

Причины, условия и время образования природных скоплений кварца, свойственных только Земле и являющихся одним из основных носителей и источников получения золота

А.П.ЛИХАЧЕВ (ФГУП Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ); г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1).

Показано, что кварц в массовых проявлениях является вторичным продуктом, формирующимся путем преобразования более ранних пород под воздействием воды. Его выделение и накопление, как и концентрирование золота, стало возможным только с появлением супра-крустальных (~3800 млн. лет назад) и более поздних образований земной коры.

Ключевые слова: кварц, золото, вода, магмы, магматические образования, формирование, гидротермальные процессы, метасоматоз, месторождения, перспективные площади.

Лихачев Александр Петрович



alexanderlikhachev@rambler.ru

The reasons, conditions and time of formation of natural quartz clusters, peculiar only to the Earth, one of the major carriers and sources of gold

A.P.LIKHACHEV

It is shown that the bulk of quartz is a secondary product formed by converting older rocks under the influence of water. Its selection and accumulation, as well as the concentration of gold was only possible with the advent of supracrustal (~3,8 Ga) and the later formations of the crust.

Key words: quartz, gold, water, magma, magmatic formations, formation, hydrothermal processes, metasomatism, deposits, prospective areas.

Рассматриваются актуальные вопросы, касающиеся причин, условий и времени образования природных скоплений кварца, свойственных только Земле и являющихся одним из основных носителей и источников получения золота (рис. 1). Показано, что кварц в массовых проявлениях является вторичным продуктом, формирующимся путем преобразования более ранних пород под воздействием воды. Его выделение и накопление, как и концентрирование золота, стало возможным только с появлением супра-крустальных (~3800 млн. лет назад) [1] и более поздних образований земной коры. До этого такой возможности не было из-за сравнительно низкого содержания Si в исходном материале планеты (~5,7%) [11], относительно высокого Mg в составе мантии (~25% MgO) и недостаточного количества свободной воды.

Формирование супра-крустальных толщ происходит на кристаллическом фундаменте андезит-тоналитового состава, являющимся наиболее легким (верхним) дифференциатом общего расплава планеты [8]. Оно начиналось после появления на поверхности Земли воды, конденсированной из атмосферы и частично выделенной из планетарного расплава при его кристаллизации.

В образовании кварцевых скоплений вода играет определяющую роль. Она выражается в следующих

трех проявлениях: 1) снижении температуры солидуса мантийных веществ, позволяющим при их парциальном плавлении формироваться сравнительно кислым андезито-дацитовым магмам, продуцирующим в ходе своей кристаллизации магматический кварц (см. таблицу), 2) преобразовании минералов горных пород путем их растворения, гидратации и дегидратации с выделением гидротермально-метаморфического кварца и 3) в химической и физической транспортировке и массовом накоплении SiO₂ в виде моно- и полиминеральных образований.

При кристаллизации андезито-дацитовых магм (как в эффузивном, так и в интрузивном варианте) отсутствуют условия для глубокой дифференциации магматического материала, а, следовательно, и для индивидуальных скоплений его составляющих. Причина состоит в небольшом температурном интервале между их ликвидусом и солидусом и, соответственно, в незначительном промежутке времени (малой длительности) существования в жидком состоянии. Поэтому солидификация андезито-дацитовых магм приводит к выделению в основном равномерно распределенного породообразующего кварца без массовых его скоплений и обогащения рудными компонентами, включая золото.

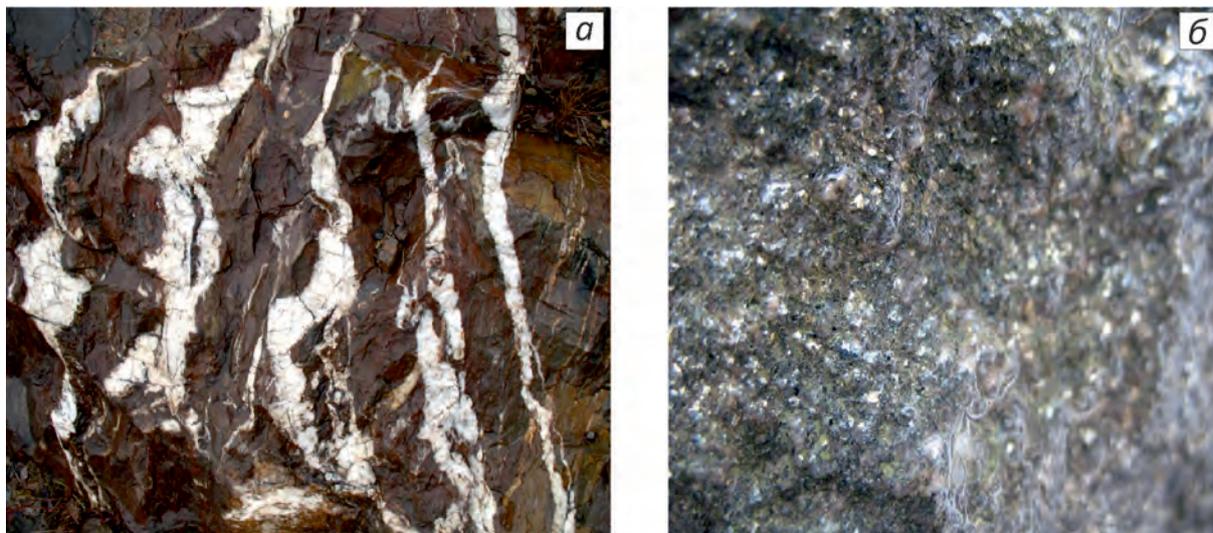


Рис. 1. Примеры массовых выделений кварца. По материалам интернета:

а – жильные образования (белое); б – образец сплошного среднезернистого кварца

При последующем фракционном плавлении водонасыщенных андезито-дацитовых пород и продуктов их разрушения, как и других, обогащенных кремнием коровых образований, формируются кислые магмы, производящие богатые кварцем гранитоидные породы. На магматической стадии в них также не происходит сплошных выделений кварца и по существу по той же причине – из-за их субэвтектического состава, препятствующего глубокой дифференциации магм. Однако в постмагматический период, при наличии значительного количества воды, они могут продуцировать кварцевые скопления, в том числе и в виде золотоносных образований.

В водных преобразованиях веществ с выделением кварца определяющее значение имеет температура, при которой совершается процесс. При температурах выше температур гидратации минералов (например, для оливина $>500^{\circ}\text{C}$) осуществляется прямое растворение магматического материала с возможностью переноса растворенных компонентов на большие расстояния и отложения их в виде новообразованных минеральных продуктов, включая SiO_2 .

Такое происходит при выделении растворенной в магмах воды, образующей, так называемые сквозьмагматические растворы (по Д.С.Коржинскому), а также при проникновении в высокотемпературный магматический объем воды окружающей среды. Причем, это совершается фракционно, подобно парциальному плавлению пород: вначале переходят в раствор наиболее легкоплавкие и легкорастворимые фракции.

В ультрамафических и мафических магмах и породах к таковым относится фаялитовая составляющая –

Fe_2SiO_4 , которая может вести себя следующим образом:
 $6[(\text{Mg}_{1,5}\text{Fe}_{0,5})\text{SiO}_4]+3\text{H}_2\text{O}\rightarrow 4,5\text{Mg}_2\text{SiO}_4+3\text{Fe}^{2+,3+}+$
 $+1,5\text{H}_4\text{SiO}_4+3\text{O}\rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4+1,5\text{SiO}_2+3\text{H}_2\text{O}$

Оливин+вода→форстерит+компоненты водного раствора→ продукты отложения+вода

(1)

$4[(\text{Mg}_{0,5}\text{Fe}_{1,5})\text{SiO}_4]+6\text{H}_2\text{O}\rightarrow \text{Mg}_2\text{SiO}_4+6\text{Fe}^{2+,3+}+3\text{H}_4\text{SiO}_4+$
 $+3\text{O}_2\rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4+3\text{SiO}_2+6\text{H}_2\text{O}$

Оливин+вода→форстерит+компоненты водного раствора→ продукты отложения+вода

(2)

Подобные реакции в больших масштабах могли проявляться в ранние периоды формирования и эволюции земной коры в ходе массового внедрения и извержения высокотемпературных магм ультрамафит-мафитового состава. Результатом таких процессов могло стать образование докембрийских железистых кварцитов, для которых характерны свойственные ультрамафитам сравнительно низкие (<1 г/т) содержания золота [2, 16]. Эти реакции приводят также к увеличению в твердом остатке форстеритовой составляющей, что может быть причиной высоких содержаний магния в оливинах ряда ультрамафитовых пород докембрия и более позднего времени.

При температурах гидратации воздействие воды на породы сначала вызывает замещение исходных (способных к гидратации) минералов водными фазами с оставлением новообразованных продуктов на месте первичного вещества без мономинеральных накоплений. И только потом, в случае дальнейшего поступления и продвижения гидротермальных растворов, осуществляются процессы растворения, переноса и отложение

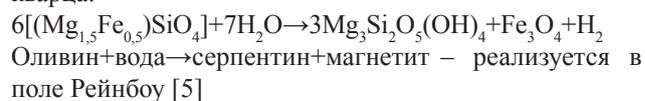
Химический состав (в массовых долях %) продуктов фракционного плавления перидотита, полученных при различных температурах и давлениях в присутствии избытка H₂O [13]

Компоненты, минералы	Исходный перидотит	1080°C 1700 МПа	990°C 750 МПа	1100°C 750 МПа	1050°C 750 МПа	1120°C 1500 МПа
SiO ₂	45,10	64,4	57,2	58,9	58,9	59,6
TiO ₂	0,13	0,1	0,6	0,6	0,6	0,6
Al ₂ O ₃	3,92	20,6	22,8	17,1	19,5	18,1
Fe ₂ O ₃	1,00					
FeO	7,29	0,8*	2,6*	2,3*	2,3*	2,1*
MgO	38,81	3,2	4,0	5,2	3,9	4,2
CaO	2,66	9,4	9,7	14,3	11,9	14,5
Na ₂ O	0,27	1,4	2,7	1,4	2,7	1,1
K ₂ O	0,02	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
H ₂ O ⁺	0,07					
H ₂ O ⁻	0,12					
P ₂ O ₅	0,01					
MnO	0,14	0,01	0,1	0,1	0,1	0,1
CO ₂	0,01					
C	0,00					
F	0,01					
S	0,02					
Cr ₂ O ₃	0,31					
NiO	0,25					
Сумма	100,13	100,0	99,8	100,0	100,1	100,4
<i>Нормированный состав по CIPW</i>						
Кварц	–	30,36	11,41	17,00	13,56	20,10
Ортоклаз	0,12	0,59	2,36	0,59	1,18	0,59
Альбит	2,28	11,85	22,85	11,85	22,85	9,31
Анортит	9,43	46,93	48,12	40,08	40,50	44,16
(Клинопироксен)	(2,93)	–	–	(24,64)	(14,87)	(22,20)
Геденбергит	0,27	–	–	4,19	3,12	4,00
Диопсид	2,66	–	–	20,45	1,75	18,20
(Гиперстен)	(22,16)	(9,29)	(13,93)	(4,80)	(6,00)	(2,91)
Ферросилит	1,99	1,02	3,20	0,82	1,26	0,52
Энстатит	20,17	8,27	10,73		4,74	2,39
(Оливин)	(60,57)	–	–			
Фаялит	5,45	–	–			
Форстерит	55,12	–	–			
Корунд	0,00	1,10	0,29			
Магнетит	1,45	–	–	–		
Ильменит	0,25	0,19	1,14	1,14	1,14	1,14
Апатит	0,02	–	–	–	–	

Примечание. * – все железо в виде FeO.

компонентов как гидратированных, так и не подверженных гидратации минералов (включая содержащийся в исходных породах кварц). Они способны приводить к пространственному разделению веществ и образованию массовых скоплений мономинеральных продуктов, в том числе кварца, а также к концентрации элементов-примесей, включая золото. Накопление кварца и рудных компонентов может происходить и на месте исходного вещества, в случае более раннего выноса из него других растворимых элементов.

В ультрамафит-мафитовых породах возможны, например, следующие реакции гидратации и образования кварца:

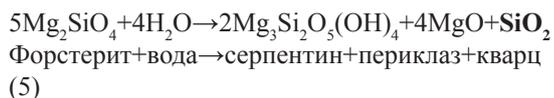


(3)

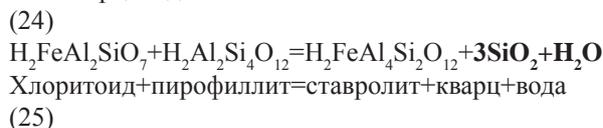
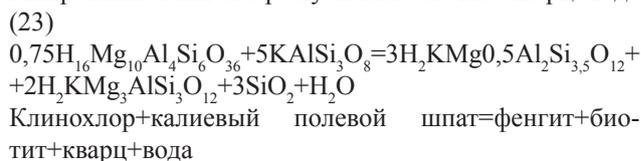
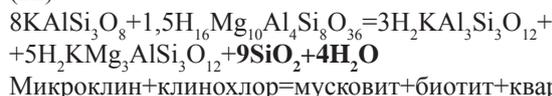
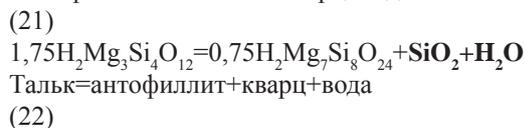
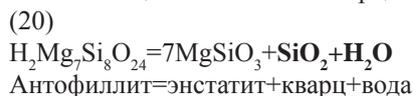
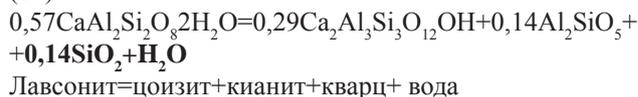
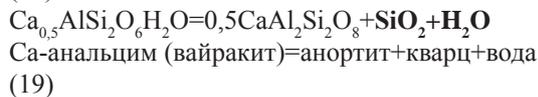
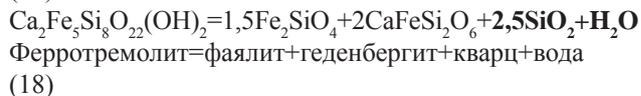
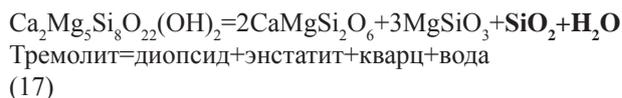
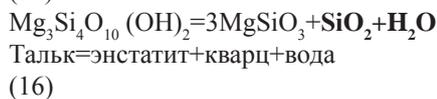
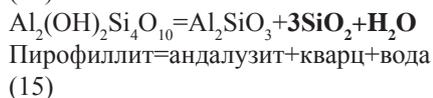
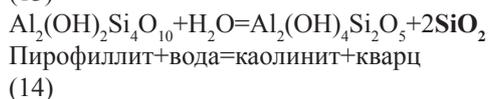
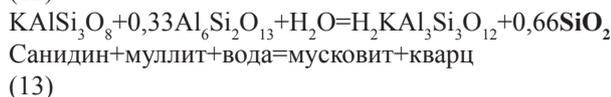
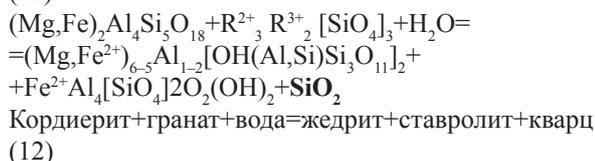
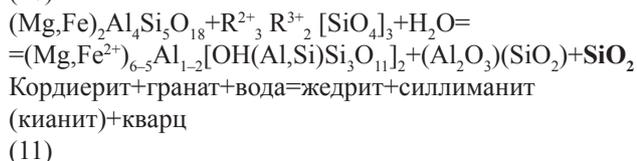
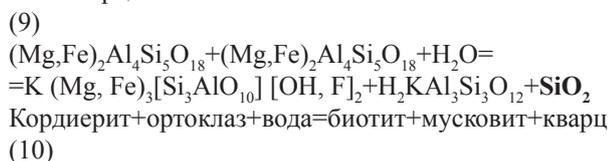
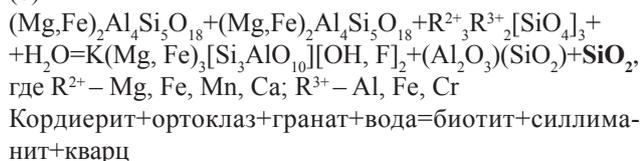
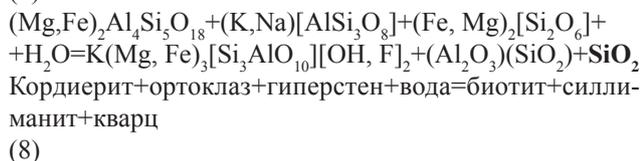
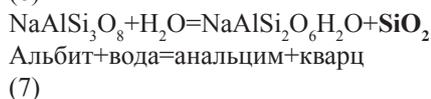
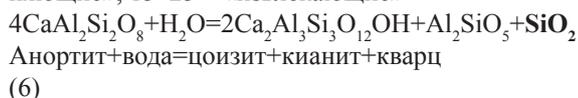


Серпентин→брусит+периклаз+кварц

(4)



Выделение кварца под влиянием воды (в том числе в ассоциации с золотом) происходит и при преобразовании многих других, различных по составу и происхождению пород и минералов и в многочисленных реакциях. При этом в одних из них вода замещает SiO_2 , вытесняя его (в случае гидратации), а в других (при дегидратации) извлекается вместе с ним из исходных минералов. Примером могут быть следующие реакции, составленные А.А.Маракушевым [14]: 6–14 – «вытесняющие», 15–25 – «извлекающие»



В подобных перечисленным реакциях и процессах исходные примеси золота сначала остаются в новообразованном материале, примерно в тех же количествах. И лишь в последующем, при разложении новых образований и выносе из них подвижных (опережающих в растворении) компонентов, оно накапливается вместе с кремнеземом в твердом остатке. Этот остаток в одних случаях может служить самостоятельным кварц-золотоносным объектом, а в других – источником SiO_2 и золота в образовании гидротермальных кварцевых жил, обогащенных золотом, как и золотоносных россыпей при водно-механическом разрушении пород.

Первичное накопление кварца в основном происходит при метасоматических преобразованиях горных пород, процессы которых особенно глубоко и детально изучены Д.С.Коржинским и его учениками и последователями [3, 4, 14 и др.]. В частности, ими было показано, что кварц концентрируется в остатке гидротермальных преобразований разнообразных горных пород, формируя самостоятельную тыловую зону метасоматических колонок [3].

Приведенные выше и подобные им реакции отражают варианты гидротермально-метасоматического образования кварца в ассоциации с другими минералами, без возможностей его накопления в виде сплошных масс,

в случае застойного состояния и слабого движения воды. Однако при повышенной скорости ее течения, обеспечивающей пространственное разделение и транспортировку химических элементов, они могут приводить и к образованию мономинеральных скоплений кварца, в том числе и аналогично тому, как это происходит при формировании метасоматических колонок [3].

Следовательно, можно допускать, что метасоматические процессы, осуществляемые при малых скоростях движения и ограниченных количествах водных растворов, в основном приводят к формированию «рассредоточенного» кварца без существенной концентрации рудных компонентов, включая Au. Поэтому образования такого рода являются малоперспективными на обнаружение месторождений золота и других полезных ископаемых.

Перспективными они становятся в случае дальнейшего развития процесса, выражающегося в продолжении и увеличении скорости движения растворов, обеспечивающих дифференциальный вынос и привнос химических элементов с их индивидуальной концентрацией и образованием мономинеральных продуктов, накладывающихся на ранее сформированные метасоматиты. Подобная последовательность обычно проявляется в наложении рудной минерализации на ранее образованные метасоматические породы.

Отмеченные закономерности позволяют осуществлять предварительную оценку перспективности метасоматических образований: в малоперспективных слабо проявлены мономинеральные выделения кварца, как и других веществ [12].

Процессы гидратации минералов могут осуществляться либо за счет внутренней воды, изначально находящейся в исходном материале, либо внешней, поступающей в него извне, либо и той, и другой.

Изначальная вода, не имея дополнения, производит ограниченные преобразования. Так вода магматических расплавов основного и ультраосновного состава при ее выделении вызывает локальный автосоматоз. Он включает частичную серпентинизацию оливина, образование ограниченного количества амфиболов и биотита за счет пироксенов и серицита по плагиоклазу. Частичное изменение происходит и при нагреве пород, первично содержащих незначительное количество свободной воды. В подобных и других случаях, где не добавляется вода, процессы преобразования пород не приводят к существенным перемещениям исходных веществ и, следовательно, к массовому образованию кварца и иных вторичных минералов, как и к скоплению рудных компонентов. Дополнительное поступление воды без ее оттока также не производит элементного концентрирования веществ, а в основном лишь увеличивает степень измененности пород и количество метасоматических продуктов.

Перемещение и концентрирование веществ с массовым образованием кварца и других нерудных и рудных

веществ осуществляется в основном инфильтрационным путем, при движении обычно нагретых водных растворов в циркуляционных и однонаправленных потоках.

В большинстве случаев главная причина движения водных растворов и транспорта веществ – наличие теплового источника и температурного перепада в гидросистеме и во вмещающей ее среде.

В пределах земной коры проявляют действие два основных эндогенных источника тепла: геотермический, связанный с внутренними глобальным и региональными тепловыми потоками Земли, и магматический – с внедренными магмами.

Геотермический источник при воздействии на вещество земной коры приводит к проявлению регионально-геоморфизма и образованию известных метаморфических фаций, минеральный состав которых зависит от температуры и давления пород: цеолитовой (100–300°C и $0,1\text{--}2\cdot 10^8$ Па); зеленых сланцев (250–450°C и $0,5\text{--}3\cdot 10^8$ Па); эпидотовых амфиболитов (400–500°C и $0,5\text{--}4\cdot 10^8$ Па); амфиболитовой (450–700°C и $2\text{--}6\cdot 10^8$ Па); гранулитовой (650–1000°C и $5\text{--}15\cdot 10^8$ Па).

Геотермическое тепло не вызывает существенного перемещения и концентрирования веществ, в том числе кварца и золота. Основная причина тому состоит в сравнительно небольшом температурном градиенте ($\sim 30^\circ\text{C}/\text{км}$) разреза земной коры, не способном обеспечить достаточно интенсивную циркуляцию водных растворов и снижение устойчивости (выпадение) растворенных в них компонентов.

Происходящие под действием геотермического тепла реакции приводят преимущественно к смене минеральных фаз и их ассоциаций при сохранении исходного химического состава пород, за исключением воды. Вода и в этом случае играет определяющую роль, так как преобразование пород в основном состоит в проявлении реакций гидратации–дегидратации минералов, которые способны производить кварц. Однако в данных условиях не происходит его скопления из-за отсутствия интенсивных движений растворов и химического перемещения веществ.

Геотермическое тепло может приводить к преобразованию веществ со значительным их перемещением и концентрированием в случае резкого погружения в более высокотемпературные глубины Земли сравнительно небольших участков (блоков) земной коры. Осуществляемые при этом процессы во многом подобны тем, которые реализуются в ходе воздействия магматического тепла на вещество земной коры.

Магматическое тепло – основной генератор химического перемещения веществ и их концентрации. Оно продуцируется мантийными и коровыми магмами. Мантийные магмы, имеющие преимущественно мафит-ультрамафитовый состав, проявляются в зонах спрединга и в горячих точках океанического дна, а также внутри континентальных плит.

В океанических условиях они связаны с декомпрессионным плавлением поднимающихся масс мантийного вещества, а в континентальных – с плавлением материала мантии под действием глубинного термического плюма [10].

Коровые магмы, характеризующиеся в основном средне-кислым составом и высокой растворимостью воды (с массовой долей до ~10%), образуются в зонах субдукции океанических плит (на границе их столкновения с континентом) в результате частичного плавления погружающегося в высокотемпературную мантию океанического вещества и вследствие плавления материала континентальной коры за счет его трения с океанической плитой. Совместно эти процессы приводят к формированию островодужных и окраинно-континентальных областей активного проявления базальт-дацит-риолитового магматизма и массового образования осадочно-вулканогенных толщ, прорванных интрузивными телами того же состава.

Образование коровых магм возможно и в континентальных условиях. Оно происходит по причине плавления ранее сформированных толщ внедренными в них мантийными магмами, приводящими к зарождению кислых расплавов, образующих гранитные массивы. Больше всего такие процессы проявлялись в докембрийское время.

Практически во всех случаях воздействие магматического тепла на коровые толщи происходит при наличии воды. Поэтому преобразование исходных (вмещающих) пород и слагающих их минералов обычно сопровождается выделением кварца. Однако не всегда он образует массовые скопления. Для этого надо, как уже было сказано, достаточно интенсивное движение водного раствора, обеспечивающее перенос веществ. Если его нет, то новообразованные выделения кварца остаются на месте и в небольших количествах, в основном в виде вкрапленных проявлений. То же происходит и с золотом. Оно не концентрируется. Его количество остается тем же, что и было в исходном материале [9].

Интенсивность движения растворов находится в прямой зависимости от перепада (градиента) температуры и давления, существующих в водном потоке. Наибольшие их величины, влияющие на устойчивость компонентов в растворах и дальность их переноса, достигаются при внедрении магматических тел в верхние (наиболее холодные) части земной коры.

Каждое магматическое тело, являющееся тепловым источником, после внедрения магмы сначала довольно длительное время (до нескольких тысяч лет и более, в зависимости от массы и состава магмы) сохраняет сравнительно высокую температуру за счет исходного теплового запаса и кристаллизационного тепла. По завершении кристаллизации расплава температура сформированного магматического тела снижается в направлении от его периферии к центру, вплоть до ее выравнивания с окружающим пространством.

В соответствие с тепловой эволюцией магматического тела меняется его воздействие на окружающую среду. Вначале она разогревается до максимального предела вблизи интрузива с распространением (удалением) теплового фронта в сторону периферии до тех пор, пока не начнется охлаждение теплового источника. Затем происходит снижение температуры вмещающей среды и отступление теплового фронта.

Термическая эволюция источника тепла определяет реализацию и продуктивность внутри- и околоинтрузивных гидротермальных процессов. Температурный перепад в гидротоке обеспечивает не только движение раствора, но и выпадение из него растворенных компонентов, теряющих устойчивость с понижением температуры и изменением Eh и pH среды, как и делает возможным существование в нем зон растворения (в области высоких температур) и зон отложения веществ (в низкотемпературной части).

Растворение и отложение веществ потоками водных растворов контролируются несколькими факторами [6, 17], главным из которых является величина свободной энергии образования (ΔG°) создающих химическими элементами ионов, молекул и твердых соединений. Она учитывает и аккумулирует в себе практически все энергетические эффекты и определяет степень и различие подвижности элементов. По этому признаку химические элементы выстраиваются в единый термодинамический ряд (рис. 2), в котором каждый правостоящий элемент более предпочтителен (создает более прочные формы и соединения) в водных растворах по сравнению с левостоящими. При дефиците растворителя он раньше поступает в раствор, если не мешают другие факторы [6, 7, 17].

Природным условиям свойственны ситуации дефицита растворителя (лигандов в растворе). Поэтому химические элементы растворяемых веществ обычно поступают в раствор, выносятся из зоны растворения и отлагаются в зоне кристаллизации не одновременно, а в определенной последовательности, во многом соответствующей термодинамическому ряду и обуславливающей существование химической и минеральной зональности [6, 17].

В термодинамическом ряду химических элементов золото занимает крайнее левое положение (см. рис. 2), что определяет его самую низкую растворимость в водных растворах. В аналогичной позиции находится SiO_2 в термодинамическом ряду породообразующих минералов (рис. 3), устойчивость которых в водных растворах обычно повышается, а растворимость снижается с уменьшением величины свободной энергии их образования. Причина состоит в том, что большинство петрогенных элементов имеют более прочные связи с лигандами водного раствора, чем в исходном минерале и, следовательно, первыми поступают в раствор. Поэтому кварц так же, как и золото, характеризуется одинаково низкой растворимостью в водных средах.

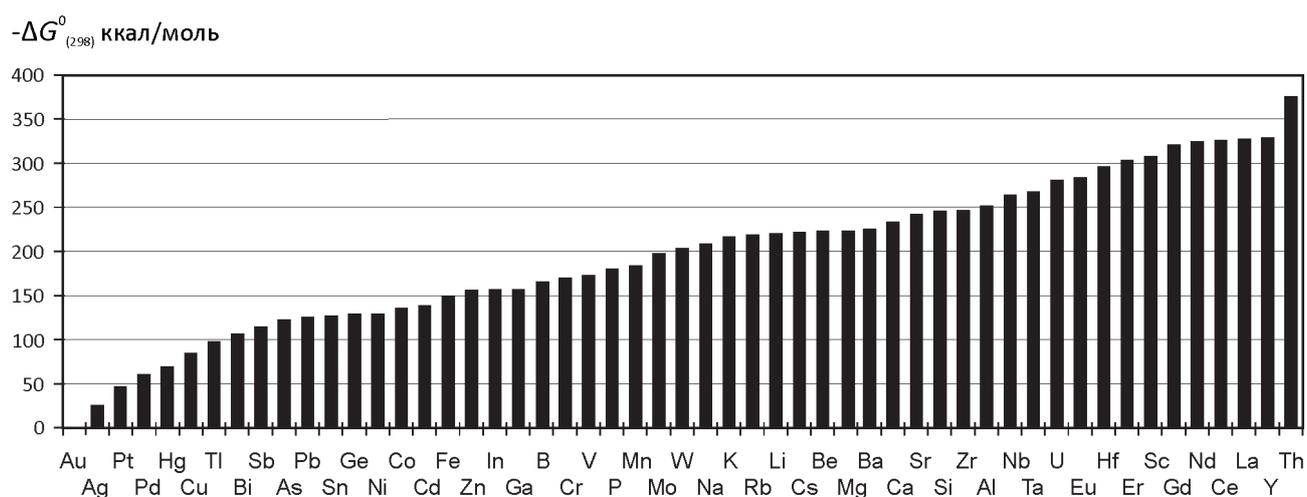


Рис. 2. Термодинамический ряд химических элементов:

обобщенные значения свободной энергии образования известных соединений каждого элемента в водных растворах, рассчитанные по отношению к Au, величина ΔG которого принята за нулевую; расчеты выполнены на основе конкретных данных [6–7, 14, 16]

Именно эти свойства и причины обуславливают совместное нахождение и накопление кварца и золота в остаточных и новообразованных продуктах гидротермального преобразования минеральных веществ, а также и формирование месторождений золота, связанных с кварцем [12].

Как следует из приведенных выше данных, реакции с выделением кварца в основном происходят за счет замещения и извлечения водой SiO_2 минералов исходных пород, реализации которых способствует сходство величин свободной энергии образования H_2O и SiO_2 (см. рис. 3). Они могут приводить к отложению новообразованных продуктов или практически на месте исходного материала (без привноса и выноса компонентов), или на удалении от него с выносом из зоны растворения и отложением в удаленной зоне кристаллизации. Возможен переход первого варианта во второй в ходе разрастания теплового воздействия и развития гидротермальной системы.

Первый вариант менее продуктивен, чем второй, так как в нем отсутствуют условия для транспорта, увеличения количества и концентрирования веществ. Его реализация характерна для случаев слабого движения растворов, в основном для ранней стадии прогрева вмещающих толщ и медленной пропитки растворами пород, когда происходит преимущественно гидратация исходных минералов. Примером продуктов таких реакций и процессов являются метасоматические образования типа березитов и лиственитов, являющиеся продуктами в основном кислотной стадии гидротер-

мального преобразования, соответственно, кислых и ультраосновных пород [3, 4].

В последующем на них могут накладываться привнесенные водным раствором вещества, в том числе рудоносный и безрудный кварц, растворение и перенос элементов которого оптимальны в щелочных условиях. Иначе говоря, метасоматиты такого рода в своем формировании не производят рудных скоплений, но могут являться носителями рудного вещества, наложенного на них в результате перехода гидротермального процесса в режим привноса-выноса компонентов.

Вынос из зоны растворения и отложение в зоне кристаллизации перешедших в раствор компонентов обеспечивают сбор растворяемых веществ с больших объемов исходного материала и отложение их с концентрированием на сравнительно ограниченных участках. Причиной тому является то, что сам интрузив и области околоинтрузивного нагрева коровых толщ, где происходит растворение веществ, обычно охватывают значительно большие пространства, и они менее изменчивы по температуре, чем зоны кристаллизации, характеризующиеся резкими температурными перепадами, снижающими устойчивость компонентов в водных растворах.

Зоны растворения веществ находятся в наиболее высокотемпературных частях самого источника тепла (интрузива) и в ближайших к нему участках вмещающей среды, тогда как зоны отложения характерны для областей сравнительно низких температур окружающих толщ и периферии интрузивов.

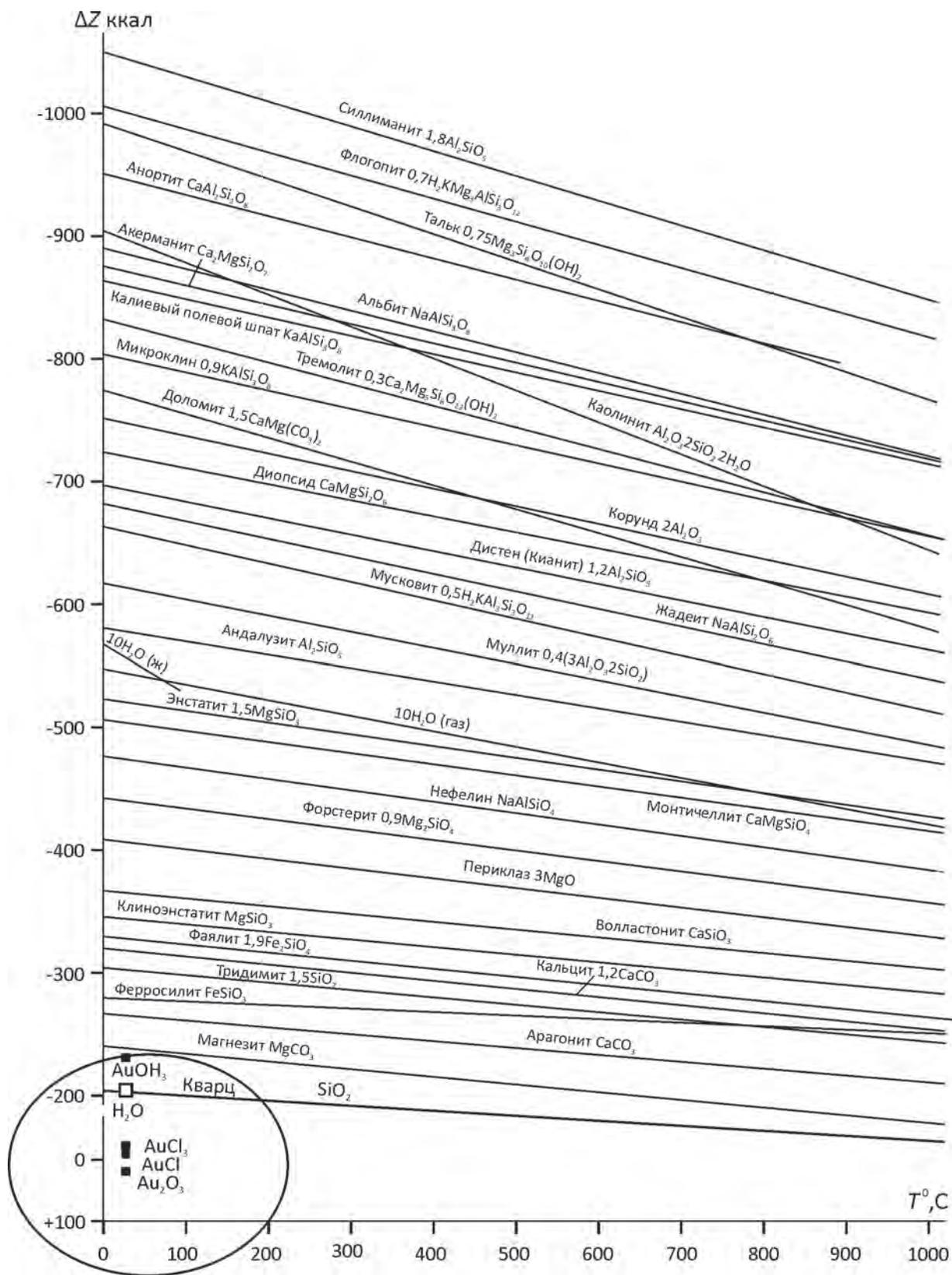


Рис. 3. Диаграмма зависимости от температуры изобарных потенциалов образования главнейших породообразующих минералов. По работе [14], соединения Au и H_2O по работе [15]

Зоны отложения растворенных компонентов могут располагаться от мест их растворения на значительных расстояниях, вплоть до нескольких километров, в зависимости от массы теплового источника, величины температурного градиента области нагрева и устойчивости компонентов в водных средах. В общем случае большие объемы веществ и высокие температуры обеспечивают максимальную продуктивность гидротермальных процессов, в том числе в образовании скоплений кварца и концентрировании золота.

Практически во всех случаях во время возникновения, существования и охлаждения теплового источника зоны растворения и отложения веществ мигрируют и меняют свои границы. По мере прогрева окружающей среды зона растворения расширяет свои пределы, а зона отложения удаляется от источника тепла. С наступлением стадии охлаждения теплового источника границы обеих зон смещаются в обратном направлении. В результате возникают химические и минеральные зональности в рудных телах и вмещающих их средах, как и многочисленные этапы и фазы минералообразования.

Таким образом, гидротермальные процессы, вызываемые магматическим тепловым источником и приводящие к формированию скоплений кварца и рудных компонентов, в основном происходят вследствие наличия температурного перепада в потоке водного раствора. Движение раствора имеет преимущественно замкнутый (рециклинговый) характер. Замыкание может осуществляться через водоем, что имеет место в гидросистемах зон спрединга океанического дна, или полностью в твердой среде земной коры. В последнем случае это происходит в основном за счет изоляции гидросистемы от окружающей среды посредством отложения на периферии области нагрева привнесенных потоками раствора и местных новообразованных продуктов, среди которых может быть кварц.

Гидротермальные процессы в своем проявлении и воздействии на окружающую среду проходят три стадии, соответствующие температурной эволюции теплового источника: раннюю – стадию нагрева (повышения температуры), промежуточную (основную) и позднюю. В раннюю стадию происходит медленная пропитка исходных пород водным раствором с частичной гидратацией породообразующих минералов. Промежуточная стадия является наиболее высокотемпературной и продолжительной, зависящей в основном от длительности кристаллизации внедренной магмы. В течение ее осуществляется объемная гидратация минералов исходных пород и другие изменения с образованием массивных метасоматитов. В позднюю стадию формируются накладывающиеся на предшествующие образования вкрапленно-прожилково-жилльные безрудные и рудные поли- и мноминеральные ассоциации, включая кварц и золото.

Приуроченность выделений кварца и золота к поздней стадии минералообразования объясняется их накоплением (из-за относительно низкой растворимости) в остатке исходных веществ и поступлением в раствор в последнюю очередь.

Усложненные варианты отложения кварца и связанных с ним рудных скоплений, как и метасоматических образований в целом, возникают при многофазном внедрении и неоднократном перемещении теплового источника, а также из-за неровностей его границ.

Таким образом, можно сделать следующие основные выводы.

1. Скопления кварца и золота являются конечными продуктами дифференциации земного вещества, осуществляемой в основном под воздействием воды в термоградиентных условиях.

2. Массовое образование кварца происходило только на Земле, единственной в Солнечной системе планете, обладающей необходимым количеством H_2O .

3. Проявление массовых скоплений кварца началось после отвердевания (кристаллизации) верхней части до этого расплавленной Земли, со времени образования супракристалльных структур (~3800 млн. лет назад) и благодаря поступлению на земную поверхность воды, конденсированной из атмосферы и освобожденной кристаллизующимся планетарным расплавом.

4. Формирование кварцевых скоплений осуществлялось путем магматических и гидротермальных преобразований более ранних горных пород.

5. Наибольшая продуктивность свойственна гидротермальному метасоматозу, который реализуется в условиях повышенного движения водных растворов с проявлением реакций гидратации породообразующих минералов, обеспечивающих извлечение из исходного вещества, перенос и отложение в концентрированном виде кремнезема и сопутствующих рудных компонентов, в том числе и золота.

6. В процессе гидротермального преобразования горных пород можно выделить три стадии: раннюю, промежуточную (основную) и позднюю. В раннюю стадию происходит медленная пропитка исходных пород водным раствором с частичной гидратацией породообразующих минералов; в промежуточную – полная их гидратация и другие изменения с образованием массивных метасоматитов; в позднюю формируются вкрапленно-прожилково-жилльные нерудные и рудные минерализации, включая кварц и золото.

7. Совместное нахождение и концентрирование золота с кварцем обусловлены одинаково низкой величиной свободной энергии образования (ΔG°) создающих ими форм и соединений в водных растворах, определяющей их слабую растворимость: накопление в остатке от растворения исходного материала, а также переход в раствор и выпадение из него в позднюю стадию минералообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аллорт Я.* Древние супракрустальные породы с возрастом свыше 3760 млн. лет и ассоциирующиеся с ними полосчатые железистые кварциты, район Исуа, центральная часть западной Гренландии // Ранняя история Земли. – М.: Мир, 1980. С. 188–201.
2. *Докембрийские железорудные формации Мира.* – М.: Мир, 1975.
3. *Жариков В.А., Омелянко Б.И.* Некоторые проблемы изучения изменений вмещающих пород в связи с металлогеническими исследованиями // Изучение закономерностей размещения минерализации при металлогенических исследованиях рудных районов. – М.: Недра, 1965. С. 119–194.
4. *Коржинский Д.С.* Общие свойства инфильтрационной метасоматической зональности // Доклады АН СССР, 1951. Т. 78. № 1. С. 95–98.
5. *Леин А.Ю., Сагалевич А.М.* Курильщики поля Рейнбоу – район масштабного abiогенного синтеза метана // Природа. 2000. № 8. С. 44–53.
6. *Лихачев А.П.* О переотложении рудогенных и петрогенных компонентов водными растворами // Геохимия. 1975. № 10. С. 1459–1474.
7. *Лихачев А.П.* О поведении химических элементов в магматических и гидротермальных процессах // ЗВМО. 1975. Вып. 6. С. 649–663.
8. *Лихачев А.П.* Формирование континентальной коры и образование в ней месторождений полезных ископаемых // Отечественная геология. 2011. № 4. С. 55–63.
9. *Лихачев А.П.* Общая закономерность размещения месторождений золота по глубинным геофизическим данным // Отечественная геология. 2012. № 6. С. 13–29.
10. *Лихачев А.П.* Причины и условия существования магнитных и немагнитных полей земной коры, определяющих формирование и размещение месторождений золота, алмазов, нефти, газа и других полезных ископаемых // Отечественная геология. 2013. № 6. С. 40–50.
11. *Лихачев А.П.* Планеты земной группы как твердые остатки (ядра) обычных преимущественно газовых планет, потерявших газовую составляющую при первоначальной вспышке Солнца // Отечественная геология. 2014. № 3. С. 89–100.
12. *Лихачев А.П.* Возможные причины и условия тесной ассоциации золота с сульфидами и кварцем // Отечественная геология. 2016. № 2. С. 41–52.
13. *Майсен Б, Беттчер А.* Плавление водосодержащей мантии. – М.: Мир, 1979.
14. *Маракушев А.А.* Термодинамика метаморфической гидратации минералов. – М.: Наука, 1968.
15. *Наумов Г.Б., Рыженко Б.Н., Ходаковский И.Л.* Справочник термодинамических величин. – М.: Атомиздат, 1971.
16. *Чернышов Н.М., Резникова О.Г.* Типы, состав и генетические особенности золотоплатинометалльного оруденения в железистых кварцитах Старосельского рудного района КМА (Центральная Россия). – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2014.
17. *Likhachev A.P.* Redeposition of ore-producing and petrogenetic components by aqueous solutions // Geochemistry Internat. 1975. Vol. 12. Pp. 101–113.