

УДК 550.4.02

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТА КОМПОНЕНТОВ СУЛЬФИДНЫХ РУД В ПРИСУТСТВИИ ФЛЮИДНОЙ ФАЗЫ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ *PT*-ПАРАМЕТРАХ

© 2022 г. Б. Б. Дамдинов^{1,*}, А. Р. Котельников², Н. И. Сук², Л. Б. Дамдинова¹,
З. А. Котельникова³, Г. М. Ахмеджанова², член-корреспондент РАН Ю. Б. Шаповалов²

Поступило 05.05.2022 г.

После доработки 04.08.2022 г.

Принято к публикации 22.08.2022 г.

В связи с проблемой возможности метаморфогенного формирования рудных месторождений, проведено экспериментальное моделирование транспорта компонентов сульфидных руд в присутствии базальтового стекла и флюидной фазы, представленной водно-солевыми системами разного состава. Эксперименты проводились при *PT*-условиях, близких к параметрам амфиболитовой фации метаморфизма: $T = 500\text{--}650^\circ\text{C}$, $P \sim 4\text{--}5$ кбар. Моделирование проводилось в два этапа, в термостатических и термоградиентных условиях. В результате экспериментов первого этапа (термостатические условия) была показана принципиальная возможность переноса и переотложения рудообразующих компонентов (Zn, Cu, Au) водно-солевыми флюидами в эндогенных условиях, а также выявлена зависимость состава минеральных ассоциаций от химизма водно-солевых систем, участвующих в процессах минералообразования. Опыты в термоградиентных условиях показали, что рудное вещество вместе с силикатным активно транспортируется в верхнюю часть ампулы. По результатам наших опытов можно сделать вывод об успешном моделировании транспорта рудного вещества водно-солевыми флюидами, причем экспериментально установлена совместная миграция силикатного и рудного вещества, в результате чего формируются сульфидно-силикатные минеральные агрегаты. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность формирования золото-сульфидно-кварцевых и полиметаллических месторождений за счет миграции при повышенных *PT*-параметрах, вещества ранее сформированных сульфидных руд.

Ключевые слова: сульфидные руды, экспериментальное моделирование, водно-солевые флюиды, метаморфогенная миграция

DOI: 10.31857/S2686739722600655

ВВЕДЕНИЕ

Механизмы формирования золото-сульфидно-кварцевых и эпигенетических полиметаллических месторождений до сих пор остаются предметом дискуссий. Это обусловлено тем, что зачастую такие месторождения не имеют видимой связи с магматизмом, что не позволяет однозначно идентифицировать происхождение рудообразующих гидротермальных растворов. В ряде слу-

чаев установлена ведущая роль океанической коры в формировании месторождений золота [1–3]. Фрагменты океанической коры (офиолиты) присутствуют в крупных шовных зонах, где часто отмечается пространственная ассоциация месторождений золота с офиолитовыми поясами. Офиолитовые блоки могут содержать фрагменты субмаринных сульфидных руд, что наблюдается, в частности, на крупнейшем в Восточном Саяне, Зун-Холбинском золоторудном месторождении [4, 5]. Такие сульфидные руды представляют собой отложения подводных гидротермальных систем — аналогов современных “черных курильщиков”, в которых накапливаются Fe, Zn, Cu, Pb, Ag и Au — то есть элементы, характерные для руд золото-сульфидно-кварцевых месторождений. Было высказано предположение, что фрагменты таких сульфидных руд, присутствующие в составе офиолитовых блоков, являются источником вещества для месторождений золота в Восточном Саяне [1, 4–6].

¹Геологический институт им. Н.Л. Добрецова
Сибирского отделения Российской академии наук,
Улан-Удэ, Россия

²Институт экспериментальной минералогии
Российской академии наук, Черноголовка, Россия

³Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: damdinov@mail.ru

Считается, что формирование орогенных золото-сульфидно-кварцевых месторождений обусловлено либо влиянием синколлизионных магматических расплавов [7], либо процессами метаморфической деволатилизации, переноса и переотложения рудного вещества в составе эндогенных флюидов [3, 8].

Другим типом рудных месторождений, формирующихся за счет флюидного переноса и переотложения рудообразующих компонентов, но не имеющих видимых связей с магматизмом, являются полиметаллические месторождения типа MVT (Mississippi Valley type). Предполагается, что Pb и Zn переносятся в составе высококонцентрированных рассолов с высоким содержанием солевых компонентов (более 30 мас. %), сформированных, предположительно, за счет захороненных эвапоритов [9, 10].

Для моделирования транспорта рудного вещества необходимо знание условий образования соответствующих месторождений. Такие работы были выполнены для ряда золото-сульфидно-кварцевых месторождений Восточного Саяна [1, 2]. Кроме того, на основе минеральной термометрии и изучения флюидных включений (ФВ) были определены *PT*-параметры метаморфизма колчеданных руд Восточного Саяна, представляющих собой реликты древних субмаринных сульфидных тел: температура 430–530°C, давление ~5 кбар [11]. Кроме того, термобарогеохимические исследования кварцевых жил во вмещающей сланцевой толще показали наличие высокотемпературных (более 500°C) включений в кварце с высокой концентрацией солей до 30 мас. % (NaCl-экв), близкой по концентрации к рассолам, формирующим полиметаллические месторождения типа MVT. Наличие высококонцентрированных рудообразующих флюидов часто отмечается и в составе плутоногенно-гидротермальных золоторудных месторождений ([12, 13] и др.).

Многочисленные экспериментальные и термодинамические исследования, по условиям переноса и отложения золота и полиметаллов в гидротермальных растворах, чаще всего ограничены температурами порядка 300–400°C, редко до 600°C и давлением до 1–2 кбар (например, [14, 15] и др.). Эти работы моделируют преимущественно область рудоотложения. Экспериментальные исследования поведения компонентов золото-полиметаллических месторождений при повышенных *PT*-параметрах, в присутствии концентрированных водно-солевых флюидов, соответствующих областям мобилизации рудообразующих компонентов, ранее не проводились.

Считается, что *PT*-параметры динамометаморфизма в области генерации рудообразующих флюидов орогенных месторождений золота (глубинных частях сдвиговых зон) могут достигать

P – до 8 кбар и *T* – до 600°C и более [16, 17]. С учетом наших данных по природным парагенезисам для проведения экспериментов были определены *PT*-параметры, отвечающие амфиболитовой фации метаморфизма: *T* = 500–650°C, *P* ~ 4–5 кбар и использовались водно-солевые растворы с высокой концентрацией солевых компонентов.

Эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе были проведены предварительные опыты в термостатических условиях, с целью выяснения принципиальной возможности переотложения рудных компонентов под воздействием повышенных *PT*-параметров и оценки влияния состава флюида на характер образующихся парагенезисов. На втором этапе исследовали транспорт вещества в термоградиентных условиях.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для опытов первого этапа использовали базальтовое стекло (восточно-тихоокеанское поднятие, обр. VTP-014) и сульфидные руды: образец 3894-9-2 – субмаринная гидротермальная сульфидная руда (гидротермальное поле Рейнбоу), в составе которой преобладает сфалерит, также присутствуют кубанит, миллерит, марказит и пирит и образец ТМ-1 – субмаринная сульфидная руда, сложенная преимущественно сфалеритом с незначительным количеством галенита (табл. 1). Состав базальтового стекла (мас. %): SiO₂ – 47.65; TiO₂ – 2.05; Al₂O₃ – 13.04; FeO – 11.26; MnO – 0.10; CaO – 10.51; MgO – 6.02; Na₂O – 2.79; K₂O – 0.05; SO₃ – 0.52; сумма 93.98. Образцы были любезно предоставлены д.г.-м.н. И.В. Викентьевым.

В опытах второго этапа также использовалось базальтовое стекло, однако, к субмаринным сульфидам добавлялись сульфиды из медно-никелевых руд Талнахского месторождения и отдельные монофракции сульфидных минералов (халькопирит, пирит). В одном случае использовалась сложная смесь сульфидов состава арсенопирит + пирит + галенит + сульфиды из медно-никелевых руд Талнахского месторождения + халькопирит + гринокит + киноварь, с добавкой оксида висмута – бисмита (табл. 2). Таким образом, в экспериментах, наряду с базальтовым стеклом, использовались смеси сульфидных минералов, имитирующие сульфидные руды сложного состава.

В качестве флюидной фазы использованы водно-солевые смеси разного состава и концентраций. В солевом составе модельных флюидов первого этапа экспериментов использовались 1М-растворы хлоридов Na, K и Fe с примесями С, S, N (см. табл. 1). На втором этапе солевой состав модельного флюида был усложнен – к хлоридным солям добавлялись карбонаты щелочных металлов, щелочи и азотистые соединения (см. табл. 2). Общая концентрация солей также была

Таблица 1. Условия и результаты опытов первого этапа

№ оп	Исходная навеска ¹⁾	Исходный флюид	K ²⁾	Фазовый состав продуктов опытов ³⁾
$T = 500^{\circ}\text{C}$; $P = 5$ кбар; $\text{grad } T = 0$; 12 сут (Au-ампулы); $\lg(f\text{O}_2) = -28.3$; $\lg(f\text{S}_2) = -4.2$				
7300	Базальт + руда + БС	40 мГ FeCl_2 + 160 мкл H_2O	1.6	Chl + Amf + Ep + Pl + Mt + Py + Pyr + + Sph + Gn + Spr + Au
7301	“	200 мкл 1М NaCl	1.5	Cpx + Amf + Ksp + Mt + Pyr + Sph + + Py + Pyr + Sph
7302	“	130 мкл 1М KCl	1.4	Bt + Cpx + Amf + Ksp + Anh + Py + + Pyr + Sph + Au
7303	“	30 мГ NaCNS + 220 мкл 0.5М NaCl	1.5	Chl + Ab + Pl + Cpx + Amf + Cal + Mt + + Py + Pyr + Sph
7304	“	20 мГ Na_2S + 200 мкл 0.5М NaCl	1.4	Cpx + Amf + Pl + Ep + Qz + Mt + Au + + Py + Pyr + Sph
7305	“	20 мГ FeCl_2 + 180 мкл 0.5М NaCl	1.6	Cpx + Amf + Pl + Ab + Mt + Brt + Au + + Py + Pyr + Sph + Gn

Примечание. ¹⁾ исходная навеска: базальт (VTP-014), руда – “черный курильщик” 3894-9-2; БС – буферная смесь ($\text{Fe} + \text{FeO} + \text{FeS} + \text{FeS}_2$); ²⁾ K – соотношение навеска/флюид; ³⁾ продукты опытов. Индексы минералов: Ab – альбит, Amf – амфибол; Cpx – пироксен, Chl – хлорит; Ep – эпидот, Ksp – калиевый полевой шпат, Mt – магнетит, Qz – кварц; Anh – ангидрит, Au – золото, Brt – барит, Gn – галенит, Py – пирит, Pyr – пирротин, Sph – сфалерит, Spr – сперилит.

Таблица 2. Условия и результаты опытов в градиентных условиях

№ оп	Исходная навеска ¹⁾	Исходный флюид	K ²⁾	Фазовый состав продуктов опытов ³⁾
$T(\text{низ}) = 680^{\circ}\text{C}$; $T(\text{верх}) = 650^{\circ}\text{C}$; $P = 5$ кбар; $\text{grad } T = 30^{\circ}\text{C}$; 14 сут (Pt-ампулы); $\lg(f\text{O}_2) = -22.3$; $\lg(f\text{S}_2) = -0.5$				
7336	Базальт + чкТМ-1 + С	100 мГ NH_4Cl + 100 мГ NaCl + + 50 мГ NaOH(тв) + 600 мкл H_2O	0.7	Cpx + Amf + Pl + Cb + Ap + + Qz + Sph
7337	“	100 мГ NH_4Cl + 100 мГ KCl + + 50 мГ KOH(тв) + 600 мкл H_2O	0.7	Cpx + Qz + Pl + Ksp + Amf + + Sph + Gn
$T(\text{низ}) = 680^{\circ}\text{C}$; $T(\text{верх}) = 650^{\circ}\text{C}$; $P = 4$ кбар; $\text{grad } T = 30^{\circ}\text{C}$; 14 сут (Pt-ампулы); $\lg(f\text{O}_2) = -22.4$				
7368	*Базальт + чк3894 + С	50 мГ NH_4Cl + 100 мГ NaCl + + 100 мГ Na_2CO_3 + 460 мкл H_2O	1.4	Ab + Cpx + Qz + Sph + PtS
7369	“	100 мГ NH_4Cl + 200 мГ KCl + + 200 мГ K_2CO_3 + 720 мкл H_2O	0.8	Ksp + Qz + Sph + Gn
$T(\text{низ}) = 620^{\circ}$; $T(\text{верх}) = 580^{\circ}\text{C}$; $P = 4.5$ кбар; $\text{grad } T = 40^{\circ}\text{C}$; 14 сут (Au-ампула); $\lg(f\text{O}_2) = -24.3$; $\lg(f\text{S}_2) = -0.55$				
7378	*Базальт + PT + Chp + + Py + С	30 мГ NH_4Cl + 40 мГ Na_2CO_3 + + 32 мГ NaCl + 220 мкл 10% NaOH	3.2	Ab + Qz + Cpx + Cb(Ba) + Ap + + Pyr + Chp + Gn + Au(Fe)
7379	“	45 мГ NH_4Cl + 60 мГ K_2CO_3 + + 45 мГ KCl + 320 мкл 2% KOH	2.9	Cpx + Qz + Amf + Ksp + Py + + Pyr + Chp + Cb(Fe) + + Au(Fe, Cu)
$T(\text{низ}) = 680^{\circ}$; $T(\text{верх}) = 640^{\circ}\text{C}$; $P = 5$ кбар; $\text{grad } T = 40^{\circ}\text{C}$; 14 сут (Au-ампула); $\lg(f\text{O}_2) = -22.3$; $\lg(f\text{S}_2) = -0.50$				
7387	*Базальт + чкТМ-1 + + смесь сульфидов ⁴⁾	120 мГ NH_4Cl + 90 мГ Na_2CO_3 + + 50 мГ NaCl + 450 мкл 5% NaOH + 20 мГ С + 20 мГ S	3.9	Ab + Qz + Cpx + Py + Pyr + + Tnt + Sph + Gn(As, Bi) + + Chp + As_2S_3 + AsS + Au(As, Hg)

Примечание. * – в этих опытах в верхней части ампулы расположен контейнер со смесью Fsp + Qz, в этот контейнер в градиентных условиях и осуществлялся перенос рудного и силикатного вещества. ¹⁾ исходная навеска: базальт (VTP-014), руда – “черный курильщик” 3894-9-2; С – графит; PT – руда Талнаха (пентландит + халькопирит + пирротин); ²⁾ K – соотношение навеска/флюид; ³⁾ продукты опытов (индексы минералов): Ab – альбит, Amf – амфибол; Ap – апатит, Cpx – пироксен, Chl – хлорит; Ep – эпидот, Ksp – калиевый полевой шпат, Mt – магнетит, Qz – кварц; Tnt – титанит (сфен), Anh – ангидрит, Au – золото, As-Py – арсенопирит, Brt – барит, Cb – карбонат, Chp – халькопирит, Gn – галенит, Py – пирит, Pyr – пирротин, Sph – сфалерит, Spr – сперилит; ⁴⁾ смесь сульфидов: As-Py + Gn + PT + Chp + CdS + HgS + $(\text{Bi}_2\text{S}_3) + (\text{Au})$.

увеличена. Значения фугитивности кислорода задавались буферной смесью Fe–FeO, фугитивности серы – смесью FeS–FeS₂.

Все опыты проводили на установках высокого газового давления (УВД) конструкции ИЭМ РАН. Точность контроля и регулирования температуры $\pm 2^\circ\text{C}$, давления ± 50 бар. Время ввода в режим составляло ~ 1 ч, закалка опыта занимала 3–5 мин. Длительность опытов составляла 14 сут. Контроль герметичности ампул проводили весовым методом.

Опыты проводили в золотых ($5 \times 0.2 \times 50$ мм или $8 \times 0.2 \times 70$ мм) и платиновых ($7 \times 0.2 \times 70$ мм) ампулах. В опыты загружали соли, исходную навеску и заливали необходимое количество раствора. Ампулу заваривали, взвешивали, помещали в реактор УВД и выдерживали в режиме опытов 14 сут.

Составы минеральных продуктов опытов изучали методом микрорентгеноспектрального анализа на электронном микроскопе “Tescan Vega” II XMU (Чехия), оснащенном энерго-дисперсионным (“INCA” x-sight) и кристалл-дифракционным (“INCA” wave) рентгеновскими спектрометрами (Англия, Оксфорд) (ИЭМ РАН, г. Черноголовка) и Leo-1430 с энерго-дисперсионным спектрометром Inca-Energy (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, аналитики Е.В. Ходырева, Е.А. Хромова). Составы растворов после опытов исследовали методом атомно-абсорбционной спектроскопии в ИЭМ РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе опытов в нижнюю часть ампулы послойно загружали порошок базальтового стекла и порошок сульфидной руды, потом добавляли водно-солевые растворы (табл. 1). Опыты проводили в изотермическом режиме ($T = 500^\circ\text{C}$, $P = 5$ кбар, длительность опытов 12 сут, кислородный буфер Fe–FeO).

Продукты опытов представляли собой ассоциацию частично раскристаллизованных силикатных и рудных минералов: амфибол + полевые шпаты (плагиоклаз, калиевый полевой шпат) + + клинопироксен + магнетит $\pm$ хлорит $\pm$ эпидот $\pm$ $\pm$ биотит $\pm$ кальцит $\pm$ барит + пирит + сфалерит + + пирротин + галенит $\pm$ сперрилит (PtAs₂) $\pm$ самородное золото (см. табл. 1).

Потенциал кислорода, соответствующий буферу Fe–FeO оценивается как $\lg(f\text{O}_2) = -28.3$; потенциал серы (исходя из присутствия пирита и пирротина в продуктах опытов) рассчитан как $\lg(f\text{S}_2) = -4.2$. Значения потенциалов кислорода и серы, рассчитанные для PT -параметров проведения экспериментов, указаны в табл. 1 и 2.

Вследствие частичной раскристаллизации и мелкой-тонкой размерности новообразованных минералов, микронзондовый и SEM-EDS количественные анализы не давали стопроцентных сумм, однако были установлены фазовые составы новообразованных минеральных ассоциаций. Анализ результатов опытов первого этапа показал, что многие новообразованные минералы содержат Cl в своем составе. В продуктах экспериментов отсутствуют минералы Cu, присутствующие в исходном сульфидном образце, что, по видимому, связано с растворением Cu в золоте ампулы. Было также установлено, что минеральный состав продуктов метаморфизма основных пород и сульфидных руд зависит от солевого состава флюидной фазы. Так, в препарате с добавлением водного раствора KCl появляется ассоциация амфибол–биотит–клинопироксен–калиевый полевой шпат; в присутствии раствора H₂O–NaCl формируется ассоциация клинопироксен–амфибол–альбит; в системе H₂O–FeCl₂ амфибол–хлорит–эпидот–плагиоклаз (андезин–лабрадор). В опыте с раствором H₂O–NaCNS–NaCl формируется агрегат клинопироксен–плагиоклаз (альбит), с относительно большим распространением рудных минералов, причем сульфиды железа представлены преимущественно пирротин (пирит присутствует в подчиненном количестве), тогда как в других случаях в продуктах экспериментов преобладает пирит. То есть наличие в опытах азотистых соединений (NaCNS) способствовало более интенсивному переносу и переотложению рудных минералов в силикатной матрице, а присутствие углерода обусловило переход пирита в пирротин. В опытах с добавлением флюида состава H₂O–Na₂S–NaCl формировался агрегат амфибол–пироксен–эпидот–плагиоклаз (андезин–лабрадор), а в присутствии раствора H₂O–FeCl₂–NaCl агрегат представлял собой смесь клинопироксена и плагиоклазов (альбит, олигоклаз, андезин) с небольшим количеством амфибола. Таким образом, в результате экспериментов первого этапа была показана принципиальная возможность переноса и переотложения рудообразующих компонентов (Zn, Cu, Au) водно-солевыми флюидами в эндогенных условиях, а также выявлена зависимость состава новообразованных минеральных ассоциаций от химизма водно-солевых систем, участвующих в процессах минералогенеза.

Второй этап экспериментальных исследований – это проведение опытов с целью более подробного изучения транспорта рудного вещества. Для этого была применена методика градиентных опытов, в которых транспорт вещества осуществляется от более нагретой нижней части ампулы в верхнюю, более холодную. Состав флюида также был скорректирован по сравнению с первым этапом. В работах Д.С. Коржинского [18] было тео-

ретически предсказано, что транспорт рудного вещества осуществляется во флюидах повышенной щелочности (“щелочная, рудонесущая стадия метасоматоза”). Для улучшения транспорта была увеличена общая соленость растворов до 35–42 мас. %, кроме того, состав флюида стал более сложным: использованы хлориды, карбонаты щелочных металлов, хлористый аммоний, исходный раствор содержал щелочи (NaOH и KOH) в концентрации 2–10 мас. %. В ряде опытов в исходную шихту, кроме материала субмаринных сульфидных руд, добавляли другие сульфидные минералы (арсенопирит, сфалерит, галенит и др., в том числе медно-никелевые руды Талнахского месторождения), имитирующие сложную смесь сульфидов. Также в опыты добавляли небольшие количества углерода (графит) и элементарной серы (по ~20 мг). Опыты проводили при температурах 580–680°C, температурный градиент составлял 30 и 40°C. Давление составляло 4–5 кбар. Условия проведения опытов и фазовый состав продуктов опытов представлены в табл. 2.

Результаты опытов второго этапа показали, что рудное вещество, вместе с силикатным, активно транспортируется в верхнюю часть ампулы. За 14 сут при указанных выше параметрах в верхнюю часть переносится приблизительно до 40% исходной шихты. Наиболее показательными являются опыты под номерами 7368 и 7369, характеризующиеся соответственно Na и K специализацией солевого состава раствора (см. табл. 2). Исходный материал опыта представлен субмаринной сульфидной рудой и базальтовым стеклом с примесью углерода (графита). Такой состав соответствует природным парагенезисам углеродистых сланцев с прослоями метавулканитов и сульфидных руд, изученных в Восточном Саяне [11]. В продуктах этих опытов встречены сростки минеральных агрегатов силикатного материала и сульфидного вещества (рис. 1). Эти сростки представляют собой агрегаты идиоморфных кристаллов сфалерита, кварца и калиевого полевого шпата, присутствующие в разных соотношениях (рис. 1 а–в). В опыте с натриевой спецификой (оп. 7368) продуктами являются агрегаты кварца, альбита, клинопироксена и сфалерита (рис. 1 г). Наличие таких агрегатов свидетельствует в пользу одновременного переноса как силикатного, так и рудного вещества. Субщелочные растворы, содержащие значительные количества солей, а также силикатного вещества, являются, как правило, солями второго (P–Q-типа) и характеризуются сложными фазовыми соотношениями, с развитыми процессами гетерогенизации в широком интервале РТХ-параметров [19]. Поэтому, скорее всего, транспортная среда была гетерофазной.

Следует отметить, что чаще всего мы наблюдали простой перенос и кристаллизацию в верхней, более холодной части ампулы того же рудного ве-

Таблица 3. Средний химический состав силикатных минералов в продуктах опытов 7368 и 7369

Минерал	Alb	Срх	Kfs
<i>№ опыта</i>	<i>7368</i>	<i>7368</i>	<i>7369</i>
Кол-во опр.	<i>n = 7</i>	<i>n = 8</i>	<i>n = 8</i>
SiO ₂	69.45	50.90	64.49
TiO ₂	0.06	3.77	
Al ₂ O ₃	19.26	1.81	17.54
FeO	0.58	18.25	0.05
MnO	0.05	0.17	
MgO	0.04	6.05	
CaO	0.07	12.27	0.11
Na ₂ O	10.23	6.71	0.25
K ₂ O	0.03		17.07
Сумма	99.78	99.92	99.50

Примечание: Alb – альбит, Срх – клинопироксен, Kfs – калиевый полевой шпат.

щества, которое было в загрузке (см. табл. 2). В то же время силикатный материал шихты (базальтовое стекло) претерпевал процесс раскристаллизации и последующего переноса с изменением состава твердых растворов. Так, в продуктах опытов чаще всего встречаются клинопироксены, представленные почти чистым диопсидом, хотя по расчетам Срх должен содержать до 30% геденбергитового минала (табл. 3). Полевые шпаты представлены в основном альбитом и калиевым полевым шпатами (в опытах с Na и K спецификой соответственно). Среди сульфидных минералов в опытах диагностированы сфалерит, галенит и сульфид платины – куперит (табл. 4). Сфалерит в продуктах опыта несколько отличается по железистости от исходного (обр. 3894-9-2) и характеризуется отсутствием примеси Cu (см. табл. 4).

Таким образом, по результатам наших опытов можно сделать вывод об успешном моделировании транспорта рудного вещества эндогенными водно-солевыми флюидами, причем экспериментально установлена *совместная миграция силикатного и рудного вещества*. Известно, что водно-солевые системы, в которых присутствуют кремнезем или силикаты, относятся к II (P–Q) типу и характеризуются рядом особенностей – аномальной растворимостью при высоких РТ-параметрах, наличием двух областей гетерогенизации [20]. В верхней высокотемпературной и высокобарической области происходит разделение на два флюида – низкоконцентрированный кислый водный флюид и высококонцентрированный щелочной рассол, причем более плотная флюидная фаза начинает накапливать кремнезем и рудные компоненты [19].

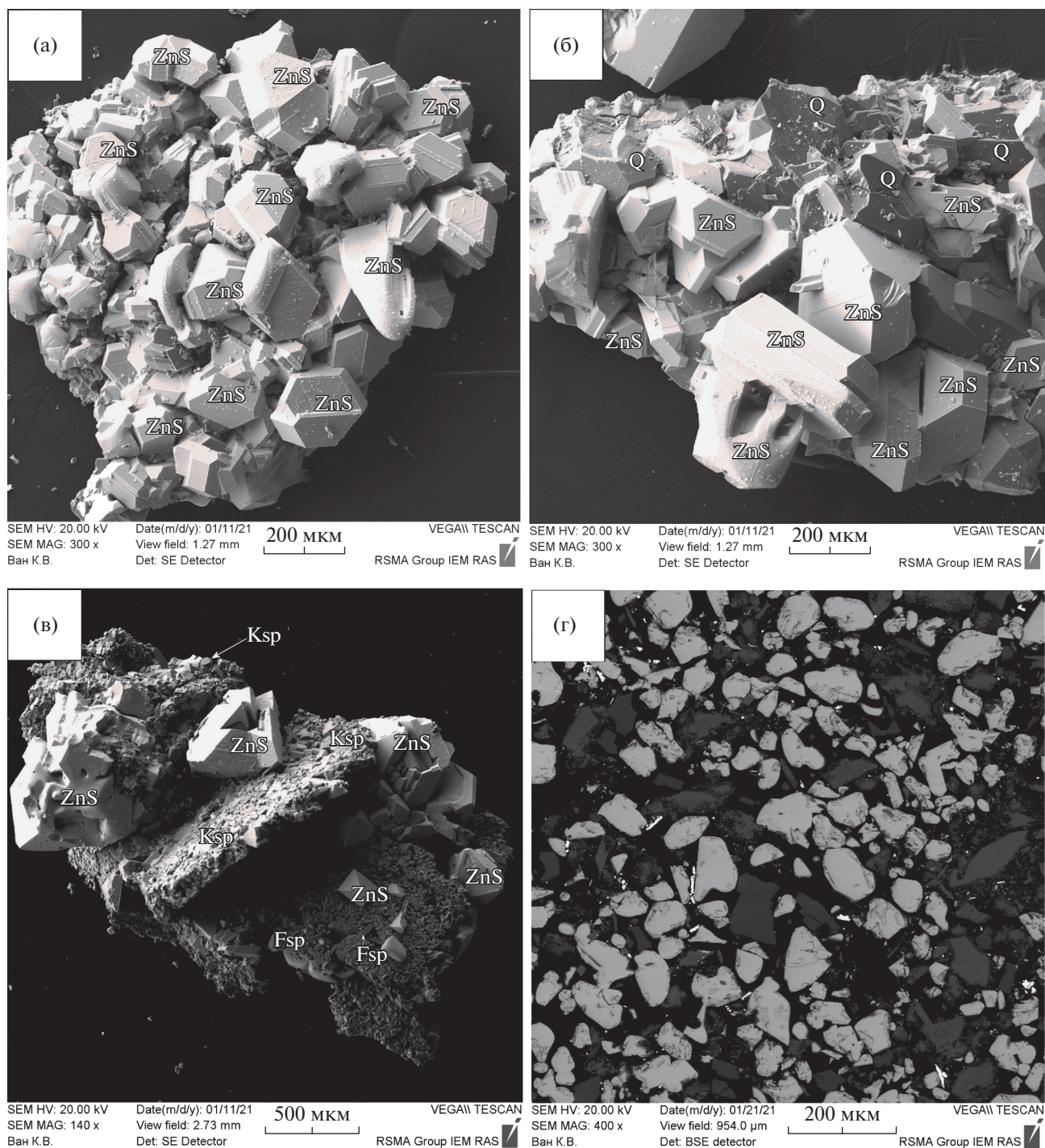


Рис. 1. Новообразованные минеральные агрегаты: а — опыт 7369, сросток кристаллов сфалерита; б — опыт 7369, кристаллический агрегат кварца и сфалерита; в — опыт 7369, сросток кристаллов калиевого полевого шпата и сфалерита; г — опыт 7368, минеральный агрегат, состоящий из сфалерита (серый), силикатов — кварц, альбит, клинопироксен (темно-серые) с примесью куперита (PtS, белый). Qz — кварц, ZnS — сфалерит, Ksp, Fsp — калиевый полевой шпат.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что рудные компоненты (Zn, Cu, Au) способны мигрировать в эндогенных условиях в составе водно-солевых флюидов, при *PT*-параметрах амфиболитовой фации метаморфизма.

2. Экспериментально установлено, что наряду с рудными компонентами, в составе водно-солевых растворов мигрирует силикатное вещество, в результате чего формируются сульфидно-силикатные минеральные агрегаты.

Таблица 4. Средний химический состав сульфидных минералов в продуктах опытов 7368 и 7369

№ п/п	Кол-во опред.	Fe	Cu	Zn	Pb	Pt	S	Сумма
<i>Опыт 7368</i>								
1	$n = 5$	2.26		66.5			31.24	100.00
2	$n = 2$	0.39		3.01		83.13	13.48	100.00
<i>Опыт 7369</i>								
3	$n = 4$	5.67		61.35			32.99	100.01
4	$n = 4$			0.69	85.18		14.14	100.00
5	$n = 2$	1.29		13.45		67.50	17.77	100.00
<i>Обр. 3894-9-2</i>								
6	$n = 6$	4.78	0.60	62.48			31.04	98.9

Примечание: 1, 3 – сфалерит; 2, 5 – куперит; 4 – галенит. Наличие примесей Zn в галените и куперите связано с захватом из вмещающего сфалерита.

3. Механизм формирования золото-сульфидно-кварцевых и полиметаллических месторождений за счет миграции и переотложения рудообразующих элементов в составе концентрированных водно-солевых флюидов нашел экспериментальное подтверждение.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Экспериментальные исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект ГИН СО РАН № АААА-А21-121011390003-9 и ИЭМ РАН FMUF-2022-0003 рег.№ 1021051201959-6-1.5.6;1.5.4;1.5.2); микрорентгеноспектральный анализ, электронно-микроскопические исследования и интерпретация результатов выполнены при поддержке РНФ, грант № 22-17-00106. В аналитических исследованиях использовалось оборудование ЦКП "Геоспектр" ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дамдинов Б.Б. Минеральные типы месторождений золота и закономерности их размещения в юго-восточной части Восточного Саяна // Геология рудных месторождений. 2019. Т. 61. № 2. С. 23–38.
2. Дамдинов Б.Б., Дамдинова Л.Б. Зун-Оспинское золоторудное месторождение (Восточный Саян): особенности геологического строения, состав руд и генезис // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60. № 3. С. 274–300.
3. Groves D.I., Santosh M., Deng J., Wang Q., Yang L., Zhang L. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration // Mineralium Deposita. 2020. V. 55. P. 275–292.
4. Damdinov B.B., Goryachev N.A., Moskvitina M.L., Damdinova L.B., Izvekova A.D., Reutsky V.N., Posokhov V.F., Artemyev D.A. Zun-Kholba Orogenic Gold Deposit, Eastern Sayan, Russia: Geology and Genesis // Minerals. 2022. <https://doi.org/10.3390/min12040395>
5. Zhmodik S.M., Dobretsov N.L., Mironov A.G., Roshchektaev P.A., Karmanov N.S., Kulikov A.A., Nemirovskaya N.A., Ochirov Yu.Ch. Mineralogical and geochemical signatures of hydrothermal-sedimentary origin of gold ore formation of the Kholba deposits, Eastern Sayan, Russia // Resource Geology. Special Issue. 1993. V. 17. P. 287–313.
6. Миронов А.Г., Жмодик С.М. Золоторудные месторождения Урик-Китойской металлогенической зоны (Восточный Саян, Россия) // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41. № 1. С. 54–69.
7. Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Бахарев А.Г. Состав и происхождение флюидов в гидротермальной системе Неждановского золоторудного месторождения (Саха-Якутия Россия) // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 2. С. 99–145.
8. Phillips G.N., Powell R. Formation of gold deposits—a metamorphic devolatilization model // Journal of Metamorphic Geology. 2010. V. 28. P. 689–718.
9. Basuki N.I., Spooner E.T.C. A review of fluid inclusion temperatures and salinities in Mississippi Valley-type Zn-Pb deposits: Identifying thresholds for metal transport // Exploration and Mining Geology. 2002. V. 11. № 1–4. P. 1–17.
10. Leach D.L., Song Yu.-C., Hou Z.-Q. The world-class Jinding Zn-Pb deposit: ore formation in an evaporite dome, Lanping Basin, Yunnan, China // Mineralium Deposita. 2017. V. 52. P. 281–296.
11. Дамдинов Б.Б., Дамдинова Л.Б., Жмодик С.М., Миронов А.Г. Состав и условия формирования золотоносных пирротиновых руд Восточного Саяна (на примере рудопроявления Ольгинское) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 5. С. 666–687.
12. Прокофьев В.Ю., Наумов В.Б., Миронова О.Ф. Физико-химические параметры и геохимические особенности флюидов докембрийских золоторудных месторождений // Геохимия. 2017. № 12. С. 1069–1087.
13. Baker T., Edert S., Rombach C., Ryan C.G. Chemical compositions of fluid inclusions in intrusion-related gold systems, Alaska and Yukon, using PIXE micro-

- analysis // *Economic Geology*. 2006. V. 101. P. 311–327.
14. Акинфиев Н.Н., Тагиров Б.Р. Цинк в гидротермальных системах: термодинамическое описание гидроксхлоридных и гидросульфидных комплексов // *Геохимия*. 2014. № 3. С. 214–232.
 15. Pokrovski G.S., Akinfiev N.N., Borisova A.Y., Zotov A.V., Kouzmanov K. Gold specialization and transport in geological fluids: insights from experiments and physical-chemical modeling / In *Gold-Transporting Hydrothermal Fluids in the Earth's Crust* (Eds. Garofalo P.S. and Ridley J.R.). 2014. Geo-logical Society Special publication. V. 402. P. 9–70.
 16. Gaboury D. Parameters for the formation of orogenic gold deposits // *Applied Earth Science*. 2019. V. 128. № 3. P. 124–133.
 17. Gongalves P., Poivlet J.-C., Olio E., Trap P., Marquer D. How does shear zone nucleate? An example from the Suretta nappe (Swiss Eastern Alps) // *Journal of Structural Geology*. 2016. V. 86. P. 166–180.
 18. Коржинский Д. С. Теория метасоматической зональности. М.: Наука. 1982. 103 с.
 19. Котельников А.Р., Сук Н.И., Котельникова З.А., Янев Й., Енчева С., Ананьев В.В. Жидкостная не-смеси́мость во флюидно-магматических системах (экспериментальные данные) // *Петрология*. 2019. Т. 27. № 2. С. 206–224.
 20. Вальяшко В.М. Фазовые равновесия и свойства гидротермальных систем. М.: Наука. 1990. 270 с.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF TRANSPORT OF COMPONENTS OF THE SULFIDE ORES IN THE PRESENCE OF A FLUID PHASE AT INCREASED *PT*-PARAMETERS

**B. B. Damdinov^{a, #}, A. R. Kotelnikov^b, N. I. Suk^b, L. B. Damdinova^a, Z. A. Kotelnikova^c,
G. M. Akhmedzhanova^b, and Corresponding Member of the RAS Y. B. Shapovalov^b**

^a*Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation*

^b*Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation*

^c*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: damdinov@mail.ru*

In connection with the problem of the possibility of metamorphogenic formation of ore deposits, an experimental modeling of transport of components of sulfide ores in the presence of basalt glass and a fluid phase, represented by water-salt systems of various compositions, was carried out. The experiments were carried out at *PT* conditions close to the parameters of the amphibolite facies of metamorphism: $T = 500\text{--}650^\circ\text{C}$, $P \sim 4\text{--}5$ kbar. The modelling was carried out in two stages, under thermostatic and thermogradient conditions. As a result of the experiments of the first stage (thermostatic conditions), the fundamental possibility of transfer and redeposition of ore-forming components (Zn, Cu, Au) by water-salt fluids under endogenous conditions was shown. Also the dependence of the composition of mineral associations on the chemistry of water-salt systems involved in the process was revealed. Experiments under thermogradient conditions have shown that the ore-forming components are actively transported to the upper part of the ampoule together with the silicate matter. Thus, according to the results of our experiments, we can conclude that the modeling of the transport of ore-forming components by water-salt fluids has been successful. Joint migration of silicate and ore material has been experimentally established, as a result of which sulfide-silicate mineral aggregates are formed. The conducted experimental studies have confirmed the possibility of the formation of gold-sulfide-quartz and base-metal deposits due to the migration of the substance of previous formed sulfide ores at elevated *PT*-parameters.

Keywords: sulfide ores, experimental modelling, water-salt fluids, metamorphogenic migration