

ЗОЛОТО И ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ЛИСТВЕНИТИЗАЦИИ

© 2009 г. Л. П. Плюснина, Г. Г. Лихойдов, Т. В. Кузьмина

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
690022, г. Владивосток, просп. 100-летия Владивостока, 159
E-mail: makarovo38@mail.ru

Поступила в редакцию 16.03.2009 г.

При экспериментальном и расчетном моделировании процессов лиственитизации серпентинитов определена валовая растворимость золота в сульфидно-карбонатно-хлоридных растворах при 300 и 400°C ($P_{\text{общ}} = 1$ кбар). Установлено, что взаимодействие растворов с лиственитами формирует близонейтральную, слабощелочную среду с относительно высокими значениями f_{CO_2} , $f_{\text{H}_2\text{S}}$, низкими $-f_{\text{O}_2}$, f_{SO_2} . В этих условиях растворимость золота падает до $\lg m_{\text{Au}} = -8.54$ (300°C), что способствует его осаждению в ходе фильтрации рудоносных растворов через листвениты. Предшествующие лиственитизации контактово-реакционные процессы в смежных ультрабазитах и гранитоидах генерируют флюид, способный осуществить К-метасоматоз и серпентинизацию ультрабазитов. Растворимость золота в таких флюидах варьирует в пределах $-6.82 < \lg m_{\text{Au}} < -5.06$ при 300 и 500°C, соответственно, что значительно превосходит растворимость золота в растворах, взаимодействующих с лиственитами. Это и определяет роль лиственитов как геохимического барьера, на котором из рудоносных растворов, продуцируемых орогенными гранитоидами, осаждается золото.

Ключевые слова: золото, листвениты, серпентинизация, эксперимент, гранит-ультрабазитовое взаимодействие, растворимость, флюидный режим.

Листвениты, несущие золоторудную минерализацию, впервые были описаны на Уральском Мечниковском месторождении Г. Розе [25]. В них присутствовали железистый карбонат, кварц, тальк, гематит и пирит. Позднее, при изучении лиственитов на Южном Урале, Алтае, в Средней Азии, Восточном Казахстане, Армении, Восточной Сибири и др., их состав был расширен включением серицита, фуксита и других сульфидов. Метасоматиты такого состава образуются по протолитам ультрабазитов, серпентинитов, габбро, диабазов, порфириров, амфиболитов и, даже, песчаников и известняков. Однако классические листвениты замещают ультрабазиты и серпентиниты, тогда как в других случаях карбонатизированные метасоматиты можно считать лиственитоподобными породами [2]. Металлоносность лиственитов зависит от состава протолита, характера наложенных изменений и включает золото, мышьяк, ртуть, сурьму, платиноиды, никель и кобальт. Наиболее известны золотоносные листвениты развивающиеся, обычно, по гипербазитам и серпентинитам на золоторудных месторождениях Южного Урала [14, 15], Приамурья [9], Алтая [5] и т.п. Лиственитизация гипербазитов на этих месторождениях связывается, как правило, с более поздним внедрением орогенных гранитоидов, продуцирующих хлоридно-углекислые флюиды. Повышенное содержание мышьяка и сурьмы, фиксируемое в лиственитах, свидетельствует об участии в их формировании гидротермальных растворов, связанных с гранитоидами. В то время как примесь **Cr, Ni, Co, Pt и Pd** говорит о гипербазитовом составе протолита [19].

В этой связи особый интерес вызывает взаимодействие контрастных по кремнекислотности пород, его влияние на состав формирующихся при этом растворов и подвижность в этих условиях различных компонентов. Ранее, при $T = 450^\circ\text{C}$ и $P_{\text{общ}} = 1$ кбар, было изучено взаимодействие серпентинита с биотит-гранат-полевошпатовыми сланцами [22]. Однако серпентинит в качестве протолита не позволил установить соотношение процессов серпентинизации и биметасоматизма. Кроме того, не была рассмотрена подвижность золота в ходе такого взаимодействия. Нашей целью является изучение химических особенностей флюида, который формируется путем взаимодействия пород, контрастных по кремнекислотности, и моделирование процесса лиственитизации серпентинитов, включая подвижность золота в этой обстановке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Метаморфизм офиолитовых поясов характеризует последовательное наложение метаморфотметасоматических стадий. Ранние стадии натриевого метаморфизма сменяются более поздними с увеличенной относительно натрия ролью калия, что отвечает метаморфизму калиевого профиля, связанному с формированием гранитоидных тел [8]. При драгировании офиолитов Срединно-Индийского хребта в базальтах были обнаружены выделения метаколлоидного флюида, состоящего в основном из кремнекислоты и NaCl, что в условиях литификации и метаморфизма привело к кристал-

лизации кварца и галита [23]. Учитывая это обстоятельство, моделирование взаимодействия ультрабазитов и гранитоидов в офиолитовых комплексах выполнено в растворах 1*m*NaCl переменной кислотности (при 400–500°C и $P_{\text{общ}} = 1$ кбар). В результате установлена метасоматическая зональность и описан ряд подвижности (в порядке ее уменьшения): Si, K, Ca, Fe, Mg, Al [12]. При этом в зависимости от кислотности раствора, Si и K могут меняться местами. Серпентинизация дунита на контакте с гранитоидами отсутствовала, и по нему развивался тальк, что потребовало проведения опытов при более низкой температуре. Рентгеновский анализ продуктов взаимодействия колонки пород гранит–дунит с раствором 1*m*NaCl при 300°C обнаружил развитие серпентина (антигорита) по всему объему дунита. При этом сохранились реликты исходного оливина и пироксена. Тальк, в подчиненном антигориту количестве, отмечался лишь вблизи контакта дунита с гранитом. Химический состав закаленного раствора (в молях на 1 кг воды): Si – 2.8×10^{-3} , Ca – 2.04×10^{-3} , K – 3×10^{-3} , Mg – 3.68×10^{-4} , Al – 2.43×10^{-5} , Fe – 1.93×10^{-5} и Au – 2.33×10^{-7} . Рост температуры (до 400 и 500°C) способствовал увеличению количества кремния и калия в растворах (табл. 1), в результате чего происходит десиликация гранитоидов, из которых натриевым раствором выносятся калий. Процесс сопровождается нейтрализацией исходных растворов, особенно 1*m*NaCl + 10^{-3} *m*NaOH, вследствие резкого увеличения содержания в них кремния. В итоге, количество SiO₂ в конечном растворе превышает концентрацию его насыщения. Это ведет к увеличению концентрации в растворах таких металлов как Zn, Pb и Cu, но уменьшает содержание Au [24]. Контакты контрастных по составу пород отличаются повышенной флюидной проницаемостью и развитием роя кварцевых жил. В случае контакта гранитоидов с ультрабазитами такие жилы нередко сопровождают лиственины и могут оказаться перспективными на золото.

Поскольку лиственины содержат обычно карбонаты и сульфиды, моделирование процесса лиственинизации требует включить в систему углекислоту и серу. Золотоносные растворы, судя по составу газовой-жидких включений в лиственинах, имеют карбонатно-сульфидно-хлоридный состав [5]. Для экспериментального моделирования процесса лиственинизации мы использовали лиственины и серпентиниты Усть-Депского офиолитового комплекса (Приамурье) и углекисло-хлоридные растворы [7, 13]. Фугитивность кислорода и серы, а также кислотность среды контролировали пирит-гематит-магнетитовым (PHM) буфером. Активность калия определялась раствором 1*m*KCl + 0.1*m*HCl. Фугитивность CO₂ в опытах задавалась растворением карбонатов в лиственинах, а в случае серпентинитов и для получения более высоких ее значений ($X_{\text{CO}_2} = 0.005$ или 0.05) разложением щавелевой кис-

Таблица 1. Концентрация Si, K, Au (*Igm*_г) на изотермах в растворах, взаимодействовавших с пакетом пород гранодиорит–дунит при $P_{\text{общ}} = 1$ кбар

Раствор	<i>T</i> °C	Si	K	Au
1 <i>m</i> NaCl	300	-2.95	-3.52	-6.82
1 <i>m</i> NaCl	400	-2.62	-2.95	-6.20
1 <i>m</i> NaCl	500	-2.23	-2.72	-5.41
1 <i>m</i> NaCl + 10^{-3} <i>m</i> HCl	500	-1.82	-1.42	-6.56
1 <i>m</i> NaCl + 10^{-3} <i>m</i> NaOH	500	-1.54	-1.91	-6.67

лоты. Источником золота при растворении служили стенки золотых ампул (10 × 80 × 0.2 мм), куда помещали раствор и тонко перетертую навеску, состоящую из 150 мг лиственина или серпентинита и 150 мг смеси PHM. Содержание Au в закаленных растворах определяли на спектрометре Solar методом электротермической атомизации с предварительной экстракцией золота в диоктилсульфид. Интегральную ошибку эксперимента оцениваем в 20 относ. %. Фазовый состав продуктов опыта контролировали рентгеном на аппарате ДРОН-3. Измеренные в закаленных растворах концентрации золота приведены в табл. 2.

При взаимодействии сульфидно-хлоридно-карбонатного раствора с серпентинитом пеннин полностью замещает антигорит (*d/n* = 14.03; 7.08; 4.72; 4.57; 3.55Å), что говорит о неустойчивости последнего в подобных условиях. При $X_{\text{CO}_2} = 0.005$ и 0.05 образуются карбонаты состава (MgFe)CO₃ (*d/n* = 2.75; 2.08; 1.71Å), кварц и пеннин. Слюда в продуктах опытов рентгеном не фиксируется, и ее отсутствие связано, скорее всего, с дефицитом глинозема. При 400°C и $X_{\text{CO}_2} = 0.05$ гематит и пирит в составе буфера PHM замещаются магнетитом и пирротинном. Низкая растворимость золота в сульфидно-хлоридно-карбонатных растворах устанавливается при взаимодействии их с лиственинами как природными Усть-Дева, так и образованными по серпентинитам в ходе опытов.

Таблица 2. Валовая концентрация золота в растворах, закаленных после взаимодействия с серпентинитами и лиственинами ($P_{\text{общ}} = 1$ кбар)

Серия	Исходная ассоциация	<i>Igm</i> Au	
		300°C	400°C
1	Серпентинит + PHM	-7,73 ± 0,30	-7,42 ± 0,40
2	Лиственин + PHM	-7,68 ± 0,35	-7,30 ± 0,30
3	Серпентинит + PHM	-8,13 ± 0,30	-7,55 ± 0,20
4	Серпентинит + PHM	-7,59 ± 0,35	-7,10 ± 0,20

Примечание. Серии: 1 – $X_{\text{CO}_2} = 0$, в продуктах хлоритолит + PHM (пирит, гематит, магнетит); 2 – X_{CO_2} задается карбонатами породы; 3 – $X_{\text{CO}_2} = 0.005$, в продуктах лиственин + PHM; 4 – $X_{\text{CO}_2} = 0.05$, в продуктах лиственин в смеси с пирротинном и магнетитом.

Таблица 3. Параметры сульфидно-углекисло-хлоридных растворов и валовая концентрация золота в них после взаимодействия с серпентинитом по результатам расчетов ($P_{\text{общ.}} = 1$ кбар, буфер РНМ)

Исходный раствор	pH	lgmAu	lgf _{CO₂}	lgf _{H₂S}	lgf _{O₂}	lgf _{SO₂}
300°C, X _{CO₂} = 0.005						
H ₂ O	5.04	-8.33	1.56	-1.19		
1mKCl	5.30	-7.70	1.75	-1.21		
1mKCl + 0.1mHCl	4.77	-8.20	1.75	-1.21	-30.98	-6.51
1mKCl + 0.1mKOH	5.96	-7.05	1.75	-1.21		
1mKCl + 0.1mKOH*	6.16	-6.80	1.75	-1.16	-31.29	-6.92
X _{CO₂} = 0.05						
H ₂ O	4.53	-8.88	2.42	-1.21		
1mKCl	4.76	-8.27	2.73	-1.22		
1mKCl + 0.1mHCl	4.27	-8.57	2.76	-1.22	-30.98	-6.51
1mKCl + 0.1mKOH	5.96	-7.05	1.75	-1.21		
400°C, X _{CO₂} = 0.005						
H ₂ O	5.01	-6.61	1.18	-0.27		
1mKCl	4.87	-6.03	1.57	-0.29		
1mKCl + 0.1mHCl	4.70	-6.15	1.59	-0.29	-24.29	-2.97
1mKCl + 0.1mKOH	5.01	-5.87	1.62	-0.29		
1mKCl + 0.1mKOH*	6.38	-4.37	1.59	-0.02	-25.91	-5.13
X _{CO₂} = 0.05						
H ₂ O	4.81	-6.85	2.04	-0.29		
1mKCl	4.89	-6.08	2.42	-0.30	-24.29	-2.97
1mKCl + 0.1mHCl	4.67	-6.23	2.44	-0.30		
1mKCl + 0.1mKOH	5.29	-5.70	2.39	-0.27	-24.48	-3.23
1mKCl + 0.1mKOH*	5.93	-4.95	2.42	-0.13	-25.33	-4.36

Примечание.* – сдвиг в поле устойчивости Mg₂ + Py, со снижением f_{O_2} Нем растворяется (см. текст).

Для оценки параметров растворов “in situ” (в *PT*-условиях опытов) термодинамически рассчитано взаимодействие модельных серпентинитов и лиственитов с растворами переменной кислотности: H₂O, 1mKCl, 1mKCl + 0.1m HCl, 1mKCl + 0.1mKOH при X_{CO₂} = 0, 0.005 и 0.05. Расчеты выполнены с помощью программного комплекса “Селектор-С” [4]. Смесь минералов формировалась максимально приближенной к составу серпентинита Усть-Депского комплекса [13], результаты расчетов даны в табл. 3. Очевидно, что рост фугитивности углекислоты в растворе снижает валовую концентрацию золота, особенно ощутимо при 300°C. Уменьшение растворимости Au обусловлено изменением фугитивности CO₂, так как $f_{\text{H}_2\text{S}}$ и f_{O_2} на изотерме практически не меняются. Кроме того, увеличение щелочности растворов сопровождается рост растворимости Au, благодаря стабилизации гидросульфидных комплексов [11].

При взаимодействии тех же растворов с лиственитами на изотерме 300°C (табл. 4), растворимость золота (lgmAu) определяется значениями того же порядка, что и в случае карбонатизации серпентинитов. При 400°C растворимость Au увеличивается примерно на 2 порядка, но уже за пределами устойчивости лиственитов и буфера РНМ. В твердых продуктах опытов появляются калиевый полевой шпат,

мусковит и пирротин. Новообразованная ассоциация буферной уже не является и фугитивность H₂S возрастает более чем на порядок, что увеличивает растворимость золота и степень его выноса из вмещающих пород гидротермальным флюидом. Обращает внимание то, что растворимость золота в условиях и опытов, и термодинамических расчетов определяется величинами одного порядка, что свидетельствует в пользу их достоверности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При изучении золоторудных лиственитов исследователи обычно обращают внимание на соотношение процессов серпентинизации и лиственитизации. Некоторые связывают формирование лиственитов с процессами серпентинизации и карбонатизации, которые осуществляются при температуре ниже 300°C. Так, в верхнепротерозойских офиолитах Аравии, Мали и Марокко промышленная концентрация золота обнаружена в лиственитах, сформированных под действием гидротермальных растворов при 150–250°C в ходе серпентинизации и карбонатизации гипербазитов. Предполагается, что золото из растворов осаждалось в ассоциации с сульфидами, арсенидами, кварцем при взаимодействии кислых Au-содержащих рас-

Таблица 4. Параметры хлоридных растворов и валовая концентрация золота в них после взаимодействия с лиственитом ($P_{\text{общ}} = 1$ кбар, буфер РНМ, расчет)

Раствор	pH	lgmAu	lgf _{CO₂}	lgf _{H₂S}	lgf _{O₂}	lgf _{SO₂}
300°C						
H ₂ O	5.81	-7.54	1.63	-1.19		
1mKCl	5.11	-7.89	1.99	-1.21		
1mKCl + 0.1mHCl	4.29	-8.54	2.02	-1.21	-30.98	-6.51
1mKCl + 0.1mKOH	5.61	-7.40	1.95	-1.21		
400°C						
H ₂ O*	5.98	-5.58	1.32	-0.21	-24.69	-3.50
1mKCl*	5.52	-5.34	1.70	-0.13	-25.25	-4.25
1mKCl + 0.1mHCl	4.20	-6.33	1.68	-0.29	-24.29	-2.97
1mKCl + 0.1mKOH*	5.99	-4.83	1.64	-0.06	-25.68	-4.83

Примечание. * – поле устойчивости Mg + Py

творов с лиственитами, карбонатными линзами и серпентинитами [20].

Наиболее детально качественное и количественное изменение минерального состава при лиственитизации серпентинитов рассмотрено на примере ряда Уральских золоторудных месторождений [14–16]. Было показано, что “лиственитизирующий” флюид сопряжен с гранитоидным магматизмом и его температура не превышает 250–360°C. При этом происходит привнос калия, углекислоты, серы и вынос кремния и натрия. Подчеркивается отсутствие золоторудных тел за пределами лиственитов. Листвениты на Урале проявлены в различных породах: серпентинитах, хлоритолитах, пропилитах, габбро, порфиритах, диабазах, доломитах, известняках и конгломератах с известковистым цементом [15]. Следовательно, нельзя считать процесс лиственитизации сопряженным с серпентинизацией.

Ответ на вопрос об источниках углекислоты в лиственитизирующих растворах не однозначен. Так, наряду с эндогенным ее источником, имеет место смешение ювенильных флюидов с богатыми CO₂ поверхностными углекислотными водами, распространенными в складчатых областях [18]. Другим источником CO₂ служит окисление углеродистого вещества (УВ) углеродсодержащих сланцев, нередко присутствующих в офиолитовых комплексах. Примером подобных месторождений золота могут служить Олимпиадинское в Восточной Сибири [1] и коренное золото россыпей Усть-Депского рудного узла [9]. Для определения редокс-потенциала реакции $C + O_2 = CO_2$, в сравнении с рядом других буферных реакций, мы рассчитали их в координатах $lgf_{O_2} - T$ с помощью пакета “Селектор-С” [4] и представили на диаграмме (рис. 1). Очевидно, что при температуре ниже 250–300°C окисление углерода поддерживает наиболее восстановительный потенциал, даже, в сравнении с окислением метана. Флюидные включения в кварце и карбонатах из лиственитов, кристаллизующих-

ся при 250–150°C, представляют собой ассоциацию жидкой и газовой фазы состава CO₂-CH₄ [20]. Конверсия CO₂ в CH₄ в процессе лиственитизации отражает восстановительные условия, которые благоприятствуют осаждению золота из кислых хлоридных растворов, благодаря снижению в этих условиях его растворимости [6, 10]. Повышение щелочности сульфидных растворов, наоборот, увеличивает подвижность золота за счет стабилизации его

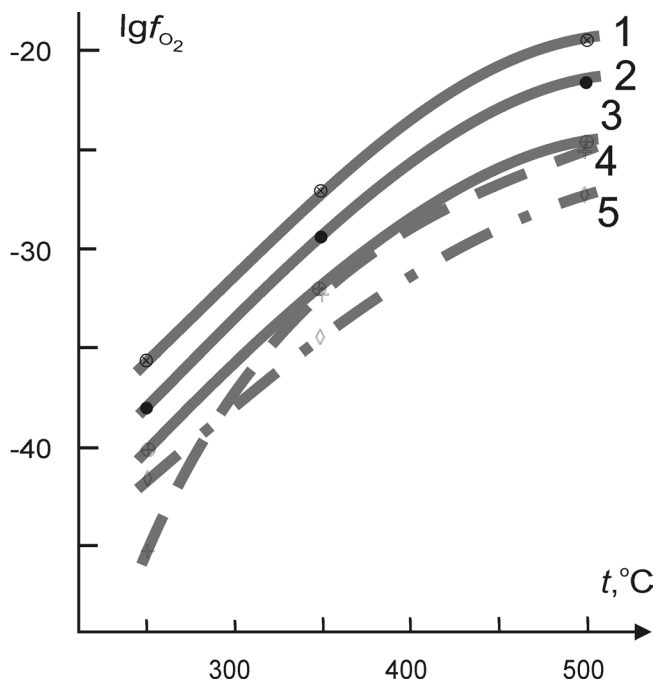


Рис. 1. Фугитивность кислорода различных буферных смесей как функция температуры.

1 – НМ (гематит-магнетит) 2 – РРМ (пирит-пирротин-магнетит), 3 – УВ (углеродистое вещество) + РРМ (или НМ), 4 – $C + O_2 = CO_2$, 5 – $CH_4 + O_2 = C + 2H_2O$.

гидросульфидных комплексов, что может служить причиной частичного выноса Au из лиственитов на соответствующих этапах многоактного рудогенеза.

Растворимость золота в хлоридных растворах, которые формируются в зоне контакта гранитоидов и дунитов при 300–400°C, более чем на порядок выше содержания Au в сульфидно-углекисло-хлоридных растворах (табл.1–3). Это говорит о способности флюидов осаждать Au при взаимодействии с лиственитами или другими содержащими карбонаты породами. Если учесть более высокую растворимость золота в хлоридных растворах, буферизуемых ассоциациями НРМ и РРМ (пирит-пирротин-магнетит) по экспериментальным [6, 21] и расчетным [11] данным, то очевидна роль лиственитов как барьера, на котором такие гидротермальные растворы осаждают золото.

В ультрабазит-базитовых комплексах выделяется ряд последовательных гидротермально-метасоматических этапов: прерудные – серпентинизация, карбонатизация, оталькование и рудные – сульфидизация и окварцевание с локализацией жильных тел с золотой минерализацией [17]. Листвениты всегда представляют собой результат наиболее поздних преобразований ультрабазитов под действием гидротермальных растворов, продуцируемых внедрением гранитоидов. Кларк золота в альпинотипных ультрабазитах ниже, чем в гранитоидах, и концентрирование золота в серпентинитах и лиственитах происходит при поздней метасоматической их трансформации под действием флюидов, отделившихся при становлении гранитоидных массивов [3].

ВЫВОДЫ

Биметасоматические реакционные процессы в зоне контактов гранитоидов и ультрабазитов вызывают натриевый метасоматоз гранитоидов и их десиликацию. В ходе этих процессов генерируется флюид, способный вызывать калиевый метасоматоз и серпентинизацию ультрабазитов. При экспериментальном моделировании был установлен диапазон изменения растворимости золота в подобном флюиде: $-6.82 < \lg m_{Au} < -5.06$ при 300 и 500°C ($P_{общ} = 1$ кбар), соответственно. Этот процесс определяет количество золота, способное выноситься из пород при их взаимодействии с такими водно-хлоридными растворами. Биметасоматоз в зонах контактов пород, контрастных по кремнекислотности, предваряет лиственитизацию и может рассматриваться в качестве ранней рудоподготовительной стадии.

Взаимодействие углекисло-сульфидно-хлоридных растворов с ультрабазитами формирует близонейтральную слабощелочную среду ($pH = 4.80-5.96$ при 300°C) с высокой фугитивностью CO_2 ($\lg f_{CO_2} = 1.56$), H_2S ($\lg f_{H_2S} = -1.20$) и низкой O_2 ($\lg f_{O_2} = -31.9$)

и SO_2 ($\lg f_{SO_2} = -6.51$). Высокий потенциал углекислоты обеспечивается присутствием карбонатов, что снижает валовую растворимость Au в кислых хлоридных растворах ($\lg m_{Au} = -8.54$).

Термодинамические расчеты и физический эксперимент подтверждают отрицательное влияние углекислоты на растворимость золота в кислом хлоридном флюиде. При поступлении рудоносных растворов в листвениты рост активности CO_2 способствует отложению золота.

Лиственитизация – многоактный процесс, которому предшествуют серпентинизация, карбонатизация и калиевый метасоматоз. В сумме они создают геохимический барьер, на котором из сульфидно-хлоридных растворов, связанных с орогенными гранитоидами, осаждается золото. Каждый из перечисленных процессов вносит свою лепту в интегральную золотоносность лиственитов, нередко сопряженных с кварцевыми и кварц-карбонатными золотоносными жилами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Академии наук Республики Саха (Якутия) по проекту 09-3-А-08-415 и 09-2-СО-08-002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакулин Ю.И., Буряк В.А., Пересторонин А.Е. Карлинский тип золотого оруденения. Хабаровск: Изд-во ДВНИИ, 2001. 159 с.
2. Бородаевский Н.И. Лиственитизация как генетический комплекс гидротермальных изменений // Генетические проблемы руд. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 118–127.
3. Бортников Н.С., Саонов В.Н., Викентьев И.В. и др. Роль магматогенного флюида в формировании Березовского гидротермального золото-кварцевого месторождения // Докл. АН. 1998. Т. 363. № 1. С. 82–85.
4. Карпов И.К., Чудненко К.В., Бычинский В.А. и др. Минимизация свободной энергии Гиббса при расчете гетерогенных равновесий // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. С. 3–21.
5. Коробейников А.Ф., Гончаренко А.И. Золото в офиолитовых комплексах Алтае-Саянской складчатой области // Геохимия. 1986. № 3. С. 328–338.
6. Лихойдов Г.Г., Некрасов И.Я. Растворимость золота в комплексной водной сульфидно-хлоридной среде при 300–500°C // Геохимия. 2001. № 4. С. 394–403.
7. Лихойдов Г.Г., Плюснина Л.П., Щека Ж.А. Поведение золота в процессе лиственитизации (экспериментальное и теоретическое моделирование) // Докл. АН. 2007. Т. 414. № 5. С. 672–676.
8. Маракушев А.А. Петрогенезис и рудообразование. М.: Наука, 1979. 262 с.
9. Молчанов В.П., Зимин С.С., Октябрьский Р.А. и др. Минеральный состав и золотоносность лиственитов Усть-Депских офиолитов // Рудные месторождения континентальных окраин. Вып. 1. Владивосток: Дальнаука, 2000. С.170–180.
10. Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 300 с.

11. Пальянова Г.А. Физико-химические особенности поведения золота и серебра в процессе гидротермального рудообразования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 220 с.
12. Плюснина Л.П., Лихойдов Г.Г., Зарайский Г.П., Афанасьева Т.Б. Взаимодействие гранит-дунит и растворимость золота в водно-хлоридных растворах при 400–500°C // Петрология. 1995. Т. 3. № 2. С. 214–222.
13. Плюснина Л.П., Лихойдов Г.Г., Молчанов В.П., Щека Ж.А. Моделирование массопереноса золота при лиственитизации и родингитизации на примере Усть-Депского офиолитового комплекса // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 26. № 5. С. 67–76.
14. Сазонов В.Н. Лиственитизация и оруденение. М.: Наука, 1975. 171 с.
15. Сазонов В.Н. Березит-лиственитовая формация и сопутствующее оруденение. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. 206 с.
16. Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Огородников В.Н., Волченко Ю.А. Золотое оруденение, сопряженное с альпинитовыми ультрабазитами (на примере Урала) // Литосфера. 2002. № 4. С. 63–77.
17. Скурский М.Д. Недра Земли. Кемерово: Кузбассвузиздат, 2006. 832 с.
18. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 204 с.
19. Auclair M., Gauthier H., Trottier J. et al. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of the serpentinite associated Ni-Cu-Zn deposit, Quebec Appalachians // Econ. Geol. 1993. V. 88. № 1. P. 123–138.
20. Buisson G., Leblanc M. Gold in mantle peridotites from Upper Proterozoic ophiolites in Arabia, Mali and Morocco // Econ. Geol. 1987. V. 82. № 8. P. 2091–2097.
21. Gibert F., Pascal M.L., Pichavant M. Solubility of gold in HCl solution under hydrothermal conditions (350–450°C, 500 bars) // Proceed. of 4th Intern. Symp. on Hydrothermal Reactions. Nancy. 1993. P. 65–68.
22. Koons P.O. A study of natural and experimental metasomatic system from the Haast schist, New Zealand // Contrib. Mineral. Petrol. 1981. V. 78. P. 189–195.
23. Plyusnina L.P., Vysotsky S.V. Two-phase separation of fossil hydrothermal fluids in the Mid-Indian Ridge ophiolites // Geochim. Cosmochim. Acta. 1994. V. 58. P. 2035–2039.
24. Robinson G.R. Metal transport and deposition in hydrothermal systems buffered mineral assemblages // Water-Rock Interaction. Rotterdam. Balkema. 1992. V. 2. P. 1613–1617.
25. Rose G. M. Mineralogico-geognostische Reise nach dem Ural dem Altai und dem Kaspischen Meer. Berlin. 1842. 193 p.

Рецензент В.В. Мурзин

Gold and fluid regime of listvenitization

L. P. Plyusnina, G. G. Likhoidov, T. V. Kuzmina

Far East Geological Institute of Far East Branch of RAS

During experimental and computational modeling of listvenitization of serpentinites the total gold solubility in sulfide-carbonate-chloride solutions at 300 and 400°C ($P_{\text{tot}} = 1$ kbar) were performed. It was found that interaction of those solutions with listvenite forms near-neutral, weakly alkaline medium with relatively high f_{CO_2} , $f_{\text{H}_2\text{S}}$ and low f_{O_2} , f_{SO_2} . Under this conditions Au solubility dropped to $\lg m_{\text{Au}} = -8.54$ (300°C) that leads to gold precipitation from ore solutions at its filtration through listvenites. The contact interaction between adjacent ultrabasites and granitoides, which precedes to listvenitization, produce a fluid capable for effecting serpentinitization and K-metasomatism of ultrabasites. The gold solubility in such fluids varies in limits $-6.82 < \lg m_{\text{Au}} < -5.06$ at 300 and 500°C accordingly, which surpass the Au solubility in the hydrothermal solutions interacting with listvenites. Thus, it generates the geochemical barrier for Au deposition from sulfide-carbonate-chloride solutions produced by orogenic granitoides.

Key words: *gold, listvenites, serpentinitization, experiment, granite-ultrabasite interaction, solubility, fluid regime.*