зависит зональность рудоотложения, от температуры поверхности — доля вещества, отлагающегося в ходе смешения с морской водой (продукты смешения могут иметь специфический состав). Рост тела вызывает изменение во времени этих характеристик [2].

При небольших размерах рудного тела (10–20 м) высокотемпературная зона (>300°C) занимает большую часть его внутреннего объема, а периферическая характеризуется большими температурными градиентами. В крупном теле с радиусом ≥ 50 м горячая зона занимает относительно меньшую долю объема и может распространяться в периферическую часть только при значительных дебитах источника, при этом градиенты температур во внешней части существенно уменьшаются.

Разрастание рудного тела со временем можно выразить уравнением:

$$M_n = \sum_{i=1}^n (\Delta S_i \tau),$$

где M_n — масса рудного вещества после прохождения n -й порции раствора; ΔS_i — масса осадка рудного вещества, получающегося из 1 кг гидротермального раствора для i -й волны (вычисляется в термодинамической модели зоны рудоотложения и зависит от свойств нисходящей системы); τ — время истечения одной порции раствора. Именно последний параметр связывает темп изменений в нис-

ходящей ветви системы с формированием рудного тела. По косвенным признакам его значение можно приближенно оценить в 10^8 – 10^9 с (3–30 лет).

Как показали результаты моделирования, состав формирующегося рудного тела зависит от состава питающего раствора (важным параметром является соотношение железа и серы), температуры в глубинах системы, суммарного отношения порода/вода (Σ П/В), а также от длительности функционирования системы.

Отложение рудного вещества происходит как внутри растущей рудной залежи вследствие существующих в ней термических градиентов, так и при истечении растворов в придонную воду из-за смещения и охлаждения. Данная модель включает оба механизма рудоотложения, кроме того, она учитывает эволюцию питающей гидротермальной системы и переотложение внутри рудной постройки.

При моделировании формирования рудной залежи выполнено несколько вариантов расчетов модели. Во всех вариантах соблюдалась одна и та же последовательность в изменении состава минеральных парагенезисов рудного тела: вначале ангидрит-пиритовый, затем кремнезем-сфалерит-пиритовый, далее пирит в самой горячей части тела начинает замещаться на магнетит, а в центральных частях появляются сульфиды меди. Таким образом, распределение парагенезисов рудных минералов в области их накопления (формирования рудного тела) подчинено вертикальной зональности пирит→пирит±магнетит и гематит→халькопирит→сфалерит на фоне возрастания доли кварца в минеральных парагенезисах внешних зон рудных тел, чем объясняется природа яшмоидных образований в кровле толщи.

Наиболее типичен вариант с начальным (в первой «волне») суммарным отношением порода/вода=4 кг/кг и температурой на устье рудоподводящего канала 325°C . Максимальные содержания цинка в рудной залежи достигаются на начальном этапе, а содержание меди сравнивается с количеством цинка только на заключительном этапе роста залежи, когда появляется ангидрит (рис. 1).

При других значениях варьируемого параметра П/В эволюция зональности рудного тела и динамика накопления рудных элементов несколько отличаются. При малых отношениях П/В в питающей рециклинговой системе сульфидная сера легко вымывается из нисходящей ветви, и рудное тело быстро замещается гематитом и кремнеземом. Полный цикл развития моделируемого тела проходит за меньшее число волн. Вариант расчета модели с начальными высокими отношениями П/В характеризуется весьма медленной изменчивостью в нисходя-

щей ветви конвекции и требует значительно большего времени существования системы, при этом вероятно перекрытие рудного тела эффузивами с дальнейшим образованием многоярусной залежи.

Повышение температуры в очаге, питающем рудное тело, приводит к относительному обогащению его железом и недостатку сульфидной серы. Вследствие этого в рудном теле увеличивается доля магнетита, вплоть до исчезновения всех сульфидных фаз, кроме медных. Это указывает на существование оптимального температурного интервала для образования колчеданных рудных тел, ограниченного сверху возрастанием подвижности железа в гидротермальных растворах.

Состав пород, по которым развиваются гидротермальные системы, оказывает влияние на формирование рудных тел. Именно эти породы служат источниками рудообразующих металлов, которые переносятся флюидом нисходящей ветви системы. Так, в породах среднего состава эволюция системы и формирование медноколчеданных тел должны происходить быстрее (а следовательно, и с меньшими суммарными затратами тепловой энергии), другой состав пород будет влиять и на состав руды.

Моделирование рудонакопления с участием магматогенного флюида показало, что при обилии серы и высокой кислотности растворов формируются собственно пиритовые руды, обогащающиеся затем медью и цинком на рециклинговом этапе. Этот комбинированный вариант моделирования предполагает, что рудное тело на первом этапе формируется в результате разгрузки на дно моря магматогенного флюида, а на втором этапе после прекращения дегазации рудоотложение осуществляется за счет конвективной системы с таким же дебитом. Руды первого этапа — серноколчеданные. Содержания цинка и меди в рудном теле невелики из-за кислотного характера раствора. Магматогенный флюид имеет на выходе из канала рН около 1,5, что приводит к недонасыщенности его сульфидами цветных металлов, несмотря на достаточно высокие содержания в растворе меди, цинка и сульфидной серы. Эти компоненты начинают осаждаться только при сильном разбавлении флюида морской водой. Другая возможность нейтрализации — метасоматическая переработка известковистых донных осадков — в данной модели не рассматривалась.

На втором этапе (собственно рециклинговом) рудное тело формируется в несколько раз медленнее со значительным изменением состава. Вначале наблюдается обогащение цинком, поступающим из зон нисходящей циркуляции, затем в рудное тело начинает поступать медь, концентрация которой во всем рудном теле в конце процесса достигает

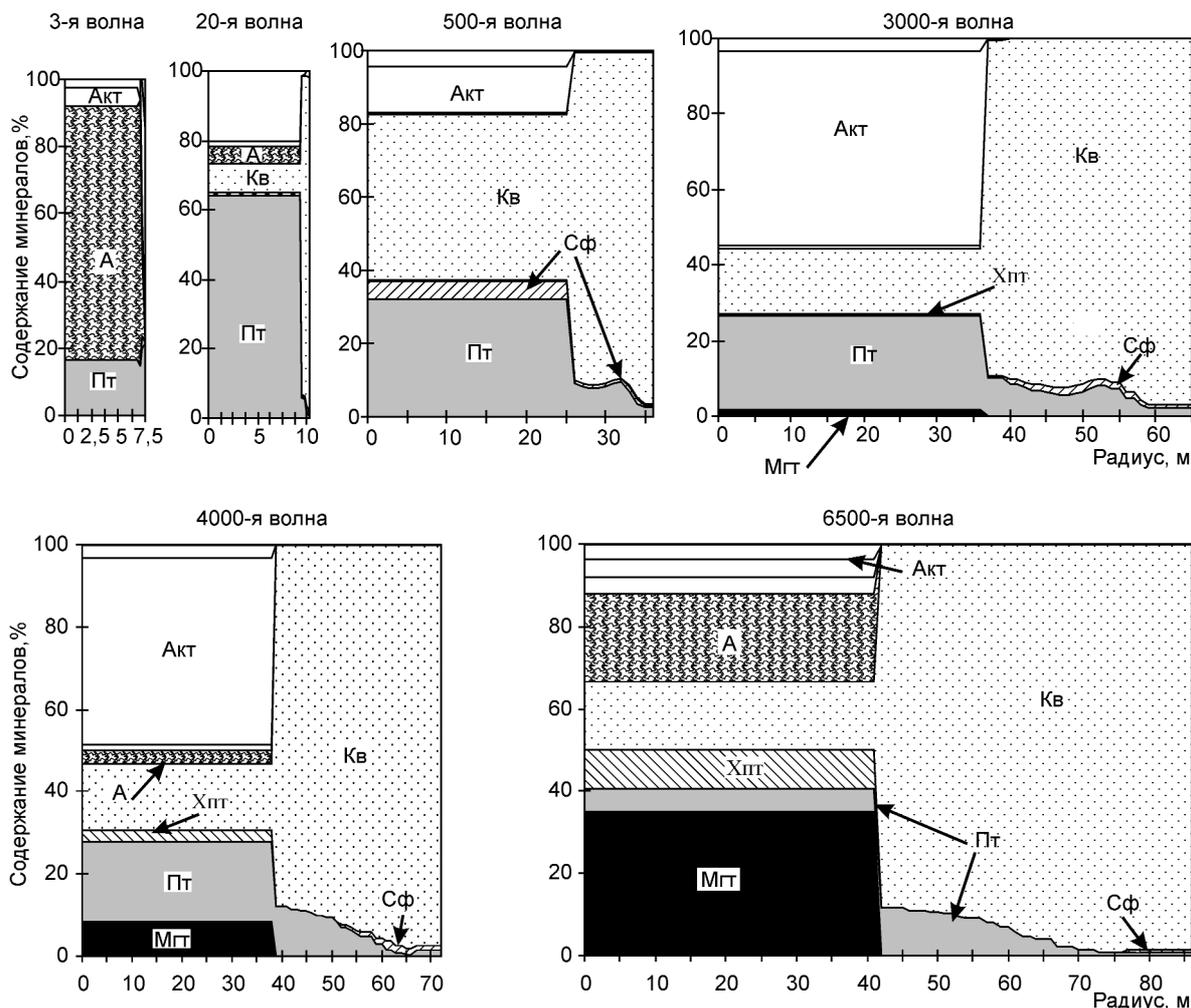


Рис. 1. Зональность минеральных парагенезисов в рудном теле по радиальному разрезу:

$T=325^{\circ}\text{C}$, $P/B=4$, исходные породы — базальты; А — ангидрит, Акт — актинолит, Кв — кварц, Пт — пирит, Сф — сфалерит, Хпт — халькопирит, Мгт — магнетит

0,24%. Отложенные металлы распределены неравномерно: цинк преимущественно осаждается в периферической части рудного тела, а медь — в наиболее горячей центральной. На поздних отрезках развития начинается постепенный вынос цинка за пределы рудного тела, и оно приобретает медно-колчеданный состав. Рост тела сопровождается интенсивными процессами переотложения и метасоматического замещения вещества внутри тела.

Для многих колчеданных месторождений, особенно уральских, характерно многоуровневое строение рудных залежей. При построении модели образования двухуровневой залежи был использован следующий сценарий. На первом этапе в толще базальтовой коры функционирует рециклинговая система, полностью аналогичная типовому варианту, описанному выше. Затем система замирает, и полученное к этому моменту рудное тело пирит-сфалерит-халько-

пиритового состава отвечает нижнему уровню будущего месторождения. Происходит внедрение даек кислого состава (до 10% от объема основных пород), а рудное тело перекрывается толщей эффузивов кислого состава. После этого начинается второй этап гидротермальной деятельности, в ходе которого рециклинг захватывает частично измененные ранее (на первом этапе) базальты, дайки и эффузивы кислого состава, а в области подрудного канала — ранее образованное рудное тело. Верхнее рудное тело проходит полный цикл развития примерно в два раза быстрее, чем при тех же условиях в одноуровневой модели. Оно раньше обогащается цинком и медью, однако ощущаемый в нем дефицит серы препятствует образованию крупной залежи.

Все полученные при моделировании рудные парагенезисы аналогичны встречаемым на месторождениях Урала. Схематические разрезы некото-

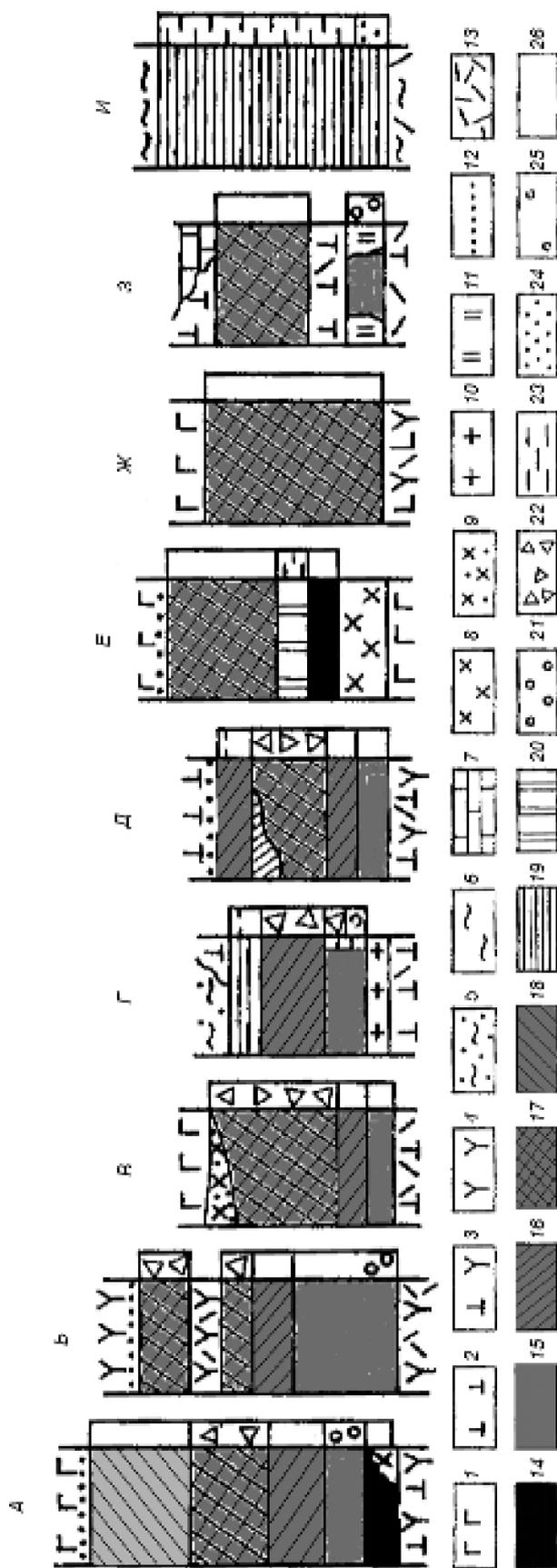


Рис. 2. Схематизированные разрезы рудных залежей колчеданных месторождений различных типов, по А.Г.Злотнику-Хоткевичу, 1987:

А — Приорское, Муголжары; Б — Ново-Шемурское; В — Учалинское; Г — Учалинское; Г — одно из месторождений Японии (тип Куроко, по Сато, 1974); Д — Западно-Озерное; Е — Летнее, Ж — Осеннее; З — Талганское; И — Филлизайское; Л — базальты; 2 — риолиты; 3 — риолиты; 4 — дациты; 5 — глины; 6 — глинистые сланцы с прослоями песчаников; 7 — известняки; 8 — хлоритовые породы; 9 — то же, с отсортированными по крупности обломками и глыбами сульфидных руд; 10 — гипс-ангидритовые породы; 11 — кремнисто-гематитовые породы; 12 — зоны заалки в эффузивах; 13 — гидротермальные изменения и рудная минерализация в вулканитах; 14 — магнетит-магнетитовые, 15 — пиритовые, 16 — халькопирит-пиритовые, 17 — сфалерит-халькопирит-пиритовые, 18 — сфалерит-пиритовые с примесью халькопирита, 19 — полиметаллические, 20 — магнетит-магнетит-сульфидные; текстуры руд: 21 — брекчиевидные, 22 — брекчиевые, 23 — слоистые, 24 — пятнисто-вкрапленные, 25 — сыпучие, 26 — массивные

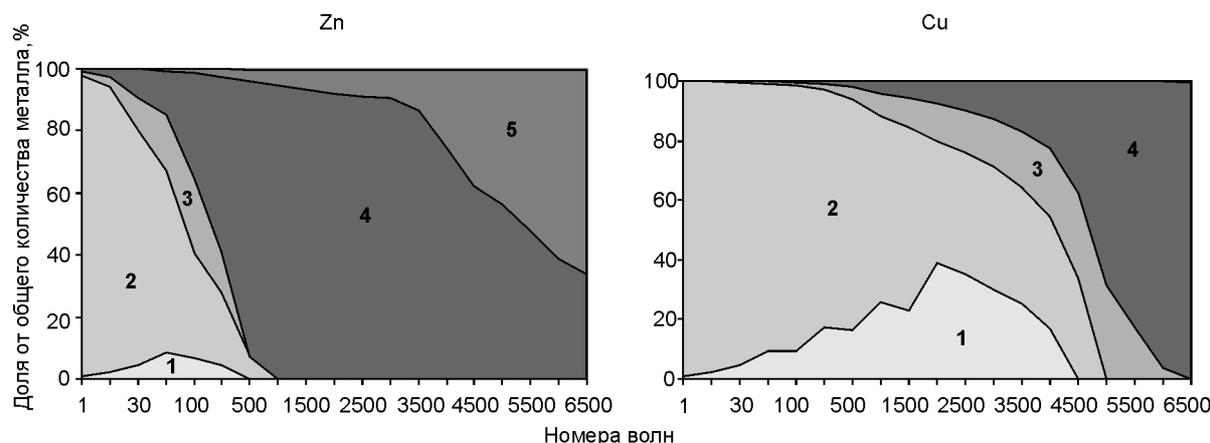


Рис. 3. Распределение металлов по частям конвективно-рециклинговой системы:

1 — доля металлов в зонах слабых аномалий в нисходящей ветви; 2 — остаточная доля металлов в эпидотсодержащих породах нисходящей ветви; 3 — переотложено в подрудные метасоматиты; 4 — отложено в рудном теле; 5 — рассеяно в придонной водной толще

рых из них приведены на рис. 2. Наиболее подходит под описание модели полного развития Приорское месторождение (см. рис. 2, А).

Детальный анализ результатов моделирования показывает, что ряд несоответствий модели природным аналогам вызван тем, что при образовании колчеданных месторождений могут проявляться и другие факторы рудоотложения. Например, в модели не учитывается изменение фильтрационных свойств рудного тела и предполагается их достаточность для прохождения гидротермального раствора при заданном дебите системы. Кольматизация пор (главным образом кремнеземом) должна приводить к прекращению фильтрации. Из расчета гидростатического равновесия в гидротермальной системе следует, что при ее закупорке на устье подводящего канала может возникать избыточное давление, вполне достаточное для образования гидроразрывов в рудном теле, а в экстремальных случаях происходит выброс обломков с формированием рудокластов. На реальность процессов гидроразрывов указывает широкое распространение внутрирудных брекчий в древних колчеданных месторождениях (см. рис. 2, А–Д) [4].

Анализ распределения меди и цинка по частям конвективно-рециклинговой системы — зоне глубокой циркуляции, подрудным метасоматитам и рудному телу — с последующим выносом в толщу воды показал различия в их поведении (рис. 3). Согласно модельным расчетам, цинк быстро выносится из пород нисходящей ветви, ненадолго задерживается в подрудных метасоматитах и поступает в рудное тело. Уже с начала функционирования системы заметен вынос цинка в придонную водную толщу. Вынос интенсифицируется на заключительном отрезке жизни системы. К этому времени рудное тело теряет

более половины поступившего в него цинка. Медь почти на порядок дольше цинка находится в породах нисходящей ветви и только затем переносится сначала в канал, потом в рудное тело. Вынос в придонную толщу не проявляется и тогда, когда уже вся медь в модели переотложена в рудное тело.

Таким образом, металлы, выносимые из исходных пород, формируют не только рудную залежь — они могут отлагаться в придонных металлоносных осадках. Кроме того, обогащенные ими воды могут вовлекаться в новый рудообразующий процесс. Как уже отмечалось А.И.Кривцовым [6], результатом деятельности конвективно-рециклинговых систем является не только формирование рудных тел колчеданного семейства, но и начальное концентрирование ряда металлов в породах, участвующих в более поздних процессах рудогенеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гричук Д.В. Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. — М.: Научный мир, 2000.
2. Гричук Д.В., Абрамова Е.Е., Тутубалин А.В. Термодинамическая модель субмаринного колчеданного рудообразования в рециклинговой гидротермальной системе // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40. № 1. С. 3–19.
3. Злотник-Хоткевич А.Г. Древние и современные колчеданные руды: черты сходства и отличия // Зап. ВМО. 1987. Ч. 116. Вып. 5. С. 574–585.
4. Злотник-Хоткевич А.Г. Диагенетическое преобразование колчеданных руд // Геология рудных месторождений. 1992. № 2. С. 83–98.
5. Краснов С.Г. О минимальных глубинах формирования массивных сульфидных руд на дне океана // Докл. АН СССР. 1987. Т. 296. № 5. 1188–1191.
6. Кривцов А.И. Гносеологические «мифы и рифы» проблем источников рудного вещества // Руды и металлы. 2003. № 4. С. 5–14.