ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РУД САМОЛАЗОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА (Центральный Алдан) И.Д. Борисенко^{1,2}, А.А. Боровиков², А.С. Борисенко^{2,1}, И.В. Гаськов^{2,1}

¹Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

Проведенные исследования флюидных включений в кварце из руд кварц-флюоритовой, пиритхалькопиритовой, пирит-молибденитовой и полисульфидной стадий Самолазовского месторождения современными методами термобарогеохимии (термо- и криометрия, рамановская спектроскопия, LA-ICP-MS анализ) позволили охарактеризовать флюидный режим процессов рудообразования данного месторождения. Определены состав газов, растворов включений и основные твердые фазы в их составе (преимущественно представленные сульфатами, карбонатами и хлоридами различных металлов). Установлены температуры гомогенизации включений, а также температуры эвтектики их растворов. Полученные результаты позволили оценить температуры флюидов во время образования руд каждой стадии, а также определить концентрации основных солевых компонентов. Необходимо отметить, что для выполнения этой работы на основе данных по растворимости из справочника В.Б. Когана была составлена диаграмма состояния системы Na₂SO₄-NaHCO₃-H₂O для температур <40 °C и концентрации Na₂SO₄ в растворе <35 мас. %, ранее не представленная в литературных источниках. При помощи LA-ICP-MS метода была определена металлоносность и геохимическая специфика каждой стадии рудообразования. Растворы кварц-флюоритовой стадии характеризуются повышенными содержаниями B, V, Co, Ni, Zn, As, Te, Cs, Ba, Mg, растворы пирит-молибденитовой стадии обогащены Тi, Ni, Nb, Mo, полисульфидной — Са, As, Pb, Sb, Te, Ag, Rb, Ba, Sr. Кроме того, в составе включений была обнаружена самородная сера, что вкупе с присутствием сульфатной и сульфидной серы в составах растворов, газов и твердых фаз подтолкнуло авторов к изучению изотопного состава серы. В ходе работ было установлено, что сера Самолазовского рудного поля характеризуется облегченным изотопным составом ($\delta^{34}S = -2.5...$ -13.4 %). Для объяснения формирования сульфидной серы в рудах месторождения авторами был предложен механизм образования сульфидной серы из флюида за счет высокотемпературной сульфат-редукции (>500—700 °С).

Термобарогеохимия, щелочной магматизм, окисленные флюиды, LA-ICP-MS, флюидные включения, металлоносность растворов.

PHYSICOCHEMICAL CONDITIONS OF ORE FORMATION IN THE SAMOLAZOVSKOE GOLD DEPOSIT (*Central Aldan*)

I.D. Borisenko, A.A. Borovikov, A.S. Borisenko, and I.V. Gas'kov

Using modern thermobarogeochemical methods (thermo- and cryometry, Raman spectroscopy, and LA-ICP-MS), we studied fluid inclusions in quartz from ores formed at the quartz-fluorite, pyrite-chalcopyrite, pyrite-molybdenite, and polysulfide stages of evolution of the Samolazovskoe gold deposit. We have established the fluid regime of the ore formation processes, the gas and liquid composition, main solid phases (metal sulfates, carbonates, and chlorides), homogenization temperatures of the inclusions, and the eutectic temperatures of their solutions. The obtained data helped to estimate the fluid temperatures during the formation of ores at each stage and to determine the contents of major salt components. Based on the substance solubility values given in the reference-book by V.B. Kogan, we have first constructed a phase diagram of the system Na₂SO₄- $NaHCO_3 - H_2O$ ($Na_2SO_4 < 35$ wt. %) at temperatures below 40 °C. The metal contents and geochemical specification of the second s ics of solutions at each stage of the ore formation were determined by LA-ICP-MS. At the quartz-fluorite stage, the solutions were enriched in B, V, Co, Ni, Zn, As, Te, Cs, Ba, and Mg; at the pyrite-molybdenite stage, they had high concentrations of Ti, Ni, Nb, and Mo; and at the polysulfide stage, the solutions were rich in Ca, As, Pb, Sb, Te, Ag, Rb, Ba, and Sr. Native sulfur found along with sulfate and sulfide sulfur in the inclusions impelled us to study the sulfur isotope composition. The research has shown a light sulfur isotope composition ($\delta^{34}S$ = -2.5 to -13.4 %). We believe that sulfide sulfur in the Samolazovskoe deposit formed from a fluid during hightemperature (>500-700 °C) sulfate reduction.

Thermobarogeochemistry, alkaline magmatism, oxidized fluids, LA–ICP-MS, fluid inclusions, metal contents in solutions

© И.Д. Борисенко⊠, А.А. Боровиков, А.С. Борисенко, И.В. Гаськов, 2017 ⊠e-mail: iborisenko94@gmail.com

DOI: 10.15372/GiG20171205

введение

Одним из крупных золоторудных районов России является Центрально-Алданский, в котором выявлены и эксплуатируются крупные коренные и россыпные месторождения золота: Куранахское (>400 т Au), Рябиновое (>100 т Au), Лебединое (>100 т Au), Самолазовское и др. Своеобразие металлогении Центрально-Алданского рудного района определяется широким развитием золотого, медно-молибденового, уранового, платинового, флюоритового типов оруденения, ассоциирующего со щелочным магматизмом алданского комплекса мезозойского возраста (рис. 1). Этот район рассматривается как один из типовых примеров крупной высокопродуктивной рудно-магматической системы, связанной с конкретным локальным ареалом дифференцированного щелочного магматизма [Кочетков, 2006]. Особенности геологического строения, магматизм и оруденение Центрального Алдана детально рассмотрены во многих публикациях [Максимов, 1991, 2003; Бойцов и др., 2002; Ветлужских и др., 2002; Кочетков, 2006; Максимов и др., 2010; и др.]. В нем среди докембрийских метаморфических пород и перекрывающих их венд-кембрийских карбонатных и терригенных юрских отложений проявлен крупный ареал мезозойского щелочного магматизма площадью около 12.5 тыс. км².

Методами термобарогеохимии изучены физико-химические условия формирования руд Самолазовского месторождения золота, расположенного в Центрально-Алданском рудном (Au-U) районе Южной Якутии. Данное месторождение приурочено к Юхтинскому щелочному массиву позднемезозойского возраста (K₁). Юхтинский щелочной массив сложен щелочными и известково-щелочными сиенитами, нордмаркитами, сиенит- и граносиенит-порфирами, дайками керсантитов и штоками щелочных базитов (рис. 2). Наиболее поздними магматическими образованиями являются эксплозивные брекчии с сиенитпорфировым цементом (127 млн лет, U-Pb метод). Оруденение характеризуется двумя разновозрастными этапами рудообразования: 1) ранний – слабозолотоносный скарновый с пирит-халькопиритовыми (± карролит) рудами (130—135 млн лет) и 2) основной продуктивный Au-Mo-полиметаллический (<127 млн лет), проявившийся после эксплозивных брекчий. В рудном этапе выделены четыре стадии проявления прожилково-вкрапленной минерализации: 1) ранняя кварц-флюоритовая (Q+Fl), 2) пиритхалькопиритовая (Py-Chp), 3) пирит-молибденитовая (Py-Mo) и 4) золото-полисульфидная (Au-Pb-Zn) (пирит, блеклые руды, галенит, сфалерит, халькопирит, борнит, сульванит, ванадинит, роскоэлит, Hg-



Рис. 1. Геологическая схема расположения Центрально-Алданского рудного района в ареале развития алданского щелочного комплекса (по А.С. Борисенко, Г.С. Федосееву).

1— Сибирская платформа, 2— Байкало-Патомский пояс, 3— Становая область, 4— Монголо-Охотский пояс, 5— Монголо-Китайский коллаж терейнов, 6— разломы, 7— водоемы, 8— государственные границы. Красным выделен Центрально-Алданский рудный район, черным — локальные ареалы позднемезозойского щелочного магматизма.



Рис. 2. Геологическая карта и разрез Самолазовского рудного поля в восточной части Юхтинского щелочного массива (по данным геологической службы ООО «Селигдар»).

 $I - Q_4$ аллювий (*a*), Q_3 аллювий террас (*б*); 2 -дайки сиенит-порфиров (*a*), эксплозивные брекчии (*б*); $3 - K_1$ дайки-силлы, штоки керсантитов; $4 - K_1$ штоки, лакколиты нордмаркитов, граносиенитов (комплекс сиенит-порфиров); $5 - K_1$ штоки, лакколиты лейкосиенитов (лебединский монцонит-сиенитовый комплекс); $6 - J_3 - K_1$ силлы, штоки сиенитов; $7 - J_1$ песчаники, гравелиты, конгломераты; $8 - \epsilon_1$ битуминозные доломиты, мергели; 9 -мраморы (*a*), мраморизованные доломиты (*б*); 10 -скарны; 11 -зоны сульфидизированных пород; 12 -месторождения и рудопроявления золота; 13 -россыпи; 14 -разломы.

золото, серебро и др.) [Борисенко, 2016]. Урановая минерализация представлена уранинитом, коффинитом с кварцем, карбонатами и флюоритом.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения флюидных включений использовались традиционные и новые инструментальные методы термобарогеохимии. Температуры гомогенизации включений, солевой состав растворов и их концентрация, а также плотность CO₂ в газовой фазе включений определялись методом термо- и крио-

метрии на микротермокамере THMSG-600 фирмы «Linkam» с лиапазоном измерений –196...+600 °С. Для определения температур эвтектики минералообразующих растворов во включениях, температур растворения кристаллогидратных фаз, температур гомогенизации газового пузыря, а также температур общей гомогенизации, включения сначала охлаждали до температуры –100 °C, в ходе этого охлаждения раствор во включении замерзал в виде мелкозернистого агрегата льда и кристаллогидратов. После этого включение постепенно, с шагом ~15 °C/мин, нагревали до того момента, пока лед не начинал плавиться. В начале плавления льда темп нагрева снижали до 3—5 °С/мин и, когда в камере включения оставались последние кристаллы льда, включение снова медленно охлаждали для того, чтобы вода намерзала на уже существующие кристаллы льда. Эту операцию повторяли три раза, чтобы выкристаллизовать максимальное количество воды в виде одного-двух кристаллов льда, в свою очередь, остаточный раствор раскристаллизовывался, образуя тонкозернистый агрегат. Затем включение постепенно нагревали, и температура, при которой лавинообразно таял мелкозернистый агрегат, образованный раствором, вместе с кристаллами льда, фиксировалась как температура протаивания эвтектики (T, °C эвтектики). Нагрев включения продолжался, и после исчезновения кристаллов льда во включении могло оставаться небольшое количество твердых фаз (предположительно кристаллогидратов), которые также растворялись при соответствующей температуре (T, °C растворения кристаллогидратов). При дальнейшем нагреве включения фиксировались температуры растворения газового пузыря (T, °C растворения газа) и растворения твердых солевых фаз (T, °C растворения твердых фаз).

Расчет концентраций Na₂SO₄ и NaHCO₃ во флюидных включениях производили по водно-солевой системе Na₂SO₄—NaHCO₃—H₂O и, соответственно, на ее основе интерпретировали результаты криометрического анализа сульфатно-бикарбонатно-натриевых растворов двухфазных (Ж+Г) включений. Для этого авторами по данным «Справочника по растворимости» [Коган, 1963] составлена диаграмма состояния такой системы для температур <40 °C и концентрации Na₂SO₄ в растворе <35 мас. %. Результаты криометрического анализа корректировались с учетом данных LA-ICP-MS анализа включений.

Для определения состава и металлоносности рудообразующих флюидов золотого оруденения Самолазовского рудного поля были проведены исследования включений методом LA-ICP-MS в ИГХ СО РАН на приборе XSERIES2 ICP-MS компании ThermoScientific, совмещенном с устройством лазерного пробоотбора NewWaveResearch, Nd:YAG (твердотельный лазер) (г. Иркутск). Для изучения были отобраны полированные пластинки кварца кварц-флюоритовой, пирит-молибденитовой и полисульфидной стадий рудообразования. Суть метода заключается в том, что материал отобранных включений в пластинках сжигается сфокусированным лучом лазера и как следствие ионизируется, а затем в инертной среде (в газообразном аргоне) подается в масс-спектрометр. В качестве внешнего стандарта для калибровки прибора использовались сертифицированные стандартные образцы государственного Института стандартов и технологии (США) - стекла NIST 612 с эталонными концентрациями элементов. В качестве внутреннего стандарта для расчета концентраций использовался Na, концентрации которого были рассчитаны при помощи криометрических исследований и тройной диаграммы Na₂SO₄—NaHCO₃— Н.О. По установленным при помощи термо- и криометрических анализов концентрациям Na рассчитывались концентрации других рудных и петрогенных элементов во включениях по результатам LA-ICP-MS анализа. Ошибка определения концентраций элементов по такой методике, по нашей оценке, варьировала от 10-15 до 30 %.

Методом рамановской спектроскопии определялся состав газовой фазы флюидных включений, присутствие в растворах включений ионов HCO_3^- , HS^- и SO_4^{2-} и диагностировались твердые фазы включений (спектрометр Ramanor U-1000 и детектор Horiba DU420E-OE-323 фирмы Jobin Yvon; лазер Millennia Pro, 532 nm, мощность 2 Вт, фирмы Spectra-Physics).

ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения термобарогеохимических исследований были отобраны наиболее представительные образцы с кварцем из каждой стадии и изготовлено 25 двусторонних полированных пластинок: 6 из кварца кварц-флюоритовой стадии, 4 из кварца пирит-халькопиритовой стадии, 5 из кварца молибденитовой стадии, 10 из кварца полисульфидной стадии.

В кварцах из кварц-флюоритовой, пирит-халькопиритовой, молибденитовой и полисульфидной стадий были изучены первичные и первично-вторичные флюидные включения. Необходимо отметить, что на данном этапе особое внимание было уделено подбору первичных включений, по общепринятым критериям первичности—вторичности [Реддер, 1987]. Для крио- и термометрических исследований, по возможности, выбирались более уплощенные включения, поскольку во включениях с такой формой вакуоли значительно лучше различимы фазовые переходы, для всех остальных исследований подбирались относительно изометричные включения. По фазовому составу выделяются три типа флюидных включений: двухфазные (Ж+Г), трехфазные (Ж+Ж_{сод}+Г) и многофазные (Ж+Г+ (от 1 до 5 тв. фаз)). Включения в кварцах разных стадий отличаются по фазовому составу.



Рис. 3. Типичные первичные двухфазные включения в кварце кварц-флюоритовой стадии.



Рис. 4. Типичные многофазные включения в кварце кварц-флюоритовой стадии.

Кварц-флюоритовая стадия характеризуется первичными двухфазными (рис. 3) и многофазными включениями с большим количеством твердых фаз (рис. 4). Кроме того, в кварце данной стадии присутствует значительное количество вторичных включений, приуроченных к залеченным трещинам (рис. 5).

В кварце *пирит-халькопиритовой стадии* также находятся двухфазные и многофазные включения. В последних наряду с растворимыми твердыми фазами (галит и др.) есть и нерастворимые ксеногенные фазы, в том числе халькопирит (рис. 6). Ксеногенность данных частиц подтверждается двумя фактами: во-первых, они не растворяются при нагревании, вплоть до декрипитации включения, вовторых, во включениях разного объема вакуоли частицы обладают одним и тем же размером. Необходимо отметить, что подобные включения были обнаружены А.А. Боровиковым при изучении включений в кварце с месторождения Рябиновое, также расположенного в Центрально-Алданском рудном районе в Рябиновском массиве к северу от Юхтинского массива.

Кварц из *пирит-молибденитовой стадии* характеризуется преимущественно мелкими двухфазными включениями (рис. 7), также присутствуют многофазные включения с растворимыми (галит) и нерастворимыми твердыми фазами (рис. 8).



Рис. 5. Типичные вторичные включения, приуроченные к залеченным трещинам в кварце, кварц-флюоритовая стадия.



Рис. 6. Включения пирит-халькопиритовой стадии с ксеногенным халькопиритом.



Рис. 7. Двухфазные включения в кварце пирит-молибденитовой стадии.



Рис. 8. Типичные многофазные включения в кварце пирит-молибденитовой стадии.

Кварц из *полисульфидной стадии* содержит преимущественно двухфазные включения, многофазные включения встречаются редко и, как правило, являются вторичными (рис. 9).

После отбора наиболее представительных включений нам было необходимо определить химические составы их растворов, газов и твердых фаз, для этого был проведен анализ на Raman-спектрометре в ИГМ СО РАН. В составе растворов включений всех стадий были обнаружены: SO_4^{2-} , HSO_4^{-} , HCO_3^{-} , HS^{-} . В составе газовой фазы включений кварц-флюоритовой и пирит-молибденитовой стадий обнаружены: $CO_2 - 91.4 - 100$ мол. % (резко преобладает), $N_2 - 0 - 8.6$ мол. %, $H_2S - 0 - 0.1$ мол. %.

Рис. 9. Типичные двухфазные включения в кварце полисульфидной стадии.





Рис. 11. КР-спектры твердых фаз сингенита и самородной серы в многофазных включениях кварц-флюоритовой стадии.

№ п/п	<i>T</i> , °C эвтектики	<i>T</i> , °C растворения кристаллогилратов	<i>T</i> , °C гомогенизации газа	<i>T</i> , °C общей гомогенизации включения					
Кварц-флюоритовая стадия									
1	-5	11	315	350					
2	-7	13	310	326					
3	-8	15	311	330					
4	-6	16	313	332					
5	-5	13	312	338					
6	-5	12	315	336					
7	-7	13	311	340					
8	-5	13	315	337					
9	-5	12	312	346					
Пирит-молибденитовая стадия									
1	-8	15		210					
2	-6	13		216					
3	-4	11		220					
4	-11	13		226					
5	-5	12		208					
6	-5	12		215					
7	-6	10		206					
8	-6	13		218					
9	-7	14		216					
10	-6	13		216					
Полисульфидная стадия									
1	-5	12		324					
2	-10	13		325					
3	-6	15		323					
4	-7	10		320					
5	-8	12		303					
6	-6	12		311					
7	-6	13		322					
8	-11	10		319					
9	-8	10		326					
10	-5	13		317					

Таблица 1. Результаты термо- и криометрических исследований флюидных включений в кварце кварц-флюоритовой, пирит-молибденитовой и полисульфидной стадии

Примечание. Полужирным шрифтом отмечены максимальные температуры, курсивом — минимальные.

Твердые фазы во включениях кварц-флюоритовой, пирит-халькопиритовой и пирит-молибденитовой стадий представляют собой: гексагидрит (MgSO₄·6H₂O), цианохроит (K₂Cu(SO₄)₂·6H₂O) (рис. 10), тенардит (Na₂SO₄), нахколит (NaHCO₃), галит (NaCl), барит (BaSO₄), целестин (SrSO₄), гипс (CaSO₄·2H₂O), ангидрит (CaSO₄), сингенит (K₂Ca(SO₄)·2H₂O), кроме того, во включениях была обнаружена самородная сера (S⁰) (рис. 11). Полученные данные показывают, что минералообразующие растворы включений являются существенно карбонатно-сульфатными по составу. Весьма нетривиальным является тот факт, что сера во включениях представлена спектром степеней окисления от +6 в SO₄^{2–} через 0 в S⁰ до –2 в H₂S, что говорит о сложной физико-химической динамике минералообразующих растворов.

В ходе проведенных термо- и криометрических исследований включений в кварце из кварцфлюоритовой, пирит-молибденитовой и полисульфидной стадий было установлено, что:

 температуры эвтектики включений кварц-флюоритовой стадии варьировали от -8 до -5 °C, температуры гомогенизации — от 326 до 380 °C, средняя температура эвтектики составила -5.8 °C, средняя температура гомогенизации 341 °C;

– температуры эвтектики включений пирит-молибденитовой стадии варьировали от –4 до –11 °C, температуры гомогенизации — от 206 до 220 °C, средняя температура эвтектики составила –6.4 °C, средняя температура гомогенизации 215 °C;



Рис. 12. Температуры эвтектики и гомогенизации включений в кварце кварц-флюоритовой стадии (1), пирит-молибденитовой (2) и полисульфидной (3) стадий.

– температуры эвтектики включений полисульфидной стадии варьировали от –5 до –11 °C, температуры гомогенизации — от 303 до 326 °C, средняя температура эвтектики составила –6.4 °C, средняя температура гомогенизации 215 °C (табл. 1, рис. 12).

Поскольку в растворах всех типов включений, по данным КР спектроскопии, доминируют ионы SO₄²⁻ и HCO₃, а преобладающими растворимыми солевыми фазами являются Na₂SO₄ или Na₂SO₄·10H₂O и NaHCO₃, можно рассматривать такие растворы в приближении к водно-солевой системе Na₂SO₄—NaHCO₃—H₂O и, соответственно, на ее основе интерпретировать результаты криометрического анализа



Рис. 13. Диаграмма трехкомпонентной системы Na₂SO₄—NaHCO₃—H₂O.

Рис. 14. Изотопный состав серы месторождений Центрально-Алданского района.

сульфатно-бикарбонатно-натриевых растворов двухфазных (T+Г) включений. Для этого нами по данным «Справочника по растворимости» [Коган, 1963] была составлена диаграмма состояния такой системы для температур <40 °C и концентрации Na_2SO_4 в растворе <35 мас. %. (рис. 13). На основе данных термо- и криометрии (средняя температура эвтектики: -6 °C и температуры растворения кристаллогидрата Na₂SO₄·10H₂O: 2—13 °C) и используя построенную диаграмму, были рассчитаны концентрации основных солевых компонентов для растворов включений в кварце из кварц-флюоритовой и полисульфидной стадий: Na₂SO₄ — от 3.0 до 8.3 мас. %, NaHCO₃ — от 5.5 до 6.0 мас. %. Их общая концентрация варьирует в диапазоне от 9.0 до 13.8 мас. %. Включения, содержащие твердые фазы с температурами гомогенизации 240—380 °C, имеют повышенное содержание солевых компонентов. Их концентрации могут доходить до 50 мас. % и более.

В ходе исследования включений методом LA-ICP-MS было проанализировано 20 включений (7 из кварц-флюоритовой стадии, 7 из пирит-молибденитовой стадии и 6 из различных ассоциаций полисульфидной стадии). В табл. 2 приведены средние значения содержаний элементов для каждой стадии. Из полученных данных видно, что состав и концентрации элементов во включениях сильно различаются по стадиям. Растворы кварц-флюоритовой стадии харак-



теризуются повышенными содержаниями B, V, Co, Ni, Zn, As, Te, Cs, Ba, Mg и явно имеют фемический геохимический профиль. Растворы пирит-молибденитовой стадии обогащены Ti, Ni, Zn, Nb, Mo. Растворы полисульфидной стадии богаты Ca, As, Sb, Te, Ag, Rb, Ba, Sr. Важным является тот факт, что



е, Ag, Rb, Ba, Sr. Важным является тот факт, что данная геохимическая специфика находит прямое отражение в минеральном составе каждой стадии. Кроме того, повышенные содержания V и Ti согласуются с данными A.A. Боровикова по Мурунскому массиву [Borovikov et al., 2015]. В целом данные термобарогеохимических исследований позволяют существенно дополнить результаты изучения флюидных включений, полученные по Самолазовскому месторождению А.H. Красновым [Краснов, Дорожкина, 2005; Краснов и др., 2007].

Для того, чтобы установить условия формирования сульфидной серы на данном месторождении, было проведено изучение изотопного состава серы сульфидов руд Самолазовского и Гарбузовского месторождений (Юхтинский щелочной массив), серы флюидных включений сульфатно-карбонатного состава в кварце и флюорите руд Самолазовского и Рябинового месторождений, а также хромдиопсидов Инаглинского массива и кварце из пегматитов Рябиновского

Рис. 15. График фракционирования изотопов серы в системе: растворенный сульфат—растворенный сульфид [Соботович, 1982].

Таблица 2. Результаты LA-ICP-MS флюидных включений в кварце
кварц-флюоритовой, пирит-молибденитовой и трех различных
ассоциаций полисульфидной стадии рудообразования
Самолазовского рудного поля (концентрации элементов в г/т)

	Стадии минералообразования						
Элемент	Кварц-флюори- товая	Пирит-молиб- денитовая	Полисульфидная				
В	36500	_	240	320	200		
Na	56000	58000	170000	28000	56000		
Mg	4900	20	270	180	170		
Κ	19000	11000	13000	7550	5100		
Ca			3000	270	9700		
Ti		5900	160	140	30		
V	210	30	40	90	70		
Mn	4000		4500	170	80		
Fe	550	_	1300	180	130		
Co	260	80	2		10		
Ni	6400	1600	70	60	30		
Cu	490	30	60	16	5		
Zn	7200	410	40	70	5		
As	370		70	260	210		
Rb	210	40	2300	1300	670		
Sr	670		3900	250	270		
Y			25	2600	7		
Nb		130	_	30			
Mo	3	300	10	100	25		
Ag			_	60	2		
Sb			40	30	70		
Te	2600		242	50	270		
Cs	200		210	80	60		
Ba	750	40	2900	60	30		
W	—	30	220	40	30		
U	—		20	15	20		

массива. Установлено, что изотопные составы серы из рассол-расплавных включений в хромдиопсидах Инаглинского (δ^{34} S — 1.5 и 2.2 ‰) и кварце пегматитов Рябиновского (б³⁴S — 1.8 и 2.8 ‰) массивов близки между собой и характеризуют изотопный состав серы магматогенных флюидов щелочных интрузий Алдана. Близкий к ним состав серы имеют лишь сульфиды руд Лебединого месторождения. Сера сульфидов руд Рябинового ($\delta^{34}S = -5.7...$ -12.8 ‰) [Кочетков, 2006] и Самолазовского рудных полей ($\delta^{34}S = -2.5...$ -13.4 ‰) (данные авторов, рис. 14) характеризуется облегченным изотопным составом. Поскольку в ходе раман-спектроскопических исследований было установлено, что в растворах включений преобладает сульфат, нами было сделано предположение о том, что сульфидная сера могла формироваться за счет процесса сульфат-редукции. Для того, чтобы оценить температуру этого процесса, мы воспользовались графиком сульфат-редукции для системы растворенный сульфид-растворенный сульфат, на оси абсцисс откладывается разница изотопного состава сульфатной и сульфидной серы, в нашем случае разница средних значений составляет 10 ‰, что, примерно, соответствует температуре 700 °С по оси ординат, разница крайних значений составляет 16 ‰,

что, в свою очередь, соответствует температуре 450 °C, таким образом, полученные данные свидетельствуют о высокотемпературной сульфат-редукции серы (>450—700 °C) при соотношении SO_4 >> H_2S во флюиде (рис. 15).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным термобарогеохимических исследований установлено, что рудообразующие флюиды Самолазовского месторождения характеризуются хлоридно-карбонатно-сульфатным составом и переменными концентрациями основных солевых компонентов. Выделяются два основных типа флюидов, отличающихся по концентрации: 1) высококонцентрированные растворы (до 50—60 и более мас. %) и 2) умеренно- и низкоконцентрированные (9—14 мас. %). Температуры рудообразования по стадиям составляли: кварц-флюоритовая: 380—325 °C, пирит-молибденитовая: 220—200 °C, полисульфидная: 325—305 °C. Повышение температуры в полисульфидной стадии, возможно, свидетельствует о том, что флюиды данной стадии были внедрены под действием нового импульса флюидоотделения, вызванного, вероятно, локальной тектонической активностью в данном регионе.

Установлено, что растворы кварц-флюоритовой стадии характеризуются повышенными содержаниями B, V, Co, Ni, Zn, As, Te, Cs, Ba, Mg, растворы пирит-молибденитовой — обогащены Ti, Ni, Nb, Mo, растворы полисульфидной стадии богаты Ca, As, Pb, Sb, Te, Ag, Rb, Ba, Sr, что напрямую отражается в составе минеральных парагенизов этих стадий рудообразования. Геохимическая специфика, а именно повышенные содержания V, Co, Ni, Ba, Mg, Ni во флюиде, указывает на ультраосновной характер расплава, продуцировавшего определенный тип флюида. Исходя из геологических данных, можно сделать предположение, что наблюдаемые флюиды могли образоваться двумя способами: 1) отделение от расплава во время формирования комплекса лампрофиров, 2) отделение от расплава во время формирования комплексов сиенит-порфиров и дальнейшая проработка докембрийских вмещающих пород.

Предложен вероятный механизм образования сульфидной серы из флюида за счет высокотемпературной сульфат-редукции (>500—700 °C).

Коллектив авторов выражает искреннюю благодарность своим коллегам по ИГМ СО РАН: д.г.м.н: А.Г. Дорошкевич, Ю.А. Калинину, А.А. Томиленко, к.г.-м.н: И.Р. Прокопьеву, Е.А. Наумову и сотрудникам АЦ ИГМ СО РАН: М.В. Хлестову, Э.П. Солотчиной, В.П. Бондаренко, оказавшим помощь и содействие в написании данной работы. Отдельную благодарность авторы выражают научным сотрудникам ИГАБМ СО РАН: к.г.-м.н. А.И. Иванову, к.г.-м.н. А.А. Кравченко и А.Е. Собакину за помощь и поддержку в проведении полевых исследований в Якутии в 2016 г.

Полевые исследования, изучение флюидных включений при помощи масс-спектрометра на индуктивно связанной плазме с приставкой лазерной абляции (ИГХ СО РАН, г. Иркутск), а также определение изотопного состава серы выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-17-20036) в ИГМ СО РАН. Изучение флюидных включений при помощи Raman-спектрометра и криометрической установки Linkam (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) выполнено за счет средств и по теме проекта НИР ИГМ СО РАН № 0330-2016-0002.

ЛИТЕРАТУРА

Бойцов В.Е., Лабунь А.Н., Пилипенко Г.Н. Самолазовский тип золоторудных месторождений Центрального Алдана — благоприятный объект для кучного выщелачивания // Горный журнал, 2002, № 2, с. 30—32.

Борисенко И.Д. Физико-химические условия формирования руд Самолазовского месторождения золота, Центральный Алдан // Тез. докл. Международной студенческой конференции (16—20 апр. 2016 г.). Новосибирск, ИГМ СО РАН, 2016, с. 75.

Ветлужских В.Г., Казанский В.И., Кочетков А.Я., Яновский В.М. Золоторудные месторождения Центрального Алдана // Геология рудных месторождений, 2002, т. 44, № 6, с. 467—499.

Коган В.Б., Огородников С.К., Кафаров В.В. Справочник по растворимости. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1963, т. 2: Тройные многокомпонентные системы, 1122 с.

Кочетков А.Я. Мезозойские золотоносные рудно-магматические системы Центрального Алдана // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (7), с. 850—864.

Краснов А.Н., Дорожкина Л.А. Геологическое строение и минеральный состав месторождения Гарбузовское (Ц. Алдан) // Минералогические исследования в решении геологических проблем: материалы годичного собрания МО РМО 2005 г. (Москва, 14 дек. 2005 г.). М., 2005, с. 68—69.

Краснов А.Н., Ломм Т., Крылова Т.Л., Грознова Е.О. Первые данные рамановской микроспектрометрии рудообразующих флюидов золотой и урановой минерализации Алдана (Республика Саха, Якутия) // ДАН, 2007, т. 413, № 2, с. 233—236.

Максимов Е.П. Геологические формации, формационные и структурно-вещественные комплексы мезозоя Алданского щита // Проблемы геологии, геофизики и полезных ископаемых Алдано-Станового геоблока. Якутск, Изд-во ПГО «Якутскгеология», 1991, с. 52—58.

Максимов Е.П. Мезозойские рудоносные магматогенные системы Алдано-Станового щита: Автореф. дис.... д.г.-м.н. Якутск, 2003, 44 с.

Максимов Е.П., Уютов В.И., Никитин В.М. Центрально-Алданская золото-урановорудная магматогенная система (Алдано-Становой щит, Россия) // Тихоокеанская геология, 2010, т. 29, № 2, с. 3—26.

Реддер Э. Флюидные включения. М., Мир, 1987, т. 1, 560 с.

Соботович Э.В., Бартницкий Е.Н., Цьонь О.В., Кононенко Л.В. Справочник по изотопной геохимии. М., Энергоиздат, 1982, 58 с.

Borovikov A.A., Borisenko A.S., Gaskov I.V., Borisenko I.D., Doroshkevich A.G., Vladykin N.V., Prokopiev I.R. Composition and metal-bearing capacity of the ore-forming fluids of the Late Mesozoic alkaline complexes in the Aldan shield (Russia) // The Sorby Conference on Fluid and Melt Inclusions ECROFI XXIII. Leeds, UK, June 27—29, 2015. Extended Abstracts, 2015, v. 2, p. 546—548.

Рекомендована к печати 6 декабря 2016 г. А.Э. Изохом Поступила в редакцию 12 октября 2016 г.