

МИКРОСФЕРУЛЫ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ В ЗОЛОТЫХ РУДАХ

© 2003 г. М. И. Новгородова*, Г. Н. Гамянин**, Ю. Я. Жданов**,
А. А. Агаханов*, Т. В. Дикая*

*Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН
117071 Москва, Ленинский просп., 18, корп 2.

**Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН
677891 Якутск, просп. Ленина, 39

Поступила в редакцию 16.05.2001 г.

В рудах золото-кварцевых и золото-кварц-сульфидных месторождений Нежданинское, Келлям (Якутия), Демократ (Аляска), Кокпатас (Узбекистан) обнаружены и изучены микросферулы алюмосиликатных стекол с широким разбросом в содержаниях петрогенных компонентов и включениями стекла в стекле, подчеркивающими дискретность их состава. Их образование связывается с микровзрывными кавитационными явлениями в потоке вскипающих гетерогенизирующихся гидротермальных растворов.

Минеральные микросферулы, или шарики, самородных металлов (железа, золота, меди, цинка, кадмия и др.), оксидов (магнетита и поцита), силикатов, сульфидов и сульфосолей, обнаруженные в последние годы [1], рассматривались обычно как морфологические редкости или даже минералогические курьезы. Причины их образования трактовались по-разному. Для тех, что находились в россыпях, доказывалось космогенное происхождение, а для обнаруженных в рудах, прошедших механическую обработку в процессе дробления проб и выделения тяжелых фракций, – техногенное происхождение [2]. В тех редких случаях, когда удавалось найти минеральные микросферулы непосредственно в породах, оказывалось, что они свободно располагаются внутри мелких полостей, пустых или заполненных рыхлым минеральным веществом, представленным водосодержащими филлосиликатами (диккит, гидрослюды). Проведенные в свое время исследования шариков самородного цинка из пустот в гранитоидах [3] показали высокую вероятность их роста по механизму ПЖК (пар–жидкость–кристалл), т.е. кристаллизацию их из капель металлического расплава, формирующегося из легко летучих соединений цинка в составе послемагматических флюидов с низким окислительным потенциалом. Низкая температура плавления металлического цинка ($T_{пл}^{\circ} 419.5$) не исключала такое предположение.

Проблема возникла, когда в мезотермальных золоторудных месторождениях, руды и околорудные метасоматиты которых формировались в среднетемпературных гидротермальных условиях, среди минеральных микросферул постоянно обнаруживались шарики тугоплавких металлов и

алюмосиликатных стекол. Загрязнение исследуемого материала космогенным или техногенным веществом исключалось по условиям отбора проб на глубинах до 700 м от поверхности и по итогам специально выполненных экспериментов [4]. Соответственно, вставал вопрос о том, связано ли появление в рудах гидротермального генезиса микросферул тугоплавких минеральных веществ с возникновением капель расплавов, и если да, то что явилось причиной резких флуктуаций температур. На первом этапе работы были сконцентрированы на исследовании микросферул алюмосиликатных стекол.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОТО-КВАРЦЕВЫХ РУД

Объектом исследования служили микросферулы алюмосиликатных стекол из золоторудных месторождений Нежданинское, Келлям (Якутия), Демократ (Аляска), Кокпатас (Узбекистан). Малосульфидные золото-кварцевые и золото-кварц-сульфидные руды этих месторождений жильного и прожилково-вкрапленного типа располагаются в углеродистых терригенных песчано-сланцевых (Нежданинское, Келлям) или осадочно-вулканогенных (Кокпатас) толщах, метаморфизованных в фации зеленых сланцев. Золото-кварцевое месторождение Демократ на Аляске локализовано в жильных зонах среди метасоматически измененных березитизированных гранодиоритов с участками грейзенов. Вблизи контакта с золото-кварцевыми жилами с редкой вкрапленностью арсенопирита и висмутовых сульфосолей вмеща-

Таблица 1. Химический состав (мас. %) гидрослюда и диккита из друзовых пустот с регенерированным кварцем (Нежданинское месторождение)

Минерал	Место взятия	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Сумма
Гидрослюда	рудная зона 1, +1100 м	50.60	35.20	–	1.47	–	–	5.64	5.89	98.80
	рудная зона 1, +700 м	50.75	40.81	0.15	0.20	–	–	3.77	4.81	100.49
	жила № 6, +900 м	49.26	36.03	0.37	1.53	–	0.17	4.98	6.57	99.01
	жильная зона 76, +600 м	49.31	38.90	0.22	1.21	–	0.19	2.53	6.67	99.03
Диккит	рудная зона 32, +1100 м	47.42	38.38	0.64	–	1.46	–	–	12.32	100.22
	рудная зона 8, +800 м	47.55	37.55	0.49	0.24	2.35	–	–	11.36	99.59
	рудная зона 1, +100 м	48.34	39.01	0.25	–	0.12	–	–	12.43	100.15

ющие породы турмалинизированы. В брекчиевидных по текстуре кварцевых жилах обломки турмалинитов сцементированы кварцем. Месторождение Демократ по типу золото-кварцевого оруденения сходно с Ключевским месторождением в Забайкалье.

Рудные тела в своем размещении контролируются региональными надвигами и глубинными разломами и их пересечениями.

Для рассматриваемых месторождений Якутии и Средней Азии характерно поэтапное формирование руд, сопровождаемое внедрением внутрирудных даек лампрофиров и диорит-порфиров.

При сходной для всех рассматриваемых месторождений последовательности формирования рудной минерализации от раннего комплекса слабо золотоносных пирит-арсенопиритовых ассоциаций к поздним продуктивным ассоциациям с кварцем и сульфидами Pb, Ag, Sb, Cu, они различаются по количественным соотношениям вкрапленной и жильной минерализации в балансе руд. Основную промышленную ценность для Кокпатаасского месторождения представляют вкрапленные и прожилково-вкрапленные руды, для других – жильные и прожилково-вкрапленные руды.

В золоторудных месторождениях, локализованных среди терригенных или осадочно-вулканогенных толщ, первый этап представлен гидротермально-метаморфогенными убого-золотоносными кварцевыми жилами с содержанием сульфидов <0.1%. Во второй этап происходит метасоматическое преобразование вмещающих толщ с образованием золотоносных березитов за счет существенной (до 15%) вкрапленности метакристаллов пирита и арсенопирита. Основная продуктивная минерализация сосредоточена в жильном материале, сложенном пирит-арсенопирит-кварцевой, халькопирит-сфалерит-галенитовой и тетраэдрит-сульфоантимонитовой золотоносными ассоциациями. Третий этап связан с наложением на рудные тела двух предыдущих этапов молодого серебро-полиметаллического или сурьмяного оруденения, что сопровождается интенсивной коррозией, выщелачиванием и регенерацией ранних минералов.

На примере детально исследованного Нежданинского месторождения установлено, что руды были образованы при $T^{\circ}\text{C}$ 175–360, P 1.2–1.7 кбар при участии флюидов средней солёности с $\text{H}_2\text{O} > \text{CO}_2 > \text{CH}_4 = \text{N}_2 > \text{H}_2\text{S}$, гетерогенизированных на две фазы – жидкую водно-углекислотную с N_2 , CH_4 , растворенными хлоридами и газообразную с преобладающими CO_2 и CH_4 [5]. Исследования состава стабильных изотопов привели к выводу о смешанном источнике флюидов, к магматогенной составляющей которых добавлялись компоненты, заимствованные из вмещающих пород, и метеорные воды [5].

УСЛОВИЯ НАХОЖДЕНИЯ И МОРФОЛОГИЯ МИКРОСФЕРУЛ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

Микросферулы стекол помимо тонких фракций из протолок рудных проб были обнаружены непосредственно в образцах внутри мелких пустот в раннем кварце, нередко в зальбандах кварцевых прожилков на границе с метаморфизованными глинистыми сланцами. Характерной особенностью таких пустот на месторождении Нежданинское являются тонкопылеватые налеты углеродистого вещества и слюдистых минералов на стенках пустот и на всех минеральных образованиях внутри. Нередко такие пустоты почти целиком заполнены тонкошешуйчатой смесью гидрослюд и диккита, для которых был определен химический состав (табл. 1). Стенки пустот инкрустированы друзами регенерированного длиннопризматического кварца, а на месторождении Демократ – помимо кварца, также щетками игольчатого турмалина и карбонатов. На Нежданинском месторождении в рыхлой массе глинистых минералов помимо микросферул алюмосиликатного состава были обнаружены шарики графита и галенита, а также нитевидный кварц и тончайшие иголки сульфосолей, легко препарлируемые вручную с помощью медной иглы под бинокляром. Рост нитевидных и сферических минеральных образований происходил, очевидно,

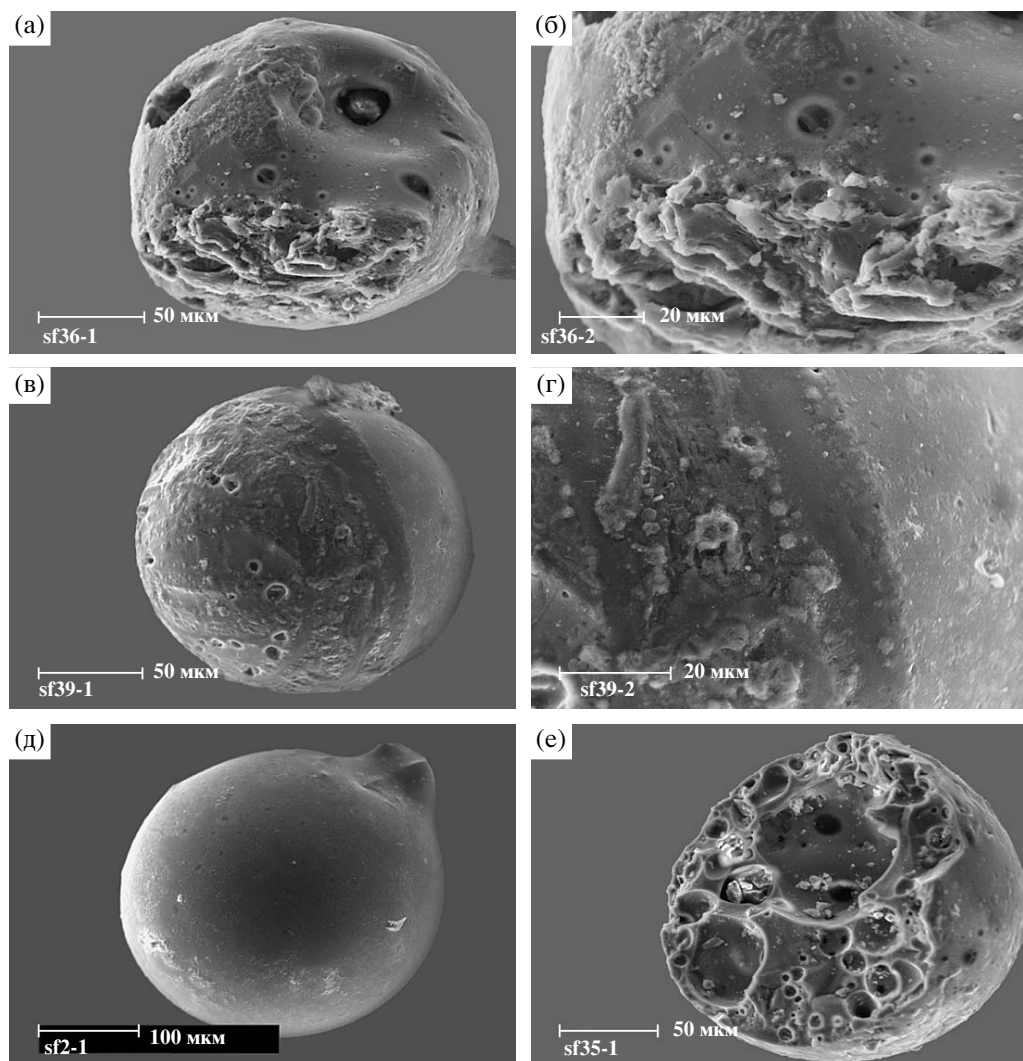


Рис. 1. Микросферы алюмосиликатного стекла. СЭМ а, б – со сглаженно-увалистой поверхностью и востками гидрослюды (Нежданинское); в, г – с газовыми камерами и налетами солей (Нежданинское); д – с блестящей поверхностью (Демократ); е – с газовыми камерами и солями на их стенках (Демократ).

в свободном пространстве, впоследствии частично или полностью заполненным рыхлыми водосодержащими глинистыми минералами.

Размер микросферул алюмосиликатных стекол не превышает 0.15 мм, чаще составляет менее 0.10 мм.

В Нежданинском месторождении большинство стекловидных микросферул имеет идеально шаровидную форму с гладкой блестящей поверхностью; стекла бесцветные, дымчато-серые прозрачные и полупрозрачные. Небольшие искажения шаровидной формы обусловлены тонкими наростами и плавными углублениями неровных очертаний, со сталактитовидными наростами на поверхности микросферул (рис. 1а, 1б). В прозрач-

ных сфероидеях при 100-кратных увеличениях наблюдались газовые пузырьки. Число и размеры газовых камер разнообразны; единичные камеры могут занимать до 3/4 площади среза микросферул. Чаще присутствуют разноразмерные камеры. Стенки газовых камер имеют пупырчато-сталактитовидную поверхность. Во включениях в самом стекле наблюдались мельчайшие неправильной формы обломки кварца; в одном из них микрондовым рентгеноспектральным анализом определены включения галенита. В алюмосиликатных микросферулах темно-серого цвета (месторождение Демократ) диагностированы округлые включения иоцита с небольшой примесью Сг и металлического железа.

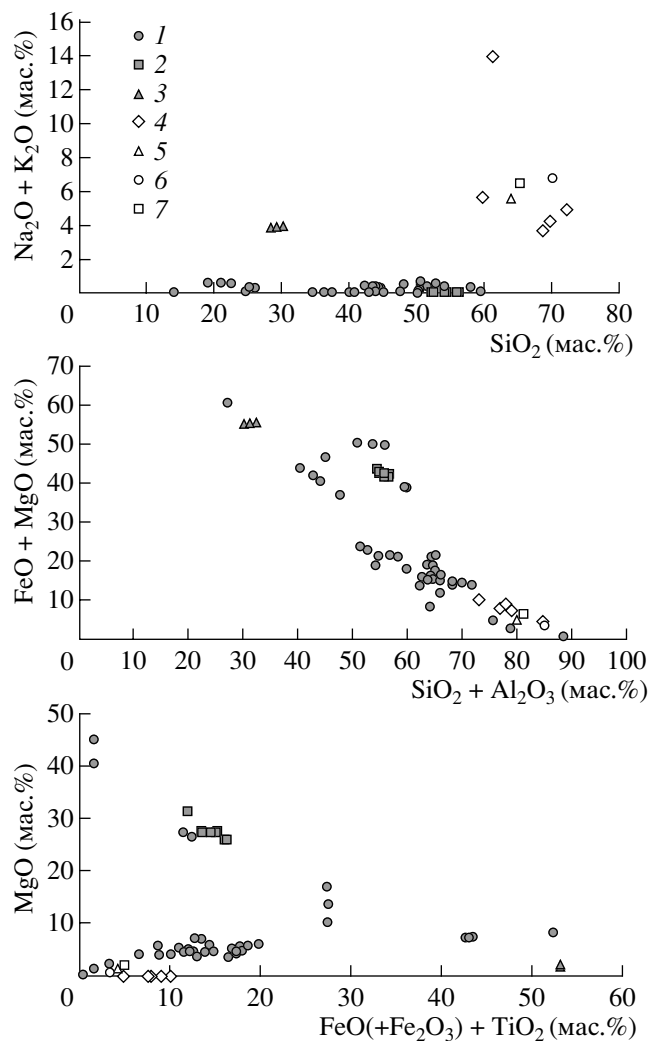


Рис. 2. Вариационные диаграммы составов алюмосиликатных стекол (по данным табл. 2):

1 – месторождение Нежданинское, 2 – Демократ, 3 – Келлям, 4 – Кокпатас, 5 – вмещающие алевриты, Нежданинское, 6 – вмещающие песчаники, Нежданинское, 7 – гранодиорит, среднее по Дели.

В рудах месторождения Келлям стекловатые микросферы встречались не так часто, как на Нежданинском. Обнаруженные шарики стекла имели темно-бурый цвет, шагреневую поверхность с газовыми камерами и налетами солей (рис. 1в, 1г). Для месторождения Демократ характерны овальные, сфероидальные и более сложной конфигурации стекловидные микросферы (рис. 1д) ярко-зеленого цвета. Они отличаются обилием сообщающихся разноразмерных газовых пустот (рис. 1е), что придает им внешнее сходство с пузырьчатыми лавами.

Постоянно обнаруживаемые на поверхности стекловатых микросфер тончайшие налеты и скопления солей по данным энергодисперсионно-

го анализа содержат в своем составе К, Са, Fe с лигандами Cl, S, P (хлориды, сульфаты, фосфаты) (рис. 2а, 2д).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТЕКЛОВИДНЫХ МИКРОСФЕРУЛ

Все стекловидные микросферы по данным рентгеноструктурных анализов рентгеноаморфны, т.е. действительно представлены стеклами.

По химическому составу (табл. 2) они отличаются от пород, вмещающих золото-кварцевые руды, уменьшением содержаний SiO_2 и щелочей; относительно высокие содержания SiO_2 и щелочей установлены для алюмосиликатных микросфер месторождения Кокпатас (рис. 2). При широких вариациях состава, особенно характерных для микросфер Нежданинского месторождения, большая часть анализов не соответствует известным составам каких-либо магматических пород, что хорошо видно на классификационной диаграмме $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (рис. 2). Для высокомагнезиальных стекол характерна обратная зависимость содержаний MgO и $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$ в отличие от большинства анализов с прямо пропорциональным увеличением в составе стекол содержаний феррических компонентов (рис. 2).

Стекла характеризуются широкими вариациями в содержаниях SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, MgO, FeO и дискретностью состава. Различия в составе центральной и краевой частей микросфер незначительны (табл. 2, ан. 2–3, 4–5, 18–19), тогда как состав одной микросферы от другой, выделенных из одной и той же пробы, отличается по содержаниям SiO_2 существенно (табл. 2, ан. 30–32). Выявлена внутренняя неоднородность состава микросфер с включениями стекла в стекле. Включения отличаются пониженными содержаниями SiO_2 и представлены дискретными составами с высокими содержаниями Al_2O_3 и FeO (табл. 2, ан. 7, 13–15); Al_2O_3 , FeO и MgO (табл. 2, ан. 36, 37); FeO и MgO с пониженным Al_2O_3 (табл. 2, ан. 34); Al_2O_3 и CaO (табл. 2, ан. 24). Часть включений и некоторые микросферы в целом с относительно пониженными содержаниями FeO люминесцируют (голубое свечение) под электронным пучком микроскопа.

В отличие от микросфер Нежданинского месторождения алюмосиликатные стекла других месторождений более однородны по составу. Для Кокпатасского месторождения характерны стекла, наиболее обогащенные щелочами (рис. 2). Существенная концентрация K_2O (до 4%), MgO и FeO свойственна стеклам месторождения Келлям, тогда как алюмосиликатные стекла месторождения Демократ на Аляске, стабильные по содержаниям SiO_2 , с высокими концентрациями MgO и

FeO, не содержат щелочей и характеризуются низкими содержаниями Al_2O_3 .

Среди алюмосиликатных микросферул обнаружены микросферулы мономинерального состава. Для Нежданнинского месторождения они представлены стеклами почти чистого SiO_2 (98.69–99.02%) и хорошо рассчитываемым на формулу $(Mg_{1.4}Fe_{0.4}Al_{0.2})_2(Si_{1.9}Al_{0.1})_2O_6$ пироксеном типа энстатит-бронзита с повышенным глиноземом. На аналогичную формулу пироксена $(Mg_{1.4}Fe_{0.6})_2Si_2O_6$ рассчитываются все изученные стекла месторождения Демократ.

Как показывают результаты исследований с помощью сканирующего электронного микроскопа, помимо микросферул, алюмосиликатные стекла обнаруживаются в виде тонких фрагментарных пленок на поверхности микросферул рудных минералов. С помощью качественного энергодисперсионного анализа установлен состав таких пленок и неправильных наростов. Пленки железо-магнезиальных алюмосиликатных стекол обнаружены на поверхности микросферулы марганцовистого ильменита и антимонита (рис. 3); более сложный состав имеют наросты неправильной формы на поверхности микросферул того же ильменита (смесь алюмосиликатных стекол с солями K, Ca, Cu, Zn с Cl, S) или пирита (соли и стекла с катионным составом – Fe, Ca, K, Cu и анионным – Cl, S) (рис. 3).

Срастаний микросферул алюмосиликатных стекол с микросферулами рудных минералов не обнаружено.

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

Полученные фактические данные об условиях нахождения алюмосиликатных стекол, морфологии микросферул и их химическом составе сводятся к следующим положениям, имеющим значение для генетических построений.

1. Микросферулы алюмосиликатного стекла, обнаруживаемые в пустотах и трещинах жильного кварца из рудных зон рассматриваемых месторождений, характеризуются широким разбросом содержаний петрогенных компонентов и дискретностью состава, которая подчеркивается наличием включений стекла в стекле. Обнаружен эффект катодоллюминесценции стекол.

2. Химический состав алюмосиликатных стекол не идентичен составу вмещающих оруденные измененных терригенных или магматических пород, что доказывает, что их образование не может быть прямым следствием плавления пород *in situ*.

3. Наличие многочисленных газовых полостей внутри микросферул алюмосиликатных стекол, внешне напоминающих вспененные лавы, указы-

вает на весьма существенную долю газовой фазы во флюидах.

Необходимыми условиями образования микросферул алюмосиликатных стекол являются высокие температуры и быстрые скорости охлаждения расплавленного вещества. Вероятность зарождения капель алюмосиликатных расплавов во флюидах гидротермальной рудообразующей системы определяется вероятностью гидродинамических возмущений в этой нестационарной системе с конвективным массообменом в трещинных зонах флюидопроводников. По Л.Н. Поспелову [6], течение макрообъемов флюидов сходно с турбулентным струйным течением, для которого характерны неупорядоченные сложные движения отдельных элементарных ячеек. Движущей силой конвективного транзита является градиент давления, величина которого по мере развития процесса минералогенеза меняется в зависимости от фазового расслоения флюида, появления газовых фаз в результате химических транспортных реакций и глубинных подтоков, взрывных и других явлений, определяющих барическую гетерогенность гидротермальной системы. Вероятность взрывов в макрообъемах очевидна из известных фактов присутствия на некоторых рудных месторождениях трубчатых и пластовых тел с брекчиями взрыва.

В локальных участках в потоке гетерогенизированных флюидов гидродинамические возмущения могут быть вызваны возникновением кавитационных явлений, на вероятность которых в природных процессах впервые обратил внимание Э.М. Галимов [7]. Лимитирующими параметрами кавитации (явления, при котором происходит разрыв сплошности жидкости и обособление газовых пузырьков) являются скорость потока и градиент давления, соотношения величин которых определяют безразмерное число кавитации:

$$\chi = 2(P_{\infty} - P_n) / \rho V_{\infty}^2, \quad (1)$$

где P_{∞} и V_{∞} – давление и скорость набегающего потока, ρ – массовая плотность раствора, P_n – давление насыщенного пара жидкости. Кавитация возможна при $\chi \leq 1$, а степень ее развития тем больше, чем ниже величина χ . Подставляя в уравнение согласно [8] P_{∞} 100 МПа, P_n 22.12 МПа для воды при 375°C, ρ 1000 кг/мм² для гидротермальных растворов, получим, что для начала кавитации при заданных условиях требуются критические скорости потока, равные 7.9 м/сек.

Движение фильтрующихся гидротермальных растворов при градиентах давления в системах со свободной конвекцией 0.5–1.0 МПа, а с вынужденной конвекцией до 10 МПа [8] подчиняется закону Стокса:

$$V = -(K/\mu) \text{grad } p, \quad (2)$$

Таблица 2. Химический состав (мас. %) алюмосиликатных стекол по данным микронзондовых анализов

Номер п/п	Номер образца	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1.	18-14	59.37	1.90	12.84	0.02	9.22	10.80	4.26	0.20	0.04	0.16	98.81
2.	18-2	47.97	8.18	12.02	0.03	11.66	11.22	6.01	0.12	0.30	0.13	97.63
3.	18-2 край	50.48	2.17	14.16	0.05	10.65	11.80	5.12	0.04	0.15	0.15	94.77
4.	18-3 центр	48.00	1.56	15.69	0.02	11.90	12.41	7.12	0.21	0.36	0.12	97.40
5.	18-3 край	50.35	1.37	14.37	0.05	11.51	11.80	7.22	0.13	0.39	0.15	97.34
6.	18-3	51.42	3.25	13.73	0.03	11.07	11.56	6.15	0.16	0.27	0.14	97.80
7.	18-3 вкл.	43.87	1.14	20.43	0.31	16.49	9.29	4.70	0.05	0.32	0.24	96.85
8.	18-5	50.47	2.23	13.84	0.05	8.81	11.77	5.71	0.08	0.70	0.27	93.92
9.	35	54.71	1.41	8.32	0.00	10.49	11.27	4.79	0.01	0.00	0.00	91.00
10.	35	55.70	1.36	7.09	0.00	11.03	10.04	4.86	0.01	0.00	0.00	90.09
11.	18-8	57.97	2.98	10.54	0.08	10.06	10.51	3.92	0.04	0.26	0.18	96.54
12.	18-8	53.87	2.03	10.79	0.06	10.21	11.08	4.88	0.04	0.37	0.20	93.26
13.	18-8 вкл	22.90	0.25	33.16	0.08	42.60	1.76	7.13	0.02	0.40	0.13	108.44
14.	18-8 вкл	19.33	0.20	31.78	0.07	43.20	1.82	7.30	0.03	0.45	0.14	104.33
15.	18-8 вкл.	21.12	0.23	32.47	0.08	42.90	1.79	7.22	0.02	0.43	0.13	106.39
16.	34	50.28	2.48	13.77	0.00	4.02	18.23	3.90	0.01	0.00	0.00	92.69
17.	34 люм. вкл	50.02	1.18	25.54	0.00	1.91	15.10	2.31	0.00	0.00	0.00	96.06
18.	18-1	45.16	4.22	20.75	0.09	10.10	11.53	4.65	0.08	0.39	0.22	97.18
19.	18-1 край	44.29	5.04	19.41	0.13	9.78	11.36	4.60	0.06	0.25	0.22	95.17
20.	37	44.47	1.90	25.65	0.00	9.63	8.53	4.64	0.00	0.00	0.00	94.82
21.	37 центр	43.93	2.28	24.58	0.00	9.90	8.26	4.80	0.00	0.00	0.00	93.75
22.	18-13 центр	42.34	1.10	22.72	0.05	17.06	9.75	4.60	0.04	0.37	0.27	98.30
23.	38	43.50	2.41	22.74	0.14	11.51	10.34	4.54	0.03	0.33	0.24	95.49
24.	38 люм. вкл	40.44	1.16	25.65	0.00	7.61	13.67	3.81	0.01	0.00	0.00	92.35
25.	34 люм.	47.66	0.40	30.89	0.00	1.08	14.60	1.45	0.01	0.00	0.00	96.08
26.	18-11	49.82	0.00	38.59	0.04	0.32	0.03	0.31	0.02	0.02	4.34	93.50
27.	18-17	45.04	0.00	0.27	0.36	1.47	0.02	45.10	0.05	0.00	0.01	92.33
28.	18-17 вкл.	42.96	0.01	0.09	0.07	1.41	0.01	40.72	0.02	0.00	0.00	85.28
29.	36	40.00	1.16	18.10	0.00	16.23	13.00	4.50	0.01	0.00	0.00	93.00
30.	32	37.13	0.85	15.77	0.00	16.91	18.31	5.77	0.00	0.00	0.00	94.75
31.	32	34.79	0.91	16.79	0.00	17.66	17.24	5.80	0.00	0.00	0.00	93.19
32.	32	40.78	1.04	16.14	0.00	15.78	14.19	5.28	0.00	0.00	0.00	93.21
33.	32	37.86	1.06	16.95	0.00	16.35	16.70	5.02	0.00	0.00	0.00	93.93
34.	32 вкл.	14.37	0.25	13.00	0.00	52.14	6.10	8.34	0.00	0.00	0.00	94.20
35.	33 край	36.58	1.35	17.93	0.00	15.15	20.76	3.73	0.00	0.00	0.00	95.50
36.	33 вкл.	24.84	1.01	23.05	0.00	26.62	12.16	10.40	0.00	0.00	0.00	98.12
37.	33 вкл.	25.38	0.51	18.78	0.02	27.00	14.38	13.60	0.10	0.21	0.01	99.85
38.	18-16	25.92	0.02	14.50	0.02	27.32	16.59	16.81	0.19	0.21	0.01	101.58
39.	18	52.44	0.74	9.78	0.00	7.87	14.50	5.66	0.04	0.00	0.56	91.59
40.	26	55.10	0.00	4.65	0.00	11.37	1.01	27.64	0.24	0.00	0.00	100.00
41.	26-1	53.60	0.14	5.82	0.00	12.33	1.27	26.77	0.00	0.00	0.00	100.00
42.	6-1	53.87	0.00	3.03	0.00	15.98	0.87	26.20	0.13	0.00	0.00	100.09
43.	6-2	52.71	0.00	2.61	0.00	16.08	0.86	26.10	0.10	0.00	0.00	98.41
44.	6-3	54.76	0.00	0.00	0.00	11.94	0.61	31.50	0.00	0.00	0.00	98.79

Таблица 2. Окончание

Номер п/п	Номер образца	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
45.	6-4	55.87	0.00	0.82	0.00	13.42	0.87	27.80	0.00	0.00	0.00	98.82
46.	6-5	52.24	0.14	2.99	0.00	14.97	0.95	27.90	0.11	0.10	0.00	99.44
47.	6-6	52.56	0.16	2.60	0.00	14.98	0.98	27.70	0.10	0.12	0.00	99.17
48.	6-7	55.63	0.00	0.35	0.00	13.70	0.54	27.70	0.12	0.00	0.00	98.08
49.	6-8	53.95	0.15	2.07	0.00	14.44	0.81	27.80	0.11	0.11	0.00	98.97
50.	1-1	28.43	0.00	1.90	0.00	53.22	3.83	1.93	0.00	0.00	3.93	93.24
51.	1-2	30.30	0.00	2.15	0.00	53.17	3.89	2.27	0.00	0.00	3.96	95.74
52.	1-3	29.37	0.00	2.03	0.00	53.20	3.86	2.10	0.00	0.00	3.95	94.49
53.	УЗ-1	59.70	0.00	13.27	0.00	10.00	0.22	0.00	0.00	4.33	1.34	88.86
54.	УЗ-2	68.68	0.00	8.47	0.00	7.89	0.07	0.00	0.00	1.81	1.90	88.82
55.	УЗ-3	72.15	0.00	12.68	0.00	4.71	0.31	0.00	0.00	3.49	1.46	94.80
56.	УЗ-4	69.58	0.00	8.51	0.00	9.01	0.20	0.00	0.00	2.67	1.58	91.55
57.	УЗ-5	61.35	0.00	17.56	0.00	7.54	0.45	0.00	0.00	6.85	7.16	100.91
58.	Н-п1	64.28	0.69	15.70	0.00	3.43	0.00	1.03	0.08	2.39	3.25	90.85
59.	Н-п2	70.00	0.58	15.05	0.00	2.72	0.00	0.89	0.07	5.56	1.20	96.07
60.		65.05	0.56	15.94	0.00	4.39	4.42	1.91	0.07	3.70	2.75	98.79
61.		57.95	0.57	13.39	0.00	5.55	5.89	2.65	0.00	1.13	2.86	99.93

Примечание. Анализы (1–41) – Нежданинское месторождение (Якутия); (42–49) – месторождение Демократ (Аляска); (50–52) – месторождение Келлям (Якутия); (53–57) – месторождение Кокпатас (Узбекистан); 58 – вмещающие измененные алевролиты, Нежданинское месторождение, кроме того P₂O₅ 0.18–0.36, SO₃ 0.07–0.08, п.п.п. 0.27–4,16; 59 – вмещающие измененные песчаники, месторождение Нежданинское, кроме того P₂O₅ 0.33, SO₃ 0.33, п.п.п. 3.42; 60 – гранодиорит, среднее по Дэли, кроме того H₂O 1.04, P₂O₅ 0.20; 61 – осадочные породы, среднее по кларку, кроме того, H₂O 3.23; P₂O₅ 0.13; CO₂ 5.38; SO₃ 0.54, С – 0.66, ВаО 1.00.

где K – проницаемость пород, μ – вязкость флюида с характеристическим значением 1.2×10^4 Па с [8].

Приблизительные оценки проницаемости горных пород в их естественном залегании составляют 10^{-14} – 10^{-16} м²с [8], что определяет скорость фильтрации растворов в соответствии с уравнением (2) равной 0.01 м/сек. Указанная скорость медленного просачивания растворов в объеме горных пород резко увеличивается в свободном пространстве приоткрываемых тектонических трещин либо мгновенно заполняющихся трещин гидроразрыва. По расчетам У. Файфа с соавторами [9], скорость истечения воды по вертикальной открытой трещине диаметром 10 см при градиенте давления 1250 бар составляет 80000 м/сек.

По заключению авторов работы [9] полученная величина невероятно высока, хотя и указывает на то, что открытые трещины под влиянием градиента напряжения во флюиде будут заполнены раствором почти мгновенно. Для наших целей важно установленное У. Файфом с соавторами [9] резкое увеличение скорости движения гидротермального раствора при переходе от режима их медленного просачивания по капиллярам и порам

во вмещающей породе к мгновенному заполнению трещин, приоткрываемых при тектонических подвижках.

Если принять скорость потоков по трещинным зонам в периоды их раскрытия, близкую к 10 м/с, то число кавитации составит соответственно 0.25, что означает высокую вероятность возникновения кавитационных явлений. Кавитационные явления [10], т.е. разрыв сплошности жидкости с обособлением газовых пузырьков, имеют локальный и пульсационный характер. Их возникновение определяется локальным градиентом давления и облегчается наличием в растворе кавитационных зародышей: твердых частиц, микроскопических газовых пузырьков, плохо смачиваемых участков поверхности обтекаемого тела, твердых частиц с абсорбированным газом и др. Понижение давления возникает в участках расширения путей движения растворов вследствие искривления флюидоподводящих трещин, вблизи выступов их стенок и вокруг обломков вмещающих пород. Расширение и сжатие (схлопывание) газовых пузырьков внутри жидкости регулируется соотношением давления жидкости в потоке (или гидростатического

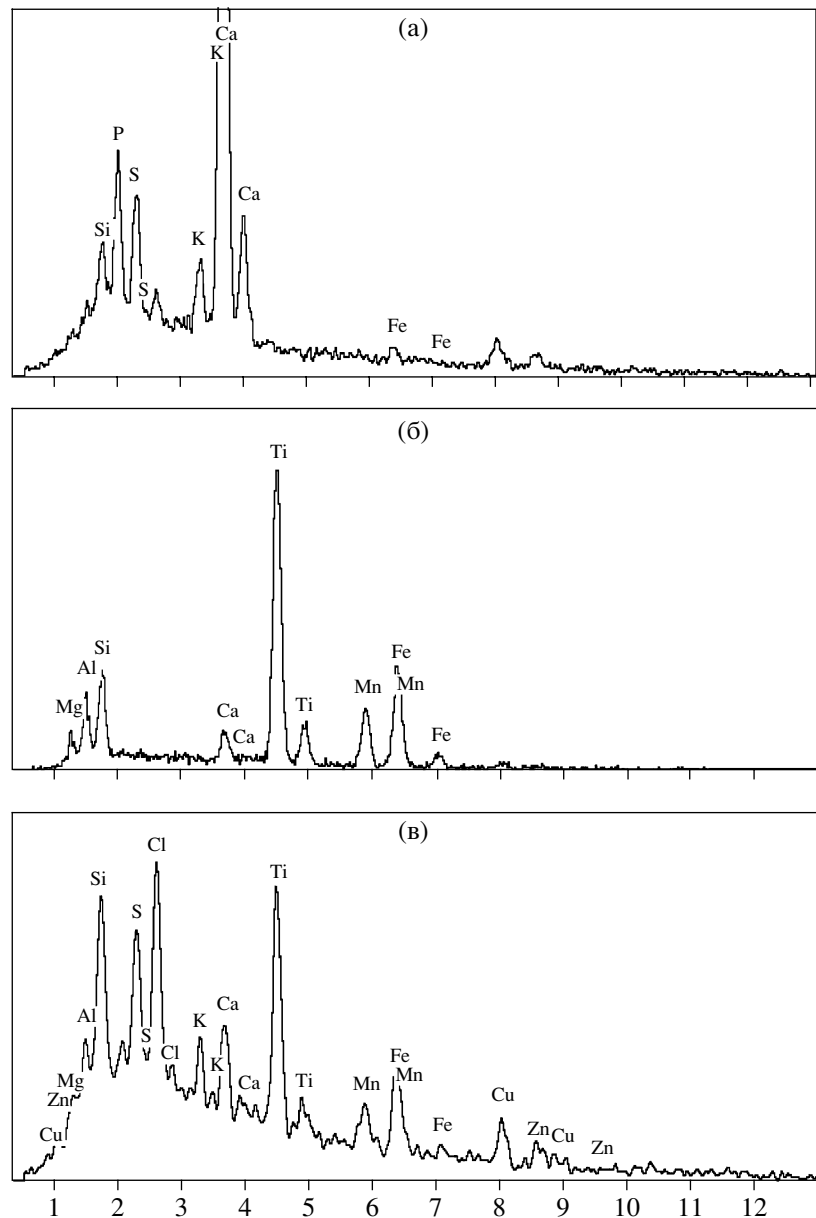


Рис. 3. Энергодисперсионные спектры состава пленок на поверхности микросферул – алюмосиликатного стекла (а, д), марганцовистого ильменита (б, в), пирита (г), антимонита (е). Месторождение Келлям.

давления) и давления насыщенного пара этой жидкости. Критическое давление может быть рассчитано из формулы [10]:

$$P_{кр} = P_n - \frac{2}{3\sqrt{3}} \left(\frac{2\sigma}{R_0} \right) \left[1 + (P_0 - P_n) \frac{R_0}{R} \right]^{-1/2}, \quad (3)$$

где P_0 – равновесное внешнее давление (1000 МПа), P_n – давление насыщенного пара воды (22.06 МПа), σ – поверхностное натяжение воды (58.89×10^{-3} н/м), R_0 – радиус расширяющегося пузырька газа, R – радиус пузырька газа после расширения ($R_0/R = 0.1$).

Решая это уравнение получим величину $P_{кр} = 22.05$ МПа, очень близкую к давлению насыщенного пара жидкости. Для упрощения расчеты выполнены для чистой воды, однако полученный результат (лишь ненамного меньшая величина $P_{кр}$ по отношению к величине давления насыщенного пара) применим к любым водно-солевым растворам, поскольку при любых значениях σ и P_n математическая величина за минусом в правой части уравнения (3) будет всегда очень мала (<1). Если предположить адиабатическое изменение

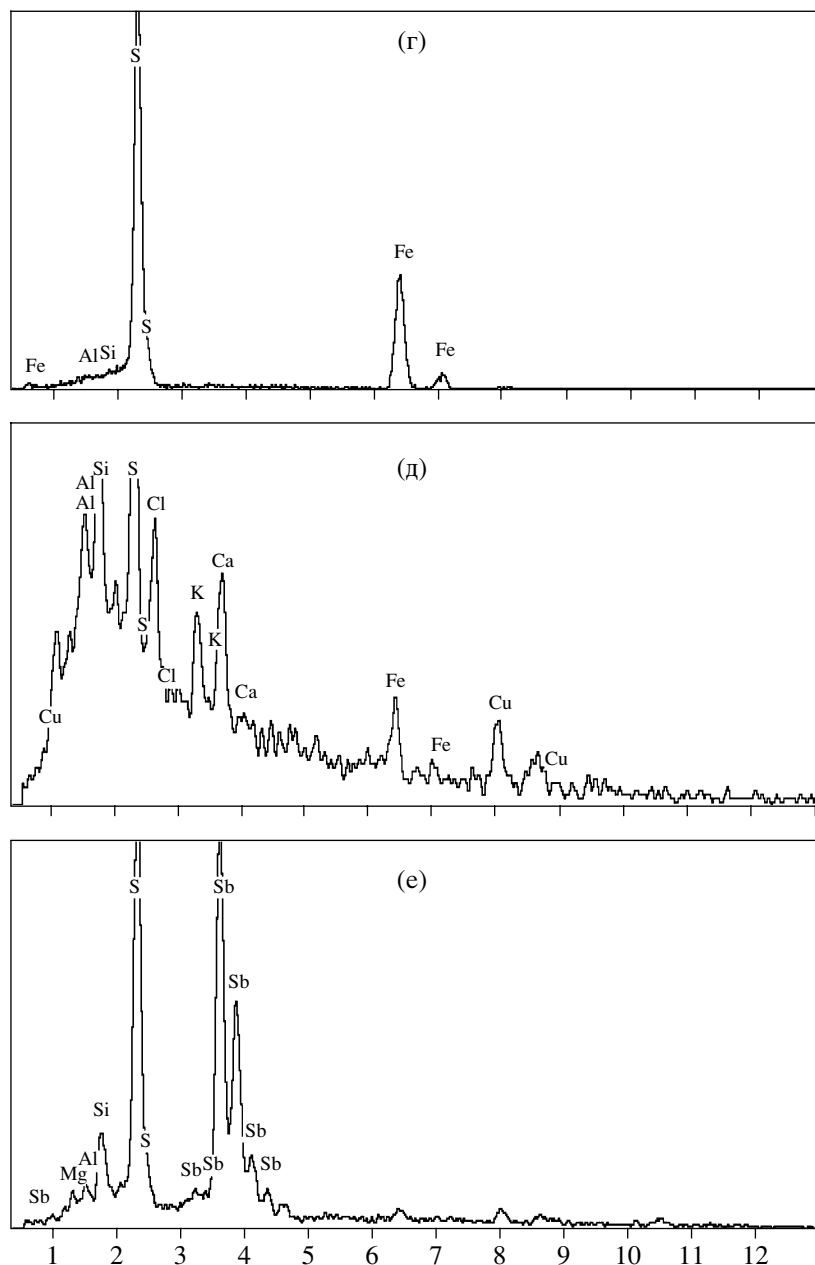


Рис. 3. Окончание.

объема газового пузырька, то, используя уравнение Пуассона:

$$PV^\gamma = P_1 V_1^\gamma, \quad (4)$$

где P – внешнее давление (1000 бар), P_1 – давление пара жидкости (22.06 МПа), V – первоначальный объем газового пузырька 1 микрон, γ – коэффициент адиабатичности, равный 1.4 для двухатомного газа, то можно рассчитать увеличение объема пузырька газа при давлении. Расчеты показывают, что в условиях адиабатичности процесса при падении давления до величины давления на-

сыщенного пара воды пузырек водяного пара будет увеличен в 17 раз.

В потоке поступающего гидротермального флюида в поле переменного давления процесс отклоняется от адиабатичности. При условии $P < P_{кр}$ пузырьки газа способны к неограниченному росту, при $P > P_{кр}$ происходит их резкое сокращение. Процесс носит пульсационный характер и сопровождается целым рядом побочных эффектов, в том числе акустической кавитацией, дополняющей, вследствие возникновения звукового давления в широком спектре частот (кавитационный

шум), барическую гетерогенность газовой-жидкой среды кавитации.

Высокие скорости сокращения кавитационного пузырька приводят к аномально высоким локальным флуктуациям температур и давлений [10]. В применении к природным процессам из этого вытекают следующие следствия.

Одно из них связано с так называемой кавитационной эрозией, брекчирующей и разрушающей стенки каналов с образованием каверн, заполненных газовыми пузырьками. Не исключено, что кавернозная поверхность стенок пустот в кварце, являющихся местами скопления шариков алюмосиликатного стекла, имеет кавитационную природу. Чисто химическое растворение кварца в ламинарном либо турбулентном потоке раствора должно выразиться в образовании сглаженных "обсосанных леденцовых" форм, а в застойных водах на поверхности кварца при его растворении обычно четко видны закономерно ориентированные ямки и каналы растворения.

Другое следствие заключается в нарушении в кавитационной области плотностной однородности жидкой водно-солевой фазы. Как показывают результаты экспериментов по гидротермальному росту кристаллов в условиях градиентов температур и давлений [11], при резком сбросе давления с взрывообразной скоростью (10^{-6} сек.) из раствора выделяются коллоидно-дисперсные микроглобулярные агрегаты твердого вещества; в качестве типичного примера приводится образование вспененного кремнезема в форме агрегата мелких пузырей [11].

Третье следствие связано с вероятностью возникновения в кавитационной области микровзрывных явлений, приводящих к диспергированию и локальному разогреву вещества. При больших скоростях сжатия газ нагревается до температуры $\sim 10^4$ К, а давление в пузырьке возрастает до нескольких сотен МПа [10]. Мощные гидродинамические возмущения в кавитационной области сопровождаются микровзрывами, частичной ионизацией газа и сильным разогревом вещества вплоть до его плавления.

Таким образом, гидротермальный раствор, проникая с высокой скоростью в область пониженных относительно гидростатического давлений, в условиях адиабатичности гетерогенизируется с выделением газовых пузырьков, высокоплотных солевых фаз с остаточной жидкой фазой. Дополнительным изменением состояния раствора является понижение температуры, которое можно рассчитать по уравнению Пуассона:

$$T^{\gamma} P^{1-\gamma} = T_1^{\gamma} P_1^{1-\gamma}, \quad (5)$$

где T – температура поступающего гидротермального раствора (300°C), T_1 – температура, возникающая в адиабатической камере, P – равно-

весное внешнее давление (1000 бар), P_1 – давление насыщенного пара жидкости (22.06 МПа), γ – коэффициент адиабаты (1.4). Расчеты показывают, что при принятых параметрах $T_1 = 195^{\circ}\text{C}$.

Газовые пузырьки скапливаются вблизи искривлений стенок флюидоподводящей трещины. При подтоке флюида условие адиабатичности нарушается, и в микрообластях скопления пузырьков вследствие явлений кавитации происходят циклические изменения объема пузырьков с их расширением и сокращением. Аномально высокие флуктуации температур и давлений, возникающие при схлопывании пузырьков, характеризуются высокими скоростями и незначительным радиусом действия. Если в пределах этого аномального микрополя находятся тонкодисперсная взвесь твердых частиц или скопления солевых фаз, то они плавятся и мгновенно закаляются в окружающем растворе с пониженной температурой.

Вероятность подобной модели подтверждается, казалось бы, парадоксальными фактами нахождения микросферул алюмосиликатного стекла (индикаторов ранее возникших капель расплавов) среди низкотемпературных минеральных агрегатов – тонкочешуйчатых диккита и гидрослюд.

Природные алюмосиликатные стекла отличаются, как было показано выше, широким разбросом и дискретностью в содержаниях химических компонентов, что свидетельствует о неуровновешенности и гетерогенности составов, возникающих при микровзрывах и плавлении высокоплотных солевых фаз. Вследствие высоких скоростей кавитационных явлений в ограниченных объемах минерализующихся трещин, эти явления не отражаются на составе газовой-жидкой включений в минералах, образованных в условиях обычного гидротермального роста.

ВЫВОДЫ

1. Микросферулы алюмосиликатного стекла характеризуются широким разбросом и дискретностью в содержаниях петрогенных элементов, обедненных относительно вмещающих золотые руды пород кремнекислотой, щелочами и обогащенными фемическими компонентами.

2. На поверхности микросферул обнаружены присыпки и вроски солей Ca, Cu, Zn, Fe с лигандами, содержащими S, Cl, P, C, а также тонкодисперсный гидрослюдистый и глинистый материал. Большинство изученных микросферул содержит многочисленные газовые вакуоли. Пленки алюмосиликатных стекол в смеси с рудами обнаружены на поверхности микросферул рудных минералов.

3. Условия локализации микросферул алюмосиликатного стекла в пустотах и трещинах ранне-го кварца однотипны для золотых руд четырех

месторождений (Нежданинское, Келлям, Демократ, Кокпатас).

4. Образование микросферул алюмосиликатных стекол связывается с локальными микровзрывными кавитационными эффектами в потоке гетерогенизирующихся гидротермальных растворов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ – грант № 00-05-64709.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданов Ю.Я., Гамянин Г.Н., Яковлев Я.В. Сферидальное золото из рудопоявления Келлям (Верхне-Индибирский район, Якутия) // В кн.: Золотое оруденение и гранитоидный магматизм Северной Пацифики. Магадан, 2000. Т. 1. С. 246–250.
2. Dilabio R.N.W., Newsame J.W., McIvor D.F., Lowenstein P.L. The spheroid form of gold: man-made or secondary? // Econ. Geol. 1988. V. 83. P. 153–162.
3. Новгородова М.И., Боярская Р.В., Юсупов Р.Г. Рост и коррозия самородного цинка в газовой среде // Зап. Всесоюз. минер. о-ва. 1986. Ч. 115. Вып. 1. С. 16–25.
4. Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я., Моисеенко В.Г. Природные и техногенные сфероиды минералов // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19. № 4. С. 52–60.
5. Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Алпатов В.А. и др. Минералого-геохимические особенности и условия образования Нежданинского месторождения золота (Саха-Якутия, Россия) // Геол. рудн. м-ний. 1998. Т. 40. № 2. С. 137–156.
6. Поспелов Г.Л. Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизмы метасоматоза. Новосибирск: Наука, 1973. 355 с.
7. Галимов Э.М. Кавитация как механизм синтеза природных алмазов // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1973. № 1. С. 22–37.
8. Пэк А.А. Гидродинамические модели гидротермальных рудообразующих систем // В кн.: Рудообразующие процессы и системы. М.: Наука, 1989. С. 68–78.
9. Файф У., Прайс Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М.: Мир, 1981. 436 с.
10. Иванов А.Н. Гидродинамика развитых кавитационных течений. Л.: Наука, 1980.
11. Труфанов В.Н., Куршев С.А., Майский Ю.Г., Ушак А.Т. Рост кристаллов при высоких перепадах температур и давления // Морфология и фазовые равновесия минералов. София: Изд-во Болг. АН, 1986. С. 119–125.