УДК 553.065:553.21

А.В.Козлов

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ХРУСТАЛЕОБРАЗОВАНИЯ

На основе анализа существующих моделей хрусталеобразования и результатов изучения Приполярноуральской хрусталеносной провинции показано, что существующие концепции не являются взаимоисключающими, а хрусталеобразование полигенно. Необходимые для роста кристаллов кварца условия могут реализоваться на определенных этапах развития магматических, метаморфических, метасоматических и тектонофлюидных гидротермальных систем. Наиболее благоприятные для хрусталеобразования условия возникают при проявлении тектонофлюидной активизации на фоне регрессивной стадии регионального метаморфизма зеленосланцевой фации.

It is seen, on the base of the Near-Polar Urals provinse study, that existing verious models of the rock cristals mineralization process do not exclude mutually one another, because the process, in the whole, was polygeneous. Conditions needed for a large quartz crystal to grow could took place within different stages of development as magmatic, so metamorphic, metasomatic or tectono-fluid hydrothermal systems. But it seems that the most favorable conditions for the rock crystals forming occured while the tectonic-fluid activisation developed on the background of a regressive stage of the greenstone regional metamorphism.

Вопросы генезиса безрудных кварцевых жил и хрустальных гнезд представляют интерес не только в связи с проблемами хрусталеобразования. Широкая распространенность кварцево-жильной, в том числе и хрусталеносной, минерализации, ее связь с самыми разнообразными петрогенетическими процессами, а также широкий спектр структурно-текстурных, морфолого-анатомических и кристаллохимических особенностей кварца предоставляют широкие возможности для его использования в качестве индикатора режимов функционирования эндогенных флюидных (гидротермальных) систем.

Многолетние исследования месторождений горного хрусталя Приполярного Урала, знакомство с опубликованными результатами изучения кристаллов кварца месторождений и проявлений металлических, неметаллических и горючих полезных ископаемых, а также анализ существующих генетических моделей хрусталеобразования позволяют выделить ряд общих черт, присущих этому процессу. В то же время особенности функционирования минералообразующих гидротермальных систем находят отражение в специфических чертах кристаллов кварца, возникающих на определенных этапах их развития. Для использования информационных функций кристаллов кварца необходимо выявить характер связи кварцеобразующих процессов с сингенетичными им геологическими процессами. Чтобы проанализировать эти проблемы, обратимся сначала к рассмотрению существующих генетических моделей хрусталеобразования.

Оживленная дискуссия по проблеме генезиса хрусталеносных кварцевых жил началась с серии работ исследователей кварцевых жил Швейцарских Альп Й.Кенигсбергера [25], Р.Паркера [26] и ряда других геологов. Й.Кенигсбергер предполагал, что материал, слагающий хрусталеносные кварцевые жилы, извлекался ювенильными (телемагматическими) гидротермальными растворами водно-углекислого состава из вмещающих пород. Этот процесс был назван латеральной секрецией, а образовавшиеся по такому механизму жилы - латераль-секреционными (или по месту их первоначального описания - жилами альпийского типа). Процесс образования жил альпийского типа разделялся им на две части: 1) разложение пород при температуре свыше 300 ^{0}C и высоком давлении с диффузией растворенного вещества в полость; 2) кристаллизация минералов из раствора при понижении температуры от 230 до 130 ^{0}C. Он подчеркивал вторичное происхождение полостей и их минерального выполнения в связи со складчатостью и динамометаморфизмом.

В этой модели первоначально предполагался магматический источник растворов и местная мобилизация и концентрация кремнезема.

Одни из первых исследователей месторождений горного хрусталя Приполярного Урала - Г.Г.Леммлейн [14] и И.И.Шафрановский - отнесли их также к жилам альпийского типа, подчеркивая этим названием не столько их генетическую принадлежность, сколько аналогию структурно-минералогических особенностей хрусталеносных жил Швейцарских Альп и Приполярного Урала. В более поздней работе [15] Г.Г.Леммлейн, анализируя развернувшуюся дискуссию о происхождении хрусталеносных жил Приполярного Урала, отмечал, что "...существует очень превратное представление о формировании жил альпийского типа и сомнения правильности отнесения к ним хрусталеносных жил Приполярного Урала. Эти сомнения происходят, по-видимому, более от несогласия с объяснениями,предполагаемыми теорией латераль-секреционного отложения, которую развивает Й.Кенигсбергер, чем в результате знакомства с минералами жил Швейцарских Альп и детального их сопоставления с минералами жил Приполярного Урала..." [15, с.443]. Генетические выводы в этой работе несколько неопределенны. Г.Г.Леммлейн отмечает проблематичность происхождения воды и предполагает ее гибридное смешение из горячих насыщенных углекислотой телемагматических вод и пропитывающей породу "горной влаги". Он добавляет, что этот процесс в известной мере является как бы одним из этапов или, вернее, результатов самого метаморфизма.

Специально вопросы генезиса хрусталеносных жил Приполярного Урала проанализированы в работе Г.В.Меркуловой [16]. Полученные ею выводы сводятся к тому, что "...единственным отличием жил Приполярного Урала от типичных альпийских жил является несколько более высокая минерализация термальных вод, обусловивших образование жил. Кроме CO_2 эти воды, очевидно, выносили из магмы и K_2O..." [16, с.43]

Более определенно о роли магматизма в хрусталеобразовании высказался Н.П.Ермаков. Он подчеркнул, что "...особенности генезиса этих месторождений - кристаллизация кондиционных кристаллов только из ювенильных, обычно средненизкотемпературных растворов - является общей для всех месторождений пьезооптического кристаллосырья..." [8, с.5]. С учетом доказанной к этому времени определяющей роли вмещающих пород как источника кремнезема, им выделен "гидротермально-альпийский" тип месторождений пьезооптических минералов. Вслед за ним аналогичный генетический тип месторождений горного хрусталя выделяет Е.М.Лазько [13]. Детализируя механизм формирования хрусталеносных жил, он отмечает, что на последних этапах их формирования кристаллизация кварца происходила в спокойных условиях и рост кристаллов определялся диффузионными явлениями в застойных растворах, заполнявших полость. Е.М.Лазько выделяет три самостоятельные группы месторождений горного хрусталя: гидротермальные, гидротермально-альпийские и латераль-секреционные. Такая классификация является результатом значительной неопределенности в терминологии, нашедшей отражение в развернувшейся в то время бурной дискуссии по проблемам гидротермального рудообразования, которая с новой силой вспыхнула после известной работы Л.Грейтона [6]. Е.М.Лазько к гидротермальным отнесены месторождения, имеющие магматический источник и растворов и кремнезема; гидротермально-альпийские жилы образуются в связи с функционированием постмагматических растворов, но при местном источнике кремнезема; к латераль-секреционным отнесены хрусталеносные образования, возникшие из метаморфогенных растворов, выносивших кремнезем в полости из вмещающих пород. Последний тип хрусталеносных жил совершенно определенно отнесен к группе метаморфогенных месторождений. К постмагматическим гидротермальным образованиям относил все кварцевые жилы и гнезда горного хрусталя Приполярного Урала А.Е.Карякин [10], разделяя их по источнику кремнезема: магматическому для кварцевых жил и местному для кристаллов кварца.

Более дифференцированно к происхождению хрусталеносных кварцевых образований подошел Ю.Н.Ануфриев. В соответствии с его представлениями отложение жильного кварца происходило в результате привноса кремнезема из удаленных источников подкоровых глубин или размещающихся в земной коре магматических очагов. Хрусталеносные гнезда,

Ф 33

по его мнению, имеют метаморфогенное происхождение и образуются на регрессивной ветви метаморфизма зеленосланцевой фации [1].

Чисто метаморфогенная концепция образования кварцевых жил и хрустальных гнезд выдвинута Ю.М.Соколовым [17], в сответствии с представлениями которого жильный кварц образуется на прогрессивной ветви регионального метаморфизма,а хрустальные гнезда связаны с его регрессивной стадией или процессами диафтореза на уровне зеленосланцевой фации. В одной из последних работ [24] хрусталеносная минерализация отнесена им к ортометаморфическому классу метаморфогенных месторождений.

Чисто эклектически к решению вопроса о генетической принадлежности хрусталеносной минерализации подошли в своей работе С.К.Кузнецов с соавторами, которые предложили в генетическом отношении рассматривать ее как "гидротермальную магматогенно-метаморфогенную" [12].

Приведенный обзор основных взглядов на природу процессов образования хрусталеносных кварцевых жил свидетельствует о поляризации генетических представлений от ортодоксальной постмагматической модели А.Е.Карякина до ортометаморфической модели Ю.М.Соколова. В последнее время существенное развитие вопросы образования безрудной кварцевожильной минерализации получили в работах А.В.Осинского [21-23], который на новом уровне возродил латераль-секреционную модель Й.Кенигсбергера. В соответствии с его представлениями во всех случаях флюидно-твердофазового равновесия в горной породе с избытком кремнезема во флюидной фазе последний может отлагаться или в виде породообразующего кварца, или, при возникновении (наличии) синминерализационных полостей, в жильной (конкреционной или секреционной) форме. Такие условия могут реализоваться при самых разнообразных петрогенетических процессах, по генетической связи с которыми им выделены магматический, метаморфический и метасоматический типы латеральной секреции. Предложенный подход позволяет систематизировать безрудную кварцевожильную минерализацию на основе объективных вещественных признаков (по ассоциации с определенными типами магматитов, метаморфитов, метасоматитов), но не раскрывает место и специфику хрусталеобразования в общем процессе мобилизации и отложения кремнезема в виде кварца.

Основные закономерности размещения хрусталеносной минерализации в земной коре и генетические аспекты хрусталеобразования рассмотрены в одной из последних работ Ю.Н.Ануфриева [2]. Выделяя хрусталеносную минерализацию магматогенного, метаморфогенного и телетермального классов, он впервые подчеркнул важную роль режимов тектономагматической и тектонометаморфической активизации в хрусталеобразовании. При описании телетермального класса хрусталепроявлений автор отмечает его связь с тектонической активизацией земной коры без проявления магматизма и регионального метаморфизма. Этот тип эндогенной активизации земной коры по аналогии с тектономагматической и тектонометаморфической назовем *тектонофлюидной* активизацией. Ю.Н.Ануфриев подчеркнул также большое значение особенностей тепломассопереноса в хрусталеобразующих гидротермальных системах, которые определяют динамику физико-химических параметров гидротермальных растворов.

Анализируя рассмотренные модели хрусталеобразования, можно отметить общие для них моменты:

1) кристаллы кварца образуются из *гидротермальных* растворов (флюидов) на регрессивной ветви развития хрусталеобразующих гидротермальных систем;

2) кремнезем для образования кристаллов кварца заимствовался из вмещающих пород (в том числе из дохрустального жильного кварца);

3) кристаллы кварца завершают процесс образования безрудных кварцевых жил.

Различия отдельных моделей хрусталеобразования наиболее значительны в отношении источника хрусталеобразующих растворов, их связи с определенными петрогенетическими процессами, генетической соподчиненности кварцево-жильной и хрусталеносной минерализации. В упомянутых выше моделях не рассматривается характер связи роста кристаллов кварца с особенностями проявления материнских петрогенетических процессов. Во всех случаях образование конкретного кристалла кварца увязывается только с каким-либо

одним из них, даже при установлении четкой стадийности гидротермального процесса, находящей отражение в сложении кристаллов несколькими генерациями кварца [4].

Рассмотрим эти вопросы на примере Приполярноуральской хрусталеносной провинции. В геологическом отношении она приурочена к Ляпинскому антиклинорию Центрально-Уральского поднятия. В последнее время он рассматривается в качестве фрагмента активизированой окраины Русской платформы (миогеосинклинальной области), которая причленяется с запада к эвгеосинклинальной зоне Урала и отделяется от нее главным Уральским глубинным разломом. Основным структурным элементом Приполярного Урала является Хобеизский гранитогнейсовый купол, ядро которого сложено породами няртинской свиты нижнего протерозоя, а сланцевое обрамление - комплексом пород рифей-вендского возраста. Верхний структурный этаж представлен терригенной толщей ордовика (рис.1).

Породы Хобеизского гранитогнейсового купола испытали метаморфизм по крайней мере двух этапов. Нижнепротерозойский этап метаморфизма проявился в породах няртинской свиты, которые затем совместно с более молодыми отложениями были метаморфизованы при проявлении герцинского тектономагматического цикла. Поздний метаморфизм имеет зональный характер с понижением его фациального уровня от ядра гранитогнейсового купола к периферии. На концентрически-зональную структуру гранитогнейсового купола наложена выделенная И.А.Шевченко [20] Центральная зона тектономагматической активизации, в пределах которой наиболее интенсивно и разнообразно проявились эндогенные процессы: магматизм, метаморфизм, гидротермальная деятельность. Явления тектономагматической активизации проявились и в пределах отдельных зон поперечных, дуговых и кольцевых разломов.

В соответствии с приведенной схемой геологического строения Приполярного Урала в его пределах выделяются три хрусталеносных района: западный (З), центральный (Ц) и восточный (В) (рис. 1). Центральный хрусталеносный район пространственно совпадает с Центральной зоной тектономагматической активизации, а два других района расположены соответственно западнее и восточнее.

Анализ размещения хрусталеносной минерализации в пределах Приполярного Урала свидетельствует о том, что при в целом согласным с зональностью регионального метаморфизма размещении согласных нехрусталеносных кварцевых жил с различными структурно-вещественными особенностями, хрусталеносные кварцевые жилы в своем распределении подчиняются совсем другим закономерностям. Основная часть хрусталеносных кварцевых жил (более 50 %) и все крупнейшие месторождения горного хрусталя (три из них эксплуатируются и в настоящее время) связаны с наложенной на Хобеизский гранитогнейсовый купол Центральной зоной тектономагматической активизации. В западном хрусталеносном районе более 50 % хрусталепроявлений приурочено к поперечной Вангыро-Маньинской зоне разломов. Наибольшая плотность хрусталепроявлений в восточном хрусталеносном районе связана с активизированной северной частью Хобеизского гранитогнейсового купола, которая выделена в качестве Верхнекожимской кольцевой структуры. Все отмеченные хрусталеконтролирующие геологические элементы относятся к группе долгоживущих тектонических нарушений и занимают секущее положение по отношению к метаморфической зональности Хобеизского гранитогнейсового купола, что указывает на отсутствие прямой генетической связи процессов хрусталеобразования и метаморфизма. Учитывая существенное отличие на Приполярном Урале возраста магматизма (рифей-венд) и хрусталеобразования (пермь), можно утверждать отсутствие генетической связи хрусталеобразования с постмагматическими процессами.

При детальном рассмотрении особенностей размещения различных по масштабам хрусталепроявлений и месторождений отчетливо выделяются два их типа, отличающихся по закономерностям распределения хрусталеносных тел. Наиболее широко распространены мелкие хрусталеносные кварцевые жилы и минерализованные трещины первого типа, которые связаны с продольно-секущими трещинами отрыва, рассредоточенными в объеме метаморфических пород. Приуроченность таких жил к определенным разновидностям пород определяется в первую очередь их физико-механическим свойствами, благодаря которым

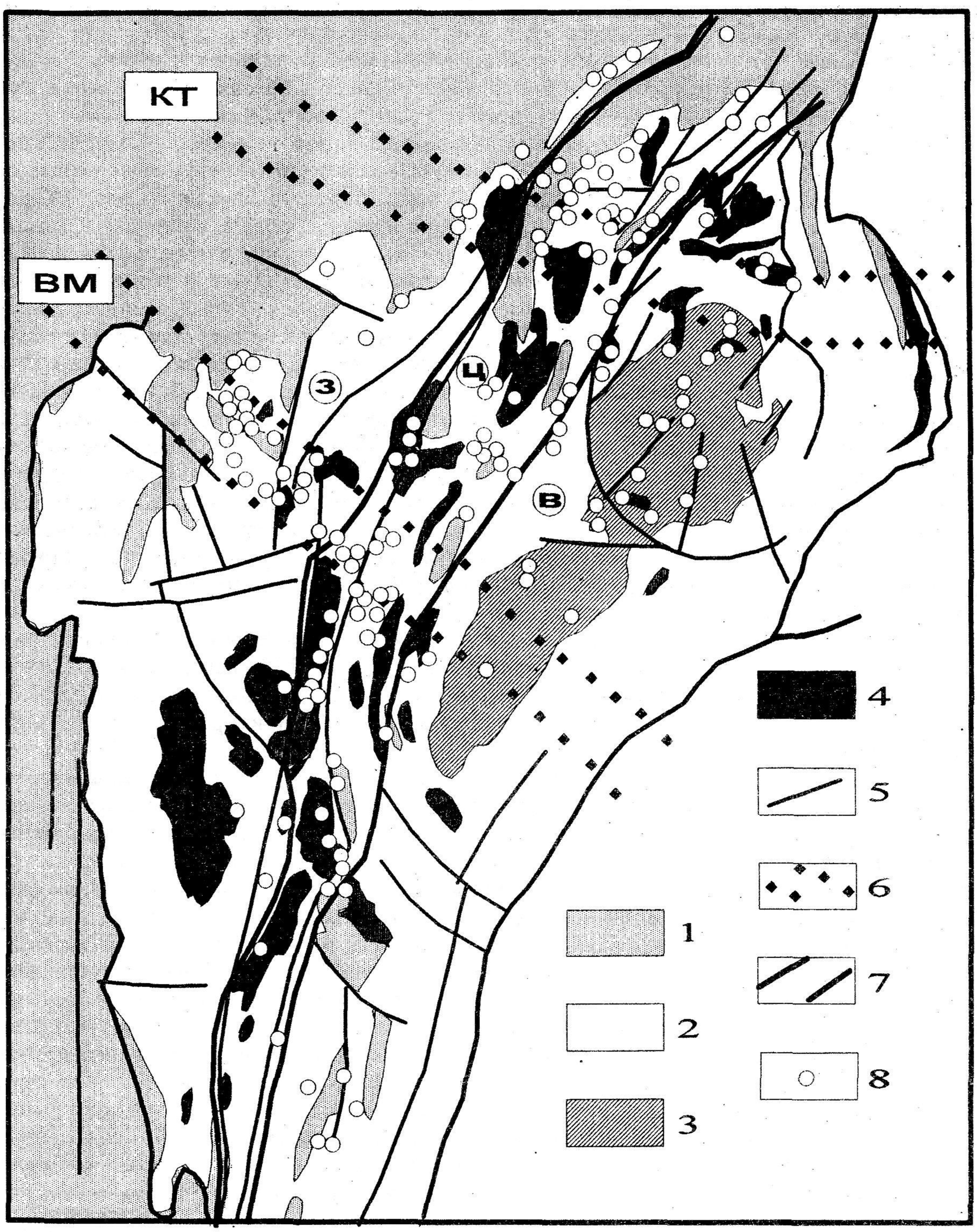


Рис.1. Схема размещения проявлений горного хрусталя Приполярного Урала

1 - палеозойский структурный этаж (тельпосская, хыдейская, щугорская свиты); 2 - рифей-вендский структурный этаж: маньхобеинская, шокурьинская, пуйвинская, хобеинская, мороинская, саблегорская, лаптапайская свиты; 3- нижнепротерозойский структурный этаж (нярτинская свита); 4 - интрузивные массивы; 5 - тектонические нарушения; 6 - зоны долгоживущих поперечных разломов (по И.А.Шевченко); ВМ - Вангыро-Маньинский, КТ - Косью-Тынаготский; 7 - границы Центральной зоны тектономагматической активизации; 8 - месторождения и проявления горного хрусталя

ISSN 0135-3500. Записки СПГГИ. СПб, 1997. Т.143

при синметаморфических деформациях в них происходило образование хрупких разрывов на фоне преимущественно пластических деформаций вмещающих пород. Механизм образования таких трещин детально рассмотрен А.Е.Карякиным и В.А.Смирновой [11].

Второй тип минерализации характеризуется ее компактным распределением в виде линейных хрусталеносных зон, протяженность которых может достигать нескольких километров. Для них характерна интенсивная переработка вмещающих пород вдоль разнообразных по ориентировке трещин, а не только вблизи хрустальных гнезд. За пределами месторождений по простиранию хрусталеносных зон переработанные гидротермальными растворами породы прослеживаются на значительные расстояния (десятки километров). К этому типу месторождений относятся наиболее крупные хрусталеносные объекты Приполярного Урала. Локализация проявлений данного типа четко контролируется активизированными протяженными зонами нарушений, секущими метаморфическую зональность.

Аметистовая минерализация завершает процесс хрусталеобразования на Приполярном Урале и накладывается преимущественно на ранее образованные кристаллы кварца в пределах месторождений второго типа. Ее развитие весьма ограничено как по распространенности, так и по масштабам проявления.

Анализируя особенности распределения минерализации различных типов, можно сделать вывод, что только хрусталеносные тела первого типа непосредственно связаны с синметаморфическими трещинами и могут иметь метаморфогенно-гидротермальное происхождение. Хрусталеносная минерализация второго типа и проявления аметиста наложены на метаморфические структуры, хотя по времени образования они могут совпадать с определенными периодами регрессивного этапа метаморфизма. Однако в этом случае отчетливо проявляется неравновесность хрусталеобразующих растворов с метаморфическими породами, что выражается в наличии протяженных и мощных зон гидротермального изменения вмещающих хрусталеносную минерализацию пород.

Проанализируем основные проблемы генезиса хрусталеносной минерализации с позиций современной теории гидротермального минералообразования. На ее основе можно утверждать, что проблема источника воды гидротермальных растворов практически решена. Обширные данные по изотопии водорода и кислорода древних и современных гидротерм свидетельствуют о том, что подавляющая часть воды неотличима от атмосферных, океанических и пластовых вод [5]. Если и существует ювенильная компонента воды , то она мала и практически не идентифицируется современными методами.

Применительно к месторождениям горного хрусталя отсутствует и проблема источника кремнезема: его всегда достаточно во вмещающих породах. Следует при этом подчеркнуть, что хрусталеобразование не является процессом концентрирования кремнезема. В ряде случаев содержание кремнезема в хрустальном гнезде в целом ниже, чем во вмещающих породах. Это можно проиллюстрировать на примере хрустальных гнезд, залегающих в мономинеральных кварцитах. В них с учетом гнездовой массы и незаполненного минеральным выполнением пространства содержание кремнезема может быть значительно ниже, чем во вмещающих породах. Если даже и происходит концентрация кремнезема в случае залегания гнезд в относительно обедненных им породах, то кларк концентрации не превышает 2, что ниже, чем для любого рудного месторождения. Поэтому принципиально важной особенностью хрусталеносных тел является то,что они представляют собой в первую очередь структурную, а не вещественную (концентрационную) аномалию в земной коре в отличие от рудных объектов.

Отсюда вытекает еще одно важное следствие: хрусталеобразование является процессом менее энергоемким, чем рудообразование. Для образования руд необходима значительная энергия для выполнения работы по концентрации рудных элементов, кларк концентрации которых колеблется от 5 (Fe) до $n \cdot 10^6$ (Hg, Au). При образовании хрустальных гнезд количество переносимого в гнездо кремнезема и дальность его переноса невелики, что определяет малую величину работы, а следовательно, и затрачиваемой на ее реализацию энергии. Основные энергозатраты при этом связаны с поддержанием в течение длительного времени термостатированных условий, необходимых для роста высококачественных кристаллов кварца. В этом отношении процесс природного хрусталеобразования близок к синтезу

кристаллов кварца, при котором основные энергозатраты также сводятся к поддержанию автоклава в рабочем температурном режиме.

Продолжая сопоставление синтеза кварца и его образования в земной коре, можно увидеть и принципиальное отличие этих процессов. При синтезе необходимое для роста кристаллов кварца пересыщение достигается за счет создания градиента температур между зоной растворения шихты и зоной роста кристаллов, который составляет десятки градусов на метр. В природных хрусталеобразующих гидротермальных системах такие градиенты нереальны. В них необходимые пересыщения могут достигаться другими путями: за счет постепенного остывания раствора; при разности химического потенциала кремнезема в поровом растворе вмещающих пород и хрусталевмещающей полости; в результате изменения давления в полости при тектоническом приоткрывании трещин.

Ведущее значение тектонического фактора в функционировании хрусталеобразующих гидротермальных систем было сформулировано Т.Л.Нейкур [18], а в последнее время развивается Л.В.Оганесяном [19]. Однако ни один из этих путей не является универсальным, и в конкретных геологических условиях реализация хрусталеобразования может происходить с преобладанием любого из них при наличии кремнезема в подвижной форме (растворе, расплаве). Такие условия могут иметь место при различных геологических процессах, и для выяснения их соподчиненности обратимся к имеющимся в публикациях схемам строения рудогенерирующих метаморфических систем. Это удобно, поскольку сторонники метаморфогенного направления в рудогенезе в последние годы включают в метаморфогенную группу все больше и больше месторождений, относимых ранее к другим генетическим типам. Так, в одной из последних публикаций Ю.М.Соколов [24] выделяет уже 96 метаморфогенных рудных формаций, что позволяет на приводимых схемах найти место всем эндогенным месторождениям (рис. 2).

Анализ метаморфогенных моделей рудообразования приводит к однозначному выводу о том, что изначальным источником энергии всех эндогенных процессов является поток интрателлурических (ювенильных) флюидов. Он не только является энергоносителем, но и осуществляет массоперенос водорода, углекислоты, воды и ряда других элементов и соединений. Флюидодинамические особенности этого потока определяют специфику проявления инициированных им процессов метаморфизма, метасоматизма, магматизма и их соотношение на различных уровнях земной коры. Осуществляя тепломассоперенос из глубинных областей земли в земную кору, поток интрателлурических флюидов создает необходимые для начального плавления пород термодинамические условия. Дальнейшее сколько-нибудь длительное перемещение магматической колонны вверх в земной коре также не может происходить без энергетической поддержки этого процесса потоком интрателлурических флюидов, который, продвигаясь в пределах магматической колонны, приобретает характер трансмагматического флюида. В фронтальной части магматической колонны он осуществляет процессы магматического замещения, а в процессе кристаллизации магматического расплава входит составной частью в постмагматический флюид. Следовательно, поток интрателлурического флюида первичен по отношению к процессам как корового магматизма, так и метаморфизма, что и иллюстрирует приведенная схема.

Результат его взаимодействия с породами земной коры определяется интенсивностью этого потока и степенью открытости флюидодинамической системы. В относительно закрытых системах при ареальном характере флюидного потока в его фронтальной части проявляются процессы регионального метаморфизма, сменяющиеся в тыловой зоне процессами ультраметаморфизма и корового магматизма. В относительно открытых системах с компактной формой и значительной мощностью флюидного потока инициированные им магматические продукты могут перемещаться в более высокие горизонты земной коры вплоть до поверхности земли с образованием вулканических пород. При наличии глубоко проникающих тектонических зон поток ювенильного флюида может перемещаться по ослабленным тектоническим зонам с образованием в верхних горизонтах земной коры амагматических (телетермальных) гидротермальных месторождений. Все эти процессы могут происходить как на фоне проявления метаморфизма любого фациального уровня (преимущественно на его регрессивной ветви), так и в неметаморфизованных породах. В первом случае метамор-

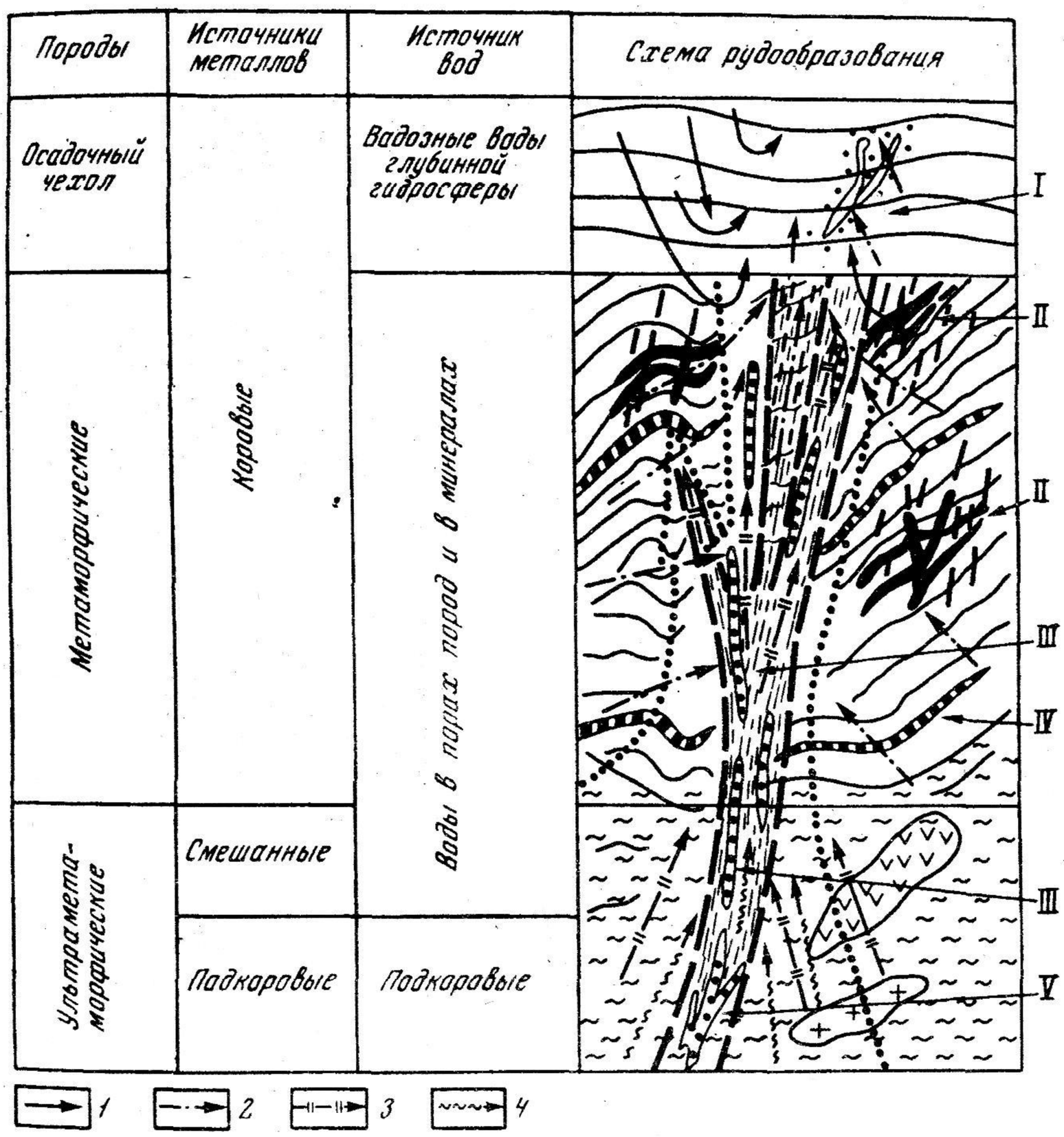


Рис. 2. Схема источников металлов при метаморфогенном рудообразовании [3]

Типы месторождений: I - телетермальные; II - метаморфические; III - ультраметаморфические; IV - метаморфизованные; V - эндогидрогенные. Типы рудообразующих растворов: 1 - вадозные глубинной циркуляции; 2 - метаморфические; 3 - ультраметаморфические + ювенильные; 4 - ювенильные

физм задает общие термодинамические условия реализации минералообразования, а флюидный поток определяет динамику и геохимические особенности минералообразующих процессов. Во втором случае термодинамические условия определяются особенностями самого потока.

Характер взаимодействия интрателлурических флюидов с породами земной коры в пределах глубинных разломов миогеосинклинальных областей проанализирован П.Ф.Иванкиным [9]. В соответствии с его представлениями, фанерозойские подвижные пояса можно рассматривать в качестве призмы нарушенной мозаично-блоковой земной коры и активизированной мантии, в пределах которой осуществляется их активное взаимодействие, наиболее интенсивно протекающее в зонах глубинных разломов. К ним приурочены протяженные и длительно развивающиеся в земной коре флюидно-магматические колонны. Происходящие в их пределах флюидно-магматические процессы подразделяются П.Ф.Иванкиным на три составные части, последовательно проявляющиеся во времени: 1) опережающий поток восстановленных ювенильных газов с нарастающей во времени тенденцией их окисления; 2) колонна основных расплавов, сменяющаяся с глубиной ультраосновными; 3) тыловой поток высокотемпературных щелочно-кремнистых флюидов, приводящих к гранитизации ядерных частей сланцевых зон в условиях средних и больших глубин. Основная идея П.Ф.Иванкина, состоит в том, что в условиях глубинного разлома эволюция ювенильных флюидов закономерно приводит к возникновению зональной колонны метаморфизма, регионального метасоматоза и эндогенного оруденения. В

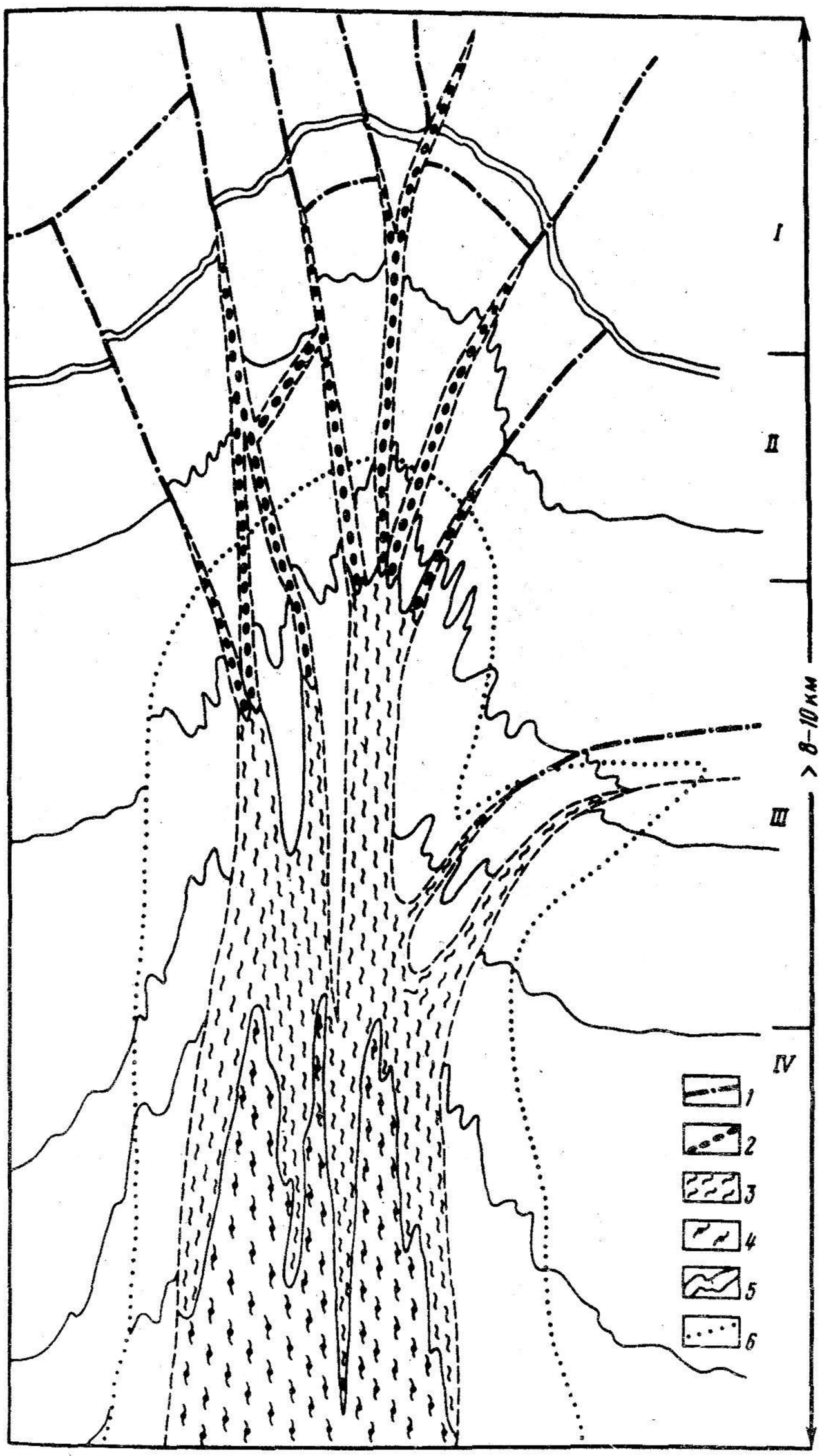


Рис.3. Схема вертикальной зональности глубинного разлома миогеосинклинальной области для конца этапа тектонической инверсии [10]

I -IV - структурно-вещественные этажи; 1 - дизъюнктивные нарушения в слоистых дислоцированных толщах; 2 - зоны катаклазитов, милонитов, бластомилонитов с интенсивным проявлением карбонатно-сульфидно-углеродистого метасоматоза и кварцевой флюидизации; 3 - зона углеродистых динамосланцев, аспидных сланцев и филлитов с углеродистой щелочно-кремнистой флюидизацией; 4 - зона кристаллических сланцев, парагнейсов, частью гранитогнейсов и амфиболитов с высокотемпературным щелочно-кремнистым метасоматозом, кварц-полевошпатовыми и пегматоидными флюидизитами; 5 - слоистые породы геосинклинальных ярусов с относительно невысоким региональным метаморфизмом; 6 - внешняя граница области "размягчения" и повышенного метаморфизма вокруг глубинного разлома

рассмотренной схеме (рис.3) флюидно-магматического взаимодействия земной коры с подкоровыми зонами магматические, метаморфические, метасоматические процессы и сопровождающее их рудообразование (в том числе и хрусталеобразование) сосуществуют в тесной взаимосвязи. Вычленить магматические, метаморфические, метасоматические и тектоно-флюидные рудообразующие системы из природно целостной системы эндогенного петрогенезиса можно только условно. Естественно, что столь же условны будут устанавливаемые рамки этих систем.

Для выделения системы метаморфогенного петрогенезиса принципиальна подчеркнутая Н.Л.Добрецовым [7] важная особенность метаморфогенных гидротермальных растворов: их относительно медленная фильтрация, благодаря которой они успевают прийти в частичное или полное равновесие с вмещающими породами, буферирующими свойства растворов по многим параметрам. Такую гидротермальную систему он назвал "системой с местными буферами", в отличие от быстрофильтрующихся гидротерм, образующих "системы с отдаленными буферами". Второй вариант систем может быть реализован или при наличии зон повышенной проницаемости в земной коре, или в условиях относительно низкой проницаемости, но при высоких градиентах основных физико-химических параметров, что характерно для контактово-метасоматических месторождений.

Подводя итог рассмотрению взаимосвязи гидротермальных месторождений различных генетических типов в общей системе эндогенного рудообразования предлагаем в группу

метаморфогенно-гидротермальных выделить те объекты, которые сформировались практически в изохимических условиях при ареальном характере флюидного тепломассопереноса в системе с местными буферами. В целом ареал метаморфогенных процессов представляет собой аномальную, но наиболее низкоградиентную зону активизированного взаимодействия земной коры с глубинным флюидным потоком, на фоне которой (или за ее пределами) осуществляются более динамичные, неравновесные, высокоградиентные и продуктивные в отношении рудообразования флюидно-магматические, флюидно-метасоматические и тектонофлюидные процессы.

Необходимые для хрусталеобразования низкоградиентные и относительно термостатированные условия могут иметь место при проявлении флюидной деятельности в связи с различными режимами эндогенной активизации земной коры. Наиболее широко распространены рассредоточенные в метаморфических породах мелкие хрусталеносные кварцевые жилы и минерализованные трещины, образовавшиеся на регрессивной стадии метаморфизма зеленосланцевой фации. К ним относятся типичные жилы "альпийского типа", выделенные Й.Кенегсбергером. Аналогичные образования описаны В.В.Букановым на Приполярном Урале. Для них характерно отсутствие или слабое проявление окологнездовых метасоматитов, незначительный выход пьезооптического сырья с преобладанием плавочного кварца и прекрасных коллекционных образцов, содержащих кроме кристаллов кварца разнообразные парагенетические минералы: рутил, брукит, анатаз, хлорит, карбонаты, адуляр и др. По геологическому строению и особенностям распределения хрусталеносных жил они соответствуют первому из выделенных типов минерализации.

При совмещении в пространстве и во времени регрессивной стадии зеленосланцевой фации метаморфизма и тектонофлюидных процессов образуются наиболее крупные месторождения горного хрусталя. Хрусталеносная минерализация в них располагается в виде довольно компактных и протяженных хрусталеносных зон (второй тип хрусталеносной минерализации). При их формировании роль метаморфизма сводится к термостатированию, а тектонофлюдные процессы создают необходимые для роста кристаллов многочисленные тектонические полости и определяют оптимальные значения пересыщения растворов кремнеземом. Более динамичный характер этих систем способствует существенному увеличению доли конвективного массопереноса кремнезема, что способствует увеличению скорости роста кристаллов и, при наличии достаточно крупных затравок, приводит к образованию крупных кристаллов кварца. Более динамичный и неравновесный характер таких хрусталеобразующих систем приводит к возникновению значительных ореолов окологнездовых изменений. Данный процесс может накладываться и на расположеные в зоне функционирования тектонофлюидной системы хрусталеносные полости метаморфогенного типа, с возникновением в них кристаллов, содержащих кварц двух стадий хрусталеобразования.

Схожая геологическая ситуация имеет место при реализации тектонофлюидных процессов на фоне проявления региональных, околоинтрузивных или мощных приразломных ореолов метасоматитов, которые образуются в диапазоне термодинамических параметров, близком зеленосланцевой фации метаморфизма. В этом случае термостатирование определяется большим объемом метасоматических пород, в которых на регрессивной стадии их формирования происходят автокомпенсирующие реакции, приводящие к снижению скорости остывания пород. Роль тектонофлюидных процессов здесь аналогична предыдущему случаю. К этому типу можно отнести крупнейшее в России Астафьевское месторождение на Южном Урале и большинство месторождений Алданской хрусталеносной провинции. Типоморфным признаком для их выделения является связь с мощными зонами метасоматитов.

Реализация тектонофлюидных процессов в породах, находящихся за пределами региональных метаморфических или метасоматических ореолов, происходит в условиях резких температурных градиентов на границе раствор-порода, что приводит к образованию мелких кристаллов кварца низкого качества. Однако если растворы низкотемпературны, а породы несколько подогреты в условиях нормального геотермического градиента и за счет предхрусталеносной гидротермальной деятельности, то в таких зонах реализации флюидно-тектонических процессов довольно часто проявляется низкотемпературная аметистовая минерализация. Ярким примером хрусталеносной минерализации такого типа являются

аметистовые щетки Терского берега Кольского полуострова, при образовании которых аметист завершает гидротермальную минерализацию, с начальными стадиями которой связано отложение барита и флюорита.

Аналогом метаморфогенно-гидротермальной хрусталеносной минерализации является магматогенно-гидротермальная, к которой можно отнести камерные хрусталеносные пегматиты Волыни. В данном случае медленное остывание материнского интрузива определяет термостатированный характер процесса хрусталеобразования, которое протекает в камере пегматитового тела из остаточных гидротермальных растворов местного происхождения. Как и в случае метаморфогенного хрусталеобразования, нет обмена энергией между раствором и вмещающей породой, с которой гидротермальная система находится в равновесии.

Хрусталеобразование может происходить и на определенных этапах эволюции высокоградиентных рудообразующих гидротермальных систем. В этом случае оно обычно связано с завершающими стадиями их развития, отражает период стабилизации этих систем и снижения в них температурных градиентов в результате теплообмена между растворами и вмещающими породами. Малая продолжительность этого периода определяет низкую продуктивность связанной с ним хрусталеносной минерализации. На основании анализа рассмотренных моделей хрусталеобразующих гидротермальных систем можно сделать следующие выводы:

1. Выдвинутые различными исследователями генетические модели хрусталеобразования не являются взаимоисключающими, однако каждая из них в отдельности не отражает всего многообразия условий образования кристаллов кварца.

2. Предлагаемый подход основан на определении необходимых и достаточных для реализации хрусталеобразования условий и выявлении геологических ситуаций, в которых эти условия могут быть реализованы.

3. Для осуществления хрусталеобразования необходимы: термостатирование гидротермальной системы с медленным охлаждением растворов на фоне регрессивного развития материнских магматогенных, метаморфогенных или метасоматогенных систем; наличие к началу роста кристаллов кварца готовых полостей; длительное поддержание низких градиентов термодинамических параметров.

4. Наиболее благоприятные условия для хрусталеобразования реализуются при совмещении в пространстве и во времени региональных (крупнообъемных) метаморфических или метасоматических процессов с наложенными на них тектонофлюидными процессами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ - грант 96-05-64682.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ануфриев Ю.Н.* Метаморфогенная хрусталеносная минерализация и условия ее образования на Урале / /Метаморфогенное рудообразование. Киев: Наукова думка, 1972. С. 263-271.

2. *Ануфриев Ю.Н.* Основные закономерности размещения хрусталеносной минерализации в земной коре // Изв. вузов , Геол. и разведка. 1979. № 2. С.109-117.

3. *Белявцев Я.Н.* Источники рудного вещества при метаморфогенном рудообразовании // Источники рудного вещества эндогенных месторождений. М.: Наука, 1976. С. 66-84.

4. *Буканов В.В.* Горный хрусталь Приполярного Урала. Л.: Наука, 1974. 212 с.

5. *Виноградов В.И.* Геологические концепции, изотопная геохимия и сверхглубокое бурение // Сов. геология. 1991. № 8. С. 46-51.

6. *Грейтон Л.* Природа рудообразующего флюида. М.-Л.: Госгеолиздат, 1946. 184 с.

7. *Добрецов Н.Л.* Глобальные петрологические процессы. М.: Недра, 1981. 235 с.

8. *Ермаков Н.П.* Генетически обоснованная классификация месторождений пьезооптического кристаллосырья // Тр. ВНИИ пьезооптического сырья. 1958. Т. 2, вып. 1. С. 5-12.

9. *Иванкин П.Ф.* Флюидно-магматогенные колонны глубинных разломов и прогноз оруденения // Глубинные условия эндогенного рудообразования М.: Наука, 1986. С.103-113.

10. *Карякин А.Е.* Пути движения растворов и механизм образования хрустальных гнезд Приполярного Урала // Зап. Ленингр. горн. ин-та. 1959. Т. 35, вып. 2. С. 47-61.

11. *Карякин А.Е., Смирнова В.А.* Структуры хрусталеносных полей. М.: Недра, 1967. 240 с.

12. *Кузнецов С.К., Буканов В.В., Юхтанов П.П.* Топоминералогические закономерности рудообразования. Л.: Наука, 1988. 144 с.

13. *Лазько Е.М.* О генезисе хрусталеносных образований и промышленных типах месторождений пьезокварца // Тр. ВНИИ пьезооптического сырья. 1958. Т. 2, вып. 1. С. 13-24.

14. *Леммлейн Г.Г.* Кристаллографические исследования кварца с горы Сура-Из // Тр. СОПС АН СССР. Сер. уральск. 1937. Вып. 6. С. 87-92.

15. *Леммлейн Г.Г.* Жилы альпийского типа на Приполярном Урале // Минералогия Урала. 1954. Т.1. С. 435-445.

16. *Меркулова Г.В.* К вопросу о типе и генезисе месторождений пьезокварца Приполярного Урала // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1942. № 3. С. 38-44.

17. Минерагения метаморфогенных месторождений горного хрусталя и гранулированного жильного кварца / Ю.М. Соколов, Е.П. Мельников, Е.К. Маханек, Н.И. Мельникова. Л.: Наука, 1977. 120 с.

18. *Нейкур Т.Л.* К условиям образования хрусталеносных кварцевых жил // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. 1976. Ч.105, вып. 1. С. 18-29.

19. *Оганесян Л.В.* Минерагенические и методические основы многоуровневого прогноза гидротермальных хрусталеносных объектов. М.: Наука, 1994. 222 с.

20. Опыт составления геолого-прогнозной карты хрусталеносности Приполярного Урала на основе дистанционных съемок и минералогического картирования / В.В. Буканов, И.А. Шевченко, А.В. Козлов, Б.О.Андреев, В.А. Буканов, Н.Д. Василевский // Пути повышения эффективности поисковых работ на пьезооптическое и камнесамоцветное сырье: Тез. докладов совещания / Всесоюз. ин-т экон. минер. сырья. М., 1982. С.30-32.

21. *Осинский А.В.* Формационно-генетические типы безрудной кварцевожильной минерализации и принципы их выделения // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. геол. ин-та. НС. 1979. Т. 283. С. 73-112.

22. *Осинский А.В., Соколов Я.Н., Лебедев В.В.* Формационно-генетические типы безрудной кварцевожильной минерализации и основные принципы ее мелкомасштабного прогнозирования // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. геол. ин-та. НС. 1981. Т. 292. С. 18-37.

23. *Осинский А.В.* Основные особенности онтогенеза хрусталеносных кварцевых жил // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. геолог. ин-та. НС. 1982. Т. 320. С.5-27.

24. *Соколов Ю.М., Салье М.Е.* Генетическая систематика метаморфогенных месторождений полезных ископаемых // Геол. рудных месторождений. 1992. Т. 34, вып. 3. С. 19-30.

25. *Konigsberger J.* Uber alpin Mineralegerstatten // Schweiz. mineral. und petrogr. Mitt. 1925. № 5. S. 67-127.

26. *Parker R.* Alpin Minerallagerstatten // Schweiz. mineral. und petrogr. Mitt. 1923. № 3. S. 23-65.