

КАК ПРИРОДА ИЗГОТАВЛИВАЕТ ЗОЛОТО?

Б.И. Силкин

Известно, что золото – один из наиболее “благородных” металлов – оно крайне неохотно вступает в химические реакции и принадлежит к числу наименее распространенных на нашей планете элементов: в весовых единицах его всего лишь около двух миллионных долей процента по всей земной коре. Однако разогретые воды, циркулирующие в недрах коры, каким-то образом ухитряются выщелачивать золото из огромных масс геологической породы и при 300 – 400 °С осаждают в жильных месторождениях, где его концентрация может быть в 10000 раз больше, чем в среднем по всей коре.

Возникают вопросы: 1) какие именно виды водных растворов в состоянии растворять столь “нерактивный” желтый металл; 2) почему элемент концентрируется в жилах, тогда как иные металлы, например, свинец, цинк, медь, которых в породах коры в 100 тыс. раз больше, так не “поступают”; 3) при каких гидротермальных условиях жидкое золото становится растворимым; 4) в чем причина того, что большая часть месторождений этого вещества образуется в столь узком “коридоре” температур между 300 и 400 °С в метаморфической среде “зеленых” сланцев?

На эти “проклятые” вопросы дают ответы работы Роберта Р. Лукса (R.R. Loucks) и Джона А. Маврогенеса (J.A. Mavrogenes) с Геологического факультета Австралийского национального университета в Канберре.

Золото является на нашей планете редкостью по трем причинам: астрономической, атомной и сугубо “земной”. В ходе реакций ядерного синтеза, происходящих на звездах типа Солнца, сперва выгорают водород и гелий, а тяжелые элементы – вплоть до железа с атомным числом 56 – уже потом. Элементы тяжелее железа могут возникать лишь путем нейтронного захвата – реакций, происходящих при редких событиях, именуемых взрывом сверхновой звезды. Кроме того, все нуклиды (изотопы) с нечетным атомным числом являются редкими по сравнению с их “четными соседями” потому, что их ядра менее стабильны и в результате этого золото (⁷⁹Au) встречается реже, чем платина (ат. число 78) или ртуть (80). Наконец, в процессе образования планет земного типа жидкое железо тяготением было “уведено” в глубинные недра, где образовало железное ядро. А золото и другие сидерофильные элементы – платина, палладий, иридий и радон, были увлечены туда же. Поэтому уделом большей части золота является область ядра планеты, а в коре его осталось мало.

Следовательно, для того, чтобы сконцентрировать в одном месте обильное количество золота, необходимы весьма длительные и сложные природные процессы.

Вот пример такого природного химического “производства”, осуществлявшегося в Северной Америке в пределах древнего Канадского щита (возрастом 2,7 млрд. лет). Здесь в провинции Онтарио находится диоритовый (диабазовый) пояс протяженностью 200 – 300 км, из недр которого было извлечено около 4 тыс. тонн золота! Оно добывалось только из жил, где концентрация металла была достаточной для окупаемости работ, так что в действительности там количество золота еще в 10 раз больше.

Если эффективность процессов выщелачивания из

Как природа изготавливает ЗОЛОТО?

породы источника составляла 50 %, то объем его мог достигать 20 тыс км³, что равно блоку земной коры площадью 50 на 50 км при глубине 8 км. Примерно 1 тыс км³ водных флюидов с начальной T=500 °C должна была выщелачивать этот блок, вынести золото в жидком виде и канализировать его вдоль разломов коры, где золото при той самой “магической” температуре – от 300 до 400 °C подвергалось осаждению вместе с кварцем в жильных отложениях.

Какая химия растворов лежит в основе подобного геохимического чуда? Хотя желтый металл и относительно нереактивен, а содержащие его вещества не отличаются заметной стабильностью, известно, что золото растворяется в водных флюидах, образуя комплексы Au-Cl и Au-S. В качестве агентов растворения золота из каменных пород называли комплексы Au-Te (теллуриды). Однако это предположение в реальности проверено не было.

Эксперименты, поставленные Р. Луксом и Дж. Маврогенесом, позволяют утверждать, что таковым является комплекс AuHS (H₂S)₃^o. Это соответствует ионным характеристикам и природным ассоциациям золота с пиритом (FeS₂), недаром прозванным “дурацким золотом”. Данный вывод также отвечает на вопрос относительно отложений драгоценного металла: большее количество свинца, цинка и меди, чем золота образует растворимые комплексы с хлором, а не с серой, это объясняет невозможность для них подвергаться концентрации при помощи того же механизма.

Авторы использовали принципиально новую методику. Обычно эксперименты, проводимые с целью установить степень растворимости золота в естественных системах флюид – горная порода при T от 200 до 700 °C и P в несколько сотен мегапаскалей страдают из-за нежелательного охлаждения. Когда флюиды под высоким давлением при высокой температуре удаляются, они охлаждаются до температуры в лаборатории и из раствора выпадает осадок. Измеренная растворимость может не отражать растворимость в соответствующих гидротермических условиях.

Исследователи использовали явление естественного роста кристаллов. Когда минералы (особенно кварц – SiO₂) осаждаются из водных флюидов, крошечное количество жидкости оказывается запертым в пустотах размерами в микрометры, которые затем, в ходе роста кристаллов, прочно “запечатываются”. Подобные флюидные включения сохраняют некую долю способности к растворению.



Так в пустотах повышается концентрация золота и других металлов. Имитируя этот процесс, Лукс и Маврогенес прокололи в образце кварца углубления и поместили его в гидротермальный раствор вместе с образцом золота, флюидами и минералами.

Углубления под гидротермальным давлением заполнились флюидом; растущие кристаллы их запечатали в насыщенном кремнеземом растворе, сохранив весьма малые количества флюидов, содержащих золото в виде сульфида AuHS (H₂S)₃^o, тем самым сохраняя химическое равновесие.

Заполненные флюидом углубления были открыты при помощи ультрафиолетового лазера с диаметром луча менее 10 мкм. При этом флюид и раствор испарялись. Анализ микроскопических количеств испарений требует высокочувствительной аппаратуры. В них направляли газ аргон, используя масс-спектрометр, строящий спектр всего за несколько миллисекунд. Так возникла возможность обнаруживать очень слабый приходящий сигнал, образующийся при вскрытии включения лазерным лучом.

Эксперименты доказали, что степень растворимости AuHS (H₂S)₃^o сильно зависит от изменений давления и температуры. Охлаждение с 400 до 340 °C приводит к осаждению в металлическом виде 90 % растворенного золота. Падение давления, происходящее по мере подъема горячего флюида вверх по разлому, уменьшает растворимость золота тоже на 90 %. Это объясняет узость температурного “коридора”, в котором образуются большинство залежей драгоценного металла.

Science. 1999. V. 284. № 5423. P.p. 2101, 2159.