

УДК 553.062+550.41:546.22+552.112

РУДНЫЕ ЛОВУШКИ В МАГМАТИЧЕСКОМ СУЛЬФИДООБРАЗОВАНИИ

© 2004 г. А. И. Малышев

Представлено академиком В.А. Коротеевым 22.12.2003 г.

Поступило 13.01.2004 г.

Среди рудной минерализации магматических сульфидных месторождений можно выделить руды первичной локализации и миграционные руды. В образовании руд первичной локализации большое значение имеют рудные ловушки. Под рудными ловушками здесь понимаются специфические *PT*-условия, благодаря которым происходит массовый сброс высокотемпературным эндогенным флюидом избыточной серы с последующим интенсивным сульфидообразованием за счет перехвата высокотемпературным серным конденсатом *p*- и *d*-металлов, транспортируемых флюидом. Всего выделено пять типов рудных ловушек. Первые четыре типа характерны для эволюции магматических и постмагматических флюидов в малоглубинных условиях. Рассмотрим эти типы на примере формирования норильских сульфидных месторождений.

С точки зрения концепции серного перехвата региональными факторами рудоносности норильского района являются: 1) высокая активность летучих; 2) повышенный потенциал газов группы серы в составе эндогенных флюидов, способный обеспечить в зонах отгонки относительное давление ее паров до 4.6%; 3) повышенная активность щелочей в магматогенных флюидах. Вкрапленное сульфидное оруденение норильских интрузивов генетически связано с такситовыми габбро-долеритами. Эти породы определяют важнейшую черту полнодифференцированных интрузивов [1], с одной стороны, как рудонесущий горизонт, а с другой – как специфические образования, обязанные высокой роли флюидной фазы. В рудоносных норильских интрузивах эти горизонты-флюидопроводники располагаются, как правило, в верхнем и нижнем эндоконтактах. Наибольшее развитие имеет горизонт нижних такситовых габбро-долеритов.

Барическая рудная ловушка (*P*-ловушка) обеспечивает формирование крупных и сверхкрупных рудных концентраций в виде богатого вкрапленного и шлирового сингенетического оруденения при прохождении флюидного потока во впадинах придонной части полнодифференцированных интрузивов норильского типа. Пример: богатая линза вкрапленного оруденения и шлиры сплошных сульфидов мыса Северной горы Рудной [2].

В районе оруденения происходит погружение подошвы интрузива на глубину не менее 120 м. Механизм формирования богатого вкрапленного и шлирового оруденения крайне прост. На фоне относительной стабильности температурного режима интрузива при принудительном погружении трассы флюида на более низкий гипсометрический уровень (рис. 1) трасса флюида на *PT*-диаграмме смещается в глубь области зон серной отгонки, что приводит к интенсивному сбросу серы и сульфидообразованию.

Возьмем в качестве условного примера схему, приведенную на рис. 1. Пусть в соответствии с диаграммой флюид вошел в область локального погружения на вероятной глубине около 700 м при температуре порядка 750°C. При этом он обладал потенциалом серы около 2.5%. Если считать, что исходный потенциал серы на входе в область зон серной отгонки составлял 4.6%, то к моменту входа флюида в локальное погружение почти половина серы была сброшена в виде рассеянной сульфидной минерализации, рассредоточенной по всей трассе движения флюида в *PT*-области зон серной отгонки. Локальное погружение горизонта-флюидопроводника на глубину 150–200 м приводит к резкому усилению сброса серы (и, соответственно, к интенсивному сульфидообразованию) – серный потенциал флюида снижается в 2.5 раза за счет перехода с относительной изобары $P_S/P_{S+H_2O} = 2.5\%$ на уровень изобары 1%. Причем чем глубже погружается трасса флюида (чем больше возрастает флюидное дав-

Институт геологии и геохимии
им. акад. А.Н. Заварицкого
Уральского отделения Российской Академии наук,
Екатеринбург

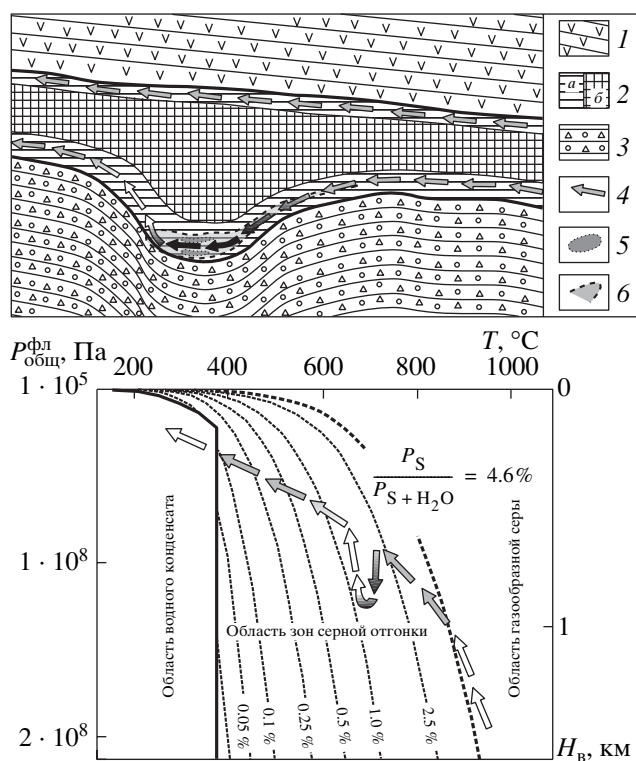


Рис. 1. Барическая рудная ловушка (P -ловушка) в формировании сульфидных руд первичной локализации в разрезе и на PT -диаграмме. Вероятная глубина – литостатический эквивалент, пятикратно уменьшенный за счет поправки на избыточное флюидное давление. 1 – вмещающие породы лавовой толщи нижнего триаса; 2 – породы полнодифференцированного интрузива (a – такситовые габбро-долериты, b – прочие дифференциаты интрузии); 3 – осадочные породы тунгусской серии; 4 – трассы движения флюидов в интрузиве и по полю PT -диаграммы, плотность заливки соответствует интенсивности сульфидообразования; 5 – тела сплошных сульфидных руд; 6 – область богатого вкрапленного оруденения. $P_{\text{общ}}^{\text{фл}}$ – общее давление флюида, $H_{\text{в}}$ – вероятная глубина.

ление), тем интенсивнее протекают процессы сброса серы и последующего сульфидообразования.

При выходе флюида из зоны локального погружения сброс серы и сульфидообразование резко прерываются. При этом формируется тупое ограничение зоны богатого оруденения на выходе флюидного потока из локального погружения. Таким образом, для нашего условного примера в области локального погружения сбрасывается треть транспортируемой флюидом серы ((2.5%–1%)/4.6%). Подобный масштабный сброс серы и последующее интенсивное сульфидообразование собственно и приводят к формированию богатой рудной минерализации в районах локального погружения дна полнодифференцированных интрузивов норильского типа.

P -ловушки очень характерны для образования магматических сульфидных месторождений.

Следующие три типа рудных ловушек представлены температурными рудными ловушками (T -ловушками). Перед тем как перейти к характеристике этих типов ловушек следует отметить общую для T -ловушек черту – для них характерен резкий сброс температуры флюидного потока. Температурный режим флюида при его прохождении в самом интрузиве меняется незначительно. Рассеивание тепла во вмещающие породы в значительной степени компенсируется выделением скрытой теплоты кристаллизации. Избыточное тепло, выделяющееся при прохождении флюида, поглощается за счет частичного плавления уже раскристаллизованных пород. Все это обеспечивает своеобразное термостатирование флюида при его движении в теле интрузива. В момент выхода флюида за пределы интрузива эффект термостатирования исчезает, что и обеспечивает резкий сброс температуры. Благодаря подобной “закалке” флюида происходит быстрое смещение его трассы в глубь области зон серной отгонки. В свою очередь это приводит к массовому сбросу избыточной серы и интенсивному сульфидообразованию.

Фланговая T -ловушка (рис. 2) обеспечивает формирование крупных и сверхкрупных рудных концентраций в виде прожилково-вкрапленного и брекчиевидного оруденения во вмещающих породах при выходе флюидного потока за пределы интрузива на его флангах. Пример: фланговое оруденение Талнахского интрузива [5].

T -ловушка рассеивания обеспечивает формирование крупных рудных концентраций в виде вкрапленного и массивного оруденения в верхнем и нижнем экзоконтактах полнодифференцированных массивов норильского типа при выходе отдельных струй флюидного потока за пределы интрузива во вмещающие породы экзоконтакта. В нижнем экзоконтакте данная ловушка более функциональна за счет дополнительного барического эффекта. Пример: оруденение верхнего и нижнего экзоконтактов полнодифференцированных интрузивов норильского типа [5].

T -ловушка транзитная (рис. 3) обеспечивает формирование сверхкрупных рудных концентраций в виде вкрапленного и массивного оруденения в верхнем и нижнем экзоконтактах полнодифференцированных массивов норильского типа при кратковременном выходе основного объема флюидного потока за пределы интрузива во вмещающие породы экзоконтакта. Возникает в случае крутых выступов в рельефе фундамента или кров-

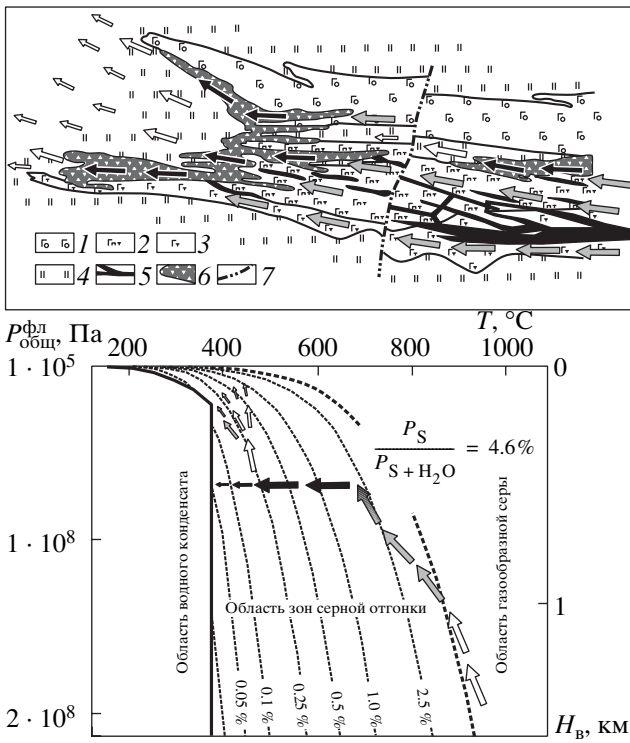


Рис. 2. Температурная рудная ловушка (*T*-ловушка) фланговая в формировании сульфидных руд первичной локализации в разрезе по данным [5] и на *PT*-диаграмме. 1 – оливиновые габбро-долериты; 2 – горизонт перемежающихся пикритовых и такситовых габбро-долеритов; 3 – такситовые габбро-долериты; 4 – контактово-метаморфические породы и метасоматиты; 5 – тела сплошных сульфидных руд; 6 – тела брекчиевых руд; 7 – тектонические нарушения. Стрелками показаны трассы движения флюидов в интрузиве и по полю *PT*-диаграммы, плотность заливки соответствует интенсивности сульфидообразования.

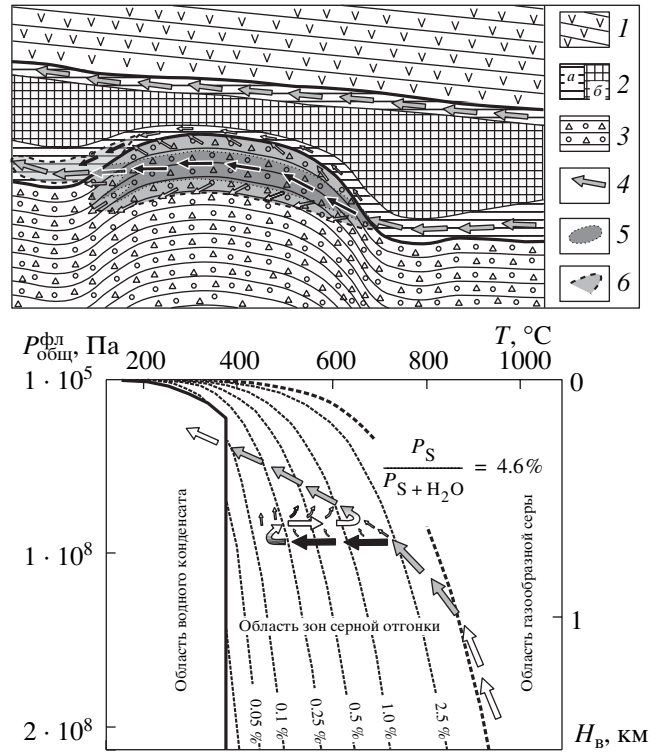


Рис. 3. *T*-ловушка транзитная в формировании сульфидных руд первичной локализации в разрезе и на *PT*-диаграмме. Обозначения см. рис. 1.

ли интрузивов. Как и предыдущий тип ловушки, в нижнем экзоконтакте более функциональна. Пример: южная часть Талнахского месторождения [5], крупное плитообразное тело сплошных сульфидных руд, максимальная мощность (до 45 м) которого приурочена к центрoклинальному замыканию локальной брахиантиклинальной структуры в породах тунгусской серии.

Как показано ранее [4], эволюция флюида в условиях больших и малых глубин имеет существенные различия. Причем критерием глубинности является позиция критической точки *K* для стартовой зоны серной отгонки. В частности, для относительной изобары $P_S/P_{\text{общ}} = 4.6\%$ критическая точка расположена на вероятной глубине около 3 км. В условиях малых глубин, меньших, чем вероятная глубина критической точки (см. верхнюю трассу на диаграмме рис. 4), сброс серы начинается при бо-

лее низких температурах, протекает постепенно, а в зону водного конденсата выносится сравнительно большое количество серы. Напротив, в условиях больших глубин эволюция серосодержащих флюидов протекает контрастно, со сбросом в высокотемпературный конденсат значительных количеств серы сразу при пересечении линии критической температуры. Например, по нижней трассе диаграммы рис. 4 флюид на входе в область зон серной отгонки сразу сбрасывает в высокотемпературный конденсат более 80% серы.

Все это накладывает определенную специфику на магматическое сульфидообразование. С увеличением глубины постепенно нивелируется значение *P*-ловушек. Закалочные *T*-ловушки с глубиной также теряют свое значение, так как основная масса серы начинает сбрасываться на линии критической температуры, что также можно рассматривать как своеобразную рудную ловушку критической температуры (*K*-ловушку). *K*-ловушка обеспечивает формирование крупных и сверхкрупных рудных концентраций в виде вкрапленного и массивного оруденения при пересечении эндогенным флюидом температуры границы 1040°C (критической температуры серы) в условиях высокого давления. При этом происходит

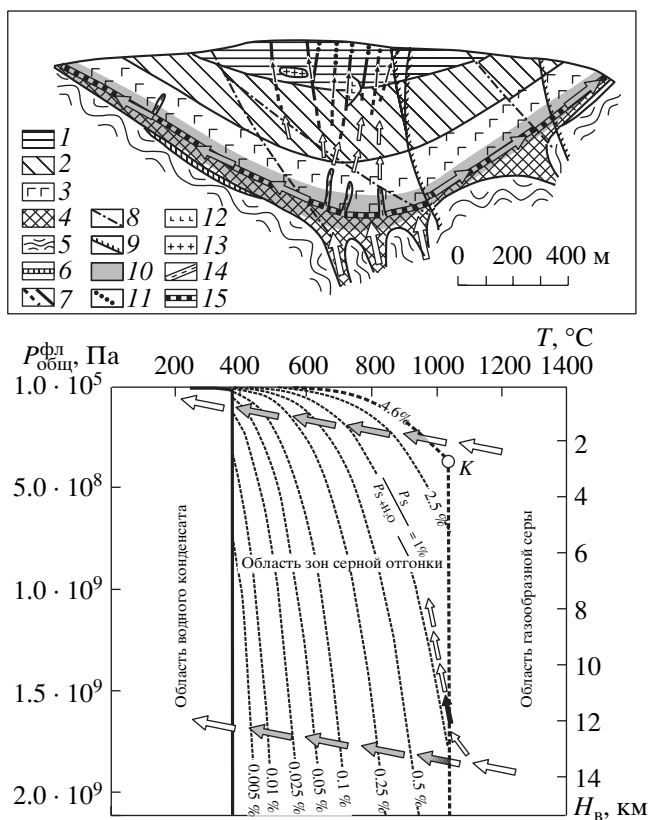


Рис. 4. Рудные жилы Мончегорского плутона как пример рудной ловушки критической температуры (*K*-ловушки). Стрелками показаны трассы движения флюидов в интрузиве и по полю *PT*-диаграммы, плотность заливки соответствует интенсивности сульфидообразования. Обозначения разреза [3]: 1 – бронзитит, 2 – зона перемежаемости прослоев бронзитита и гарцбургита, 3 – плагиоклазовый гарцбургит с редкими прослоями оливинового бронзитита, 4 – норит и габбро-норит, 5 – гнейсы, 6 – диорит, 7 – рудные жилы, 8 – тектонические нарушения, 9 – диабазы, 10 – вкрапленные руды, 11 – диорит-пегматиты, 12 – зональные пегматиты, 13 – пегматоидные бронзититовые шпирь, 14 – габбро-норит-пегматиты, 15 – неравномерно-зернистый плагиоклазовый бронзитит с прослоями такситового гарцбургита и трахитоидного гиперстенита.

массовый сброс серы и интенсивное сульфидообразование. Наиболее характерный пример – вертикальные рудные жилы Мончегорского плутона [3].

Тесная генетическая связь жил с тектоническими зонами, расположенными в осевой части мульды, их ассоциация и взаимосвязь с пегматоидными породами позволяют рассматривать происхождение этих жил как результат прорыва высокотемпературных летучих из флюидоподводящего канала в осевой части мульды. Прорыв происходил по субвертикальным трещинам в теле практически раскристаллизованного, но еще раскаленного интрузива. Здесь, в

отличие от рассеянного флюидного потока в придонной части интрузива, движение летучих было сконцентрировано в пределах трещин. Субвертикальная ориентировка этих трещин обеспечивала быстрый сброс давления во флюидном потоке, и, следовательно, очень крутое прохождение трассы отрыва на *PT*-диаграмме.

Сконцентрированный характер прохождения флюидов по трещинам и крутизна эволюционной трассы флюида на *PT*-диаграмме позволяют четко отождествить момент входа флюида в зону действия *K*-ловушки – как только температура движущегося по субвертикальной трещине флюидного потока становится ниже 1040 °С, так сразу происходит сброс значительных объемов избыточной флюидной серы. Однако сразу после этого сброс серы (и сульфидообразование) резко прекращается, так как при субвертикальном движении флюида вектор его эволюции на *PT*-диаграмме ориентирован более круто по сравнению с относительными изобарами давления паров серы. Поэтому вместо дальнейшего сброса серы происходит ее частичный вынос из уже образовавшихся сульфидов с переводом их в оксидную форму. В конечном счете вся область локализации описанных выше рудных жил контролируется расположением в интрузиве изотермической поверхности 1040 °С. Таким образом, субвертикальные рудные жилы Мончегорского плутона обязаны происхождением исключительно эффекту рудной *K*-ловушки, а зона действия этой ловушки фиксируется проявлениями высокотемпературного отжига сульфидов на верхних и нижних окончаниях жил.

Миграционные руды возникают при перемещении высокоподвижного сульфидного расплава за пределы зон интенсивного сульфидообразования (т.е. зон действия перечисленных выше рудных ловушек), формируют жильное оруденение как в самом массиве, так и во вмещающих породах. Примеры: отмечаются факты [1, 2] приуроченности жильного оруденения к зонам развития богатого сингенетического оруденения (зоны *P*-ловушек), в западной части Талнахского интрузива прослежен [5] переход от участков развития брекчиевидных руд (*T*-ловушка закалочная фланговая) через систему разноориентированных прожилков и жил к основной залежи.

Таким образом, перечисленные выше типы рудных ловушек совместно с миграционными сульфидными рудами исчерпывающе охватывают весь спектр крупных и сверхкрупных рудных концентраций магматических сульфидных месторождений. Это делает возможным использовать положения концепции серного перехвата для поисков, разведки и доразведки магматических сульфидных месторождений.

Работа выполнена при поддержке по Программе фундаментальных исследований по Отделению наук о Земле РАН “Генетические особенности и условия формирования крупных и суперкрупных месторождений стратегических видов минерального сырья и проблемы их комплексного освоения”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дюжиков О.А., Дистлер В.В., Струнин Б.М. и др. Геология и рудоносность Норильского района. М.: Наука, 1988. 279 с.
2. Зонтов Н.С. // Геология руд. месторождений. 1959. № 6. С. 3–20.
3. Карпов Р.В. // Геология руд. месторождений. 1959. № 5. С. 74–90.
4. Мальшев А.И. // ДАН. 2004. Т. 394. № 5. С. 669–672.
5. Генкин А.Д., Дистлер В.В., Гладышев Г.Д. и др. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, 1981. 234 с.