

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО МЕТАМОРФИЗМА КВАРЦА, СВЯЗАННОГО С ВНЕДРЕНИЕМ ПОСТРУДНЫХ ДАЕК В САРАЛИНСКОМ РУДНОМ ПОЛЕ

В. Г. ПРОХОРОВ (КРАСНОЯРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ СНИИГГ_иМС)

Отличительной чертой Саралинского золото-кварцевого месторождения является обилие в составе рудного поля пород дайковой серии. Особенно распространены среди них пострудные гипербазитовые дайки, секущие кварцевые жилы в направлении, близком к нормали. Мощность этих даек колеблется от долей метра до 20—40 метров. Характерной особенностью залегания даек является их выдержанность и параллельность. Наблюдение в горных выработках контактов даек с кварцевыми жилами свидетельствует о их пострудном внедрении.

Внедрение даек в рудоносную толщу с уже сформированными золото-кварцевыми жилами, очевидно, не могло пройти бесследно, однако сведений о масштабах и даже качественных наблюдений термального метаморфизма материала жил вблизи даек для Саралинского месторождения практически нет.

В настоящей работе делается попытка оценить масштабы термического метаморфизма путем исследования теплофизической модели дайки, интродуцировавшей кварцевую жилу.

С теоретической точки зрения, прогрев пород за счет тепла остывающей дайки можно представить как нестационарный (неустановившийся) тепловой поток, распространяющийся от остывающей плиты в бесконечное пространство.

Зная температуру внедрения дайки, ее мощность и теплоемкость и задаваясь временем прогрева, можно рассчитать температуру в любой точке пространства около дайки. Решение может быть найдено из уравнения теплопередачи остывающего тела — уравнение Фурье.

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{d^2T}{dx^2}$$
, где a — коэффициент теплопередачи.

Решение это будет приближенным вследствие непостоянства свойств материала дайки и вмещающих пород во времени (t) (в зависимости от температуры T будет меняться теплопроводность и теплоемкость).

Достаточно сложная для вычисления задача становится практически не разрешимой для прямого математического расчета, если учесть, что теплопроводность вмещающих кварцевую жилу пород отличается от теплопроводности кварца. В этом случае поток тепла от дайки не будет равномерным и уравнение придется решать в более общем виде

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{d^2T}{dx^2} + a \frac{d^2T}{dy^2}$$

при двух или даже трех переменных значениях коэффициента температуропроводности. Данные трудности могут быть в значительной мере обойдены при использовании теплового моделирования, перспективность и возможность которого для решения самых сложных теплофизических задач высоко оцениваются специалистами (Л. Р. Ингерсолл и др., 1959; А. П. Дударев, 1965).

Нами исследовалась тепловая модель дайки, остывающей в интродуцированной ею кварцевой жиле. Масштаб модели 1 : 100. Модель дайки выполнена из асбоцементной пластины с вмонтированным электрическим нагревателем. Зная вес пластины и нагревателя, их удельные теплоемкости, температуру нагрева и силу тока, можно имитировать процесс

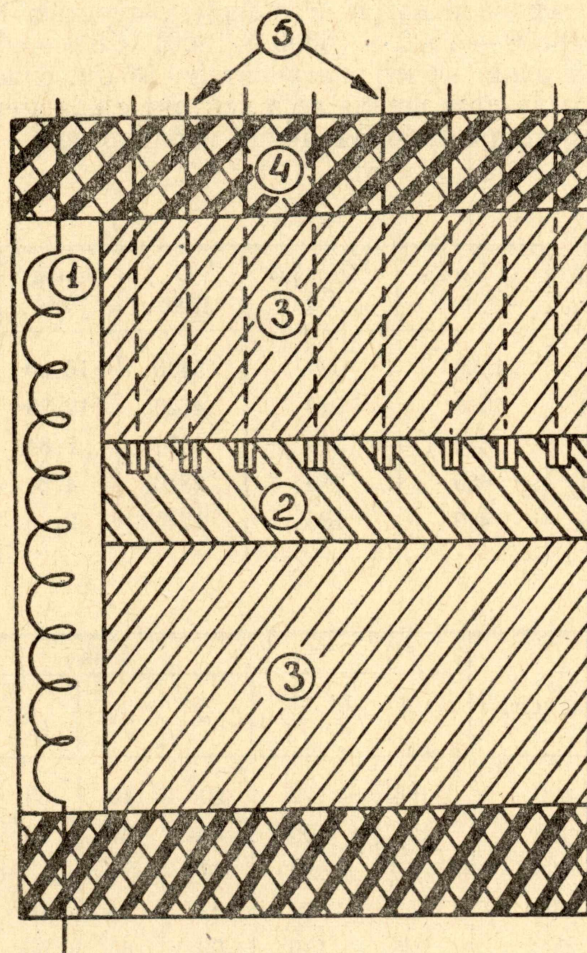


Рис. 1. Модель кварцевой жилы с введённой дайкой; 1 — асбоцементная пластина с электронагревателем, имитирующим секущую дайку; 2 — кварцевая пластина; 3 — вмещающие породы; 4 — теплоизоляция; 5 — термопары.

внедрения «даек» различной мощности с различной температурой. Кварцевая жила — пластинка кварца толщиной около 2 см с просверленными для помещения термопар углублениями. Пластинка может помещаться между двумя слоями любого материала, имитирующего породы всячего и лежащего бока (рис. 1).

Схема опыта. «Модель дайки» нагревается до заданной температуры и затем приводится в контакт с кварцевой жилой. Нагревание про-

должается на протяжении расчетного времени, эквивалентного в масштабе опыта тепловому потоку дайки определенной мощности.

Время нагрева рассчитывается из следующих данных. Площадь нагрева дайки $2 \times 5 \text{ см}^2$, мощность дайки 1 см, теплоемкость диабазового порфирита определена равной 0,3 кал/г. град., удельный вес $= 3 \text{ г/см}^3$. Количество тепла, заключенное в дайке, равно: $Q = h \cdot s \cdot d \cdot C \cdot T = 1 \times 2 \times 5 \times 0,3 \times 3 \times 700$ (при температуре внедрения 700°). $Q = 6300$. Учтем количество тепла, заключенного в нагретой до 700° модели. Вес модели 12 г, суммарная теплоемкость 0,18 кал/г. град., Q модели $= 0,18 \times 12 \times 700 = 1500$ кал. Потери тепла через боковые плоскости модели дайки, не соприкасающиеся с жилой, составляют 8%.

Количество тепла, которое необходимо подвести дополнительно, чтобы имитировать тепловой поток от дайки мощностью 1 м, будет равно:

$$Q_{\text{расч.}} = 6300 - 1500 + (6300 + 1500) \times 8\% = 5430 \text{ кал.}$$

При сопротивлении электронагревателя 16 ом, силе тока 4, а время нагрева дайки, после приведения ее в контакт с кварцевой жилой, будет определено из формулы Джоуля-Ленца и равно $5430 : (0,24 \times 4^2 \times 16) = 88$ сек.

Таблица 1

| Т° нагрева | Q общ. кал. | Q модели кал. | Потери 8% | Q расч. | Сила тока | Сопротивление, ом | Время, сек. |
|------------|-------------|---------------|-----------|---------|-----------|-------------------|-------------|
| 700 | 6300 | 1500 | 630 | 5430 | 16,00 | 16 | 88 |
| 600 | 5400 | 1320 | 540 | 4620 | 12,25 | 16 | 98 |
| 400 | 3600 | 880 | 360 | 3080 | 7,84 | 16 | 102 |
| 300 | 2700 | 660 | 270 | 2310 | 4,84 | 16 | 124 |
| 200 | 1800 | 440 | 180 | 1540 | 2,25 | 16 | 174 |

Таблица 2

| Мощность дайки, м | Т° нагрева | Зона | | | | | | | |
|-------------------|------------|------|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 600 | 160 | 110 | 60 | 40 | 30 | | | |
| | 400 | 125 | 100 | 58 | 26 | 22 | | | |
| | 300 | 70 | 30 | 17 | 14 | | | | |
| | 200 | 65 | 55 | 22 | 14 | 12 | | | |
| 2 | 600 | 225 | 150 | 90 | 60 | 50 | 40 | 35 | 30 |
| | 400 | 140 | 110 | 58 | 36 | 35 | 25 | 22 | 20 |
| | 300 | 110 | 75 | 48 | 28 | 22 | 19 | 18 | 16 |
| | 200 | 70 | 55 | 28 | 18 | 14 | 14 | | |
| 5 | 600 | 250 | 200 | 120 | 75 | 65 | 55 | 50 | 45 |
| | 400 | 160 | 130 | 80 | 50 | 40 | 35 | 43 | 30 |
| | 300 | 140 | 105 | 63 | 45 | 40 | 34 | 32 | 26 |
| | 200 | 85 | 70 | 40 | 28 | 26 | 21 | 19 | 17 |
| 10 | 600 | 350 | 225 | 175 | 105 | 98 | 80 | | 68 |
| | 400 | 200 | 150 | 115 | 78 | 70 | 58 | 50 | 48 |
| | 300 | 135 | 100 | 75 | 54 | 52 | 42 | 40 | 36 |
| | 200 | | | | | | | | |

Аналогичным путем проводим расчет времени нагрева для других температур внедрения.

С момента приведения дайки в контакт с жилой через интервал времени 1 минута берется отсчет температуры нагрева кварцевой жилы в восьми точках, расположенных по нормали к контакту дайки в удалении от 1 до 8 см.

Данные температуры прогрева в зависимости от температуры «дайки», времени прогрева (т. е. мощности дайки) и расстояния от контакта приведены в табл. 2.

По экспериментальным данным, сведенным в табл. 2, строилась серия графиков, связывающая температуру прогрева кварцевой жилы на различном удалении от контакта с температурой внедрения дайки (рис. 2)

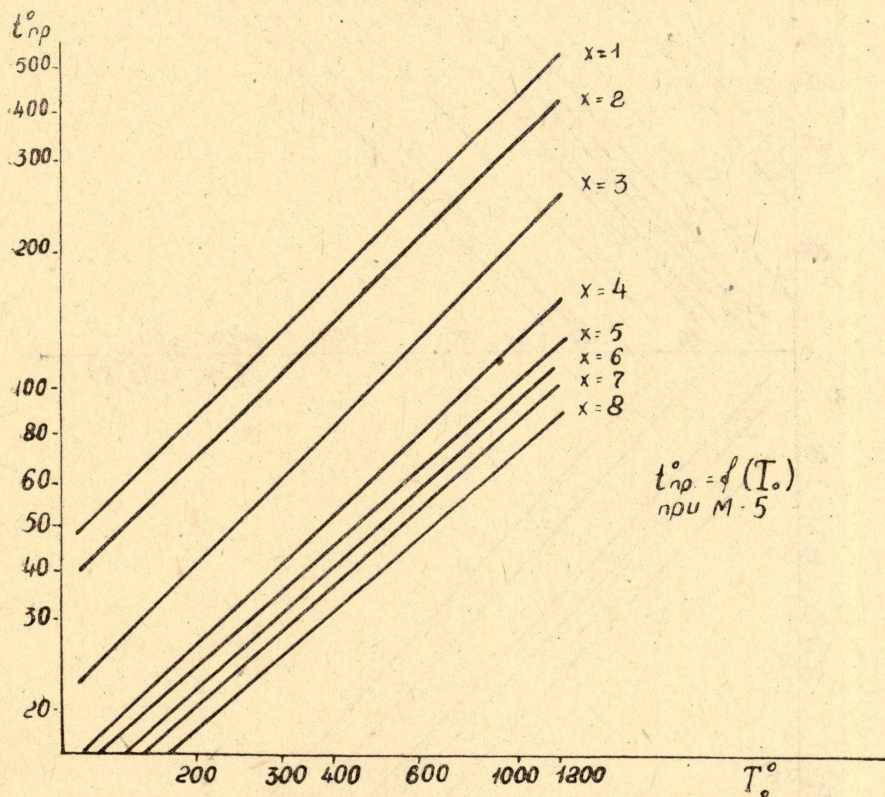


Рис. 2. График зависимости температуры минимального прогрева кварцевой жилы ($t_{пр}$) от температуры внедрения дайки (T_0), расстояние от контакта (x) при мощности дайки 5 м.

и мощностью дайки (рис. 3). Все построения выполнены в логарифмическом масштабе, поэтому экспоненциальные законы теплопередачи на графиках обретают линейную форму, удобную для экстраполяции в область более высоких температур. Такая экстраполяция необходима, поскольку по условиям опыта мы надежно могли проводить замеры при температуре «дайки» не более 600° (при 700° наблюдался перекал нагревательного элемента). Четкая линейность графиков в интервале от 200 до 600° позволяет, не опасаясь, внести сколько-нибудь значительные искажения в реально существующую картину, экстраполировать опытные данные на область температур $1000\text{--}1200^\circ$.

По данным экспериментальных графиков и экстраполяции построена сводная диаграмма зависимости температуры прогрева кварцевой жилы от температуры внедрения дайки, мощности дайки и расстояния от контакта (рис. 3).

Проверка термической модели

Непосредственное измерение температуры лав основного состава на земной поверхности дает значения в пределах 1050—1200°. Начало плавления диабазов 1150°, полное расплавление происходит при 1300°. Свободное течение магмы диабазового состава наблюдается при 1225°. При медленном остывании расплава может наблюдаться переохлаждение, при котором подвижность сохраняется до 1050° (Ловринг, 1958). Нами для расчета принята температура диабазовой магмы, равная 1200°. Расчеты

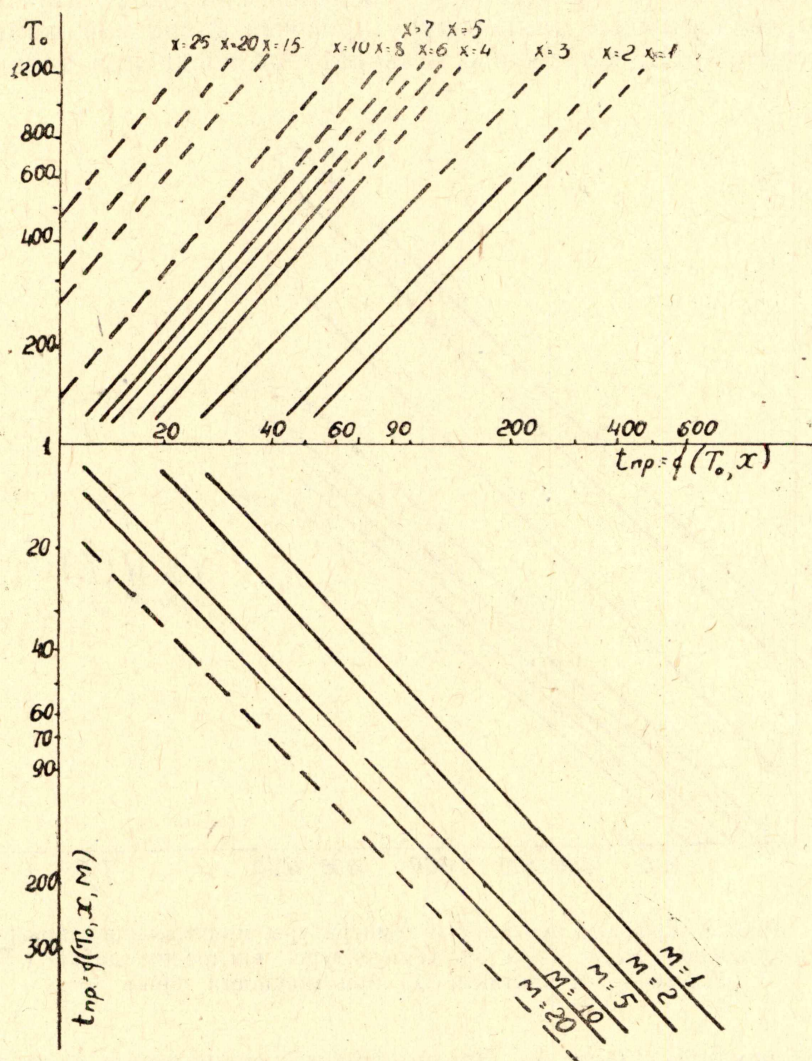


Рис. 3. График зависимости температуры минимального прогрева кварцевой жилы ($t_{пр}$) от температуры внедрения дайки (T_0), расстояние от контакта (x) и мощности дайки (M).

температуры прогрева проведены для различно удаленных от контактов участков кварцевых жил, в которых были проведены определения температуры метаморфизма методом декрепитации кварца и методом сульфидного геотермометра Каллеруда.

1. Сопоставление расчетных данных с температурами декрепитации. Нами для Саралинского месторождения было установлено, что в непосредственном контакте с дайками кварц не содержит газовой-жидких включений. В удалении от даек такие включения обнаруживаются методом декрепитации и при просмотре сколов кварца

под микроскопом при увеличениях 400—800 х. Мелкие размеры включений затрудняют определение температуры гомогенизации. По степени заполнения включений жидкой фазой кварц может быть отнесен к сравнительно низкотемпературному, в пользу этого свидетельствуют и данные декрепитации — массовое растрескивание кварца начинается при температуре 180—200°.

Образцы кварца, отобранные из жилы в непосредственной близости от контакта, как правило, при нагревании не обнаруживают наличия включений, последние, очевидно, уничтожены вследствие прогрева материала жилы внедрившейся дайкой.

В помещенной ниже табл. 3 приведены расчетные данные прогрева участков кварцевой жилы и температура декрепитации кварца.

Расчет температуры прогрева выполнен по диаграмме 3.

Т а б л и ц а 3

| № образца | Расстояние от контакта | Мощность дайки | Температура прогрева | Температура декрепитации |
|-----------|------------------------|----------------|----------------------|--------------------------|
| С—2703 | 50 | 5 | 30 | 200—240 |
| С—2693 | 2 | 15 | 500 | не декрепитирует |
| С—2063 | 5 | 12 | 180—200 | не декрепитирует |
| С—2070 | 5 | 12 | 180—200 | не декрепитирует |
| С—2080 | 1 | 25 | 1000 | не декрепитирует |
| С—2088 | 3 | 15 | 400 | не декрепитирует |
| .2798 | в контакте | | 1000 | не декрепитирует |

2. Сопоставление расчетных данных с температурой отложения сфалерита. Железистость сфалерита на месторождении колеблется в широких пределах от долей % до 10%. Более железистые сфалериты пространственно приурочены к контактам даек или находятся вблизи них. Эта закономерность объясняется нами как следствие перекристаллизации первичного низкотемпературного сфалерита под влиянием тепла даек. Возможность такой перекристаллизации, в ходе которой образовывался более железистый сфалерит, подтверждается экспериментально.

Содержание изоморфного железа в сфалерите определялось химическим анализом. Исследованию подвергались сфалериты, ассоциирующие с пирротинном и пиритом. Последняя ассоциация на месторождении встречается значительно чаще. По данным Каллеруда, температура, определенная для пирит-сфалеритовой ассоциации, может рассматриваться как минимальная или заниженная (Г. Каллеруд, 1959); учитывая это, а также появившиеся в последнее время критические замечания по поводу метода вообще (Н. А. Годовиков, А. Б. Птицын, 1966), мы полагаем возможным использовать данные метода для выявления температурных перепадов, характеризовавших отложение сфалерита в различных частях месторождения. Данные сопоставления температур, определенных по методу Каллеруда, и расчетных температур прогрева приведены в табл. 4.

Как видно из сопоставления, большим температурам прогрева соответствуют и большие температуры отложения сфалерита, определенные по методу Каллеруда. Превысивший сфалерит, по-видимому, отлагался при температурах, близких к 100°. Такой сфалерит находится в участках жил, где практически не проявилось термическое влияние даек.

3. Сопоставление расчетных данных с нахождением метаморфических ассоциаций.

Вблизи контакта даек с кварцевыми жилами в последних наряду с пиритом в подчиненном количестве отмечается пирротин. Отсутствие пирит-пирротиновой ассоциации в удалении от контактов свидетельствует в пользу метаморфического происхождения пирротина за счет разложения пирита под влиянием тепла даек. Мак Кинстри (1959) оценивает температуру перехода пирит → пирротин при давлении серы 1 ат. равным

Таблица 4

| № образца | Расстояние от контакта | Мощность дайки | Температура прогрева | Температура отложения сфалерита |
|-----------|------------------------|----------------|----------------------|---------------------------------|
| Обр. 1367 | 1 | 5 | 500 | 350 |
| Обр. 1366 | 20 | 8 | 35 | 112 |
| Обр. 1375 | 2 | 6 | 400 | 200 |
| Обр. 1310 | 5 | 10 | 180 | 130 |
| Обр. | непосредств. контакт | | ~1000 | |

689°. Температура диссоциации возрастает до 743° при 12,2 ат. серы. Низкое содержание пирита в кварцевой жиле, отсутствие сколько-нибудь значительного скопления новообразований сульфидов, связанных с внедрением даек, так же как и отсутствие сульфидной минерализации самих даек, дает основание полагать, что привнос серы с внедрением даек не было и давление серы определялось только упругостью паров над сульфидами, т. е. было при температурах ниже диссоциации пирита на пирротин и серу неизмеримо малым, оставаясь весьма низким и при более высоких температурах. По данным Удинцевой и Чухрова (1941), заметно процесс диссоциации пирита на серу и пирротин при низких (мм Hg) давлениях серы проявляется с 400°. Учитывая длительность времени прогрева пород около даек, исчисляющееся месяцами и даже многими годами, можно полагать, что процесс частичного перехода пирита в пирротин мог проходить при температурах, близких и даже несколько меньших 400°. На месторождении пирротин-пиритовая ассоциация отмечалась в участках, расчетные температуры прогрева которых колеблются в пределах от 1000 до 400°.

4. Определение длительности прогрева. Экспериментальные данные, полученные при исследовании модели, позволяют оценить время прогрева кварцевой жилы. Расчеты основываются на так называемом «законе времени теплопередачи», который формулируется следующим образом. Время, необходимое для того, чтобы две какие-либо точки достигли одной и той же температуры, пропорционально квадратам их расстояний от источника тепла. Таким образом, если в нашей модели точка на 3 см удаленная от «дайки», имеющей температуру 600°, нагреется до 150° через 16 минут, то кварцевая жила на расстоянии 3 м нагреется до этой температуры от источника тепла такой же интенсивности через 16×10^4 минут, или 110 суток.

Диаграмма зависимости времени прогрева до 100° для зон, удаленных от контакта на различные расстояния и различных мощностей даек, приведена на рис. 4. Аналогичным образом могут быть составлены диаграммы для других температур прогрева.

Как видно из диаграммы, на удалении от контакта с дайкой, внедрившейся при температуре 1200°, равном 2 метрам, жила достигнет температуры 100° через 10 суток. При мощности дайки 5 м крайняя точка 100°-ной зоны будет отстоять от контакта на 7 метров. Она достигнет

этой температуры через 140 суток. Охлаждение участка жилы, удаленного от контакта на 2 метра, до температуры 100° произойдет через 270 суток.

5. Оценка влияния термического метаморфизма на перераспределение золота.

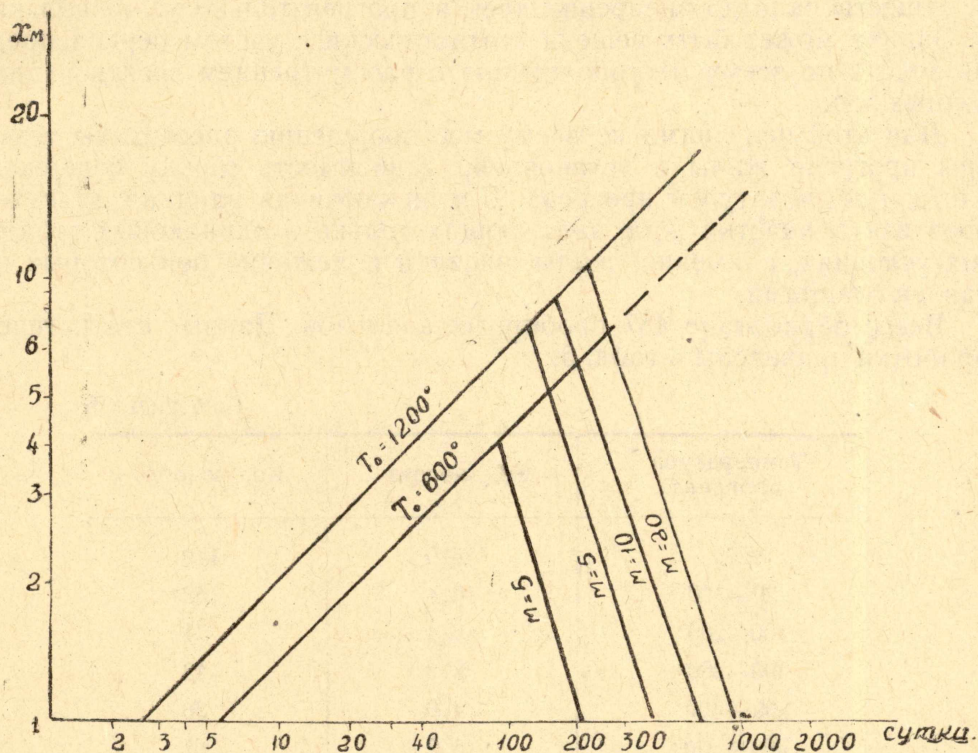


Рис. 4. Диаграмма времени нагрева кварцевой жилы выше 100° около дайки диабазового состава при температуре внедрения последней 1200° . x — расстояние от контакта с дайкой, m — мощность дайки.

Еще в 1930 году Г. Берг установил, что тонкодисперсное золото в пирите, не видимое под микроскопом, после нагревания образца до 300 — 400° укрупняется и становится видимым. Впоследствии этот эффект наблюдался многими исследователями. Влияние метаморфического прогрева на размеры частиц золота в колчеданных рудах Уральских месторождений изучил Крейтер (1941). По данным Крейтера, для южноуральских месторождений, не затронутых метаморфизмом (Сибай, Блява), извлечение золота из руд методом цианирования не превышает 30 — 40% , в то время как для среднеуральских интенсивно метаморфизованных месторождений золото тем же методом извлекается на 95% . Крейтер находит этому объяснение в дисперсности золота неметаморфизованных месторождений. В процессе метаморфического изменения руд среднеуральских месторождений золото укрупнялось.

Экспериментальными исследованиями Н. Н. Масляницкого (1940), О. Е. Звягинцева и И. А. Паульсена (1940) было установлено, что золото, выделяющееся из растворов совместно с пиритом, обычно имеет субмикроскопические размеры зерен. Извлечение такого золота методом амальгамации и цианирования дает низкий выход металла. Золото, осаждавшееся на ранее сформированный пирит, образует более крупные выделения. Судя по опытам Г. Берга, золото укрупняется при последующем метаморфизме сульфидов.

Оценив температуры термического прогрева месторождения за счет внедрения даек, было бы интересно установить, насколько повлиял этот прогрев и повлиял ли вообще на перераспределение золота в жилах.

Поставленная задача не может быть решена путем рассмотрения изменения содержания золота по мере удаления от отдельно взятой дайки, поскольку неравномерность в распределении золота по жиле, несомненно, существовала до внедрения даек и прогрев только усложнил картину. Задача может быть решена статистически с учетом перераспределения золота по всему месторождению с рассмотрением десятков приконтактных зон.

Для этой цели нами по всему месторождению рассчитаны температуры прогрева жилы и установлена зависимость между содержанием золота и температурой прогрева. Для исключения влияния других факторов взяты участки жил, залегающих только в одинаковых геологических условиях, а именно, жилы, висячий и лежащий бок которых представлен сланцами.

Всего обработано 487 пробирных анализов. Данные статистической обработки приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

| Температура прогрева | Сод. золота | Кол-во обр. |
|----------------------|-------------|-------------|
| 20° | 6,9 | 149 |
| 20—100° | 6,4 | 158 |
| 100—200° | 6,4 | 71 |
| 200—300° | 2,8 | 43 |
| 300—400° | 4,0 | 26 |
| 400—700° | 5,2 | 61 |
| 700—1000 ° | 13,4 | 17 |

Итак, содержание золота в области прогрева ниже 200° отстает постоянно, резко падает в зоне прогрева 200—400°, обогащение наступает в зоне самых высоких температур, т. е. в области непосредственного контакта. Нам не вполне ясен механизм перераспределения золота в зоне высоких температур, но, по-видимому, он родственен укрупнению золота, наблюдающемуся при нагреве полированных шлифов пирита. Вероятно, переотложение золота у контактов сопровождается изменением его крупности. Не исключено, что колебания в извлечении золота на обогатительной фабрике рудника, заставившие предприятие отказаться от более экономичного процесса цианирования, были связаны с отработкой блоков руды, в различной степени прогретых теплом пострудных даек.

Этот вывод может представлять серьезный интерес не только с теоретической, но и с хозяйственной точки зрения, и, думается, заслуживает проверки.

В заключении остановимся на некоторых вопросах возможности применения термического моделирования. Примененная нами модель позволяет оценить температуру прогрева пород около внедрившейся дайки при условии, если прогрев шел без участия массопереноса. Если расчетные температуры прогрева близки к температурам, определенным с применением других геологических термометров, это будет являться показателем, что становление дайки произошло быстро и через рассматриваемую часть сечения прошло малое количество расплавленного материала, т. е. мы имеем дело с верхними частями дайки. Именно такой вывод мы мо-

жем сделать для даек гипербазитов, секущих Саралинское рудное поле. В случае, если расчетные температуры окажутся значительно большими, может быть сделан вывод, что мы имеем дело с глубокими горизонтами дайки, или же дайка являлась подводющим каналом, через который шло питание более крупного интрузивного тела.

Термическая модель дает возможность оценить масштабы времени метаморфизма. В принципе модель может быть использована и для решения обратной задачи, т. е. для определения температуры внедрения дайки по температуре метаморфических изменений пород вблизи контактов. Проводя эксперименты в закрытом пространстве, можно будет оценить и влияние массопереноса, связанного с «отгонкой» поровых вод вмещающих пород.

Несомненно, представленная «модель» позволяет лишь приближенно оценить температуры прогрева пород. В ней не учтены многие факторы (теплоты кристаллизации и плавления материала дайки), но уже такая модель позволяет сделать ряд интересных геологических заключений, проливающих свет на генезис месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

- Дударев А. П., Шарапов В. Н. О механизме теплопереноса в контактовых зонах интрузивов. «Геология и геофизика», 1965, № 11.
- Годовиков Н. А., Птицын А. Б. Вхождение железа в сфалерит при гидротермальной перекристаллизации. Докл. АН СССР, т. 166, № 1, 1966.
- Звягинцев О. Е., Паульсен И. А. К теории образования жильных месторождений золота. Докл. АН СССР, т. 26, № 7, 1940.
- Ингерсолл Л. Р., Зобель О. Дж., Ингресолл А. К. Теплопроводность ее применения в технике и геологии. М.-Л., Машгиз, 1959.
- Каллеруд Г. Сульфидные системы как геологические термометры. В кн.: «Геохимические исследования», ИЛ, 1961.
- Ловринг Г. С. Температуры вблизи и внутри интрузий. Проблемы рудных месторождений, ИЛ, 1958.
- Масляницкий Н. Н. Форма ассоциации золота с минералами в сульфидных рудах цветных металлов. ОНТИ, 1940.
- Удинцева В. С., Чуфаров Т. И. Кинетика диссоциации пирита. Журн. Прикладной химии, т. 14, 1941, № 1.