

КАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ МИКРОСФЕРУЛ В РУДАХ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ГЕНЕЗИСА

М.И.Новгородова

Минералогический музей им.А.Е.Ферсмана РАН, Москва, min@fmm.ru

С.Н.Андреев, А.А.Самохин

Институт общей физики РАН, Москва, asam@ran.gpi.ru

Для объяснения условий возникновения в рудах гидротермального генезиса минеральных микросферул, трактуемых как затвердевшие и раскристаллизованные капли расплава, рассмотрена кавитационная модель. Термодинамическими расчетами величин тепловой энергии, выделяемой за микросекундное время при сокращении газового пузырька во вскипающем гидротермальном растворе, показана вероятность плавления таких тугоплавких веществ как кварц и золото.

В статье 2 таблицы, 6 рисунков, список литературы из 12 названий.

Минеральные микросферулы – шарообразные выделения микронных размеров (от 10 до 100 мкм в диаметре) с разным минеральным составом были известны давно (Вернадский, 1955), однако особый интерес они вызвали после того, как были обнаружены непосредственно в рудах на достаточно большой глубине от поверхности (Гамягин и др., 1999; Новгородова и др., 2003). Ранее объяснения причин их образования были различными. Для так называемых магнитных шариков, состоящих из металлического железа с примесью Ni, часто полностью или частично замещенных вюрцитом или магнетитом, предполагалось космогенное происхождение, а обнаруженные в рудах, прошедших механическую обработку, рассматривались как техногенные артефакты (Dilabio *et al.*, 1988). Округлые конкреционные формы минеральных агрегатов хорошо известны для осадочных руд и минеральных образований карстовых пещер (пещерный жемчуг). Ни одно из этих объяснений не может быть использовано для выяснения условий образования микросферул алюмосиликатных стекол и тугоплавких металлов, а также сульфидов, располагающихся в пустотах и трещинах жильного α -кварца в минерализованных зонах терригенных и вулканогенно-осадочных пород, метаморфизованных в фации зеленых сланцев (золоторудные месторождения Якутии, запада Узбекистана, Аляски). Границные параметры зеленосланцевой фации метаморфизма ($T^{\circ}\text{C}$ до ~500, Р, кбар до ~ 2–8) не допускают возникновения условий парциального плавления сульфидных руд, как это было предположено Р.Фростом с соавторами (Frost *et al.*, 2002) для месторождений, залегающих в породах амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма.

Конкретные сведения о физико-химических параметрах рудообразующих растворов представляют термобарометрические исследования газово-жидких включений в минералах, в частности, в кварце. На примере детально изученного Нежданинского месторождения (Якутия) было установлено, что руды образованы при $T^{\circ}\text{C}$ 175–360, Р 1,2–1,7 кбар при участии растворов средней солености с $\text{H}_2\text{O} > \text{CO}_2 > \text{CH}_4 = \text{N}_2 > \text{H}_2\text{S}$, гетерогенизованных на две фазы: жидкую водноуглекислотную с N_2 , CH_4 , растворенными хлоридами, и газообразную с преобладающими CO_2 и CH_4 (Бортников и др., 1998). Не были отмечены признаки оплавления кварца или включений стекла в кварцевых зернах.

Для объяснения возникновения микросферул алюмосиликатных стекол и тугоплавких металлов с температурами плавления, существенно превышающими температуру гидротермального раствора при образовании мезотермальных золоторудных месторождений (Нежданинское, Келлям в Якутии, Кокпатаас в западном Узбекистане, Демократ на Аляске) была выдвинута гипотеза о кавитационной природе явления (Новгородова и др., 2003.).

Предположено, что минеральные микросферулы образуются за счет быстрого охлаждения и раскристаллизации капель расплава, возникающих в локальных участках приоткрывающихся трещин и пустот в зоне минерализации вследствие явлений кавитационного вскипания и гетерогенизации гидротермальных растворов. Переход от режима медленного просачивания гидротермальных растворов по капиллярам и порам во вмещающей породе к мгновенному заполнению трещин, приоткрываемых при тектонических подвижках, приводит к местному понижению давления, расширению выде-

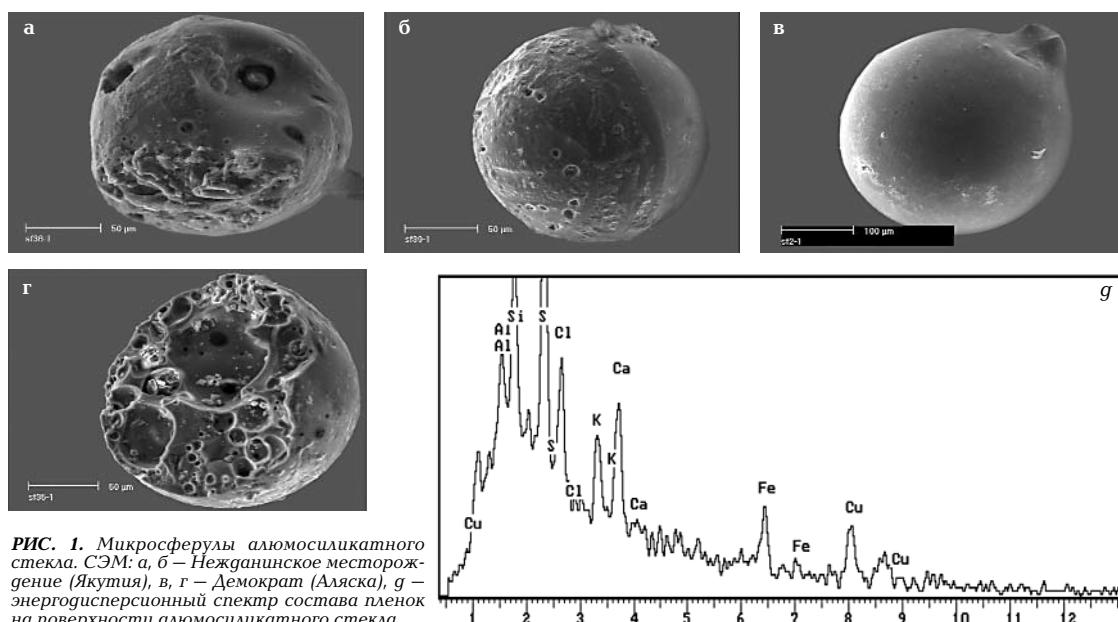


РИС. 1. Микросферулы алюмосиликатного стекла. СЭМ: а, б – Нежданинское месторождение (Якутия), в, г – Демократ (Аляска), г – энергодисперсионный спектр состава пленок на поверхности алюмосиликатного стекла

лившихся газовых пузырьков и их схлопыванию при возвращении к начальным условиям при полном заполнении приоткрывшегося пространства. После схлопывания мелкие пузырьки исчезают, крупные разбиваются на множество мелких. Время протекания процесса для одного пузырька исчисляется микросекундами, однако теплоты и энергии, необходимой для расплавления той или иной твердой частицы, находящейся в зоне воздействия схлопывающегося пузырька, оказывается достаточно, как показывают расчеты, приведенные ниже, для плавления даже таких тугоплавких веществ, как кварц или золото.

Предшествующее затвердеванию и раскристаллизации микросферул их расплавное состояние было установлено (Новгородова и др., 2003_{1,2}) по следующим фактам и соображениям.

Алюмосиликатные стекла микросферул (рис. 1) – прозрачные рентгеноаморфные образования, характеризуются широким разбросом и дискретностью в содержаниях петротогенных элементов, обедненных относительно вмещающих золотые руды пород кремнекислотой, щелочами и обогащенных фемических компонентами (рис. 2). Большая часть анализов не соответствует известным составам каких-либо магматических пород. Выявлена внутренняя неоднородность состава микросферул с включениями стекла в стекле; включения отличаются пониженными содержаниями SiO_2 и представля-

лены дискретными составами с высокими содержаниями Al_2O_3 , MgO , CaO , FeO .

Среди алюмосиликатных стекол выявлены микросферулы мономинерального состава. Для Нежданинского месторождения они представлены стеклами почти чистого SiO_2 (98.69–99.02%) и пироксеном типа энстатит-бронзита со стехиометрией $(\text{Mg}_{1.4}\text{Fe}_{0.6})_2(\text{Si}_{1.9}\text{Al}_{0.1})_2\text{O}_6$. Во вмещающих золото-сурьмяные руды этого месторождения терригенных породах пироксен отсутствует. На аналогичную формулу энстатит-бронзита рассчитываются все изученные стекла месторождения Демократ.

Размер микросферул алюмосиликатных стекол от 10 до 100 микрон (обычно ~50 микрон). Кварцевые стекла – самые мелкие. Все микросферулы насыщены многочисленными газовыми вакуолями. На их поверхности методом растровой электронной микроскопии (SEM) с энергодисперсионным спектрометром Zink-860 обнаружены присыпки и вrostки солей Ca , Cu , Zn , Fe с лигандами, содержащими S , Cl , P , C (рис. 1).

Микросферулы рудных минералов, составы которых описываются системой $\text{Pb-Sb-Au(Ag)-S(As)}$, представлены мономинеральными (самородное золото, галенит, антимонит, буланжерит, пирротин) и полиминеральными микросферулами зонального строения с «золотым» ядром и галенит-буланжеритовой каймой. На их поверхности обнаружены пленки алюмосиликатных стекол и солей Cu и Zn с

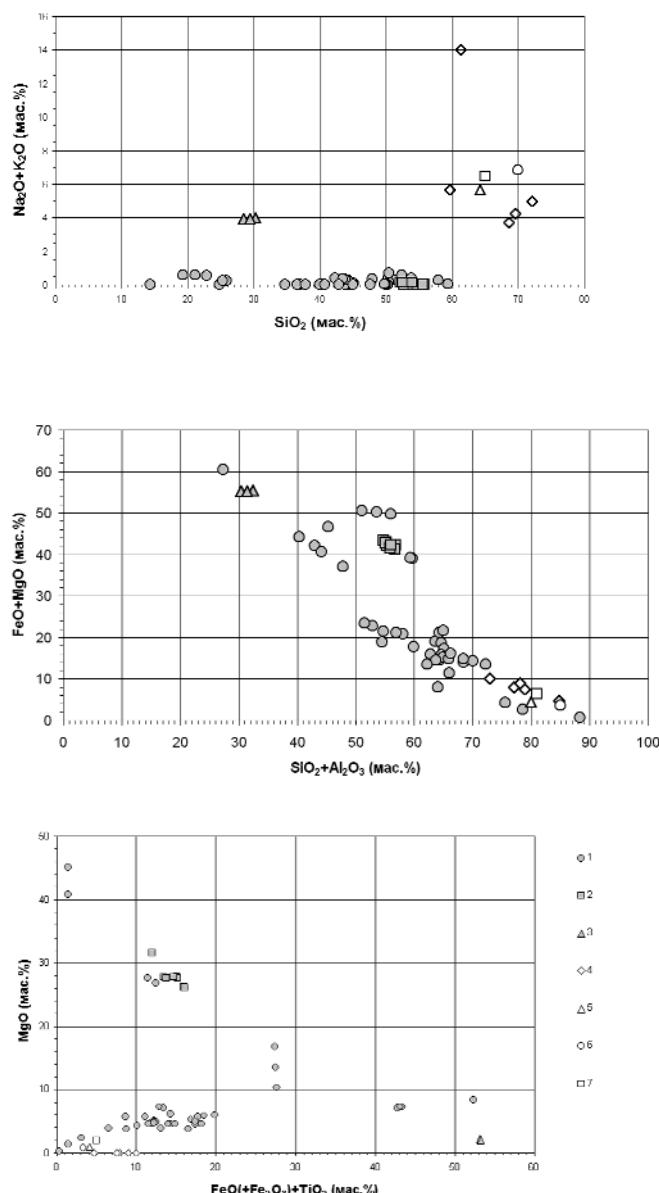


РИС. 2. Вариационная диаграмма составов алюмосиликатных стекол:
1 – месторождение Нежданинское, 2 – Демократ, 3 – Келлям, 4 – Кокпаташ, 5 – вмещающие алевролиты, Нежданинское, 6 – вмещающие песчаники, Нежданинское, 7 – гранодиорит, среднее по Дэли

лигандами С1 и S. Внутри микросферул присутствуют газовые полости и реликты осколков кварца и арсенопирита.

Установлено тонкопластинчатое и дендритовидное внутреннее строение мономинеральных микросферул; для микросферул самородного золота характерны трещины контракции,

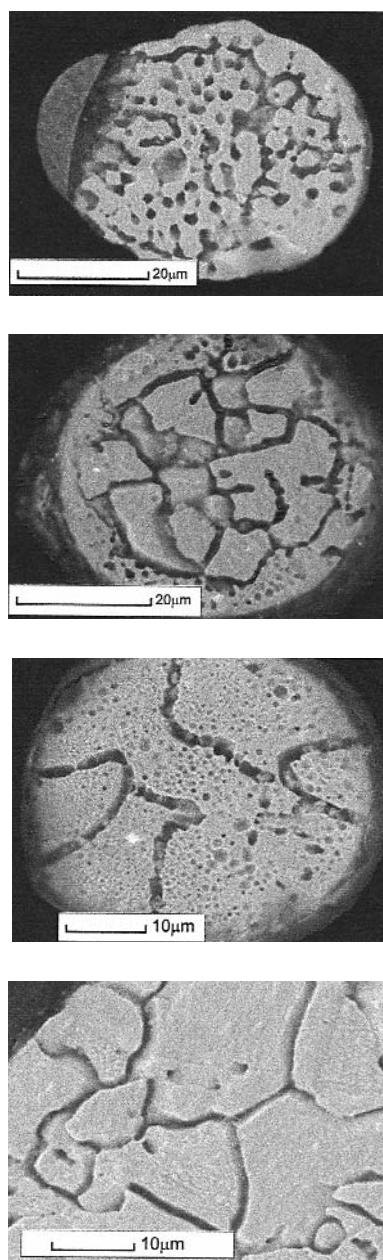


РИС. 3. Трещины контракции, заметные в поперечном срезе микросферулы самородного золота. СЭМ

возникающие вследствие уменьшения объема при затвердевании и раскристаллизации капель расплава золота (рис. 3).

Зональные микросферулы обнаруживают признаки ликвации с обособлением сульфидной (Pb-Sb(As)-S) части в краевых зонах с эвтектоидными сростками галенита и бу-

Таблица 1. Химический состав (мас%) минеральных фаз, слагающих микросферулы

| № пп | Фаза | №№ обр. | Кол-во анализов | Au | Ag | Pb | Sb | Fe | As | S | Сумма | Формула |
|---------|-------------|------------|--------------------|-------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---|
| 1 | Арсенопирит | 92 | 3 | - | - | - | - | 34,39 | 46,23 | 19,52 | 100,14 | $\text{Fe}_{1,00}\text{As}_{1,00}\text{S}_{1,00}$ |
| 2 | " | 82 | 5 | - | - | - | - | 34,32 | 45,99 | 19,79 | 100,10 | $\text{Fe}_{1,00}\text{As}_{1,00}\text{S}_{1,00}$ |
| 3 | Пирит | " | 5 | 0,2 | - | - | 0,2 | 46,70 | - | 48,8 | 95,9 | $\text{Fe}_{1,00}\text{S}_{1,93}$ |
| 4 | Пирротин | " | 2 | - | - | - | 0,2 | 63,60 | 0,7 | 34,8 | 99,3 | $\text{Fe}_{1,02}\text{S}_{0,97}\text{As}_{0,01}$ |
| 5 | Антимонит | " | 3 | 0,2 | - | - | 69,6 | 0,30 | 0,5 | 27,9 | 98,5 | $\text{Sb}_{1,93}\text{S}_{3,00}$ |
| 6 | Галенит | " | 6 | 0,7 | 1,0 | 83,3 | 0,2 | - | 0,5 | 13,4 | 99,1 | $\text{Pb}_{0,96}\text{Ag}_{0,02}\text{Au}_{0,01}$ $\text{S}_{0,99}\text{As}_{0,02}$ |
| 7 | Галенит | 105 | 1 | - | - | 86,58 | - | - | - | 14,03 | 100,61 | $\text{Pb}_{0,98}\text{S}_{1,02}$ |
| 8 | " | 90 | 1 | - | - | 87,24 | - | - | - | 14,18 | 101,42 | $\text{Pb}_{0,98}\text{S}_{1,02}$ |
| 9 | " | 96 | 1 | - | - | 86,32 | - | - | - | 14,05 | 100,37 | $\text{Pb}_{0,98}\text{S}_{1,02}$ |
| 10 | " | 82 | 4 | - | - | 86,52 | - | - | - | 13,59 | 100,11 | $\text{Pb}_{0,99}\text{S}_{1,01}$ |
| 11 | " | 109 | 4 | - | - | 86,70 | - | - | - | 13,63 | 100,33 | $\text{Pb}_{0,99}\text{S}_{1,01}$ |
| 12 | " | 62 | 2 | - | - | 86,49 | - | - | - | 13,71 | 100,20 | $\text{Pb}_{0,98}\text{S}_{1,01}$ |
| 13 | Буланжерит | 82 | 4 | - | - | 55,46 | 25,55 | - | - | 18,83 | 99,84 | $\text{Pb}_{5,03}\text{Sb}_{3,94}\text{S}_{11,03}$ |
| 14 | " | 109 | 4 | - | - | 55,54 | 25,38 | - | - | 19,12 | 100,04 | $\text{Pb}_{5,00}\text{Sb}_{3,89}\text{S}_{11,11}$ |
| 15 | " | " | 4 | 0,3 | - | 56,9 | 24,1 | - | 1,4 | 17,6 | 100,30 | $(\text{Pb}_{5,27}\text{Au}_{0,03})_{3,30}$ $\text{Sb}_{3,80}\text{As}_{0,38}\text{S}_{10,54}$ |
| 16 | Золото | 92 | 3 | 77,70 | 21,95 | - | - | - | - | - | 99,65 | $\text{Au}_{1,98}\text{Ag}_{1,02}$ |
| 17 | " | 105 | 2 | 78,82 | 20,62 | - | - | - | - | - | 99,44 | $\text{Au}_{2,03}\text{Ag}_{0,97}$ |
| 18 | " | 96 | 1 | 84,97 | 14,46 | - | - | - | - | - | 99,43 | $\text{Au}_{3,05}\text{Ag}_{0,95}$ |
| 19 | " | " | 2 | 82,92 | 16,21 | - | - | - | - | - | 99,13 | $\text{Au}_{2,96}\text{Ag}_{1,03}$ |
| 20 | " | " | 2 | 92,72 | 6,96 | - | - | - | - | - | 99,68 | $\text{Au}_{3,52}\text{Ag}_{0,48}$ |
| 21 | " | 90 | 4 | 75,69 | 23,47 | - | - | - | - | - | 99,16 | $\text{Au}_{1,92}\text{Ag}_{1,08}$ |
| 22 | " | " | 1 | 68,60 | 30,97 | - | - | - | - | - | 99,57 | $\text{Au}_{1,10}\text{Ag}_{0,90}$ |
| 23 | Au-Pb-Sb | 92 | 1 | 70,98 | - | 2,90 | 25,08 | - | - | - | 98,96 | $\text{Au}_{0,72}\text{Sb}_{0,23}\text{Pb}_{0,03}$ |
| 24 | " | 62 | 3 | 42,46 | - | 12,06 | 45,65 | - | - | - | 100,17 | $\text{Au}_{0,33}\text{Sb}_{0,50}\text{Pb}_{0,09}$ |
| 25 | " | " | 3 | 41,89 | - | 44,30 | 13,58 | - | - | - | 99,77 | $\text{Au}_{0,39}\text{Sb}_{0,21}\text{Pb}_{0,40}$ |
| 26 | " | " | 5 | 42,3 | 0,6 | 45,3 | 11,3 | - | 1,1 | - | 100,6 | $\text{Au}_{0,39}\text{Ag}_{0,01}\text{Pb}_{0,40}$ $\text{Sb}_{0,17}\text{As}_{0,03}$ |
| 27 | " | " | 3 | 74,9 | 4,0 | 1,8 | 19,6 | - | 1,3 | - | 101,6 | $\text{Au}_{0,63}\text{Ag}_{0,06}\text{Pb}_{0,01}$ $\text{Sb}_{0,27}\text{As}_{0,03}$ |
| 28 | " | " | 3 | 62,8 | 1,1 | 0,9 | 31,1 | - | 3,3 | - | 99,2 | $\text{Au}_{0,50}\text{Ag}_{0,02}\text{Pb}_{0,01}$ $\text{Sb}_{0,40}\text{As}_{0,07}$ |
| 29 | Мышьяк | " | 4 | 2,1 | - | 0,4 | 1,3 | - | 96,1 | - | 99,9 | $\text{As}_{0,99}\text{Sb}_{0,01}\text{Au}_{0,01}$ |
| 30 | Au-Sb-As | " | 3 | 59,2 | - | 0,9 | 25,1 | - | 14,9 | - | 100,1 | $\text{Au}_{0,42}\text{Pb}_{0,01}\text{Sb}_{0,29}\text{As}_{0,28}$ |
| 31 | Ag-Pb-S | 105 | 1 | - | 24,24 | 60,72 | - | - | - | 15,91 | 100,87 | $\text{Pb}_{0,58}\text{Ag}_{0,41}\text{S}_{0,98}$ |
| 32 | " | " | 1 | - | 19,45 | 65,16 | - | - | - | 15,30 | 99,90 | $\text{Pb}_{0,65}\text{Ag}_{0,37}\text{S}_{0,98}$ |
| 33 | " | " | 1 | - | 22,10 | 62,86 | - | - | - | 15,43 | 100,39 | $\text{Pb}_{0,61}\text{Ag}_{0,41}\text{S}_{0,97}$ |
| 34 | Sb-As | 125 | 3 | - | - | - | 51,63 | - | 49,00 | - | 100,63 | $\text{As}_{3,03}\text{Sb}_{1,97}$ |
| 35 | Pb-Sb-Fe-0 | 90 | 1 | - | - | 72,54 | 20,38 | 6,14 | - | - | 99,07 | $\text{Pb}_{1,83}\text{Sb}_{1,71}\text{Fe}_{0,48}$ $\text{O}_{4,02}$ |
| | | | | (PbO) | (Sb ₂ O ₅) | (FeO) | | | | | | |

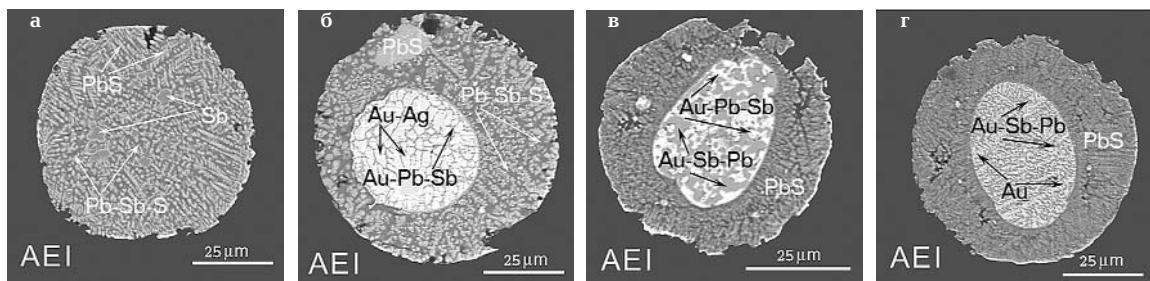


РИС. 4. Строение рудных микросферул в срезе: генериты галенита в буланжеритовой матрице с неправильными выделениями самородной сурьмы, окаймленной галенитом (а); зональные микросферулы с «золотым» ядром: эвтектоидные сростки золота и Au-Pb-Sb фаз с галенит-буланжеритовой каймой с реликтом неодоплавленного галенита (б); эвтектоидные сростки Au-Pb-Sb фаз, различающиеся по содержаниям Pb, в галенитовой с примесью буланжерита матрице (в); тонкорасслоенные структуры Au-Pb-Sb фаз и Au в «золотом» ядре с галенитовой с примесью буланжерита оторочкой (г). Изображение в поглощенном токе (AEI). Масштабная линейка 25 микрон. Месторождение Келлям

ланжерита и металлической (Au(Ag)-Pb-Sb) части в центральной зоне (рис. 4). «Золотое» ядро характеризуется признаками расслоения с тонкопластинчатой структурой фаз, различающихся по содержаниям Pb, и эвтектоидными сростками фаз Au-Sb и Au-Pb-Sb (табл. 1). Установлена близость состава впервые обнаруженных в природе Au-Pb-Sb фаз к синтезированным стеклам нового класса высокотемпературных сверхпроводников (Новгородова и др., 2003₂).

С использованием систем инвариантных точек на диаграммах плавкости (табл. 2) оценен интервал температур образования микросферул от >850°C (плавление золота, галенита, сурьмы, алюмосиликатов и кварца в присутствии природных флюсов и последующая ликвация рудных микрорасплавов) до 650 – 400°C (инконгруэнтное плавление галенита в смеси с антимонитом с образованием буланжерита и галенита через эвтектоидный распад протосоединения – фалькманита) и до 300 – 250°C (плавление, расслоение и эвтектоидный распад с образованием Au-Pb-Sb фаз).

По табулированным значениям свободной энергии Гиббса в реакциях сульфидизации и окисления рассчитаны фугитивности серы и кислорода в газовой фазе, равновесной с сульфидами Pb и Sb (Новгородова и др., 2003₂). Показано, что газовая фаза (мольные доли H₂>H₂O>H₂S) насыщена водородом.

Инициальным этапом формирования минеральных микросферул является процесс плавления твердых частиц, присутствующих в виде взвеси в потоке гидротермального раствора и попавших в кавитационную область. Сами твердые частицы могут являться зародышами кавитационных пузырьков. Необходимым условием перехода твердых частиц в капли расплава является повышение их температуры до значений T_{пл}<T, превышающей температуру плавления твердого вещества. Такое повышение может реализоваться при схлопывании парогазового пузырька, однако микросекундные длительности процесса требуют обсуждения его динамики, величины выделяющейся энергии и скорости прогрева твердой частицы.

Необходимые расчеты были выполнены для самых тугоплавких минеральных веществ, присутствующих в составе микросферул – кварца и золота, без учета природных добавок, понижающих температуры плавления. Другими словами, ставилась задача оценить воздействие возможных максимальных температур, кратковременно возникающих при кавитационных явлениях. Для расчетов было принято, что начальное давление P₁ равно 1,5 кбар, T°C

250°C, газовые пузырьки в периоды их максимального расширения имеют сантиметровые размеры, размеры микрозерен самородного золота 50 микрон, кварца 10 микрон. Для упрощения принимаем также, что жидккая фаза – вода.

Для оценки динамики схлопывания газо-парового пузырька в воде воспользуемся уравнением Рэлея (Наугольных, Островский, 1990):

$$R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho_1} (P(t) - P_1), \quad (1)$$

где R – радиус пузырька, P(t) и P₁ – давление соответственно внутри пузырька и начальное давление, c₁ – плотность окружающей пузырек несжимаемой жидкости. Давление P(t) будем оценивать по формулам адиабатического сжатия неидеального газа, описываемого уравнением Ван дер Ваальса с переменной теплоемкостью в расчете на одну частицу C_v = 5/2 для плотности пара c_v<c_c меньше критической плотности c_c и C_v = 3 для плотности c_v>c_c.

Расчет по формуле (1) при P₁ = 1,5 Кбар, c₁ = 1 г/см³ и начальных условиях P₀ = 40,5 бар и R₀ = 1 см где P₀ – давление насыщенного пара жидкости при 250°C, R₀ – радиус расширенного пузырька, показывает, что время t_m существования возросшей температуры T>T_{пл} в пузырьке не превышает 1,5 мкс. Максимум температуры при этом составляет T_{max} = 7030°C, а минимальный радиус пузырька R_{min} = 0,15 см. Величины t_m и R_{min} оказываются примерно пропорциональными начальному радиусу пузырька, в то же время T_{max} от R₀ практически не зависит.

Элементарная оценка l = √χt в случае кварцевого микрозерна (температурапроводность χ = 0,02 см²/с) показывает, что за время t~1 мкс толщина прогретого расплавленного слоя l ~ 1,7 мкм является относительно малой, по сравнению с радиусом микрозерна r_s = 10 мкм. В то же время заметное превышение T_{max} над температурой плавления может обеспечить энерговклад, достаточный для более глубокого проплавления микрозерна.

Решая уравнение теплопроводности для сферической микрочастицы кварца с температуропроводностью χ, теплоемкостью C_s = 70Дж/(Моль·°C), температурой плавления T_{пл} = 1610°C и начальной температурой T(r,o) = 250°C, на поверхности которой задана температура T_s = T(t), определяемая из решения уравнения (1), можно получить полный энерговклад и распределение температуры внутри микрозерна к заданному моменту времени (Карслуу, Егер, 1964). На рис. 5 при-

Таблица 2. Инвариантные точки природной системы
 с Au, Pb, Sb, S, As, Fe
 (по Robinson, 1948; Craig *et al.*, 1973; Gmelin Handbook..., 1996)

| Низкотемпературная ассоциация | Высокотемпературная ассоциация | T°C |
|---|--|--------|
| Кварц | Расплав | 1610 |
| Галенит | Расплав | 1115 |
| Золото | Расплав | 1063,4 |
| Галенит-свинец | Расплав (расслоенный) | 1041 |
| Бронзит | Расплав(1 кбар) | 850 |
| Сурьма-расплав (56% S) | Расплав монотектический (~5,5% S) | 800 |
| Пирит (+ сера) | Расплав | 743 |
| Арсенопирит | Пирротин + леллингит + расплав | 702 |
| Фалькманит (фаза I по Craig <i>et al.</i>) | Галенит + расплав, богатый Sb ₂ S ₃ | 642 |
| Буланжерит | Фалькманит (фаза I по Craig, <i>et al.</i> , 1973) + расплав | 638 |
| Золото-мышьяк | Расплав эвтектический | 636 |
| Галенит + сурьма | Расплав | 622 |
| Антимонит + сурьма | Расплав (расслоенный) | 615 |
| Буланжерит + галенит | Фалькманит (фаза I по Craig <i>et al.</i> , 1973) | 605 |
| Ag ₂ S + галенит | Расплав | 605 |
| Мышьяк (25.5%) + сурьма | Расплав эвтектический | 602 |
| Антимонит | Расплав | 556 |
| Пирит + арсенопирит | Пирротин + расплав (AsS) | 491 |
| Ауростибит | Расплав (конгруэнтное плавление) | 460 |
| Золото + кремний (6%) | Расплав эвтектический | 370 |
| Золото-ауростибит | Расплав эвтектический | 360 |
| Фаза Au _{0,36} Pb _{0,25} Sb _{0,39} | Расплав эвтектический | 250 |

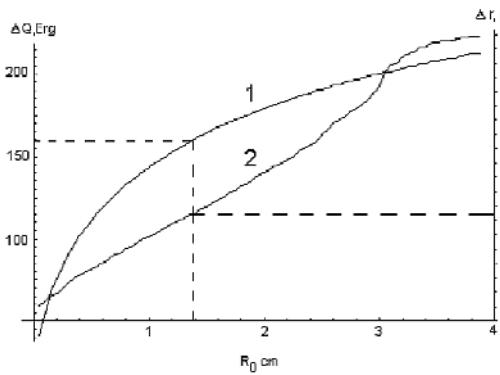


РИС. 5. Величина энерговклада ΔQ , Erg (кривая 1) и толщина проплавленного слоя Δt , мкм (кривая 2) микрозерна кварца в зависимости от изменения радиуса парогазового пузырька при его расширении

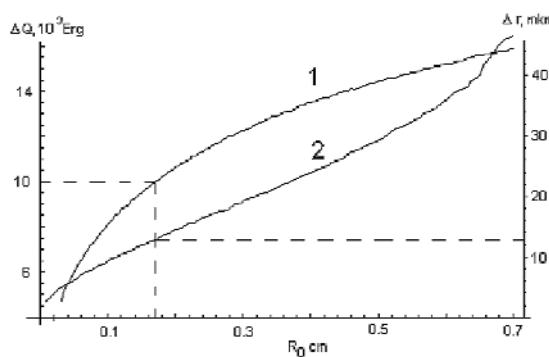


РИС. 6. Величина энерговклада ΔQ , Erg (кривая 1) и толщина проплавленного слоя Δt , мкм (кривая 2) микрозерна золота в зависимости от изменения начального радиуса парогазового пузырька

водится величина полного энерговклада и

$$\Delta Q = 4\pi c_s \int_0^{R_0} (T(r) - T_0) r^2 dr$$

толщина проплава Δr в зависимости от радиуса расширившегося кавитационного пузырька к тому моменту времени, когда температура в пузырьке $T(t)$ после прохождения через максимум $T_{\max} = 7030^\circ\text{C}$ уменьшается до значения $T(t) = T_{\text{пл}}$.

Из рис. 5 видно, что микрозерно получает энергию, необходимую для его полного расплавления $\Delta Q = 161$ Эрг при $R_0 = 1.4$ см, однако фактическое температурное распределение существенно отличается от равномерного и толщина проплавленного слоя в этот момент составляет всего лишь $\Delta r = 3.7$ мкм. В последующие моменты времени глубина проплава может увеличиться до 4.5 мкм. Полное расплавление может реализоваться при $R_0 > 2$ см.

Таким образом, микрозерно кварца размером 10 мкм может быть выплавлено «сухим» способом за счет тепловой энергии, возникающей при резком адиабатическом сокращении радиуса газового пузырька от 2 см до 0.6 см. Столы высокие температуры ($> T_{\text{пл}}$ кварца 1610°C), инициирующие начало плавления поверхности микрозерна кварца, могут быть реализованы лишь при сантиметровых размерах расширившегося газового пузырька, что, очевидно, возможно лишь при больших объемах адиабатической полости.

Аналогичные расчеты были выполнены для микрозерна самородного золота ($T_{\text{пл}} = 1063^\circ\text{C}$, $C_p = 25.23$ Дж/(Моль \cdot °С), $\chi = 1$ см 2 /с) с радиусом 50 мкм, результаты которых приводятся на рис. 6. В этом случае необходимый для полного расплавления микрозерна энерговклад $\Delta Q = 1.06 \cdot 10^4$ Эрг достигается при $R_0 = 0.2$ см. При этом $R_{\min} = 0.06$ см, а глубина проплава составляет величину $\Delta r = 14$ мкм. Для полного расплавления микрозерна из самородного золота в рамках данной модели требуется $R_0 > 0.5$ см.

Из соотношений уравнения (1) следует, что величины температуры прогрева твердой частицы и энерговклада сжимающегося пузырька зависят от его размера в момент его наибольшего расширения. Естественно, что для более легкоплавких веществ, составляющих большинство минеральных микросферул (табл. 1, 2), требуются на 1–2 порядка меньшие размеры пузырька.

Следует иметь в виду, что используемая модель является весьма упрощенной и нуждается в ряде уточнений, в частности, в более последовательном учете динамики процессов на границе раздела жидкость-пар,

реального уравнения состояния и процесса теплопередачи от окружающей среды к микрозерну.

Тем не менее, вероятность резких флюктуаций температур, сопровождаемых генерацией тепловой энергии, достаточной для проплавления твердых частиц в потоке вскипающего гидротермального раствора, подтверждается приведенными выше расчетами кавитационной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 00-05-64709.

Литература

- Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Аллатов В.А. Минералого-geoхимические особенности и условия образования Нежданинского месторождения золота (Саха-Якутия, Россия) // Геол. рудн. м-ний. 1998. Т. 40. № 2. С. 137 – 156.*
- Вернадский В.И. Избранные сочинения (т. 1, 2). // М.: Изд-во АН СССР, 1955. 615 с.*
- Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я., Сыромятникова А.С. Состав и структурные особенности сфероидов из золоторудных месторождений Восточной Якутии // ЗВМО. 1999. Ч. 128. № 5. С. 71 – 75.*
- Карслу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел // М.: Наука, 1964.*
- Наугольных К.А., Островский Л.А. Нелинейные волновые процессы в акустике // М.: Наука, 1990.*
- Новгородова М.И., Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я., Агаханов А.А., Дикая Т.В. Микросферулы алюмосиликатных стекол в золотых рудах // Геохимия. 2003₁. № 1.*
- Новгородова М.И., Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я., Агаханов А.А., Дикая Т.В. Микросферулы самородного золота, сельфидов и сульфосолей в золотых рудах // Геохимия. 2003₂ (в печати).*
- Craig J.R., Chang Z.Z.Y., Zeees W.R. Investigations in the Pb-Sb-S system // Canad. Mineral. 1973. Vol. 12. Part 3. P. 199 – 206.*
- Dilabio R.H.W., Newsome J.W., Mc Jvor D.F., Jowenstein P.J. The shperoid form of gold: manmade or secondary // Econ. Geol. 1988. V 83. P. 153 – 162.*
- Frost B.R., Mavrogenes J.A., Tomkins A.G. Partial melting of sulfide ore deposits during medium – and high-grade metamorphism // Can. Mines. 2002. V 40. P. 1. P. 1 – 18.*
- Gmelin Handbook of inorganic and organometallic chemistry // An. Suppl. 1996. Vol. 134. P. 128 – 134.*
- Robinson S.C. Synthesis of lead Sulphantimonites // Econ. Geol. 1948. Vol. 43. No 4. P. 293 – 312.*