

ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ,
МЕТОДИКА ИХ ПОИСКА И РАЗВЕДКИ

УДК 553.41:553.21/.24

И.И. ФАТЬЯНОВ, В.Г. ХОМИЧ, Н.Г. БОРИСКИНА

О ПОЛИГЕННОСТИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МНОГОВЕРШИННОГО
ЗОЛОТОСЕРЕБРЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
(ПО ДАННЫМ ИЗОТОПИИ УГЛЕРОДА, КИСЛОРОДА И СЕРЫ)

На основе детального изучения строения жильно-метасоматических зон и изотопных данных по O, C, S в жильных и рудных минералах предложена принципиально новая схема формирования Многовершинного месторождения. Она отражает полигенность источников питания местной гидротермальной палеосистемы, функционировавшей как за счет восходящих гидротермальных потоков магматогенного происхождения, так и инфильтрационных растворов конвективных ячеек.

Данные о гидросфере как оболочечной структуре Земли, проникающей в недра на значительные глубины, приводят к выводу о том, что ювенильные флюиды в верхних горизонтах коры «обречены» на взаимодействие с тем или иным типом инфильтрационных терм. Следы такого взаимодействия можно обнаружить на месторождениях вулканоплутонических поясов, формировавшихся на гипабиссально-субвулканическом уровне глубинности. Поиск доказательств полигенности источников питания гидротермальных палеосистем затруднен и требует тщательного изучения рудных объектов с применением изотопного и других анализов. Один из детально изученных рудных объектов — Многовершинное золотосеребряное месторождение [7, 10—12, 14], на примере которого можно показать, что в его формировании участвовали и восходящие гидротермальные потоки, связанные с магматической деятельностью, и инфильтрационные растворы конвективных ячеек.

Строение жильно-метасоматических зон
месторождения

Золотосеребряная минерализация сосредоточена в протяженных (до 10 км) и мощных (до 100 м) жильно-метасоматических зонах, прослеженных на глубину до 600 м в вулканических образованиях и терригенных породах фундамента. Зоны приурочены к крутопадающим разрывным нарушениям, по которым в период формирования месторожде-

ния происходила разгрузка динамических напряжений с проявлением поперечного (вкrest простирания нарушений) растяжения и движений сбрососдвигового характера (суммарная вертикальная амплитуда перемещения крыльев разрывов несколько сотен метров). Синхронно с растяжением разломов шло их залечивание минеральным (преимущественно кварцевым) субстратом.

Строение жильно-метасоматических зон сложное. Оно обусловлено проявлением вдоль путей фильтрации гидротермальных растворов метасоматического замещения пород, отложения и переотложения минерального вещества, тектонического и флюидно-эксплозивного брекчирования, скарнирования, перекристаллизации минералов на пути движения растворов и в экзоконтактовом ореоле гранитоидного плутона [12]. Перечень выделяемых структурно-вещественных элементов зон приведен в последовательности, соответствующей началу их образования:

1. Метасоматиты стадии кислотного выщелачивания, формировавшиеся вдоль крутопадающих тектонически ослабленных структур отделявшимися от магм восходящими гидротермальными потоками.

2. Кварцевые тела, возникшие вследствие залечивания разрывных нарушений в условиях устойчивого поперечного растяжения, обусловленного формированием куполовидной структуры вулканоплутона.

3. Участки брекчирования (флюидно-эксплозивного и тектонического) с кварцевым, адуляр-кварцевым, редко карбонатно-кварцевым цементом.

4. Ореолы прожилковой перекристаллизации кварцевого субстрата, окаймляющие участки брекчирования. Карбонатные тела, возникшие в результате залечивания карбонатами локальных участков разрывных нарушений (сохранились фрагментарно вследствие скарнирования).

5. Скарноподобные метасоматиты (магнезиально-железистые, железистые, марганцовистые) и их низкотемпературные аналоги, образование которых обусловлено возбуждением (реювенацией) завершающейся гидротермальной деятельности при внедрении интрузивных тел позднего этапа (с повсеместным скарнированием карбонатных тел и локальным развитием высоко-, средне- и низкотемпературных ассоциаций минералов по кварцевому субстрату).

6. Участки термального преобразования жильно-метасоматических зон в контактовом ореоле интрузивных тел позднего этапа внедрения.

7. Карбонатные тела (послескарновые), возникшие после инверсии температур гидротермальной системы к доскарновому режиму и маркирующие завершение деятельности плутоногенно-вулканогенной гидротермальной системы.

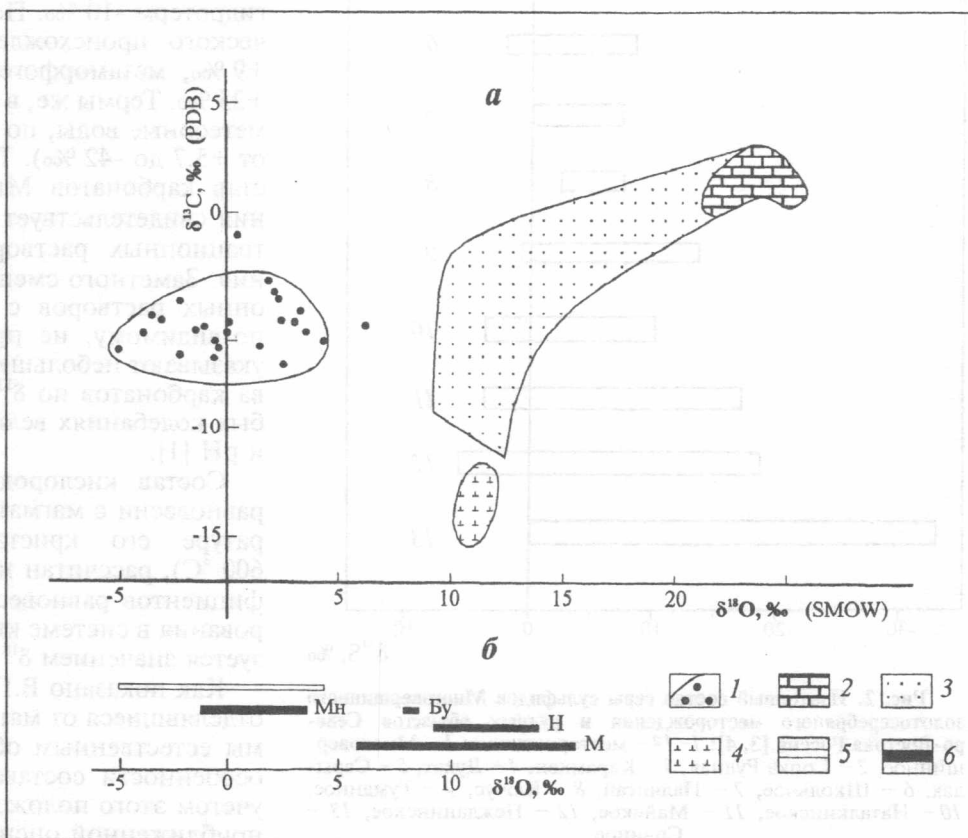
8. Турмалин-кварцевые, кварцевые, карбонатные жилки и прожилки, ориентированные поперечно к простиранию жильно-метасоматических зон и являющиеся продуктами более поздней — плутоногенной — гидротермальной системы.

Структурно-вещественные элементы зон содержат необходимую информацию о механизме образования. В этой связи они использовались как опорные реперы при построении схемы формирования месторождения. Вместе с тем одна из особенностей строения зон привлекает внимание и требует объяснения. Гидротермально-измененные породы, окаймляющие кварцевые ядра жильно-метасоматических зон, представляют собой ярко выраженные метасоматиты кислотного выщелачивания [11]. Появление карбонатных тел в зонах кислотного выщелачивания может быть результатом эволюции гидротерм в условиях закрытой (термостатированной) гидротермальной системы или являться следствием поступления в нее иных (близнейтральных) терм. Для уточнения условий формирования месторождения проведены изотопные исследования.

Изотопный состав углерода, кислорода и серы жильных и рудных минералов Многовершинного месторождения

Определения изотопного состава С, О, S в карбонатах (кальците и доломите), кварце и сульфидах (пирите и халькопирите) месторождения выполнены в лаборатории геохимии изотопов ДВГИ ДВО РАН на прецизионном масс-спектрометре Finnigan MAT 252. Результаты измерения привязаны к международным стандартам PDB (С), SMOW (О) и CDT (S). Точность измерения на 95-процентном доверительном уровне составляла $\pm 0,1$ ‰. Общее количество анализов 62, в том числе по углероду и

Рис. 1. Изотопный состав О и С в карбонатах (а) и кварце (б) Многовершинного месторождения в сравнении с иными объектами: 1 — поле карбонатов Многовершинного месторождения; 2—4 — поля карбонатов осадочного и метасоматического происхождения, а также гидротермального генезиса с магматогенным источником гидротерм: девонские известняки (2) и скарны по известнякам (3) Центральных Пиренеев [19], 4 — Печенгское медно-никелевое месторождение [5]; 5 — интервал значений $\delta^{18}\text{O}$ в карбонатах Многовершинного месторождения; 6 — интервалы значений $\delta^{18}\text{O}$ в кварцах: Бу — поздних дериватов Бекчиулского вулканоплутона, Мн — Многовершинного, М — Майского [2], Н — Наталкинского [4] месторождений



кислороду карбонатов 24, по кислороду кварца 18, по сере сульфидов 20.

Результаты изотопных анализов в обобщенной форме приведены ниже. В целом они достаточно полно характеризуют объект по латерали и на глубину. Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ карбонатов месторождения меняются от $-7,0$ до $-3,2$ ‰ и от $-3,8$ до $+4,6$ ‰ соответственно (средние $\delta^{13}\text{C}$ $-5,3$ ‰, $\delta^{18}\text{O}$ $-0,5$ ‰). На диаграмме изотопных составов (рис. 1) карбонаты месторождения образуют компактное поле, отчетливо обособленное от карбонатов осадочного происхождения, а также возникших при скарнировании известняков и гидротермальных карбонатов с магматогенным источником гидротерм [1].

Изотопный состав кислорода кварцев из жильно-метасоматических зон месторождения характеризуется значениями $\delta^{18}\text{O}$, варьирующими от $+3,4$ до $-1,0$ ‰ (средняя величина $\delta^{18}\text{O}$ $+1,5$ ‰). По этому показателю Многовершинное золотосеребряное месторождение заметно отличается от золо-

рудных объектов Северо-Востока России, приуроченных к терригенным толщам: Наталкинское ($+14,1$ — $+9,3$ ‰) [4] и Майского ($+16,1$ — $+6,4$ ‰) [2]. Изотопный состав кислорода в кварце месторождения несколько тяжелее, чем в карбонатах (рис. 1), что подтверждается сопоставлением средних величин $\delta^{18}\text{O}$ в кварцах ($+1,5$ ‰) и карбонатах ($-0,5$ ‰).

Кислород магматических кварцев из поздних дериватов местного вулканоплутона еще тяжелее: $\delta^{18}\text{O}$ кварца из гранит-порфиров и лейкогранитов составляет $+7,9$ ‰ и $+8,3$ ‰ соответственно (рис. 1).

Изотопный состав серы сульфидов месторождения, изученный по самому распространенному в жилах рудному минералу — пириту, варьирует от $-5,6$ до $+1,8$ ‰. Два анализа халькопиритов укладываются в интервал значений $\delta^{34}\text{S}$ пиритов. По этому показателю Многовершинное месторождение сопоставимо с рядом золотоносных объектов Северо-Востока России [3, 4]: золотоантимонитовым — Сарылах, золоторедкометалльным — Школьное, золотосеребряным — Сопка Рудная, серебряным — Дукат (рис. 2). Для сульфидов этой группы месторождений характерен небольшой разброс значений $\delta^{34}\text{S}$ относительно нулевой отметки.

Обсуждение результатов изотопных исследований

Расчет изотопного состава кислорода терм, равновесных с кальцитом при температуре его образования, выполнен по [16]. При температуре образования карбонатов месторождения 200 °C [10] $\delta^{18}\text{O}$ гидротерм -10 ‰. По [18], $\delta^{18}\text{O}$ флюидов магматического происхождения колеблется от $+5,7$ до $+9$ ‰, метаморфогенных растворов — от $+3$ до $+25$ ‰. Термы же, в составе которых присутствуют метеорные воды, по кислороду самые легкие ($\delta^{18}\text{O}$ от $+5,7$ до -42 ‰). Таким образом, изотопный состав карбонатов Многовершинного месторождения свидетельствует об их отложении из инфильтрационных растворов метеорного происхождения. Заметного смешения при этом инфильтрационных растворов с магматогенными флюидами, по-видимому, не происходило, на что косвенно указывают небольшие вариации изотопного состава карбонатов по $\delta^{13}\text{C}$, свидетельствующие о слабых колебаниях величин фугитивности кислорода и pH [1].

Состав кислорода флюида, находившегося в равновесии с магматическим кварцем (при температуре его кристаллизации примерно около 600 °C), рассчитан на основании известных коэффициентов равновесного изотопного фракционирования в системе кварц—вода [16]. Он характеризуется значением $\delta^{18}\text{O}$ $+6,3$ ‰.

Как показано В.Г. Моисеенко и В.Г. Сахно [8], отделившиеся от материнских расплавов гидротермы естественным образом наследовали основные особенности состава магматических флюидов. С учетом этого положения рассмотрим возможности приближенной оценки изотопного состава кисло-

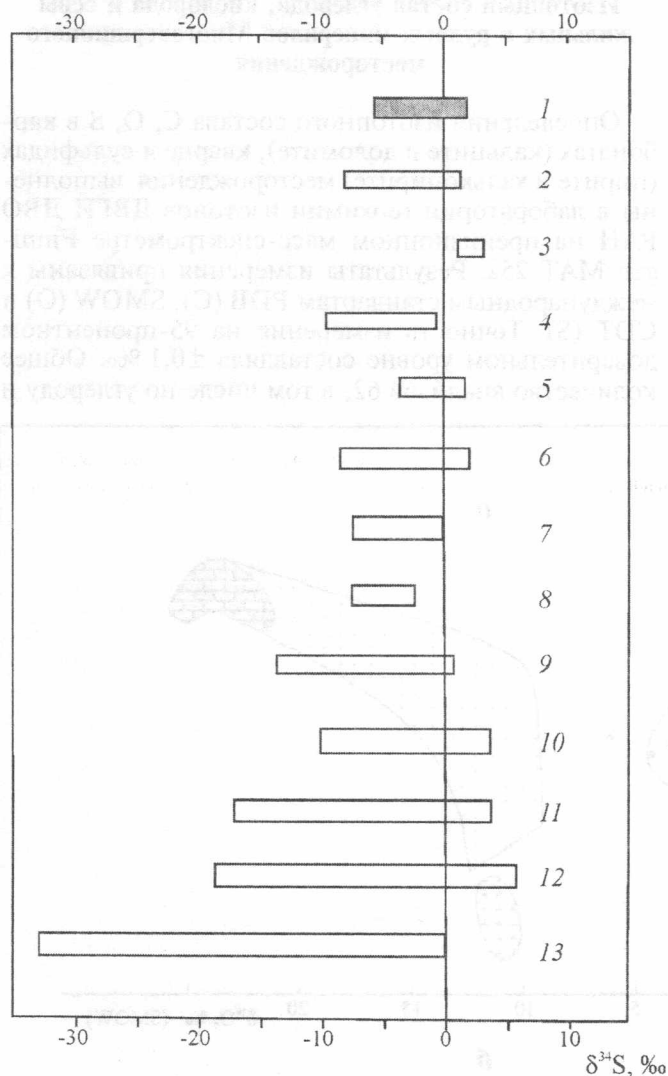


Рис. 2. Изотопный состав серы сульфидов Многовершинного золотосеребряного месторождения и рудных объектов Северо-Востока России [3, 4]: 1–13 — месторождения: 1 — Многовершинное, 2 — Сопка Рудная, 3 — Карамкен, 4 — Дукат, 5 — Сарылах, 6 — Школьное, 7 — Палянгай, 8 — Ключус, 9 — Туманное, 10 — Наталкинское, 11 — Майское, 12 — Нежданинское, 13 — Совиное

рода флюида после его поступления в гидротермальную палеосистему Многовершинного месторождения. На этапе интенсивной фильтрации флюидного потока вдоль тектонически-ослабленных структур (с образованием метасоматитов кислотного выщелачивания) изотопный состав кислорода флюида менялся как за счет обменных реакций с породами, так и вследствие снижения его температуры. При включении механизма поперечного растяжения рудолокализирующих структур и активного залечивания их кремнеземом влияние первого фактора на изотопный состав кислорода флюида стало, вероятно, минимальным. Но и без учета первого фактора при переходе магматогенного флюида на уровень температур гидротермального минералообразования значение $\delta^{18}\text{O}$ в изотопном составе кислорода, в соответствии с данными [18], не должно опуститься ниже +5,7 ‰.

Реальные значения $\delta^{18}\text{O}$ для терм, равновесных с кварцем рудных тел при температурах его образования, рассчитанные по [15], составили для 400 °С -3,0 ‰, 250 °С -8,0 ‰, что существенно отличается от значений $\delta^{18}\text{O}$, характеризующих магматогенный флюид, соответствуя термам с преобладанием метеорных вод в составе [18].

Вместе с тем геологические факты свидетельствуют, что образование кварцево-жильных тел месторождения связано с деятельностью периферического магматического очага местного вулканоплутона. Так, гидротермально-измененные породы вокруг кварцевых ядер в жильно-метасоматических зонах, являются внешней частью метасоматической колонки, сформировавшейся в условиях интенсивного кислотного выщелачивания [11]. Расчеты привноса—выноса вещества при формировании околорудно-измененных пород, приведенные в [11], также не дают оснований связать поступление больших количеств кремнезема в рудолокализирующие структуры только с процессами изменения вмещающих пород.

Интерпретация изотопных данных, когда они не укладываются в рамки моделей, разработанных на основании геологических исследований, связана с поиском доказательного обоснования причин возникшего несоответствия. Подобные примеры обсуждены в [13]. В нашем случае рассчитанные величины $\delta^{18}\text{O}$ терм, равновесных с кварцем, следует рассматривать в контексте воздействия на кварцевую матрицу жильно-метасоматических зон нагретых метеорных вод на заключительных стадиях гидротермальной деятельности. Истощение магматогенного источника флюидов вело к снижению флюидного давления в дренажных каналах и подпитке гидротермальной системы инфильтрационными растворами конвективной ячейки. Фильтрация растворов через кварц осуществлялась в условиях разуплотнения минеральной составляющей зон (вследствие поперечного их растяжения) и сопровождалась интенсивным изотопным обменом. Степень сдвига изотопного состава кислорода кварца в общем виде зависела от объемных количеств просочившихся через него растворов и их температуры. Вероятно, необходимые объемы рас-

творов для осуществления подобного изотопного обмена были обеспечены длительностью процесса их фильтрации. Температура растворов снижалась и в конечном итоге, как свидетельствуют результаты гомогенизации вторичных включений, достигла 80 °С [10].

Воздействие на кварцевую матрицу жильно-метасоматических зон поздних стадий гидротермальной деятельности обнаруживается повсеместно. Так, среди газовой-жидких включений в кварце в основном развиты первично-вторичные (и вторичные) включения с большим температурным диапазоном их гомогенизации. На кварцевую матрицу наложены серии рудоносных ассоциаций минералов с переменными количествами хлорита и серицита, которые в виде прожилков, просечек, пятнообразных выделений, вкраплений неравномерно рассеяны в кварце. При изучении под бинокулярном мелких фракций тонкозернистого кварца, которым сложены зоны, выявляется его неоднородное строение, выражающееся в частичном преобразовании плотного тонкозернистого агрегата кварца в прозрачные и полупрозрачные разности. Не исключено, что частичное преобразование первичных агрегатов кварца — следы длительной фильтрации метеорных вод, обусловленной закономерным восстановлением деятельности конвективной ячейки на завершающем этапе эволюции гидротермальной системы.

Считается, что изотопный состав серы сульфидных рудных месторождений обычно не позволяет однозначно решить задачу источника этого элемента [13]. По Р. Раю и Х. Омото [9], проблема источника серы рудных объектов может обсуждаться при условии определения $\delta^{34}\text{S}$, характеризующем изотопное состояние серы всех сосуществующих минеральных форм, в составе которых она присутствует. По мнению М.Л. Йенсена [6], узкий интервал значений $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов может являться свидетельством магматического происхождения серы. По данным [17], для сульфидов рудных объектов, ассоциируемых с гранитоидной магмой, характерны значения $\delta^{34}\text{S}$ в диапазоне от -4 до +4 ‰. В [18] этот диапазон несколько шире — от -9 до +11 ‰. Поскольку связь Многовершинного месторождения с местным вулканоплутоном очевидна, мы констатируем узкий интервал значений $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов этого объекта (-5,6 — +1,8 ‰) и фактическое совпадение с диапазонами в [17, 18].

О полигенности источников питания гидротермальной палеосистемы Многовершинного месторождения

На основе детального изучения строения жильно-метасоматических зон и анализа результатов изотопных исследований предложена принципиально новая схема формирования Многовершинного месторождения (рис. 3). Схема отражает полигенность источников питания гидротермальной системы, функционировавшей за счет восходящих гидротермальных потоков магматогенного происхождения при активном участии на заключитель-

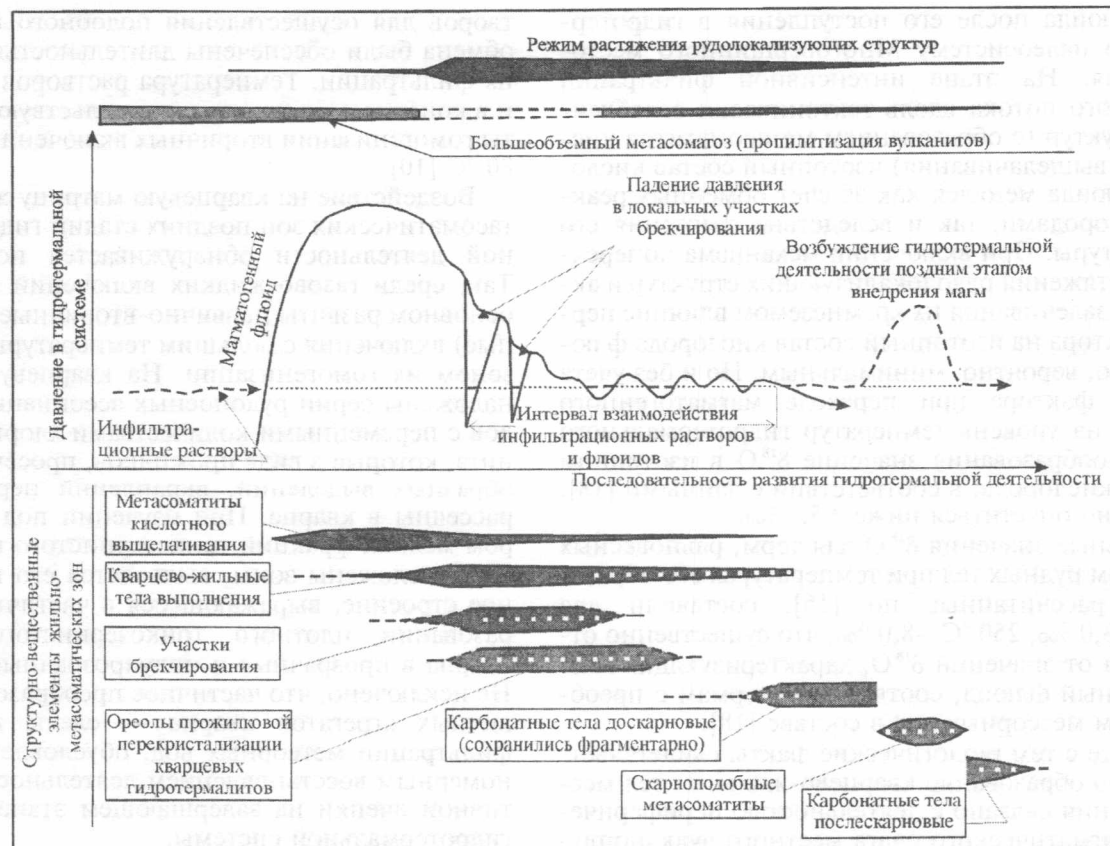


Рис. 3. Схема формирования оруденелых жильно-метасоматических зон Многовершинного золотосеребряного месторождения: отображено взаимодействие разнотипных по происхождению гидротермальных растворов и показано положение структурно-вещественных элементов, составляющих зоны; белый пунктир — вероятные место и время выделения рудной минерализации

ном этапе гидротермальной деятельности инфильтрационных растворов из состава конвективных ячеек.

Образование жильно-метасоматических зон, начавшееся с формирования мощной метасоматической колонки вдоль путей фильтрации ацидофильных флюидных потоков [11], продолжилось с поступлением в рудолокализирующие структуры значительных количеств кремнезема. Процесс раскрытия и залечивания разрывных нарушений кварцем был обусловлен устойчивым поперечным растяжением тектонически ослабленных структур. В образовавшейся таким образом кварцевой матрице жильно-метасоматических зон зафиксировались в той или иной мере все последовавшие затем события, связанные с гидротермальной деятельностью. В этой связи представляется не случайным первично-вторичное и вторичное происхождение большинства газовой-жидких включений в кварце и широкий температурный интервал их гомогенизации — 400—80 °C [10]. Поступление в рудолокализирующие структуры кремнезема сменилось затем притоком углекислотных растворов и залечиванием локальных участков карбонатами. Появление карбонатов в зонах кислотного выщелачивания обусловлено постепенным истощением магматогенного источника питания гидротермальной системы, падением флюидного давления в дренах и подключением к дренажным каналам инфильтра-

ционных растворов из поровых пространств окружающих пород. Процесс образования карбонатных тел был «приостановлен» их скарнированием вследствие возбуждения (реювенации) затухавшей гидротермальной деятельности при внедрении субщелочных магм [10], а затем, по «возвращении» гидротермальной системы к доскарновому температурному режиму, продолжен и завершен. После-скарновыми карбонатными телами маркируется завершение деятельности гидротермальной системы, сформировавшей оруденелые жильно-метасоматические зоны месторождения.

Заключение

Изотопные исследования позволили подтвердить полигенность источников питания гидротермальной системы при формировании Многовершинного месторождения. Смена в жильно-метасоматических зонах структурно-вещественных элементов кремнекислотного профиля (метасоматитов кислотного выщелачивания, кварцево-жильных гидротермалитов) карбонатными ассоциациями, отлагавшимися из близнейтральных растворов, обусловлена естественным истощением источника магматогенных флюидов и, как следствие, вытеснением последних из зон дренирования инфильтрационными растворами метеорного происхождения. Подобная эволюция гидротермального процесса на

гипабиссальном-субвулканическом уровне глубинности закономерна. Вместе с тем на завершающем этапе формирования месторождения «типовой» ход минералообразующего процесса был осложнен образованием скарноподобных метасоматитов и более низкотемпературных их аналогов (вследствие внедрения субщелочных расплавов, разогрева окружающего пространства и усиления гидротермальной деятельности). Характерно, что восстановление температурного фона, свойственного предскарновому периоду, привело к кратковременному возобновлению отложения карбонатов.

Сценарий развития гидротермальной палеосистемы Многовершинного месторождения акцентирован

вниманием на особенностях взаимодействия восходящих флюидных потоков и фильтрующихся растворов конвективной ячейки. Динамическая сущность интервалов такого взаимодействия (прерывистое проникновение инфильтрационных растворов в зоны дренирования магматических флюидов, способность их участков взаимодействия изменяться в размерах, перемещаться в плоскости зон), обусловлена флуктуациями такой реактивной характеристики гидротермальных систем, как флюидное давление.

Публикация подготовлена при содействии местного фонда РФФИ-ДВО РАН (грант № 06-05-96013).

ЛИТЕРАТУРА

1. Авченко О.В., Фатьянов И.И. Изотопный состав углерода и кислорода гидротермальных карбонатов золото-серебряного месторождения Многовершинного // Тихоокеанская геология. 1995. № 2. С. 150–153.
2. Бортников Н.С., Брызгалов И.А., Кривичка Н.Н., Прокофьев В.Ю., Викентьева О.В. Майское многоэтапное прожилково-вкрапленное золото-сульфидное месторождение (Чукотка, Россия): минералогия, флюидные включения, стабильные изотопы (О и S), история и условия образования // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. № 6. С. 101–105.
3. Волков А.В. Закономерности размещения и условия формирования золоторудных месторождений в зонах тектоно-магматической активизации Северо-Востока России // Геология рудных месторождений. 2005. Т. 47. № 3. С. 211–229.
4. Гончаров В.И., Ворошин С.В., Тюкова Е.Э. Геохимия стабильных изотопов руд и вмещающих пород Наталкинского месторождения // Геологические этюды / Под ред. К.В. Симакова. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2003. 198 с.
5. Егоров Д.Г., Абзалов М.З., Юхалин П.В. Генетическая интерпретация изотопного состава углерода и кислорода гидротермальных кальцитов Печенгского рудного поля // Геология рудных месторождений. 1991. Т. 33. № 1. С. 101–105.
6. Йенсен М.Л. Изотопы серы и проблемы минерогенеза // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир, 1970. С. 129–147.
7. Константинов М.М., Варгунина Н.П., Косовец Т.Н., Стружков С.Ф., Сынгаевский Е.Д., Шишаква Л.Н. Золото-серебряные месторождения. Серия: Модели месторождений благородных и цветных металлов. М.: Изд-во ЦНИГРИ, 2000. 239 с.
8. Моисеев В.Г., Сахно В.Г. Глубинные флюиды, вулканизм и рудообразование Тихоокеанского пояса. М.: Наука, 1982. 192 с.
9. Рай Р., Омото Х. Обзор исследований изотопов серы и углерода применительно к проблеме генезиса руд // Стабильные изотопы и проблемы рудообразования. М.: Мир, 1977. С. 175–212.
10. Фатьянов И.И. Стадийность и температурные условия формирования одного из золоторудных месторождений Нижнего Приамурья // Термобарогеохимия и рудогенез. Владивосток: ДВО АН СССР. 1980. С. 162–169.
11. Фатьянов И.И., Хомич В.Г. Строение и особенности образования жильно-метасоматических зон золото-серебряного месторождения Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса // Геологические условия локализации эндогенного оруднения. Владивосток: ДВО АН СССР. 1989. С. 86–100.
12. Фатьянов И.И., Хомич В.Г. Структурно-вещественные элементы жильно-метасоматических зон Многовершинного золото-серебряного месторождения (Нижнее Приамурье) как показатели эволюции гидротермальной рудообразующей системы // Рудные месторождения континентальных окраин. В. 2. Ч. 2. Владивосток: Изд-во «Дальнаука», 2001. С. 322–331.
13. Форг. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 589 с.
14. Хомич В.Г., Фатьянов И.И. Геолого-структурные элементы одного из золоторудных месторождений Нижнего Приамурья и их влияние на зональность оруднения // Структуры рудных полей и месторождений золота и серебра. В. IV. Владивосток: Изд-во ДВО АН СССР, 1985. С. 53–55.
15. Clayton R.N., O'Neil J.R., Mayeda T.K. Oxygen isotope exchange between quartz and water // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. P. 3057–3067.
16. Friedman I., O'Neil J.R. Data of geochemistry. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. U.S. // Geological Survey Professional Paper. 1977. 40–KK.
17. Ohmoto H., Rye R.O. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes H.L. (ed.) Geochemistry of hydrothermal ore deposits. New York: Wiley. 1977. P. 509–567.
18. Rollinson H.R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. London: Croupp UK Ltd. 1994. 352 p.
19. Solera A., Delgado J., Cardellach E., Ayora C. Fluid-rock interaction in skarns from La Gerdanya, Central Pyrenees, Spain: Evidence from carbon and oxygen isotopes // Water-rock interaction. 1992. V. 2. P. 1547–1551.

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
Рецензент — Г.Н. Пилипенко