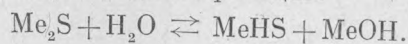


О. Е. ЗВЯГИНЦЕВ и И. А. ПАУЛЬСЕН

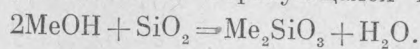
**К ТЕОРИИ ОБРАЗОВАНИЯ ЖИЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА**

(Представлено академиком А. Е. Ферсманом 25 I 1940)

На основании работ Глаубера (1), Skey (2), Эглестона (3), Бекера (4), Ленгера (5), Леверейджа (6) и Огрызло (7) можно утверждать, что золото в гидротермальные жилы приносится из глубинных очагов интрузий в виде гидросульфидных щелочных растворов. Гидросульфиды образуются под влиянием паров воды по реакции:



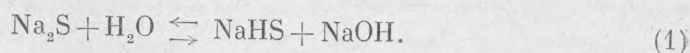
В присутствии кремнекислоты образующаяся щелочь связывается:



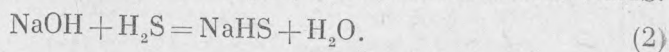
Нами были произведены опыты растворения золота в растворах гидросульфидов натрия и калия в зависимости от различных условий: агрегатного состояния золота, перемешивания раствора, концентрации сернистого натрия, температуры и присутствия различных минералов (сульфидов, кремнезема, карбонатов).

Опыты производились при температурах от 15 до 95° при атмосферном давлении в стеклянных колбочках с притертыми пробками. Нагревание осуществлялось в водяной бане с электрическим нагревателем и терморегулятором. Колбочка периодически встряхивалась особым приспособлением, приводившимся в движение моторчиком. Специально поставленными опытами установлено, что без перемешивания растворение золота идет гораздо медленнее.

Раствор гидросульфида готовился следующим образом. 2—4 г  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  растворялись в 25 мл воды (прокипяченной в течение 10 мин. для удаления воздуха во избежание окисления гидросульфида натрия в полисульфиды, в растворах которых золото нерастворимо), и затем в раствор пропускался сероводород в течение 1/2—1 часа. Сернистый натрий в растворе частично гидролизуеться:



При пропускании сероводорода NaOH образует новые количества NaHS:



Изучение растворимости золота от концентрации  $\text{Na}_2\text{S}$  в растворе показало, что растворимость растет до некоторого максимума; в концентриро-

Таблица 1

№ опыта	Материалы	Время в часах	Темп.	Убыль веса золота в г	Найдено зо- лота в ра- створе в г	Наблю- дения
1	3,5 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Прибли- тельно 10%-ный раствор	140	90°	0,0008	0,0008	Раствор светло- зеленый
2	3,5 г $\text{K}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Прибли- тельно 10%-ный раствор	140	90°	0,0007	0,0006	Раствор светло- зеленый
3	7 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Прибли- тельно 20%-ный раствор	138	90°	0,0010	0,0009	Раствор зеленый
4	10 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Прибли- тельно 30%-ный раствор	138	90°	0,0014	0,0012	Раствор желтый
5	15 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Прибли- тельно 40%-ный раствор	138	80°	0,0022	0,0020	Раствор зеленый
6	20 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Прибли- тельно 60%-ный раствор	137,5	80°	0,0026	0,0024	Раствор желтый
7	20 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Прибли- тельно 60%-ный раствор	163,5	80°	0,0028	0,0028	Раствор желто- зеленый
8	29 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Прибли- тельно 80%-ный раствор	142	90°	0,0014	0,0010	Раствор бесцветный
9	33 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Прибли- тельно 90%-ный раствор	143	90°	0,0002	0,0002	Раствор светло- желтый
10	20 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{3}{4}$ часа. Прибли- тельно 60%-ный раствор. Опыт без примесей	137,5	80°	0,0026	0,0026	Раствор желтый
11	21 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{3}{4}$ часа. Прибли- тельно 60%-ный раствор. Прибав- лено $\text{Na}_2\text{CO}_3$	140	80°	0,0012	0,0012	Раствор желто- зеленый. В осадке золота нет
12	21 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{3}{4}$ часа. Прибли- тельно 60%-ный р. створ. Прибав- лено 3 ч. $\text{CaCO}_3$	142	80°	0,0012	0,0010	Раствор желто- зеленый. В осадке золота нет
13	21 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 24 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{3}{4}$ часа. Прибли- тельно 60%-ный раствор. Прибав- лено 3 ч. $\text{CaCO}_3$	139,5	80°	0,0014	0,0013	Раствор желтый. В осадке золота нет

Таблица 1 (продолжение)

№ опыта	Материалы	Время в часах	Темп.	Убыль веса золота в г	Найдено золота в растворе в г	Наблюдения
14	21 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{3}{4}$ часа. Приблизительно 60%-ный раствор. Прибавлено 5 г кварца	133	80°	0,0134	0,0131 (из них в осадке 0,0045)	Осадок кварца фиолетово-черный. Раствор желтый
15	21 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{3}{4}$ часа. Приблизительно 60%-ный раствор. Прибавлено 3 г кварца	140	80°	0,0072	0,00725 (из них в осадке 0,00039)	Осадок кварца фиолетовый. Раствор желтый
16	21 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{3}{4}$ часа. Приблизительно 60%-ный раствор. Прибавлен 1 г пирита (-70+150 меш)	144	80°	0,0082	0,0074 (из них 0,0004 в осадке)	Раствор ярко желтый.

ванных растворах она снова падает и при большой концентрации щелочи доходит до очень малой величины. Объясняется это тем, что реакция (1) в крепком растворе  $\text{Na}_2\text{S}$  весьма затруднена; в растворе имеется много  $\text{Na}_2\text{S}$  и очень мало  $\text{NaHS}$ . Растворимость золота в растворе  $\text{Na}_2\text{S}$ , как показал Огрызло (7), ничтожна. Максимум растворимости золота находится в наиболее благоприятной для образования  $\text{NaHS}$  концентрации  $\text{Na}_2\text{S}$ . Результаты опытов сведены в табл. 1 (опыты 1—9).

Если растворимости золота мешает избыток щелочи, образующейся при реакции (1), то вещества, связывающие щелочь, должны способствовать растворению. Нами были проведены опыты, аналогичные предыдущим, в присутствии кварца и сульфидов. Растворимость золота значительно растет, если к раствору  $\text{NaHS}$  прибавить мелкоистолченный кварц\* или пирит (табл. 1, опыты 14—16). Наоборот, в присутствии углекислых солей растворение золота задерживается (опыты 10—13).

Наши опыты таким образом показали, что сульфиды и кварц не являются осадителями золота из гидросульфидных растворов. Наоборот, эти вещества способствуют растворению золота. Гидросульфидные растворы могут проходить через сульфидную зону без выделения золота. Более того, гидросульфидные растворы могут растворять золото, находящееся в сульфиде.

По отношению к кислотам гидросульфидные растворы неустойчивы: кислоты полностью выделяют из них золото в виде металлического осадка.

Было проделано несколько опытов для выяснения влияния агрегатного состояния золота на его растворимость в гидросульфидах. Оказалось, что при длительных опытах растворимость золота не зависит от агрегатного состояния; порошок золота и золотая платина растворяются одинаково.

\* Кварц был измельчен и просеян; для опытов была взята фракция -70+150 меш. Кварц был прокипячен в растворе соляной кислоты, тщательно промыт и прокален.

Наиболее интересным является зависимость растворимости золота в растворах гидросульфидов от температуры. Данные, приведенные в табл. 2 и на кривой (см. фигуру), показывают, что растворимость при 15° ничтожно мала, при 70° она вдвое больше и далее быстро растет, достигая при 300° величины в 600 раз большей, чем при 15°. Надо полагать, что рост растворимости будет продолжаться и далее до тех температур, при которых уже не могут существовать гидросульфидные растворы (порядка 400°).

Таблица 2  
Влияние температуры на растворимость золота в растворе NaHS

№ опыта	Материалы	Время	Темп.	Убыль веса золота в г	Найдено золота в растворе в г	Наблюдения
1	6 г $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20%-ный раствор	31 день	15°	0,0005	0,0004	Раствор желтый
2	25 мл 12%-ной КОН. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20%-ный раствор	31 »	15°	0,0003	0,0003	Раствор желтый
3	25 мл 12%-ного NaOH. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20%-ный раствор	31 »	15°	0,0003	0,0003	Раствор желтый
4	7 г $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20%-ный раствор	140 час.	70°	0,0007	0,0006	Раствор зеленый
5	7 г $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20%-ный раствор	138 »	80°	0,0010	0,0009	Раствор зеленый
6	6 г $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20%-ный раствор	90 »	200°	0,0323	Не опред.	Данные Огрызло (?) - Раствор желтый
7	6 г $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды. $\text{H}_2\text{S}$ пропускается $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20%-ный раствор	90 $\frac{1}{4}$ »	300°	0,0634	Не опред.	Данные Огрызло (?) - Раствор светлозеленый

Эти опыты разъясняют механизм выделения золота из термальных, растворов. Золото выделяется не в силу воздействия каких-то специфических осадителей, а в силу понижения растворимости его при понижении температуры растворов. Вследствие этого золото не связано ни с одним из минералов, находящихся в жилах, и может осаждаться в одинаковой мере на всех.

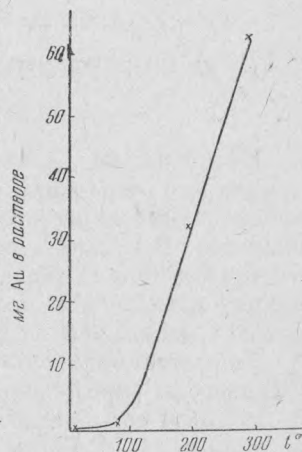
Вторым следствием из изложенного будет и то, что золото осаждается из растворов в металлическом состоянии.

Чем же объяснить то обстоятельство, что золото в жильных месторождениях встречается во всех минералах, все же преимущественно находится в пирите, арсенопирите и других сульфидах? Ответом на этот вопрос служат наши опыты с коллоидными растворами золота, опубликованные в 1938 г. (8). При медленном охлаждении золотоносных гидросульфидных растворов золото должно выделяться по всей вероятности в форме



очень мелких кристаллов, а в первоначальной стадии выделения в виде золь золота. Этот золь должен был соприкасаться с различными минералами, которые коагулируют золото. Согласно нашим опытам осаждение золота из золь наиболее интенсивно происходит при соприкосновении с сульфидами, особенно пиритом, галенитом, арсенопиритом. Другие сульфиды (халькопирит, сфалерит), кальцит, барит и кварц осаждают коллоидное золото гораздо хуже. Таким образом концентрация значительной части золота на сульфидах объясняется их воздействием на образующийся в первую стадию осаждения золь золота. Другая часть золота осаждалась на всех других минералах, присутствующих в жилах, в том числе зернах кварца.

А. Е. Ферсман дал геохимическую диаграмму золота (9). Согласно этой диаграмме золото может выделяться во все стадии гидротермального процесса; в большинстве месторождений золото является результатом кристаллизации в поздних его стадиях. Такое представление находится в полном согласии с нашими результатами. Мы также полагаем, что золото должно кристаллизоваться из растворов в промежутке температур от 400 до 150°, причем начало его кристаллизации зависит от степени насыщения золотом первоначального раствора. Если из магматического очага выходят ненасыщенные растворы, то, очевидно, золото будет выпадать из них лишь начиная с той температуры, которая соответствует точке насыщения, и закончится при температуре, где кривая (см. фигуру) делается пологой. Конец кристаллизации золота с нашей точки зрения во всех случаях должен соответствовать этой нижней температурной границе и не может обрываться ранее. Это последнее положение соответствует наблюдениям над выделениями золота в различных жильных месторождениях (10), в том числе и в «глубинных березитовых жилах» Березовского месторождения (11).



**В ы в о д ы.** 1. Изучена растворимость золота в растворах гидросульфидов щелочей и влияние на нее различных условий. Установлено, что растворимость быстро растет с температурой. Растворению золота способствуют реагенты, связывающие свободную щелочь (сульфиды, кварц).

2. Разъяснен механизм переноса и осаждения золота из термальных растворов. Золото осаждается вследствие падения растворимости его с температурой, а не осадителями; поэтому золото не связано с какими-либо определенными минералами золотоносных жил. Обогащение золотом сульфидов происходит в силу более быстрой по сравнению с другими минералами коагуляцией ими золь золота.

Поступило  
25 I 1940

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Цитир. по Len her (5). <sup>2</sup> S key, Trans. New. Zealand Inst., 5, 382 (1872).  
<sup>3</sup> Eggleston, Trans. Amer. Inst. Min. Eng., 9, 640 (1880—81). <sup>4</sup> Becker, Amer. Journ. Soc., (3), 33, p. 207 (1887). <sup>5</sup> Len her, Econ. Geol., 7, p. 746 (1912).  
<sup>6</sup> Leversidge, Journ. of the Royal Soc. of New South Wales, 27, p. 303 (1893).  
<sup>7</sup> Ogryzlo, Econ. Geol., 30, p. 400 (1935). <sup>8</sup> О. Е. Звягинцев и И. А. Паульсен, ДАН, XXI, № 4 (1938). <sup>9</sup> А. Е. Ферсман, ДАН, А, № 8 (1931).  
<sup>10</sup> С. А. Юшко, Труды Геол. ин-та АН СССР, VIII, стр. 151—192 (1938).  
<sup>11</sup> П. Кутюхин, Вещественный состав руд Березовского месторождения и типы кварцевых жил, Свердловск, 1937 (Отчет ГУУЗа НКТП, Свердловск. Горн. ин-та).