

*На правах рукописи*

**Мальшев Александр Иванович**

**Теория магматического сульфидного  
и оксидного рудообразования**

Специальность 25.00.11 —  
«Геология, поиски и разведка твердых  
полезных ископаемых, минерагения»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

Екатеринбург – 2005

**Работа выполнена** в Институте геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН.

**Научный консультант** —

доктор геолого-минералогических наук, академик Российской академии наук  
Коротеев Виктор Алексеевич

**Официальные оппоненты:**

доктор геолого-минералогических наук, академик Российской академии наук  
Юшкин Николай Павлович

доктор геолого-минералогических наук, профессор  
Сазонов Владимир Николаевич

доктор геолого-минералогических наук  
Горбачев Николай Степанович

**Ведущая организация** —

Институт геохимии имени А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН

Защита состоится 20 октября 2005 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.280.01 при ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

Тел: (343) 257-25-47

Факс: (343) 251-48-38

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УГГУ

Автореферат разослан 15 сентября 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Рудницкий В.Ф.

# **Введение**

## ***Актуальность исследований***

Диссертационная работа направлена на решение фундаментальной проблемы рудной геологии, связанной с разработкой физико-химических моделей рудообразования, и проблем генезиса рудных месторождений. Огромный материал, накопленный по геологии сульфидных месторождений и месторождений самородной серы, обсуждается и дискутируется исследователями в рамках взаимно непересекающихся парадигм. Вопросы генезиса сульфидных месторождений, как и месторождений самородной серы, во многом остаются дискуссионными. Отсутствует единая генетическая классификация сульфидных месторождений. Все это обуславливает необходимость разработки единой теоретической схемы эндогенного сульфидообразования. Во многом благодаря все более широкому использованию термодинамических и статических подходов и методов к концу XX века получило практически полное признание положение о конвергентности рудных месторождений, согласно которому ни одна из гипотез не сможет полностью и универсально объяснить возникновение всего многообразия руд. Генетические классификации стали все больше соответствовать классификациям ситуационным, в которых основное внимание уделялось составу руд и геологическим обстановкам, с которыми они связаны. При этом нередко суть рудообразующего процесса подменялась формой его проявления. Положение о конвергентности делало возможным предложить для каждой группы близких рудообразующих обстановок свой рудообразующий процесс или даже их группу. Есть все основания считать, что разрабатываемая автором схема физико-химической эволюции эндогенных флюидов позволяет, вопреки принципу конвергентности, создать единую теорию эндогенного рудообразования.

## ***Цель и задачи исследования***

Общая цель исследований — создание на базе представлений о физико-химической эволюции эндогенных флюидов единой теории эндогенного рудообразования. В рамках диссертационной работы решается задача построения единой теоретической модели для магматического сульфидного рудообразования.

## ***Фактический материал***

Изучением динамики поведения летучих в высокотемпературных эндогенных процессах автор занимается с 1980 г., включая 7 лет режимных наблюдений за действующими вулканами Северной группы Камчатки. В 1999 г. разработки этой проблемы были представлены и защищены в виде кандидатской диссертации на тему «Динамическая модель вулканического процесса и ее использование в палеовулканологических реконструкциях». В 2000 г. по этой теме была опубликована монография «Жизнь вулкана». Раздел «Серный перехват в сульфидном рудообразовании» входил в состав

обеих указанных работ как пример возможного использования разработанной динамической модели. Свое дальнейшее развитие эта тема получила в рамках данной диссертационной работы. Таким образом, докторская диссертация для автора является естественным и закономерным продолжением исследований поведения летучих в реальных магматических процессах. Приоритетность и развитие исследований именно в этом направлении определяются его высокой практической и теоретической значимостью. С другой стороны, опыт вулканолога-процессовика, как будет показано ниже, во многом определил саму постановку задачи, выбор методов ее решения и, в конечном счете, в немалой степени способствовал получению конкретных результатов.

### **Методы исследований**

Ключевое значение в решении поставленной задачи имеет использование двух оригинальных подходов. Первым из них является молекулярно-химический подход в физико-химическом моделировании. Этот подход в определенной степени противопоставляется общепринятому и широко распространенному термодинамическому подходу в физико-химическом моделировании. Для этого имеются следующие основания. Как известно, существуют два раздела физической науки, изучающие один и тот же круг явлений, – термодинамика и молекулярная физика. Термодинамика – аксиоматическая наука, оперирующая макрофункциями и макросостояниями вещества, абстрагируясь от сути протекающих при этом процессов. Поэтому в тех областях, где, во-первых, требуется выявление сути происходящих процессов, а во-вторых, где непосредственный контроль за условиями протекания каких бы то ни было процессов невозможен, возможности термодинамики резко ограничены. Попытки же вскрыть суть протекающих процессов с использованием термодинамических подходов некорректны исходя из самого определения целей и задач термодинамики как науки. Этим вызван сознательный отказ автора от использования в качестве аргументации каких бы то ни было термодинамических расчетов, равно как и сделанных на их основе теоретических выводов. Молекулярная физика, напротив, исходит из представления об атомно-молекулярном строении вещества и ориентирована именно на отображение сути протекающих процессов.

Кроме молекулярно-химического подхода в физико-химическом моделировании в работе за основу взят динамический подход в реконструкции рудообразующих процессов. Как правило, при разработке теоретических моделей используется статический подход, в котором приоритет отдается изучению статических геологических объектов в их современном состоянии. Статический подход по своей сути является объектно-ориентированным. Однако при всей его распространенности он имеет ограничения, т.к. при этом могут теряться определенные сведения о предшествующей эволюции изучаемого объекта. При использовании динамического подхода за основу берется рассмотрение процесса. При этом предполагается последовательность

исследований, прямо противоположная используемой в статическом подходе: построение теоретической модели — контроль и корректировка модели по литературным данным — контроль и корректировка модели в ходе полевого и камерального изучения геологических объектов. В идеале статический и динамический подходы должны взаимно дополнять друг друга точно так же, как в материалистической диалектике должны друг друга дополнять материалистический и диалектический подходы. Поэтому обширные результаты статического подхода, применявшегося различными исследователями, в данной работе используются на стадии контроля и корректировки моделей по литературным данным.

### **Научная новизна**

Основу работы составляет положение о возможности существования в составе эндогенного флюида газовой фазы даже для наиболее высокобарических условий. Этим работа отличается от общепринятых представлений, согласно которым понятие «флюид» трактуется как нечто неопределенное (не газ и не жидкость). Последнее обстоятельство, в свою очередь, приводит к недооценке роли газообразных соединений в планетарной эволюции. Из глубин планеты рвется наружу молекулярный поток газообразных летучих соединений. Может быть он и не тот, что прежде, сразу после планетарной аккреции, но у него еще вполне достаточно сил, чтобы раскалывать материки и двигать литосферные плиты. На своем пути он расшатывает кристаллические решетки вмещающих пород, преобразует, в конце концов — плавит их, получая в виде магмы наиболее удобные пути для своего распространения.

На протяжении многих поколений со времен Дж. Поулетт-Скропа, т.е. уже почти двести лет, вулканологи, изучающие процесс извержений, не устают вновь и вновь повторять то, что пожалуй лучше всех сказал Ф.А. Перре, наблюдая динамику извержений вулкана Мон-Пеле: «Газ — это активный агент, и магма является его переносчиком» (Макдональд, 1975). И тем не менее этот вывод раз за разом отвергается магматической геологией как некий частный приповерхностный случай. Отвергается сама возможность существования в глубинных условиях вещества в газообразном состоянии.

Подобное постоянство во многом обусловлено общепринятыми представлениями, согласно которым в условиях высоких давлений все различия между физическими свойствами газа и его конденсата исчезают. При этом не учитывается, что существует универсальное и крайне важное отличие между жидким и газообразным состояниями веществ, связанное с наличием или отсутствием сил межмолекулярного взаимодействия. В свою очередь, это определяет стремление газов равномерно распространиться по всему доступному пространству, тогда как конденсат, напротив, стремится сформировать молекулярные агрегаты с минимальной (в идеале — сферической) поверхностью. Поскольку миграция газовой фазы эндогенных флюидов может осуществляться еще и путем прямой молекулярной диффузии сквозь растворы, распла-

вы и кристаллическую решетку минералов горных пород, то в эндогенных условиях любая система для газообразных соединений является открытой. Причем скорость молекулярной диффузии повышается с ростом температуры и давления, что делает эту форму перемещения флюидного вещества наиболее благоприятной для условий высокотемпературных эндогенных процессов.

Миграция газообразных соединений имеет важнейшее значение как для общепланетарных процессов вообще, так и для процессов рудообразования в частности. Скачкообразное или постепенное выведение из состава высокотемпературной газовой смеси конденсирующихся веществ приводит к закономерной химической эволюции эндогенного флюида. Эта эволюция обусловлена, во-первых, резким возрастанием концентрации химических соединений в зонах их конденсации. Во-вторых, гетерогенность реакций, протекающих в зонах избирательной конденсации флюидного потока, во многом определяет и направленность этих реакций. Равновесие реакций, обратимых в условиях исключительно газовой или исключительно жидкой среды, резко смещается в сторону гетерогенности. Образующийся конденсат выводится из реакций газового взаимодействия. Точно так же газы, образующиеся при реакции веществ в конденсированном состоянии, уходят из зоны протекания реакции и рассеиваются в окружающей среде. Подобные реакции идут, как правило, до конца.

Устранение существующего пробела в определении особенностей поведения газообразных соединений в эндогенных процессах, значения переходов «газ–жидкость» в эволюции вещества земной коры, в том числе в образовании рудных концентраций, составляет важный новаторский элемент работы. В работе предложен принципиально новый механизм рудообразования — концепция серного перехвата. К принципиально новым моментам работы относится вводимое автором понятие рудных ловушек в магматическом рудообразовании, а также все разработанные автором модельные схемы рудообразования.

### **Защищаемые положения**

- I. В образовании сульфидных руд магматических месторождений определяющее значение имеют рудные ловушки, т.е. такие специфические РТ–условия, благодаря которым происходит массовый сброс высокотемпературным эндогенным флюидом избыточной серы с последующим интенсивным сульфидообразованием.**
- II. Эволюция газовой фазы высокотемпературных эндогенных флюидов приводит к образованию сульфидных месторождений Норильского, Мончегорского, Печенгского и Аллареченского типов, а также сульфидных месторождений, ассоциирующих с коматиитами.**
- III. Серный перехват приводит к образованию оксидных магматических месторождений благодаря возможности метасоматической трансформации сульфидных рудных концентраций в оксидную форму с заменой серы на кислород и частичным изменением рудообразующего комплекса металлов.**

## **Теоретическое значение работы**

Теория магматического рудообразования на базе концепции серного перехвата позволяет свести в единое целое все существующие взгляды на генезис магматических сульфидных и оксидных месторождений, устранив их взаимные противоречия, объединив положительные моменты при наиболее полном использовании фактического материала.

Крайняя простота и предельно высокое значение изложенных в работе фактов и логических построений как для понимания эволюции эндогенных флюидов вообще, так и для решения проблем эндогенного рудообразования в частности заставляют рассматривать их на уровне первично-понятийных постулатов (гносеологических примитивов), на которые с необходимостью должна опираться теория рудогенеза.

## **Практическое значение работы и рекомендации по ее использованию**

Разрабатываемые на базе молекулярно-химического и динамического подходов физико-химические модели позволяют четко указать, где, при каких обстоятельствах и отчасти даже в каких количественных соотношениях происходит развитие рудообразующих процессов. Тем самым схема рудообразования, разработанная на основе этих представлений, приобретает определенное прогнозное значение, что, собственно, и требуется от теоретических разработок. Для поисков, разведки и доразведки руд магматических месторождений могут быть полезны представления о рудных ловушках. Они позволяют определить тип возможного структурного контроля рудоносных зон в зависимости от вероятной глубины формирования потенциально рудоносного объекта. Кроме этого из концепции серного перехвата автоматически следуют три основных критерия для зон измененных пород, требующих наиболее пристального внимания: 1) объем измененных пород: чем больше объем измененных пород, тем, скорее всего, выше была мощность флюидного потока при их формировании, и, следовательно, больше могут быть запасы руд в нижнем горизонте; 2) максимальная высокотемпературность парагенезиса метасоматитов – позволяет отслеживать осевую линию движения флюида; 3) максимальное содержание серы во всех формах ее соединений (сульфидной, самородной, сульфатной) – позволяет отслеживать осевую линию переноса соединений серы, на которой могли находиться зоны массового рудообразования. Для более точного определения позиционирования этих зон может быть полезна векторизация флюидного потока на РТ–диаграмме его физико-химической эволюции. Под векторизацией понимается определение реальной трассы эволюции флюида на РТ–диаграмме, позволяющее оценить по флюидному потоку в изученной части объекта возможное положение зон рудообразования на его трассе. Технически процесс векторизации может быть осуществлен стандартными методами определения РТ-условий на основе изучения флюидных включений.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация имеет объем 271 стр. Она состоит из введения, 8 глав, объединенных в 2 части, и заключения. Диссертация содержит 51 рисунок, 17 таблиц и список литературы из 101 названия. В первой части работы обосновывается роль серы как фактора эндогенного рудообразования. Эта часть состоит из трех глав. В 1-й главе приводится обзор эволюции представлений о процессах сульфидного рудообразования. Во 2-й — общая информация по физико-химическим свойствам серы. Глава 3 посвящена разрабатываемой автором молекулярно-химической теории эволюции газовой составляющей высокотемпературных эндогенных флюидов. Наибольшее внимание в этой главе уделено особенностям поведения серы в высокотемпературных эндогенных процессах, так как эти особенности являются ключевым фактором эндогенного рудообразования. Вторая часть работы посвящена непосредственно рассмотрению моделей формирования магматических рудных концентраций. Она состоит из пяти глав. В 1-й главе на примере Норильских сульфидных месторождений рассматриваются 4 типа рудных ловушек, определивших образование этих месторождений и характерных для эволюции высокотемпературных эндогенных флюидов в малоглубинных условиях. В 2-й главе на примере Мончегорского плутона рассматривается еще один тип рудных ловушек, характерный для более глубоких условий. В 3-й главе на примере месторождений Кольского полуострова рассматривается процесс образования сульфидного оруденения, приуроченного к сравнительно небольшим интрузивам базит-гипербазитового состава, формирование которых происходило в условиях напряженного тектонического режима на глубинах 3–5 км. В 4-й главе рассматривается генезис сульфидных руд в составе ультраосновных эффузивных комплексов. И, наконец, 5-я глава посвящена рассмотрению возможной роли серного перехвата в образовании оксидных магматических месторождений.

## **Благодарности**

Автор выражает глубокую признательность Виктору Алексеевичу Коротееву, чье благожелательное отношение и помощь в немалой степени способствовали успешному проведению диссертационного исследования. Автор также благодарен Юрию Александровичу Полтавцу за ряд критических замечаний на начальной стадии работы, которые были полезны для ее дальнейшего развития. Кроме этого, автор выражает признательность Виталию Николаевичу Огородникову за неоценимую помощь на завершающем этапе оформления диссертационной работы. На завершающей стадии диссертационное исследование выполнялось при финансовой поддержке ОНЗ РАН в рамках программы № 2 «Крупные и суперкрупные месторождения стратегических видов минерального сырья: геологические особенности, условия формирования, фундаментальные проблемы комплексного освоения и глубокой переработки».



## Флюидный поток и его эволюция

Под флюидным потоком понимается перемещение летучих соединений в эндогенных условиях, которое может осуществляться как путем молекулярной диффузии этих соединений, так и посредством миграции мобильных газовых и газовой-жидких обособлений. Миграция флюидного конденсата происходит по сообщающимся порам и трещинам, зонам тектонических нарушений или путем перемещения (всплывания) газовой-жидких обособлений в маловязких магматических расплавах. Миграция газовой фазы эндогенных флюидов осуществляется дополнительно к вышеперечисленному еще и путем прямой молекулярной диффузии сквозь растворы, расплавы и кристаллическую решетку минералов горных пород. При этом скорость молекулярной диффузии повышается с ростом температуры и давления, что делает эту форму перемещения флюидного вещества наиболее благоприятной для условий высокотемпературных эндогенных процессов.

В эволюции эндогенных флюидов важнейшую роль играют фазовые переходы «газ–жидкость». При охлаждении потока высокотемпературной газовой смеси и достижении критической температуры одного из веществ, составляющих смесь, происходит образование высокотемпературного конденсата, в который сбрасывается избыток вещества с наиболее высокой критической температурой. Здесь до определенной степени возможна аналогия с процессами кристаллизации магматического расплава. Как при охлаждении магмы в силикатном расплаве начинается образование и рост кристаллов, так и в высокотемпературном флюиде происходит образование капелек жидкости и их укрупнение. Однако кроме сходства здесь имеется и очень существенное различие. Если в магме остаточный расплав и растущие кристаллы могут длительное время находиться совместно, то в высокотемпературных флюидных потоках возможна быстрая сепарация на конденсат и остаточную газовую смесь. Это происходит благодаря более высокой мобильности газов, их стремлению распределиться по всему доступному пространству, а также их способности к молекулярной диффузии.

Скачкообразное или постепенное выведение из состава высокотемпературной газовой смеси конденсирующихся веществ приводит к закономерной эволюции флюида. Исходя из элементарных молекулярно-химических представлений в пределах этой эволюции автором [9] выделены три геохимические области, имеющие важнейшее практическое значение (рис. 1):

1. Область зон серной отгонки, в которой происходит сброс конденсата серы. Эта область имеет большое значение для образования многих рудных месторождений, а в той части, где область примыкает к барьеру водной нейтрализации, происходит формирование эндогенных месторождений собственно самородной серы.
2. Область зон водной отгонки, приводящая к появлению на пути эндогенных флюидов барьера нейтрализации и последующего зарождения волны

повышенной кислотности. Эта зона имеет ключевое значение для формирования гидротермальных, золоторудных и кварцевых месторождений.

3. Область зон сероводородной и углекислотной отгонки, играющая ведущую роль в формировании месторождений углеводородного сырья.

В диссертационной работе автор остановился на рассмотрении лишь первой из вышеперечисленных геохимических областей в ее наиболее высокотемпературной (магматической) части.

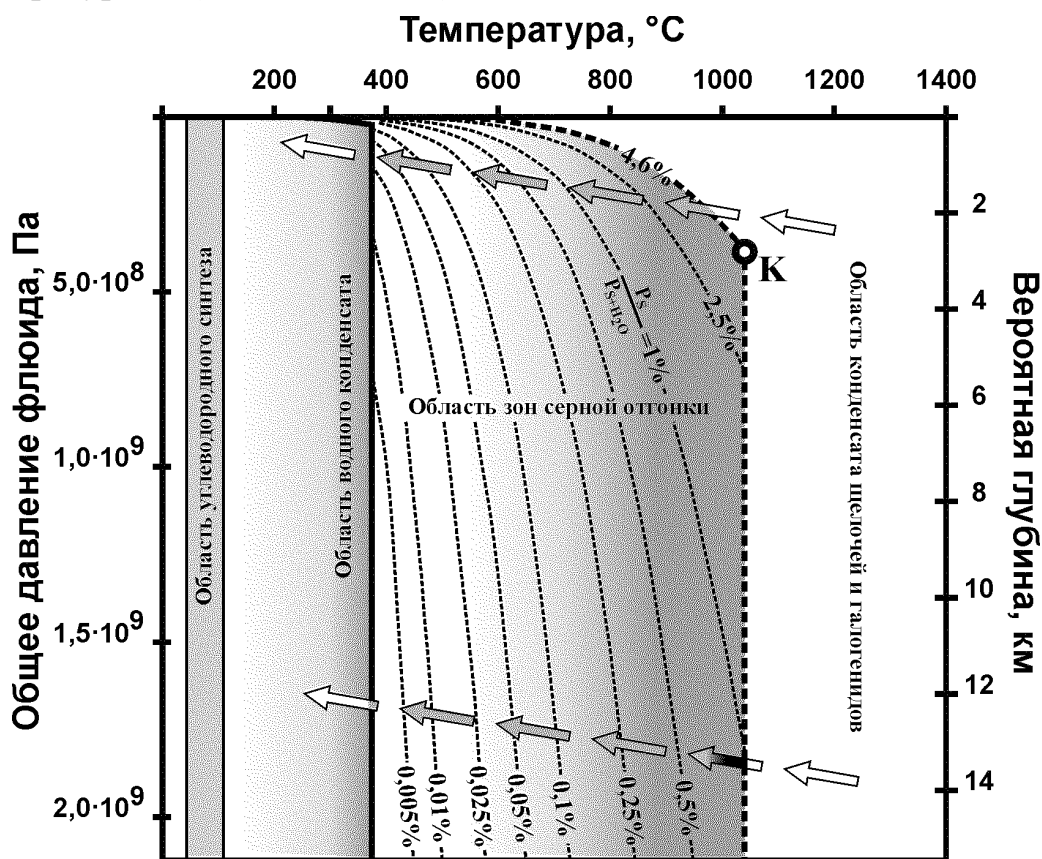


Рис. 1. Важнейшие геохимические области в эволюции высокотемпературных эндогенных флюидов. Вероятная глубина — литостатический эквивалент, пятикратно уменьшенный за счет поправки на избыточное флюидное давление

## Серный перехват в магматическом рудообразовании

С геологической точки зрения критические параметры серы и ее фазовая диаграмма представляют большой интерес, так как критическая температура попадает в интервал возможного существования магматических расплавов, а линия насыщения паров лежит в области температур постмагматического газо-гидротермального процесса. При пересечении магматическим флюидом линии насыщения или линии критической температуры происходят спонтанные конденсация и сброс избыточной серы. Благодаря этому, на пути преимущественного движения высокотемпературных эндогенных флюидов воз-

можно существование зон «отгонки» серы, в которых она сбрасывается из газообразного состояния и из состава серусодержащих летучих соединений ( $H_2S$ ,  $SO_2$ ) в жидкий конденсат. Именно здесь наиболее интенсивно протекают процессы массового сульфидообразования, т.к. в щелочной высокотемпературной среде молекулярная сера оказывается практически единственным и очень мощным окислителем для транспортируемых газами металлов. Барьер водной нейтрализации является зоной возможного устойчивого существования собственно самородной серы. При попадании серы в кислую среду зоны водного конденсата она окисляется, образуя сернистую и серную кислоту, а при реакции с соединениями металлов — их соли.

Для количественных оценок в работе использованы обобщенные (Наумов и др., 1997) по многочисленным публикациям все известные данные о средних концентрациях наиболее распространенных летучих компонентов ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $S$ ,  $Cl$ ,  $F$ ) в магматических расплавах различных типов — от ультраосновных до кислых. Средние значения  $H_2O/S$  по данным (Наумов и др., 1997) и наши оценки по этим данным возможных парциальных давлений серы и родственных ей газов относительно их смеси с водой приведены в табл. 1.

Для перехода от общего флюидного давления к вероятной глубине использованы данные (Наумов и др., 1997) о в среднем 5-кратном превышении флюидным давлением его литостатического эквивалента. Это представляется вполне корректным, поскольку для перемещения флюидного потока требуется повышенный градиент давления, наиболее высокий в случае перемещения флюида путем молекулярной диффузии.

Перечисленные выше количественные характеристики являются базовыми для количественных оценок. С уточнением этих характеристик соответственно могут уточниться и количественные аспекты разработанных автором моделей. Однако важно подчеркнуть, что качественная их сторона при этом не изменится.

Табл. 1. Отношения  $H_2O/S$  по (Наумов и др., 1997) и оценки автора возможных парциальных давлений серы и родственных ей газов относительно их смеси с высокотемпературными парами воды для различных типов магматических расплавов

SiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O/S	Относительные парциальные давления, %	
		$\frac{P_S}{P_{S+H_2O}}$ , % <sup>1</sup>	$\frac{P_{H_2S+SO_2}}{P_{H_2S+SO_2+H_2O}}$ , %
75,26	130	0,16	0,43
56,21	31	0,65	1,78
50,60	7,2	2,73	7,24
49,29	8,3	2,38	6,35
42,5 <sup>2</sup>	4,2	4,6	11,8

<sup>1</sup> При расчете относительного парциального давления использовано среднее число атомов в молекуле S при критической температуре  $N=2,78$ .

<sup>2</sup> Определено экстраполированием данных (Наумов и др., 1997) в область ультраосновных расплавов.

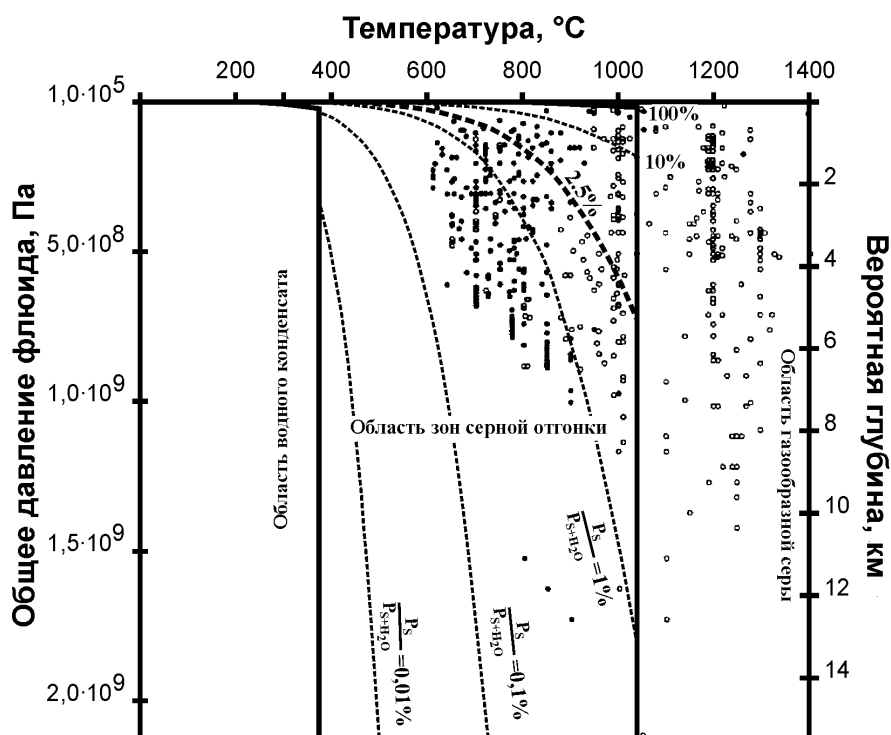


Рис. 2. Соотношение линий насыщения паров серы при различных ее концентрациях в газовой смеси и экспериментальных определений общего давления флюидов (экспериментальные данные по (Наумов и др., 1997)

На рис. 2 пунктирными линиями показано положение относительных изобар насыщения паров серы, т.е. линий насыщения при определенном отношении парциального давления паров серы к общему давлению газовой смеси. Здесь же показаны и экспериментальные данные по определению РТ-условий на момент формирования горных пород.

Как можно видеть, относительная изобара насыщения паров серы при  $P_s/P_{s+H_2O} = 2,5\%$  проходит по самому центру экспериментально определенных РТ условий в магматических флюидах. Как следует из табл. 1, именно эта относительная изобара соответствует содержанию серы в основных расплавах с весовым соотношением  $H_2O/S = 7,2 \div 8,3$ .

Поэтому эндогенные флюиды, выделяющиеся из основных расплавов, при последующем остывании должны неизбежно пересечь линию конденсации серы с относительным парциальным давлением ее паров 2,5 %. Далее они должны последовательно сбрасывать избыточную серу при пересечении всех линий конденсации с прогрессивно понижающимся относительным давлением паров серы вплоть до достижения уровня 0,01 % и менее на пересечении водного барьера нейтрализации.

Вне зон существования серного конденсата концентрация серы в элементарной форме, как правило, незначительна по сравнению с более распространенными родственными газами —  $H_2S$  и  $SO_2$ . Однако там, где есть возможность сброса серы из газообразного флюида в жидкое состояние, т.е. в зонах

отгонки, резко активизируются следующие реакции:

1.  $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S}\downarrow + \text{H}_2$
2.  $2\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 \rightarrow 3\text{S}\downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$
3.  $2\text{H}_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{S}\downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$

Из них наиболее интенсивно протекает реакция 1. Сероводород термически неустойчив. Его распад начинается уже при 400 °С, а полностью он распадается при температуре 1700 °С (Лидин, 1996). В находящихся под большим давлением высокотемпературных эндогенных флюидах вне зон отгонки распаду препятствует то обстоятельство, что при протекании этой реакции должно резко возрасти давление газовой смеси, так как из одного моля газа образуются два. Поэтому вне зон отгонки в соответствии с принципом Ле Шателье – Брауна равновесие в реакции 1 смещено влево.

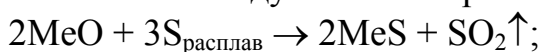
Ситуация резко меняется при попадании флюида в РТ–условия зоны отгонки. Во-первых, сброс серы в жидкий конденсат снимает ограничение Ле Шателье – Брауна на реакцию 1. Во-вторых, сбрасываемая сера выводится из реакций газового взаимодействия. Тем самым равновесие реакции 1 в зоне серной отгонки смещается в крайне правое положение, что соответствует практически полному распаду сероводорода с одновременным сбросом серы.

Одновременно с распадом сероводорода в зонах отгонки он интенсивно взаимодействует с диоксидом серы (реакция 2). Эта реакция хорошо известна и применяется в промышленности как составная часть так называемого Клаус-процесса промышленного получения серы (Грунвальд, 1992). Равновесная смесь паров реагентов из обеих частей реакции 2 может существовать на всем пути движения высокотемпературных эндогенных флюидов, но при пересечении РТ–условий зон серной отгонки равновесие в этой реакции, как и в промышленном Клаус-процессе, резко смещается вправо, в сторону сброса серы в жидкий конденсат. Реакция 3 аналогична реакции 2 лишь с тем отличием, что она протекает в зоне серной отгонки с участием водорода, как продукта распада  $\text{H}_2\text{S}$ .

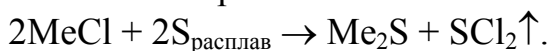
В зонах серной отгонки может иметь место довольно значительный эффект изотопной сепарации [4, 9, 11]. Этот эффект возникает за счет различий в давлении, которое создают химические эквиваленты парообразной серы, отличающиеся изотопным составом. Из-за более высокого давления молекул, включающих в себя атомы тяжелого изотопа, эти молекулы будут сильнее поглощаться конденсатом по сравнению с их более легкими аналогами. Данные по смещению изотопного состава в сульфидной сере норильских месторождений очень хорошо соответствуют концепции серного перехвата, фактически совпадая с изобарами конденсации (сброса) основных объемов флюидной серы. Все это легко объясняет имеющиеся аномалии в изотопном составе серы норильских сульфидных месторождений без привлечения каких-либо предположений о контаминации коровой серы.

## **Сульфидообразование**

В щелочной высокотемпературной среде конденсат серы оказывается практически единственным и очень мощным окислителем для транспортируемых флюидным потоком металлов. Высокую химическую активность серы определяет тот факт, что в условиях высоких температур она сбрасывается не в виде обычных замкнутых восьмиатомных колец, а в виде коротких 2-4-атомных ( $N_{кр}=2,78$ ) обрывков цепей, крайние атомы в которых являются высокоактивными радикалами. Сера является химическим аналогом кислорода, более слабым в обычных условиях, но в зонах своей высокотемпературной отгонки она начинает его активно вытеснять из окисных и гидроксидных соединений с металлами и кислородсодержащих солей. Это становится возможным благодаря образованию летучих кислородсодержащих соединений и их выводу из зоны серного конденсата:



Аналогично протекает вытеснение галогенов из транспортируемых газовым потоком и перехватываемых в зонах серной отгонки галогенидов:



Халькофильные элементы перехватываются зонами серно-сульфидного конденсата как из газового потока, где они переносятся в виде соединений с галогенами, так и из капель щелочного конденсата, где они существуют в виде солей, в которых соответствующий элемент является кислотообразующим (типа  $K_2FeO_4$ ). Так коротко можно охарактеризовать суть серного перехвата, протекающего в зонах отгонки серы из газообразного состояния в жидкую фазу.

## **Составы магм и особенности сульфидного рудообразования**

Кроме повышения относительного содержания серы с ростом основности магматических расплавов (см. табл. 1) имеет место рост абсолютных концентраций серы в расплавных включениях. Закономерное изменение содержаний серы отражается на процессах сульфидообразования, генетически связанных с магматическими расплавами разной основности. Как можно видеть на рис. 3, А, для ультраосновных расплавов возможные зоны серной отгонки оторваны от температурной области соответствующих магм. В результате сброс серы из флюида, генерируемого ультраосновным массивом, возможен или на выходе из массива, или при быстром остывании последнего. Из-за высоких концентраций серы для генерации промышленно значимых сульфидных месторождений вполне достаточно сравнительно небольших (по объему) интрузивов, а массовое сульфидообразование возможно в условиях сравнительно небольших глубин.

Для основных магм возникает ситуация, когда область зон серной отгонки и температурная область возможного существования магматических расплавов частично пересекаются (рис. 3, Б). Это обеспечивает возможность сброса избы-

точной серы с ее переводом в сульфидную форму непосредственно в магме. Тем самым возникает известная ситуация с одновременным существованием двух несмешивающихся жидкостей — сульфидной и силикатной.

Дальнейшее развитие процесса, в конечном счете, приводит к образованию сульфидных магматических месторождений, которые принято называть ликвационными. С повышением кислотности магматического расплава зоны серной отгонки в эндогенном флюиде сначала отрываются от температурной области существования флюидогенерирующей магмы, а затем все более удаляются от нее, все ближе примыкая к барьеру водной нейтрализации (рис. 3, В, Г). В эндогенных месторождениях эта тенденция находит отражение в переходе от чисто магматических сульфидных месторождений расслоенных габброидных интрузивов, через колчеданные месторождения, генетически связанные с расплавами андезитобазальтового и андезитового составов, к типично «гидротермальным» месторождениям, характерным для кислых магм.

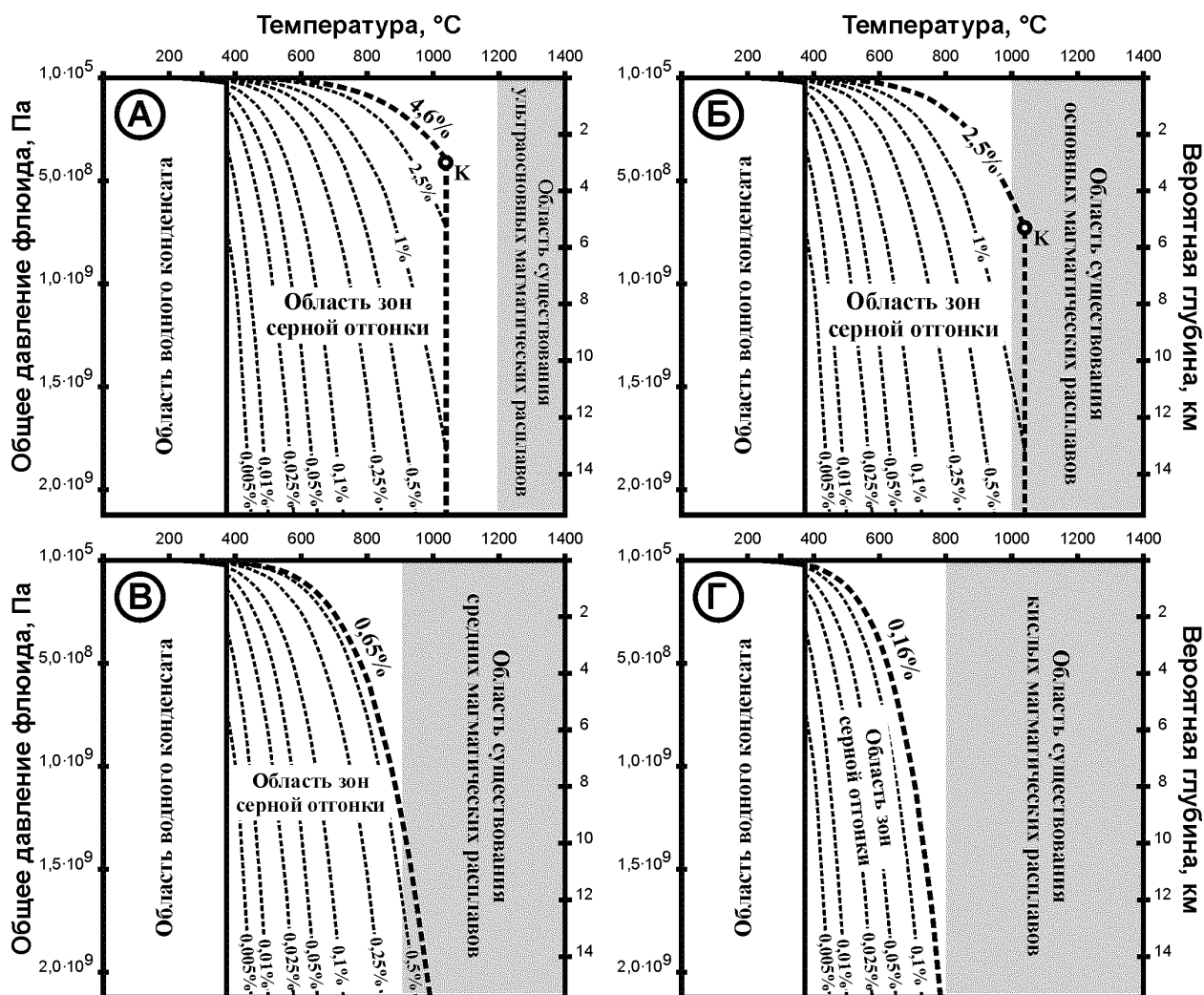


Рис. 3. Специфика сульфидообразования для ультраосновных (А), основных (Б), средних (В) и кислых (Г) расплавов

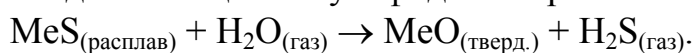
## **Постсульфидное оксидообразование**

Рудообразующая роль зон серного перехвата имеет первостепенное значение для образования в эндогенных условиях не только сульфидных руд, но и оксидных руд d- и p-элементов. Это обусловлено возможностью трансформации рудных концентраций из сульфидной формы в оксидную под воздействием высокотемпературных эндогенных флюидов. Основное значение в образовании оксидных рудных концентраций имеет высокотемпературный отжиг сульфидного расплава, протекающий под воздействием высокотемпературных паров воды.

Как следует из данных (Наумов и др., 1997), абсолютные и относительные содержания воды в магматических расплавах резко возрастают с увеличением содержания кремнекислоты. Кроме этого, соединения серы, как наименее растворимые, выделяются в первую очередь, тогда как на более поздних этапах выделяются главные объемы магматогенной воды. В результате для габброидных частей интрузивов на стадиях, близких к состоянию преимущественной раскристаллизации (позднемагматической и пневматолитовой), происходит прогрессивное снижение относительного давления паров серы в составе флюида. По нашему мнению, именно эти резко недосыщенные серой флюиды играют главную роль в высокотемпературном отжиге осажденного первично сульфидного расплава.

Как следует из проанализированных в диссертационной работе литературных данных, для сульфидных месторождений вполне обычны низкотемпературный метасоматоз, сопровождающийся переводом сульфидной минерализации в оксидную форму. Разные стадии развития этого процесса отчетливо фиксируются в кристаллических структурах. Однако вся логика данной работы показывает, что мы не имеем права исключать возможность аналогичного метасоматоза и для более высокотемпературных условий. От своего низкотемпературного аналога он отличается тем, что метасоматические изменения происходят в пределах сульфидного расплава, а не по кристаллическим структурам.

Суть процессов, протекающих при высокотемпературном метасоматозе сульфидного расплава, довольно проста. Как только образующийся в зонах отгонки серно-сульфидный расплав оказывается в зоне действия флюида, недонасыщенного парами серы (и ее летучими соединениями), так сразу появляется возможность выноса серы из состава этого расплава. Прежде всего удаляется избыточная сера, и расплав из серно-сульфидного становится чисто сульфидным. Затем под воздействием высокотемпературных паров воды происходит замещение сульфидной серы на кислород:



Недонасыщенность флюида парами серы и ее летучих соединений определяет направленность этой реакции — чисто статистически из сульфидного расплава удаляется больше серы, чем возвращается обратно. Система открыта, обогатившийся летучими соединениями серы газ уходит из зоны контакта с сульфидным расплавом, тогда как на его место поступают новые порции флюида, по-прежнему недосыщенные серой. Благодаря этому вышеприве-



денная реакция идет до конца.

Одновременно происходит изменение качественного и количественного соотношения металлов в составе рудных концентраций. Металлы, более устойчивые в соединениях с серой, выносятся флюидным потоком, тогда как более устойчивые в соединениях с кислородом, наоборот, привносятся. Подобное перераспределение металлов можно непосредственно наблюдать на вулкане Кудрявый (Рыбин и др., 2000). На этом вулкане в пределах воздействия высокотемпературных газовых струй ( $>550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в составе редкометальной сульфидной минерализации сульфиды меди не обнаружены, а препараты из металлической меди «растворяются» в парогазовых струях с выносом меди в виде хлоридов. В то же время в непосредственно окаймляющих эти высокотемпературные парогазовые струи серно-сульфидных сублиматах (согласно нашей терминологии, в поверхностных выходах зон серной отгонки и сульфидообразования) медь образует собственные минералы (халькопирит, ковеллин, борнит, халькозин).

Для формирования комплекса металлов в составе рудных концентраций большое значение имеет среда, в окружении которой находится метаморфизируемый сульфидный расплав. Так как она является поставщиком металлов, привносимых в состав рудных концентраций, то прослеживаемая связь состава оксидных магматических руд с составом вмещающих пород представляется вполне естественной. В качестве отражения этой связи можно рассматривать и сам факт приуроченности хромитовых и магнетитовых (титаномагнетитовых) месторождений соответственно к ультраосновным и основным разностям магматических пород.

Что касается самой серы, то, войдя в состав сульфидов в зоне образования рудного расплава, она в процессах апорасплавного метасоматоза вновь полностью освобождается и опять переходит в состав флюида, а затем вновь конденсируется в зоне отгонки и опять вступает в реакции с образованием рудного расплава. Благодаря подобному рециклингу одно и то же сравнительно небольшое количество флюидной серы может принять участие в образовании достаточно больших объемов оксидных руд.

## **Защищаемое положение I**

**В образовании сульфидных руд магматических месторождений определяющее значение имеют рудные ловушки, т.е. такие специфические РТ–условия, благодаря которым происходит массовый сброс высокотемпературным эндогенным флюидом избыточной серы с последующим интенсивным сульфидообразованием.**

Всего выделено 5 типов рудных ловушек. Из них первые 4 типа наиболее характерны для рудообразования в малоглубинных условиях и могут быть проиллюстрированы на примере Норильских месторождений. Последний, пятый, тип рудных ловушек характерен, напротив, для глубинных усло-

вий. В качестве наиболее характерного примера можно привести образование рудных жил Мончегорского месторождения.

Сообщество сульфидоносных интрузивов Норильского рудного района может рассматриваться (Дистлер и др., 1988) в качестве представительной модели сульфидного рудообразования. С точки зрения концепции серного перехвата региональными факторами рудоносности Норильского района являются: 1) высокая активность летучих; 2) повышенный потенциал газообразных соединений серы в составе эндогенных флюидов; 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 (Геология и рудоносность..., 1988), с одной стороны, как рудонесущий горизонт, а с другой — как специфические образования, обязанные высокой роли флюидной фазы. В. В. Золотухин (1997) отмечает, что присутствие эндоконтактных горизонтов основных пегматоидов (нижних и верхних такситовых габбро-долеритов и пегматоидных габбро) является главной особенностью расслоенных рудоносных гипербазит-базитовых интрузивов норильского типа, тогда как отсутствие в расслоенном интрузиве этих пород приводит к отсутствию в нем оруденения.

Особенности строения этих пород (Золотухин, 1964; Золотухин и Васильев, 1967) позволяют считать, что на определенном этапе становления интрузивов такситовые габбро-долериты играли роль горизонтов-флюидопроводников. В рудоносных норильских интрузивах эти горизонты располагаются, как правило, в верхнем и нижнем эндоконтактах. Наибольшее развитие имеет горизонт нижних такситовых габбро-долеритов. Эндоконтактное положение горизонтов-флюидопроводников типично для норильских интрузивов, однако имеются и отклонения. В частности, интрузия Норильск II в некоторых разрезах почти полностью сложена такситовыми габбро-долеритами (Роговер, 1959), представляя собой, по сути, единую зону миграции летучих.

В качестве примера, иллюстрирующего особенности локализации промышленного сульфидного оруденения в такситовых габбро-долеритах, можно привести шлиры сплошных сульфидов, описанные на северном мысе горы Рудной. Как следует из данных Н. С. Зонтова (1959), в районе оруденения происходит погружение подошвы интрузива на глубину не менее 120 м. Механизм формирования богатого вкрапленного и шлирового оруденения, подобного вышеописанному, крайне прост. Оруденение локализуется в нижнем горизонте такситовых габбро-долеритов, который можно рассматривать в качестве горизонта-флюидопроводника. Об этом свидетельствует наличие рассеянной сульфидной минерализации как до, так и после зоны локализации богатого оруденения. На фоне относительной стабильности температурного режима интрузива при принудительном погружении трассы флюида на более низкий гипсометрический уровень (рис. 4, А) возникает эффект **барической рудной ловушки (Р-ловушки)** — трасса флюида на РТ-диаграмме (рис. 4,

Б) по вертикали смещается в глубь области зон серной отгонки, что приводит к интенсивному сбросу серы и сульфидообразованию.

Возьмем в качестве условного примера схему, приведенную на рис. 4. Пусть в соответствии с диаграммой флюид вошел в область локального погружения на вероятной глубине около 700 м при температуре порядка 750 °С. 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 РТ-области зон серной отгонки.

Как следует из диаграммы рис. 4, Б, 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 давление), тем интенсивнее протекают процессы сброса серы и последующего сульфидообразования.

При выходе флюида из зоны локального погружения сброс серы и сульфидообразование резко прерываются, так как вектор движения флюида по РТ-диаграмме в этом случае ориентирован в сторону выхода из зон серной отгонки в область газообразной серы. Благодаря прерыванию рудообразования формируется упоминавшееся выше тупое ограничение зоны богатого оруденения на выходе флюидного потока из локального погружения. Сброс серы и рассеянное сульфидообразование возобновляются лишь после повторного пересечения трассой флюида относительной изобары паров серы 1 %. Таким образом, для нашего условного примера в области локального погружения сбрасывается треть транспортируемой флюидом серы  $((2,5\% - 1\%)/4,6\%)$ . Масштабный сброс серы и последующее интенсивное сульфидообразование собственно и приводят к формированию богатой рудной минерализации в районах локального погружения dna полнодифференцированных интрузивов норильского типа. Р-ловушки характерны для норильских интрузивов.

Для **температурных рудных ловушек (Т-ловушек)** 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 термостаивание флюида при его движении в теле интрузива.

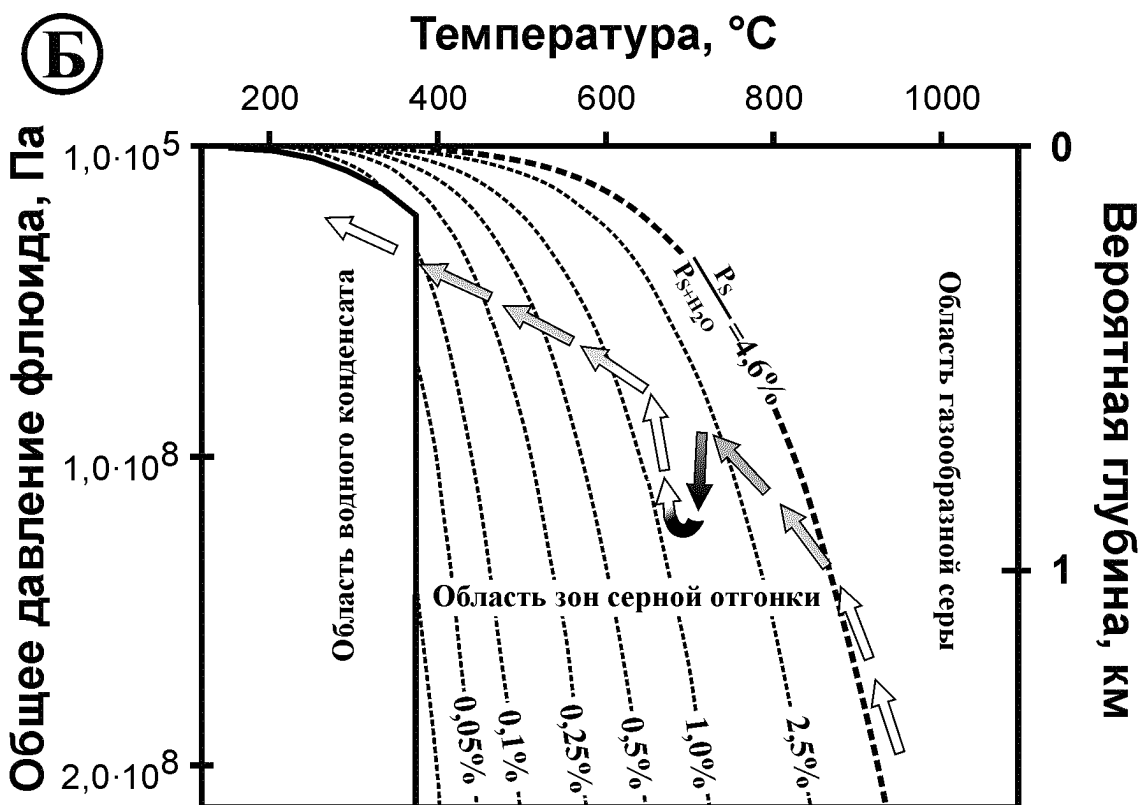
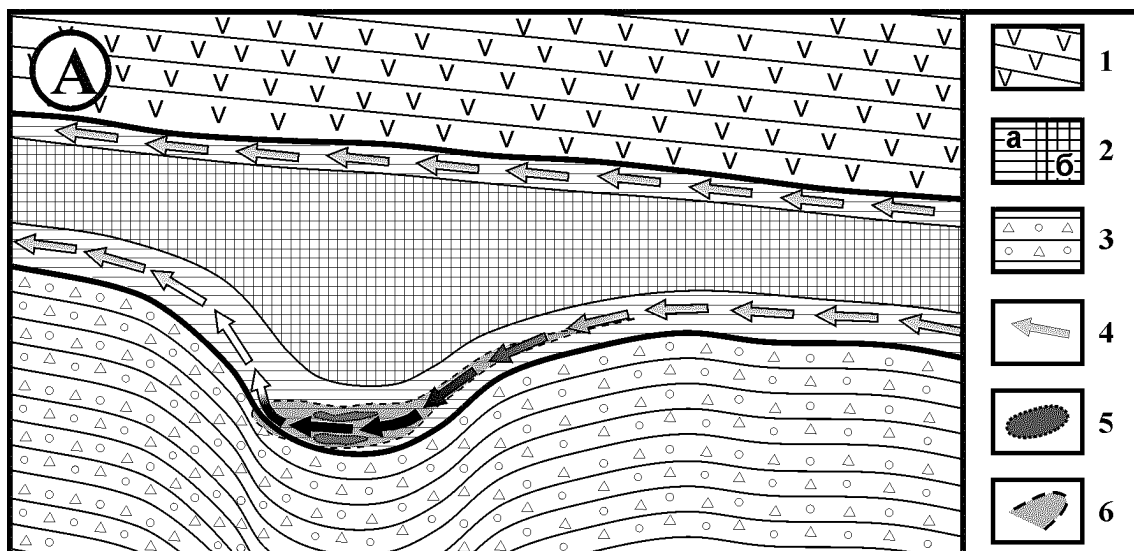


Рис. 4. Барическая рудная ловушка (P-ловушка) в формировании сульфидных руд первичной локализации в разрезе (А) и на PТ-диаграмме (Б):

1 – вмещающие породы лавовой толщи нижнего триаса; 2 – породы полнодифференцированного интрузива (а – такситовые габбро-долериты, б – прочие дифференциаты интрузии); 3 – осадочные породы тунгусской серии; 4 – трассы движения флюидов в интрузиве и по полю PТ-диаграммы, плотность заливки соответствует интенсивности сульфидообразования; 5 – тела сплошных сульфидных руд; 6 – область богатого вкрапленного оруденения

В момент выхода флюида за пределы интрузива эффект термостатирования исчезает, что 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.

С этой точки зрения фланговая зона Талнахского интрузива (рис. 5, А) представляет характерный пример **Т–ловушек флангового типа**. Эта зона соответствует окончательному выходу флюидного потока во вмещающие породы. Непосредственно на выходе флюидного потока во вмещающие породы происходит резкое выполаживание вектора наклона флюидной трассы (рис. 5, Б), т.к. исчезает термостатирующее воздействие интрузива на флюидный поток, и температура последнего резко падает. При этом РТ–параметры флюида смещаются в глубь области зон серной отгонки, вызывая интенсивный сброс избыточной серы и последующее сульфидообразование.

**Т–ловушка экзоконтактного рассеивания** возникает при выходе той или иной части флюидного потока в породы экзоконтакта. При этом наблюдаются те же явления, что и в случае фланговой Т–ловушки. В качестве примера можно привести оруденение верхнего и нижнего экзоконтактов полнодифференцированных интрузивов норильского типа. В нижнем экзоконтакте данная ловушка более функциональна за счет дополнительного барического эффекта.

С точки зрения сульфидообразования гораздо больший эффект имеет 3-й тип температурных ловушек — **транзитная закалочная Т–ловушка** (рис. 6). Эта ловушка возникает при кратковременном выходе в породы экзоконтакта основного объема флюидного потока в случае относительно крутых изгибов подошвы или кровли интрузивного массива. При этом эффекту закалки с соответствующим сбросом избыточной серы и интенсивным сульфидообразованием подвергается практически весь флюидный поток, образуя наиболее крупные тела сплошных сульфидных руд.

В качестве примера можно привести плитообразное крупное тело сложной морфологии на юге Талнахского месторождения (Рудные..., 1974). Здесь максимальная мощность (до 45 м) сплошных сульфидных руд приурочена к центроклинальному замыканию локальной брахиантиклинальной структуры в породах тунгусской серии. Как и Т–ловушка рассеивания, транзитная Т–ловушка более эффективна в нижнем экзоконтакте за счет дополнительного барического эффекта.

Эволюция флюида в условиях больших и малых глубин имеет существенные различия. В условиях малых глубин, меньших, чем вероятная глубина критической точки (см. верхнюю трассу на диаграмме рис. 7), эволюция высокотемпературных эндогенных флюидов протекает постепенно, сброс серы начинается при более низких температурах, а в зону водного конденсата (а следовательно, в область преимущественно сульфатного минералообразования) 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.

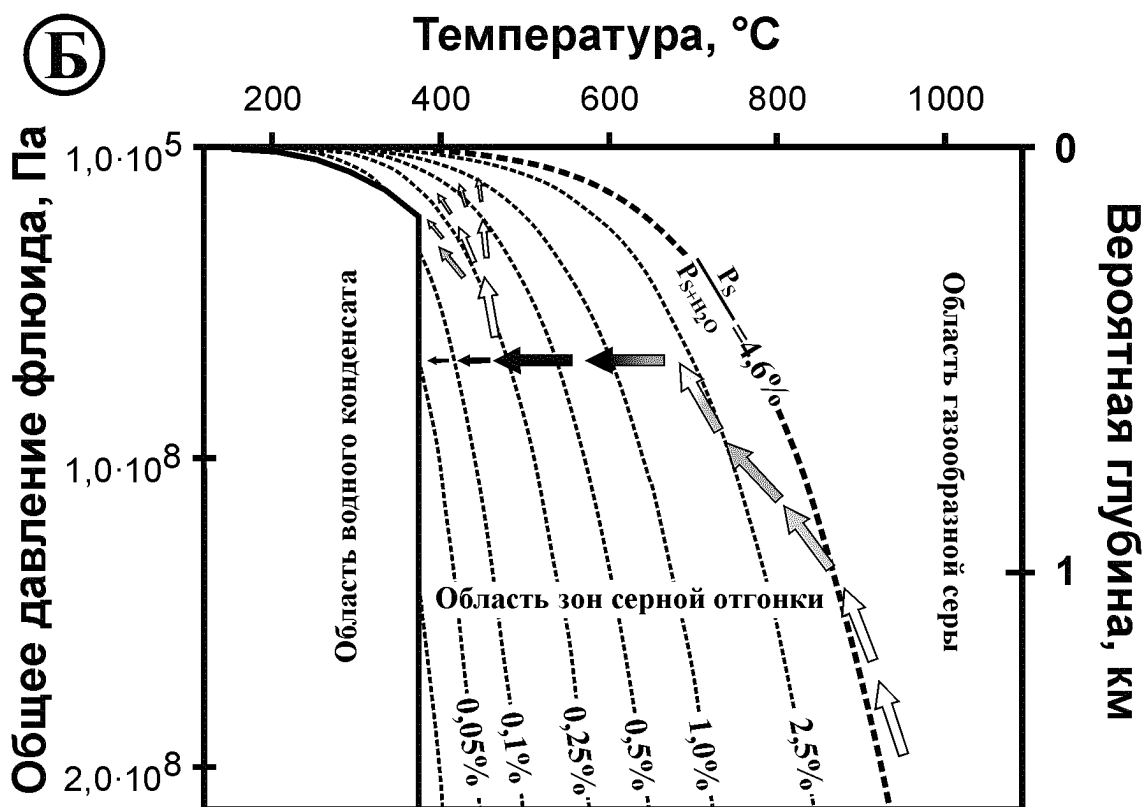
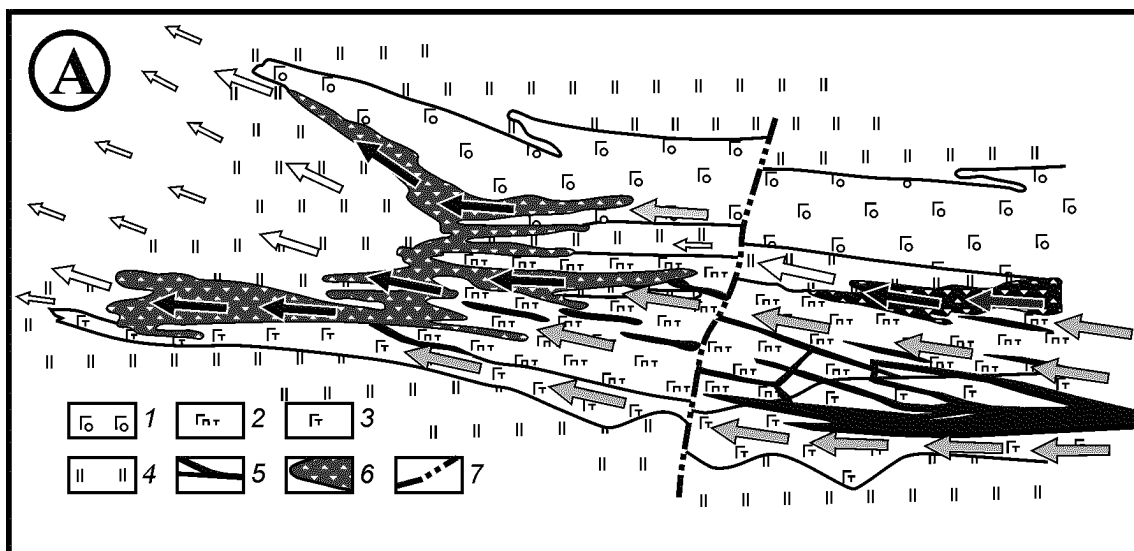


Рис. 5. Температурная рудная ловушка (Т-ловушка) фланговая в формировании сульфидных руд первичной локализации в разрезе (А) по данным (Сульфидные..., 1981) и на РТ-диаграмме (Б):

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 брекчиевидных руд; 7 – тектонические нарушения. Стрелками показаны трассы движения флюидов в интрузиве и по полю РТ-диаграммы, плотность заливки соответствует интенсивности сульфидообразования

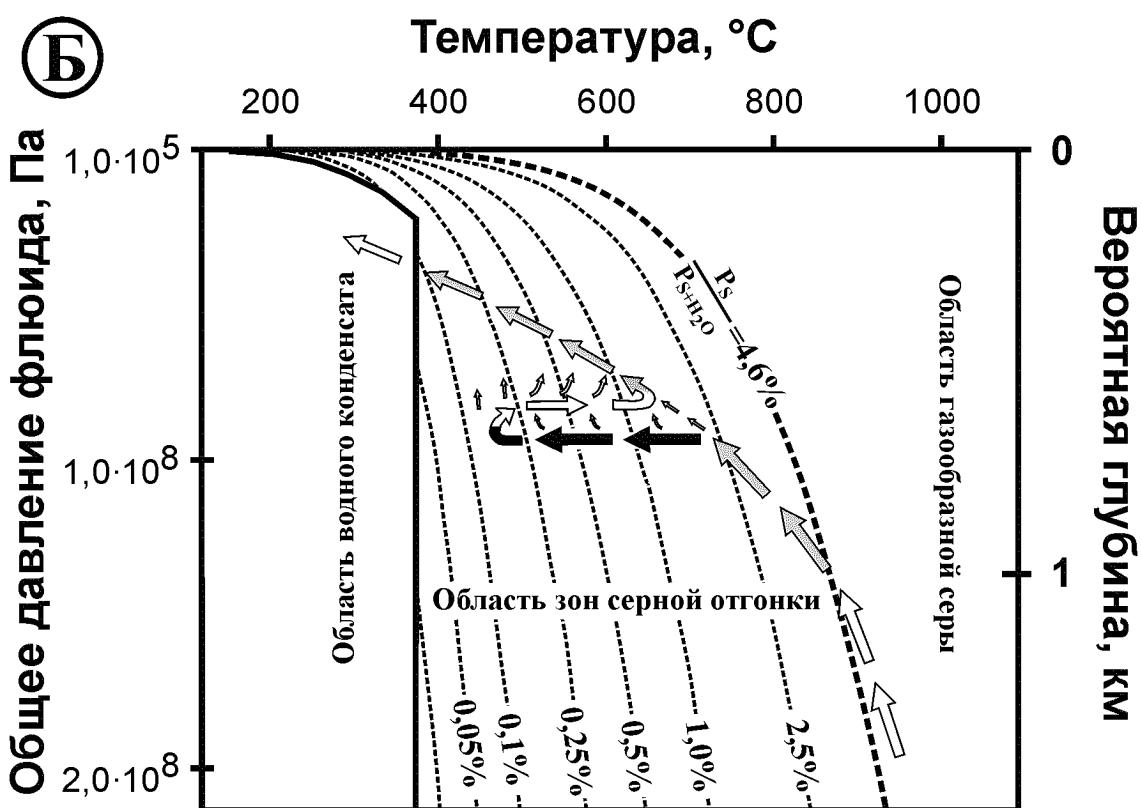
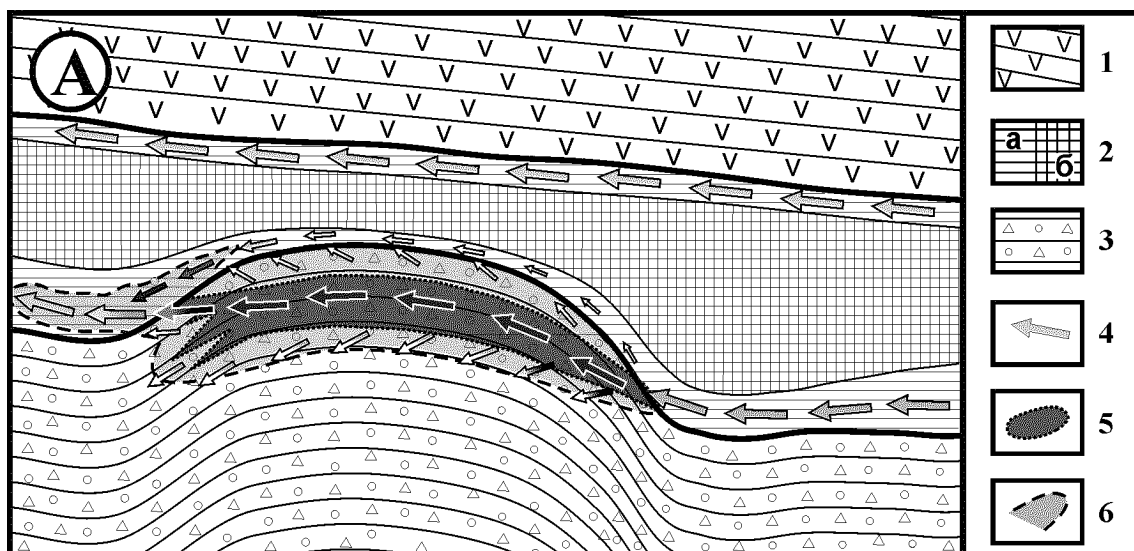


Рис. 6. Т-ловушка транзитная в формировании сульфидных руд первичной локализации в разрезе (А) и на РТ-диаграмме (Б). Усл. обозн. см. рис. 4.

Например, по нижней трассе диаграммы рис. 7 флюид входит в область зон сброса серы существенно ниже позиции ее критической точки К при исходном относительном давлении  $P_s/P_{\text{общее}} = 4,6\%$ . Эта трасса пересекает линию критической температуры там, где с этой линией смыкается относительная изобара  $P_s/P_{\text{общее}} = 1,0\%$ . Следовательно, в точке входа флюида в зону существования высокотемпературного серного конденсата относительное давление паров серы не может превышать уровень 1%.

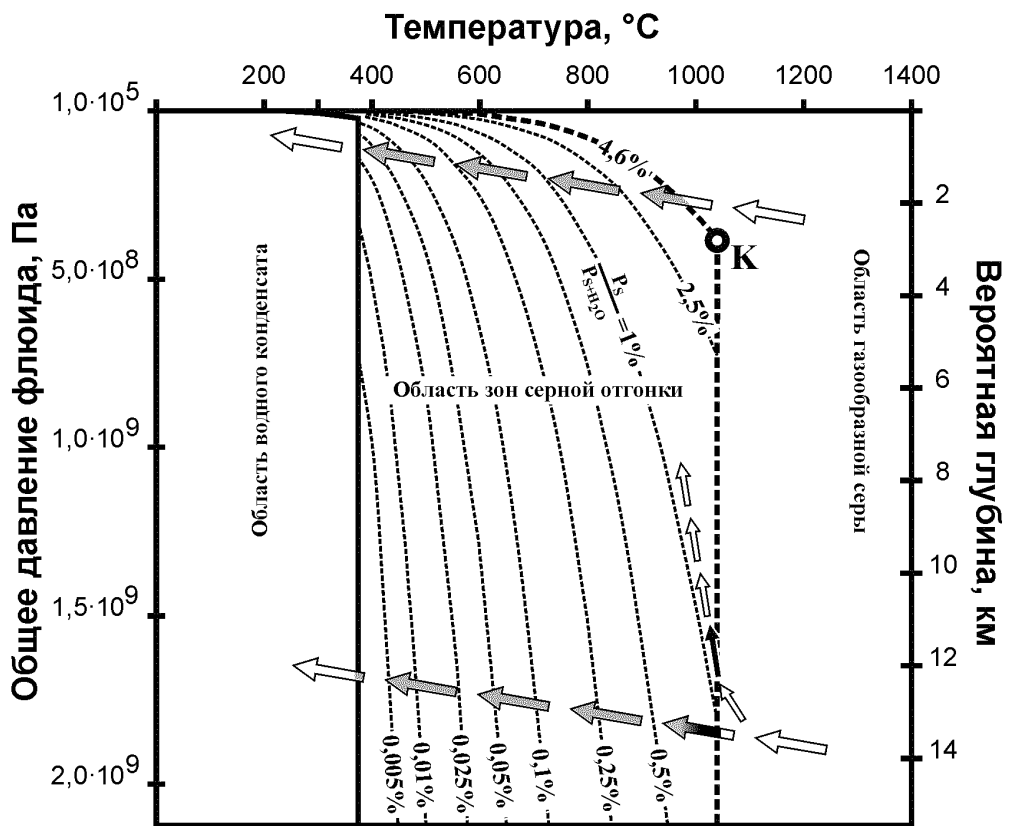
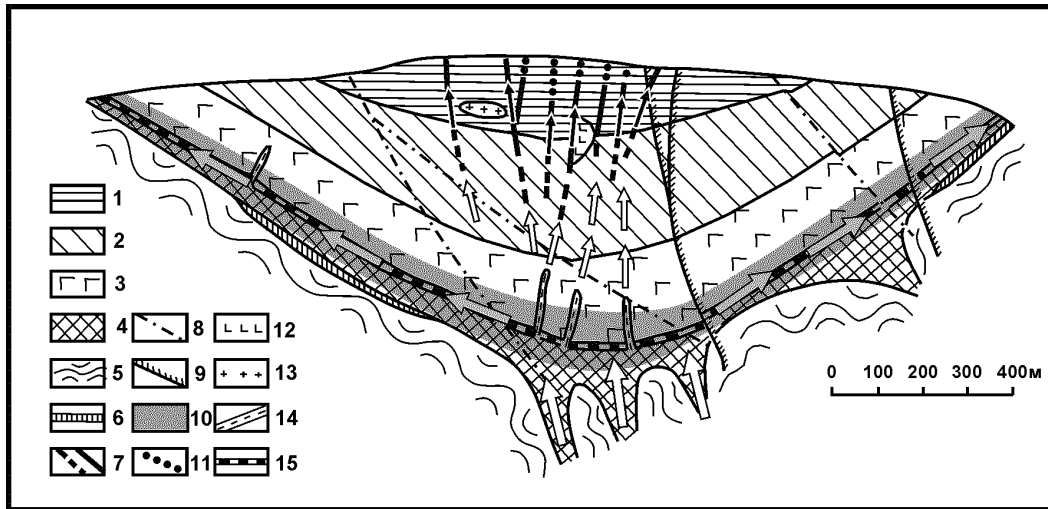


Рис. 7. Рудные жилы Мончегорского плутона как пример рудной ловушки критической температуры (К-ловушки). Стрелками показаны трассы движения флюидов в интрузиве и по полю РТ-диаграммы, плотность заливки соответствует интенсивности сульфидообразования.

Условные обозначения разреза (Карпов, 1959): 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 шлиры; 14 – габбро-норит-пегматиты; 15 – неравномерно-зернистый плагиоклазовый бронзитит с прослоями такситового гарцбургита и трахитоидного гиперстена



Поэтому, как только флюид пересечет линию критической температуры, сразу начинается массовый сброс серы в высокотемпературный конденсат. При этом флюид на входе в область зон серной отгонки сразу сбрасывает в высокотемпературный конденсат более 80 % серы. При этом вынос серы в зону водного конденсата сравнительно мал.

Все это обуславливает определенную специфику магматического сульфидообразования. С увеличением глубины постепенно нивелируется роль рудных Р-ловушек. Это происходит потому, что барический эффект ловушки зависит от относительного возрастания давления. Чем больше глубина флюидной трассы, тем пропорционально большее погружение требуется для достижения одного и того же эффекта в сбросе серы. Закалочные Т-ловушки с глубиной также теряют свое значение, так как основная масса серы начинает сбрасываться при пересечении линии критической температуры, что также можно рассматривать как своеобразную **рудную ловушку критической температуры (К-ловушку)**. В качестве наиболее характерного примера подобной К-ловушки можно привести образование рудных жил Мончегорского плутона.

Особенности строения Мончегорского плутона позволяют считать, что на завершающих стадиях его формирования основным горизонтом-флюидопроводником являлся расположенный в основании интрузива горизонт, представленный неравномерно-зернистым плагиоклазовым бронзититом с прослоями такситового гарцбургита и трахитоидного гиперстенита. Глубина залегания этого горизонта на момент формирования неизвестна. Поэтому для определенности будем считать, что в данном случае флюид эволюционировал по нижней трассе диаграммы на рис. 7. Сброс серы и последующее сульфидообразование происходили здесь рассредоточенно, во многом контролируясь локальными флуктуациями в распределениях температуры и плотности флюидного потока. Скорее всего, наиболее богатое прожилково-вкрапленное и шлировое оруденение соответствует участкам горизонта-флюидопроводника, на которых наиболее мощные струи флюидного потока претерпевали переход в область температур ниже 1040 °С. Однако строго обосновать это не представляется возможным.

По-иному обстоит дело с субвертикальными рудными жилами. Тесная генетическая связь жил с тектоническими зонами, расположенными в осевой части мульды, их ассоциация и взаимосвязь с пегматоидными породами позволяют считать 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 РТ-диаграмме.

Сконцентрированный характер прохождения флюидов по трещинам и крутизна эволюционной трассы флюида на РТ–диаграмме позволяют четко отождествить момент входа флюида в зону действия К–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 РТ–диаграмме ориентирован более круто по сравнению с относительной изобарой давления паров серы, примыкающей к линии критической температуры в точке ее пересечения трассой флюида. 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 вышеописанных рудных жил контролируется расположением в интрузиве изотермической поверхности 1040 °С. Таким образом, субвертикальные рудные жилы Мончегорского плутона обязаны своим происхождением исключительно эффекту рудной К–ловушки, а зона действия этой ловушки фиксируется проявлениями высокотемпературного отжига сульфидов на верхних и нижних окончаниях жил.

## **Защищаемое положение II**

**Эволюция газовой фазы высокотемпературных эндогенных флюидов приводит к образованию сульфидных месторождений Норильского, Мончегорского, Печенгского и Аллареченского типов, а также сульфидных месторождений, ассоциирующих с коматиитами.**

Особенности образования сульфидных месторождений Норильского и Мончегорского типов рассмотрены выше в качестве примеров действия рудных ловушек. Поэтому ниже мы остановимся на моделях образования сульфидных месторождений Печенгского и Аллареченского типов, а также сульфидных месторождений, ассоциирующих с коматиитами.

### ***Печенгские и Аллареченское месторождения***

Исходя из данных Г.И. Горбунова (Горбунов, 1968; Медно-никелевые..., 1985; Рудные..., 1974), условия образования магматических сульфидных месторождений Кольского полуострова отличались от Норильских месторождений двумя особенностями. Первой из них является более напряженный тектонический режим образования месторождений. Эта особенность формирования месторождений имела следующие последствия:

1. Автономизация материнских интрузивов на ранних стадиях их эволюции, т.е. пережим магмоподводящих каналов и изоляция интрузивов от зоны магматического питания.
2. Интенсивное трещинообразование на стадии преимущественной раскристаллизации интрузивов. Контролирующие флюидный поток тектонические зоны по мере падения температуры становились одновременно и зо-

нами интенсивного сульфидообразования.

3. Широкое развитие проявлений динамометаморфизма на финальных стадиях эволюции сульфидных месторождений.

Второй особенностью, отличающей условия образования рассматриваемых месторождений по сравнению с Норильскими месторождениями, является большая глубина, на которой происходило развитие рудообразующих процессов. В этом случае остывание интрузива до критической температуры серы приводит к его входу в область зон серной отгонки на больших глубинах по сравнению с позицией критической точки (рис. 8). Здесь стадия массового сульфидообразования имеет характерную особенность — по направлению к нижнему замыканию интрузивов интенсивность сульфидообразования существенно возрастает (в нашем примере с обобщенным интрузивом — с 12 до 52 % от всего флюидного потенциала серы, т.е. более чем в 4 раза). Эту своеобразную ситуацию можно рассматривать как рудную ловушку (РК-ловушку), представляющую собой комбинацию рассмотренных ранее барической рудной ловушки (Р-ловушки) и ловушки критической температуры (К-ловушки).

Характер сульфидного оруденения рассматриваемых месторождений во многом определяется взаимным соотношением температуры внедрения интрузива  $T_v$ , температуры преимущественной раскристаллизации его пород  $T_p$  и критической температуры серы  $T_k$ . Здесь возможны следующие варианты:

1. Классический ликвационный вариант —  $T_v > T_k > T_p$ . Непосредственно после внедрения интрузив находится в состоянии, в котором возможна гравитационная дифференциация его вещества. В момент охлаждения до критической температуры происходит мгновенный сброс существенной части флюидной серы, т.е. срабатывает рудная РК-ловушка. Образовавшись, выделения сульфидной жидкости активно включаются в гравитационную дифференциацию массива, обогащая его донную часть. Жильное сульфидообразование имеет второстепенное значение и начинается с охлаждения интрузива до температуры преимущественной раскристаллизации пород. Это наиболее распространенный вариант развития рудоносных печенгских интрузивов.
2. Аллареченский вариант —  $T_v > T_p > T_k$ . На линию критической температуры (в зону действия РК-ловушки) материнский интрузив входит уже в состоянии преимущественной раскристаллизации. Поэтому первоначально и наиболее интенсивно процессы сброса серы и сульфидообразования протекают на участках выхода летучих по зоне разлома во вмещающие породы (К- и Т-ловушки). Лишь после охлаждения массива до критической температуры серы за счет остаточных флюидов происходит формирование вкрапленных руд по всему объему интрузива за счет действия РК-ловушки. При этом дополнительное обогащение придонных частей массива за счет гравитационного осаждения сульфидной жидкости невозможно.

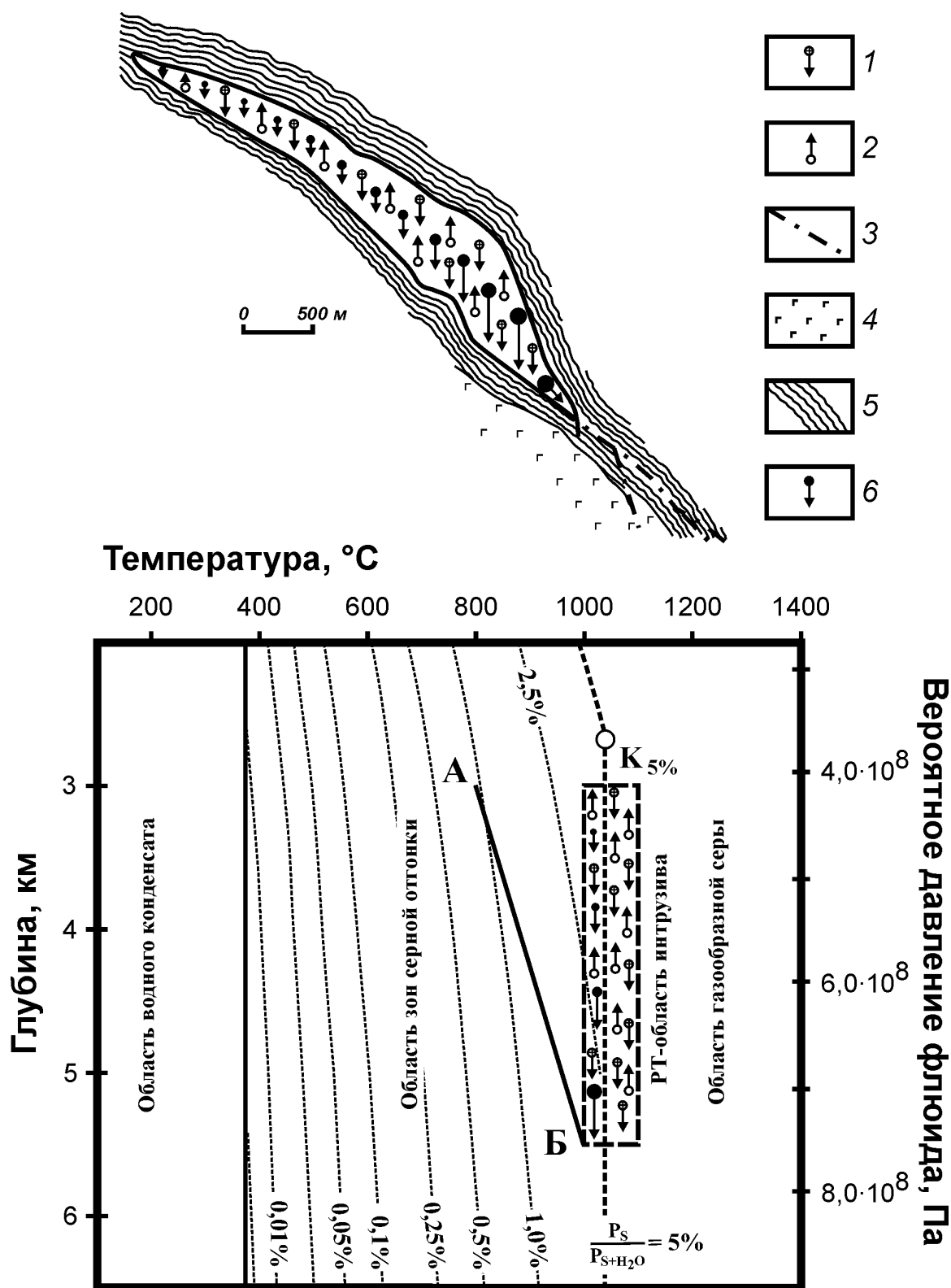


Рис. 8. Эволюция обобщенного материнского интрузива Печенгских месторождений на магматическом этапе — стадия массового сульфидообразования (ликвационная):

АБ — линия преимущественного завершения кристаллизации магматического расплава; 1–2 — гравитационная дифференциация: осаждение тяжелых (1) и всплытие легких (2) компонентов магмы; 3 — тектонические нарушения; 4 — габбро; 5 — филлиты; 6 — образование и осаждение сульфидов (размер соответствует интенсивности процесса)

3. Вариант безрудных интрузивов —  $T_k > T_b > T_p$ . В случае, когда температура внедрения выше температуры преимущественной раскristаллизации, но ниже критической температуры серы, возникает своеобразная ситуация «безрудности», при которой формируются интрузивы, в которых рудная минерализация или отсутствует, или представлена очень бедными рудами. В этом случае РК-ловушка срабатывает до внедрения, т.е. еще в магмоподводящей зоне. И там же протекает гравитационная отсадка образовавшейся сульфидной жидкости. Из-за совместного действия этих двух причин происходит внедрение магматического тела с низким потенциалом серы и убогой сульфидной вкрапленностью. Это и приводит к образованию безрудных массивов, в том числе серпентинитовых, которые вполне обычны в разрезах Печенгских месторождений.
4. Варианты тектонического внедрения ( $T_p > T_b$ ). Ситуацию, в которой температура внедрения ниже температуры преимущественной раскristаллизации пород, мы не рассматриваем, так как в этом случае речь идет уже не о магматической инъекции, а о тектонических перемещениях блоков только что раскristаллизованных пород.

Дальнейшее сульфидообразование протекает из остаточных магматогенных флюидов по мере их охлаждения. При этом большую роль играют тектонические трещины, выполненные сульфидным расплавом. С одной стороны, они являются путями миграции и отвода за пределы массива газообразных соединений, а следовательно, и зонами продолжающегося сульфидообразования. С другой стороны, скопления сульфидного расплава служат источником дополнительного флюидного потенциала серы, обеспечивающего образование богатой метасоматической вкрапленности как в материнских, так и во вмещающих породах.

При последующем снижении температуры процессов в материнских породах и сульфидных обособлениях четко фиксируется эволюция флюидного режима, связанная с выходом флюидов на барьер нейтрализации, формированием волны кислотности и ее последующей нейтрализации с повышением значения углекислоты на завершающих стадиях эволюции.

В конечном счете, имеющиеся материалы по Аллареченскому и Печенгским месторождениям хорошо согласуются с концепцией серного перехвата. С другой стороны, наблюдения, описания и выводы Г. И. Горбунова (Горбунов, 1968; Медно-никелевые..., 1985; Рудные..., 1974) позволяют подтвердить общую схему эволюции эндогенных флюидов и существенно конкретизировать вещественные проявления этой эволюции на примере руд и материнских интрузивов этих месторождений.

### **Сульфидные месторождения, ассоциирующие с коматиитами**

Имеющиеся данные по сульфидным рудам коматиитовых ассоциаций типа купола Камбалда наилучшим образом соответствуют модели Росса–Хопкинса,

предполагающей излияние сульфидных и сульфидно-силикатных лав на начальных стадиях цикла коматиитовых извержений. Лишь «отсутствие реального механизма образования сульфидно-силикатных коматиитовых магм в малоглубинных условиях» (Золотухин и Малюк, 1985, с. 66) вынуждает исследователей привлекать для объяснения их формирования довольно сложные и неочевидные модели с использованием глубинных петрологических процессов. В рамках концепции серного перехвата механизм формирования сульфидных и сульфидно-силикатных лав в ассоциации с коматиитовым вулканизмом оказывается не только реальным, но и вполне естественным.

Как отмечают исследователи (Росс и Хопкинс, 1980), сочетание наблюдаемых и аналитических данных свидетельствует о глубоководных условиях океанического дна при последовательном образовании разреза Камбалды. Контактные сульфиды являются первым выражением вулканической деятельности, которая сформировала большую часть перекрывающей ультраосновной толщи. Расположение горизонтов никеленосных сульфидов, осадочных пород и специфических ультраосновных толщ свидетельствует о наличии локального трещинного источника для части этой ультраосновной толщи. Будем считать эти данные исходными и рассмотрим механизм формирования сульфидных расплавов в ассоциации с малоглубинными ультраосновными расплавами. Ради определенности будем считать, что выход трещины, из которой происходят извержения коматиитовых расплавов на океаническое дно, расположен под слоем воды мощностью 4 км. Для субмаринных условий на диаграмме эволюции флюида характерно появление области с «запрещенными» РТ-условиями. Попадание фигуративной точки флюида в эту область требует перевода в надкритическое парообразное состояние всей перекрывающей толщи океанической воды. Поэтому температура флюида в точке его выхода на поверхность дна океана не может существенно превышать критическую температуру воды.

С другой стороны, будем считать, что ультраосновная магма достигает солидуса при температуре 1300 °С. При более низких температурах в пределах эруптивной трещины возникает зона закалки ультраосновных расплавов. Выделяющиеся при кристаллизации магматического расплава летучие благодаря своей высокой мобильности мигрируют вверх по эруптивной трещине. В результате они отрываются от магматической колонны, а их позиция на РТ-диаграмме смещается в область все более низких давлений и температур. Конечным пунктом их эволюции является выход на поверхность дна океана с температурой, близкой к критической температуре воды.

В связи с вышесказанным проанализируем модельную схему (рис. 9), согласно которой ультраосновная магма постепенно поднимается по этой трещине из глубин Земли. В состоянии, соответствующем рис. 9, А, ультраосновная магма с температурой 1300 °С находится на глубине около 3 км под поверхностью океана. Над этим горизонтом эруптивная трещина выполнена продуктами закалки и раскристаллизации расплава, т.е. своеобразной лавовой пробкой. Выделяющиеся из магмы летучие мигрируют по эруптивной трещине сквозь зону закалки.

Если исходить из линейности трассы РТ–эволюции флюида после его отрыва от материнского расплава (как это показано на диаграмме рис. 9, А), то критической температуры серы 1040 °С флюид достигает лишь на глубине около 2 км под поверхностью океана. Именно здесь происходит интенсивный сброс серы и сульфидообразование. Вполне понятно, что образующийся сульфидный расплав, несмотря на его высокую плотность, не может утонуть в более легком коматиитовом расплаве и переместиться в придонную часть магматического очага, так как от расплава он отделен практически километровой толщей твердых пород зоны закалки.

На схеме рис. 9, Б показано дальнейшее развитие этого процесса. В результате экструзии коматиитовой магмы граница ультраосновного расплава поднялась до уровня 2 км под поверхностью океана. Сульфидный расплав, формировавшийся на стадии А, оказывается уже на глубине 1 км под дном океана. Однако из-за более пологого наклона трассы РТ–эволюции флюида мигрирующие вверх по эруптивной трещине летучие входят в область зон серной отгонки ниже уровня сульфидного расплава стадии А. Поэтому новая зона интенсивного сульфидообразования отделена от магмы примерно 700-метровым интервалом безрудных пород лавовой пробки.

Дальнейшее поднятие магматической колонны по эруптивной трещине приводит к началу излияний сульфидных лав (рис. 9, В). При этом верхняя часть магматической колонны расположена примерно на километровой глубине под уровнем дна океана. Над ней, отделяясь уже 500-метровым интервалом безрудных пород, располагается зона интенсивного сульфидообразования. Из-за еще более пологого наклона трассы РТ–эволюции флюида сокращается не только интервал безрудных пород лавовой пробки, но и сама зона сульфидообразования в вертикальном сечении становится более компактной.

И, наконец, на схеме рис. 9, Г процесс показан на стадии извержений собственно коматиитовых лав, перекрывающих потоки первоначально преимущественно сульфидных, а затем сульфидно-силикатных лав с содержанием сульфидов от 20 до 65%. При остывании самих коматиитовых лав содержащиеся в них летучие пересекают РТ–условия зон серной отгонки в рассредоточенном состоянии, формируя по всему объему потока непромышленную сульфидную вкрапленность. В новом эруптивном цикле эта схема повторяется, формируя в разрезе месторождений сульфидные руды висячего бока.

При рассмотрении всех фаз схемы рис. 9 мы исходили из предположительно линейного профиля трассы РТ–эволюции флюида. Любой другой профиль требует дополнительного обоснования. Однако суть вышесказанного не меняется при использовании профиля иной формы. Могут лишь слегка измениться в ту или иную сторону количественные оценки величины безрудного интервала закаленных пород. Неизменным остается тот факт, что солидус коматиитовых расплавов и РТ–условия зон серной отгонки отделены друг от друга температурным интервалом в первые сотни градусов.

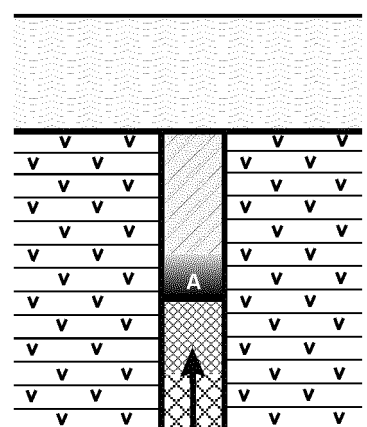
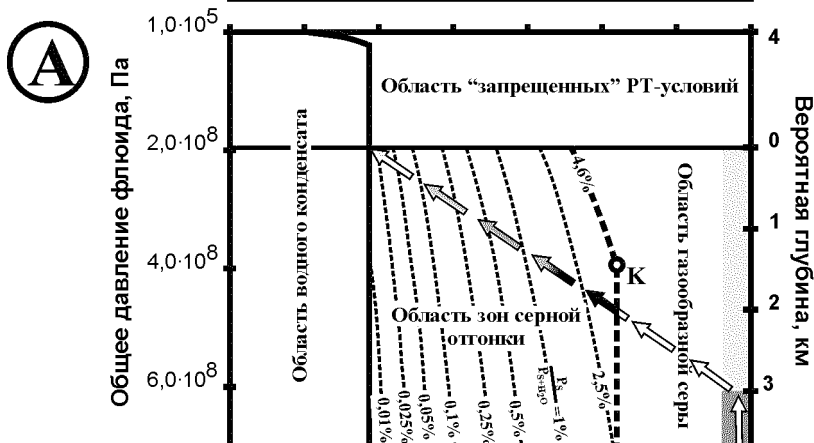
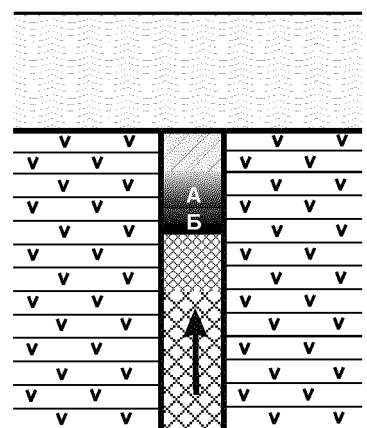
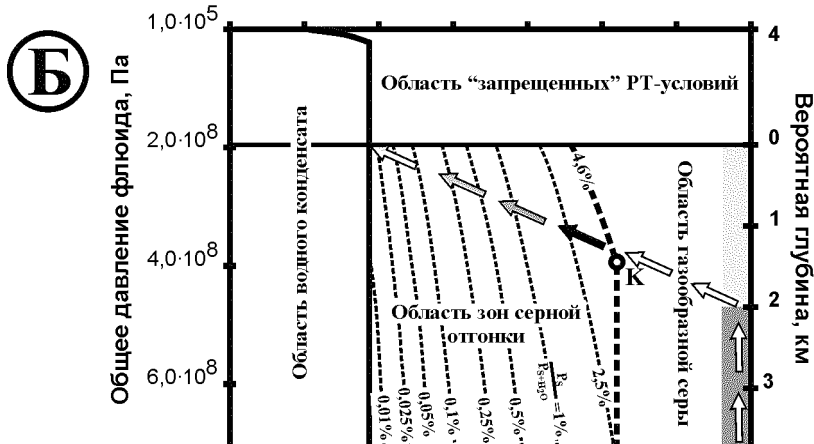
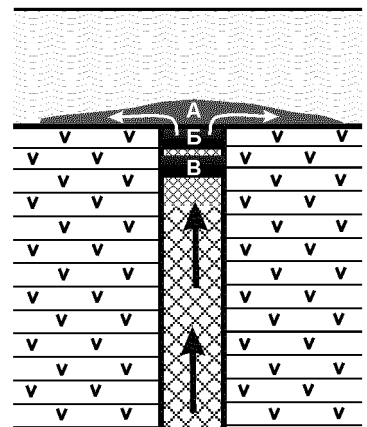
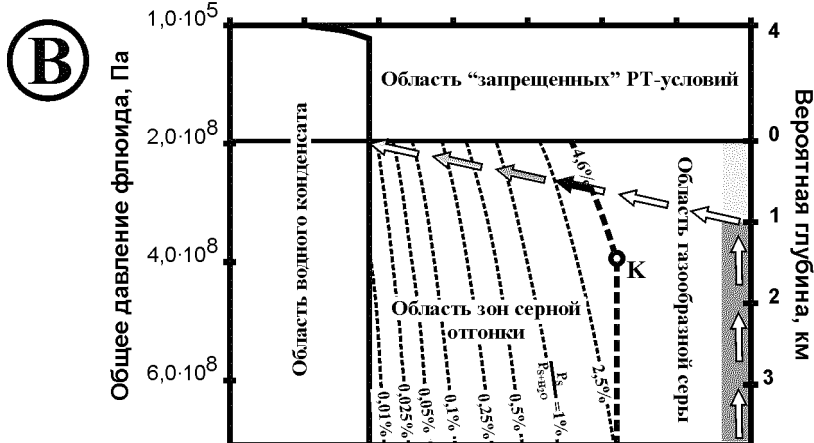
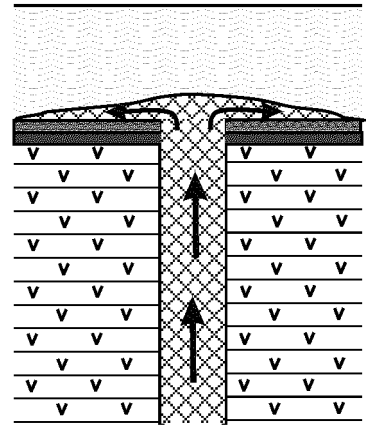
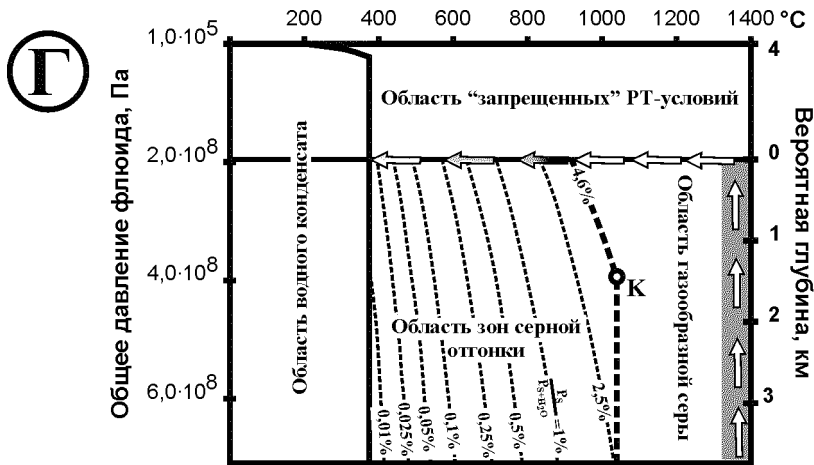
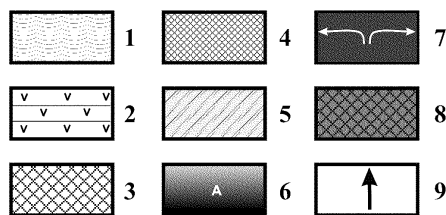




Рис. 9. Формирование коматиитовых сульфидных месторождений.

Условные обозначения разрезов: 1 — водная среда; 2 — базальты лежачего бока; 3 — коматиитовый расплав; 4 — зона закалки коматиитового расплава; 5 — эруптивная брекчия; 6 — зоны сульфидообразования; 7 — потоки сульфидов и направления их растекания; 8 — потоки сульфидно-силикатных лав; 9 — направление движения коматиитовой магмы



В этом интервале располагаются безрудные и практически твердые породы лавовой пробки, разделяющие коматиитовый и сульфидный расплавы. В эруптивном цикле коматиитовых извержений эти породы выполняют функции поршня, обеспечивающего опережающее извержение сульфидных и сульфидно-силикатных лав.

Таким образом, концепция серного перехвата вполне адекватно соответствует имеющимся данным по коматиитовым сульфидным месторождениям. Более того, она позволяет качественно улучшить известную схему Росса–Хопкинса, обосновывая как сам факт малоглубинного формирования сульфидных расплавов, так и возможность их излияния на начальных стадиях цикла коматиитовых извержений.

## Защищаемое положение III

**Серный перехват приводит к образованию оксидных магматических месторождений благодаря возможности метасоматической трансформации сульфидных рудных концентраций в оксидную форму с заменой серы на кислород и частичным изменением рудообразующего комплекса металлов.**

Существующее подразделение магматических месторождений на раннемагматические, ликвационные и позднемагматические с точки зрения концепции серного перехвата исчерпывающе соответствует трем различным вариантам соотношения температуры начала конденсации серы ( $T_k$ ) и температуры преимущественной раскристаллизации ( $T_p$ ) пород интрузива:

1. Вариант  $T_k > T_p$ . Сброс серы и массовое рудообразование происходят в присутствии достаточных количеств силикатного расплава, делающих возможным протекание процессов гравитационной дифференциации, в том числе осаждения образующегося рудного расплава. Этот случай соответствует образованию раннемагматических рудных концентраций.
2. Вариант  $T_k \approx T_p$ . Образование рудного расплава происходит в условиях, когда его осаждение под воздействием гравитации уже невозможно (силикатный расплав или практически отсутствует, или его вязкость слишком велика), но внутри интрузива под воздействием напряжений еще не начали формироваться разрывные нарушения и ослабленные зоны, по которым стало бы возможным перемещение остаточных флюидов. Этот слу-

чай в общепринятом подразделении соответствует образованию ликвационных рудных концентраций.

3. Вариант  $T_k < T_p$ . Образование рудного расплава происходит уже после того, как интрузив в зоне рудообразования переходит в состояние преимущественной раскристаллизации его пород. Здесь основные объемы рудного расплава образуются в пределах разрывных нарушений и ослабленных зон, по которым происходит преимущественная миграция летучих. Случай позднемагматических рудных концентраций.

Основное значение в образовании оксидных рудных концентраций имеет высокотемпературный отжиг сульфидного расплава, протекающий под воздействием высокотемпературных паров воды, доля которых резко возрастает на финальных стадиях раскристаллизации материнских массивов.

В рамках раннемагматического рудообразования в качестве примера рассмотрим физико-химическую модель формирования стратиформных оксидных руд Бушвельдского интрузива. Будем исходить из следующих положений. Мощность интрузива — 10 км. Ради определенности примем мощность перекрывающей толщи вмещающих пород 5 км, т.е. рассматриваемая часть интрузива в момент формирования находится на глубинах 5–15 км.

Как в предыдущих построениях, будем считать, что вероятный уровень флюидного давления пятикратно превышает литостатический эквивалент, что обеспечивает активное перемещение флюидных потоков как в пределах интрузива, так и их выход во вмещающие породы. Также будем считать, что максимальный потенциал серы в исходном магматическом расплаве соответствует среднему уровню для ультраосновных пород (табл. 1) и составляет 4,6 % от общего давления флюида. На рис. 10, А даны диаграмма и разрез интрузива в этом исходном состоянии.

Температурный профиль ( $T_p$ ) преимущественной раскристаллизации пород интрузива принят такой же, что и для печенгских интрузивов — 1000 °С для нижней ультраосновной части разреза и 800 °С для верхней габброидной. Температурный профиль магматического расплава ( $T_m$ ) принят исходя из тех соображений, что в кровле и подошве интрузива он должен непосредственно смыкаться с профилем преимущественной раскристаллизации, т.к. здесь образуются зоны закаленных пород. Максимальные температуры магматического расплава значения не имеют. Важно то, что они заведомо и существенно превышают температуры начала конденсации серы ( $T_k$ ). Ради определенности на диаграмме рис. 10, А профиль  $T_m$  ограничивается предельным значением температуры магматического расплава 1300 °С. Последним соображением, которое учтено при построении этого профиля, является его обязательная вертикальная асимметрия. Это обусловлено более высоким теплоотводом с кровли интрузива по сравнению с его подошвой.

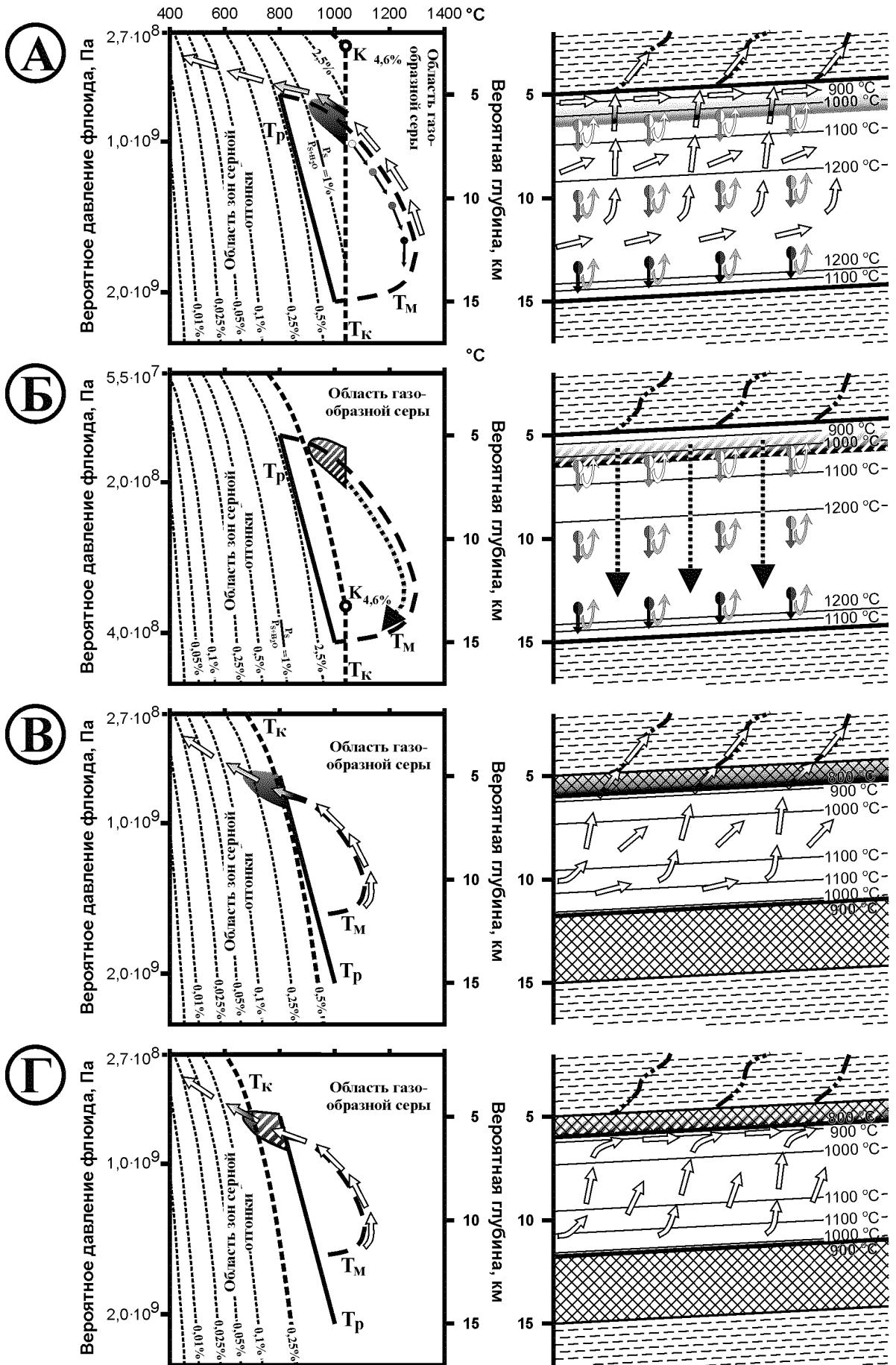
Из диаграммы рис. 10, А следует, что в исходном состоянии интрузива профиль температур начала конденсации серы практически соответствует линии ее критической температуры. Выделяющиеся из расплава магматогенные

летучие эволюционируют по температурному профилю  $T_m$  и при пересечении изотермической поверхности  $1040^\circ\text{C}$  оказываются в условиях интенсивного сброса серы. Здесь происходит массовый сброс более половины всей серы, транспортируемой флюидом. Поскольку температура массового сброса существенно превышает температуру преимущественной раскristаллизации пород на данном уровне, то внутри интрузива в его верхних частях образуется постоянная висячая зона серной отгонки и массового сульфидообразования. Постепенный сброс серы с уменьшающейся интенсивностью продолжается и в условиях более низких температур, т.е. в более высоких горизонтах. Поэтому четкой верхней границы зона сброса серы не имеет, постепенно затухая к кровле интрузива.

По мере сульфидизации серного расплава происходит нарастание его плотности и начинается процесс осаждения. При этом как только обособления серно-сульфидного расплава уходят глубже нижней границы зоны отгонки, так сразу они оказываются в условиях воздействия высокотемпературного апорасплавного метасоматоза. Можно условно выделить три стадии этого процесса. На первой стадии происходит удаление из серно-сульфидного расплава остаточной серы, которая улетучивается и возвращается в зону отгонки. Остаточный расплав становится чисто сульфидным.

На второй стадии начинается собственно апорасплавный метасоматоз сульфидных соединений. Сера частично замещается на кислород из состава высокотемпературных паров воды и в составе летучих соединений удаляется из расплава. Частично меняется комплекс рудообразующих металлов. Поскольку метасоматоз обусловлен погружением во все более высокотемпературные области, то возрастает вероятность, что образующиеся оксидные соединения также выделяются в расплавленном состоянии, образуя вместе с остаточными сульфидами сульфидно-оксидный расплав. На третьей стадии завершается удаление серы из состава рудного расплава, и по мере концентрации оксидных соединений происходит кристаллизация минералов шпинелевой группы (в данном случае хромитов). На разрезе рис. 10, А эти стадии условно показаны изменением заливки условных обозначений осаждающегося рудного расплава. В конечном счете, образованные в ходе апорасплавного метасоматоза и осажденные хромиты образуют выдержанный стратиформный горизонт у дна магматической камеры.

Повторяемость подобных горизонтов тесно связана с автоколебательным режимом формирования магматических тел. Природа автоколебаний в магматическом процессе и их полицикличность автором были рассмотрены ранее [8]. В рамках нашего анализа имеет значение тот факт, что флюидное давление в интрузиве может существенно варьировать относительно своего среднего уровня, в качестве которого мы приняли пятикратный литостатический эквивалент. Кратковременные повышения флюидного давления влияют на зоны сброса серы лишь постольку, поскольку вызывают более интенсивный сброс серы и сульфидообразование на изотерме критической температуры.



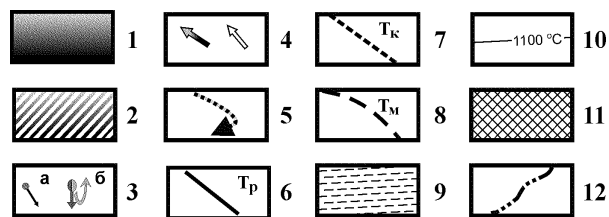


Рис. 10. Возможная схема формирования стратифицированных рудных месторождений Бушвельдского интрузива:

1 — зоны образования сульфидного расплава; 2 — апорасплавный метасоматоз с переводом сульфидных соединений в оксидные; 3 — осаждение сульфидного расплава с его одновременным метасоматозом соответственно на диаграмме (а) и разрезе (б); 4 — трассы движения магматогенных флюидов (плотность заливки соответствует интенсивности сульфидообразования); 5 — осаждение и метасоматоз всей зоны сульфидообразования в целом; 6 — профиль температуры ( $T_p$ ) преимущественной раскристаллизации пород интрузива; 7 — профиль температуры ( $T_k$ ) начала конденсации паров серы; 8 — профиль температуры ( $T_m$ ) магмы в пределах интрузива; 9 — вмещающие породы; 10 — изотермы магматического расплава; 11 — породы интрузива в состоянии преимущественной раскристаллизации; 12 — предполагаемые нарушения в кровле интрузива, по которым происходит отвод летучих

Ситуацию сброса давления до его литостатического уровня иллюстрирует рис. 10, Б. В этом случае, во-первых, температурный профиль  $T_k$  резко смещается из своего первоначального положения к кровле интрузива. Во-вторых, флюидная активность в интрузиве резко падает и зона отгонки серы в новом положении практически не формируется. Старая же зона отгонки оказывается сразу в неравновесных условиях и попадает под воздействие процессов апорасплавного метасоматоза. Избыток серного конденсата возгоняется и в составе летучих соединений возвращается в зону отгонки, тогда как остаточный рудный расплав под воздействием силы тяжести осаждается на дно магматической камеры, одновременно подвергаясь метасоматозу.

Повторное нарастание давления вновь приводит к возникновению на старом месте новой зоны образования рудного расплава, а последующий рост ведет ко все более концентрированному и массовому сбросу серы с сопутствующим интенсивным сульфидообразованием. Тем самым повторяется ситуация, изображенная на рис. 10, А. Новый сброс давления опять приводит к ситуации, показанной на рис. 10, Б. Тем самым автоколебательный режим формирования отражается в прерывистости рудообразующего процесса и, далее, в перемежаемости рудных и безрудных осадков на дне магматической камеры. Изменения флюидного давления оказывают глобальное воздействие в пределах всего интрузива. Поэтому возобновление или прекращение рудообразования в всяких зонах серной отгонки происходит практически одновременно по всей площади интрузива. Отсюда следует выдержанность чередования рудных хромитовых и безрудных слоев, наблюдающаяся в Бушвельдском интрузиве на огромных расстояниях.

По мере завершения кристаллизации нижней ультраосновной части массива ситуация несколько меняется. Здесь начинает сказываться тот двойной

эффект прогрессирующего снижения парциального давления паров серы, который уже был рассмотрен выше в разделе «Постсульфидное оксидообразование». Следует подчеркнуть, что речь идет именно об относительных, а не об абсолютных значениях содержания серы, о повышенной обводненности флюида, выделяющегося на этой стадии.

Сами абсолютные содержания флюидной серы меняются незначительно. Перейдя в состав сульфидов в зоне образования рудного расплава, сера в процессах апорасплавного метасоматоза вновь полностью освобождается и опять переходит в состав флюида, а затем вновь конденсируется в зоне отгонки и опять вступает в реакции с образованием рудного расплава. Благодаря подобному рециклингу одно и то же сравнительно небольшое количество флюидной серы может принять участие в образовании достаточно больших объемов оксидных руд.

Тем не менее происходящее снижение относительного давления паров серы приводит к тому, что зона отгонки и сульфидообразования все больше начинает приближаться к линии преимущественной раскristализации пород интрузива и, соответственно, к потолку магматической камеры (рис. 10, В). Осаждение образующегося рудного расплава в этом случае практически не происходит. Этому препятствуют малое количество и сравнительно высокая вязкость магматического расплава вблизи линии преимущественной раскristализации (профиль **Гр**). Осаждение может блокироваться и всплывающими, и накапливающимися в вязкой прикровельной области кристаллическими фазами (например, плагиоклазом). Медленное оседание сульфидных концентраций в вязком силикатном расплаве приводит к тому, что процесс их апорасплавного метасоматоза завершится задолго до того, как они успеют удалиться от зоны первичного рудообразования на сколько-либо значительное расстояние. Образующиеся оксидные соединения в условиях сравнительно низких температур (согласно нашей диаграмме, на рис. 10, В — порядка 800 °С) выделяются заведомо в твердом состоянии, в зависимости от условий создавая скрытно или явно кристаллические структуры. В результате на месте легкоплавкого и мобильного сульфидного расплава формируется жесткий каркас оксидной рудной минерализации.

Если сульфидный расплав сам по себе является прекрасным флюидо-проводником, то всякий горизонт рудных оксидов оказывается серьезным препятствием на пути перемещающихся флюидов (рис. 10, Г). В результате у подошвы рудных оксидных горизонтов образуются повышенные концентрации магматогенных летучих. Естественным следствием этого является «ржавая» поверхность нижних контактов, столь характерная для титаномагнетитовых слоев Бушвельда, а также повсеместные следы гидротермальных изменений, наиболее характерные для анортозитов, залегающих непосредственно под магнетититовыми пластами.

По сути на поздних стадиях развития интрузива происходит как бы впаивание зоны рудообразования в близкие к раскristализации породы по-

толка магматической камеры. Как и на начальных стадиях, прерывистость протекания рудообразующего процесса полностью контролируется автоколебательной изменчивостью флюидного давления. Однако выдержанность верхних рудных горизонтов на обширных площадях интрузива обусловлена уже не столько осаждением рудных концентраций (которое из-за вязкости расплава было незначительным), сколько приуроченностью рудообразования к положению в пределах интрузива определенных изотермических поверхностей.

В принципе нельзя исключить и возможность частично синхронного образования верхних и нижних рудных горизонтов. Нижняя часть зоны серного перехвата может осаждаться, тогда как верхняя часть — оставаться в висячем положении и впаиваться в уже раскристаллизованные породы. Важно лишь подчеркнуть общую тенденцию, согласно которой висячая зона сульфидообразования все больше прижимается к потолку магматической камеры, поэтому соотношение осажденных и висячих руд должно с течением времени измениться в пользу последних.

Как уже отмечалось, с точки зрения концепции серного перехвата ликвационные и позднемагматические рудные концентрации отличаются друг от друга лишь по условиям позиционирования на РТ-диаграмме. Ликвационные рудные концентрации образуются в условиях, близких к состоянию преимущественной раскристаллизации ( $T_k \approx T_p$ ), т.е. когда вязкость образующегося силикатного расплава уже достаточно велика, чтобы воспрепятствовать пассивному осаждению образующегося рудного расплава, но еще слишком мала для возникновения в интрузиве ослабленных зон и разрывных нарушений, по которым мог бы мигрировать мобильный расплав сульфидов. В свою очередь, позднемагматические рудные концентрации формируются уже в состоянии преимущественной раскристаллизации пород интрузива ( $T_k < T_p$ ). Поэтому сульфидный расплав образуется уже при перемещении летучих по ослабленным зонам и разрывным нарушениям, в пределах которых отчасти может мигрировать и самостоятельно.

Если условия позиционирования ликвационных и позднемагматических рудных концентраций существенно отличаются, то схема апорасплавного метасоматоза для них примерно одинакова и в виде варианта для позднемагматических рудных концентраций представлена на рис. 11. Суть этой схемы мы уже рассматривали выше и поэтому здесь ограничимся лишь краткой характеристикой. После образования в зоне серной отгонки сульфидного расплава (см. рис. 11, А) на волне прогрессивного нарастания обводненности постмагматических флюидов происходит быстрое снижение относительного давления паров серы (при этом абсолютные содержания серы и ее летучих соединений могут даже возрасть).

В результате процесс сброса серы перемещается на уровень более младших изобар, т.е. на РТ-диаграмме эволюции флюида резко перемещается в область более низких температур, тогда как и образовавшиеся ранее рудные концентрации, и проходящий по ним флюид сохраняют прежнюю температуру. В этих условиях состояние сульфидного расплава становится

крайне неравновесным и происходит его высокотемпературный отжиг с образованием оксидной минерализации (см. рис. 11, Б).

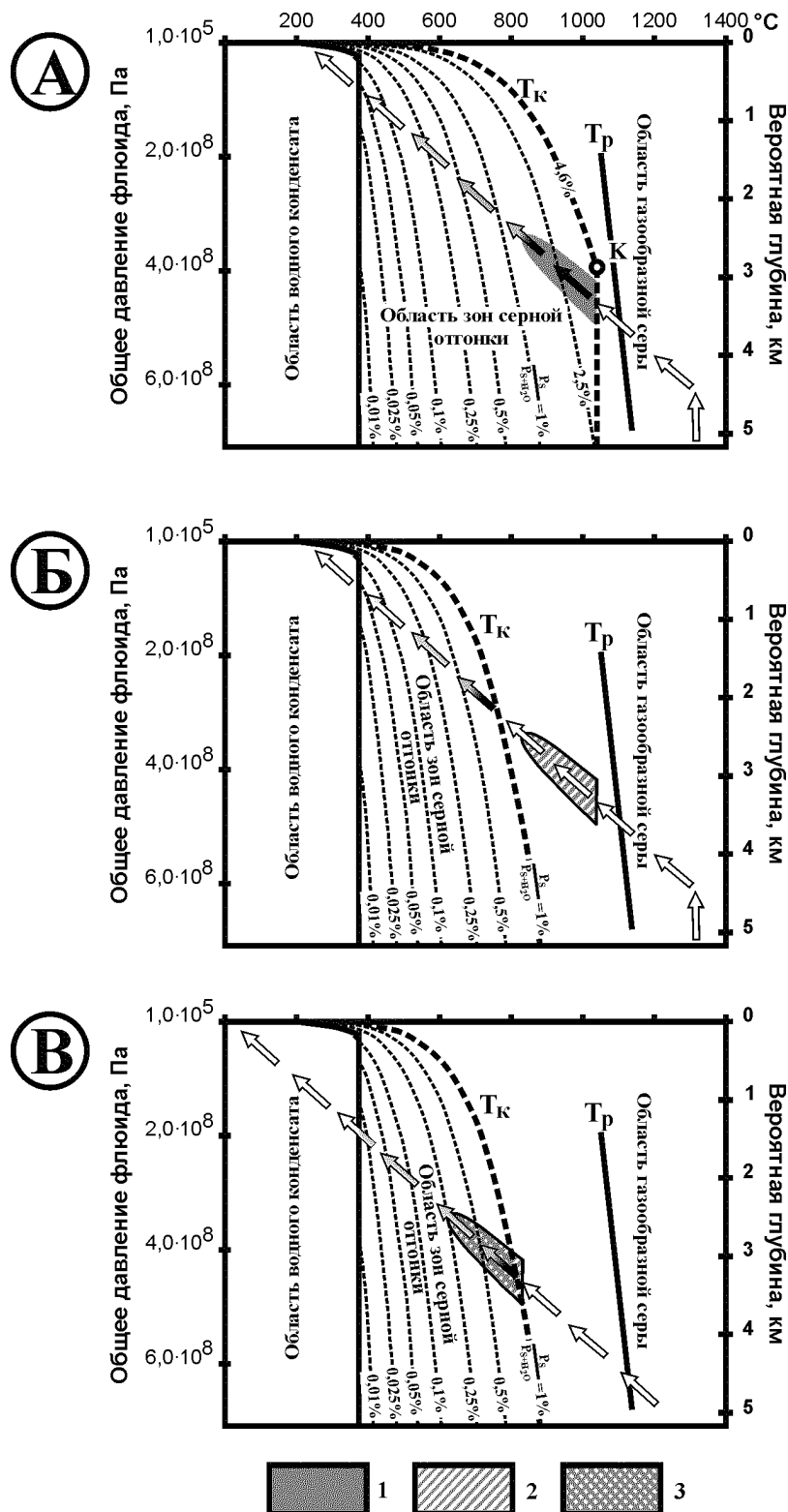


Рис. 11. Формирование позднемагматических оксидных рудных концен-  
траций ( $T_p > T_k$ ):

1 — зона образования сульфидного расплава; 2 — зона апорасплавного метасоматоза и формирования оксидной рудной минерализации; 3 — зона формирования низкотемпературной сульфидной минерализации



В том случае, если в остывающем интрузиве происходит повторный вход флюидов в область зон серной отгонки (см. рис. 11, В) происходит повторное образование сульфидного расплава и, соответственно, более поздней низкотемпературной сульфидной минерализации, столь характерной для медно-титаномагнетитовых месторождений Волковского типа. Естественно, пути миграции флюидов в пределах интрузива с течением времени и остыванием интрузива могут меняться. Это некоторое несовпадение флюидных трасс на разных стадиях эволюции интрузива и приводит к некоторому несовпадению зон титаномагнетитовой и медно-сульфидной минерализации в пределах Волковского месторождения.

Образование ликвационных оксидных руд отличается от приведенной схемы только на стадии А (см. рис. 11) и лишь тем, что первичная зона серной отгонки и сульфидообразования непосредственно позиционируется на профиле **Гр**. Ликвационные оксидные рудные обособления наиболее характерны для хромитовых месторождений. Здесь они представлены так называемыми нодулярными рудами.

Перейдем к рассмотрению модели формирования железорудных эффузивов типа вулкана Лако или Холзунского месторождения. Принципиальное значение для формирования сульфидного или оксидного типа рудных эффузивов имеет не столько их приуроченность к совершенно различным магматическим породам, сколько барические условия формирования: глубоководные — для сульфидных лав коматиитовых ассоциаций и поверхностные или мелководные — для железорудных эффузивов. Если взять схему формирования сульфидных лав (см. рис. 9) и убрать с нее воздействие океанической водной толщи, то мы автоматически получаем схему формирования оксидной рудной магмы в субвулканических условиях (рис. 12). Действительно, при этом исчезает нагрузка толщи океанической воды и проявляется резкий отход зон серной отгонки от критической температуры серы в сторону более низких температур в приповерхностных условиях. В частности, относительная изобара серы для исходного давления ее паров в 4,6 % выходит на поверхность при температуре всего около 285 °С, тогда как на этой же изобаре на глубине 3 км сброс серы начинается сразу по достижении температуры 1040 °С. Исчезает обязательная привязка конечного пункта эволюции флюидов к критической температуре воды при их выходе на дно океана. С подъемом магматической колонны без всяких искажений происходит и подъем температурного профиля отделяющихся от расплава магматогенных флюидов. В результате на нашей схеме по мере приближения магматического расплава к земной поверхности происходит повышение и температуры газовых выделений. Эта ситуация, отображенная на схеме рис. 12, вполне обычна для действующих вулканов.

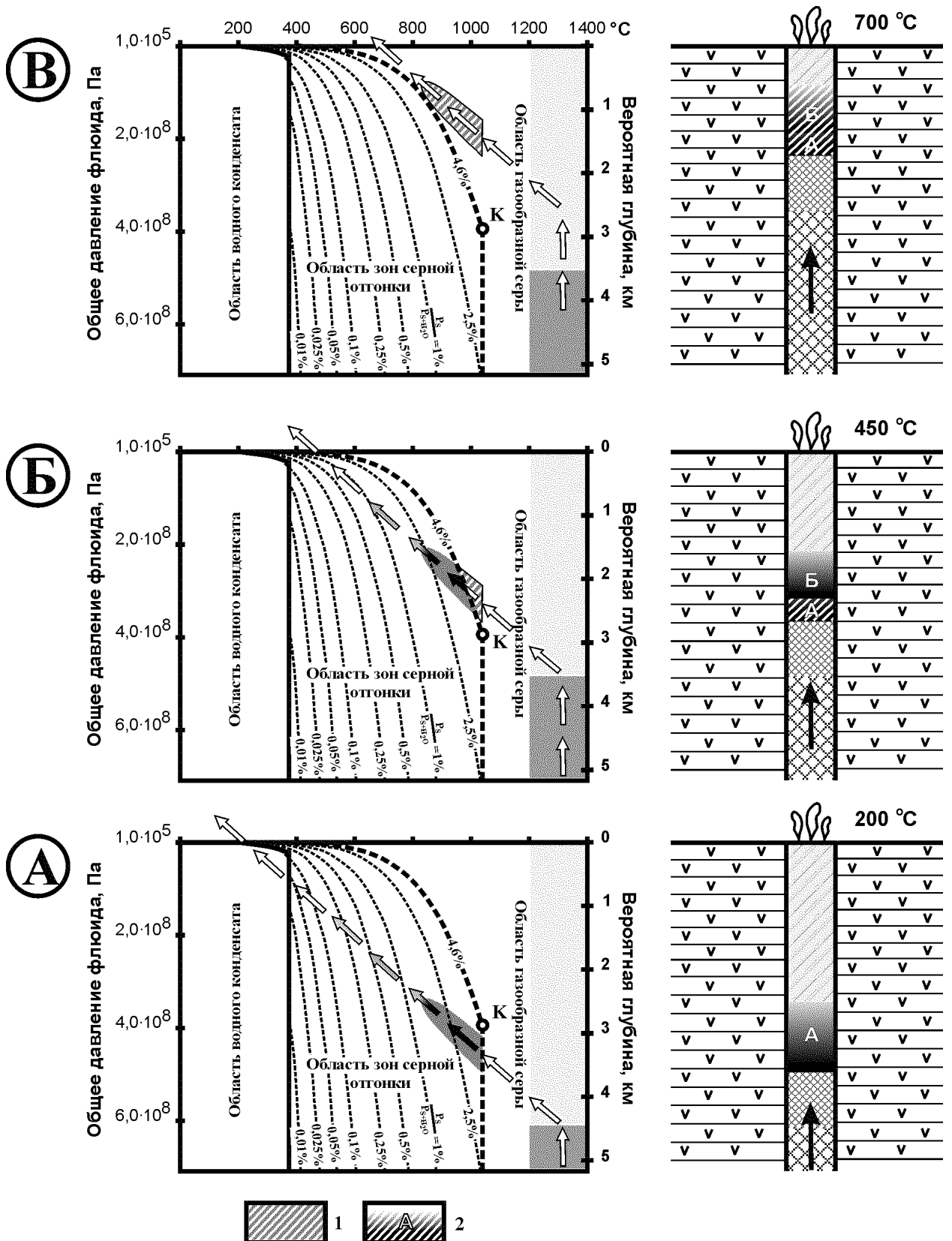


Рис. 12. Формирование оксидной рудной магмы в субвулканических условиях в процессе наземного или малоглубинного подводного вулканизма: 1–2 — зоны апорасплавного метасоматоза с переводом сульфидных соединений в оксидную форму соответственно на диаграмме и на разрезе. Остальные обозначения см. на рис. 9

В этих условиях сформировавшийся на глубинах более 3 км сульфидный расплав (см. рис. 12, А) в ходе своего подъема неизбежно проходит стадию апорасплавного метасоматоза (см. рис. 12, Б, В) и на земную поверхность получают возможность изливаться (а точнее, выжиматься) исключительно оксидные (преимущественно магнетитовые) рудные лавы типа рудных эффузивов вулкана Лако или Холзунского месторождения.

Таким образом, теория магматического рудообразования на базе концепции серного перехвата позволяет вполне корректно и адекватно рассмотреть их с единой точки зрения, объясняя при этом многие из наблюдающихся закономерностей. Образование оксидной минерализации происходит за счет сульфидных соединений путем высокотемпературного апорасплавного метасоматоза с заменой серы на кислород и частичным изменением рудообразующего комплекса металлов. Тесная ассоциация магматических оксидных руд с проявлениями флюидной активности, позиционирование магнетитовых, титаномагнетитовых и хромитовых магматических месторождений именно в тех условиях, где должны были первоначально возникать зоны серной отгонки и массового сульфидообразования, — эти факты, на наш взгляд, являются наиболее веским доводом в пользу образования подобных месторождений за счет зон серного перехвата, переведенных в оксидную форму под воздействием высокотемпературного апорасплавного метасоматоза.

Важно подчеркнуть, что освобождающаяся в ходе апорасплавного метасоматоза сера возвращается в состав флюида, а затем вновь конденсируется в зонах отгонки. Тем самым реализуется своеобразный рециклинговый процесс, при котором одно и то же сравнительно небольшое количество серы многократно принимает участие в рудообразовании. Поэтому результирующие объемы оксидных руд могут на многие порядки превышать те объемы, которые следуют из химических эквивалентов соответствующих реакций.

## **Взаимоотношение теории магматического рудообразования на базе серного перехвата с другими представлениями о формировании рудных магматических месторождений**

В области представлений о магматическом сульфидообразовании существует целый ряд взаимно противоречивых гипотез, каждая из которых имеет свою логику, аргументацию и базируется на вполне конкретном фактическом материале. Даже для одних и тех же объектов, хорошо разведанных и длительное время эксплуатируемых, до настоящего времени существуют взгляды, порой исключаящие друг друга. Например, применительно к Норильским месторождениям развитие получили ядерно-мантийная гипотеза (Лиха-

чев, 2002), ликвационно-магматическая (Годлевский, 1959, 1968; Люлько и др., 2002), инфильтрационно-автометасоматическая (Золотухин, 1964, 1988), гипотеза сульфуризации (Альмухамедов и Медведев, 1982; Маракушев и др., 2002), а также гидротермальная (Роговер, 1959).

При всем разнообразии точек зрения на магматическое сульфидообразование их несомненным достоинством является тот объективный фактический материал, которым они оперируют. При этом из перечня объективных фактов следует исключить аргументацию, опирающуюся на геохимию изотопов серы, из-за некорректной интерпретации данных по изотопному смещению [4]. В свою очередь, наиболее существенным недостатком всех вышеперечисленных гипотез оказывается неспособность объяснить «внезапность» формирования крупных рудных концентраций. Вместо прогноза их возможного местонахождения (что собственно и требуется от хорошей теории) все эти гипотезы в лучшем случае вынуждены порождать постфактум различные вспомогательные механизмы для объяснения появления рудных концентраций в местах неудобной, с их точки зрения, локализации. В худшем случае они сами рождаются как вспомогательный механизм для объяснения тех или иных особенностей рудной локализации.

Есть основания считать, что представленная в рамках данной диссертационной теории магматического рудообразования на базе концепции серного перехвата позволяет свести в единое целое все существующие взгляды на генезис магматических сульфидных месторождений, устранив их взаимные противоречия, объединив положительные моменты при наиболее полном использовании фактического материала.

В частности, концепция серного перехвата позволяет объяснить появление крупных концентраций рудной минерализации магматических сульфидных месторождений исходя из особенностей протекания высокотемпературных эндогенных процессов с участием серы. При этом концепцию можно рассматривать как объединяющее начало для всех вышеперечисленных гипотез в области магматического сульфидообразования. Прежде всего следует отметить, что эта концепция по своей химической сути является концепцией сульфуризации. От существующих вариантов сульфуризационных гипотез ее отличает, во-первых, сам агент сульфуризации (высокотемпературный серный конденсат), а во-вторых, четкое определение физико-химических условий, при которых протекает сброс избыточной серы с последующим сульфидообразованием. Далее, если обратить внимание на положение старших изобар в приповерхностных условиях, то очевидна тенденция их смещения в область более низких температур при уменьшения вероятных глубин сульфидообразования. На 200 м сброс основных объемов серы с последующим наиболее интенсивным сульфидообразованием протекает в диапазоне температур 320–640 °С, на 500 м — в диапазоне 600–770 °С, на 1000 м — 670–830 °С, на 1500 м — 720–930 °С. Низкие температуры сульфидообразования в малоглубинных условиях обусловили совокупность фактов, на которые опирается гидротермальная гипотеза (Г. Б. Роговер, Н. А. Елисеев).

ется гидротермальная гипотеза (Г. Б. Роговер, Н. А. Елисеев).

Особенности сульфидообразования на глубинах 1000–1500 м (670–930 °С) породили группу фактов, ставших основой для инфильтрационно-автометасоматической гипотезы В. В. Золотухина. На больших глубинах сульфидообразование входит в температурную область существования магматических расплавов. В этой области концепция серного перехвата полностью совместима с ликвационной гипотезой. Это происходит постольку, поскольку концепция предусматривает возможность существования в силикатной магме несмешиваемого с ней сульфидного расплава. Более того, она четко очерчивает причины и условия возникновения несмешивающейся сульфидной жидкости. С этой точки зрения концепцию серного перехвата можно с полным основанием считать ликвационной. И, наконец, в области наиболее высоких давлений (еще больших глубин) концепция серного перехвата смыкается с ядерно-мантийной гипотезой А. П. Лихачева. С ростом глубины к линии критической температуры (см. диаграмму рис. 7) примыкают все более низкие относительные диаграммы, переход серы в высокотемпературный конденсат происходит при все более низких относительных давлениях серы, отпадает необходимость в сколь-либо значительном флюидном потоке. Рассеянная сульфидная вкрапленность наиболее глубинных магматических пород, образующаяся при отсутствии признаков деятельности эндогенных флюидов, представляет собой природную совокупность геологических фактов, на которые в значительной степени опирается ядерно-мантийная гипотеза.

## **Публикации по теме диссертации и ее апробация**

Автор диссертации имеет **свыше 120 публикаций, из них свыше 70 по теме диссертации**. Защищаемые положения в полном объеме отражены в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, определенный Высшей аттестационной комиссией Министерства образования Российской Федерации:

1. **Малышев А.И.,** Молошаг В.П. Роль элементарной серы в формировании сульфидных руд // Доклады АН. 2000. Т. 370. № 1. С. 96-98.
2. **Малышев А.И.** Особенности поведения серы в магматическом процессе // Доклады АН. 2000. Т. 374. № 5. С. 675–677.
3. **Малышев А.И.** Сера в высокотемпературном газо-гидротермальном процессе // Доклады АН. 2001. Т. 381. № 5. С. 665–668.
4. **Малышев А.И.** Изотопная сепарация серы в зонах высокотемпературной отгонки // Доклады АН. 2004. Т. 394. № 5. С. 669–672.
5. **Малышев А.И.** Особенности физико-химических свойств серы и их значение для эндогенного рудообразования // Литосфера. 2004. № 2. С. 94–107.

6. **Малышев А.И.** Рудные ловушки в магматическом сульфидообразовании // Доклады АН. 2004. Т. 396. № 3. С. 389-393.
7. **Малышев А.И.** Значение фазовых переходов «газ - жидкость» в эндогенном образовании углеводородного сырья // Доклады АН. 2004. Т. 399. № 3. С. 384-387.

В монографиях:

8. **Малышев А.И.** Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 262 с.
9. **Малышев А.И.** Сера в магматическом рудообразовании. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. 189 с.

В электронном журнале «Вестник Отделения наук о Земле РАН»:

10. **Малышев А.И.** (ИГГ УрО РАН) Фазовые переходы «газ – жидкость» в эндогенном образовании углеводородного сырья / **Malyshev A.I.** (IGG UB RAS) Phase transitions «gas - liquid» in endogenic formation of hydrocarbon raw material // Электрон. науч.-информ. журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН», № 1(22)' 2004, М.: ОИФЗ РАН, 2004. URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2004/informbul-1\\_2004/hydroterm-24.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2004/informbul-1_2004/hydroterm-24.pdf)
11. **Малышев А.И.** (ИГГ УрО РАН) Изотопная сепарация серы в эндогенных процессах / **Malyshev A.I.** (IGG UB RAS) Isotopic separation of sulphur in endogenic processes // Электрон. науч.-информ. журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН», № 1(22)' 2004, М.: ОИФЗ РАН, 2004. URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2004/informbul-1\\_2004/izotop-3.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2004/informbul-1_2004/izotop-3.pdf)

В материалах совещаний международного и всероссийского уровня:

12. **Малышев А.И.**, Малышева Л.К. Летучие в планетарной эволюции // Вулканизм и геодинамика. Материалы докладов II Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург. 2003. С. 32–38.
13. **Малышев А.И.** Серный перехват в эндогенном рудообразовании // Вулканизм и геодинамика. Материалы докладов II Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург. 2003. С. 544–550.
14. **Малышев А.И.** Роль серного перехвата в образовании сульфидных руд магматических месторождений Кольского полуострова // Петрология и рудоносность регионов СНГ и Балтийского щита: Мат-лы Междунар. (X всеросс.) петрограф. совещания. Т. 3. Апатиты: Изд. Кольского НЦ РАН, 2005. С. 181–183.
15. **Малышев А.И.** Физико-химическая эволюция эндогенных флюидов и ее значение для формирования земной коры // Метаморфизм, космические, экспериментальные и общие проблемы петрологии: Мат-лы Междунар. (X всеросс.) петрограф. совещания. Т. 4. Апатиты: Изд. Кольского НЦ РАН, 2005. С. 168–170.

Основные положения диссертационной работы неоднократно докладывались на совещаниях и конференциях международного, всероссийского и регионального уровня.

Подписано к печати \_\_\_\_\_

Уч.-изд. л. 2.46

Тираж 150 экз.

Формат 60 × 84 1/16

Заказ №

---

Отпечатано с оригинал-макета в типографии ООО «ИРА УТК»

620219, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42.