

## ФЛЮИДНОЕ ДАВЛЕНИЕ И ГИДРОРАЗРЫВ ПОРОД ПРИ ГИДРОТЕРМАЛЬНОМ РУДООБРАЗОВАНИИ (НА ПРИМЕРЕ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ)

*Н.С. Остапенко, О.Н. Нерода*

*Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск*

Поступила в редакцию 3 марта 2006 г.

На основании проведенных детальных комплексных исследований золоторудного месторождения Токур (Верхнее Приамурье, Россия) и анализа опубликованных данных об уровнях флюидных давлений при формировании других разноглубинных гидротермальных месторождений, морфологии рудных тел и особенностей их размещения по отношению к породам различной проницаемости сделан вывод об активной роли флюидов в формировании рудолокализирующих структур по механизму разуплотнения и гидроразрыва флюидовмещающей среды. Рассмотрены условия возникновения и возможные следствия гидроразрыва пород при рудообразовании. Приведены признаки участия этого механизма в формировании рудных тел золоторудных месторождений Покровское, Березовское, Нежданинское (Россия) и Бендиго (Австралия).

**Ключевые слова:** гидротермальное месторождение золота, давление, вмещающие породы, гидроразрыв, Россия, Австралия.

### ВВЕДЕНИЕ

Рудные месторождения формируются в широких диапазонах глубин, температур и давлений. Методы оценки флюидных давлений более сложны, чем методы оценок температур рудообразования, поэтому данных по флюидным давлениям в публикациях гораздо меньше. Систематизируя накопленные данные по давлениям рудообразующих флюидов, В.Б. Наумов [12] показал, что около 20 % известных к тому времени определений давлений флюидов укладываются в интервал 1–5 кбар. В дальнейшем, особенно при изучении более глубинных месторождений, исследователи часто отмечали широкие диапазоны флюидных давлений, существовавших при их формировании. Так, минеральные парагенезисы среднеглубинного золоторудного месторождения Коммунар [6, 40] формировались в интервале давлений 3.5–0.9 кбар, месторождения Нежданинское (Саха Якутия) – 1.7–1.2 кбар [4], месторождения Чармитан (Узбекистан) – 2.73–0.9 кбар [2], месторождения Рябиновое на центральном Алдане – 7.0–0.6 кбар [14], глубинного месторождения Колар (Индия) – 6.0–0.7 кбар [13, 26, 40] и т.д. Таким образом, имеется немало данных, свидетельствующих о величинах флюидных давлений, приближающихся к литостатическим на глубинах рудообразования или

даже превышающих их. Это заставляет отнестись критически к сложившимся взглядам на гидротермальное рудообразование как на процесс, полностью подчиненный только тектоническим пульсациям.

Для ряда хорошо изученных по латерали и на глубину жильных золоторудных месторождений золото-кварцевой и золото-серебряной формаций часто характерна объемно-коническая или уплощенно-коническая форма пространственной организации рудных тел. От верхних к глубоким горизонтам месторождений обычно снижается количество рудных тел и их протяженность. Такое закономерно повторяющееся строение (инфраструктура) месторождений в вертикальном интервале от сотен метров до нескольких километров (например, на несомненно глубинном месторождении Колар в Индии [13], на среднеглубинных Наталкинском, Нежданинском и др. и малоглубинных месторождениях России Кубака, Карамкен, Дукаг, Арылах, а также Гуанохуаго в Мексике [9] и многих других) вряд ли можно объяснить только тектоническим фактором. Можно предположить активное участие флюида в «дооформлении» тектонической структуры месторождений посредством гидравлического раскрытия полостей, особенно интенсивного на средних и верхних горизонтах рудолокализации. Преимущественное раскрытие полостей и связанное с этим нарастание масштабов

минералоотложения в гидротермальных системах на средних и верхних горизонтах рудолокализации обусловлено градиентом снижающегося литостатического давления.

Так каковы же основные условия возникновения и признаки проявления гидравлического раскрытия рудовмещающих трещин и контактовых полос отслоения?

#### УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФЛЮИДРАЗРЫВА ПОРОД И ЕГО ИНДИКАТОРНЫЕ ПРИЗНАКИ

В соответствии с исследованиями Г.Л. Поспелова [25], У. Файфа с коллегами [32], С.Е. Nelson, D. L. Giles [39] и других исследователей, основным условием появления полостей гидроразрыва или гидроотслоения на контактах пород является достижение флюидом «критического» давления  $P_{кр}^{FL}$ , способного преодолеть литостатическую нагрузку  $P_{лит}$  и прочность пород. Представляется, что для возникновения таких высоких флюидных давлений необходима объемная флюидолокализирующая структура (коллектор флюида), перекрытая слабопроницаемыми породами, но открытая для поступления флюидов снизу. Идеальными флюидо- и рудолокализирующими структурами являлись экранированные линейные антиклинали в толщах переслаивания пород (например, как на известном месторождении Бендига в Австралии), купольные структуры, зоны надвига со слабопроницаемыми породами аллохтона. Для появления полостей отслоения благоприятны контакты хрупких (песчаники) и пластичных (сланцы) пород. Как показывает практика нефтедобычи, гидроразрыв может начаться и с раскрытия уже существующих тектонических трещин при флюидных давлениях, еще не достигших литостатического уровня [25].

Гидрораскрытие может начинаться по наиболее хорошо развитой тектонической трещине и развиваться прерывисто-стадийно, с нарастанием во времени зернистости жильного выполнения. Полосчатозональное строение рудных тел является свидетельством неоднократного раскрытия (наращивания) полости вследствие флуктуации внутрифлюидного давления. Очевидно, участки максимального раскрытия соответствуют местам достижения максимальных давлений в гидротермальной системе.

Раскрытия (дораскрытия) полостей происходят от инициальной точки (где достигнуто  $P_{кр}$ ) по градиенту снижения литостатического давления (то есть вверх и в стороны, что часто придает веерообразную форму рудному телу или коническую форму пространству, занимаемому однокорневой группой взаимосвязанных жил [8]).

Признаками гидроразрыва пород или гидравлических раскрытий полостей под действием внутрифлюидного давления в гидротермальной системе являются: одновременное раскрытие всей существующей сети трещин различных направлений, возникновение новых трещин отрыва и выполнение всех их единым минеральным комплексом; сложные взаимоотношения (сопряжения) систем одновременно формирующихся сблизженных жил; неровные границы жильных тел; угловатость и отсутствие признаков тектонического перетирания обломков брекчий в цементирующей жильной массе [18]; литологическая однородность и идентичность состава обломков с прилегающими породами; присутствие в зальбандах жил породных фрагментов, еще не полностью отделившихся от субстрата.

К этому перечню признаков следует добавить и следующие: отмечаемое исследователями [7, 8, 15] ветвление жильных тел от нижних горизонтов месторождений к верхним и увеличение количества и размеров продуктивных тел в этом направлении; наблюдаемое нами строго последовательное (по мощности и во времени) развитие текстур руд от вкрапленной, прожилково-вкрапленной и сетчатой в прилегающих к жилам зонах, брекчиевой, коккардовой – в промежуточной части до массивной и друзовой – в последующих зонах. При развитии рудных тел в стиле случайных тектонических пульсаций вряд ли можно ожидать такой строгой пространственно-временной последовательности, тем более в единой структуре.

От брекчий другого генезиса (осадочных, эруптивных, флюидно-эксплозивных, гидротермально-инъекционных и других) гидротермальные брекчии гидроразрыва отличаются мономиктностью (отвечают только составу прилегающих пород), неокатанностью обломков, гидротермальным рудно-жильным цементом заполнения, тесным сочетанием с другими (вышеотмеченными) вещественно-структурными минеральными комплексами заполнения свободного пространства. Брекчиевые текстуры руд, на наш взгляд, отвечают более «зрелому» состоянию развития прожилково-сетчатых текстур, когда обломки пород оказываются более раздвинутыми, а выполняющий прожилки минеральный комплекс занимает существенную долю объема (более 30–50 %).

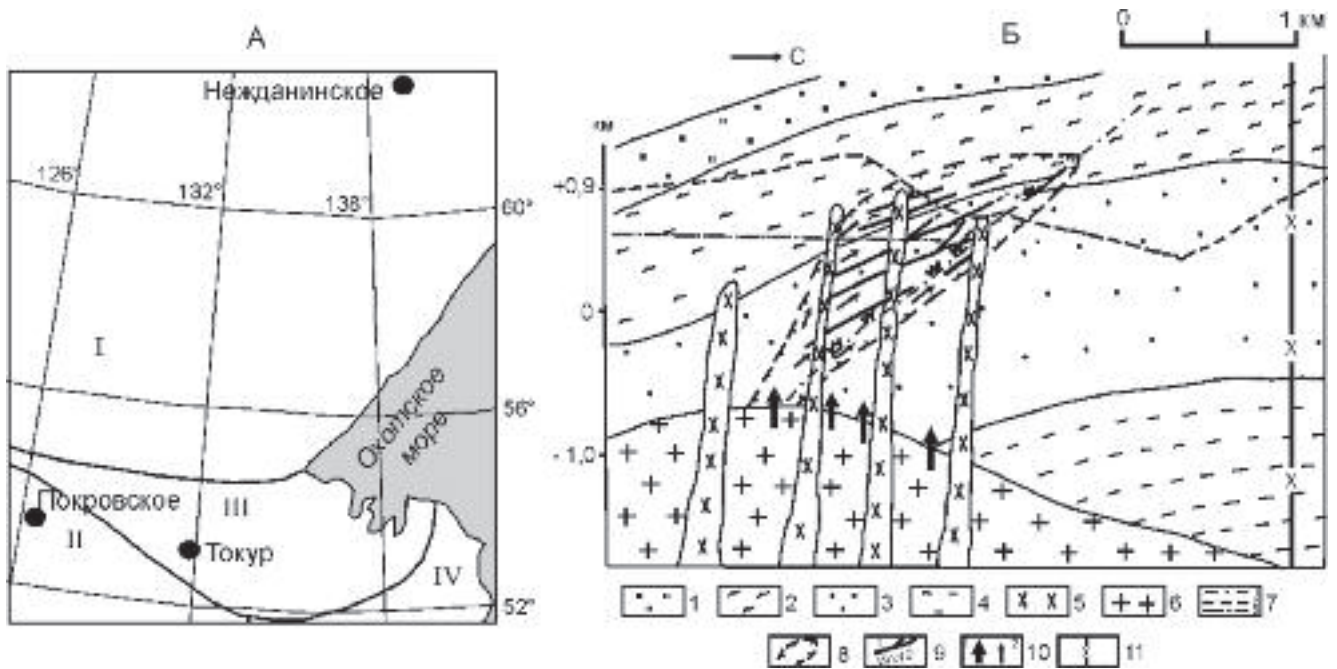
Рассмотрим признаки и следствия проявления механизма гидроразрыва пород и гидравлического раскрытия трещин в формировании некоторых золоторудных месторождений.

**ПРИЗНАКИ ГИДРОРАЗРЫВА ПОРОД ПРИ  
ФОРМИРОВАНИИ РУДНЫХ ЖИЛ ТОКУРСКОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Токурское месторождение малосульфидной золото-кварцевой формации детально изучено как в геологическом, так и в минералогическом отношении [16, 30, 33 и др.]. Расположено оно (рис. 1А) в восточной части Монголо-Охотского складчатого пояса в толще терригенных пород карбона и перми. По имеющимся геологическим и геофизическим данным, Токурское золоторудное месторождение сформировалось в южном крыле широтной Челогорской антиклинали среди пологозалегающих терригенных отложений в надинтрузивной зоне мезозойского гранитоидного плутона (рис. 1Б), кровля которого находится на глубинах 1.5–2 км от современной поверхности [27, 36], а выше распространяются дайки и штоки пород преимущественно среднего состава. Южное крыло антиклинали пересечено Главным разломом продольной ориентировки, шов которого,

как и слои пород, полого (под углами 30–40°) погружается на юг. Этот разлом является на месторождении основной флюидовыводящей и рудоконтролирующей структурой [17]. Флюидопроводник и кварцевые жилы располагаются в комплексном эндогенном ореоле As, Au, Ag, W, Pb, Zn и др. элементов.

Все продуктивные жильные тела месторождения сосредоточены в его висячем крыле в слоистой существенно песчанниковой толще под экраном алевро-аргиллитов верхней части экимчанской свиты. В пределах месторождения южное крыло этого разлома расчленено дорудными поперечными сбросами на серию смещённых относительно друг друга тектоноблоков шириной порядка 250–450 м каждый. Жильная минерализация присутствует в каждом из них, но проявлена неравномерно, что можно объяснить различной их проницаемостью и экранирующей ролью разделяющих их сбросов. Максимальное количество продуктивных жил месторождения сосредоточено между Диори-



**Рис. 1.** Расположение (А) и схематический поперечный разрез (Б) месторождения Токур.

I – Сибирский кратон, II – Буреинский массив, III – Монголо-Охотская складчатая область (восточный фланг), IV – Сихотэ-Алинская складчатая область.

1 – кремни, песчаники, сланцы (амнусская свита); 2 – экранирующая толща: алевролиты, аргиллиты с отдельными пластами песчаника (экимчанская свита); 3 – рудовмещающая толща: песчаники с отдельными пластами алевролита и флишоиды (токурская свита); 4 – кварц-серицитовые сланцы (сагурская свита) – все свиты предположительно пермо-карбонного возраста; 5 – диориты и сиенодиориты К<sub>1</sub>; 6 – гранитоиды нескрытого плутона К<sub>1</sub>; 7 – зона флюидоконтролирующего Главного разлома (1), поверхность современного эрозионного среза (2), глубина разведки (3); 8 – контур комплексного эндогенного ореола месторождения: Au, As, W, Ag, Pb, Zn; 9 – основные полости гидроотслоения и гидроразрыва, вместившие золото-сульфидно-кварцевые жилы (1), зона вкрапленно-метасоматического оруденения (2); 10 – зоны поступления (1) и разгрузки (2) флюидов; 11 – осевая плоскость Челогорской антиклинали.

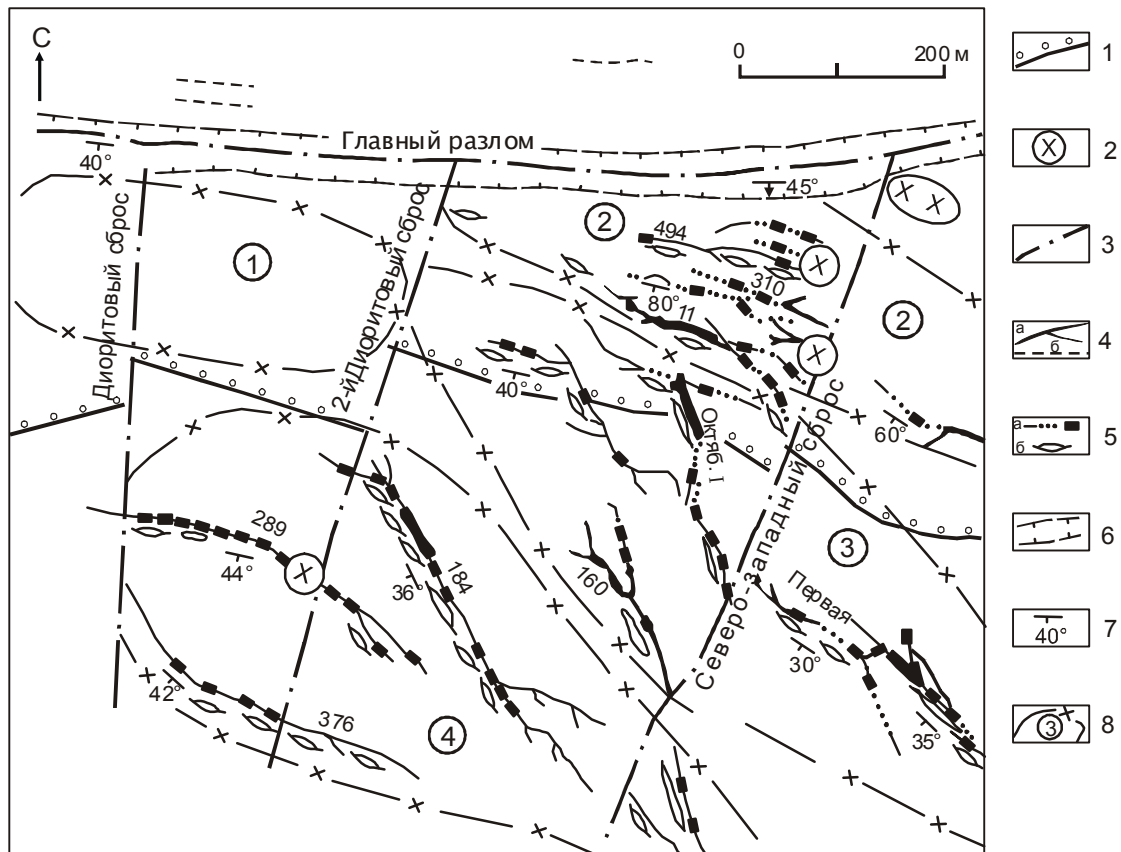


Рис. 2. Жильные системы и морфология жил. Центральная часть месторождения Токур, гор. 700 м.

1 – граница толщ песчаной (севернее) и флишоидно-аргиллитовой с пластами песчаников (южнее границы); 2 – штоки диоритов; 3 – основные разломы; 4 – кварцевые жилы (а) и маломощные зонки окварцевания (б); 5 – содержания золота в жилах (бедные, рядовые, богатые) (а) и раздувы мощности (более 0.3 м) (б); 6 – зона окварцевания и вкрапленной сульфидной минерализации; 7 – залегание разломов и жил; 8 – группы взаимосвязанных жильных систем (цифры в кругах): 1 – жилы Октябрьские V и VI, располагающиеся ниже горизонта 700 м; 2 – крутопадающие жилы 11, 103, 310, 494 и др.; 3 – жилы Октябрьские I – IV, 160 и Первая; 4 – жилы 184, 289, 376.

товым и Юго-Восточным сбросами в трех центральных блоках (рис. 2), отличающихся от остальных максимальным скоплением внутрирудных даек порфиритов и штоков диоритов мелового возраста [36]. Это свидетельствует о максимальной проницаемости именно этих тектоноблоков для флюидов и магматических расплавов и о вероятном расположении Токурского месторождения над одним из длительно формирующихся куполов не вскрытого плутона (рис. 1Б, 2), контролирующего основной поток магматогенных флюидов. По реставрации стратиграфического разреза палеозойской рудовмещающей толщи, глубина формирования верхних уровней месторождения составляла примерно 2 км от палеоповерхности [16], что соответствовало литологическим нагрузкам около 500–600 бар.

Для обоснования механизма гидравлического раскрытия жилосмещающих полостей нами использованы результаты изучения морфологии жил и жильных систем, текстурной зональности по мощности и восстанию жил, особенностей распределения мощностей жильного выполнения, содержаний золота, позиции выделений самородного золота в жилах, структуры температурного поля на этапе формирования продуктивной минерализации. Кроме этого нами было оценено максимально возможное давление флюида на ранней стадии формирования месторождения. В краткой форме признаки проявлений гидро-разрыва были обозначены нами в [21]. Охарактеризуем наиболее важные из них подробнее.

**Ветвление жильных тел.** Особенностью жильных тел Токурского месторождения является направленное изменение их морфологии. От нижних уровней к верхним они усложняются – ветвятся и

“обрастают” апофизами (рис. 3). Это же часто наблюдается и по простиранию жил (рис. 2). Вблизи ограничивающих тектоноблоков крупных поперечных сбросов многие жилы разветвляются, теряют мощность и выклиниваются (например, жилы 184, 160, Первая и др.). Лишь некоторые из них проникают в соседние тектоноблоки, но мощность и содержания золота в них резко снижается. Отмеченное боковое выклинивание жил можно объяснить экранирующей ролью поперечных сбросов (препятствующей боковому растеканию флюидов и прохождению трещин разрыва в соседний тектоноблок). Максимальное число гидравлических раскрытий возникло в наиболее проницаемых, насыщенных флюидами

внутренних частях тектоноблоков, примыкающих к Северо-Западному сбросу.

**Дискретность раскрытия жил** отражена на рис. 4, отображающем полный поперечный разрез продуктивной жилы 184. Вещественный состав и текстурно-структурная неоднородность позволяют наметить в поперечном сечении жилы пять полос и не менее четырёх зон, соответствующих нескольким этапам (ступеням) последовательного формирования жильного выполнения.

**Зона I** сложена угловатыми, вытянутыми параллельно контакту обломками сланца, сцементированными тонкозернистым изометричным серым кварцем ранней генерации с тонкой вкрапленностью

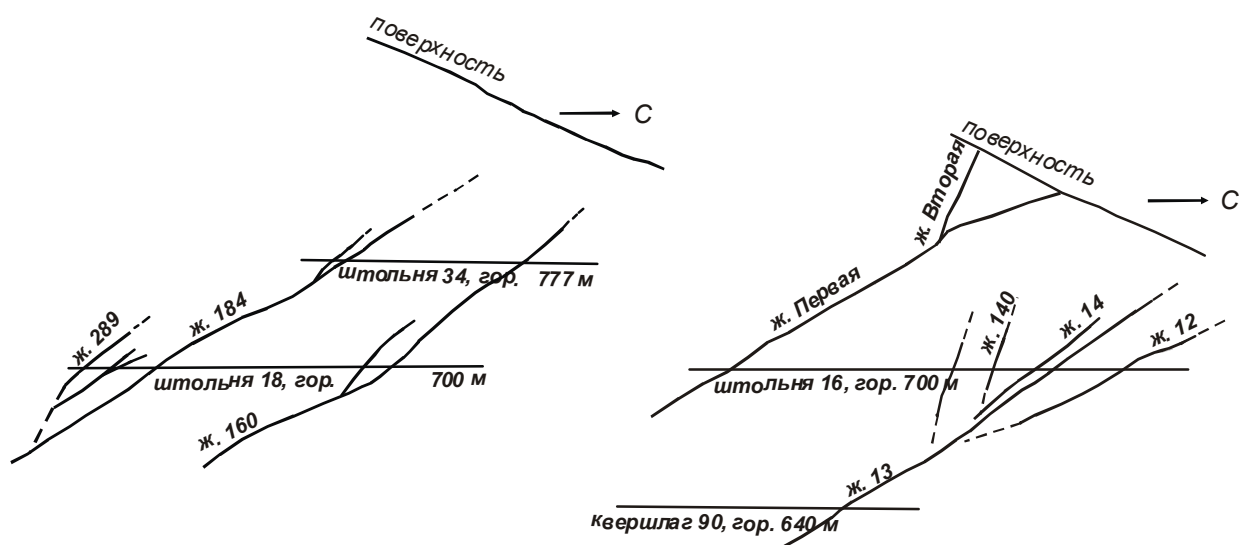


Рис. 3. Ветвление жил на верхних уровнях месторождения Токур (поперечные разрезы).

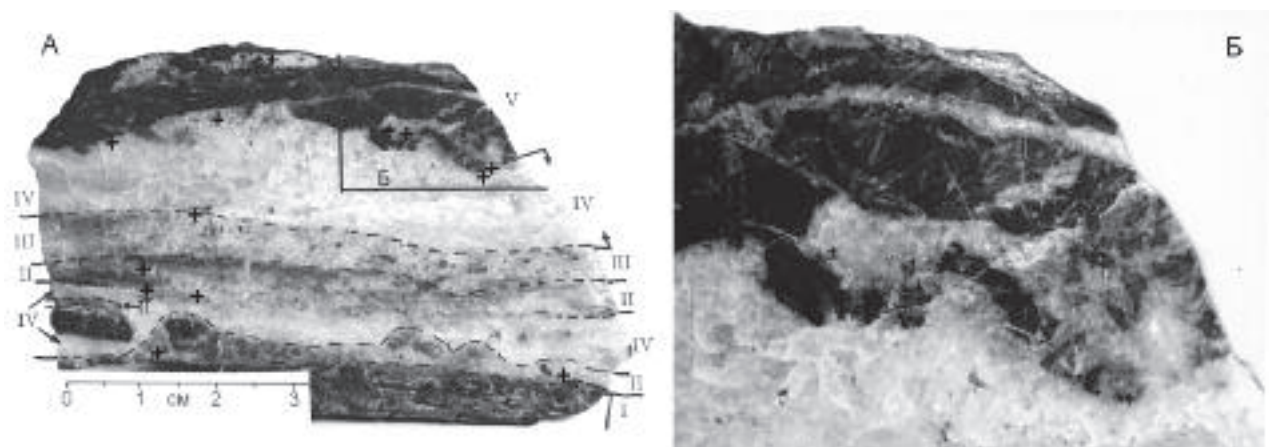


Рис. 4. Зональное строение продуктивной жилы 184 месторождения Токур.

А – поперечный разрез жилы, горизонт 777 м. I–IV – зоны в последовательности их формирования, пояснения в тексте; V – сланцевый зальбанд жилы с прожилками и гнездами кварца. Центрами крестиков отмечено положение золотин вне масштаба.

Б – деталь отчленения фрагментов вмещающей породы по трещинам, выполненным кварцем. Ув. 4х.

сульфидов. Доля обломков пород в этой зоне превышает 50% её объёма. Сульфиды присутствуют и в обломках пород.

**Зона II** возникла по контакту зоны I с вмещающей породой путем раздвижения трещин и образования массы мелких угловатых обломков вмещающих пород, обрастающих кварцем. 90% объёма этой зоны сложено мелкозернистым серым кварцем, цементирующим обломки пород. Позднее, после нового раскрытия, по центру этой зоны отложился поздний белый зернистый кварц, аналогичный формировавшемуся в IV зоне.

**Зона III** сложена серым мелко-, среднезернистым кварцем. В нем содержится масса мелких угловатых обломков сланца. Образовалась она вследствие последующего раздвижения по контакту зоны II и вмещающей породы. Текстура выполнения мелкобрекчиевая.

**Зона IV** сложена средне-, крупнозернистыми, кристаллографически оформленными вытянутыми кристаллами молочно-белого кварца с малым числом обломков вмещающей породы и минерального комплекса зоны III. Она занимает верхнюю часть жилы. Этот же кварц, как упоминалось выше, отложен и в полости, раскрывшейся по осевой плоскости зоны II. Здесь в нём наблюдаются отторженцы кварца и брекчии зоны I (два крупных обломка внизу слева). По трещине разрыва прожилки этого кварца под углом  $90^\circ$  уходит в лежащий зальбанд жилы (закрит масштабной линейкой), не смещая более ранние зоны.

Вмещающая порода выше зоны IV, содержит разновременные прожилки различной мощности и гнезда кварца, мелкую вкрапленность сульфидов. Её граница с зоной IV извилистая. На рисунке 4-А, в правой части зоны V, видны еще не полностью отделившиеся от породы фрагменты. Увеличенная деталь этого участка показана на рис. 4-Б. На ней отчетливо видны разрастание наиболее доступных для растворов трещин в породе, с превращением их в сложные прожилки и отторжение ими от массива новых фрагментов породы. Их ориентировка субпараллельна осевой плоскости жилы. Угловатые обломки зарождающейся брекчии также присутствуют в субпараллельном жиле изолированном линзовидном прожилке кварца (в самой верхней части рисунка 4-А), сформировавшемся в трещине разрыва. В зальбанде этого прожилка присутствует выделение золота размером около 0,1 мм.

В поперечных срезах продуктивной жилы 160 намечается до шести последовательных текстурно-вещественных зон и не до конца отторженные фрагменты алевrolита. Приведённые данные свидетель-

ствуют о том, что эти и другие жилы этого месторождения формировались путем дискретного раскрытия полостей вследствие раздвижения стенок с отторжением по мелким трещинам обломков вмещающей породы и ранее сформировавшихся жильных парагенезисов и цементацией их новой генерацией кварца.

Мелкие (около 0,1 мм) выделения самородного золота присутствуют в зонах II, III и IV (места его выделений отмечены на рисунках крестиками). Предполагаются они в зальбандах этих зон в ассоциации с наименее мелкозернистым кварцем каждой генерации, что свидетельствует о неоднократном отложении золота в процессе формирования жилы. В некоторых прожилках кварца во вмещающей породе также имеются мелкие золотишки в той же, призальбандовой позиции (рис. 4-Б).

Изучение поперечного строения многих жил показывает, что сульфидность минеральных ассоциаций по мере развития процесса убывает. Карбонат наблюдается в друзовых пустотах в позднем кварце, в основном, на верхних уровнях жильных тел, либо в поздних прожилках

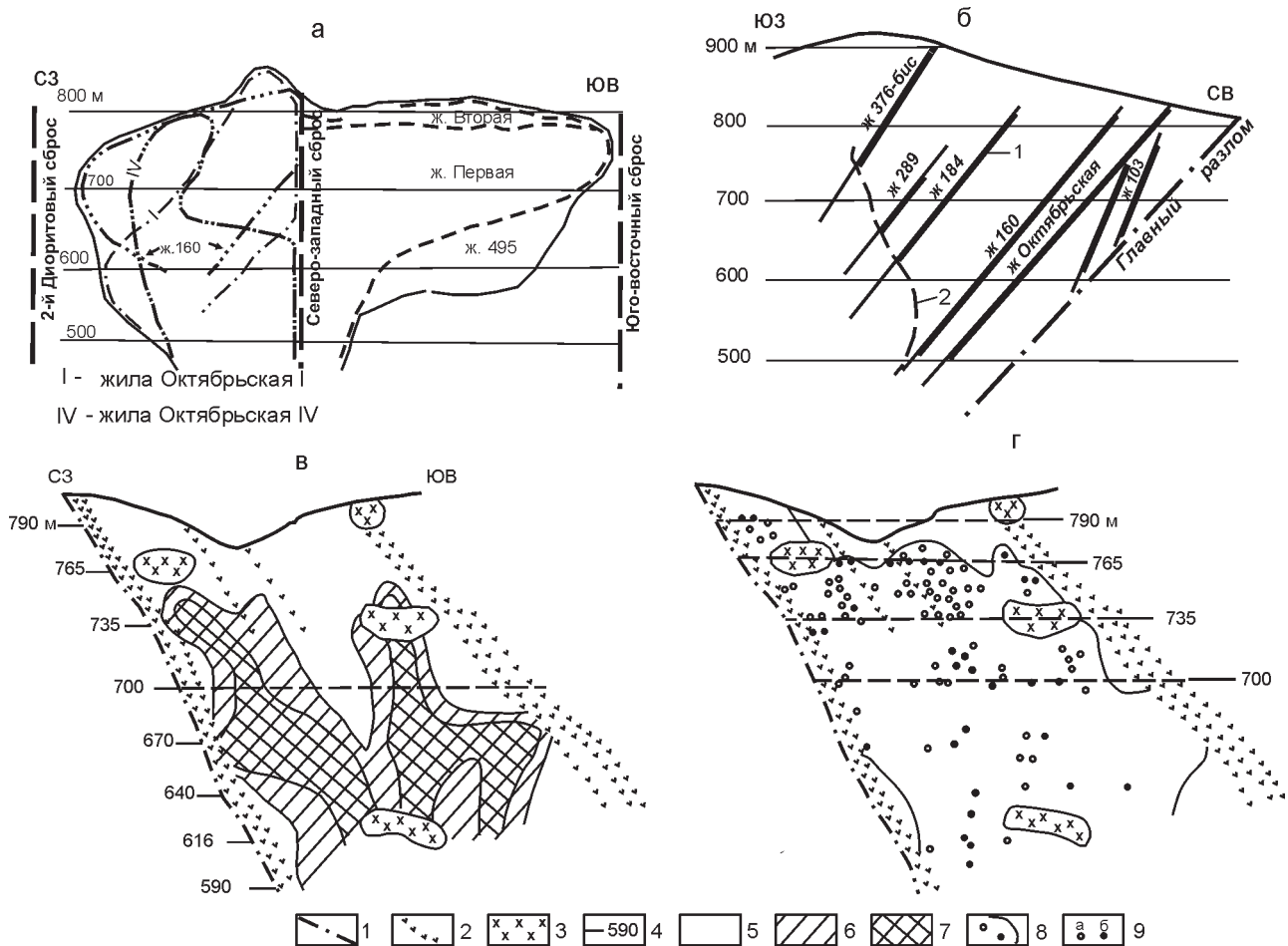
Таким образом, текстурную зональность жил Токурского месторождения можно охарактеризовать последовательной (от зальбандов или одного из них и во времени) сменой вкрапленной, прожилково-вкрапленной, брекчиевой, массивной или друзовой, а структурную – укрупнением индивидов кварца в каждой последовательной зоне, что можно связать с уменьшением перепада давления, переиссыхания и скорости роста минералов при последующих раскрытиях. Приведенные результаты наблюдений интерпретируются нами как последовательное дискретное гидравлическое раскрытие флюидами жилывмещающей полости, концентрирующимися в зоне трещиноватых пород, окружающих основную жилывмещающую структуру. При этом прожилковые текстуры трансформировались, в последующем, в брекчиевые за счет прогрессирующего раздвижения фрагментов пород по подновляющимся прожилкам.

**Связь рудных столбов с гидравлическим раскрытием полостей.** В центральной части месторождения выделяются четыре группы взаимосвязанных продуктивных жил сложной морфологии (рис. 2). Каждая из них сформировалась от обособленной корневой системы в пределах одного – двух тектоноблоков. Из них зона 1 на этом горизонте не разведана (но разведана ниже). Гидравлическая взаимосвязь жил в группах подчеркивается совмещением (с частичным наложением) контуров их богатых рудных столбов в единый рудный столб (рис. 5-а), расширяющийся снизу к средним и верхним горизон-

там. Гидравлически связанными между собой посредством ответвлений и проводников можно считать и все жильные группы. Это подтверждается закономерным постепенным повышением нижней границы распространения богатых рудных столбов жил месторождения по мере удаления на юг от основного флюидопроводника – Главного разлома (рис. 5–б), что можно связать со снижением флюидного давления в гидротермальной системе по мере удаления от флюидопроводников в этом направлении. В связи с этим раскрытия полостей на продуктивной стадии происходили лишь на литологически менее нагруженных более высоких уровнях. На наиболее продуктивную группу жил № 3, включающую жилы Первую с апофизами, Октябрьскую I с апофизами,

II–VI, 360 и жилу 160, приходится 70 % промышленного золота, сосредоточенного в жильных телах месторождения.

Между такими показателями жил, как мощность минерального выполнения и содержание золота в полости жилы прямая корреляция отсутствует (рис. 6). Вместе с тем, изучение распределения содержания золота выявило для многих продуктивных жил месторождения одну важную особенность, проиллюстрированную на примере жилы Первая (рис. 5 в и г). Повышенные содержания золота в рудных телах пространственно тяготеют к участкам с максимальными мощностями жильного выполнения, но пробы с наиболее высокими содержаниями золота чаще всего располагаются на боковой и верхней пе-



**Рис. 5.** Рудные столбы жил и жильных систем.

а – рудные столбы жильной системы 3 на продольной вертикальной проекции (жилы Октябрьские I, IV, Первая, Вторая, 160, 495); б – гипсометрическое размещение, 1 – рудные столбы (утолщенные линии) жил месторождения на поперечной вертикальной проекции, 2 – нижняя граница распространения рудных столбов; в–г – проекция на вертикальную плоскость западной части жилы Первая: структура мощности жильного выполнения (в) и распределение богатых золотом проб по результатам разведки и отработки жилы: 1 – дорудный сброс; 2 – дайки диоритовых порфиров; 3 – штоки диоритов; 4 – разведочные горизонты; 5–7 – мощности жильного выполнения (в см): 5–30 (5), 31–50 (6), 61–80 (7); 8 – граница участка с содержаниями более 10 г/т; 9 – пробы с содержаниями 50–100 г/т (а) и 101–300 г/т и более (б).

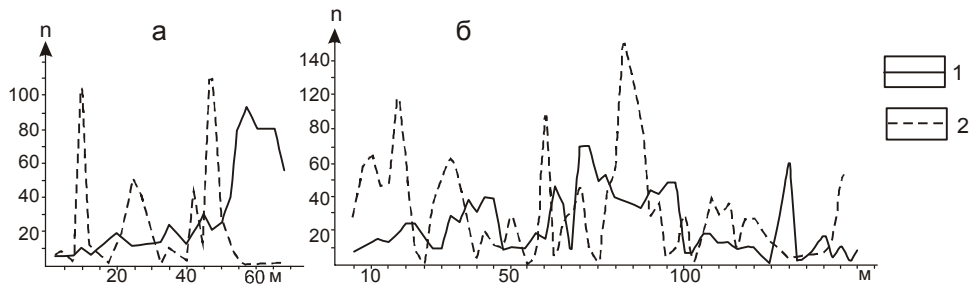


Рис. 6. Графики мощности и содержания золота по простиранию жил.

а – жила 31<sup>а</sup> (штрек 9, горизонт 750м), б – жила 46 (траншея 5); 1 – мощность жильных тел (в см), 2 – содержания золота (в г/т).

риферии этих максимумов (рис. 5-г), то есть на участках переходных мощностей. Эта же закономерность видна и на примере жилы 160 (рис. 7-в и г) и характерна для остальных изученных продуктивных жил этого месторождения. Участки повышенных мощностей жил – это максимумы суммарных последовательных раскрытий полостей, то есть локальные участки неоднократных резких падений давлений в гидротермальной системе. Следовательно, параметр  $P$  можно считать ответственным за создание неравномерных концентраций золота в объеме жильных тел и образование золоторудных столбов.

Термобарогеохимическими исследованиями минералов методом гомогенизации\* [10] и вакуумной декрепитации\*\* [20] установлен широкий температурный интервал (360–110°C) формирования жильной минерализации этого месторождения. Температурный интервал формирования минеральной ассоциации продуктивной стадии, по данным гомогенизации, оценивается в 250–200°C [10], а по данным вакуумной декрепитации – в 270–230°C [20]. Рудообразующие флюиды, судя по включениям в кварцах допродуктивной и продуктивной стадий (таблица), имели щелочно-гидрокарбонатно-хлоридный состав и особенно высокие содержания газов (до 90.6 г/кг, в том числе  $\text{CO}_2$  77 г/кг флюида или 2.7 моля/кг воды) и солевых компонентов (до 262 г/кг флюида) в раннем метасоматическом кварце минерализованной зоны Главного разлома [19]. От нижнего горизонта месторождения к верхним на изученном вертикальном интервале 750 м газонасыщенность флюидов в раннем метасоматическом кварце снижалась в 3.8 раз. Наличие в кварцах продуктивной стадии семейств включений с различ-

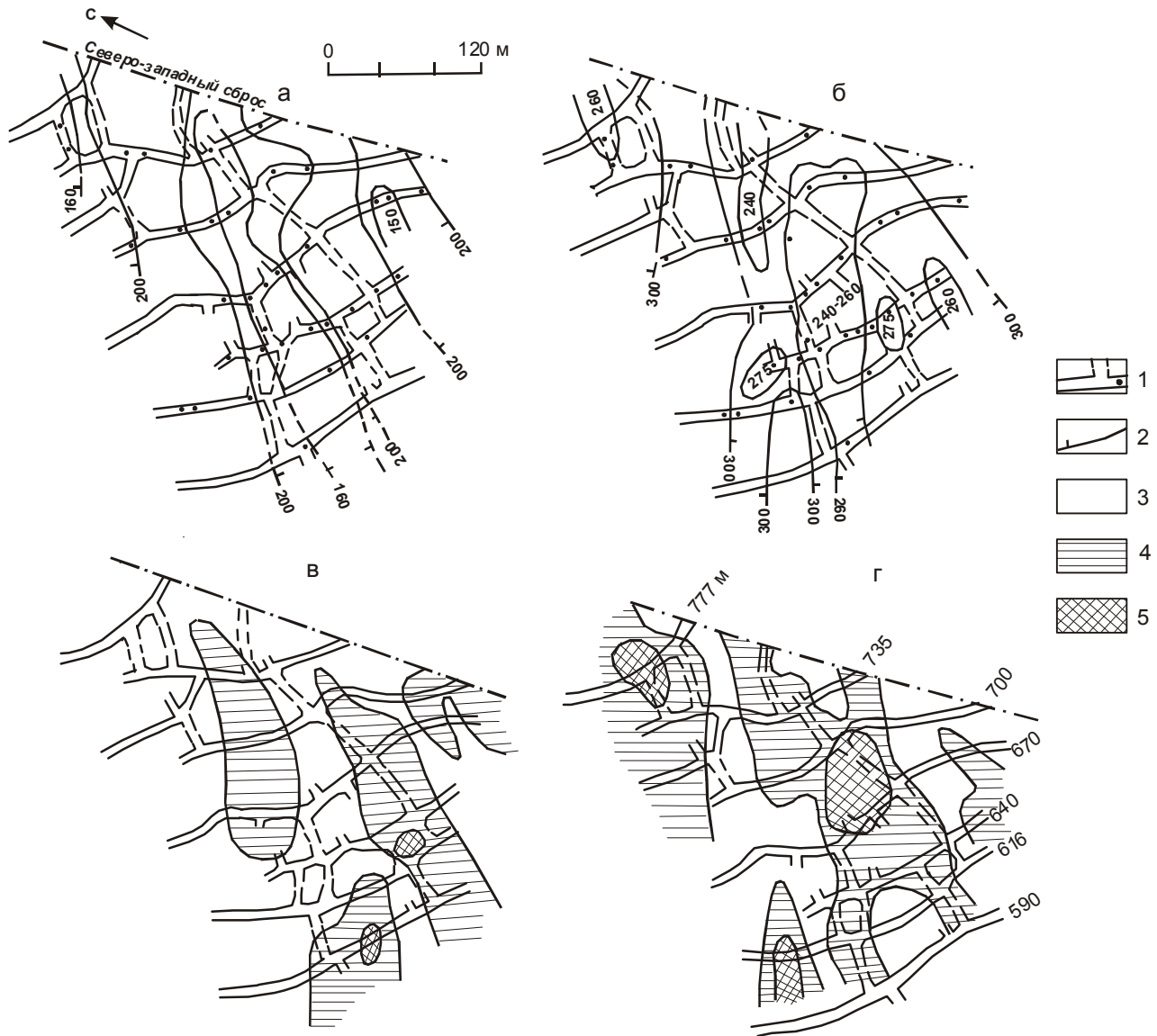
ным соотношением газовой и жидкой фаз [10] свидетельствует о проявлении гетерогенизации флюида. На основании установленных усредненных составов флюидов и максимальных температур гомогенизации по приведенным в работе [37] диаграммам  $P$ – $T$  зависимостей оценены максимально возможные давления флюида на допродуктивном этапе минералообразования. Для глубоких горизонтов месторождения они не превышали 1.9–2.5 кбар.

Представляют особый интерес полученные на примере жилы 160 данные о соотношении концентраций золота и температурных полей флюида на продуктивной стадии рудообразования (рис. 7). Монофракции чистого кварца для этих исследований отбирались из образцов руды, взятых в горных выработках, вскрывающих жилу на различных горизонтах. Температуры декрепитации были определены в АмурКНИИ на вакуумном декрепитометре ВД-3. Интерпретация результатов измерений проводилась по методике, изложенной в [20]. Структуры температурного поля (рис. 7-а и б), отстроенные по данным начала (а) и средней (в) температуры вакуумной декрепитации, в общих чертах сходны между собой. Изотермы этих полей ориентированы субвертикально. В центре и по флангам на них выделяются по три зоны пониженных температур. Аналогичную субвертикальную ориентировку максимумов имеют поля мощностей и содержания золота в этой жиле (рис. 7-в и г). Сопоставления полей показывают, что с зонами пониженных температур удовлетворительно совмещаются богатые золотом участки жилы. Вместе с тем, отображенные по результатам обработки богатые участки жилы (рис. 7-г) занимают в

\*В кварцах исследовались группы первичных включений гетерогенного захвата. Поправка к температурам на давление не требуется.

\*\*Методом вакуумной декрепитации на установке ВД-3 искусственно выращенных во ВНИИСИМСе кварцев при параметрах, близких к параметрам природных рудообразующих систем ( $T$  – 353–360°,  $P$  – 1300 бар), установлено, что средние температуры вакуумной декрепитации (350°) близки к температуре синтеза [20] или минералообразования.





**Рис. 7.** Структура температурных полей на стадии формирования продуктивной стадии ассоциации (по данным вакуумной декрепитации кварца) и концентрационных полей золота жилы 160 месторождения Токур. (Проекция на горизонтальную плоскость).

а – поля начала и б – поля средних температур декрепитации кварца-2 (в °С): 1 – штреки, во встающие (штриховые линии) и точки отбора проб кварца для декрепитации по горизонтам разведки, 2 – границы полей; в – структура мощностей жилы (в см): 3 – 10–30, 4 – 31–50, 5 – 51–80; г – поля концентраций золота (в г/т): 3 – < 5, 4 – 5–30, 5 – 31–100 и выше.

основном периферическое положение относительно раздувов мощности (западный и восточный), либо частично совмещаются с ним с небольшим смещением относительно максимума мощности вверх (центральный). Эти соотношения мы интерпретируем как: 1) отложение золота главным образом в участках снижения средних температур декрепитации (минералообразования) (270–230 °С); 2) периферическое расположение (и частичное совмеще-

ние) обогащенных участков относительно раздувов является свидетельством того, что снижение температуры есть результат падения давления в адиабатическом процессе расширения флюида в раскрывшейся полости.

**Резюме.** Токурское месторождение сформировалось, вероятнее всего, в раннемеловое время [16, 33], то есть значительно позднее масштабных тектонических процессов коллизионного этапа замыкания

**Таблица. Состав флюидов на ранней и продуктивной стадиях формирования месторождения Токур (г/кг флюида, по данным анализов вытяжек и хроматографии декрепитированных кварцев).**

Компоненты флюида	Метасоматические зоны, горизонты			Кварц продуктивной стадии
	+100 м	+540 м	-780 м	
K	52.77	20.56	14.14	6.72
Na	28.46	20.04	20.02	27.22
Ca	6.93	5.57	–	2.56
Mg	7.82	6.07	1.63	6.72
NH <sub>4</sub>	1.240	2.57	0.93	–
Σ кат	97.23	54.82	36.72	43.22
HCO <sub>3</sub>	122.01	95.80	39.35	60.62
Cl	12.67	4.07	4.30	19.53
F	3.47	2.57	1.67	1.60
SO <sub>4</sub>	26.73	15.28	20.76	7.20
BO <sub>3</sub>	–	–	2.26	0.36
Σ ан	164.88	117.72	68.54	89.31
Σ кат + ан	262.11	172.53	105.25	132.53
H <sub>2</sub>	0.78	0.42	1.04	0.15
N <sub>2</sub>	0.85	0.37	0.68	0.71
CO	10.84	7.18	5.47	4.79
CH <sub>4</sub>	1.45	1.14	1.88	0.66
CO <sub>2</sub>	76.69	64.19	14.57	33.65
Σ сумма газов	90.61	73.30	23.64	39.26
H <sub>2</sub> O	636.13	754.17	871.11	827.51

Анализы выполнены в АмурКНИИ ДВО РАН по стандартным методикам. Аналитики: И.Д. Зайкин, С.А. Шахрай.

Монголо-Охотского палеоокеана – складкообразования и образования тектонического каркаса из продольных и поперечных разломов с большими амплитудами перемещений по ним. Формированию богатых рудных тел месторождений способствовало сочетание следующих факторов (рис. 1): глубинный очаг, явившийся источником расплавов для дифференциатов (дайки, штоки диоритов и нескрытая гранитоидная интрузия) и рудообразующих флюидов; крупный и единственный флюидопроводник (разлом Главный), сосредоточивший основную часть флюидопотока, и расположенная над ним экранированная структурная ловушка флюидов. Сланцевый экран и серия крутозалегающих поперечных сбросов (боковые экраны) способствовали максимальному накоплению глубинных флюидов в автономных тектоноблоках наиболее проницаемой центральной части месторождения и достижению здесь максимальных температур и, следовательно, внутрифлюидных давлений, в том числе превышающих литостатические.

Таким образом, давление флюида в формировании месторождения играло двойственную роль. Рост флюидного давления (за счет подтока горячих глубинных флюидов и увеличения их доли в смешанном гидротермальном растворе в подэкранном коллекторе пористых пород) привел к механическому раскрытию рудовмещающих структур. Гетерогенизация и адиабатическое расширение флюида в образовавшуюся полость приводили к быстрому падению дав-

ления. Это, в свою очередь, приводило к выкипанию газов, снижению температуры, повышению pH флюидов, пересыщению их многими, в том числе рудными, компонентами, бурному зарождению кристаллитов минералов (кварца, сульфидов, золота и др.) и их отложению с укрупнением индивидов кварца в более поздних зонах роста. Наблюдаемое строение жил и прожилков отражает эту последовательность событий (рис. 4). Таких событий (стадий) в формировании жил было несколько. Флуктуации давления, в соответствии с моделью развития экранированных гидротермальных систем [22], ответственны за стадийность формирования рудных тел, общее снижение температуры рудообразования и формирование рудных столбов. Рассмотренные признаки активного участия флюида в формировании (“дооформлении” тектонических) рудо локализирующих структур свойственны многим месторождениям различных рудных провинций.

#### ПРИЗНАКИ АКТИВНОЙ РОЛИ ФЛЮИДНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ДРУГИХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Покровское месторождение** (Верхнее Приамурье) кратко характеризуется по материалам [23, 24, 34]. Это малоглубинное месторождение локализовано в западной периферии Тыгдо-Улунгинской вулканической депрессии на субвулканическом уровне в гранитах поздней юры–раннего мела её фундамента,

под экраном раннемеловых вулканических туфов (рис. 8-а). Месторождение представлено пологими жильно-прожилковыми залежами, сформировавшимися между подстилающим субвулканическим силлом дацитов и туфами основания вулканогенного этажа (экрана). Граниты в участках золоторудной минерализации интенсивно каолинизированы, окварцованы, содержат круто и полого ориентированные кварцевые жилы и прожилки, выполняющие, в большинстве случаев, трещины отрыва. Непосредственно у висячего бока рудоконтролирующего силла В.Г. Хомичем и Н.Г. Борискиной [34] закартированы тела гидротермальных брекчий с кварцевым цементом. На большем удалении от силла текстуры руд более разнообразные – полосчатые, брекчиевые, массивные. Считается [34], что формирование залежей обусловлено исключительно тектоническими факторами (пологие срывы). Однако такие признаки, как сопряжение различно ориентированных жил и прожилков, выполняющих трещины отрыва, без пересечений, телескопированное заполнение полостей последовательными минеральными ассоциациями, широкое распространение брекчиевых тел и зон с совершенно неокатанными обломками пород ранних генераций кварца с кварцевым цементом, наличие в прилегающих к жилам и прожилкам каолинизированных гранитах массы ветвящихся маломощных прожилков кварца невыдержанной мощности и с фрагментами измененных вмещающих пород, не противоречат версии об участии механизма гидравлического раскрытия рудоносных полостей. Высокое давление флюида, сосредоточенного между вулканогенным экраном и силлом, обеспечивалось, на наш взгляд, температурным импульсом внедрившейся магмы, формировавшей многофазный [34] рудоконтролирующий силл. Это подчеркивается установленным пространственным соответствием контуров промышленных руд и мощной части силла, а также отсутствием золотого оруденения в его лежащем боку [34].

На основании анализа опубликованных данных [1, 28, 30 и др.] и собственных материалов автора, широко известное *Березовское месторождение* (Средний Урал) имеет ряд признаков формирования его по механизму гидроразрыва [21]. Оно сформировалось в условиях средних глубин и литостатического давления примерно 1 кбар [30], под мощным экраном из слабопроницаемых вулканогенно-осадочных пород и тел серпентинитов [28]. Источником флюидов являлся очаг [3], сформировавший в позднем палеозое крупный гранитоидный плутон, составляющей частью которого является Шарташский гранитоидный массив, занимающий южную часть рудного поля. Роль флюидопроводников и коллекторов флюи-

да совмещали многочисленные дайки гранитоид-порфиоров, образовавшиеся в породах кровли при прорывах магм вдоль субмеридиональных зон растяжения над валобразными “отрогами” Шарташского купола гранитоидного плутона.

Золото-сульфидно-кварцевые жилы месторождения (рис. 8-в и г) сформировались в широтных зонах растяжения, возникших на завершающем этапе куполообразования и наложившихся на уже сформировавшиеся дайки и вмещающие их породы. Эти наиболее проницаемые для магматогенных флюидов зоны маркируются участками прерудной березитизации даек и лиственитизации вмещающих их вулканогенно-осадочных пород и серпентинитов. Флюидное давление в гидротермальной системе, по оценкам разных исследователей, составляло 1400–700 [30], 1800–900 [29] и до 3500 бар [5]. Значительное его превышение над литостатическим способствовало возникновению сложных систем раскрытых полостей и формированию взаимосвязанных серий поперечных жил выполнения (тип поперечных лестничных жил) в зонах растяжения среди наиболее флюидонасыщенных участков в гранитоидных дайках и за их пределами (тип красичных жил). Для лестничных жил этого месторождения (рис. 8-в) обычно не характерны тектонические ограничения. Красичные жилы (рис. 8-г) по морфологии напоминают инъекционные.

*Неждановское месторождение* (Саха-Якутия) кратко характеризуется по [4]. Локализовано оно в вытянутой в меридиональном направлении крупной антиклинали, ядро которой осложнено горстом. Горст ограничен с боков крутозалегающими меридиональными разломами большой протяженности и примыкает на юге к протяженному диагональному Сунтарскому глубинному разлому северо-восточного простирания. Оруденение сформировано в пределах этого горста среди пермских песчаников и алевролитов джуптагинской свиты под мощным экраном существенно сланцевой дыбинской свиты. Залегание рудоносных зон субмеридиональное, секущее, обусловленное наличием крупных крутозалегающих тектонических нарушений. В центральной части рудного поля экранирующая толща к настоящему времени срезана эрозией, вследствие чего на поверхности обнажены верхние части рудных тел. Они представлены протяженными по простиранию (1–6 км) и падению (1–2 км) минерализованными зонами дробления средней мощностью 8–10 м, содержащими вкрапленную, прожилковую и жильную сульфидо-кварцевую минерализацию. Сульфидов в рудах до 5–6 %. Среди них доминируют арсенопирит и пирит. Наиболее вы-

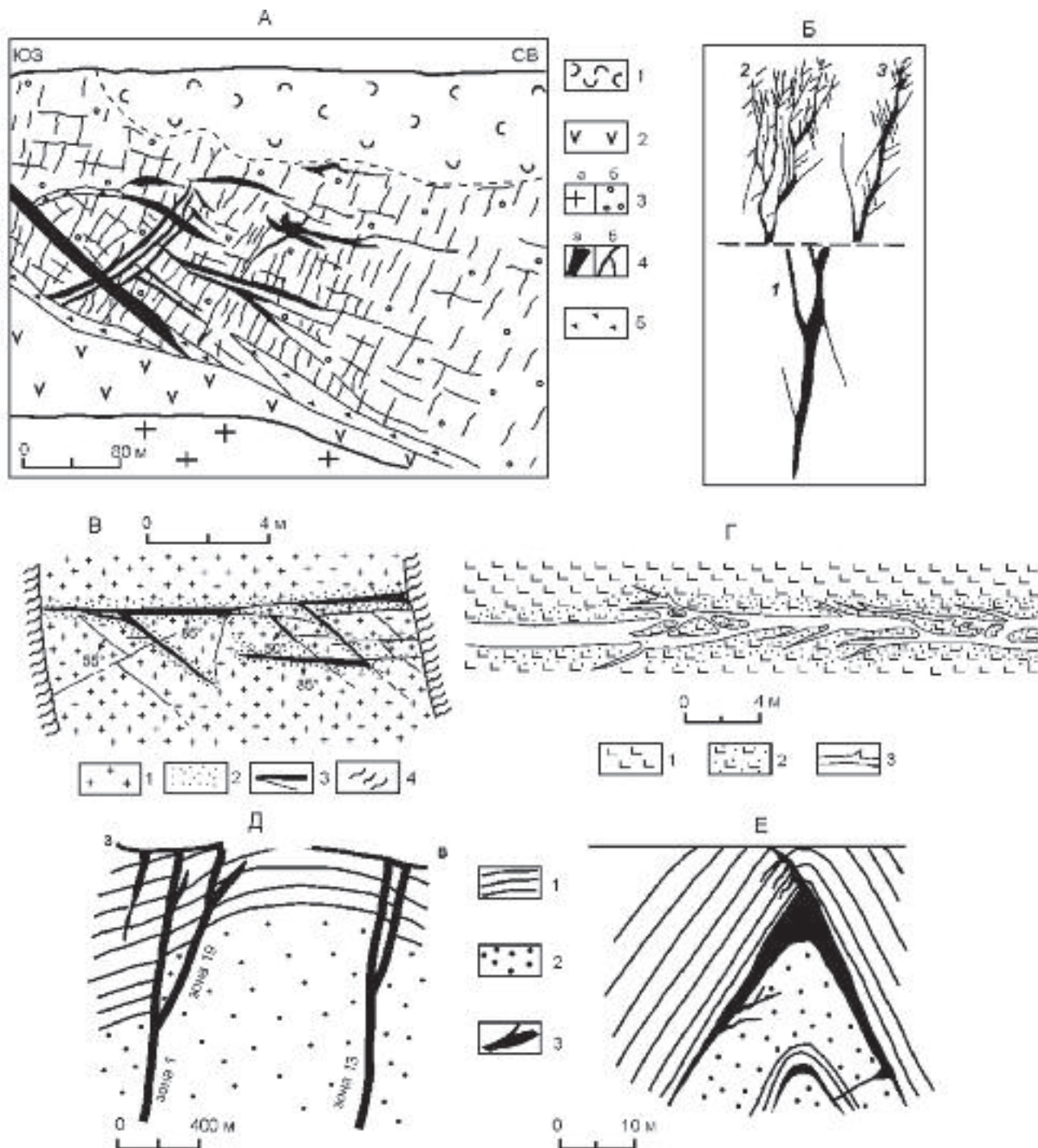


Рис. 8. Условия залегания жильных тел золоторудных месторождений.

**Покровское месторождение (А)** – разрез рудной залежи, по [34]: 1 – вулканические туфы; 2 – дациты силла; 3 – граниты (а), каолинизированные и окварцованные граниты (б); 4 – кварцевые жилы (а) и прожилки (б); 5 – флюидно-эксплозивные брекчи. Б – структурно-морфологическая зональность жил, по [3]: 1 – средний рудный уровень; 2 и 3 – верхний рудный уровень жильных тел на малоглубинных (2) и среднеглубинных месторождениях (3).

**Берзовское месторождение**, по [1]. В – фрагмент строения лестничных жил в меридиональной дайке гранитоидов: 1 – гранит-порфир; 2 – берзитизированная порода; 3 – жилы и прожилки; 4 – вмещающие дайку породы. Г – широтная жила в лиственитизированных породах, по [1]: 1 – тальк-карбонатные породы; 2 – листвениты; 3 – жила.

**Нежданское месторождение (Д).** 1 – глинистые сланцы; 2 – алевролиты; 3 – минерализованные зоны дробления с кварцево-жильными апофизами.

**Месторождение Бендиго**, по [15] (Е). 1 – сланцы; 2 – песчаники; 3 – кварцевые тела.

сокие содержания золота характерны для кварцевых жил, распространенных преимущественно на средних и верхних рудных уровнях.

При формировании этого среднеглубинного месторождения существовали следующие благоприятные условия для проявления механизма гидроразрыва: наличие экранированной антиклинальной структуры с объемным коллектором флюида (песчаники); наличие боковых тектонических экранов, снижавших боковое растекание флюидов и создавших совместно с верхним сланцевым экраном (дыбинская свита) условия для концентрации глубинного флюида и роста флюидного давления за счет возрастания в гидротермах доли глубинного флюида; установленное превышение флюидного давления над литостатическим [4]. О возможном проявлении отмеченного механизма при формировании продуктивной золоторудной минерализации свидетельствуют следующие признаки: нарастание объема свободного пространства (раскрытых трещинных зон и полостей) от нижних к верхним уровням месторождения, “обрастание” верхних частей рудных зон кварцево-рудными апофизами (рис. 8д); последовательно сменяющиеся по мощности прожилковые, брекчиевые, полосчатые и друзовые текстуры минеральных комплексов, заполняющих свободное пространство. В работе [4] отмечается вероятность проявления механизма гидроразрыва пород.

**Месторождение Бендиго** (Восточная Австралия) является наиболее ярким примером месторождений, обладающих признаками формирования по рассматриваемому механизму. К настоящему времени это крупное месторождение полностью выработано (добыто свыше 700 т золота), поэтому условия залегания и морфологию его рудных тел можно считать достаточно хорошо изученными. Однако его генезис до сих пор остается дискуссионным [10, 28]. Седловидные кварцевые жилы этого месторождения (рис. 8-е) сформированы в слоистой песчано-сланцевой толще ордовика, смятой в узкие линейные складки субмеридионального простирания. Согласно золото-сульфидно-кварцевые тела месторождения располагаются в шарнирах и крыльях антиклиналей на нескольких уровнях. Так, в шахте Виктория Кварц Майн глубиной 1385 м вскрыто 24 седловидные согласно залегающие жилы, расположенные одна над другой на различных расстояниях.

Возможность проявления механизма гидроразрыва и гидроотслоения пород при формировании этого месторождения определяется следующими факторами: наличием экранированных антиклиналь-

ных структур второго порядка, контрастной слоистостью и большим объемом в структурных ловушках проницаемых для флюидов компетентных пород, наличием глубинного, предположительно магматического, источника флюида и крупных флюидопроводников, каковыми являются скрытые разломы фундамента северо-восточного простирания; установленное высокое для среднеглубинного месторождения давление флюида – около 1.5 кбар [22].

Имеется ряд признаков, свидетельствующих о реализации этого механизма рудообразования: расположение рудных тел как в полостях отслоения пород в шарнирах антиклиналей под сланцевыми экранами, так и наличие одновременно возникших поперечных лестничных жил в маломощных слоях песчаников, экранированных с обеих сторон сланцами, и апофиз, пересекающих экран, наличие полосчатых и брекчиевых текстур руд с угловатыми, неоктантными обломками вмещающих пород, приуроченность максимальных мощностей рудных тел к шарнирам складок и быстрое выклинивание рудных тел в крыльях.

Аналогичный механизм брекчирования пород и формирования брекчиевых руд за счет внутренней энергии флюидов для близповерхностных месторождений благородных металлов отмечали и американские исследователи [2].

На основе анализа материалов по многочисленным наиболее разведанным зарубежным золоторудным месторождениям Е.М. Некрасов [15] составил обобщенную схему строения жильного ансамбля (рис. 8-б). На ней отображено прогрессирующее увеличение к поверхности объема, занимаемого рудными (жильными) телами, и усложнение их морфологии. Эта общая структурно-морфологическая закономерность характерна для разновозрастных и разноглубинных месторождений различных континентов не только золота, но и, очевидно, других металлов, и должна иметь общую причину. По нашему мнению, такой причиной является активное участие рудоносного глубинного флюида в “завоевании” объема и структурообразовании по механизму гидроразуплотнения, гидроразрыва и гидроотслоения вмещающих пород.

#### ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Обычно всё разнообразие морфологических типов рудных тел и текстур руд принято объяснять с тектонических позиций, а стадийность минерализации – тектоническими пульсациями. Однако это не всегда так. Например, на месторождении Токур отсутствовали крупные внутрирудные тектонические подвижки, которые могли бы сместить тела, сложенные ранними минеральными ассоциациями, раздро-

бить и истереть их при продольных перемещениях по рудовмещающим трещинам, либо обусловить пересечение их поздними минеральными ассоциациями. Для жил характерно телескопирование последовательных минеральных ассоциаций. В них нет явно выраженных участков внутрирудного перетиранья пород и жильной массы, а включения вмещающих пород имеют угловатую форму. Внутрирудные дайки диоритовых порфиров, выполняя поперечные трещины магморазрыва пород, не смещают жильные тела, а лишь раздвигают их и иногда захватывают ксенолиты пород и руд. Нет на месторождении и значительных пострудных смещений. По пострудным нарушениям, проходящим по зальбандам некоторых жил, пересекающие их дайки смещаются обычно на сантиметры – первые десятки сантиметров. Всё это говорит о сравнительно спокойной тектонической обстановке на этапе рудообразования. Не превышают первые десятки метров и суммарные пострудные подвижки по разграничивающим тектоноблоку поперечным сбросам [36], а также по продольному Главному разлому. В швах лишь этих нарушений образованы зоны пострудных милонитов и вязких глин.

Высокие внутрифлюидные давления в гидротермальных системах на ранних этапах формирования многих рудных полей, в том числе несколько превышающие литостатические давления на глубинах рудообразования, – объективный факт. Создаваемые флюидами высокие напряжения в породах должны были разрешаться гидравлическим раскрытием полостей различного масштаба, начиная от пор и микротрещин до раздвижений стенок крупных тектонических трещин, отслоений контактов пластов и возникновения трещин разрыва в наименее прочных породах (подобно отмеченному возникновению поперечных жил лестничного типа в маломощных пластах песчаников, заключенных в сланцы, на месторождении Бендиго [15, 35], или в протяженных дайках гранитоид-порфиров в зонах растяжения на Берёзовском месторождении [1]). Такие раскрытия могли сопровождаться и разветвлением полостей в направлении снижения литостатического давления, то есть к поверхности. Всё это наблюдается на многих месторождениях и должно адекватно интерпретироваться.

Крупные дорудные тектонические нарушения – это флюидоконцентраторы и флюидопроводники, а нередко и экраны рудообразующих флюидов, в случае разграничения ими нарушенных и ненарушенных блоков пород, значительно уменьшающие чрезмерное боковое растекание флюида. Подток флюида по флюидопроводникам способствовал возрастанию давления в экранированной структуре, а по достиже-

нию критического значения приводил к гидравлическому раскрытию разномасштабных полостей и концентрированному рудоотложению.

Логично предположить зависимость текстур жильного (рудного) выполнения от величины достигнутого внутрифлюидного давления. При давлениях ниже  $P_{\text{лит}}$  в гидротермальных системах могли происходить лишь накопления флюида, дорудный метасоматоз и отложение вкрапленности ранних сульфидов. При достижении  $P_{\text{лит}}^{\text{FL}}$  могли формироваться прожилково-вкрапленная минерализация и штокверки. При достижении  $P_{\text{кр}}^{\text{FL}}$  уже могли формироваться крупные полости, вмещающие жильные тела, а в их окаймлении – рудные прожилки. В связи с нарушенностью пород в объеме гидротермальной системы, последующие гидрораскрытия (дораскрытия) инициальных полостей достигались при более низком  $P^{\text{FL}}$ . Стадийное формирование рудных тел совершалось в режиме снижающихся  $P$  и  $T$ , вплоть до гидростатических параметров при отмирании источников глубинных флюидов.

Можно предположить, что от объёма флюидо-локализирующей структуры и степени надежности экрана зависят уровень достигаемых  $P^{\text{FL}}$  и, соответственно, преобладающий тип морфологии рудных тел. Жильные месторождения чаще формировались в структурах II–III порядка, а крупнообъемные месторождения с прожилково-вкрапленными рудами – чаще в структурах I–II порядка (Олимпиада, Мурунтау, Нежданинское и др.).

Теоретическое обоснование механизма гидроразрыва пород в земной коре содержится в работах [7, 8, 25, 32, 38–41]. Необходимым условием для работы этого механизма признаётся достижение критического внутрифлюидного давления, способного преодолеть нагрузку вышележащих пород и прочность рудовмещающих пород.

О способности газово-водных флюидов разрушать породы на различных глубинах от поверхности свидетельствуют брекчиевые трубки закрытых эксплозий и обломочные инъекционные дайки, встречающиеся на месторождениях железа, полиметаллов, золота, серебра и других металлов. Анализ всех этих явлений и процессов дан в [7, 8, 31].

По представлениям П.Ф. Иванкина [7, 8], на глубинах 4–5 км от поверхности в земной коре происходит скачкообразное увеличение проницаемости пород. В этой барьерной зоне начинается расслоение магмотогенно-флюидных систем, приводящее к остановке фронта продвижения магм. За счет «взрывного» отделения флюидов возникают закрытые эксплозии (тела взрывных брекчий). Уплотняющаяся

флюидная фаза преобразует окружающие породы, формирует метасоматические рудные залежи, а на участках достижения  $P_{кр}^{FL}$  инициирует гидроразрывы с образованием рудоносных тел брекчий [8, 11, 31], штокверков и жильных тел.

Основным условием проявления этого механизма и рудоконцентрации является наличие в барьерной зоне на гипабиссальных и близповерхностных уровнях экранированных структур, способных накопить значительные объемы высокотемпературных флюидов, сконцентрировать их энергетический потенциал для дальнейшего саморазвития [22].

**Механизм гидроразрыва** можно представить следующим образом. При достижении критического внутрифлюидного давления в экранированных структурах происходили раздвижения полостей по наиболее развитым тектоническим трещинам и опирающимся их системам и возникали массы новых трещин отрыва, что приводило к брекчированию прилегающих к трещине объемов пород. Следующие за этим падения давления в системе (вследствие увеличения объема полостей и ухода газов) приводили к некоторому обратному перемещению фрагментов пород за счет подтока флюидов из боковых пород в процессе выравнивания давления. Расширившиеся трещины заполнялись цементирующими минеральными комплексами с образованием прожилковых и брекчиевых текстур. По данным В.Ю. Прокофьева [26], на ранних стадиях формирования среднеглубинных месторождений общий перепад давлений в гидротермальных системах нередко превышал 1000 бар, что могло на локальных участках понизить температуру гидротерм на многие десятки градусов (как отображено на рис. 7-а, б) и вызвать резкие пересыщения растворов и интенсивное минералоотложение. Установлено, что золото отлагается в начале актов гетерогенизации флюидов в призальбандовых зонах раскрытий (рис. 4). В соответствии с моделью саморазвития экранированных гидротермальных систем и геологическими наблюдениями [22], механизм гидроразрыва на месторождениях проявлялся многократно.

На близповерхностных месторождениях под экранами слабопроницаемых пород, обычно окварцованных, внутрифлюидные давления достигали высоких значений, что приводило к гидроразрывам и формированию рудных брекчий и штокверков [39]. Многие горячие источники Тихоокеанского кольца располагаются в кратерах флюидных эксплозий диаметром до 500 и 1000 м с уходящими на глубину менее масштабными трубами иногда золотоносных

брекчий, порожденных взрывами гидротерм. Это роднит их с эпитептермальными золоторудными месторождениями, гидроразрывы в которых не достигали поверхности [39].

В условиях значительно больших глубин земной коры ( $10 \pm 5$  км) также возможно периодическое возникновение сверхдавлений (окололитостатических давлений) флюидов, отделяющихся при метаморфическом обезвоживании пород или от кристаллизующихся расплавов. В этих случаях происходят гидроразрывы пород, доразвитие “слепых” разломов с миграцией их вверх, формирование разрывных рудовмещающих структур [38, 40, 41].

Из изложенного следует, что механизм гидроразрыва пород принимает активное участие в структуро- и рудообразовании в широком диапазоне глубин, однако, судя по публикациям, он ещё относительно редко привлекается при интерпретации генезиса руд месторождений, особенно в отечественной практике. Нами приведены обоснование и признаки реализации механизма гидравлического раскрытия полостей при рудообразовании на материалах лишь по пяти золоторудным месторождениям, хотя те или иные из них просматриваются и на многих других месторождениях различных металлов. Публикацией этого материала авторы рассчитывают привлечь внимание исследователей к дальнейшему познанию одной из важных сторон проблемы рудообразования.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Изложенные материалы позволяют сделать следующие выводы.

1. Роль внутрифлюидного давления гидротермальных систем имеет определяющее значение и в создании рудных концентраций, и в формировании рудовмещающих структур.

2. Механизм гидроразрыва пород широко проявлен на месторождениях различных металлов, сформировавшихся на различных глубинах и, видимо, ответственен за формирование морфологических типов минерализации и рудных столбов.

3. Основным условием проявления механизма гидроразрыва является экранированность гидротермальных систем. Различные экраны способствуют достижению в гидротермальных системах критических внутрифлюидных давлений.

Авторы благодарны члену-корреспонденту РАН Н.С. Бортникову за прочтение рукописи и критические замечания, которые позволили улучшить изложение материала при окончательной доработке статьи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта ДВО РАН № 06-1-ОНЗ-114.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородаевская М.Б., Рожков Н.С. Месторождения золота // Рудные месторождения СССР. Т. 3. М.: Недра, 1978. С. 47–51.
2. Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Раздолина Н.В. Генезис золото-кварцевого месторождения Чармитан (Узбекистан) // Геохимия. 1996. Т. 38. № 3. С. 238–257.
3. Бортников Н.С., Сазонов В.Н., Викентьева О.В. и др. Роль магматогенного флюида в формировании Березовского мезотермального золото-кварцевого месторождения // Докл. РАН. 1998. Т. 363, № 1. С. 82–85.
4. Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Алпатов В.А. и др. Минералого-геохимические особенности и условия образования Нежданинского месторождения золота (Саха – Якутия, Россия) // Геология руд. месторождений. 1998. Т. 40, № 2. С. 137–156.
5. Бортников Н.С. Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах // Геология руд. месторождений. 2006. Т. 48, № 1. С. 3–28.
6. Гребенщикова В.И., Прокофьев В.Ю., Трошин Ю.П. Новые данные об условиях образования золоторудных жил месторождения Коммунар (Кузнецкий Алатау) // Докл. РАН. 1995. Т. 340, № 2. С. 239–242.
7. Иванкин П.Ф. Морфология глубоковскрытых магматогенных рудных полей. М.: Недра, 1970. 288 с.
8. Иванкин П.Ф. Внутрикоровые (скрытые) магматические эксплозии и рудогенез // Рудоносные брекчии и их поисковое значение. Алма-Ата: Казахский НИИ минер. сырья. 1977. С. 3–11.
9. Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России. М.: Наука, 1992. 140 с.
10. Моисеенко В.Г. Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 304 с.
11. Нарсеев В.А., Левин Г.Б. Брекчиевые образования золоторудных месторождений // Рудоносные брекчии и их поисковое значение. Алма-Ата: Казахский НИИ минер. сырья, 1977. С. 189–203.
12. Наумов В.Б. Возможности определения давления и плотности минералообразующих сред по включениям в минералах // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. М.: Недра, 1982. С. 85–94.
13. Наумов В.Б., Сафонов Ю.Г., Миронова О.Ф. Некоторые закономерности пространственного изменения параметров флюида золоторудного месторождения Колар (Индия) // Геология руд. месторождений. 1988. № 6. С. 105–109.
14. Наумов В.Б., Коваленкер И.К., Мызников И.К. и др. Высокобарические флюиды гидротермальных жил Рябиновского щелочного массива (Центральный Алдан) // Докл. РАН. 1995. Т. 343, № 1. С. 99–102.
15. Некрасов Е.М. Зарубежные эндогенные месторождения золота. М.: Недра, 1988. 284 с.
16. Остапенко Н.С. О глубинах формирования и последующего эрозионного среза золоторудных месторождений Верхне-Селемджинского района в связи с оценкой их перспектив // Новые данные о минерально-сырьевых ресурсах Центральной части зоны БАМ. Благовещенск: ДВНЦ АН СССР, 1978. С.69–86.
17. Остапенко Н.С. Структурные особенности локализации оруденения Токурского месторождения // Тектоника и магматизм Дальнего Востока. Хабаровск: ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 134 – 135.
18. Остапенко Н.С., Беда В.Д. К вопросу о зональности минерализации на золоторудном месторождении малосульфидной формации (Приамурье) // Новые данные по геологии и рудоносности Монголо-Охотского пояса. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. С. 40–51.
19. Остапенко Н.С. Изменение состава флюидов в процессе формирования золоторудного месторождения // Термобарогеохимия эндогенных процессов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. С. 96–103.
20. Остапенко Н.С., Левицкий Ю.Т., Шахрай С.А. К оценке температур декрепитации минералов по термобарограммам // Минералообразующие флюиды и рудогенез. Киев: Наук. думка, 1988. С. 228–237.
21. Остапенко Н.С. Признаки гидроразрыва вмещающих пород при формировании золоторудного месторождения Токур (Верхнее Приамурье) // Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, технология, экономики, экология. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2004. С. 152–154.
22. Остапенко Н.С. Саморазвитие экранированных гидротермальных систем и гидроразрывов в структуро- и рудообразовании (общая модель формирования гидротермальных месторождений) // Докл. РАН, 2005. Т. 400, № 6. С. 789–792.
23. Остапенко Н.С. и др. Гидротермальная система Покровского рудного поля // Материалы XV Российского совещания по экспериментальной минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 2005. С. 191–193.
24. Остапенко Н.С., Нерода О.Н. Сходство и различия в развитии рудоформирующих гидротермальных систем полей Березовского (Урал) и Покровского (Приамурье) месторождений золота // Материалы XV Российского совещания по экспериментальной минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 2005. С. 188–190.
25. Поспелов Г.Л. Предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников // Геология и геофизика. 1963. № 3. С. 18–39.
26. Прокофьев В.Ю. Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов. Новосибирск: Наука, 2000. 191 с.
27. Рейнлиб Э.Л., Романовский Н.П. Изучение купольно-магматических структур по геофизическим данным (на примере Верхнеселемджинского района) // Геология Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1975. С. 110–115.
28. Сазонов В.Н. Золотопродуктивные метасоматические формации подвижных поясов. Екатеринбург: УО РАН, 1998. 180 с.
29. Синяков В.И. Общие рудогенетические модели эндогенных месторождений. Новосибирск: Наука, 1986. 243 с.
30. Таланцев А.С. Геотермобарометрия по доломит-кальцитовым парагенезисам. М.: Наука, 1981. 137 с.
31. Туговик Г.И. Флюидно-эксплозивные структуры и пласто-



- вое оруденение. М.: Наука, 1989. 193 с.
32. Файф У., Прайс Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М.: Мир, 1981. 435 с.
  33. Фатьянов И.И., Лэйер П. О времени формирования золоторудного месторождения Токур // Геология и минеральные ресурсы Амурской области. Благовещенск: Амургеолком, 1995. С. 217–219.
  34. Хомич В.Г., Борискина Н.Г. Инъективные структуры и золото-серебряное оруденение Покровского рудного поля (Приамурье, Россия) // Геология руд. месторождений. 2003. Т. 45, № 1. С. 24–43.
  35. Шер С.Д. Металлогения золота (Северная Америка, Австралия и Океания). М: Недра, 1972. 295 с.
  36. Эйриш Л.В., Остапенко Н.С., Моисеенко В.Г. Золоторудное месторождение Токур (Дальний Восток, Россия) // Геология руд. месторождений. 2002. Т. 44, № 1. С. 42–58.
  37. Brown P.E, Lamb. W.M. P-V-T properties of fluids in the system  $H_2O \pm CO_2 \pm NaCl$ : new graphical presentations and implications for fluid inclusion studies // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1989. V. 53. P. 1209–1221.
  38. Cox S.F. Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust // *Economic Geology*, 100<sup>th</sup> Anniversary Volume, 2005, pp. 39–75.
  39. Nelson C.E., Giles D.L. Hydrothermal Eruption Mechanisms and Hot Spring Gold Deposits // *Economic Geology*. 1985. V. 80, N 6. P. 1633–1639.
  40. Nicholas H.S., Bons O., Bons P.D. Mechanisms of fluid flow and fluid-rock interaction in fossil metamorphic hydrothermal systems inferred from vein-wallrock patterns, geometry and microstructure // *Geofluids*. 2001. V. 1. P. 137–162.
  41. Sibson R.H. Controls on maximum fluid overpressure defining conditions for mesozonal mineralisation // *Journal of Structural Geology*. 2004. V. 26, N 26. P. 1127–1136.

*Рекомендована к печати С.М. Родионовым*

*N.S. Ostapenko, O.N. Neroda*

### **Fluid pressure and hydrorupture of rocks in hydrothermal mineralization (as exemplified by gold deposits)**

Based on the conducted detailed integrated research on the Tokur gold deposit (Upper Amur region, Russia) and the analysis of the published data on the levels of fluid pressures during the formation of other different geothermal deposits at different depths, the morphology of orebodies and the features of their location, a conclusion was made about the active role of fluids in the formation of ore-locating structures according to the mechanism of decompaction and hydrorupture of the fluid-containing medium. The conditions of appearance and possible consequences of hydrorupture of rocks in ore formation are considered. The evidence of participation of this mechanism in the formation of orebodies at the Pokrovskoe, Berezovskoe, Nezhdaninskoe (Russia) and Bendigo (Australia) gold deposits is given.

**Key words:** hydrothermal gold deposit, pressure, enclosing rocks, hydrorupture, Russia, Australia.