

ЭН
А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
И Н С Т И Т У Т О Б Щ Е Й И Н Е О Р Г А Н И Ч Е С К О Й Х И М И И

ЕВ_1941_AKS_150

О. Е. ЗВЯГИНЦЕВ

ГЕОХИМИЯ ЗОЛОТА

АК.Р
4245

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА 1941 ЛЕНИНГРАД

Ответственный редактор
акад. А. Е. ФЕРСМАН

ВВЕДЕНИЕ

Сто лет тому назад известный ученый Берцелиус обратил внимание на важность изучения химических реакций, протекающих в земной коре, и на высокий интерес для теории и практики изучения поведения химических элементов в природе. Научную дисциплину, которая занимается этим изучением, Берцелиус тогда же, вслед за Шёнбейном, назвал геохимией. Однако подлинного расцвета геохимия дождалась лишь через сто лет после своего основания. Работы ряда виднейших ученых современности снова выдвинули вопросы геохимии на видное место. В нашей Стране Советов развилась своя школа геохимии, во главе которой стали акад. В. И. Вернадский и акад. А. Е. Ферсман. Молодая наука геохимия постепенно завоевывает в СССР видное место, вовлекая в изучение ряда важнейших вопросов теории и практики социалистического строительства молодые силы нового поколения ученых, выросших после Великой Октябрьской Социалистической революции.

Труды старшего поколения ученых дали канву общих законов и положений молодой науки. Одной из задач геохимиков второго поколения является углубление, уточнение, а где нужно — пересмотр этих законов на основе нового фактического материала, добываемого повседневно и в поле и в лабораториях. Особенно важным является сейчас накопление и обобщение материала по геохимии отдельных химических элементов. На первом месте стоят, конечно, такие элементы, которые имеют для нашего советского народного хозяйства важное значение. Геохимия таких элементов, как углерод, составляющий громадные энергетические ресурсы в виде нефти, каменного угля, торфа, древесины и т. д., как железо — основа тяжелой промышленности, золото, обеспечивающее наш кредит за границей, калий и фосфор — удобрения для сельского хозяйства, стоят сейчас на первом месте.

Настоящий очерк посвящается геохимии золота, т. е. главе геохимии, которая трактует о поведении его атомов в земной коре.

Эта большая глава распадается на целый ряд более мелких частей. Прежде всего стоит частный вопрос о том, в ка-

кой форме находится золото в земной коре; второй — в каком количестве золото находится там; третий — как распределяется золото в различных зонах земной коры и каким образом оно, в зависимости от различных процессов, происходящих в земной коре, движется, мигрирует, где концентрируется, и, наконец, последний вопрос чисто прикладного характера: куда направить поиски золота? Все эти вопросы тесно связаны со свойствами атомов золота, и решение их будет зависеть от этих свойств.

К сожалению, имеющихся в настоящее время точных научных наблюдений и экспериментов далеко не достаточно, чтобы полностью осветить все названные вопросы геохимии золота. Можно только частями дать отдельные фрагменты общей картины движения золота в земной коре; одни части будут довольно хорошо выписаны, другие же останутся лишь бледными контурами и даже белыми местами.

Я не задаюсь целью дать геохимическое описание отдельных месторождений золота; мною в самых кратких чертах даны описания некоторых типичных месторождений. Я думаю, что геохимия отдельных месторождений должна быть предметом отдельных работ и даже монографий, каких в настоящее время имеется всего несколько.

Было бы очень хорошо, если бы этой моей работе предшествовало издание сводки по геологии золотых месторождений СССР, хотя бы подобной сводке Эммонса¹ для американских месторождений. Такой сводки, к сожалению, нет.

За последние годы появилось значительное количество исследований, посвященных отдельным месторождениям; из них многие являются весьма глубокими и интересными и с геохимической точки зрения. Я постарался использовать их в настоящем, весьма еще несовершенном очерке.

СВОЙСТВА ЗОЛОТА

От свойств золота зависит характер его отношения к другим элементам в земной коре. Поэтому прежде всего следует остановиться на физической и химической характеристике золота как химического элемента.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗОЛОТА

Строение атома золота, по Н. Бору, весьма сходно с его аналогами — серебром и медью и определяется следующими числами электронов:

¹ W. H. Emmons. Gold deposits of the World N. J., 1937.

В этой книге внеамериканским месторождениям уделена $\frac{1}{3}$ книги, из них на долю СССР отведено лишь 19 страниц.

Атомн. номер	Ряды кв. орб.	K_1	L_2	M_3	N_4	O_5	P_6
	Кв. числа	1	1.2	1.2.3.	1.2.3.4.	1.2.3.	1.2.3.
29	Медь	2	8	18	1		
47	Серебро	2	8	18	18	1	
79	Золото	2	8	18	32	2.6.10	1

Золото принадлежит к нечетным элементам и находится в первой группе периодической системы элементов Д. И. Менделеева. Валентность золота 1 и 3; первая вполне соответствует боровскому распределению электронов на квантовых орбитах и с положением в периодической системе; валентность 3 соответствует устойчивому сочетанию электронов 2—6—8. Повидимому, золото имеет склонность к переходу к атомному строению, соответствующему предыдущему элементу № 78 — платине — с отдачей трех электронов. Валентность 3 ведет к построению более устойчивых соединений, чем соединения одновалентного золота.

Атомный вес золота 197.2.

Удельный вес золота 19.3 является одним из самых больших среди химических элементов.

Атомный объем 10.22 принадлежит к очень малым величинам.

Кристаллическая решетка золота — куб с центрированными гранями с параметром решетки 4.070 Å (по Барт и Люнде),¹ весьма близким к радиусам атомов серебра, платины, мышьяка и некоторых других. Радиусы атомов очень часто определяют ассоциации элементов друг с другом в металлических решетках. Поэтому считаю не лишним сопоставить радиус атомов ряда элементов с этой величиной для золота:

Элемент	As	Mo	Pd	Ag	W	Pt	Hg	Au
Радиус атома в ангстремах	1.40	1.40	1.37	1.44	1.41	1.38	1.50	1.40

Радиус иона является весьма важной в геохимии величиной. Для золота должны существовать две таких величины Au^{+1} и Au^{+3} . Первая величина подсчитана на основании косвенных данных; она равна 1.37 Å или несколько больше. Большая поляризация не позволяет дать более точную цифру. Для иона Au^{+3} радиус иона не известен, так как трехвалентное золото известно только в виде комплексных ионов

¹ Barth и Lunde Z. phys. Ch., 121, 78 (1926).

$[\text{AuX}_4]^{-1}$, например $[\text{AuCl}_4]^{-1}$. Радиусы комплексных ионов этого типа не известны.

Цвет золота — блестящий желтый в отраженном свете и зеленый в проходящем — показывает на беспорядок в электронном хозяйстве его атомов в решетке¹ и аналогичен цвету меди, но не аналогичен цвету серебра.

Теория окраски золота и меди не дана.

Твердость золота весьма мала: по Бринелю при нагрузке в 100 кг твердость его равна 18; по Моосу 2—3. Золото легко деформируется при механических воздействиях, легко истирается, давая мелкодисперсные системы.

Коллоидные растворы золота устойчивы и, в зависимости от степени дисперсности частиц, окрашены в цвета от голубого до яркокрасного.

Физические свойства золота сведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Физические свойства золота

Атомный номер	79
Атомный вес	197.2
Удельный вес	19.3
Атомный объем	10.22
Кристаллическая решетка — куб с центрированными гранями.	
Параметр кристаллической решетки	4.070 Å
Радиус атома	1.40 Å
Радиус иона Au^{+1}	1.37
Радиус иона Au^{+3}	?
Твердость по Моосу	2—3
Твердость по Бринелю при нагрузке 100 кг	18
Температура плавления	1063°
Температура кипения	2600°
Коэффициент линейного расширения при 0°	14.6
Изменение (уменьшение) плотности при плавлении	5.2 %
Удельное электросопротивление в $\Omega/\text{см}$ при 18°	$2.21 \cdot 10^{-6}$
Теплопроводность при 0° в $\text{W}/\text{см} \cdot ^\circ\text{C}$	3.12
Отражательная способность в процентах для длины волны 5500 Å	85

СПЛАВЫ ЗОЛОТА

Система золото—серебро. Вследствие близости параметров кристаллической решетки золота и серебра эти металлы дают сплавы, представляющие непрерывный ряд твердых растворов во всех пропорциях. Диаграмма состояния системы золото—серебро приведена на рис. 1.

Система золото—медь. Золото с медью дают ряд сплавов, природа которых гораздо сложнее системы золото—

¹ А. Е. Ферсман. Цвета минералов, 1936, стр. 76.

серебро. Диаграмма состояния по Н. С. Курнакову, С. Ф. Жемчужному и Заседателю¹ изображена на рис. 2. При высокой температуре сплавы дают непрерывный ряд твердых растворов в любой пропорции компонентов. Однако сплавы, соответствующие 50 и 25 ат. % золота и близкие к ним, при отжиге при 360° превращаются в твердом состоянии в химические соединения $AuCu$ и $AuCu_3$. Многочисленные исследования различных свойств этой системы и рентгенографическое изучение решеток твердых растворов и химических соединений² подтвердили результаты Н. С. Курнакова с его сотрудниками и пролили свет на сущность превращений в твердом состоянии. Твердый раствор представляет собой кристаллическую решетку, где атомы меди и золота структурно равноценны и не упорядочены друг относительно друга.

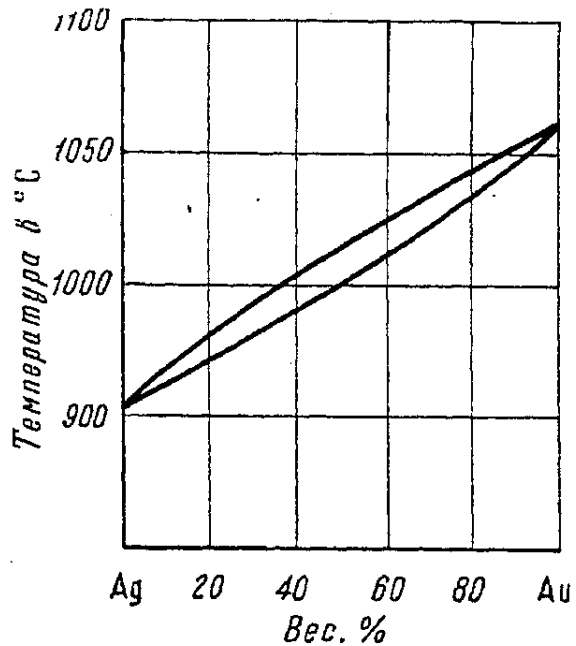


Рис. 1. Система золото—серебро.

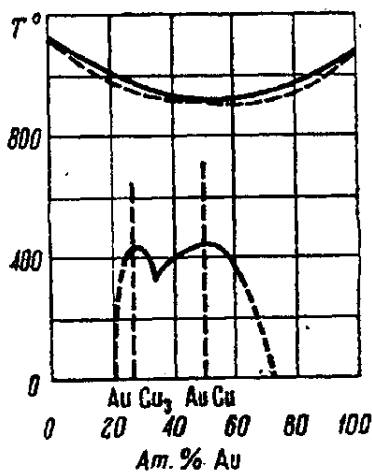


Рис. 2. Система золото—медь.

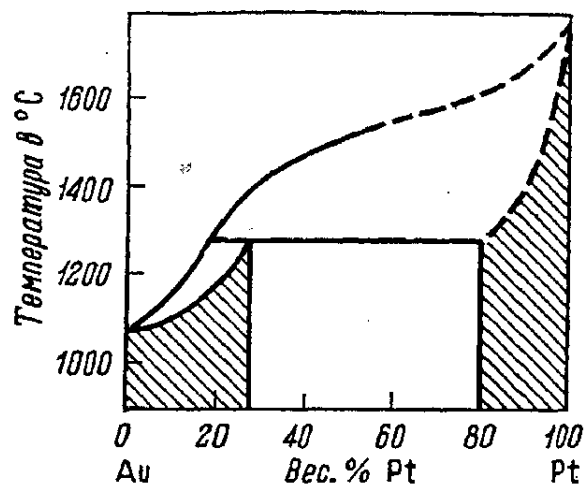


Рис. 3. Система золото—платина.

В химическом соединении мы имеем упорядоченную решетку, где атомы золота и меди имеют свои места и не заменяют друг друга. В области, близкой к составу химических соеди-

¹ Н. С. Курнаков, С. Ф. Жемчужный и Заседателев. Изв. СПб. политехн. инст., 22, 487 (1914). Inst. of Metals, 15, 305 (1916).

² Sedsfröm, Ann d. Phys., 75, 549 (1924) Johanson u. Linde, Ann d. Phys., 78, 439 (1935); 82, 449 (1927).

Naughton a. Payne J. Inst. of Metals 44, 457 (1931); Kurna kow a. Ageew. Там же, стр. 481.

нений, но не точно им соответствующей, отожженные сплавы имеют решетку с различной степенью упорядоченности.

Система золото—платина по Деринкелю¹ и Григорьеву² представляет собой в твердом состоянии три области (рис. 3): область твердых растворов золота в платине (см. правую часть рисунка), распространяющаяся до 20 вес. % золота,

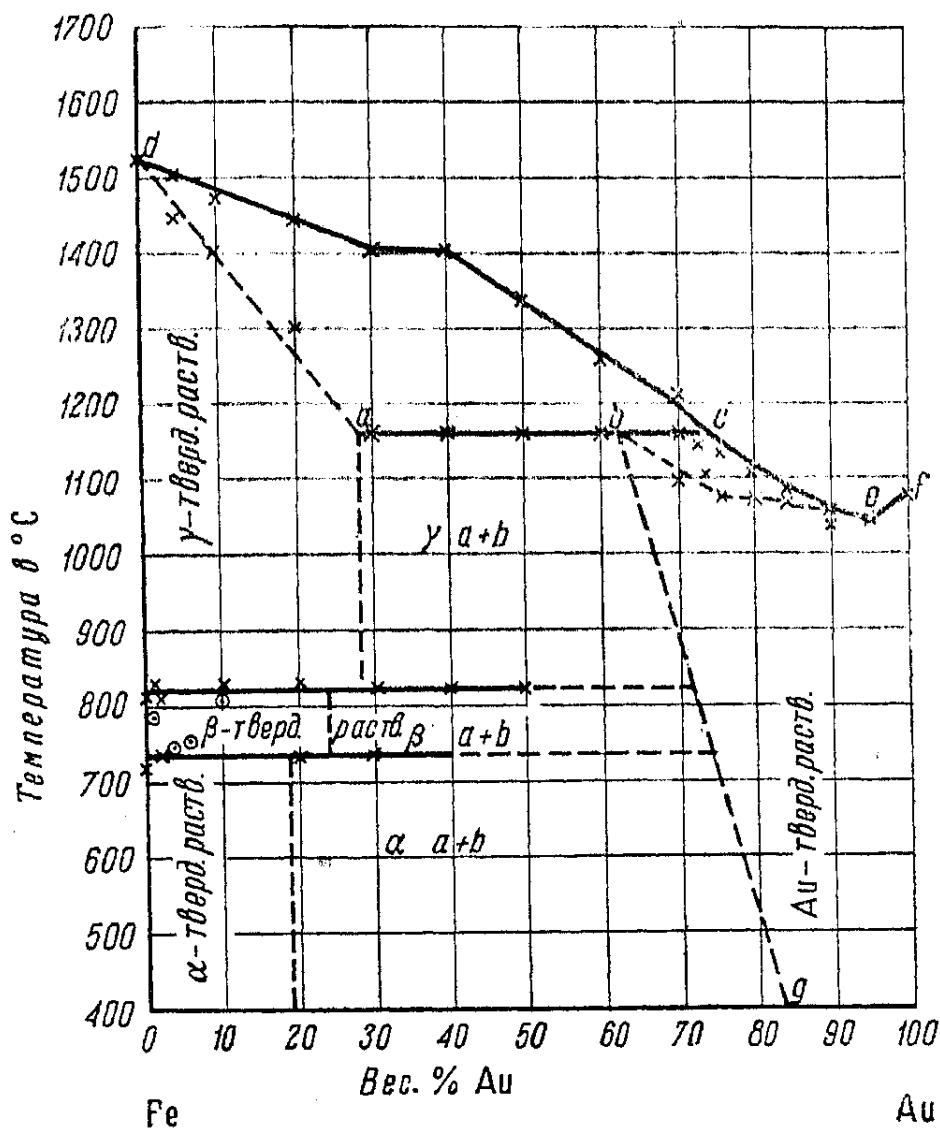


Рис. 4. Система золото—железо.

область твердых растворов платины в золоте, доходящая до концентрации 25 вес. % платины, и третья область, промежуточная, где имеется механическая смесь двух насыщенных твердых растворов.

Система золото—палладий³ аналогична системе золото—серебро, т. е. представляет непрерывный ряд твердых рас-

¹ Doerinckel, Z. anorg. Ch., 54, 345 (1907).

² Григорьев. Изв. Инст. платины, вып. 6, 184 (1928).

³ Gebel. Z. anorg. Ch., 69, 38 (1911). Holgerson u. Sedsfröm. Ann. d. Phys., 75; 143 (1924).

творов. При сходстве кристаллической решетки обоих компонентов и близости их атомных радиусов это вполне понятно.

Нет смысла рассматривать все изученные сплавы золота; я ограничусь еще несколькими системами, имеющими значение в геохимии золота.

Система золото—железо изучена Исааком и Тамманом;¹ ее диаграмма состояния характеризуется теми же свойствами, что и диаграмма золото—платина. С обеих сторон, богатой железом и богатой золотом, имеются области твердых растворов: при высоких температурах, близких к пла-

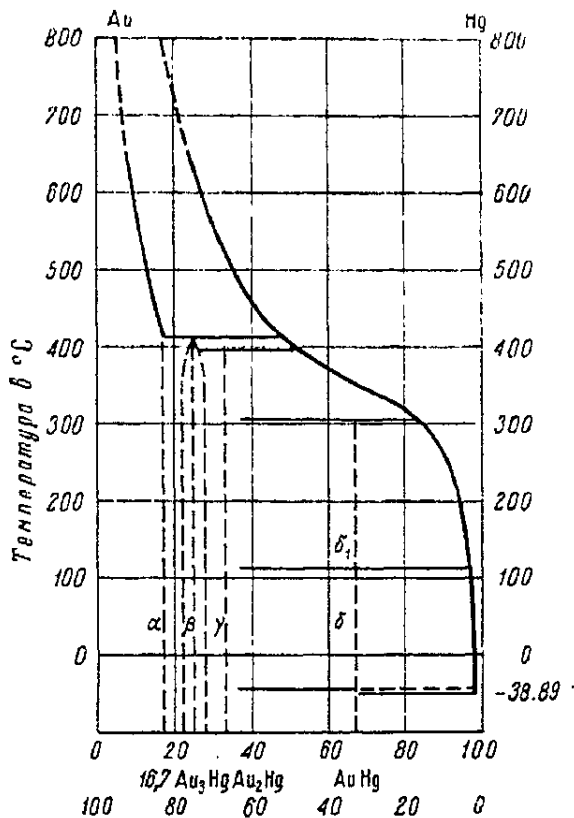


Рис. 5. Система золото—ртуть.

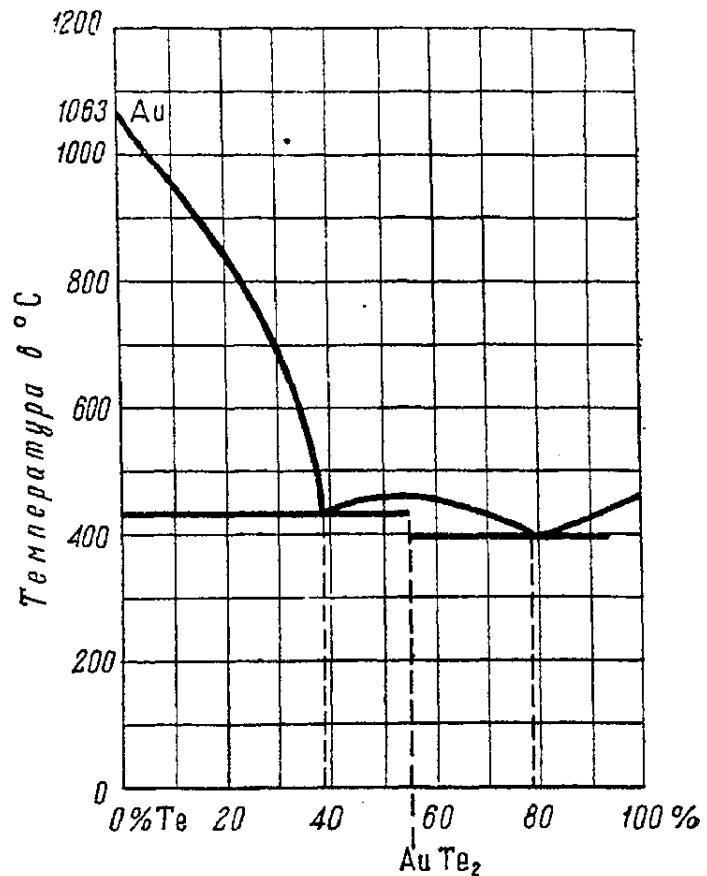


Рис. 6. Система золото—теллур.

влению, растворимость золота в железе достигает до 28%, при температуре ниже 600° растворимость падает до 18%. Железо растворяется в золоте при высокой температуре более чем на 30%, при низких температурах растворимость падает до 20%. Твердый раствор золота в железе претерпевает полиморфные превращения, соответствующие превращениям железа.

Диаграмму состояния системы золото—железо см. на рис. 4.

Система золото—ртуть интересна, так как в природе встречаются природные амальгамы золота. И. Н. Плаксин²

¹ E. Isaak u. G. Tamman. Z. anorg. Ch., 53, 294 (1907).

² И. Н. Плаксин. ЖРХО, 61, 521 (1929). Изв. сектора физ.-хим. анализа, X, 129 (1938).

И. Н. Плаксин. О взаимодействии сплавов и самородного золота со ртутью и цианпестыми растворами. 1937, стр. 24.

на основании термического анализа системы доказал, что ртуть образует в золоте твердый раствор предельной концентрации — 16 ат. % ртути. Компоненты образуют три химических соединения: AuHg_2 , Au_2Hg и Au_3Hg . Два первых соединения могут существовать лишь при высоких температурах и разлагаются при охлаждении сплавов. Растворимость золота в ртути при низкой (комнатной) температуре находится в пределах 0.15—0.20%. Диаграмма состояния системы золото—ртуть приведена на рис. 5.

Наконец, необходимо рассмотреть систему золото — теллур, так как золото в природе не редко встречается в виде теллуристых соединений. Диаграмма состояния этой системы, по Розе,¹ приведена на рис. 6. Золото с теллуром образуют химическое соединение AuTe_2 ; оно содержит 44% золота и плавится при 470°. Соединение образует с золотом эвтектику, содержащую 39% теллура и плавящуюся при 450°; другая эвтектика, образованная химическим соединением и теллуром, содержит 79% теллура и имеет температуру плавления 416°. Интересно отметить, что теллур и его соединения с золотом являются хорошими восстановителями золота из растворов его солей.

ХИМИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ ЗОЛОТА

Золото дает очень большое количество химических соединений, но для геохимических целей нет смысла рассматривать их все; достаточно остановиться лишь на немногих.

На металлическое золото действуют следующие реагенты:
хлор, бром, иод,
царская водка,
кислоты в присутствии окислителей,
цианистые соли,
гидросульфиды щелочных металлов,
ртуть.

Для природных условий имеют значение только некоторые из этих растворителей: галоиды, главным образом хлор; кислоты в присутствии окислителей, а именно серная, селеновая, теллуровая, и гидросульфиды щелочей.

В предшествовавших работах² я указывал на чистые селеновую и теллуровую кислоты как на растворителей золота, но специальная экспериментальная проверка вопроса заставила

¹ Rose. Trans. Inst. Min. a. Met. — 17, 285 (1908). Pelabon a. Quercigh, J. Ch. Soc. — 100. 45 (1911).

² О. Е. Звягинцев. Совр. проблемы физикохимии и химич. технологии, сб. 3, изд. Университета им. Н. Д. Зелинского. 1939, стр. 49.

признать, что ни та ни другая кислота не является растворителем золота.¹

Растворы гидросульфидов щелочных металлов, по опытам Огрызло,² являются растворителями золота, особенно при высоких температурах.

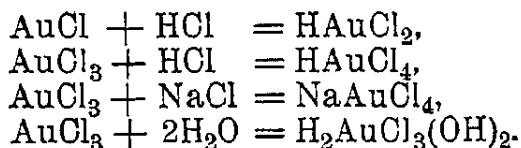
Ртуть как растворитель золота в природных условиях может играть лишь ничтожно малую роль.

Растворы сульфата окисного железа, как это установлено точными опытами, не растворяют золота и, таким образом, должны быть исключены из рассмотрения.

Некоторые органические вещества (кислоты), несомненно, растворяют золото. Так, например, гуминовые кислоты, соки, выделяемые корнями деревьев, должны действовать растворяющим образом на золото. Иначе нельзя объяснить появление золота в теле деревьев. Однако растворимость золота в этих веществах, несомненно, очень мала.

Более подробно реакции растворения золота соответствующими реагентами будут разобраны ниже при рассмотрении природных процессов.

При растворении золота под влиянием хлора образуются соединения AuCl и AuCl_3 , которые в растворах обычно ассоциируются с молекулами кислот и воды или с молекулами солей:



Форма, в которой находится золото в гидросульфидных растворах, не изучена. Можно предположить, что там имеется соединение сульфоаурат щелочного металла MeAuS ; однако весьма возможно, что существуют и более сложные соединения.

Все химические соединения золота непрочны и легко восстанавливаются при нагревании и различными восстановителями: металлами, теллуrom, сернистым газом и мн. др. Так, AuCl_3 при 185° отдает часть хлора и переходит в AuCl , которое при 220° теряет последний хлор.

Теплоты образования галоидных соединений золота таковы (в больших калориях на граммолекулу):

$\text{AuCl} \dots +$	5.81
$\text{AuBr} \dots -$	0.08
$\text{AuJ} \dots -$	5.52
$\text{AuCl}_3 \dots +$	22.02
$\text{AuBr}_3 \dots +$	8.85

¹ О. Е. Звягинцев и Е. А. Яковлева. Докл. Акад. Наук СССР. 1939, XXV, № 5, 401.

² Econ. Geol., 30, 400 (1935).

Теплота образования окисла Au_2O_3 отрицательна и равна — 12.3 ккал на 1 грамм-молекулу.

Это значит, что золото в свободном состоянии имеет меньшую энергию, чем связанное золото. Следовательно, золото в виде металла в обычных условиях находится в устойчивом состоянии.

Сульфиды золота Au_2S и Au_2S_3 получаются при действии сероводорода на соответствующие соединения одно- и трехвалентного золота. Сульфиды чрезвычайно непрочны и легко распадаются с образованием металлического золота. В природе сульфидов золота не найдено.

Нормальный потенциал Au^{+1} равен 1.55 V, нормальный потенциал Au^{+3} равен 1.38 V.

ПОВЕДЕНИЕ ЗОЛОТА В ПРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Геохимический характер золота выявляется довольно ясно при наблюдении за его поведением в ходе металлургических процессов.

В медноплавильных печах при переработке сульфидных медных руд, содержащих золото, последнее переходит в штейн, а затем в черновую медь. В шлаках практически не остается золота. Этим обстоятельством пользуются для обработки кварцевых золотых руд; их прибавляют вместо кварцевого флюса; золото после плавки сосредоточивается в металле, из которого впоследствии извлекается при рафинировании меди электролизом.

Так же ведет себя золото и при свинцовой плавке. Свинец является превосходным коллектором золота. Но если в процессе плавки образуется шпейза и штейн, то часть золота остается в них и не попадает в свинец. Это указывает на халькофильные свойства золота наряду с его ярко выраженным сидерофильным характером.

Весьма интересна судьба золота при разделительной плавке медно-никелевых руд. Эти руды подвергаются первой рудной плавке на штейн, затем плавятся в конверторах на фاینштейн. Последний содержит медь и никель, бывшие в руде, но значительно меньше железа и серы; его подвергают разделительной плавке с сернистым натрием. Сплав с сернистым натрием выливают в большие изложницы, где происходит расслаивание сплава на два: верхний — „топ“, содержащий сульфиды натрия и меди, и „ботом“, содержащий сульфиды натрия и никеля. Топ и ботом в дальнейшем идут на получение из них меди и никеля. Благородные металлы, находящиеся в руде, переходят в фاینштейн, а

при разделительной плавке разделяются: металлы платиновой группы (главным образом платина и палладий) переходят в „ботом“, а золото и серебро в главной своей массе переходит в „топ“, богатый медью. В шлаках рудной и конвертерной плавки золота практически нет. Здесь можно наблюдать весьма интересное свойство золота сопутствовать меди и не следовать за никелем.

Судьба золота в процессе доменной плавки не была никем прослежена вследствие отсутствия к этому вопросу непосредственного практического интереса. Но из предыдущего ясно, что золото должно попасть в чугун, который и растворит находившееся в руде золото. Возможность такого растворения ясна из диаграммы золото—железо.

ЗОЛОТО В МЕТЕОРИТАХ

Очень хорошо обнаруживаются геохимические свойства золота при рассмотрении анализов метеоритов.

В табл. 2 дано содержание благородных металлов в сульфидной и металлической частях тех же метеоритов (троилите и шрейберзите).

Таблица 2*

Содержание благородных металлов в троилите и шрейберзите

Название метеорита	Содержание благородных металлов в граммах на тонну							
	Ru	Rh	Pd	Ag	Os	Ir	Pt	Au
Троилит из Коагуилы	1—5	1	1	5	—	—	1—10	5—1
Железо „ „	10	5	10	5	2	10	10—100	5—1
Троилит из Кооризатило	—	0.2	0.2	10	—	—	0.2	0.5
Железо „ „	5	5	10	5—10	5	5	10	5—10
Троилит из Каньона Дяболо	0.5	0.2	0.5	10	—	—	0.5	0.5
То же	0.5	0.2	0.5	10	—	—	0.5	0.5—1
Железо, оттуда же	10	5	5—10	5	5	5	10—100	5
Шрейберзит из Юлио де Морейра	5	5—1	5	10	—	—	1	1
То же	5	5	5	10	—	—	1.5	1
Железо, оттуда же	10	10	10	5	5	1	10—100	10

В табл. 3 приведено содержание благородных металлов в метеоритах различного происхождения.

Из таблиц ясно, что золото проявляет сидерофильный характер, но на ряду с этим обладает также и халькофильными свойствами.

* Таблица взята из работы Гольдшмидта и Петерса. W. M. Goldschmidt u. Cl. Peters. Nachr. Ges. d. Wiss. Göttingen. Nat.-Phys. Kl. 377 (1932). (Перевод в Изв. Инст. платины, вып. 12, 1934).

Таблица 3*

Содержание благородных металлов в железных метеоритах**

Место находки метеорита	Вид метеорита	Содержание благородных металлов в граммах на тонну							
		Ru	Rh	Pd	Ag	Os	Ir	Pt	Au
Коагуила, Болсон де Малими, Мексика	Гексаэдрит	10	5	10	5	?	10	10—100	5—1
С.Юлио де Морейра, Португалия	Октаэдрит	10	10	10	5	5	?	10—100	10
Монт Джой, Пенсильвания, США	"	5—10	5	10	5	>5	1	10—100	5—10
Ариспе, Мексика	"	10	5	10	5	?	10	10—100	5—1
"	"	10	5	10	1—5	5	10	10—10	5
Корризатилю, Чили	"	5	5	10	5—1	>5	5	10	5—10
Магура (Арва), Чехословакия	"	10	5	5—10	5	5	5	10—100	5
Каньон Дьябло, Аризона, США	"	10	5	5—10	5	5	5	10—100	5
Каньон Дьябло, США	"	10	5	5	1	5	5	10	5
Крайбурн, Виктория, Австралия	"	10	5	10	1	—	5	10	5
Кранбурн	"	10	5	10	10	—	—	10	5
Савик, Кап-Йорк, Гренландия	"	10	5	5	10	>5	10	10—100	5
Толюка, Мексика	"	5	0.5	10	1	—	1	1	10
Н. Гуреима, Судан	"	5	1—5	5	1	—	1	5—10	1
Моредаль, Норвегия	Атаксит	5	5	10	5	—	1	10	5
То же, др. части того же куска	"	5	5	10	1—5	5	1	10—100	5—10
Капланд, Ю.Афр.	"	10	5—0	10	5—10	5	10—100	100—10	1
Хоба, Ю.Зап.Афр.	"	10	5—10	10	1	5	10	100—10	0.5
Медведево, Красноярск, Сибирь	Железо из паллисита	5	5	10	1—5	—	—	5	5
То же, другой кусок	"	5	1—5	10	5—1	5	1	5	5
Бренгам, Канзас, США	"	5—10	5	10	1	5	5—1	10—100	10—5
Эстервиль, Iowa, США	Железо из сидеролита	10	5	10	1	5	1	10	1—5
Мексика, Ixtlahuaca	Троилит	5	1	2	25	8	1	6	0.2
Каньон Дьябло, США	"	9	0.8	5	60	6	0.5	5	0.5
Теннансильм	"	20	+	0.5	5	10	+	0.3	+
Каньон Дьябло, США	Никелистое железо	8	—	—	8	3	—	18	1
Мекечир, Ю.Афр.	"	30	4	15	6	25	5	22	0

* Анализы 1—22 — М. Гольдшмидта и К. Петерса; анализы 23—27 — П. и В. Ноддак.

** Знак + обозначает, что элемент обнаружен качественно в количестве менее 0.002 кг на тонну.

Таким образом, золото по своему геохимическому характеру находится на границе сидерофильных и халькофильных свойств. Это вполне соответствует его положению на кривой

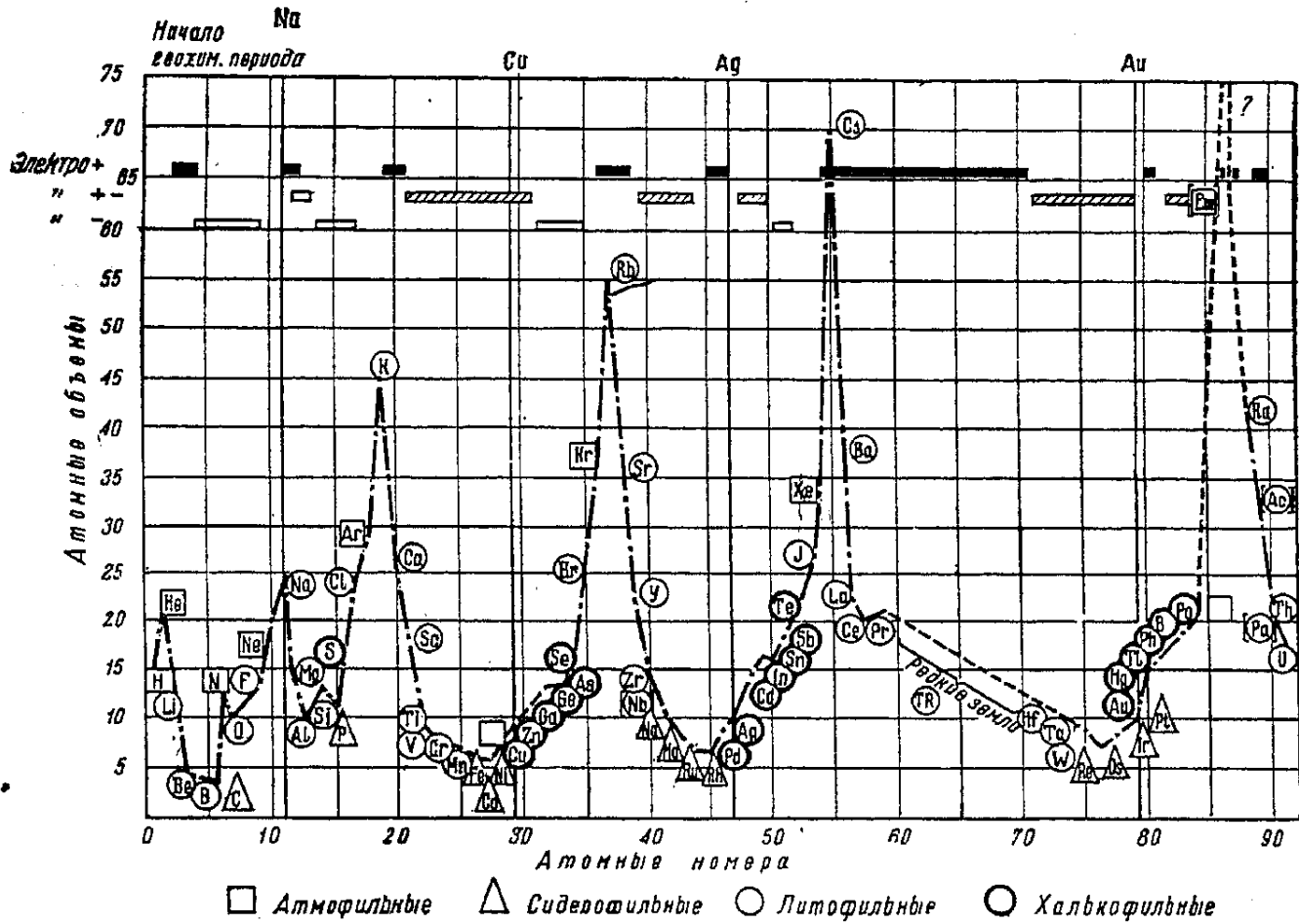


Рис. 7. Кривая атомных объемов.

атомных объемов (см. рис. 7): оно находится в самом начале восходящей ветви кривой. Ниже находятся типичные сидерофильные элементы, выше — халькофильные.

МИНЕРАЛЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ЗОЛОТО

Минералы, содержащие золото (табл. 4) можно классифицировать на следующие группы:

I. Минералы, в которых золото занимает определенное место в кристаллической решетке,

а) самородное золото, электрум и другие металлические минералы,

б) химически связанное золото (теллуриды).

II. Минералы, в которых золото является изоморфной примесью.

САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО

Самородное золото представляет собой частицы металлического золота самой разнообразной формы и величины, ме-

Таблица 4

Минералы группы золота

Название	Кристаллическая система	Состав в %	Уд. вес
Самородное золото . . .	правильная	Au 84—99, Ag 0.1—16	15.6—19.4
Самородное золото . . .	гексагональная	не изучено	
Электрум	правильная	Au 64—84, Ag 16—35	12.5—19.3
Порпоцит	"	Au 84, Pd 10	15.7
Родит	"	Au 57—66, Rh 43—34	15.5—16.8
Висмутаурит и мальданит	"	Au 64—65	8.2—12.9
Золотая амальгама . . .	"	Au 39	15.5
Светлые теллуриды:			
сильванит	моноклиническая	Au AgTe ₄	7.9—8.3
креннерит	ромбическая	(Au, Ag)Te ₂	8.4
калаверит	триклиническая	AuTe ₂	9.0
Темные теллуриды:			
нагнацит	ромбическая	Au ₂ Pb ₁₄ Sb ₃ Te ₇ S ₁₇ (?)	6.8—7.2
петцит	"	(Au, Ag) ₂ Te	8.7—9.4
Минералы, содержащие золото			
Теллуристое серебро (гессит)	кубическая	AgTe ₂ (Au 0.1)	
Колорадинит		HgTe (Au 3.5—7.7)	
Сульфиды Fe, Pb, Cu		очень мало	
Арсенопирит		" "	
Алтант		" "	

няющие химический состав в сравнительно широких пределах.

Самый большой самородок, найденный на Урале, весил 36 кг. В 1935 г. был найден на Урале самородок весом 13.8 кг (рис. 8), а в 1936 г. в коренном месторождении на Ю. Урале (Тыелгинский прииск) найдено два самородка весом 14.37 и 9.5 кг (рис. 9). На рис. 10, 11 изображены самородки меньших размеров, найденные на различных золотодобывающих предприятиях Советского Союза.

Химический состав самородного золота может быть охарактеризован следующими количественными данными (табл. 5).

Из таблицы видно, что обычной примесью к золоту в самородном металле бывают серебро, медь, железо. Остальные примеси незначительны и не обязательны в каждом анализе. Наиболее частые примеси: магний, мышьяк, теллур, висмут, реже: марганец, палладий, никель, ртуть и др. Наличие примеси, повидимому, связано с происхождением самородка. Количество элементов, найденных в золоте, очень невелико и не превышает 12—13. Все анализы, приведенные в табл. 5, относятся к самородному золоту из россыпей и коренных жиль-

Таблица 5

Состав самородного золота (минерала) различных месторождений СССР

№ обр.	Месторождение	Состав в %				Другие элементы
		Au	Ag	Fe	Cu	
119	Коммунар	94.24	4.34	0.30	0.20	<i>Mg</i>
132	"	88.01	1.05	0.52	0.75	<i>Mg</i>
282	"	93.98	1.8	0.37	0.13	<i>Ni, Co</i>
96	"	96.43	2.67	0.86	0.89	
283	Знаменитый	93.32	6.18	0.04	0.15	<i>Mg, In, Bi</i>
281	"	94.02	4.54	1.08	0.10	<i>In, Bi</i>
279	"	—	6.16	0.10	0.28	
277	"	93.52	4.92	0.03	0.25	<i>Mg, Mn, Bi, Te, As</i>
284	Случайный	87.16	10.77	0.39	0.27	<i>Mg, As</i>
771	"	91.20	9.90	0.36	0.05	<i>As, Sn, Mn</i>
474	Сарала	75.21	21.11	0.32	0.23	<i>Mg, In</i>
785	Центральное	94.38	4.31	0.27	0.07	<i>Pd</i>
784	"	88.49	11.40	0.37	0.45	
780	Марийская тайга	92.30	8.04	0.16	0.0	<i>Mg, Mn, As</i>
781	"	88.42	10.01	0.08	0.14	<i>Mg, As</i>
782	"	83.97	15.22	0.34	0.45	
786	"	63.64	39.04	1.03	0.09	
711	Майкаин	88.20	9.00	0.28	1.41	<i>As</i>
765	"	—	—	—	—	<i>Sn</i>
712	Баладжал	88.24	10.23	0.37	0.82	<i>Mg, Cr</i>
770	Балей (Каменка)	84.72	11.50	0.48	0.32	<i>Te, As</i>
700	Лена	94.79	7.38	0.03	0.25	<i>Mg, Mn</i>
701	"	91.56	7.80	0.05	0.11	<i>Mg, Ni</i>
715	Колыма (Мылга)	95.71	4.11	0.27	0.01	<i>Mg, Cr, Mn</i>
	Урал					
705	Сев. Заозерье	90.82	8.87	0.05	0.07	<i>Mg, In</i>
706	"	90.87	6.41	0.09	0.04	<i>Mg, Bi</i>
707	Лангур	93.59	6.70	0.52	0.38	<i>Mg, Bi</i>
787	Поповская сопка	84.14	9.71	1.09	0.75	<i>Mg, As</i>
788	"	89.37	8.99	0.27	0.1	<i>Mg, Cr, As</i>
703	Березовск	91.74	7.35	0.03	0.29	<i>Mg</i>
704	"	94.24	5.25	0.09	0.25	<i>Mg, Sb, As</i>
570	Карабаш I	79.72	1.4	0.01	19.41	<i>Mg, In, Cr, Ni, Sn, Mo, Pb, Mn, As</i>
	" II	69.72	2.03	0.05	21.67	<i>Mg, Ni, Mn, As</i>
	" III	—	—	—	—	<i>Mg, Ni, Mn</i>
772	Миасс	77.35	21.30	1.40	0.91	
709	"	83.45	14.40	0.25	0.88	<i>Mg</i>
710	"	92.04	7.8	0.11	0.05	<i>Mg, Cr</i>
713	"	92.79	7.21	0.15	0.84	
714	"	83.90	14.72	1.60	1.79	<i>Mg, Cr, Pb, Sb</i>
708	"	—	—	—	—	<i>Bi</i>
720	Кумак, Эрикбай	93.90	5.30	0.02	—	<i>Mg, Hg, Mn, Te, As</i>
725	"	—	—	—	—	<i>Mg, Pd, In, Sn, Hg, Mn, Bi, Te</i>
733	"	93.1	5.83	0.07	0.03	<i>Mg, Pd, Mn</i>
721	Кумак, штольня Коммерческая	93.14	5.75	0.40	0.90	<i>Mg, Ni, Cr, Hg, Mn, Te, As</i>

№ обр.	Месторождение	Состав в %				Другие элементы
		Au	Ag	Fe	Cu	
732	Кумак, штольня Коммерческая	—	—	—	—	<i>Mg, Pd, Ni, Mo</i>
722	Кумак, штольня Москаленко	—	—	—	—	<i>Mg, Cr, Ni, Mn, As</i>
726	Кумак, штольня Ефим	93.48	5.20	0.40	0.80	<i>Mg, In</i>
727	„ Французская	—	—	—	—	<i>Mg, In</i>
728	„ „ „	—	—	—	—	<i>Mg, Pd, Cr, As</i>
732	„ шахта № 2	89.74	9.98	0.28	1.28	<i>Mg</i>
750	„ „ „	95.17	5.45	0.00	0.007	<i>Mg, Ni, Cr</i>
741	„ Нарезная № 2	93.15	5.40	0.42	1.34	<i>Mg, Pd, In, Mo, Mn, Bi, Te</i>
723	„ Итальянская	—	—	—	—	<i>Mg, Bi, Te, As</i>
724	„ „	—	—	—	—	<i>Mg, Pd, In, Ga, Ni, Sn, Pb, Mn, Bi, Sb, Te</i>
740	„ „	92.30	6.38	1.12	0.47	Te
742	„ „	92.24	7.20	0.33	0.44	<i>Mg, Pd, Mo, Bi</i>
743	„ „	88.88	9.12	0.90	1.60	<i>Mg</i>
744	„ „	—	—	—	—	<i>Mg, Pd, Pb, Bi, Te</i>
745	„ „	91.77	8.98	0.69	1.34	<i>Mg, Mo, Te</i>
746	„ „	92.5	6.03	0.26	0.63	<i>Mg, Mo, Pb, Mn, Bi, Sb, Te</i>
748	„ „	—	—	—	—	<i>Mg, Ni, Cr, Bi, Te</i>
749	„ „	—	—	—	—	<i>Mg, Ni, Co, Mo, Pb, Mn, Bi, Te, As</i>
751	„ „	88.43	9.30	0.28	0.045	<i>Mo</i>
752	„ „	92.55	6.01	0.89	0.03	
1	Сев. Кавказ	83.63	13.17	0.13	0.29	
2	„ „	85.61	12.47	0.09	0.12	
4	„ „	82.12	13.64	0.13	0.18	<i>Mg, Mn</i>

Условные знаки: $Mn \approx 0.0001\%$

Mn $\approx 0.001\%$

Mn $\approx 0.01\%$

Mn $\approx 0.1\%$

Mn $\approx 1\%$

Примечание. Анализы выполнены сотрудником Нигризолото С. М. Певзнер, определения других элементов выполнено спектрографически В. В. Недлер (Отчет по теме „Состав и свойство самородного золота месторождений СССР“, Нигризолото. 1938).

ных месторождений. Анализов золота иного происхождения (из основных пород, из сульфидов магматического происхождения) не имеется.

По химическому составу самородное золото можно разбить на подгруппы:

- золото с малым содержанием примесей,
- медистое золото,
- серебристое золото.



Рис. 8. Старатель Пальцев с самородком золота весом 13 кг

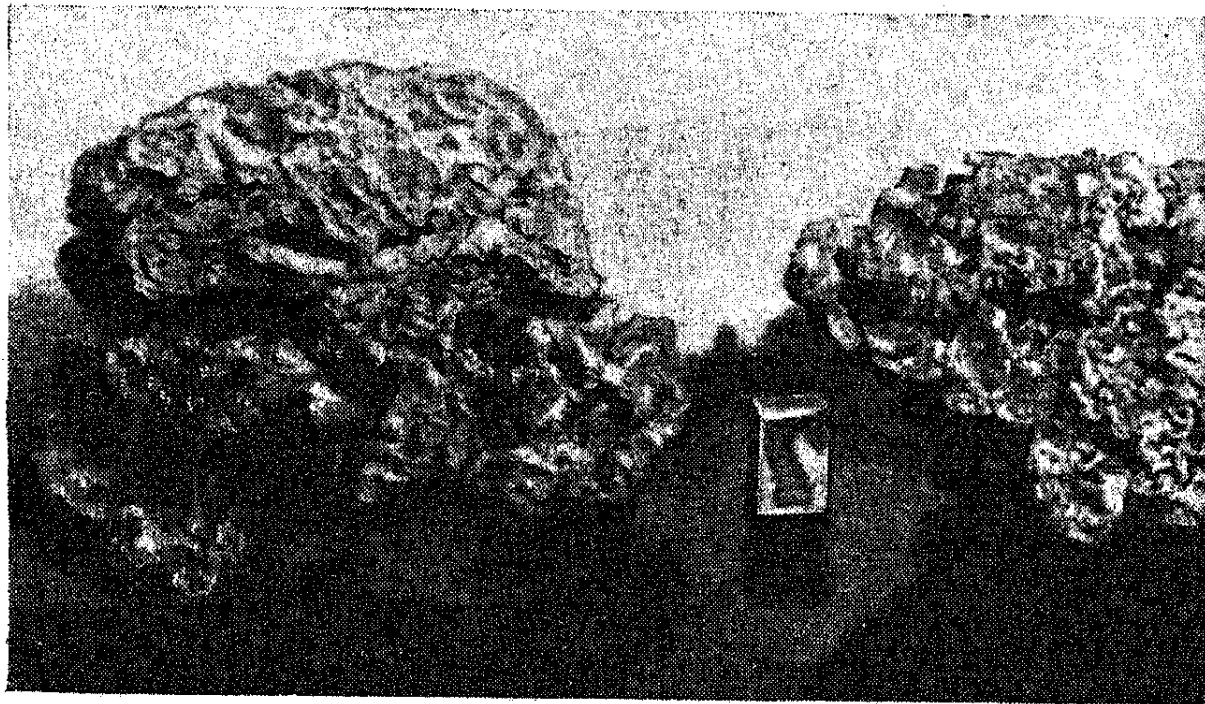


Рис. 9. Самородки золота Тьелгинского месторождения (Ю. Урал).

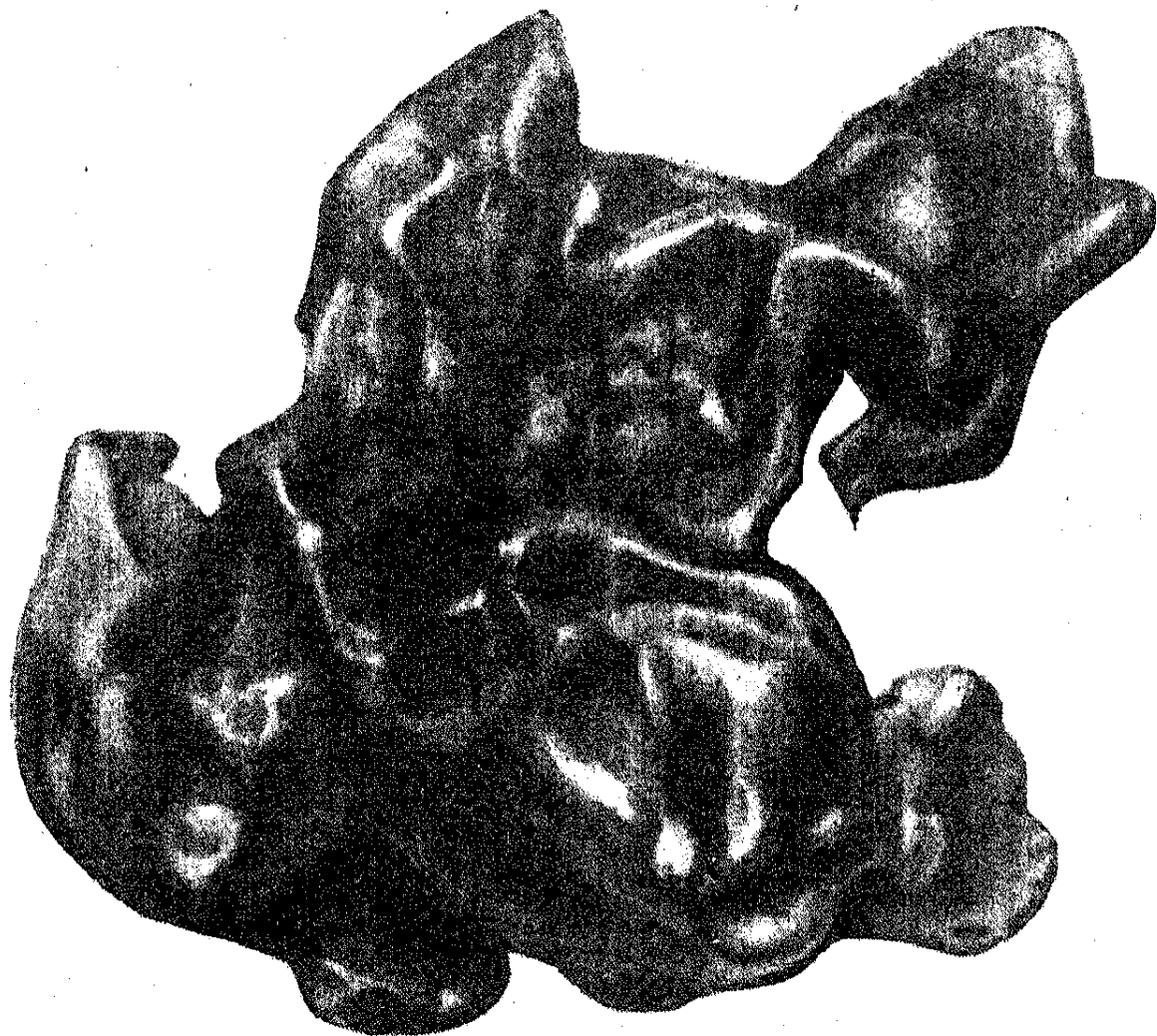


Рис. 10. Самородок золота весом 3345 г, найденный в октябре 1935 г. на Ю. Урале.

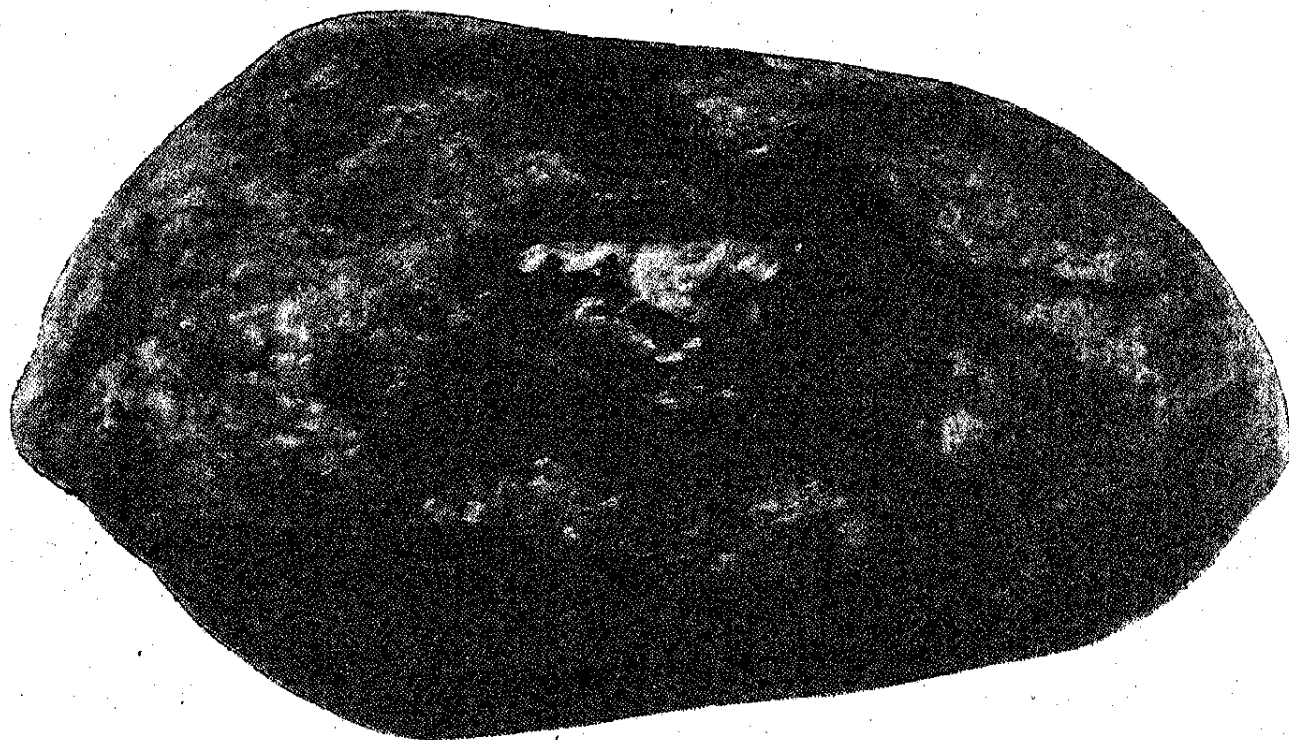


Рис. 11. Самородок золота весом 2403 г с Балыкских приисков.

Однако можно предложить и другую классификацию самородного золота в зависимости от его происхождения: можно выделить вид золота, наиболее распространенный — золото, отложившееся в жилах из горячих водных растворов; второй вид — золото, отложившееся (или переосажденное) в условиях низких температур в коре выветривания, и третий вид — золото, выделившееся из расплавленной среды (истинные сплавы золота). Очевидно, и по своей структуре и по химическому составу примесей и по физическим свойствам эти три типа золота должны быть различны. Но в настоящее время нет данных, чтобы полно охарактеризовать все три типа. Можно привести лишь данные некоторых авторов о первых двух типах.

Самородное золото изучалось Леверсиджем,¹ Маклареном и другими. Наиболее полные данные имеются в работе С. Ф. Жемчужного.² В табл. 6 (см. стр. 22) приведены вес, состав и некоторые свойства изученных С. Ф. Жемчужным самородков. К сожалению, происхождение самородков, изучавшихся этим автором, не было известно.

На основании своего исследования С. Ф. Жемчужный приходит к следующим выводам:

1. Исследование твердости самородков приводит к заключению, что они не выделились из расплавленного состояния, а образовались иным путем, вероятно путем кристаллизации из золотосодержащих водных растворов, образовавшихся путем растворения золота в серноокислых солях щелочных металлов или в сульфатах окиси железа, являющихся продуктами окисления золотосодержащих серных колчеданов. Из опытов Леверсиджа над выпадением золота из растворов хлораурата натрия вытекает, что золото способно осаждаться на золотых частицах в присутствии таких с первого взгляда индифферентных тел, как окись железа или кварц, не говоря уже о влиянии различного рода металлических сульфидов, графита и угля, которые имеют более или менее ясно выраженные свойства восстановительного характера.

2. Различное содержание серебра в самородном золоте объясняется присутствием более или менее сильных восстановителей золота. Более энергичные восстановители выделяли из растворов не только золото, но и труднее восстанавливаемое серебро.

3. Отсутствие зональной структуры самородков объясняется тем, что для зонального строения нужно было бы,

¹ A. Leversidge J. Roy. Soc. N. S. W., 27, 287—343 (1893).

² С. Ф. Жемчужный. Изв. Инст. физ.-хим. анализа, II, вып. 2, 5—28 (1922).

чтобы золото кристаллизовалось в замкнутом бассейне, который постепенно и закономерно менял бы концентрацию солей золота. Такие случаи могут быть редко. Как пример такого рода зонально построенного самородка автор приводит самородок, найденный в Сев. Каролине, один конец которого состоял из чистого золота, а другой из серебра, и между ними были, повидимому, все переходы.

Таблица 6

Состав и свойства золотых самородков (по С. Ф. Жемчужному)

№ самородков	Вес в г	Уд. вес кажущийся	Уд. вес истинный	% пустот по объему	Твердость по Бринелю		
					без обработки	отожженный	переплавленный
1	4670	17.94	18.46	2.5	33	19.1	26.5
2	3954	16.28	17.55	7.3	44.5	19.5	28
3	91.6	15.32	—	—	34	20.8	—

Химический состав в %

№ самородков	Au	Ag	Cu	Нераств. ост.	$Fe_2O_3 + Al_2O_3$	$CaCO_3$	Другие элементы
1	92.46	6.82	0.28	0.08	0.06	0.18	Мп незнач. колич.
2	89.25	9.38	0.50	0.55	0.11	0.06	
3	81.76	17.75	сл.	0.16	—	—	

4. „Исследование твердости золотых самородков позволяет сделать некоторые заключения не только относительно условий их генезиса, но также и о характере того месторождения, где они могли образоваться. Уменьшение твердости самородков при отжиге, как мы видели, указывает на то, что они подверглись действию сил, вызвавших в них остаточные деформации. Трудно допустить, чтобы таким деформациям они могли подвергаться в россыпи. Гораздо проще предположить, что золотые самородки образовались путем кристаллизации из золотосодержащих растворов в коренном месторождении и там же подверглись деформациям либо в период дислокации земной коры, либо под влиянием других механических причин, вызвавших разрушение коренного месторождения“.

Несмотря на то, что С. Ф. Жемчужным исследованы только три самородка, им дано основное направление работ по генезису самородков и указаны основные пути.

Не отрицая возможности образования самородков в россыпи, С. Ф. Жемчужный находит более правильным считать местом их образования коренные месторождения. Ю. П. Ивенсен в своей очень интересной работе¹ по изучению самородного золота задался целью найти различия между золотом, образовавшимся в коренных месторождениях, и золотом, осажденным в россыпи. Он изучил золото из следующих россыпей: Заблудящая, Шайтанка, Талица, Владимировская, Лангур из Северо-Заозерского приискового управления Уралзолото и семи приисков Миасского района Ю. Урала.

Ю. П. Ивенсеном были найдены золотины, отложенные в россыпи. Это золото отличается своей высокопробностью; оно отлагалось между минералами, находившимися в россыпи, и их цементировало.

Очень интересен самородочек платины, найденный в Сев. Заозерье (Владимировская россыпь), на котором отложилось золото.

Большая часть золота, находящаяся в россыпи, кристаллизовалась не в ней, а в коренной породе, откуда попала в россыпь в результате процессов разрушения и выветривания коренных месторождений. Переосаждение золота в россыпях, несомненно, имеет место, но не является широко распространенным. Весьма интересны находки коренного (первичного) золота, на котором с поверхности и в трещинах осаждалось вторичное золото в россыпи. Это указывает на то, что золото, растворившееся в растворах, омывающих россыпь, не уходит далеко от места растворения, а вновь осаждается тут же, на оставшемся нерастворенным золоте.

Кристаллическая структура золота, как россыпного, так и полученного из коренных месторождений СССР, несмотря на его различное происхождение, однотипна. Эта структура характеризуется отсутствием зональности, правильным равномерным ростом кристаллитов (дендритный ход кристаллизации наблюдается редко). Большое развитие получают двойники, парные и полисинтетические. Двойникование обычно развивается в плоскости октаэдра. Общий облик этих, безусловно, сингенетических структур чрезвычайно напоминает структуру рекристаллизованной после сильного наклепа латуни. Этим природное золото отличается от искусственного (литого) металла. Прихотливое распределение участков с преобладанием крупных одиночных или мелких и полисинтетических двойникованных кристаллитов подчеркивает неравномерное и

¹ Ю. П. Ивенсен. Опыт изучения морфологии и микроструктуры золота. Труды треста Золоторазведка и Инст. Нигрозолото, 1938, вып. 10, стр. 96.

чтобы золото кристаллизовалось в замкнутом бассейне, который постепенно и закономерно менял бы концентрацию солей золота. Такие случаи могут быть редко. Как пример такого рода зонально построенного самородка автор приводит самородок, найденный в Сев. Каролине, один конец которого состоял из чистого золота, а другой из серебра, и между ними были, повидимому, все переходы.

Таблица 6

Состав и свойства золотых самородков (по С. Ф. Жемчужному)

№ самородков	Вес в г	Уд. вес кажущийся	Уд. вес истинный	% пустот по объему	Твердость по Бринелю		
					без обработки	отожженный	переплавленный
1	4670	17.94	18.46	2.5	33	19.1	26.5
2	3954	16.28	17.55	7.3	44.5	19.5	28
3	91.6	15.32	—	—	34	20.8	—

Химический состав в %

№ самородков	Au	Ag	Cu	Нераств. ост.	$Fe_2O_3 + Al_2O_3$	$CaCO_3$	Другие элементы
1	92.46	6.82	0.28	0.08	0.06	0.18	Mn незнач. колич.
2	89.25	9.38	0.50	0.55	0.11	0.06	
3	81.76	17.75	сл.	0.16	—	—	

4. „Исследование твердости золотых самородков позволяет сделать некоторые заключения не только относительно условий их генезиса, но также и о характере того месторождения, где они могли образоваться. Уменьшение твердости самородков при отжиге, как мы видели, указывает на то, что они подверглись действию сил, вызвавших в них остаточные деформации. Трудно допустить, чтобы таким деформациям они могли подвергаться в россыпи. Гораздо проще предположить, что золотые самородки образовались путем кристаллизации из золотосодержащих растворов в коренном месторождении и там же подверглись деформациям либо в период дислокации земной коры, либо под влиянием других механических причин, вызвавших разрушение коренного месторождения“.

Несмотря на то, что С. Ф. Жемчужным исследованы только три самородка, им дано основное направление работ по генезису самородков и указаны основные пути.

Не отрицая возможности образования самородков в россыпи, С. Ф. Жемчужный находит более правильным считать местом их образования коренные месторождения. Ю. П. Ивенсен в своей очень интересной работе¹ по изучению самородного золота задался целью найти различия между золотом, образовавшимся в коренных месторождениях, и золотом, осажденным в россыпи. Он изучил золото из следующих россыпей: Заблудящая, Шайтанка, Талица, Владимировская, Лангур из Северо-Заозерского приискового управления Уралзолото и семи приисков Миасского района Ю. Урала.

Ю. П. Ивенсеном были найдены золотины, отложенные в россыпи. Это золото отличается своей высокопробностью; оно отлагалось между минералами, находившимися в россыпи, и их цементировало.

Очень интересен самородочек платины, найденный в Сев. Заозерье (Владимировская россыпь), на котором отложилось золото.

Большая часть золота, находящаяся в россыпи, кристаллизовалась не в ней, а в коренной породе, откуда попала в россыпь в результате процессов разрушения и выветривания коренных месторождений. Переосаждение золота в россыпях, несомненно, имеет место, но не является широко распространенным. Весьма интересны находки коренного (первичного) золота, на котором с поверхности и в трещинах осаждалось вторичное золото в россыпи. Это указывает на то, что золото, растворившееся в растворах, омывающих россыпь, не уходит далеко от места растворения, а вновь осаждается тут же, на оставшемся нерастворенным золоте.

Кристаллическая структура золота, как россыпного, так и полученного из коренных месторождений СССР, несмотря на его различное происхождение, однотипна. Эта структура характеризуется отсутствием зональности, правильным равномерным ростом кристаллитов (дендритный ход кристаллизации наблюдается редко). Большое развитие получают двойники, парные и полисинтетические. Двойникование обычно развивается в плоскости октаэдра. Общий облик этих, безусловно, сингенетических структур чрезвычайно напоминает структуру рекристаллизованной после сильного наклепа латуни. Этим природное золото отличается от искусственного (литого) металла. Прихотливое распределение участков с преобладанием крупных одиночных или мелких и полисинтетических сдвойникованных кристаллитов подчеркивает неравномерное и

¹ Ю. П. Ивенсен. Опыт изучения морфологии и микроструктуры золота. Труды треста Золоторазведка и Инст. Нигрозолото, 1938, вып. 10, стр. 96.

скачкообразное развитие кристаллизации золота в природных условиях.

Сходство структуры золота первичного из самых разных месторождений (С. Урал, Миасс, Балей и др.) и золота, пересаженного в россыпях, указывает на то, что кристаллизация золота в самых различных физико-химических условиях развивается по сходным путям.

Приведенные выводы Ю. П. Ивенсена являются чрезвычайно важными с геохимической точки зрения. Они подтверждают взгляды М. С. Фишера,¹ который в результате исследования большого числа образцов золота почти со всех частей земного шара, но, главным образом, из Новой Гвинеи, сделал заключение, что золото отложилось не в россыпи, а в коренной породе. Исключения весьма редки. Доказательством коренного происхождения золота Фишер считает присутствие в золоте включений, лишенных следов окатывания. Микроструктура россыпного и рудного золота, по Фишеру, оказалась идентичной.

Исследований, подобных предыдущим, природного золота, выделившегося из расплавленного состояния, не имеется.

МЕДИСТОЕ ЗОЛОТО

Состав медистого золота дан в табл. 5 под № 570; это довольно редкий минерал, найденный в СССР только в Карабашском золоторудном месторождении А. В. Николаевым и впоследствии анализировавшийся К. А. Ненадкевичем.² Состав

Таблица 7

Состав медистого золота

Составные части	Анализы					Атомн. эквивалент	Cu ₃ Au ₂	AgAu ₄
	I		II		III			
	1	2	1	2				
Золото .	74.33	74.92	64.72	74.95	74.94	3800	2.153	1647
Серебро .	4.49	4.53	3.92	4.53	4.53	411	—	411
Медь . .	20.39	20.55	17.72	20.53	20.53	3929	3229	—
Нераств. ост. . .	0.26	—	12.80	—	—	—	63.0	37.0
	99.47%	100%	99.169	100%	100%	—	64.0	36.0

Анализы: I — 1911 г., К. А. Ненадкевича; II — 1935 г., М. Н. Ложечкина; III — среднее из I и II; графы 2 — пересчет состава металлической части. Объяснение последних двух граф — в тексте.

¹ M. S. Fischer. Inst. of Min. and Met. Bull., 1935, № 365, 366, 367, 369, 370.

² К. А. Ненадкевич. Труды Геолог. музея Акад. Наук СССР, 1911, т. 5.

медистого золота, по К. А. Ненадкевичу и М. П. Ложечкину,¹ приведен в табл. 7, взятой из статьи М. П. Ложечкина.²

Исследования М. П. Ложечкина показали, что медистое золото Карабашского месторождения не однородно по своему составу: при микроскопическом исследовании обнаружено, что оно состоит из двух металлических составляющих. Первая — окисляется и чернеет при нагревании до 260—350°, вторая устойчива. Рентгенографическое исследование также показывает на неоднородность металла и дает для двух составляющих разные параметры кристаллической решетки: 3.83 и 4.06 Å. Подсчет количественного состава обоих минералов, составляющих карабашское медистое золото, дал следующие результаты: первый минерал представляет собой сильно медистое золото и содержит 32.5 вес. % меди; он составляет 63% от веса самородка. Второй минерал составляет 37% от веса самородка, содержит около 12% серебра и 88% золота. Медистый минерал М. П. Ложечкин предположил назвать купроауритом. Как образовалась такая механически неоднородная масса золота, пока сказать трудно.

СЕРЕБРИСТОЕ ЗОЛОТО И ЭЛЕКТРУМ

Как видно из диаграммы состояния золото—серебро (рис. 1), которая дает непрерывный ряд твердых растворов, нужно было

Таблица 8

Химический состав балейского золота (минерала) в процентах

Состав	Радиус атома Å	Обр. № 1 1-й горизонт	Обр. № 2 2-й горизонт	Обр. № 3 3-й горизонт	Обр. № 4 3-й горизонт	Обр. № 5 4-й горизонт
Золото . . .	1.40	69.83	73.62	73.06	75.91	74.71
Серебро . . .	1.40	19.53	22.48	22.81	20.10	20.63
Железо . . .	1.27	8.74	1.11	1.21	1.44	1.22
Медь	1.28	+	0.11	—	+	+
Сера	1.0	0.34	1.06	—	1.54	1.40
MgO + CaO.	—	1.55	1.29	1.79	1.16	1.56
Теллур . . .	1.33	0.18	0.4	0.3	0.58	0.7
Селен	?	+	+	+	+	+
Марганец . .	1.30	+	+	+	+	+
Платина . . .	1.38	0.09	—	менее 0.1	—	менее 0.1
Свинец . . .	1.70	0.16	—	0.21	0.62	0.18
Олово	1.55	—	—	+	—	—
Сурьма . . .	1.56	+	0.15	+	—	0.1
Мышьяк . . .	1.40	+	+	+	+	+

¹ М. П. Ложечкин. Труды Уральского филиала Акад. Наук СССР, 1935, вып. 4.

² М. П. Ложечкин. Докл. Акад. Наук СССР, XXIV, № 5, 45 (1939).

бы ожидать существования минералов, содержащих золото и серебро во всех пропорциях. Но в действительности известны минералы с содержанием серебра от долей процента до 35% и от 72 до 100%; в средней части составов минералов нет. Богатое серебром золото носит название электрума и довольно



Рис. 12. Микрофотография шлифа кварца с включением золота БалеЙского месторождения. Увеличение в 100 раз.

часто встречается в месторождениях золота Америки и Старого Света.

Самородное серебро в значительных количествах имеется в Мексике.

Отсутствие промежуточных минералов, повидимому, происходит либо вследствие их неустойчивости по отношению к природным растворителям, либо вследствие трудности осуще-

ствления в природе условий совместного выпадения из растворов минералов такого состава. Надо помнить, что большая часть известных нам минералов золота есть результат деятельности водных растворов, а не сплавы. Поэтому применение к ним закономерностей, относящихся к истинным сплавам, не может быть безоговорочно принято.

В СССР серебрястое золото в значительных количествах добывается в Балейском месторождении. Это золото было изучено в институте Гинзолото (Иркутск) и мною совместно с сотрудниками.¹ Химический состав балейского золота приведен в табл. 8 (см. стр. 25.)

Балейское золото представляет собой чрезвычайно мелкие частицы, вкрапленные в кварцевую породу, составляющую золотоносные жилы (рис. 12).

Кристаллическая структура и другие физические свойства самородного золота, медистого золота и электрума

Кристаллическая структура самородного золота, медистого золота и электрума одна и та же и характеризуется решеткой куба с центрированными гранями. Параметр этой решетки варьирует в зависимости от состава минерала в пределах от 4.06 до 3.83 Å.

Кроме кубического золота, было найдено гексагональное золото. Последнее описано А. М. Кузьминым.² Кристаллы были найдены на фабрике Берикуль при промывке илов в иловых отстойниках, откуда золотосодержащие циановые растворы поступают для осаждения золота цинком. Кристаллики золота имели размеры 0.2×0.25 мм; преимущественно развиты грани (1010) и (0001). Есть указания, что Дана в 1887 г. находил гексагональное золото в природных условиях. В 1939 г. С. К. Шабарин сообщил мне в беседе о находке очень маленького кристаллика гексагонального золота в руде, привезенного с прииска Берикуль.

Однако все же гексагональное золото должно считаться большой редкостью; оно совсем не изучено.

Чрезвычайно интересно соотношение некоторых физических свойств самородного золота коренных месторождений, изученных мною совместно с сотрудниками в Институте Нигризолото в 1938 г.³

¹ О. Е. Звягинцев, В. А. Волкова и О. Л. Писаржевская. Изв. Акад. Наук СССР, Сер. хим., 1938, № 2., 509.

² А. М. Кузьмин. Бюлл. Всес. хим. общ. им. Д. И. Менделеева, 1938, № 2, стр. 33.

³ Отчет Нигризолото по теме „Изучение самородного золота“, 1938 г. В работе принимали участие О. Е. Звягинцев, Ю. П. Ивенсен, С. М. Певзнер, В. В. Недлер.

В табл. 9 приведены данные о ряде изученных нами образцов самородного золота: в четырех первых графах указан состав образцов, в пятой графе — отражательная способность полированной поверхности образца, и в шестой — краевой угол смачивания этой же поверхности ртутью.

Из таблицы видно, что наблюдаемые свойства золота и химический состав его не стоят в прямой функциональной зависимости друг от друга. Сами же свойства — краевой угол смачивания ртутью и отражательная способность, зависящие от поверхностных свойств шлифа, — находятся в тесной связи друг с другом. На рис. 13 и 14 эта связь показана

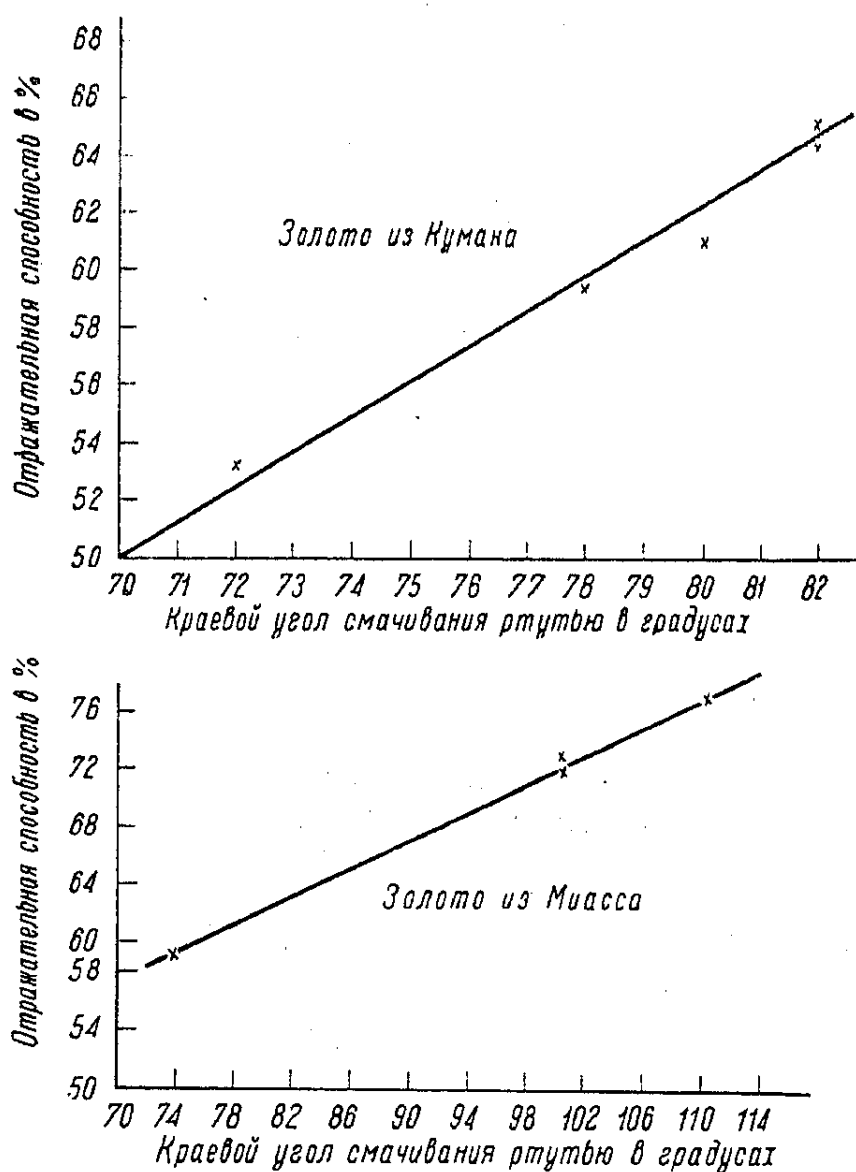


Рис. 13. и 14. Отражательная способность и краевой угол смачивания золота ртутью.

графически. Для золота одного и того же происхождения эта зависимость близка к прямолинейной. Но сравнивать между собой свойства золота различных месторождений нельзя,

Таблица 9

Отражательная способность и краевой угол смачивания ртутью для золота

Состав минерала в %				Отражательная способность в %	Краевой угол смачивания ртутью в °
золото	серебро	железо	медь		
Месторождение Кумак					
95.17	5.46	0.00	0.007	50.21	70
88.43	9.30	0.28	0.005	53.33	72
92.15	5.40	0.42	1.34	59.68	78
92.30	6.38	0.12	1.42	61.37	80
88.88	9.12	0.90	1.60	64.63	82
92.5	7.20	0.30	0.44	65.30	82
92.24	6.03	0.26	0.63	63.20	83
Мнасский район					
92.79	7.21	0.15	0.84	57.90	74
83.45	14.40	0.25	0.88	71.58	100
92.04	7.87	0.11	0.05	75.55	109

так как прямые для каждого из них имеют несколько различный наклон к оси абсцисс.

Найденную нами зависимость поверхностных свойств золота, может быть, возможно было бы использовать как диагностический признак при выборе технологической схемы извлечения золота из руд. Измерить отражательную способность золота в шлифе гораздо проще и быстрее, чем ставить опыты амальгамирования.

При изложении результатов работы С. Ф. Жемчужного было указано на важность исследования твердости золота для суждения о его происхождении. В нашей работе по изучению физических свойств самородного золота мы также обратили внимание на твердость. В табл. 10 приведены данные твердости по Викерсу семи образцов минералов.

Табл. 10 показывает (см. стр. 30), что между составом минералов и их твердостью есть некоторая зависимость, особенно ясно выраженная в отожженных образцах.

Соотношение между твердостью в естественном состоянии, отожженном и переплавленном полностью подтверждает приведенные выше данные С. Ф. Жемчужного, с тем, однако, дополнением, что мы имеем данные о золоте заведомо коренных месторождений, в то время как С. Ф. Жемчужный изучал золото неизвестного происхождения.

Наши измерения показывают, что наклеп золота происходит от сил давления в коренных месторождениях. Цифры,

приведенные в последней графе табл. 10, показывают, что самородное золото этих месторождений по физическим свойствам отличается от сплавов, происшедших из расплавленного состояния.

Таблица 10

Твердость самородного золота (по Викерсу)

№ обр.	Место-рождение минерала	Состав в %		Твердость по Викерсу			
		золо-то	сереб-ро	до отжига	после отжига		после пере-плавки
					однократ-ного	двукрат-ного	
715	Колыма . .	95.71	4.11	49.75	28.9	28.5	28.5
700	Лена . . .	94.79	4.87	43.7	21.0	19.6	27.7
704	Березовск .	94.24	5.26	44.6	21.1	—	24.9
701	Лена . . .	91.56	7.8	42.35	25.3	20.12	—
706	Сев. Зао-зерье . .	90.87	6.41	34.55	20.31	—	—
709	Миасс . . .	83.45	14.40	34.68	27.7	—	—
782	Маринская тайга . .	83.97	15.22	38.3	23.0	—	—

Было бы чрезвычайно интересно провести подобного рода измерения над золотом иного происхождения: с одной стороны, из месторождений, в которых золото закристаллизовалось из расплавленного состояния, и, с другой стороны, с золотом, переосажденным в процессе выветривания коренных месторождений или в россыпях („вторичное золото“). Однако эта весьма важная работа не была проделана.

Кроме теоретического интереса, названные измерения принесли бы и несомненную пользу в практике геологоразведочного дела, так как позволили бы определять золото различного происхождения („первичное“ и „вторичное“) и соответственно оценивать перспективы месторождений.

Весьма интересно явление, наблюдаемое в золотых частицах как из коренных месторождений, так и из россыпей, состоящее в том, что золотины на своей поверхности имеют пленку или слой иного состава, чем внутренняя часть зерна. В шлифах зерен золота, находящихся в неизменной вторичными процессами руде, этого явления не наблюдается. Руды же, подвергшиеся вторичным изменениям, и россыпи в своем составе имеют золотины с пленками.

Пленки на рудном золоте изучались И. Н. Плаксиным. Эти пленки имели в своем составе значительно больше железа, чем центральная часть зерна, и соответственно состав периферической части их был иной, чем центральной. В табл. 11

приведены данные И. Н. Плаксина о составе золотин центрального рудника по слоям.¹

Таблица 11

Состав золотин по слоям (по И. Н. Плаксину)

Наименование золотины	Слой	Содержание примесей в %			Качественно определено	Примечание
		Ag	Fe	Cu		
Магнитные золотины Центрального рудника	Периферический	4.0	2.0	следы	—	без обработки
	Центральный	6.0	0.3	следы	—	
Магнитные золотины Центрального рудника	Периферический	8.0	следы	нет	—	после обработки 0.059 % раствором серной кислоты
	Центральный	14.0	0.1	следы	следы платины	
Золотины из хвостов после амальгамации шлихов Центрального рудника в нейтральном растворе	Периферический	12.0	0.3	0.5	следы платины	без обработки
	Центральный	15.0	нет	следы	следы платины	

Пленки на золотилах, извлеченных из россыпных месторождений, наблюдались М. Фишером² и Ю. П. Ивенсеном.³ В противоположность наблюдавшимся И. Н. Плаксиным, эти пленки представляют собой слой золота более чистого, чем основная масса золотины.

На основании многочисленных наблюдений над россыпным золотом многих месторождений Ю. П. Ивенсен дает микрографическое описание высокопробных пленок, развивающихся на поверхности золотин и в межкристаллических пространствах внутри их. Происхождение этих пленок Ю. П. Ивенсен видит в явлениях электрохимической коррозии. Я остановлюсь на этих процессах ниже, при описании химических явлений в россыпях.

¹ И. Н. Плаксин. Взаимодействие сплавов и самородного золота с ртутью и цианистыми растворами. Металлургиздат. М.—Л., 1938. В этой работе сведены результаты работ автора и его сотрудников, напечатанные ранее в различных журналах и сборниках.

² M. S. Fischer. Inst. of Min. and Met. Bull. 1935, № 365 и сл.

³ Ю. П. Ивенсен. Труды треста Золоторазведка и Инст. Нигри-золото, 1938, вып. 10, стр. 96—133.

Форма золотых частиц, очевидно, не является решающим геохимическим фактором, но в некоторых случаях может иметь значение в процессах переноса золота (например „плывучее золото“ в виде тонких пластинок). Форма золотинок изучалась рядом американских геологов, и в известной сводке Дюнна¹ имеется целый атлас золотинок различной величины и формы.

И. Н. Плаксин и С. К. Шабарин² изучали форму зерен золота в рудах, главным образом, с точки зрения влияния

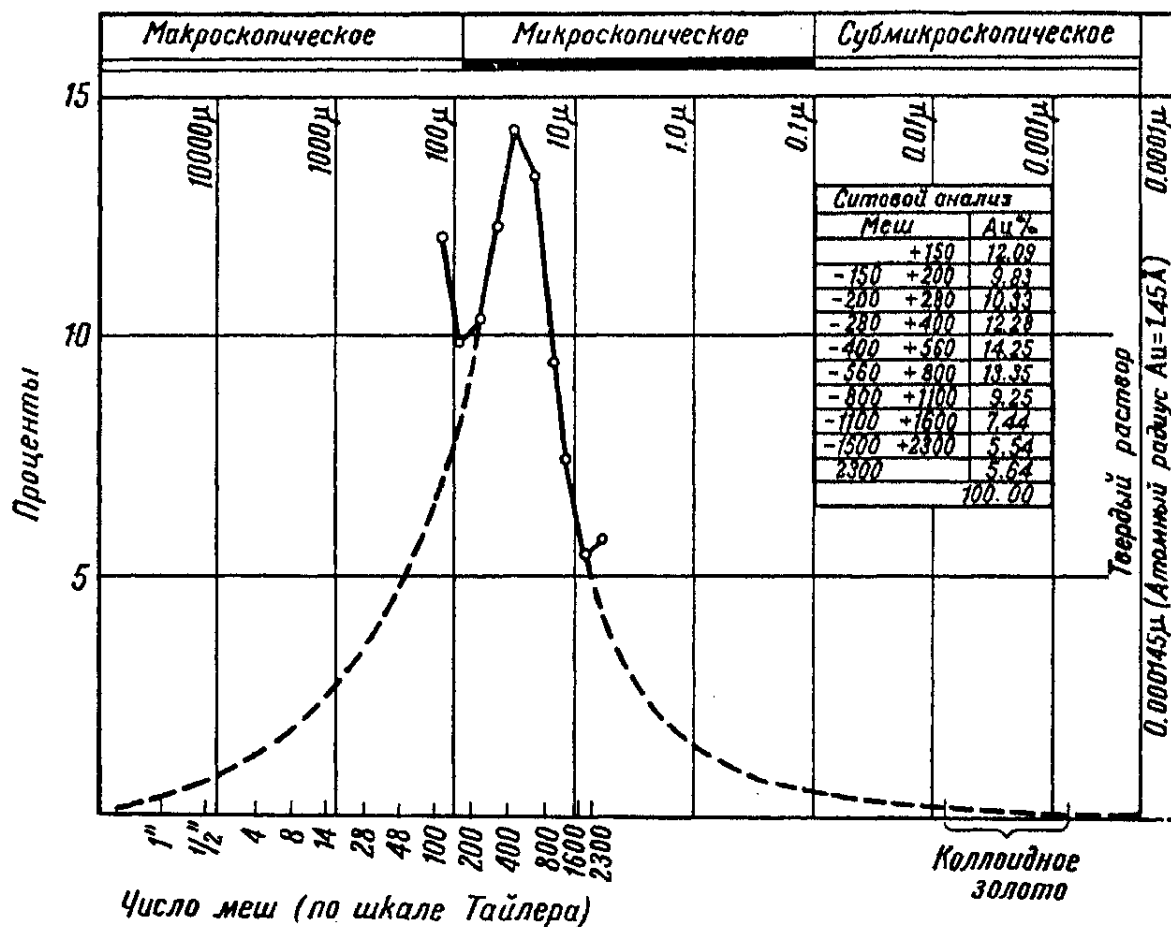


Рис. 15. Распределение золота по крупности зерен для пяти рудников Канады (по Хейкоку).

этого фактора на гидрометаллургические процессы. Они отличаются золотины следующих типов:

- а) золотины уплощенного типа,
- б) сфероидальные золотины,
- в) палочковидные золотины,
- г) неправильные золотины.

С геохимической точки зрения, следует отмечать золотины плотного строения и золотины рыхлые, пористые. Очевидно,

¹ E. J. Dunn. Geology of Gold. London, 1929.

² И. Н. Плаксин и С. К. Шабарин. Сов. золотопромышленность, 1934, № 8.

вторые могут подвергаться действию различного рода растворов гораздо более интенсивно, чем первые.

Величина зерен золота имеет существенное значение в геохимических процессах. По понятным причинам, исследованию подвергались минеральные частицы крупной величины. Только в самое последнее время появились работы, касающиеся распределения золота в рудах по величине частиц. Хейкок¹ занимался усовершенствованием методики изучения форм нахождения золота в рудах в связи с их обработкой. Им

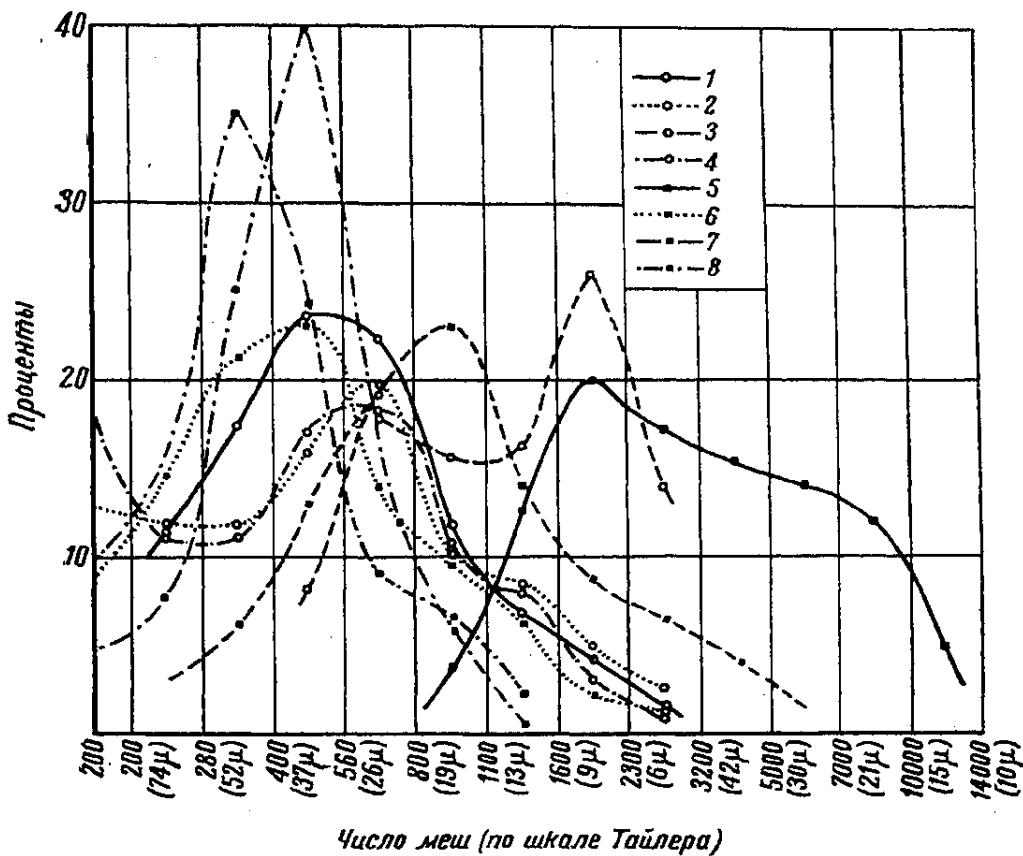


Рис. 16. Распределение золота по крупности зерен для 8 рудников Британской Колумбии (по Хейкоку).

Название рудников: 1 — Monashee Mines, 2 — Bayonne Consolidated, 3 — Howard Mine, 4 — Dome Mountain, 5 — Hedleg Mascot, 6 — Gold Fern Syndicate, 7 — Island Mountain, 8 — Martel Mines.

было применено микроскопирование при высоких увеличениях (до 5000 раз), на ряду с просеиванием через тонкие сита. На рис. 15 дано распределение золота по крупности зерен пяти рудников Канады (по Хейкоку).² График показывает, что руды содержат значительное количество очень мелкого золота; оно, согласно данным микроскопического анализа при боль-

¹ М. Н. Наукоск. Canad. Min. and Met. Bull., август 1937.

² Рисунок взят из статьи И. Н. Плаксина. Золотая промышленность, 1938, № 10.

ших увеличениях, находится, главным образом, внутри сульфидов (пирита, арсенопирита). Различные месторождения значительно отличаются друг от друга распределением золота по величине. На рис. 16 даны графики распределения золота по крупности в нескольких рудниках Британской Колумбии (по Хейкоку). В настоящее время в лаборатории металлургии благородных металлов Московского института цветных металлов и золота начаты исследования мелкодисперсного золота в рудах СССР.

ПАЛЛАДИСТОЕ ЗОЛОТО, ИЛИ ПОРПЕЦИТ

Золото в соединении с металлами платиновой группы в значительных количествах встречено только в Бразилии; в СССР оно представляет редкость. К этого рода минералам относится прежде всего палладистое золото, или порпецит. Оно добывалось еще в XVIII столетии из коренных и россыпных месторождений в штатах Гаяз и Минаж-Жерайж в Бразилии; в первой половине XIX века его добыча достигла сравнительно значительной величины (400 кг в год). В СССР порпецит был встречен в бассейне р. Чорох (Закавказье); состав его, по данным Вильма,¹ таков (в процентах):

	от	до		от	до
Золото . . .	86.0	91.1	Платина . . .	0	0.1
Серебро . .	следы	1.2	Железо . . .	0	следы
Палладий .	8.2	11.6	Медь	0	следы

По наружному виду порпецит мало отличается от золота; его отличает красноватый, бронзовый или сероватый оттенок. Порпецит кристаллизуется в правильной системе. Его уд. вес 15.73.

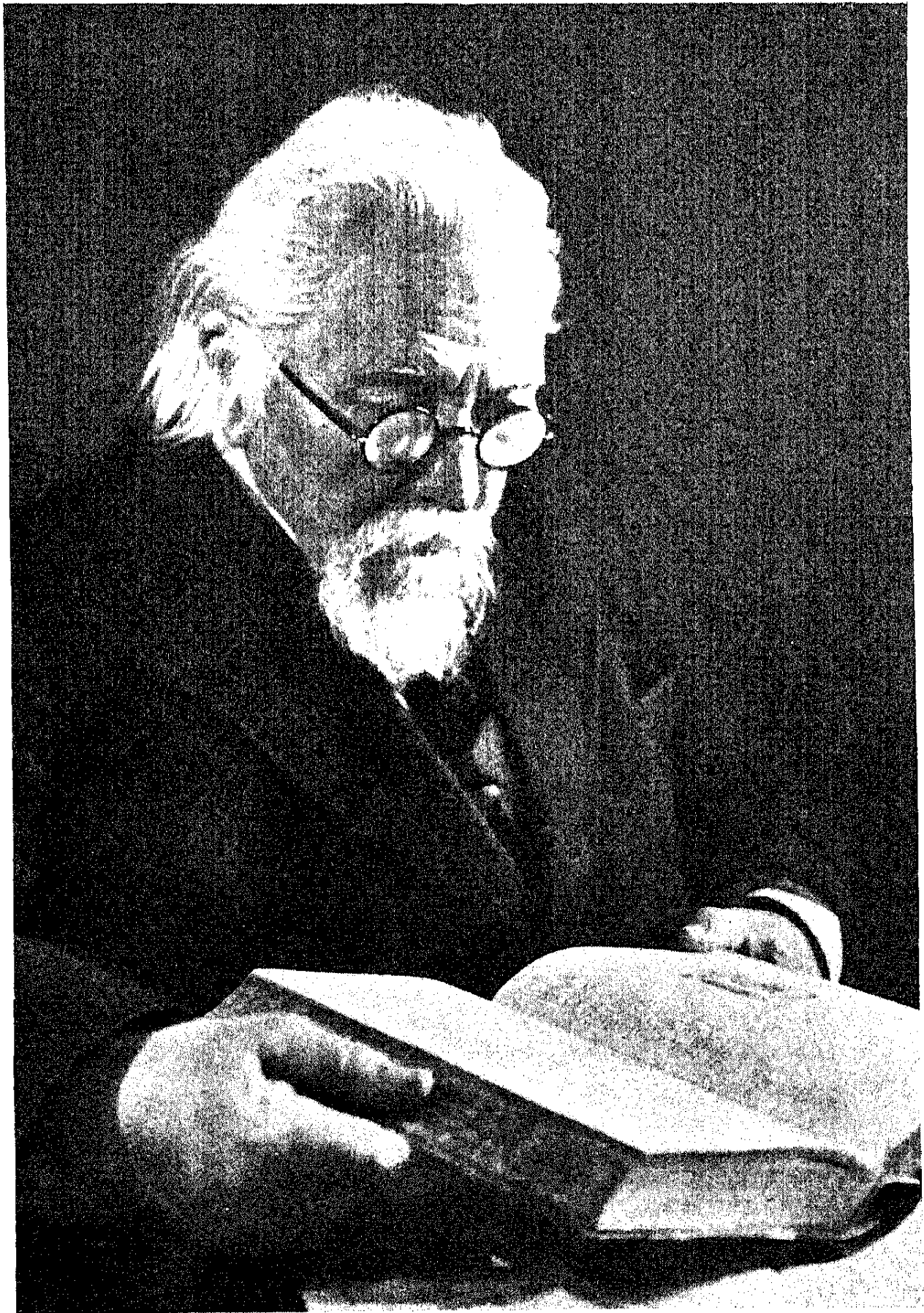
РОДИСТОЕ ЗОЛОТО (РОДИТ), ИРИДИСТОЕ И ПЛАТИНИСТОЕ ЗОЛОТО

Близко к палладистому золоту стоит родистое золото, или родит, минерал светложелтого цвета с уд. весом 15.5—16.8. Родит с р. Чорох, по Чернику,² состоит из 11.6% родия и 88.4% золота. Этот же автор наблюдал ириdistое золото и платинистое золото, первое — с содержанием 30% иридия, второе с 10.5% платины. Однако ближе эти минералы не изучены.

Металлы платиновой группы, повидимому, довольно часто сопровождают золото в коренных месторождениях. Об этом говорят химические анализы, проведенные И. Н. Плаксиным

¹ Ф. Вильм. ЖРФХО, 25, 105 и 506 (1893).

² Г. Черник. ЖРФХО, 27 (1895).



Акад. А. П. КАРПИЛОВИЧ

и И. Г. Наслузовым,¹ а также факт накопления металлов платиновой группы в растворах при аффинаже золота электролизом. Вопрос о содержании платины и ее спутников в золоте месторождений СССР требует еще подробного изучения.

Золото само в некоторых случаях является спутником металлов платиновой группы. Так, самородная платина содержит незначительные количества золота.

В 1934 г. мною был найден минерал ауросмирид, который представляет собой осмистый иридий с содержанием золота.² Его анализ дал следующий состав (в процентах):

Иридий	51.7	Золото	19.3
Осмий	25.5	Железо	следы
Рутений	3.5		

Удельный вес минерала 20; кристаллическая решетка кубическая с параметром 3.816 Å.

ТЕЛЛУРИДЫ ЗОЛОТА

Теллуриды золота — единственные химические соединения золота, встреченные в природе. Все другие химические соединения золота (селениды, сульфиды) являются гипотетическими, и существование их нельзя считать доказанным.

Соединение, соответствующее по составу установленному Розе, AuTe_2 , существует в природе и носит название калаверита. Довольно большие количества этого минерала были добыты в месторождениях Крипл-Крик в Колорадо и Кальгурли в Западной Австралии. Этот минерал с металлическим блеском, серо-белого или светло-бронзового цвета, хрупок, легко плавится. Твердость его по Моосу 2—3, уд. вес 9.0.

Кроме золота и теллура, калаверит обычно содержит изоморфную примесь серебра; в тех случаях, когда серебра много, минерал называется кренеритом $(\text{Au}, \text{Ag})\text{Te}_2$; в нем может содержаться до 20% серебра. Он также хрупок, цвет его серебристый, металлический.

Сильванит — минерал, имеющий состав Au Ag Te_4 ; теоретически он должен содержать 24.45% золота, 13.39% серебра и 52.16% теллура; на самом деле отклоняется от этого состава, но в небольших пределах. Цвет минерала стальной, серебристый, иногда желтоватый; твердость по Моосу 1—2, уд. вес 7.9—8.3.

К темным теллуридам относятся петцит $(\text{Au}, \text{Ag})_2\text{Te}$, встреченный в Забайкалье; малоизученный минерал — нагиа-

¹ И. Н. Плаксин и И. Г. Наслузов. Сов. золотопромышленность, 1935, № 10.

² О. Е. Звягинцев. Докл. Акад. Наук СССР, т. IV, № 3 (1934).

гит, или листоватая руда, найденный в Венгрии. Последний минерал сложен по составу и содержит (в процентах):

Золото . . .	5—13	Сера	3—13
Серебро . . .	0—2	Сурьма	0—8
Теллур . . .	13—33	и примеси меди и	
Свинец . . .	50—64	железа	
Уд. вес 6.7—7.2, цвет черно-свинцовый			

Другие минералы не имеют никакого практического значения.

ЗОЛОТО В СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛАХ

Выше было упомянуто (см. табл. 4), что золото встречается в виде небольшой примеси в различных сульфидах: галените, пирите, арсенопирите и др. Однако это золото нельзя считать химически связанным с серой, мышьяком или металлами. Нельзя также считать его и изоморфной примесью. Работы последнего времени Хейкока¹ и И. Н. Плаксина показывают, что золото в сульфидах находится в виде мелких металлических включений, видимых в микроскоп при больших увеличениях.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ГЕОХИМИЯ ЗОЛОТА

Процентное содержание элемента в земной коре,² по предложению А. Е. Ферсмана, называется кларком. Если подсчитать все количество золота, которое находится в земной коре как в виде минералов, так и в рассеянном состоянии, то получится величина около $5 \cdot 10^{-7} \%$. Различные авторы давали на основании своих подсчетов различные величины: И. Фогт (1898) принимал $n \cdot 10^{-8}$; Кларк и Вашингтон (1924) $n \cdot 10^{-7}$, Г. Берг (1930) $1.5 \cdot 10^{-7}$, В. И. Вернадский (1930) впервые принял во внимание рассеянное золото и дал величину $5 \cdot 10^{-6}$, Г. Берг (1932) $6 \cdot 10^{-7}$, А. Е. Ферсман (1932) $5 \cdot 10^{-6}$, и, наконец, новые подсчеты В. М. Гольдшмидта, на основании анализов Ноддак и своих, дали $5 \cdot 10^{-7} \%$. Эта величина принята в новых работах А. Е. Ферсмана (1939).³ Таким образом, золото является весьма редким элементом. По сравнению с серебром его содержание в земной коре в 20 раз менее; по сравнению со ртутью в 200 раз менее.

Однако среднее содержание золота в земной коре не является еще практически значимой величиной. Необходимо рассмотреть распределение золота в различных частях земной

¹ М. Н. Наукоск. *Canad. Min. and Met. Bull.*, август 1937.

² Считая земную кору на 10 миль (16 км) от поверхности вниз и кверху всю атмосферу и стратосферу.

³ А. Е. Ферсман, *Геохимия*, т. IV (1939).

коры. Обычно различают следующие сферы доступной для изучения части земного шара:

Ионосфера	}	воздушная оболочка
Стратосфера		
Атмосфера		
Гидросфера	—	водная оболочка
		(неполная)
Литосфера	—	твердая часть земной коры

Кроме того, различают гипотетические внутренние слои земли:¹

- Тяжелая подгранитная оболочка
- Силикатная пластическая оболочка
- Металлическое сдавленное ядро планеты

О составе внутренних частей земного шара можно судить лишь на основании косвенных данных. В. М. Гольдшмидт² считает, что металлическое ядро должно содержать значительно более благородных металлов, чем земная кора. Высокая плотность ядра и анализы металлических метеоритов служат тому доказательством. Однако вряд ли можно согласиться с таким суждением по аналогии с метеоритами, происхождение которых может быть совсем не аналогично внутреннему ядру земли.

В известных нам геосферах золото содержится в измеримых количествах в гидросфере и в литосфере. Изучением содержания золота в морской воде мы обязаны, главным образом, Габеру,³ Енике,⁴ Иасуда⁵ и Кальдуеллу.⁶

По Габеру, среднее содержание золота в воде океана составляет около 5 мг на кубический метр. Енике подтверждает эту цифру; Иасуда дает от 3 до 20 мг на метрическую тонну, а Кальдуелл, измерив содержание золота у берегов штата Орегон в различное время года, дает от 0.08 до 1 мг на тонну.

В общем следует принять, что золото в гидросфере составляет не более $1 \cdot 10^{-9}$ ‰.

Содержание золота в горных породах на основании многочисленных анализов подсчитано в $5 \cdot 10^{-7}$ ‰. Но это золото распределено неравномерно: в гранитах, составляющих главную массу (95 ‰) всех горных пород, золото содержится в количествах менее 0.002 мг на килограмм, т. е. менее $2 \cdot 10^{-7}$ ‰, в то время как гидротермальные жилы, связанные с интрузиями гранитной магмы, значительно обогащены золотом.

¹ В. И. Вернадский. О количественном учете химического атомного состава биосферы (оттиск), 1940.

² В. М. Гольдшмидт. Принципы распределения химич. элементов в минералах и горных породах. *J. Ch. Soc.*, 1937, 655.

³ Haber. *Z. angew. Ch.*, 40, 303 (1927).

⁴ J. Jeanicke. *Naturwissensch.*, 23, 57 (1935).

⁵ M. Jasuda. *Bull. Ch. Soc. Japan*, 2, 231 (1927).

⁶ W. E. Caldwell. *J. Ch. Education*, Nov. 1938.

В этом отношении золото выгодно отличается от платины: платина хотя и содержится в земной коре в большем проценте, чем золото, но реже концентрируется; золото же сравнительно часто дает повышенные концентрации в отдельных участках земной коры.

ПРОЦЕССЫ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗОЛОТА И МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Все коренные месторождения золота связаны с интрузиями магм и дифференциацией в процессе их остывания. Причины, приводящие к явлениям интрузии, так же как источники расплавленной магмы, нам не известны. Обычно различают два типа интрузий по составу магмы: 1) интрузии ультраосновных и основных магм и 2) интрузии кислых магм. Являются ли эти два вида магм результатом распада единой материнской магмы или же они образуются независимо друг от друга путем расплавления соответствующих твердых пород, — также вопрос спорный. Установлено лишь то, что ряд химических элементов, в том числе и золото, приносится в земную кору подземными извержениями — интрузиями.

В соответствии с существованием двух видов интрузий целесообразно рассмотреть отдельно поведение золота в процессе остывания основных и кислых магм.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЗОЛОТА ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ МАГМ

Согласно анализам И. и В. Ноддак основные и ультраосновные породы — дунит, перидотит и др. — содержат лишь незначительные следы золота. Это показывает, что при охлаждении основных магм золото не кристаллизовалось вместе с главной массой силикатов, а удалялось с другими продуктами дифференциации магмы. Кристаллизации твердых силикатов предшествовала стадия расслоения (вследствие уменьшения растворимости с понижением температуры) жидкого расплава на два несмешивающихся слоя: силикатный расплав и сульфидный расплав. Золото, как элемент более халькофильный, чем литофильный, при этом переходило в сульфиды, и дальнейшая его судьба связана с сульфидами. Они могли сконцентрироваться в крупные массы и в жидком состоянии импрегнировать соседние породы или же скопиться на дне магматического очага и после его остывания образовать сплошные сульфидные залежи. Могло быть иначе: сульфиды могли не успеть отделиться от силикатов и остались в виде крупных или мелких вкраплений в толще силикатов. Таким способом

образовались вкрапленники. Как в том, так и в другом случае затвердение магмы начиналось с силикатной части примерно при $1400-1300^{\circ}$ и продолжалось до полной кристаллизации всей силикатной массы. Сульфиды вследствие более низкой температуры кристаллизации затвердели значительно позже. Золото в большинстве случаев кристаллизовалось вместе с сульфидами и осталось в виде включений в них. Его содержание в сульфиде оказывается в некоторых случаях значительно превышающим среднее содержание в земной коре.

Примером такого месторождения может служить известное Сёдбёрнское месторождение медно-никелевых руд в Канаде.

Схематический геологический разрез месторождения приведен на рис. 17.

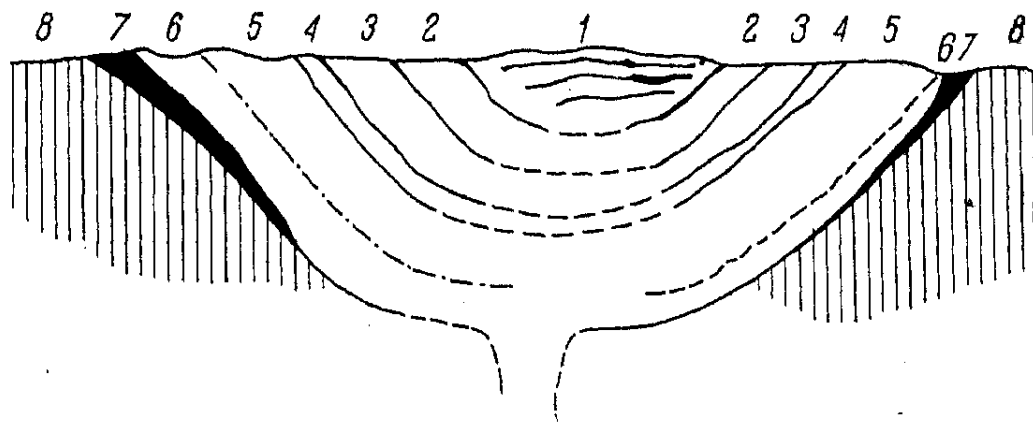


Рис. 17. Схематический геологический разрез месторождения Сёдбёри.

1 — песчаники, 2 — сланцы, 3 — туфы, 4 — конгломераты, 5 — кислые и 6 — основные медно-никельсодержащие изверженные породы, 7 — сульфидные руды, 8 — гнейсограниты (лаврентьевские).

В промежутке между формациями из конгломератов, туфов, сланцев, песчаников, с одной стороны, и из гнейсо-гранитов, кварцитов и сланцев, с другой, залегает лопполит интрузивной породы. При большом размере интрузивного тела в 60×25 км в нем появилась довольно резкая дифференциация: в верхней части массива залегают кварцевые нориты, переходящие в гранитную породу (микропегматитовый гранит), а в нижней части норит обогащается темноцветными (щелочными) компонентами и сульфидами. Руда образует залежи по контакту норита в лежащем боку, а также неправильные столбчатые жилы в породах основания. Буровые скважины и глубокие шахты рудников показывают, что рудоносные слои простираются не только по периферии, но и в скрытых окраинных частях лопполита на глубину более 600 м. Залежи имеют мощность от 1 до 45 м. Руда в них часто представляет брекчию из обломков почти пустого норита, цементированных сульфидами. Массивная руда содержит обильные остатки поро-

образующих минералов, а в более бедной эти минералы замещены сульфидами.

Генезис месторождения представляется теперь в следующем виде. Сульфиды являются одной из фракций дифференциации норитовой магмы на глубине. Расплавленные жидкие сульфиды путем инъекции проникли в контактную зону лакколита и образовали главную залежь. Часть руды образовалась, несомненно, путем сегрегации из норита, но не главная масса.

Сульфиды месторождения представлены преимущественно магнитным колчеданом, пентландитом, пиритом, халькопиритом, сфалеритом. Порядок выделения минералов таков: силикаты, магнетит, пирротин, пентландит и халькопирит. Платина встречается в руде в виде сперрилита и самородной платины, но, повидимому, часть ее находится в сульфидах в виде твердого раствора. Содержание платины и палладия 1.5—2 г на тонну и более, причем палладий преобладает над платиной. Содержание меди и никеля 2%, отношение никеля к меди равно 1.5 до 2.

В руде на ряду с платиной и палладием имеются золото и серебро. Содержание золота того же порядка, что и содержание платины, обычно несколько меньше.

Весьма интересное месторождение сульфидных руд, содержащих платину, палладий и золото, происшедшее благодаря дифференцированию огромного лакколита основной магмы, находится в Ю. Африке. В результате дифференциации произошел так называемый „горизонт Меренского“, прослеженный более чем на 300 км по южной окраине лакколита в экстрактах Претория, Рустенберг и на 160 км на северо-восточной окраине в Лиденбурге и Патжиетерсрусте.

„Горизонт“ падает к центру лакколита под углом от 6 до 25°, сохраняя свой характер на большом протяжении. Наиболее полно он развит в округах Рустенберг и Лиденбург, где застывание и дифференциация магмы были наиболее спокойными. Здесь „горизонт“ представляет толщу от 1.5 до 9 м псевдопорфирового диаллагитового норита с различным содержанием платины, увеличивающимся в верхних слоях. Расположение „горизонта Меренского“ по отношению к другим породам видно из схематического разреза (рис. 18).

Минералогический состав „горизонта“ таков: бронзит, диаллаг, оливин, лабрадор, роговая обманка, биотит, хромит, графит и сульфиды. Последние ниже зоны окисления составляют 2—3% породы и состоят из включений и зерен разной величины от 0.001 до 30 мм диаметром; крупные — заполняют промежутки между силикатами, мельчайшие попадают внутри них, особенно в диаллаге и полевом шпате. Из первичных

сульфидов надо назвать пирротин, пентландит и халькопирит; в подчиненных количествах кубан, пирит, никельсодержащий пирит. Платиновые металлы содержатся в сульфидах от следов до 445 г на тонну. В Рустенбергском округе рудный слой толщиной в 0.5 м „горизонта Меренского“ содержит на значительном протяжении около 10 г благородных металлов на тонну и выше. Слой же в 0.3 м, идущий в обработку, содержит 17—20 г на тонну.

В наибольшем количестве в рудах содержится платина (около 70% от суммы благородных металлов), затем палладий (около 20%), затем золото (около 5%); родий, иридий и осмистый иридий имеются в незначительных количествах.

В СССР имеются сульфидные месторождения, образовавшиеся аналогичным образом при застывании основных

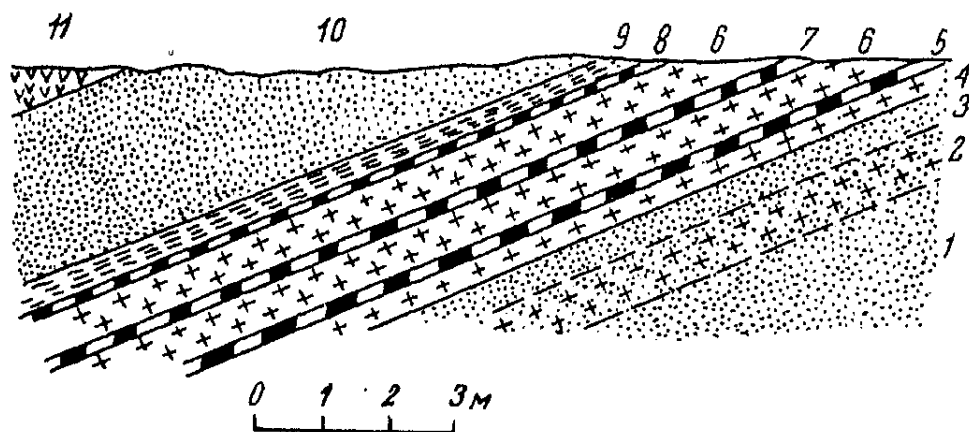


Рис. 18. Схематический разрез „горизонта Меренского“ (по П. Вагнеру).

1 — пятнистый норит, 2 — пироксеновый норит, 3 — анортозитовый норит, 4 — грубозернистый „риф“ Меренского с платиной, 5 — хромит с платиной, 6 — „риф“ Меренского с платиной, 7 и 8 — хромит, 9 — норит, 10 — пятнистый анортозит, 11 — анортозит.

магм. Норильское месторождение медно-никелевых руд (в 80 км от Дудинки, недалеко от оз. Пясина) и месторождения Сопчуайвенч, Ньюдуайвенч, Нитис и Камужья варака в Мончегундре на Кольском полуострове представляют отчасти аналогию с Сёдбери. Рудные сульфидные минералы — это главным образом пирротин, пентландит, халькопирит, которые являются дифференциатами при остывании основной магмы.

По исследованиям К. Ф. Белоглазова, сульфиды Норильского месторождения содержат палладий (главным образом в виде изоморфной смеси в пентландите и пирротине) и платину (в виде самородной платины, сперрилита, куперита и других минералов). Найдено также и золото в виде мелких вкраплений самородного металла.

Подобного же рода месторождения имеются в Норвегии (Ромзас, Эртели, Мейнкяр), в Конго и др.

Как видно из описаний, месторождения, связанные с основными магмами, не являются собственно золотыми месторождениями, хотя и содержат золото. Собственно золотые месторождения в огромном большинстве случаев связаны с кислыми магмами.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЗОЛОТА ПРИ ОСТЫВАНИИ КИСЛЫХ (ГРАНИТНЫХ) МАГМ

Интрузии кислых магм, независимо от величины, глубины залегания и других обстоятельств, отличающих их друг от друга, кристаллизовались в общем следующим порядком: первоначально охлаждающаяся масса выкристаллизовывалась, выделяя твердые кристаллы тех веществ, которые находились в расплаве в максимально возможной концентрации: SiO_2 , K_2O , Na_2O , Al_2O_3 , CaO , MgO и др. В результате кристаллизации, температура которой находится около 1000° , получался гранит, остаточный расплав, продолжавший кристаллизоваться с образованием пегматитов, и газообразные дериваты из паров воды и других химических соединений, которые при температуре $1000-700^\circ$ кристаллизоваться еще не могли. Конденсация газообразных продуктов при дальнейшем понижении температуры давала, с одной стороны, твердые возгоны, с другой — горячие водные растворы. Количество воды, находившееся в единице веса или объема расплавленной магмы и выделяющееся при ее кристаллизации, не было подсчитано. Несомненно все же, что это количество очень велико и составляло во всяком случае целые проценты от массы расплава. Таким образом, интрузия в результате процесса кристаллизации давала твердые породы — граниты ($1000-700^\circ$) и пегматиты ($700-400^\circ$), большое количество водных растворов и газообразных погонов.

Распределение золота в этих продуктах дифференциации кислых магм всегда совершенно определено: золото не выкристаллизовывается вместе с основной массой твердого вещества, а концентрируется в остаточных растворах. Согласно точным рентгеноспектральным определениям золота в гранитах, произведенным И. и В. Ноддак,¹ его содержание там ничтожно и составляет величину значительно меньшую 0.001 г на тонну. Пегматиты также, как правило, не содержат золота в сколько-нибудь повышенной концентрации. Остаточные растворы оказываются сосредоточением ряда элементов, находившихся в первоначальном расплаве в малых концентрациях; среди этих элементов находится и инте-

¹ I. u. W. Noddack. Z. phys. Ch., 154, 207 (1931).

ресующее нас золото. Причину перехода золота в растворы А. Е. Ферсман¹ видит в том, что золото легко образует комплексные анионы.

Главнейшие химические элементы, находящиеся в растворах, по А. Е. Ферсману, следующие:

Ведущие: сера, железо, медь, цинк, мышьяк, селен, серебро, олово, сурьма, свинец.

Главные: кобальт, никель, молибден, кадмий, теллур, вольфрам, золото, ртуть, висмут, уран, фтор, водород.

Средние: кремний, фосфор, марганец, углерод.

Малого значения: галлий, германий, платиновая группа, индий, рений, таллий.

Акцессорные и из соседних полей: калий, литий, бериллий, хлор, кальций, барий, бор, алюминий (магний).

Здесь, мне кажется, несколько преуменьшена роль калия, кремния и бора, по в общем, если не разделять строго на группы, список элементов дан с исчерпывающей полнотой. На рис. 19, дана таблица Д. И. Менделеева, взятая из книги А. Е. Ферсмана, в которой указаны положение интересующих нас элементов и их главнейшие константы. Как видно из рис. 19, элементы „халькокристаллизации“ составляют компактную, ясно выраженную группу, названную А. Е. Ферсманом „полем“. Золото в этом „поле“ занимает одно из центральных мест.

Многие из названных элементов, находящихся в гидротермальных растворах, образуют комплексные ионы, из которых надо назвать $[\text{SiO}_4]^{-4}$, $[\text{CO}_3]^{-2}$, $[\text{SO}_4]^{-2}$, $[\text{SeO}_4]^{-2}$, $[\text{TeO}_4]^{-2}$, $[\text{WO}_4]^{-2}$, $[\text{MoO}_4]^{-2}$, $[\text{SiF}_4]^{-4}$ и др.

Золото в этих растворах также, по всей вероятности, находится в виде комплексного иона $[\text{AuS}]^{-1}$.

Из некомплексных ионов присутствуют S^{-2} , Se^{-2} , Te^{-2} и металлические катионы: K^{+1} , Na^{+1} , Zn^{+2} , Cu^{+1} , Fe^{+2} и др.

Форма нахождения золота в гидротермальных растворах интересовала исследователей, и этому вопросу посвящено несколько работ.² Наиболее полно вопрос освещен в работе Огрызло из лаборатории Грунера (1935 г.). В дальнейшем вопрос был освещен нашими работами.³

Огрызло была испытана растворимость золота в различных растворителях под высоким давлением и при высоких темпе-

¹ А. Е. Ферсман. Геохимия, т. III, гл. 10 (1937).

² Skey. Trans. New Zealand Inst., 5, 382 (1872), Eggleston, Trans. Am. Inst. Min. Eng., 9, 640, (1880—1881); Becker, Am. J. Sc., 3, 33, 207 (1887); Lehner, Econ. Geol., 7, 746 (1912); Ogryslo. Econ. Geol., 30, 400 (1935)

³ О. Е. Звягинцев и И. А. Паульсен. Докл. Акад. Наук СССР, т. XXVI, вып. 8 (1940).

	18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
№ и символ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	2	He
№ и символ	2	3	4	5	6	7	8	—	—	—	—	3	4	5	6	7	8	9	10	Ne
R-иона	He	Li	Be	B	C	N	O	—	—	—	—	Li	Be	B	C	N	O	—	—	Ne
KC ₃ EK	—	0,78+1 12	0,34+2 90	0,2-3 250	0,15+4 400	0,1-0,2+5 (16)	1,32+2 (16)	—	—	—	—	0,78+1 12	0,34+2 90	0,2+3 250	0,15+4 400	0,1-0,2+5 (16)	1,32-2 (16)	1,33-7 (12)	1,60 0 1	0
№ и символ	10	11	12	13	14	15	—	—	—	—	—	—	—	—	14	15	16	17	18	Ar
R-иона	Ne	Na	Mg	Al	Si	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Si	P	S	Cl	—	Ar
KC ₃ EK	—	0,38+1 7	0,78+2 25	0,57+3 45	0,39+4 96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,39+4 96	0,33+5 50	1,74-2 15	1,81-1 (3,5)	1,92 0 2,6	0
№ и символ	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	Kr
R-иона	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	(Mg)	(Fe)	(Co)	(Ni)	(Cu)	(Zn)	θ α	Ge	As	Se	Br	—	Kr
KC ₃ EK	—	1,33+1 4	1,06+2 2,5	0,83+3 —	0,64+4 100	0,65+3 110	0,64+3 100	0,91+2 80	0,83+2 100	0,82+2 95	0,81+2 95	0,96+1 75	0,83+2 37	0,62+3 25	0,44+4 50	—	1,91-2 20	1,96-1 8	1,98 0 2,5	0
№ и символ	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	Xe
R-иона	Kr	Pb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	(Mn)	(Ru)	(Rh)	(Pd)	(Ag)	(Cd)	(In)	(Sn)	(Sb)	(Te)	—	—	Xe
KC ₃ EK	—	0,32 0,30	0,87 0,75	1,55 1,32	0,87+4 70	0,69+5 —	0,68+4 150	—	0,65+4 150	0,68+3 130	—	1,13+1 60	1,03+2 30	0,92+3 25	0,74+4 35	0,90 (2) 30	2,11-2 20	2,20+1 13	2,18 0 3	0
№ и символ	54	55	56	57	71	72	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	Rd
R-иона	Xe	Cs	Ba	TR	Hf	Ta	W	(Re)	(Os)	(Ir)	(Pt)	(Au)	(Hg)	(Tl)	(Pb)	(Bi)	—	—	—	Rd
KC ₃ EK	—	1,65+1 3	1,43+2 20	1,22-0,99 35	0,86+4 —	0,69+5 150	0,68+5 180	0,59+4 —	0,67+4 150	0,86+4 150	—	1,37+1 80	1,12+2 20	1,49+1 20	1,32+2 18	—	—	—	—	—
№ и символ	86	87	88	89	90	91	92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
R-иона	Rd	Ra	Th	Pa	U	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
KC ₃ EK	—	—	1,10+4 50	—	1,03+4 70	—	1,70 180	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Рис. 19. Поле халькокристаллизации (по А. Е. Ферману).

ратурах. При рассмотрении гидротермальных растворов среди этих растворителей могут иметь значение сульфиды, гидросульфиды, полисульфиды и карбонаты. Огрызло установил, что:

1) углекислый натрий не имеет растворяющего действия на золото при высоких температурах и давлениях;

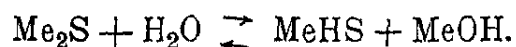
2) растворы сернистого натрия растворяют только следы золота при высоких температурах и давлениях и не растворяют его вовсе при комнатной температуре. (Эти результаты опровергают данные Беккера, Эггистона и Ленера);

3) раствор полисульфида натрия имеет слабое действие на золото;

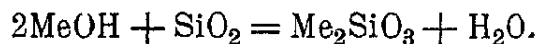
4) растворы гидросульфидов натрия и калия растворяют золото как при комнатной температуре, так особенно при высоких температурах и давлениях.

Опыты при высоких температурах Огрызло проводил в золоченом изнутри автоклаве при 200 и 300° в течение нескольких десятков часов. Раствор гидросульфида готовился насыщением раствора сернистого натрия сероводородом. Были проделаны опыты растворения золота в присутствии силикагеля.

Огрызло считает, что в условиях гидротермальных растворов образование гидросульфидов, весьма вероятно, протекает по реакции:



Образующаяся щелочь в присутствии кремнезема 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 проводилось 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 пропу-

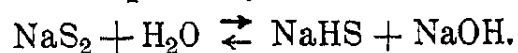
Таблица 12

Опыты растворения золота

№ опыта	Условия опыта	Время в часах	T°	Убыль веса золота в г	Найдено золота в растворе в г	Вид раствора
1	3.5 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 10 % раствор	140	90°	0.0008	0.0008	Раствор светлозеленый
2	3.5 г $\text{K}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 10 % раствор	140	90°	0.0007	0.0006	Раствор светлозеленый
3	7 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20 % 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; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 30 % 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; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 40 % 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; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 60 % раствор	$137\frac{1}{2}$	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; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 60 % раствор	$163\frac{1}{2}$	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; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 80 % 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; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 90 % 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; H_2S пропуск. $\frac{3}{4}$ часа. Приблизительно 60 % раствор. Без примесей	$137\frac{1}{2}$	80°	0.0026	0.0026	Раствор желтый

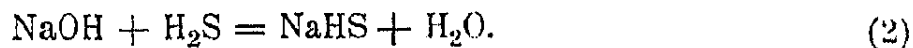
№ опыта	Условия опыта	Время в часах	T°	Убыль веса золота в г	Найдено золота в растворе в г	Вид раствора
11	21 г Na ₂ S·9H ₂ O в 25 мл воды; H ₂ S пропуск. 3/4 часа. Приблизительно 60 % раствор. Прибавлено 3 г Na ₂ CO ₃	140	80°	0.0012	0.0012	Раствор желто-зеленый. В осадке золота нет
12	21 г Na ₂ S·9H ₂ O в 25 мл воды; H ₂ S пропуск. 3/4 часа. Приблизительно 60 % раствор. Прибавлено 3 г K ₂ CO ₃	142	80°	0.0012	0.0010	Раствор желто-зеленый. В осадке золота нет
13	21 г Na ₂ S·9H ₂ O в 24 мл воды; H ₂ S пропуск. 3/4 часа. Приблизительно 60 % раствор. Прибавлено 3 г CaCO ₃	139 1/2	80°	0.0014	0.0013	Раствор желтый. В осадке золота нет
14	21 г Na ₂ S·9H ₂ O в 25 мл воды; H ₂ S пропуск. 3/4 часа. Приблизительно 60 % 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 Na ₂ S·9H ₂ O в 25 мл воды; H ₂ S пропуск. 3/4 часа. Приблизительно 60 % 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 Na ₂ S·9H ₂ O в 25 мл воды; H ₂ S пропуск. 3/4 часа. Приблизительно 60 % раствор. Прибавлен 1 г пирита (- 70 + + 150 меш)	144	80°	0.0082	0.0074 (из них 0.0004) в осадке	Раствор ярко-желтый, в нем много Fe ⁺⁺ . Пластика золота покрыта FeS

скался сероводород в течение 1/2—1 часа. Сернистый натрий в растворе частично гидролизуется:



(1)

При пропускании сероводорода NaOH образует новые количества NaHS :



Изучение зависимости растворимости золота от концентрации Na_2S в растворе показало, что растворимость растет до некоторого максимума; в концентрированных растворах она снова падает и при большой концентрации щелочи доходит до очень малой величины. Объясняется это тем, что реакция (1) в крепком растворе Na_2S весьма затруднена: в растворе имеется много Na_2S и очень мало NaHS . Растворимость золота в растворе Na_2S , как показал Огрызло, ничтожна. Максимум растворимости золота находится в наиболее благоприятной для образования NaHS концентрации Na_2S . Результаты опытов сведены в табл. 12, опыты 1—9.

Если растворимости золота мешает избыток щелочи, образующейся при реакции (1), то вещества, связывающие щелочь, должны способствовать растворению. Нами были произведены опыты, аналогичные предыдущим, в присутствии кварца и сульфидов. Растворимость золота значительно растет, если к

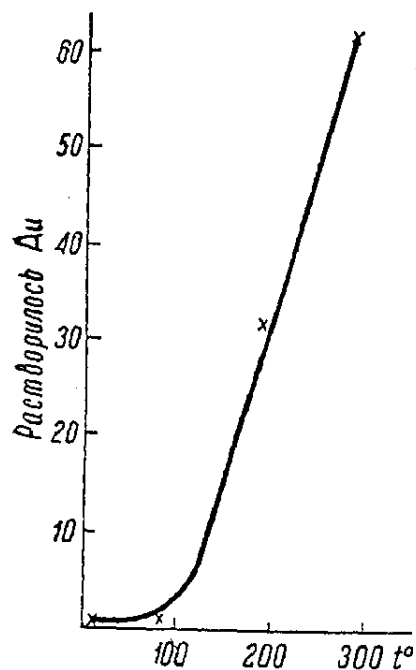


Рис. 20. Кривая растворимости золота в растворах гидросульфида натрия.

раствору NaHS прибавить мелкоистолченного кварца¹ или пирита (опыты 14—16, табл. 12). 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 длитель-

¹ Для опытов была взята фракция — 70 + 150 меш. Кварц был измельчен и просеян, затем — прокипячен в растворе соляной кислоты, тщательно промыт и прокален.

Таблица 13

Опыты растворения золота в растворе NaHS
(влияние температуры)

№ опыта	Условия опыта	Время	T°	Убыль веса зо- лота в г	Найдено золота в растворе в г	Вид раствора
1	6 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20% раствор	31 день	15 ⁰	0.0005	0.0004	Раствор желтый
2	25 мл 12% КОН; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20% раствор	31 день	15 ⁰	0.0003	0.0003	Раствор желтый
3	25 мл 12% NaOH; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20% раствор	31 день	15 ⁰	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; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20% раствор	140 час.	70 ⁰	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; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20% раствор	138 час.	80 ⁰	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; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20% раствор	90 час.	200 ⁰	0.0323	не определялось	Раствор желтый. Данные Огрызло.
7	6 г $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ в 25 мл воды; H_2S пропуск. $\frac{1}{2}$ часа. Приблизительно 20% раствор	90 $\frac{1}{4}$ часа	300 ⁰	0.0634	не определялось	Данные Огрызло. Раствор светло-зеленый

ных опытах растворимость золота не зависит от агрегатного состояния; порошок золота и золотая пластина растворяются одинаково.

Наиболее интересным является зависимость растворимости золота в растворах гидросульфидов от температуры.

Данные, приведенные в табл. 13 и кривой рис. 20, показывают, что растворимость при 15⁰ ничтожно мала, при 70⁰ она вдвое больше и далее быстро растет, достигая при 300⁰ величины в 600 раз большей, чем при 15⁰. Надо полагать, что рост растворимости будет продолжаться и далее до тех температур, при

которых уже не могут существовать гидросульфидные растворы (порядка 400°).

Изложенные результаты исследований показывают роль иона сероводородной кислоты в переносе золота в гидротермальных растворах. Однако вряд ли можно ограничиться только этим реагентом при рассмотрении природных растворов. Вероятно, какую-то роль играют также ионы селенистого и особенно теллуристого водорода. Но об этом можно пока строить предположения; исследований, посвященных этому вопросу, нет.

Неясен также вопрос о роли иона калия. Из работ Линдгрена¹ и наших² видно, что гидротермальные растворы несут повышенные концентрации калия в золотоносных породах. Имеет ли это какую-либо связь с золотоносностью (или вообще рудоносностью) растворов, также не выяснено.

Процессы осаждения золота из щелочных растворов

С. Ф. Жемчужный и ряд других исследователей полагали, что для осаждения золота необходимы восстанавливающие реагенты, как, например, сульфиды тяжелых металлов.

Приведенные выше опыты растворения золота в растворе гидросульфида натрия, проведенные в присутствии сульфидов, показывают, что золотые растворы являются устойчивыми по отношению к сульфидам. Гидросульфидные растворы золота выделяют металлическое золото лишь при подкислении. В природе случай встречи щелочных растворов с кислыми возможен лишь в поверхностной зоне окисления и имеет весьма ограниченные пределы. Следовательно, следует признать, что осаждение золота из гидротермальных растворов происходит не осадителями, а иным путем.

Растворы, являющиеся результатом дифференциации магматического очага, не остаются на месте своего образования, а ищут пути для выхода на поверхность земли. Находящиеся под очень большим давлением растворы в большей части движутся по трещинам в породах, а отчасти фильтруются сквозь породы.

По мере продвижения вверх, растворы удаляются от очага и остывают; при этом растворимость веществ, находящихся в растворе, уменьшается: начинается их кристаллизация. Порядок кристаллизации, очевидно, будет таков: сначала будут кристаллизоваться вещества, которые скорее достигнут точки насыщения ими раствора, и позднее будут выпадать те, раст-

¹ W. Lindgren. Mineral Deposits. N.-J., 1928.

² О. Е. Звягинцев, Э. Л. Писаржевская и В. А. Волкова. Изв. Акад. Наук СССР, сер. хим., 1938, 509.

воримость которых велика или концентрация которых мала (следовательно, точка насыщения ими растворов наступит позднее). Таким образом, понижение температуры (и давления) является основной причиной выделения из растворов минералов, в том числе и золота.

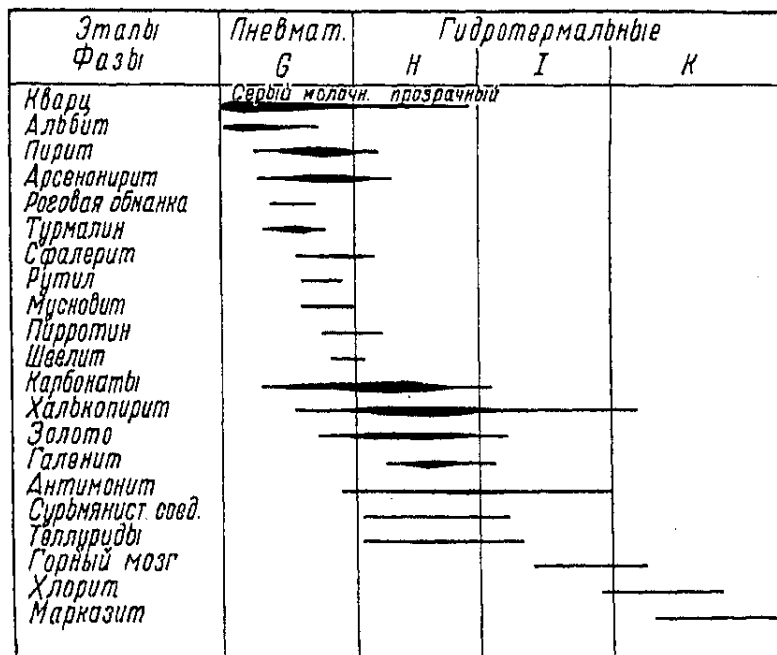


Рис. 21. Последовательность выделения минералов (по Бушендорфу и Ферсману).

Постоянство состава гидротермальных растворов гранитной магмы, повидимому, в значительной степени выдерживается повсеместно. Поэтому порядок выделения минералов из гидротермальных растворов повсеместно одинаков. Эта закономерность, установленная Эммонсом,¹ в грубых чертах почти всегда оправдывается. Различного рода побочные обстоятельства во многих случаях меняют и усложняют картину очередной кристаллизации, но в общем она является правильной. Применение этих воззрений к золотым жилам принадлежит Ф. Бушендорфу.²

На рис. 21 приведена геохимическая диаграмма последовательности выделения минералов в золотоносных жилах, составленная А. Е. Ферсманом³ по данным Ф. Бушендорфа. Вертикальные линии на диаграмме соответствуют определенным температурам: линия между

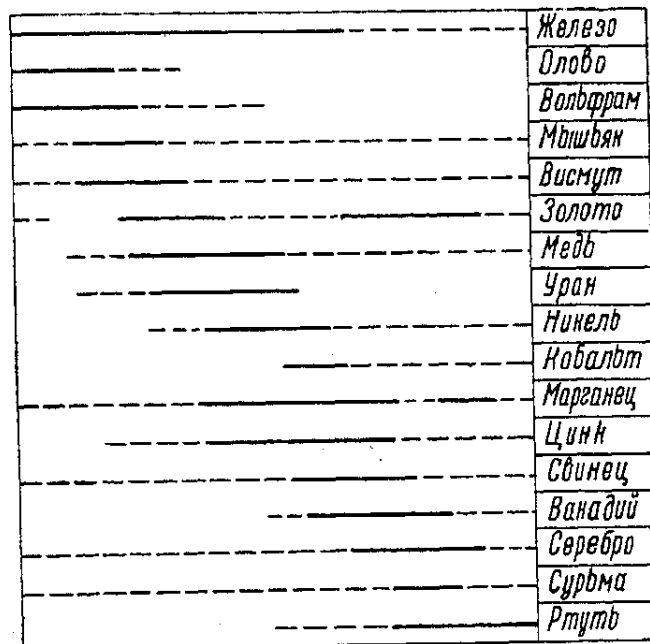


Рис. 22. Диаграмма нормального положения металлов в жильных месторождениях (по Эммонсу).

¹ W. H. Emmons. Trans. Am. Inst. Min. and Met. Eng., 70. 964—997 (1924); 74, 29—70 (1927).

² F. Buschendorf. Z. pract. Geol., 34, 1—16 (1926).

³ А. Е. Ферсман. Геохимия, т. II, 1934, стр. 192.

G и H соответствует 400° , между H и I 300° ; между I и K 200° .

Эммонс дал аналогичную диаграмму, но в несколько иной форме; он указал последовательность выделения не минералов, а элементов. На рис. 22 приводится диаграмма Эммонса. Золото в ней показано выделяющимся совместно со всеми другими металлами, как ранними, так и более поздними, но преимущественно с медью и с серебром.

И в той и в другой диаграмме авторы давали золоту определенное место в своей схеме на основании парагенетических признаков, и потому схемы эти не совсем верно отражают

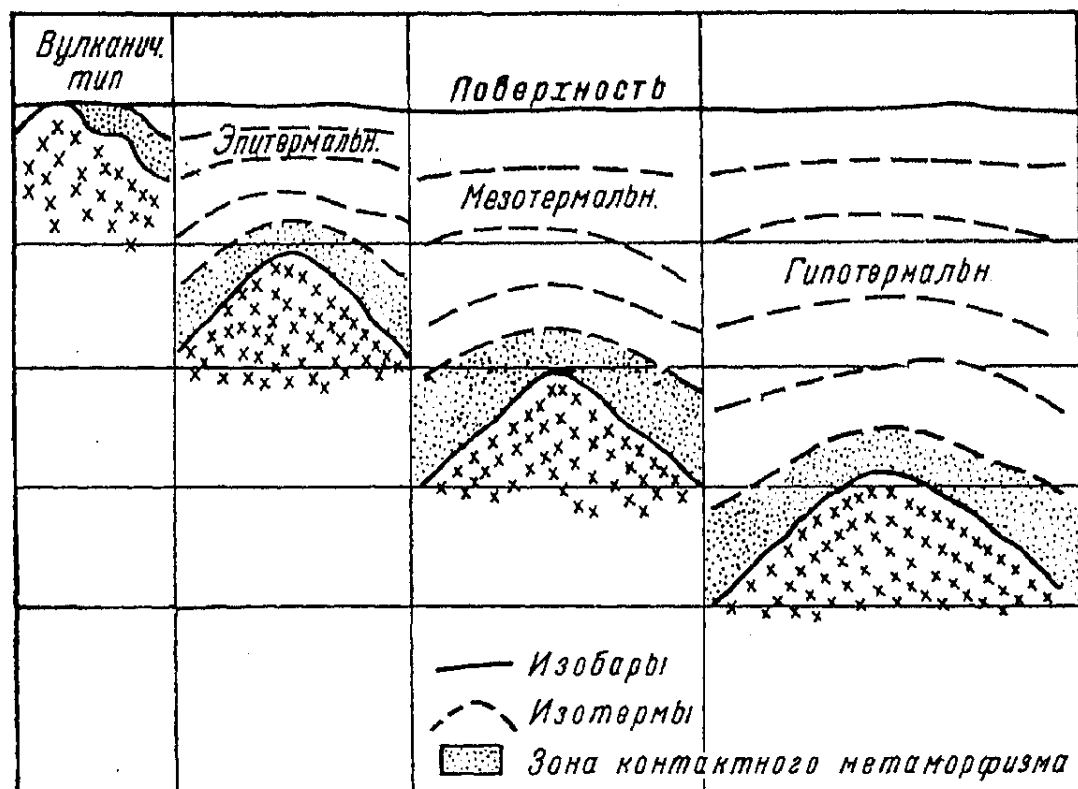


Рис. 23. Классификация гидротермальных месторождений.

последовательность выделения минералов во времени. Они являются лишь самым грубым приближением, но в то же время они и наиболее общи.

Гидротермальные месторождения различаются по глубине залегания интрузива и температуре, согласно известной классификации Ливдгрена, принятой и Обручевым, на эпитермальные, мезотермальные и гипотермальные. Сущность этой классификации наглядно уясняется из рис. 23.

Эпитермальные месторождения характеризуются относительной близостью интрузии к поверхности земли, быстрым падением температуры от интрузии к поверхности и относительно малыми давлениями. Гипотермальные месторождения связаны с интрузиями, находящимися глубоко под поверхностью; темпе-

ратура между интрузией и поверхностью убывает медленно; растворы, исходящие из интрузии, находятся под очень большим давлением. Мезотермальные месторождения находятся в промежуточном положении.

Растворенные в гидротермальных растворах вещества отлагаются не одинаково в различных типах жил. Если растворы движутся из большой глубины и остывают очень медленно, то дифференциация кристаллизующихся веществ будет более дробная; последовательность отлагаемых минералов будет выражена более отчетливо. Наоборот, растворы, остывающие быстро вследствие незначительной глубины первоисточника, должны отлагать растворенные вещества в смешанном виде; дифференциация будет менее отчетливой.

В соответствии с существованием различных типов гидротермальных жил, заполненных отложениями растворов на разных глубинах и в разных условиях, А. Е. Ферсман¹ дал геохимическую диаграмму золотых месторождений (рис. 24). А. Е. Ферсман различает четыре разных вида месторождений золота в соответствии с различными температурами его выделения на разных глубинах.

По А. Е. Ферсману, золото в глубинных шеелитовых жилах начинает выделяться близ критической температуры воды (около 400°). Здесь оно ассоциируется с шеелитом, турмалином, пиритом. На геохимической схеме (рис. 24) эти жилы обозначены цифрой IV и Au_1 .

Второй тип золотоносных жил аплито-березитовых (на схеме III), которые можно себе представить, как пространственное отщепление геофазы В, причем образуются кварцевые жилы. Характерные минералы — кварц и жильбертит.

Третий тип жил, наиболее распространенный — высоко-температурные (400—450°) образования с сульфидами (по схеме II).

Четвертый тип (по схеме I) — отщепление от эффузивных пород: золото с теллуrom и селеном, большей частью серебристое, и электрум.

Геохимическая диаграмма А. Е. Ферсмана по способу своего построения является парагенетической схемой: в ней дан парагенезис золота и определена (приблизительно) температура образования большей части минералов минерального комплекса, среди которого находится золото. В ней не учитываются разновременность выделения различных минералов и температура выделения самого золота.

¹ А. Е. Ферсман. Докл. Акад. Наук СССР, 1931, А, № 8, стр. 191—214. Та же диаграмма в исправленном виде дана в Геохимии, т. IV, 1939, стр. 264.

Расплавы Q			Флюиды P			Критическая точка воды-растворы				Гипергенный	
Эпимагматический			Пегматитовый этап			Гидротермальный этап					
A	B	C _{600°}	D	E	F	G _{400°}	H _{300°}	J _{200°}	K _{100°}	L	Геофазы
Магматическ. геофаза	Аплитовая геофаза	Письменная геофаза				Гипотермальный процесс	(древние жилы)	Мезотермальный процесс	(юные Au-Ag жилы)	Эпитермальный процесс	по Линдбергу и В. Обручеву
Из эволюции пород II, III, IV					X		T, Au, Au	T, Au, Au	Au, Te	Белокварцевые и золотые жилы	Пегматитовый этап и гидротермальные
T Пегматитовый остаток			Mo'	Sn	W, Bi	As, W, Mo'', Au	Au	Au		Глубинные березитовые жилы	
Примечание			[Микроил-Ортон] →			Альбит	Адуляр I	Адуляр II			Пегматит
X Тентонические нарушения			Плагиоклаз			Эпидот, пироксилит (?)	Жильбертит	Серпентин	Глина	Глина	Полевые шпаты
• Главная кристаллизация золота			Мусковит			Турмалины (Cr)	Флюорит	Серпентин	Балит	Балит	Слюда
T Начало кристаллизации жильного тела			Шерл			Леглохлориты	Кальцит	Магнезит	Родохрозит	Нальцит	Карбонаты
Ступени Au в жильном процессе			Светло-дымч. Серый	Bi		As, Zn, FeS ₂ (белес), (дымчат)	Кальцит	Магнезит	Родохрозит	Нальцит	Сульфиды
						(Au I)	(Au II)	(Au III)	Au IV	Ау	Кварц
						Пиритизация	Березитизация	(Жильбертитизация)	Хлоритизация	Альбитизация (наольнитизация)	Лиственизация
						Пиритизация	Березитизация	(Жильбертитизация)	Хлоритизация	Альбитизация (наольнитизация)	Лиственизация
						Хлоритизация	Серпентинизация	Альбитизация (наольнитизация)	Халцедонитизация (Церопитизация)		Процессы
						Хлоритизация	Серпентинизация	Альбитизация (наольнитизация)	Халцедонитизация (Церопитизация)		Изменения пород
			K	Sn	Na, W, Bi	As, W	Na, Sn, B, CO ₂ , OH, S, Cr, Fe	Fe, Cu, Zn, Pb, S, CO ₂ , [SO ₄]	Pb, As, Sb, Ag, Se, Te, Mn, CO ₂ , [SO ₄]		Типоморфные элементы

Рис. 24. Геохимическая таблица золота А. Е. Ферсмана.

Парагенетическими характеристиками являются также описания различных групп месторождений золота и Эммонса, с той только разницей, что этот исследователь различает золото только двух генераций: древние жилы (шеелито-турмалиновые) и молодые жилы (теллуристые).

Положительной стороной воззрений А. Е. Ферсмана является то, что им допускается выделение золота в течение всего интервала температур гидротермальных растворов.

Чрезвычайно интересная работа в деле построения действительно генетической диаграммы образования золотоносных жил проделана Н. Н. Горностаевым.¹ Главным результатом этой работы является установление чрезвычайно длительного процесса формирования рудного месторождения. Плутоническая масса остывала чрезвычайно медленно, и притом при постоянном воздействии стресса (одностороннего давления). Выделение эманаций из магматического бассейна, продолжающееся до последнего момента кристаллизации, будет продолжаться столь же долгое время, может быть, десятки тысяч лет, причем по мере понижения температуры плутона и понижения геоизотерм в континенте будут меняться, с одной стороны, состав отделяющихся от него эманационных струй, а с другой — и условия осаждения минералов из этих струй. Протекание этих струй будет меняться и по интенсивности, иногда замирая, а временами возобновляясь, так как воздействие стресса по мере остывания плутона непостоянно.

Таким образом, месторождение не является комплексом минералов, выделившихся в ограниченном промежутке температур, а представляет собой парагенетический комплекс минералов, выделившихся в разное время, в разных температурных промежутках, начиная с самых высоких (выше 400°) и кончая последними этапами кристаллизации (50°).

Большинство генераций жильных и рудных минералов образовалось путем метасоматического замещения предыдущих „поколений“ последующими. Так, было установлено семь и даже девять генераций („поколений“) кварца в жилах Советского рудника. При этом все фракции кварца (за исключением, может быть, последней фракции халцедона) выделялись не из коллоидных, а из истинных (молекулярных) растворов. То же относится и к выделению рудных минералов и золота. Золото откладывается из наиболее холодных гидротерм.

Согласно данным этой работы, золото, являющееся в соответствующих месторождениях всегда почти последним из

¹ Н. Н. Горностаев. Труды треста Золоторазведка и Инст. Нигри-золото, 1936, вып. 3.

рудных минералов — позже галенита и только ранее сульфидов сурьмы и ртути, вообще представляет весьма низкотемпературный гидротермальный минерал. Анализ порядка выделения минералов уральских месторождений в ряде последующих работ подтверждает это положение.^{1, 2, 3}

Согласно данным Н. Н. Горностаева, в геохимической схеме Эммонса следует, вероятно, вовсе уничтожить зону высокотемпературного золота и перенести последнее на его надлежащее место в геофазу I и K (по Ферсману) после свинца и серебра и перед сурьмой и ртутью.

Со всеми этими положениями работы Н. Н. Горностаева следует согласиться.

Действительно, не только анализ месторождений, но и наши лабораторные опыты показывают необъяснимость существования двух генераций золота и разрыва между ними. Согласно кривой растворимости золота, приведенной на рис. 20, оно должно выделяться по мере падения температуры непрерывно, начиная с момента насыщения раствора золотом.⁴ В большинстве случаев это насыщение, повидимому, достигается не при высоких температурах, но даже, если золото и отложилось в раннюю фазу кристаллизации, оно легко могло быть в дальнейшем метасоматически замещено более поздним. Таким образом „раннее“ золото Эммонса в жильных месторождениях должно быть исключительно редким явлением. Разрыв же между „ранним“ и „поздним“ золотом должен быть ликвидирован, так как выпадение золота из растворов — процесс непрерывный на всем интервале температур, с начала его кристаллизации.

Второе важное следствие наших экспериментальных работ состоит в том, что золото, осажденное из растворов вследствие понижения растворимости его с температурой (а не осадителями), не должно быть непременно связано с определенными минералами. Оно могло выделиться как на сульфидах, так на кварце и на других минералах, соприкасавшихся с гидротермальными растворами. Золото может оказаться внутри кристаллов сульфидов или кварца, если оно выделялось одновременно с ними. Оно могло выделиться на поверхности кристаллов различных минералов, если оно выделялось после

¹ С. А. Юшко. Труды Геол. Инст. Акад. Наук СССР, 1938, VIII, стр. 151—192.

² П. Кутюхин. Вещественный состав Березовского месторождения и типы кварцевых жил. Свердловск, 1937 (Отчет Свердловского горного института).

³ В. Н. Натаров. Труды треста Золоторазведка и Инст. Нигризолото, 1937, вып. 4, стр. 3—47.

⁴ О. Е. Звягинцев и И. А. Паульсен. Докл. Акад. Наук СССР, т. XXVI, вып. 7 (1940).

них, или, наконец, оно могло метасоматически замещать другие минералы, например, сульфиды, принадлежащие к предыдущим генерациям.

Все эти случаи наблюдаются при изучении микрофотографий шлифов жильных пород (см. упомянутые работы Н. Н. Горностаева, В. Н. Натарова, О. Е. Звягинцева и мн. др.).

Однако факты говорят, что золото ассоциируется преимущественно с сульфидами, особенно с пиритом, арсенопиритом, халькопиритом, но так же и с галенитом, сфалеритом и другими. При этом золото не образует ни химических соединений (сульфидов), ни изоморфных смесей. Оно находится в виде металлических мелких и крупных включений и сростков с сульфидами. Объяснение такой постоянной ассоциации золота с сульфидами следует, по моему мнению, искать в механизме выделения золота из растворов и его осаждения.

Главнейшие условия выпадения золота из растворов следующие:

- 1) весьма медленное падение растворимости с температурой,
- 2) отсутствие специфических осадителей золота,
- 3) во многих случаях повышенная вязкость кремнеземистых растворов,
- 4) весьма медленное движение растворов.

Эти условия создавали возможность выпадения золота в форме весьма мелких кристалликов, а в первоначальной стадии выделения в виде золя золота. Это обстоятельство играло далее решающую роль в деле создания ассоциации золота с сульфидами. Золь золота относился весьма не безразлично к различным минералам, присутствовавшим в жилах. Согласно нашей работе в 1938 г.¹ ни один из испытанных минералов не относится к золоту индифферентно, особенно же интенсивно реагируют сульфиды. В табл. 14 приведены результаты наших опытов. Для них был приготовлен красный коллоидный раствор золота с таннином. Для опытов бралось 50 мл этого раствора и от 0.5 до 5 мг минерала, измельченного до минус 150 меш. Если при перемешивании раствора с минералами на холоду изменений цвета раствора не наблюдалось, то последний подвергался кипячению. Для контроля всегда ставился слепой опыт.

Из таблицы 14 видно, что наиболее энергичными реагентами, заставляющими коагулировать золото из коллоидного раствора, являются сульфиды, особенно пирит. Другие минералы действуют гораздо медленнее.

¹ О. Е. Звягинцев и И. А. Паульсен. Докл. Акад. Наук СССР, т. XXI, № 4 (1938).

Действие минералов на коллоидный раствор золота

Таблица 14

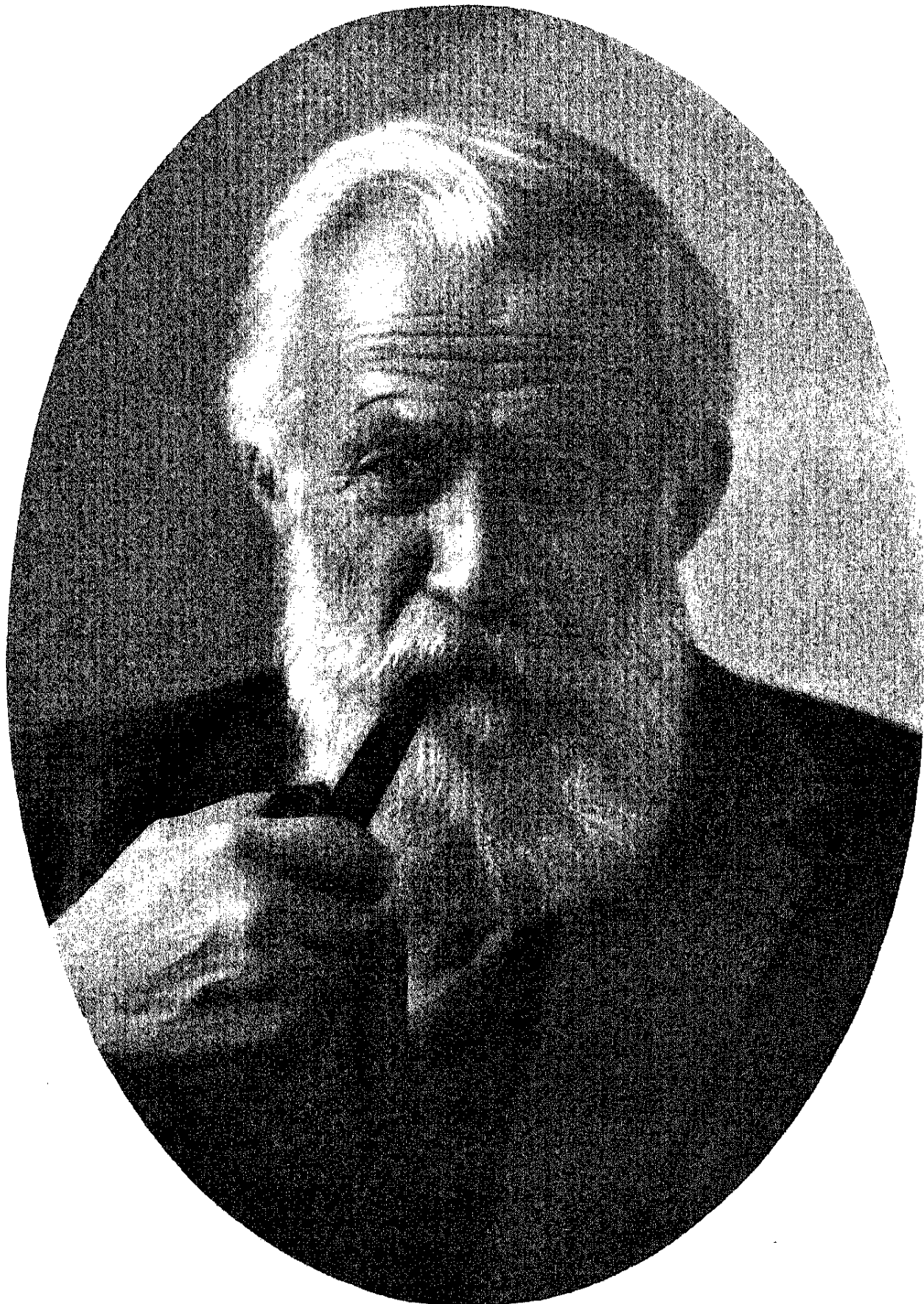
Количество раствора (0.673 г/л) в мл	Минерал	Результат опыта
50	пирит 1 г	Мгновенное посинение раствора; при взбалтывании через несколько минут полное осаждение золота
50	марматит 1 г	Быстрое посинение раствора; при кипячении осаждение золота
50	халькопирит 1 г	Посинение раствора, но при кипячении и при стоянии в течение 2 суток все золото не осело
50	арсенопирит 1 г	Раствор сразу приобрел фиолетовый цвет и при кипячении не изменился
50	сфалерит 1 г	Раствор посветлел, оттенок фиолетовый, через сутки золото все адсорбировалось
50	галенит 1 г	Быстрое посинение раствора. Через сутки полное осаждение золота
50	кальцит 0.5 до 1 г	При 0.5 г цвет раствора стал чуть заметно фиолетовым, при прибавлении до 1 г и при кипячении с осадком все золото адсорбировалось, осадок розовый
50	барит 0.5—1 г	То же, что и с кальцитом, осадок сине-фиолетовый
50	кварц 1 г	При кипячении и спустя 2 суток раствор остался розово-фиолетовый. Через трое суток часть золота осела

Наши опыты не носили количественного характера; чрезвычайно интересно было бы проделать их с учетом скорости коагуляции и с большим числом минералов.

Но и качественные опыты уже с достаточной ясностью убеждают в том, что сульфиды должны быть обогащены золотом в силу названных физико-химических условий.

Примеры месторождений золота гидротермального происхождения

Нет необходимости включать в эту работу многочисленных и подробных описаний месторождений золота. Я считаю необходимым ограничиться лишь кратким описанием некоторых типичных, на примере которых обнаруживаются упомянутые выше процессы отложения золота.



Акад. В. А. ОБРУЧЕВ

Балейское месторождение

Балейское золото-рудное месторождение, открытое в 1929 г., находится в Забайкалье. Благоприятное географическое положение и богатое содержание золота в руде позволили быстро развить добычу золота.

Геология месторождения, представляющая большую и сложную задачу, изучалась И. В. Копейным, Воронцовым и Столяр, И. С. Яговкиным,¹ П. В. Митрофановым,² Б. Л. Степановым³ и особенно Н. Н. Горностаевым.⁴ В грубых чертах картина месторождения такова. Основное рудное поле приурочено к южному участку обширного плато Борщевочного края. Гранодиорит, а также лейкократовый гранит разбиты сетью текто-

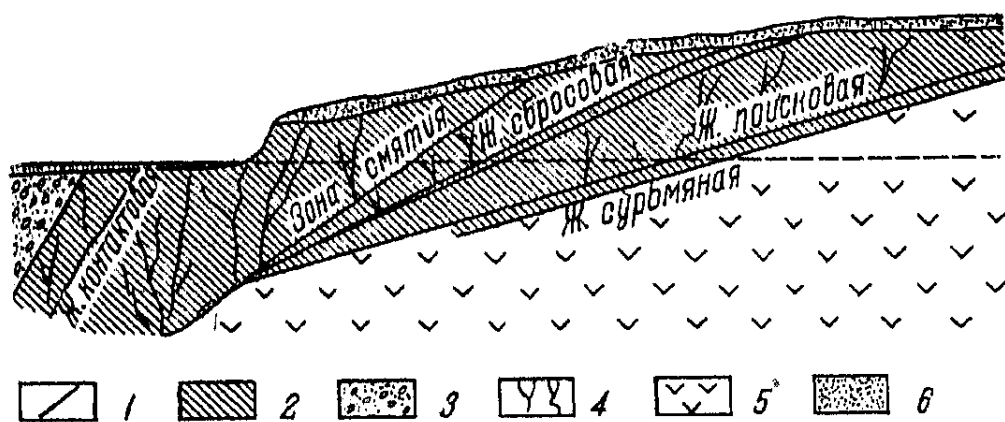


Рис. 25. Меридиональный геологический разрез Балейской горы (схема).

1 — тектоническая рудоносная трещина, 2 — гранодиорит, 3 — конгломераты, 4 — рудные тела (трещины раздробления), 5 — лейкократовый гранит, 6 — современные рыхлые отложения.

нических трещин и связанными с ними трещинами раздробления. Количество последних очень велико, и расстояния между ними столь невелики, что месторождение можно отнести к штокверкам.

Установить закономерность залегания рудных тел представляется очень трудным. Сетка жил в восточной части заметно гуще и сокращается к западу, переходя в обычный жильный участок. Тектонические трещины (жилы Контактная, Сурьмяная, Сбросовая, Поисковая) расходятся веерообразно к западу. Эти жилы служили в период рудообразования каналами, подводящими вверх золотосодержащие ра-

¹ И. С. Яговкин. Материалы Золоторазведки, 190—3—0, № 1242 (1933).

² Материалы Золоторазведки, 190—3—0, № 1786 (1933).

³ Б. Л. Степанов. Материалы Золоторазведки, 190—3—0, № 1794 (1932) и № 3043.

⁴ Н. Н. Горностаев. Материалы Золоторазведки, 190—3—0, № 1794 (1932) и № 3043.

створы. Последние расходились по сопряженным трещинам раздробления, задерживаясь в местах пережимов и образуя здесь более богатые золотом участки.

Число жил и прожилок, включенных в эксплуатацию, составляет более 200; обычно по простиранию они тянутся на 30—120 м, мощность их 10—20 см. Тектонические трещины прослежены по простиранию более чем на 300 м, мощность их 0.5—0.2 м.

Продольный разрез (схема) Балейской горы в меридиональном направлении приведен на рис. 25.

Зона окисления в Балейском месторождении ограничена весьма небольшим слоем близ поверхности, так как ниже этого слоя находится водонепроницаемый слой мощностью 18—20 м, закупоривающий все нижележащие породы от проникновения кислорода воздуха с поверхности и препятствующий прямому проникновению нисходящих растворов.

Строение золотоносных жил в общих чертах однородно по всей Балейской горе.

Жильные минералы в порядке их выделения таковы (по Н. Н. Горностаеву):

халцедон черного цвета, очень плотный,

голубовато-серый кварц (450—350°),

кальцит — ажурные пластинки (350—300°),

молочно-белый халцедон,

тонкокристаллический кварц и под конец щетки кристаллов кварца (350—300°),

темносерый халцедон замещения (200—100°),

кварц, кальцит, серый халцедон.

Рудные минералы: пирит, халькопирит, молибденит, линнеит (Co_3S_4), пираргирит ($3\text{Ag}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$), сурьмяный блеск — содержатся в весьма небольших количествах; они в большинстве случаев мелкокристаллические.

Вся картина жил осложнена присутствием перетертого химически измененного глинообразного гранодиорита — „жильбертита“.

Золото выделялось совместно с поздним кварцем и халцедоном одновременно и позднее пирита; оно находится в жилах обычно в виде мельчайших частиц. Эти частицы иногда скапливаются, давая рыхлые сростки и скопления, видимые простым глазом. Внешний вид этих скоплений таков, что впервые видящий их наблюдатель не узнает в них золота. Это серозеленые пятна весьма непривлекательного вида с тусклым блеском или вовсе без блеска. Такого рода золото носит название „зеленого“ золота.

Гораздо реже встречается так называемое „желтое“ золото, несколько отличающееся по виду и составу от „зеленого“.

Отношение количества „зеленого“ к „желтому“ примерно составляет 20:1.

Анализы балецкого золота приведены в табл. 15. Микрофотография скопления золотинок была приведена на рис. 12.

Таблица 15

Химический состав балецкого золота (минерала) в процентах

Состав	Радиус атома А	Образец № 1, 1-й горизонт	Образец № 2, 2-й горизонт	Образец № 3, 3-й горизонт	Образец № 4, 3-й горизонт	Образец № 5, 4-й горизонт
Золото . . .	1.40	69.83	73.62	73.06	75.91	74.71
Серебро . . .	1.40	19.53	22.48	22.81	20.10	20.63
Железо . . .	1.27	8.74	1.11	1.21	1.44	1.22
Медь . . .	1.28	+	0.11	+	+	+
Сера . . .	1.0	0.34	1.06	—	1.54	1.40
MgO + CaO		1.55	1.29	1.79	1.16	1.56
Теллур . . .	1.33	0.18	0.4	0.3	0.58	0.7
Селен . . .	?	+	+	+	+	+
Марганец . . .	1.30	++	+	+	+	+
Платина . . .	1.38	0.09	—	менее 0.1		менее 0.1
Свинец . . .	1.70	0.16	—	0.21	0.62	0.18
Олово . . .	1.55	—	—	+	—	—
Сурьма . . .	1.56	+	0.15	+	—	0.1
Мышьяк . . .	1.40	+	+	+	+	+
Отношение Au:Ag		3.5	3.3	3.2	3.8	3.6

Примечания. 1. Знаком плюс (+) отмечены элементы найденные, но не определенные количественно, а знаком (—) не найденные. Кобальт, никель, иридий, родий, палладий, висмут, цинк, молибден, вольфрам и ртуть найдены не были ни в одном из образцов.

2. Анализу подвергались следующие образцы:

№ 1 — 1-й горизонт, жила № 18, глубина 30 м.

№ 2 — 2-й горизонт, апофиз жилы № 99, глубина около 60 м.

№ 3 — 3-й горизонт, очистные работы по жиле № 35, глубина около 75 м.

№ 4 — 3-й горизонт, штрек по жиле № 74, глубина около 90 м.

№ 5 — 4-й горизонт, гезенов по Жаровской жиле (№ 76) в месте ее пересечения с жилой № 79, глубина 120 м.

Изучением микроструктуры и химического состава балецкого золота занимались сотрудники Гос. института золотой промышленности (Гинзолото) в Иркутске¹ и я с сотрудниками.²

¹ Материалы Золоторазведки 190—3—0, № 2372 (1935). Исследование „зеленого“ и „желтого“ золота Балецкого месторождения. Отчет Гос. института по золоту и спутникам „Гинзолото“. 1936. Руды Балецкого месторождения, отчет „Гинзолото“, 1936.

² О. В. Звягинцев, В. А. Волкова и Э. Л. Писаржевская. Изв. Акад. Наук СССР, сер. хим., 1937, 509.

Размеры частиц золота из жилы Утешительная Балейской горы таковы:

0.10—0.20 мм . . .	5%	0.01—0.05 мм . . .	75%
0.05—0.10 „ . . .	10%	менее 0.01 „ . . .	10%

Золото других жил так же мелкозернисто, как и в Утешительной.

Анализ жильной породы, из которой извлекалось золото, приведен в табл. 16.

Таблица 16

Анализ Балейской породы, из которой извлекалось золото, в процентах

Состав	Образец № 1, 1-й горизонт	Образец № 2, 2-й горизонт	Образец № 5, 4-й горизонт
SiO ₂	67.76	93.04	74.29
H ₂ O	0.94		2.26
CO ₂	4.33	0.82	1.05
S сульфатная	4.044	0.022	0.02
S сульфидная	0.696	0.127	1.05
Fe общ.	2.79	0.39	1.85
Al ₂ O ₃	5.83	2.93	1.128
CaO	5.04	0.84	2.91
MgO	0.072	0.33	0.76
K ₂ O	7.83	1.628	6.43
Na ₂ O	0.132	0.058	0.01
As	1.41	0.33	2.24
Sb	0.05	0.07	0.55
Pb	следы	следы	следы
Mn	следы	—	—
Co	?	следы	следы
Отношение Au: Ag	2.4	2.85	2.1

Таблицы анализов 15 и 16 показывают, что в состав балейского золота (минерала) входит, главным образом, золото и серебро; все остальные элементы играют подчиненную роль. Содержание железа во всех образцах значительно, особенно в № 1, где присутствуют окислы железа.

Среди элементов, входящих в состав изученных минералов, доминируют элементы с атомными радиусами 1.30—1.40 Å. Группа элементов с атомными радиусами около 1.6 Å — свинец, олово, сурьма — составляют постоянную, но очень малую примесь.

Сера, вероятно, не входит в состав минерального золота, а находится в виде неотделимой примеси сульфидов. Окиси магния и кальция тоже не входят в состав золота.

Интересно отметить весьма малое содержание в бале́йском золоте меди.

Из элементов, сопутствующих золоту в породе, помимо обычных теллура, мышьяка, селена, сурьмы, нужно отметить кобальт.

Характеристика химических элементов, входящих в состав бале́йского золота и сопутствующих ему, не будет полна, если мы не охарактеризуем их с энергетической стороны.

Мерилом уровня геохимической энергии элементов является величина, предложенная А. Е. Ферсманом,¹ — ВЭК. ВЭК — это энергия единицы валентности каждого иона элемента в килокалориях на 1 моль. $ВЭК = \frac{W}{2R}$, где W — валентность, R — радиус атома.

Если расположить элементы в порядке повышения величины ВЭКов, то получится следующий ряд:

Таблица 17

ВЭК ионов Бале́йских жил в кг/кал на 1 моль

	Благо- родн. газы	J	Br	Cl	Cs	H	Rb	K	F	CO ₃
W	0	-1	-1	-1	+2	+1	+1	+1	-1	-2
ВЭК	0	0.18	0.22	0.25	0.30	0.32	0.33	0.36	0.37	0.39
	Tl	Na	Te	Si	Se	S	Ag	Au	Ba	SiO ₄
W	+1	+1	-2	+1	-2	-2	+1	+1	+2	-4
ВЭК	0.42	0.45	0.47	0.55	0.55	0.57	0.60	0.65	0.65	0.69
	Cu	O	Sr	AlO ₄	Pb	Ca	Mn	Cd	Hg	
W	+1	-2	+2	-5	+2	+2	+2	+2	+2	
ВЭК	0.70	0.75	0.77	0.80	0.82	0.85	0.97	1.00	1.05	
	Cu	Fe	Co	Mg	Ni	H				
W	+2	+2	+2	+2	+2	+1				
ВЭК	1.05	1.05	1.07	1.07	1.09	1.1				

Элементы и ионы бале́йских золотоносных жил (напечатаны курсивом) занимают в этом ряду почти подряд 20 мест между калием и водородом. Элементов, ВЭКи которых находятся вне этого промежутка, в бале́йских рудах не найдено.

Таким образом, интервал ВЭКов от 0.36 до 1.1 характеризует низкий уровень энергии всех элементов бале́йских золотоносных жил.

Бале́йское месторождение принадлежит к эпитеpмальному типу: магматический очаг находился не глубоко, термальные растворы остывали быстро, выделяя растворенные в них

¹ А. Е. Ферсман, Геохимия, т. III (1937).

вещества в течение круто падающего интервала температур. По мере остывания очага растворы продолжали протекать по трещинам и жилам, но уже более холодные. Эти растворы выделяли более поздние минералы, которые замещали предыдущие поколения. Так, кальцит был почти полностью замещен белым кварцем, который кристаллизовался по кальциту. Раннее золото, если оно существовало, также было замещено другими минералами. Находимое теперь золото — позднее, выделившееся в интервале температур ниже 250° при быстром остывании растворов. При этих условиях нельзя ожидать разделения элементов друг от друга: золото осаждалось совместно с серебром, давая „зеленое“ серебристое золото.

Месторождения, подобные Балейскому, главным образом американские: месторождение Топопах в Неваде, месторождения Комсток и др. описаны в специальной литературе.

Месторождение Крипл-Крик

Месторождение Крипл-Крик в Колорадо представляет результат дифференциации неглубокого интрузива (отчасти и эффузива, излившегося на поверхность). Плато красного гранита, гнейса и волокнистого сланца было прорвано третичными вулканическими породами. Поверхность контакта между гранитом и вулканическими породами крутая, вертикальная или даже с обратным падением. Здесь мы имеем дело с пробкой (или корнем), которая представляет сердцевину третичного вулкана (см. схему на рис. 26). Масса вулканической породы сложена туфами и брекчиями латита-фенолита, пересеченными дайками и интрузивными массами фенолита, сиенита, мончикита и вогезита. Рудные жилы образовались, по видимому, позднее даек; они расположены радиально и падают очень круто. Геологическая история района показывает, что во время образования жил поверхность была всего на несколько сот футов выше современной поверхности. На границе около контакта также обнаружены неправильные рудные тела. Золото в жилах развито очень

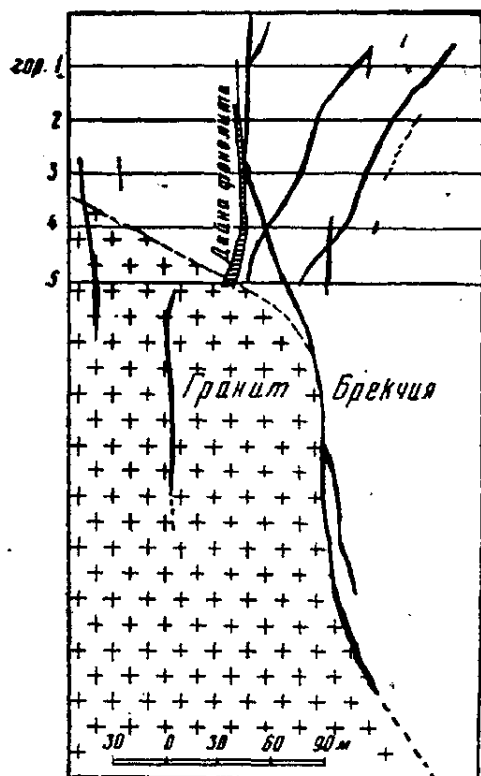


Рис. 26. Схематический разрез одной из жил Крипл-Крик (по Линдгрёну).

Золото в жилах развито очень

мало; его почти совсем нет. Главный рудный минерал — калаверит, с небольшой примесью серебра, желтовато-белый, часто в хорошо образованных кристаллах. С ним ассоциированы небольшие количества пирита, цинковой обманки, тетраэдрита, стибинита и молибденита. Жильные минералы представлены кварцем, флюоритом и доломитом. Структура рудных жил друзовидная; калаверит образовался одним из последних минералов. Жильное тело состоит примерно из 60% кварца, 20% доломита, 20% флюорита и 0.3% теллуристого золота (калаверита) с железом, медью, цинком и молибденом. На рис. 26 схематически показан рудник Индепенденс Стрэттон по данным Линдгрена.¹ Месторождение образовалось, так же как и Балейское, в течение короткой эпохи жилкообразования эманациями более глубоких изверженных масс. Воды поднялись быстро в более глубоких частях вулканического жерла, а вблизи поверхности разошлись по множеству трещин, где быстро остыли и осадили большое количество жильных и рудных минералов. Растворы эти были щелочными и несли, по видимому, не сульфоаураты, как обычно, а теллураураты.

Механизм осаждения теллурида золота из таких растворов в настоящее время не исследован и должен быть предметом экспериментального изучения.

Месторождение Советский рудник

Советский рудник² в Североенисейской тайге. Расположен он на крутом склоне правого берега долины р. Безымянки.

Его происхождение таково. В массу сланцев вторглось интрузивное тело, которое дало эманации, проникавшие вдоль круто падающей слоистости вмещающей породы. Все без исключения отдельные жильные тела представляют собой согласные со слоистостью вмещающих сланцев седловидные и обратно-седловидные жилы, представляющие собой тонкие жилки с раздутыми в области синклиналей и антиклиналей смятого в складки сланца. На рис. 27 схематически изображена одна из таких седловидных жил Советского рудника. Жилы простираются на 300 с лишком метров; возможно, что продолжение зоны рудных жил будет прослежено дальше.

Внутренняя структура жил обычно проста: жилу выполняет молочно-белый кварц; в нем, главным образом у зальбандов, нередки включения обломков сланцев разной вели-

¹ В. Линдгрена. Рудные месторождения (русский перевод), т. III, стр. 46 (1935).

² Труды треста Золоторазведка и Нигризолото, 1936, вып. 3.

чины, обычно угловатой формы. Сульфидные минералы входят в состав жильного тела в незначительном количестве — всего несколько процентов от общей массы тела. Распределение их неправильно. Найдены висмутин, пирротин, арсено-

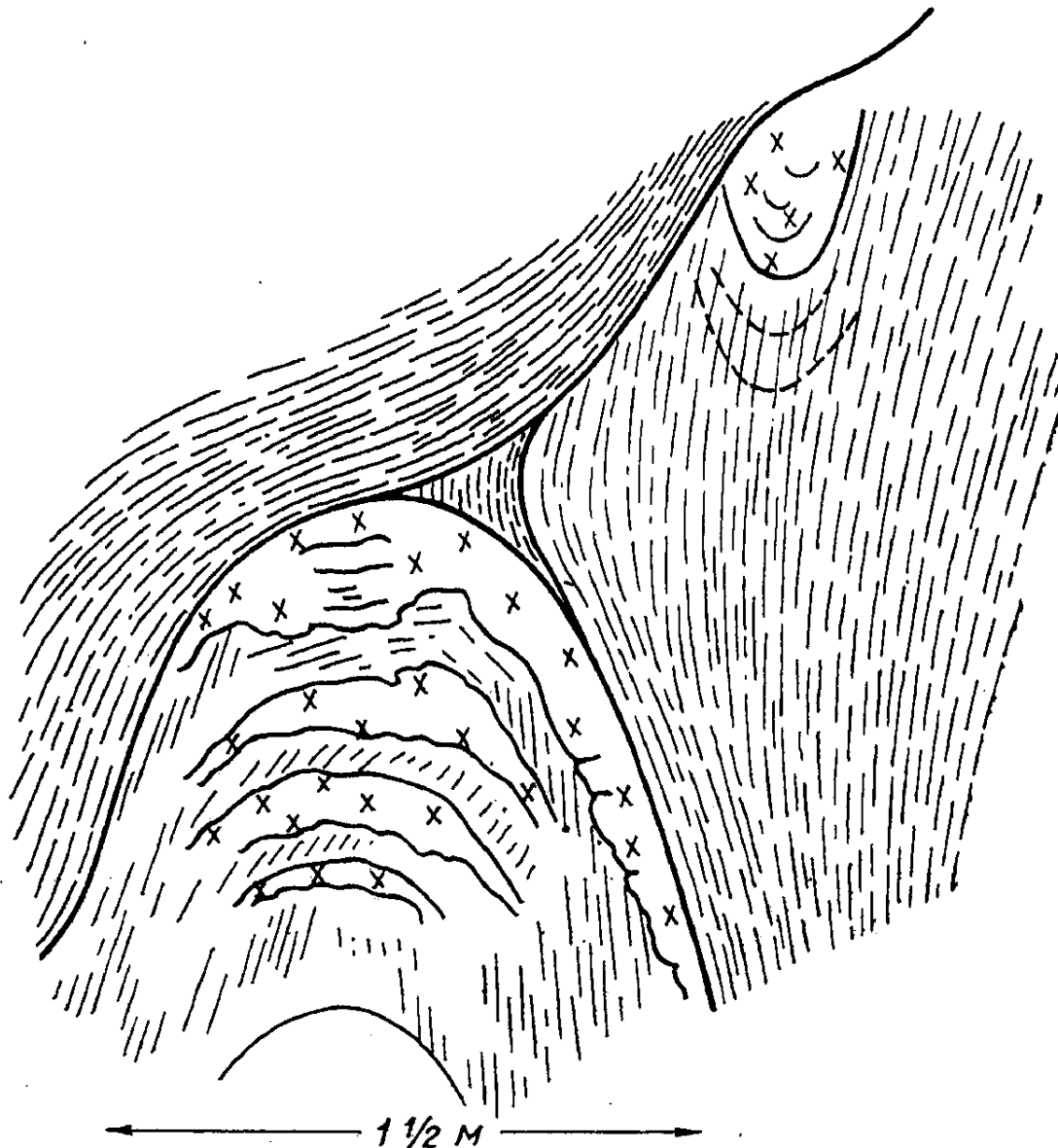


Рис. 27. Седловидные жилы Советского рудника (по Горвостаеву).

пирит, пирит, халькопирит, сфалерит и галенит. Преобладающим сульфидным минералом является пирит.

Самородное золото встречается в форме небольших, ясно кристаллических зерен, обычно вместе с арсенопиритом, халькопиритом, а также и в кварце, независимо от сульфидов. Зерна золота часто соприкасаются с пиритом, причем видны следы замещения последнего золотом. При соприкосновении с халькопиритом замещения не заметно. Зерна золота, находящиеся в кварце, отличаются более крупными размерами, чем зерна в сульфидах.

При тщательном изучении шлифов кварцевых жил было

Таблица 18

Тектоно-геохимическая диаграмма Советского рудника

Тектонические фазы, складчатость		Геохимическая характеристика		Гео-фазы	
Расширение		Гранитная интрузия. Обособление пегматитовой и пневматолитово-гидротермальной ветвей развития		A B C	
Огнейсование гранита	Рассланцовка (главная фаза)	Пегматиты (ближе не изученные)	Дымчатый кварц, молочный грубо-зернистый кварц	GFED	
	2-е растяжение		Полумолочный кварц	H	
	Рассланцовка (2-я фаза)				
	3-е растяжение		Анкерит, висмутин, альбит, пирротин	Гребенчатый кварц	
	Слабое сжатие			Мелкогребенчатый кварц	
	4-е растяжение			Прозрачный мелкозернистый кварц. Прозрачный тонкозернистый кварц	J
	(?)				
	Расколы (?)				
	Растяжение			Пирит, арсенопирит, тонкошерстоватый кварц	K
	Расколы			Халькопирит	
Растяжение					
Расколы (?)					
Растяжение		Хлорит, хальцедоновидный кварц	Сфалерит Галенит Золото	L	

обнаружено, что белый кварц и рудные минералы отложились не одновременно, а их кристаллизация продолжалась очень долго. При этом видны следы многочисленных генераций кварца: их насчитывается семь, а иногда и девять. Отдель-

ные генерации различаются между собой по характеру. Можно проследить, что они отлагались в разных условиях, определявшихся температурой и давлением. Последнее, в свою очередь, определялось в значительной мере действием стресса, которое менялось в течение жизни жил.

Сульфидные минералы отлагались в известной последовательности: после ряда налагающихся друг на друга и отчасти замещающих друг друга „поколений“ кварца выделяется пирит, во многих случаях совместно с арсенопиритом. После пирита и сфалерита появился халькопирит. Сфалерит и галенит следовали друг за другом после халькопирита. Самым последним выделялось золото.

Осаждение рудных минералов в месторождении Советского рудника происходило путем медленной — молекула за молекулой — кристаллизации выпадающих последовательно из молекулярных гидротермальных растворов золота, причем такое выпадение сопровождалось частичным метасоматическим замещением прежде выделившихся кристаллов. Самый процесс выпадения растянулся на долгое время и шел в известной последовательности, определяемой, в первую очередь, падением температуры протекавших растворов. Давление уменьшалось также постепенно, с небольшими скачками вследствие тектонических явлений. Но поскольку процесс оруднения происходил на значительной глубине, не было достаточно резких моментов уменьшения давления.

Советский рудник относится к типичным золото-кварцевым месторождениям средних глубин (мезотермальным).

В табл. 18 (см. стр. 67) приведена геохимическая диаграмма Советского рудника с указанием последовательности выделения минералов и параллельно с указанием тектонических явлений, сопровождавших остывание интрузии (по Н. Н. Горностаеву).

Риддерское месторождение

Риддерское полиметаллическое месторождение представляет собой источник добывания свинца, цинка, серебра, золота, меди и кадмия. Оно находится в западной, рудной части Алтая в верховьях р. Ульбы. Главная часть рудных тел месторождения находится среди осадочных пород девонского возраста. Эти породы занимают широтно вытянутую площадку около 35 кв. км, залегают довольно полого, и несколько смяты. С северо-востока и востока с девонскими породами граничат метаморфизованные толщи, состоящие из эпидото-хлорито-кварцевых сланцев, порфиroidных пород и филлитизированных сланцев. С северо-запада с девонскими поро-

дами соприкасается гранодиоритовый массив, прорезанный многочисленными параллельными дайками кварцевых кератофилов. С юга и с запада девонские породы покрыты аллювиальными и делювиальными отложениями.

Рудные тела представляют собой залежи сплошных сульфидов. Они приурочены к одному горизонту, называемому „критическим“, между роговиками в лежащем и глинистыми сланцами в висячем боку. На рис. 28 дан вертикальный

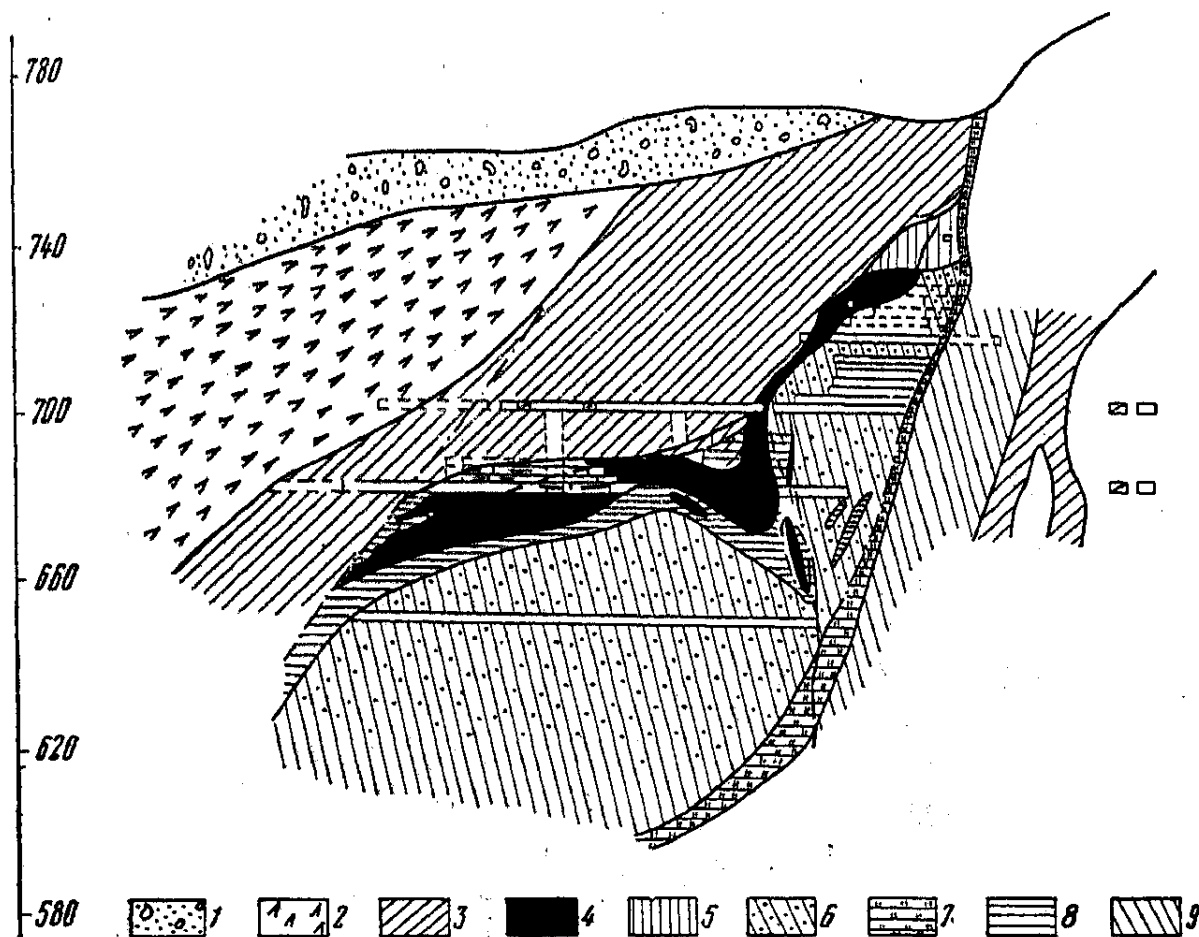


Рис. 28. Риддерский рудник. Вертикальный разрез по 6-му орту.

1 — аллювий, 2 — красно-зеленые туфы, 3 — сланцы висячего бока (глинистые), 4 — сплошные руды, 5 — окисленные руды, 6 — роговики с вкрапленностью, 7 — серицитовые породы с кварцем, 8 — серицитовые породы с карбонатами, 9 — роговики.

разрез Риддерского рудника, взятый из работы Н. Н. Курек и П. П. Бурова.¹ Роговики, находящиеся в лежащем боку, образовались из осадочных пород (туфы, известняки) путем замещения части их вещества; они в значительной степени оруденели и содержат вкрапленные сульфиды и золото. Глинистые сланцы в висячем боку были непроницаемы для растворов и не носят признаков оруденелости; они служили естественным препятствием для рудоносных растворов.

¹ Н. Н. Курек и П. П. Буров. Риддерская группа полиметаллических месторождений. Сб. „Большой Алтай“, изд. Акад. Наук СССР, т. I, стр. 121—141.

Месторождения приурочены к трем антиклинальным складкам, крылья которых усложнены мелкой брахискладчатостью. Рудные залежи сплошных сульфидов концентрируются, главным образом, в куполах этих мелких складок, но имеются залежи и в крыльях складок.

Месторождения, повидимому, генетически связаны с интрузиями кератофира, являющимися источниками растворов, из которых отлагались сульфиды.



Рис. 29. Микрофотография риддерской руды с самородным золотом. Увелич. 1000.

Рядом с Риддерским рудником, в одном километре от него, находится Сокольный рудник, питаемый рудными телами, являющимися прямым продолжением Риддерского.

Минералогический состав риддерской руды: сфалерит, галенит, пирит, халькопирит, тетраэдрит, золото; жильные минералы: кварц, карбонаты, барит, серицит, хлорит.

Особенностью Риддера является весьма мелкозернистое строение сульфидов и тесное их срастание между собой. Для получения минералов в свободном виде приходится измельчать руду до 260 меш, но и при этом не все минералы освобождаются от срастания с другими. Золото находится в

сульфидах в металлическом состоянии и в большей части в весьма мелкокристаллическом. На рис. 29 показана микрофотография шлифа риддерской руды, снятой Л. И. Цукерман в лаборатории металлургии благородных металлов Московского института цветных металлов и золота при увеличении в 1000 раз. На снимке видны кристаллы халькопирита, галенита, пирита и золота на фоне темного сфалерита.

Условия выделения золота здесь, повидимому, отличались от описанных мной выше случаев тем, что золото отлагалось из растворов не позднее, а одновременно с главной сульфидной массой. Золото и здесь, как и в других гидротермальных отложениях, не связано избирательно с какими-либо минералами, а встречается со всеми присутствующими минералами. Исследования И. Н. Плаксина и сотр.¹ и М. Д. Ивановского показали, что золото одинаково находится как в сфалерите, так в пирите и галените и других сульфидах риддерской руды.

По глубине залегания интрузий кератофира Риддера относится к мезотермальной группе месторождений.

Березовское месторождение

Весьма интересно рассмотреть теперь пример глубинного гипотермального месторождения золота. Березовское золоторудное месторождение, как и некоторые другие уральские месторождения, относится к такого рода типу.

Березовск находится недалеко от города Свердловска, на ровной плоской местности. Местность сложена, главным образом, из хлоритовых, тальковых и глинистых сланцев с лиственитом и змеевиком. С поверхности породы превращены в так называемый „красик“ — красноватые мягкие глинистые массы. Сланцы простираются с севера на юг и круто падают на восток. Они пересечены густой сетью почти вертикальных жил, выполненных „березитом“, простирающихся, главным образом, в меридиональном направлении (рис. 30). Жилы имеют 4—20 м мощности, среднее 10 м, а вблизи поверхности и более. Протяженность их значительная, некоторые тянутся на 8 км и более; общая протяженность более 150 км.

„Березит“ — порода, состоящая, главным образом, из кварца, мусковита и пирита. Происхождение ее представляется не совсем ясным.

В березитовых жилах пролегают вкрест их простираения жилы кварца „лестничного“ типа (рис. 31), падающие обычно

¹ И. Н. Плаксин, И. С. Волынский и Л. И. Цукерман. Юбилейный сборник трудов Моск. инст. цветных металлов и золота, № 9, 353, 1940.

на юг под углом $60-90^\circ$, мощностью от 1 мм до 0.3 м, редко более; в среднем 0.08—0.1 м. По простиранию они ветвятся, выклиниваются, соединяются, сменяются новыми. Часто наблюдаются резко выраженные зальбанды. Распределение кварцевых жил в березите очень неравномерное: одни березитовые жилы на большом протяжении не содержат кварцевых, другие очень много.

Кроме кварцевых жил, находящихся в березитовых жилах („лестничных“ или „полосовых“), имеются также кварцевые жилы, находящиеся непосредственно в сланцах и лиственитах, носящие название „красичных“. В некоторых, редких слу-



Рис. 30. Схематический план расположения золотоносных жил Березовска (по Карпинскому).

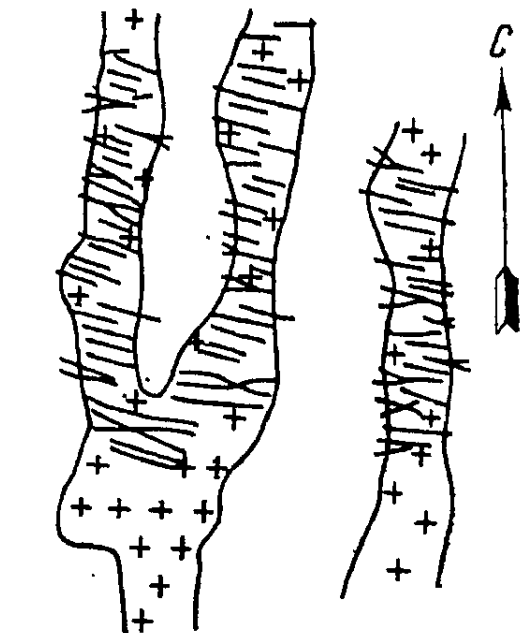


Рис. 31. Лестничные жилы Березовска (схема).

чаях красичные жилы являются продолжением лестничных, пересекающих березит. Мощность „красичных“ жил та же, что и „лестничных“, простирание — десятки и даже сотни метров. По своему характеру и времени образования они, повидимому, не отличаются от лестничных жил.¹ Кварцевые рудные жилы заполнены, главным образом, плотным и пористым кварцем; в зоне окисления кварц охристый и содержит лимонит, малахит, церуссит, крокоит и ряд других минералов. С глубиной появляются сульфиды: пирит, халькопирит, марказит, галенит, сурьмянистая блеклая руда. В

¹ Н. Бородаевский и П. Кутюхин. Советская геология, 1939, № 2, стр. 81.

кварце и березите имеются турмалин, актинолит, пирофиллит и хромовая слюда (фуксит). Самородное золото имеется как в зоне окисления, так и глубже, до 200 и далее метров.

Месторождение образовалось на очень большой глубине. Первоначально находящийся глубже месторождения батолит инъецировал своими эманациями толщу сланцев, в которых вдоль тектонических нарушений долготного направления образовались березитовые жилы. В дальнейшем происходили повторные тектонические

нарушения в широтном направлении, которые сделали возможным протекание термальных вод по тем же березитовым жилам и по свежим трещинам в породе. Циркуляция растворов продолжалась очень долго; при этом температура растворов постепенно падала. В результате длительного процесса, начавшегося при очень высокой температуре, близкой к критической точке воды, и закончившегося при температуре ниже точки кипения воды, образовались рудные жилы. В них можно найти всю гамму минералов, начиная от высокотемпературных и кончая образовавшимися из весьма умеренно нагретых вод. Наконец, в березовских жилах имеются различные генерации того же минерала: кварца, пирита и др. Согласно П. Кутюхину,¹ последовательность выделения минералов березовских жил выражается диаграммой, приведенной на рис. 32. Золото является одним из самых низкотемпературных минералов. Оно ассоциировано, главным образом, с пиритом позднейших генераций, хотя иногда находится и в других минералах. Пирит ранних генераций, по анализам П. Кутюхина, содержит

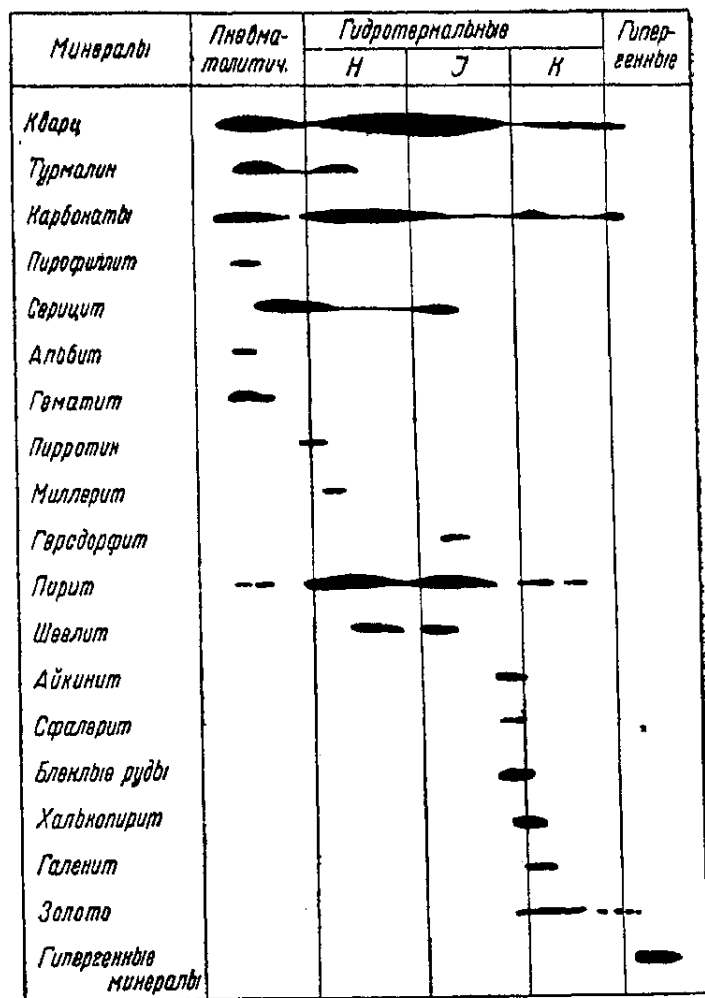


Рис. 32. Геохимическая диаграмма минералов Березовского золоторудного месторождения (по П. Кутюхину).

¹ П. Кутюхин. Вещественный состав руд Березовского месторождения и типы кварцевых жил. Свердловск, 1937, Отчет Свердловского горного института.

весьма мало золота; не содержат его также другие высоко-температурные минералы.

Эти данные о Березовском месторождении подтверждают приведенные выше мысли Н. Н. Горностаева.

Месторождение Хомстэк¹ в округе Лид (Южная Дакота, США) также представляет собой тип гипотермального образования больших глубин. Другим примером могут служить некоторые золотоносные жилы Аляски.

В недавно вышедшей книге Эммонса² читатель может найти многочисленные примеры различных месторождений золота Америки и других стран. Поэтому мне нет надобности далее останавливаться на них.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Дать энергетическую характеристику золото-кварцевых жил перечисленных месторождений (кроме Балея) нет возможности из-за отсутствия полных аналитических данных. Я, однако, считаю весьма полезным попытаться сравнить несколько месторождений по величине ВЭКов ионов, составляющих вещество жильных минералов. Для этой цели возможно воспользоваться аналитическими данными, имеющимися в моем распоряжении по следующим пяти месторождениям:

Балей, Забайкалье	мои анализы
Коммунар, Кузнецкий Алатау	} анализы Ивен-
Кумак, Южный Урал	
Карабаш (Золотая гора), Южный Урал	} и Нэдлер
Ключи, Забайкалье	
	золото ³

ВЭКи ионов для этих месторождений приведены в табл. 19. Из табл. 19 видно, что энергетический уровень различных месторождений существенно различен. Для Балея он очень низок: там нет ионов с ВЭКами выше 1.10. Все ионы Ключевского месторождения распадаются на две группы: с высокими ВЭКами от 1.60 до 2.28 и низкими — до 1.16. Это обстоятельство заставляет предполагать, что месторождение, вероятно, представляет собой результат двух (или более) наложенных один на другой процессов, протекавших при различных условиях.

ВЭКи ионов Коммунара близко подходят по характеру к Балею.

Южноуральские месторождения Кумак и Карабаш (Золотая гора) относятся к более высокому энергетическому уровню,

¹ В. Линдгрэн. Рудные месторождения. *Paige. Econ. Geol.*, 18, 205—237 (1923).

² E m m o n s. *Gold Deposits of World*, 1937.

³ Журнал прикл. химии, 9, 1972 (1936).

Таблица 19

ВЭКи ионов различных месторождений

Ион	Величина ВЭК	Месторождение				
		Балей	Комму- нар	Кумак	Кара- баш	Ключи
Хлор	0.25	—	—	—	—	+
WO ₄	0.28	—	—	+	—	+
Фтор	0.35	—	—	—	—	+
Калий	0.36	+	—	—	—	+
CO ₃	0.39	+	+	+	+	+
MoO ₄	?	—	—	+	+	+
Таллий (1)	0.42	—	—	—	—	—
Натрий	0.45	+	+	+	+	+
Теллур (2)	0.47	+	—	+	—	—
PO ₄	0.50	—	—	—	—	+
Селен	0.56	+	—	—	—	+
Сера	0.55	+	+	+	+	+
Литий	0.55	—	—	—	—	+
Серебро	0.60	+	+	+	+	+
Золото	0.65	+	+	+	+	+
Медь (1)	0.70	+	+	+	+	+
Кислород	0.75	+	+	+	+	+
SiO ₄	0.80	+	+	+	+	+
AlO ₄	0.80	+	+	+	+	+
Свинец	0.82	+	+	+	+	—
Кальций	0.85	+	+	+	+	+
Марганец	0.97	+	+	+	+	+
Медь (2)	1.05	—	—	—	—	—
Ртуть	1.05	—	—	+	—	—
Железо (2)	1.05	+	+	+	+	+
Кобальт	1.07	+	+	+	—	+
Магний	1.07	+	+	+	—	+
Никель	1.08	—	+	+	+	+
Цинк	1.10	—	+	+	—	+
Водород	1.10	+	+	+	—	+
Таллий (3)	1.15	—	—	—	—	+
Индий	1.45	—	+	+	+	—
Титан	1.55	—	+	+	—	+
Хром	1.60	—	—	+	+	+
Железо (3)	1.71	—	—	—	—	+
Родий	1.72	—	—	—	—	+
Палладий	?	—	—	+	—	+
Ванадий	1.77	—	—	+	+	+
Галлий	1.80	—	—	+	+	+
Цирконий	1.96	—	—	—	—	+
Олово	1.98	—	—	+	+	+
Гафний	1.95	—	—	—	—	+
Бор	2.00	—	—	—	—	+
Рутений	2.28(?)	—	—	—	—	+
Мышьяк	?	+	—	+	+	+
Висмут	?	—	—	+	—	—
Сурьма	?	+	—	+	—	+

чем Коммунар и Балей, и при этом обнаруживают большое сходство между собой. Может быть, это сходство имеет под собой глубокое основание в общности геологических явлений, служивших причиной их возникновения.

ПРОЦЕССЫ, ИДУЩИЕ В ЗОНЕ ОКИСЛЕНИЯ ЗОЛОТЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Процессы глубокой эрозии выводят жильные месторождения в область, на которую распространяется действие атмосферного воздуха и поверхностных вод. Здесь наступает новый цикл химических реакций и явлений, приводящий к еще большей концентрации части золота, бывшего в жилах, и к рассеянию другой его части.

В главном эти явления следующие:

- 1) коррозия поверхности частиц золота,
- 2) растворение золота,
- 3) осаждение золота,
- 4) раздробление и снос жильной породы с золотом (образование россыпей).

КОРРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ ЗОЛОТА

Коррозию поверхности частиц золота изучали многие авторы, особенно Фишер¹ и Ивенсен.² Она состоит в том, что неоднородные по своему составу частицы золота образуют друг с другом гальванические пары, где анодами будут участки менее чистого золота, а катодами — участки высокопробного золота. На аноде будет происходить отдача положительно заряженного иона в электролит.

На катоде заряженные ионы, соприкасаясь с отрицательными ионами электролита, образуют нейтральную молекулу. Освободившиеся при этом электроны металла перетекают к катодным участкам и нейтрализуют положительно заряженные ионы электролита. В результате этого процесса анодные участки металла разрушаются, а на катодных участках происходит разряд положительных ионов. Такими ионами обычно являются ионы водорода, а при коррозии сплавов благородных металлов могут быть ионы благородных металлов, главным образом золота. Водород поляризует электрод и прекращает процесс. Но практически в природной среде находятся деполяризующие агенты, как, например, кислород воздуха, и водород выделяется в виде пузырьков.

¹ M. S. Fischer. Inst. Min. and Met. Bull. 1935, № 365—370.

² Г. П. Ивенсен. Труды треста Золоторазведка и Нигризолото, 1938, вып. 10, стр. 96—133.

В конце концов на золотилах образуется тонкая пленка почти чистого золота. Такие пленки действительно наблюдались названными авторами. Вначале пленки бывают пористыми и рыхлыми; впоследствии они уплотняются.

При рассмотрении коррозии природного золота необходимо учитывать наличие на всех металлах, в том числе и на платине и на золоте, оксидной пленки толщиной от 10 до 30 Å, возникающей при соприкосновении с воздухом.¹ Эта пленка при электрохимических процессах оказывает пассивирующее влияние, значительно повышая электродный потенциал покрытого ею металла. Поэтому для развития процесса коррозии необходимо присутствие в электролите таких активных ионов, как ионы хлора. Последние весьма часто присутствуют в поверхностных водах.

Процесс коррозии золота представляет собой элементарный процесс, который протекает в весьма узких пространственных пределах. Растворение и отложение золота происходит на пространстве одной, большей частью весьма небольшой частицы золота. Но в зоне окисления протекают также и более крупные процессы растворения и переосаждения золота.

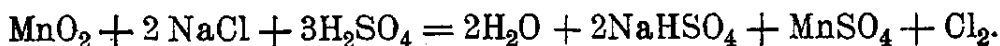
РАСТВОРЕНИЕ ЗОЛОТА

Растворение золота в природных условиях изучалось очень многими авторами, из которых нужно назвать Брокау,² Стокса,³ Фрейзе,⁴ Огрызло⁵ и других. Сводки по этому вопросу даны в книгах В. Эммонса⁶ и С. С. Смирнова.⁷

Из перечисленных в самом начале этой работы растворителей золота наиболее вероятным в природных условиях зоны окисления надо считать кислоты в присутствии окислителей, главным образом в присутствии хлора.

Хлор может образоваться, когда в водах находятся одновременно серная кислота и хлористый натрий, а в рудном материале имеются высшие окислы марганца, например псиломелан или пиролюзит.

Хлор образуется по реакции:



¹ И. Н. Плаксин. Взаимодействие сплавов и самородного золота со ртутью и цианистыми растворами. М., 1937, стр. 54.

² A. Brokaw. J. Geol., 18, 320—326 (1910).

³ H. N. Stokes. Econ. Geol., 1, 644—650 (1906).

⁴ F. W. Freise. Econ. Geol., 26, 421—431 (1931).

⁵ Ogryslo. Econ. Geol., 30, 400 (1935).

⁶ W. Emmons. The Enrichment of Ore Deposits. Washington (Русский перевод, 1935).

⁷ С. С. Смирнов. Зона окисления сульфидных месторождений. М.—Л., 1936, стр. 171—175.

В названной работе Брокау можно найти весьма интересные результаты опытов по растворению золота в различных смесях реагентов, в том числе и в смеси растворов серной кислоты, хлористого натрия с твердым пиролюзитом. Для опытов брали смесь растворов кислоты и соответствующей соли железа, в некоторых случаях в раствор вводилась измельченная двуокись марганца. Золото было 999 пробы, его раскатывали в пластинку толщиной 0.05 мм и площадью 350 кв. мм. Для опыта брали 0.15 г золота. Результаты опытов Брокау сведены в табл. 20

Таблица 20

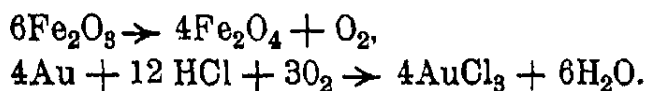
Действие растворов солей железа на золото

№ опыта	Реакционная смесь	Площадь пластинки золота в кв. мм	Продолжительность опыта в днях	Результат опыта
1 а	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Au}$	350	34	Невесомая потеря
1 б	Та же	350	34	" "
2	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{MnO}_2 + \text{Au}$	350	34	" "
3 а	$\text{FeCl}_3 + \text{HCl} + \text{Au}$	350	34	" "
3 б	Та же	350	34	" "
4 а	$\text{FeCl}_3 + \text{HCl} + \text{MnO}_2 + \text{Au}$	383	34	Потеря 0.01640 г
4 б	Та же	348	34	Потеря 0.01504 г
5	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{NaCl} + \text{Au}$	350	14	Невесомая потеря
6	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{NaCl} + \text{MnO}_2 + \text{Au}$	350	14	Потеря 0.00505 г

Из таблицы видно, что хлористый натрий, соляная и серная кислоты действуют на золото только в случае присутствия двуокиси марганца, обуславливающей выделение свободного хлора (опыты 4 и 6). Если таких условий не создается, то растворения золота не происходит. Специальные опыты, поставленные для проверки действия на золото растворов сернокислой окисной соли железа, показали, что этот реагент не растворяет золота.

Чрезвычайно интересны работы Стокса и Огрызло по действию на золото смеси растворов соляной кислоты и хлорного золота при высоких температурах. Стокс установил, что FeCl_3 в растворе соляной кислоты растворяет золото. Этот опыт повторил Огрызло и получил результаты, подтверждающие выводы Стокса. Раствор 1 г $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в 20 мл 1N соляной кислоты нагревался вместе с листочками золота в течение 61 часа. Золото переходило в раствор и при охлаждении осаждалось вновь в виде мелких кристалликов. В растворе было обнаружено золото. В смеси соляной кислоты с хлорным золотом растворялось значительно больше золота, чем в одной соляной кислоте.

Были проделаны также опыты в запаянной трубке при 200° в течение 59 часов со смесью 20 мл 1*N* соляной кислоты и 1 г окиси железа. Огрызло предполагал, что при введении Fe₂O₃ вместо FeCl₃ некоторое количество золота будет оставаться в растворе за счет окисляющего действия окиси железа, протекающего по реакциям:



Действительно, после реакции было обнаружено небольшое количество магнитной окиси железа. Значительное количество золота растворялось, но при охлаждении снова выпадало.

Опыты Огрызло с растворами хлористого натрия, углекислого натрия и хлористого аммония при 200° не дали положительного результата: золото не растворялось. Опыты с соляной кислотой в автоклаве при 200 и 300° в атмосфере воздуха показали, что золото в незначительной степени растворяется; в атмосфере углекислого газа и азота растворимость падает, делаясь едва заметной.

В табл. 21 (см. стр. 80) приведены некоторые данные опытов Огрызло, произведенные в бомбе, выложенной изнутри золотом.

Эти данные говорят, что растворение золота в растворе соляной кислоты возможно, если присутствует окислитель — кислород воздуха или окись железа. Растворимость эта совершенно ничтожна при отсутствии окислителя.

Отсюда напрашивается вывод: для растворения золота в природных условиях необходимо присутствие энергичных реагентов, выделяющих из хлористых солей хлор.

Образование в природных условиях цианистых соединений, если может иметь место, то в крайне ограниченных размерах.¹ Такого широкого распространения, как процессы растворения и переноса золота, оно иметь не может.

Как было указано выше, селеновая и теллуровая кислоты, образующиеся при окислении теллуристых и селенистых минералов, также не служат растворителями золота.²

Если реагентами, действующими на золото в зоне окисления, служат хлор и кислоты, то каковы их источники в природе?

Хлор в виде хлористых солей находится почти во всех грунтовых водах. Концентрация его по большей части незначительна, но достаточна, чтобы шли реакции медленного растворения золота. По данным Эммонса, в 16 пробах вод из медных рудников концентрация хлор-иона в среднем составляла 69.9 миллионных доли, а из 22 проб вод из золотых

¹ А. Е. Ферсман. Геохимия, т. IV, см. при азоте и золоте.

² О. Е. Звягинцев и Е. А. Яковлева. Докл. Акад. Наук СССР, 1932, № 5, стр. 401—402.

Таблица 21

Действие различных реагентов на золото
(По опытам Огрызло)

№ опыта	Условия опыта				Результаты опыта
	реакционная смесь	газ	время в часах	температура в °С	
5	25 мл 0.5N HCl	воздух	59	300	Раствор желтый; в него перешло 0.0349 г золота.
6	25 мл 0.05N HCl	воздух	59	200	Раствор бесцветный; в нем следы золота.
9	25 мл 0.05N HCl	CO ₂	50	300	Раствор бесцветный; в нем нет золота.
49	25 мл 0.5N HCl	CO ₂	45.5	300	Раствор желтый; в нем 0.0078 г золота; золотой листочек значительно разъеден, и на нем осело немного золота.
66	25 мл 0.5N HCl	CO ₂	47	200	Раствор бесцветный; в нем следы золота.
57	25 мл 0.5N HCl	N ₂	48	300	Раствор слегка желтый; в нем 0.0023 г золота; золотой листочек слегка растравлен; на нем осело немного золота.
12	1 г NaCl; 25 мл H ₂ O	воздух	56	300	Раствор бесцветный, золота в нем нет. При выпаривании досуха раствор окрашен в красный цвет, вероятно, коллоидным золотом.
51	3 г NaCl; 25 мл H ₂ O	воздух	44.5	300	Тот же результат; золотой листочек протравлен в нескольких местах.
22	1.25 г NaCl; 25 мл H ₂ O и 0.7293 г Au в трубке стекла пирекс	N ₂	59	200	Раствор бесцветный, не дает пробы на золото. Вес золота 0.72900 г.
24	1 г NH ₄ Cl; 25 мл H ₂ O в золоченой бомбе	N ₂	35	200	Раствор бесцветный, не дает пробы на золото. Золотой листочек не протравлен.
14	1 г FeCl ₃ · 6H ₂ O 20 мл 1N HCl и золотой листочек в трубке стекла пирекс	CO ₂	61	200	Золото растворилось и снова выпало при охлаждении.
21	0.7651 г Au; 1 г Fe ₂ O ₃ 20 мл 1N HCl в трубке стекла пирекс	N ₂	59	200	В растворе было 0.0458 г золота и выпало снова при охлаждении. Образовалось немного Fe ₃ O ₄ . Раствор не дает пробы на золото.
34	0.7949 г Au; 2 г Na ₂ CO ₃ 20 мл H ₂ O в трубке стекла пирекс	N ₂	46.5	200	Раствор бесцветный, не дает пробы на золото; в растворе найден SiO ₂ .

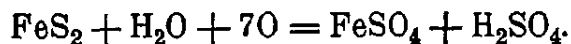
рудников 21.3 миллионных доли. Во многих случаях содержание хлористых солей значительно выше: так, вблизи морских берегов, соляных озер, солончаков и т. д. в почвах и поверхностных породах содержание хлористых солей увеличивается.

Для образования свободного хлора необходимо присутствие серной кислоты и высших окислов марганца.

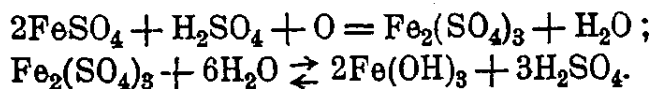
Высшие окислы марганца входят в состав минералов: пиролюзита и псиломелана. Кроме того, марганец входит в состав ряда других минералов: манганита, манганозита, пирохроита, сульфатов (смикит, малардит и др.), сульфидов (алабандин, гадерит), карбонатов (радхорзит, марганцовистый сидерит и др.), силикатов (родонит). Кроме того, очень многие породообразующие минералы содержат марганец в виде примеси (порядка 0.1—1%). Таким образом, нельзя себе представить месторождение золота, которое было бы лишено содержащих марганец минералов. Эммонс приводит ряд примеров золотосодержащих жил, в которых найдены минералы марганца. А если нет в наличии марганцовых минералов, то марганец всегда находится в силикатах и других породах в виде примеси как неизменный спутник железа. В зоне выветривания и интенсивного окисления марганцовые соединения переходят в высшие окислы. Лимонит, в больших количествах накапливающийся в зонах окисления сульфидных месторождений и золото-кварцевых жил, всегда содержит высшие окислы марганца.

Окись железа, как показал Огрызло (см. выше), так же как и окислы марганца, может служить окислителем и способствовать растворению золота. Поэтому в некоторых случаях свободный хлор в незначительных количествах может выделяться под действием окислов железа на хлористые соли.

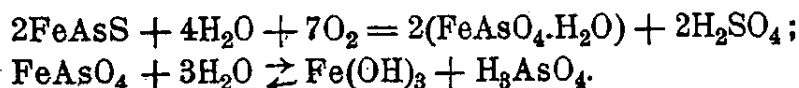
Свободная серная кислота в зоне окисления образуется за счет окисления сульфидов. Так, пирит окисляется по реакции:



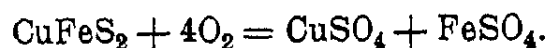
При дальнейшем окислении закисная соль переходит в окисную, а последняя, гидролизуясь, переходит в лимонит:



Арсенопирит также при окислении должен дать серную и мышьяковую кислоты:



Халькопирит, окисляясь, образует сернокислые соли меди и железа:



Гораздо быстрее халькопирит окисляется при совместном воздействии кислорода, воды и окисной сернокислой соли железа:



при этом также образуется серная кислота.

Сульфиды, содержащие меньшее количество атомов серы на атом металла (сфалерит, галенит), не выделяют при окислении свободной серной кислоты.

Таким образом, в зоне окисления месторождений золота повседневно должны иметься в наличии как свободная серная кислота (а также мышьяковая и другие кислоты), так и окислы марганца и хлористые соли. При этих условиях должно иметь место образование свободного хлора, и растворение золота под влиянием этого хлора должно быть явлением весьма частым.

Помимо истинного растворения золота в зоне окисления имеются благоприятные обстоятельства для образования золя золота. Мельчайшие частицы золота, находящиеся внутри и на поверхности сульфидов, при окислении сульфидов освобождаются и переходят в водный раствор в виде золя или суспензии (в зависимости от величины частиц золота). Золь и суспензии могли свободно передвигаться вместе с грунтовыми водами до тех пор, пока не встретились с коагулирующими реагентами.

ОСАЖДЕНИЕ ЗОЛОТА

Одновременно с растворяющими агентами, в золотоносных жилах присутствуют и осаждающие реагенты и коагулирующие золи вещества. К таким веществам прежде всего относятся сульфиды. Вопросу осаждения золота сульфидами посвящено несколько исследований: Брокау,¹ Пальмер и Бастин,² Ваутин³ и др. Брокау положил кристалл сфалерита в раствор хлорного золота; через 24 дня поверхность кристалла покрылась блестящими пятнами золота. Та же реакция была повторена с пирротинном; золото восстановилось быстрее; минерал позолотился через 3 дня. Осаждение золота на пирротине происходило несколько иначе, чем на сфалерите; поверхность минерала оказалась разъеденной, а золото осадилось в виде кристалликов неравномерно и частично в разъединах и углублениях в минерале. Полибазит $(\text{SbAs})_2\text{S}_3 \cdot 8(\text{Ag, Cu})_2\text{S}$ также

¹ A. D. Brokaw. J. Geol., 21, 251—268 (1913).

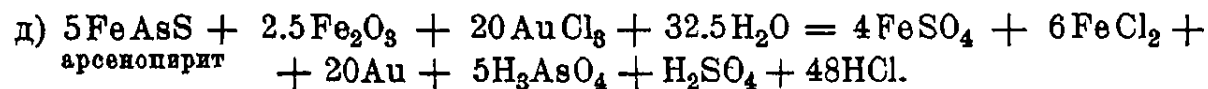
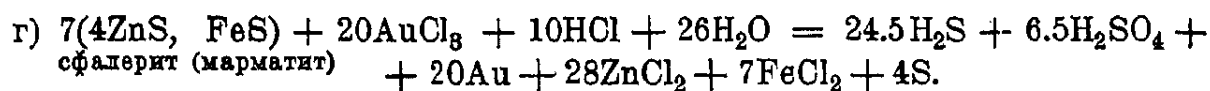
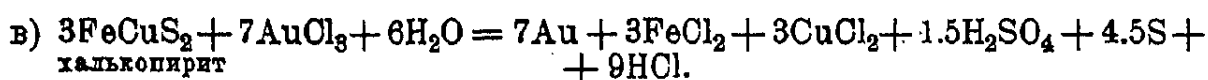
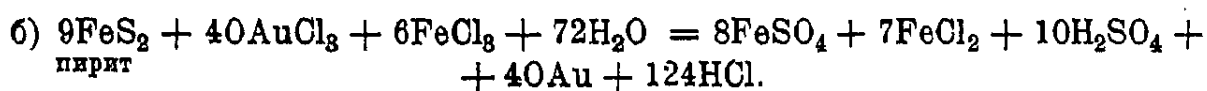
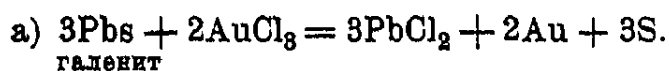
² C. Palmer and E. S. Bastin. Econ. Geol., 8, 140—171 (1913).

³ C. Vautin. Inst. Min. and Met. Trans., 1, 274 (1893).

быстро (в течение 10 дней) осаждал золото, покрываясь матовой пленкой.

Эти опыты качественного характера были повторены нами,^{1, 2} но мы постарались изучить также и количественную сторону вопроса, чтобы вывести суммарные уравнения реакций осаждения, а также исследовать скорость осаждения золота различными сульфидами.

Нами были изучены реакции взаимодействия растворов хлорного золота с галенитом, сфалеритом, халькопиритом, пиритом, арсенопиритом. Были проведены опыты с растворами золота определенной концентрации и с минералами, состав которых был известен. Продукты реакций были тщательно проанализированы. Количественные отношения элементов в исходных продуктах и в продуктах реакций позволяли написать следующие уравнения:



Интересно отметить, что при этих реакциях железо всегда восстанавливалось до двухвалентного. Также нужно констатировать наличие элементарной серы в продуктах реакций с галенитом, халькопиритом и сфалеритом и свободной серной кислоты во всех реакциях, кроме галенита. Реакции осаждения золота разными сульфидными минералами идут с различной скоростью. На рис. 33 и в табл. 22 (см. стр. 85) показана сравнительная скорость осаждения золота при 25° из хлористых растворов с одинаковой начальной концентрацией золота различными сульфидами с одинаковой площадью.

Нами изучены скорости осаждения золота сульфидами при различных температурах, при различной поверхности сульфидов и при различной концентрации хлорного золота в растворе. Увеличение температур от комнатной до 65 и до 95° значи-

¹ О. Е. Звягинцев и Э. Л. Писаржевская. Докл. Акад. Наук СССР, 1936, IV, № 2, 106.

² О. Е. Звягинцев и И. А. Паульсен. Изв. Сектора платины и других благородных металлов, 16, 109—137 (1939); см. также Докл. Акад. Наук СССР, 1938, XXI, № 4, стр. 175.

тельно увеличивает скорость осаждения золота сульфидами. В таком же направлении действует и увеличение поверхности сульфида.

Качество осадков, выделяющихся из раствора хлорного золота на сульфидах, различно: галенит покрывается плотной пленкой золота; пирит и арсенопирит покрываются рыхлым слоем мелкого, почти коллоидного золота.

Таким характером осаждения объясняется большая склонность золота ассоциироваться с пиритом и арсенопиритом, чем со сфалеритом и галенитом.

Кроме сульфидов, целый ряд других минералов также осаждает золото. По данным Брокау, карбонаты — кальцит, сидерит и родохрозит — быстро осаждают золото из растворов, в которых оно содержится в виде хлорида. Особенно активным осадителем служит сидерит, вероятно потому, что в кислоте образуется сульфат закиси железа, восстанавливающий

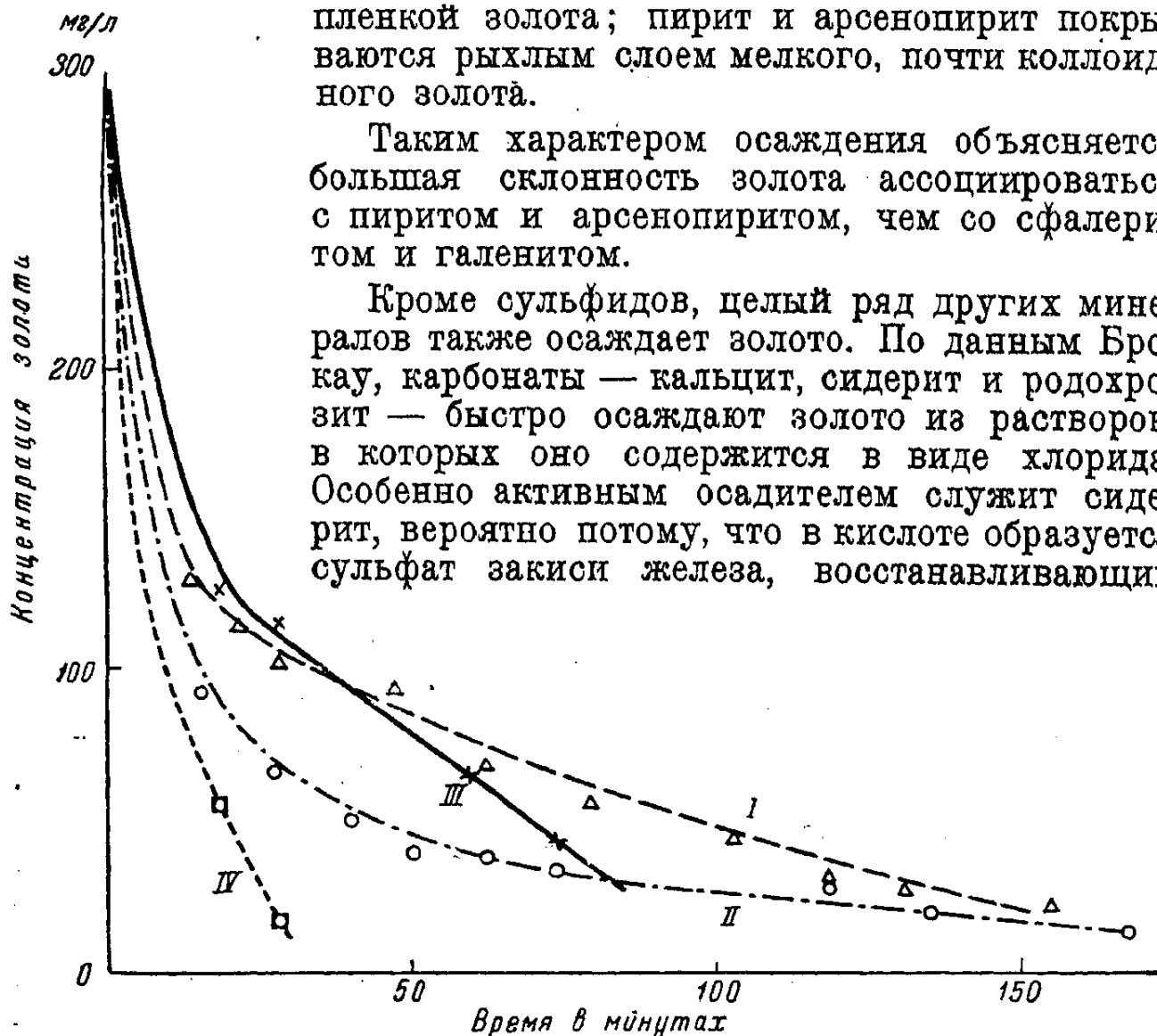


Рис. 33. Скорость осаждения золота различными сульфидами при 25°. I — пирит, II — галенит, III — марматит, IV — халькопирит.

золото. Нишихара¹ показал, что нефелин и лейцит быстро восстанавливают кислые растворы золота. Вообще все минералы, так или иначе нейтрализующие кислые золотые растворы, осаждают золото из растворов, однако время, потребное для осаждения его слюдами, полевыми шпатами и т. п., очень велико. При достаточно длительном соприкосновении этих минералов боковых пород с кислыми растворами, кислота нейтрализуется,

¹ G. S. Nishihara. Econ. Geol., 743—757 (1914).

все золото восстанавливается, а прореагировавшие минералы дают каолин.

Растворы сернокислой закисной соли железа также являются энергичными восстановителями золота, а в малых концентра-

Таблица 22

Скорость осаждения золота сульфидами
(начальная концентрация золота 0.292 мг/л,
температура 25°)

Время в ми- нутах	Концентрация золота в мг/л			
	пирит	халькопирит	марматит	галенит
0	0.292	0.292	0.292	0.292
13	0.127	—	—	—
15	—	—	—	0.094
18	—	—	0.125	—
19	—	0.055	—	—
22	0.118	—	—	—
27	—	0.019	—	0.068
28	0.103	—	0.117	—
36	0.109	—	—	—
40	—	—	—	0.051
47	0.097	—	—	—
50	—	—	—	0.040
56	0.084	—	—	—
60	—	—	0.064	—
62	0.067	—	—	—
63	—	—	—	0.038
74	—	—	0.044	0.037
80	0.057	—	—	—
85	—	—	0.029	—
104	0.041	—	—	—
113	0.034	—	—	0.025
132	0.027	—	—	—
135	—	—	—	0.019
156	0.023	—	—	—
157	—	—	—	0.013

Примечание. Арсенопирит восстанавливал золото полностью уже в первые минуты.

циях задерживают его растворение.¹ Эти растворы легко образуются при окислении пирротина или из раствора окисной сернокислой соли железа при восстановлении его пиритом, пирротинном и другими сульфидами.

Энергичными восстановителями хлоридов золота являются также теллуристые минералы, теллуриды золота, а также самородное золото.

¹ W. I. McCaughey. J. Am. Ch. Soc., 31, 1261 (1909).

Такое обилие осадителей золота обеспечивает то обстоятельство, что золото, растворившееся в зоне окисления, не может быть перенесено нисходящими растворами на сколько-нибудь значительную глубину.

Многие авторы, как Эммонс, Ленер¹ и др., придают переносу золота в виде хлористых солей в зоне окисления месторождений слишком большое значение. Мне представляется, что более прав С. С. Смирнов,² который указывает на возможность многократного растворения и переосаждения золота, но не соглашается с допущением переноса золота на значительное расстояние в один прием. Он говорит: „В общем можно сказать, что при таком обилии осадителей трудно говорить о какой-либо сколько-нибудь ощутимой миграции золота в щелочных, нейтральных и даже в слабокислых растворах.“

МИГРАЦИЯ ЗОЛОТА

Миграция золота в коллоидных растворах гораздо более вероятна. Исследования Маклорена³ и Фронделя⁴ показывают, что золи золота обладают ничтожной устойчивостью по отношению к огромному числу минеральных реагентов. Изложенные выше данные⁵ вполне подтверждают это.

Но эти опыты приведены без учета наличия в природных условиях защитных коллоидов, как например, коллоидных кремнекислоты, гидрата окиси железа и т. п. Бойделл,⁶ исходя из наличия защитных коллоидов, считает, что коллоидные растворы представляют собой главную форму, в которой мигрирует золото. Нельзя не признать, что защитные коллоиды могут сыграть некоторую роль в увеличении пути, проходимогo золотом с нисходящими растворами, но все же неустойчивость растворов остается в силе. Поэтому нельзя допустить возможности длительного нахождения золота в растворах и значительности пути, проходимогo этими растворами.

Миграцию золота вниз с нисходящими растворами, по моему мнению, надо представлять себе, как сумму многократно повторенных растворений, движений золота в виде истинных и коллоидных растворов и осадений его. В результате таких многочисленных движений золото медленно движется вниз и останавливается в зоне, где окисляющие и

¹ V. L e n e r. Econ. Geol., 13, 161—184 (1918).

² С. С. Смирнов. Зона окисления сульфидных месторождений. ОНТИ, Гл. ред. геол.-разв. литературы, М.—Л., 1936.

³ G. M. M a c l o r e n. Gold.

⁴ F r o n d e l. Econ. Geol., 33, 1—20 (1938).

⁵ О. Е. Звягинцев и И. А. Паульсен. Изв. Сектора платины, вып. 16, стр. 135 (1939).

⁶ H. S. B o y d e l l. Bull. Inst. Min. and Met., 243 1—108 (1924).

растворяющие агенты отсутствуют. В результате этих процессов верхний слой породы обедняется золотом, а зона цементации (слой, где действуют восстанавливающие реагенты) обогащается золотом. По мере сноса с поверхности обедненных золотом слоев находившееся в них ранее золото накапливается в зоне цементации. В итоге совместной деятельности денудированных, окисляющих и восстанавливающих факторов коренные месторождения золота в своей верхней зоне обогащаются.

Обогащение за счет концентрации золота сопровождается параллельным процессом обогащения за счет выщелачивания и выноса других легкоподвижных элементов. В результате

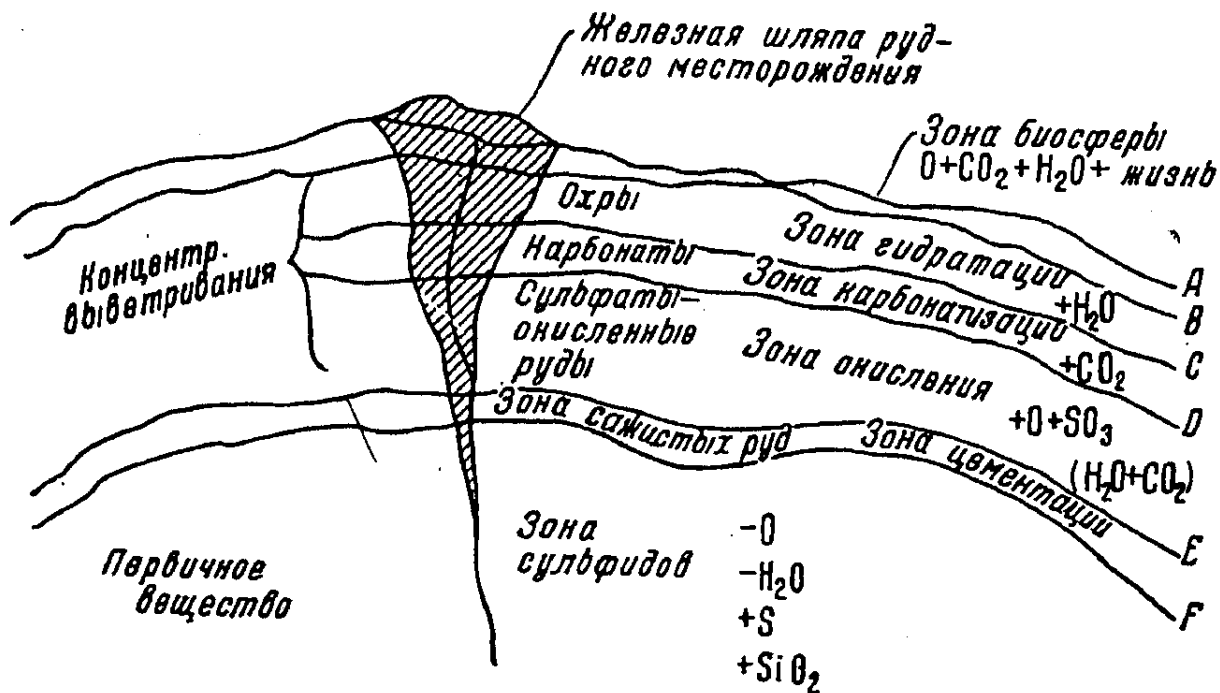


Рис. 34. Схема зоны окисления сульфидного месторождения (по А. Е. Ферсману).

выщелачивания общая масса рудного тела уменьшается, и золото, оставшееся в нем, повышает свое относительное содержание.

Схематически пространственное размещение процессов, описанных выше, в поверхностной части золоторудного месторождения изображено на рис. 34.

Следует указать, что так называемая зона цементации, или зона сажистых руд, может быть ясно выражена только тогда, когда рудное месторождение имеет достаточно много сульфидов. Если золоторудная жила содержит мало сульфидов, то эта зона растягивается на значительном протяжении вглубь и выражена не резко. Впрочем, и растворение золота в этом случае не может иметь широкого распространения вследствие незначительных количеств серной кислоты, образующейся при окислении сульфидов.

Месторождения, богатые сульфидами, которые имеют ясно выраженную окисленную зону в виде „железной шляпы“, имеют и ясно выраженную зону цементации.

Примером такого месторождения является Блява на Урале. Под „железной шляпой“, состоящей, главным образом, из окислов железа, находилась зона цементации, чрезвычайно богатая золотом (в настоящее время выработана), состоявшая из „сажистых руд“ (минералов черного цвета: ковеллина, халькозина, аргентита и др.).

ВТОРИЧНОЕ ЗОЛОТО

Вторичное золото, осажденное из растворов после его растворения, как показал Г. П. Ивенсен (см. выше), обычно не отличается от первичного ни формой кристаллизации, ни другими свойствами. Однако есть довольно распространенная

Геофазы Минералы	Эманационная	Гидротермальная			Супергенная
		высоко-температ.	средне-температ.	низко-температ.	
Пирит		■			
Кварц (1-я генерация)		■			
Сфалерит			■		
Халькопирит			■		
Кварц (2-я генерация)				■	
Барит				■	
Фальгерц				■	
Галенит				■	
Самородн. золото				■	
Сфалерит					■
Ковеллин					■
Горчичное золото					■

форма вторичного золота, которая характерна только для него; это так называемое горчичное золото. Горчичное золото имеет коричневый цвет, подобный цвету порошка горчицы, и мелкозернистую структуру.

С. А. Юшко¹ описывает колчеданистые руды Баймакского района Урала, подвергшиеся в значительной степени окисляющему действию поверхностных вод и воздуха. Этот автор проследил минералогическую форму зо-

Рис. 35. Диаграмма последовательности кристаллизации колчеданистых руд Баймакского района (по Юшко).

лота в этих рудах. Было установлено, что золото первичное находится в самородном состоянии в ассоциации со сфалеритом, халькопиритом, пиритом, галенитом и кварцем. Порядок выделения минералов и место золота в этом порядке определяется геохимической диаграммой, которая приведена на рис. 35. Кроме первичного, было найдено и вторичное, переосажденное золото в виде розовато-серых комочков, наблюдавшихся на некоторых зернах первичного золота. Таким образом, переосаждение золота происходило

¹ С. А. Юшко. Изв. Акад. Наук СССР, сер. геолог. 1936, № 2—3, стр. 435—440.

сно
ы“,

ле.
ис-
тая
ки-
на,

аст-
не
ру-
ная
ота,
ько
зы-
ото.
еет
об-
ор-
тую

сы-
уды
ра-
чи-
яю-
ерх-
уха.
ми-
зо-
ие
але-
По-
дке
иве-
то
рых
того
ило

2-3,



В. ЛИНДГРЕН

почти там же, где и растворение. На геохимической диаграмме горчичное золото занимает последнее по времени образования место среди других минералов.

ОБРАЗОВАНИЕ РОССЫПЕЙ

Миграция золота под влиянием процессов окисления и воздействия поверхностных вод является не единственным процессом, который происходит в поверхностной зоне золотых месторождений. Выходя на поверхность, золотоносные жилы подвергаются интенсивной денудации: механическому раздроблению, разрыхлению и сносу измельченного материала, его перетиранию и размыванию. Здесь нет надобности останавливаться подробно на процессах образования россыпей: достаточно сослаться на литературу и перечислить типы россыпных месторождений. Линдгрэн в своем капитальном труде¹ пишет:

„При образовании россыпей природа со своей обычной медлительностью проводит те же процессы дробления и концентрации, которыми мы пользуемся при механическом обогащении руд. От быстрых перемен температуры породы разрушаются и измельчаются; то же самое происходит под влиянием жизнедеятельности растений, ударов, наносимых оползающими и уносимыми водой обломками пород, перетирающего действия льдов и, наконец, химического разложения и гидратаций. Продукты этих процессов образуют скопления в ложах рек или на берегах проточных вод или под влиянием океанских течений, вызывающих движение, напоминающее механическое действие концентрационных столов и отсадочных машин. Круглые частицы различных размеров тонут в воде со скоростью, пропорциональной их весу, деленному на сопротивление. Так как сопротивление пропорционально поверхности, обломок кварца величиной с горошину будет тонуть гораздо медленнее, чем кусок золота того же размера. Этот обломок будет легко уноситься потоком воды, в котором частица золота того же размера немедленно потонет“.

Таким образом, в более ранние стадии в россыпях будет идти накопление минералов с наиболее высоким удельным весом. Удельный вес главных минералов следующий:

Кварц	2.64	Корунд	4.0
Полевой шпат	2.55—2.65	Монацит	5.0
Ферромарганцевые силикаты	2.9—3.4	Магнетит	5.0
Гранат	3.14—4.13	Касситерит	6.4—7.1
Алмаз	3.54	Золото (минерал)	15.6—19.33
		Платина (минерал)	14.0—19.0

¹ В. Линдгрэн. Минеральные месторождения. Русский перевод, вып. II (1934).

Помимо удельного веса при накоплении в россыпях играет также роль форма частиц минералов: чешуйчатые минералы, подобные молибдениту, и чешуйчатое золото, несмотря на свой высокий удельный вес, будут легко уноситься потоком воды и концентрироваться с трудом.

Россыпи по их происхождению можно разделить на три вида:

1. Элювиальные — находящиеся в том самом месте, где находится и коренная порода, служившая материалом для их образования.

2. Эоловые — скопившиеся под действием ветра. Такие россыпи могут образовываться только в сухом климате.

3. Аллювиальные — в руслах потоков, ручьев и рек, уносивших разрушенные породы коренных месторождений и дававших наносы, обогащенные тяжелыми частицами минералов с высоким удельным весом. Последний вид россыпей является наиболее распространенным.

По времени образования все россыпи делятся на образовавшиеся в современную нам геологическую эпоху и на россыпи прежних геологических циклов (поднятые, погруженные, ископаемые).

Наконец, по характеру залегания россыпи делятся на русловые мелких притоков, русловые россыпи и бары рек, галечные равнины и прибрежные (морские) россыпи.

Нас интересует прежде всего процесс образования россыпи с точки зрения тех химических процессов, которые ведут к изменению состава золота или к его переходу в форму иную, чем оно имело в коренном месторождении.

Затем весьма интересными являются процессы изменения золота или его перемещения в россыпи после ее образования.

Образование россыпи сопровождается многократными механическими воздействиями на частицы золота: ударами и трением. Первые сглаживают выпуклости и углы и уплотняют самородное золото, если оно было рыхлым и пористым, подобно тьелгинским самородкам, изображенным на рис. 9. Если золото было пористо или покрыто пористым слоем вторичного происхождения, то этот слой может быть уплотнен и превращен в листоватый слой, лежащий поверх более пористой прослойки на самородке.

Гораздо более важным фактором является истирание. Кристаллические золотые частицы под влиянием истирающего действия песка и других твердых минералов окатываются, приобретая округлые очертания и блестящую поверхность. Всевозможные корочки и рубашки, находившиеся на поверхности золотин, стираются. При этом золотинки уменьшаются

в объеме и весе. Чем дальше удаляется золото от первоисточника (коренного месторождения), тем мельче становятся его частицы. Стираящееся с поверхности золотин золото переходит в раствор в виде мельчайшей взвеси и образует коллоидальные частицы, уносимые реками в море. Эта часть золота рассеивается и ускользает из области концентрации. Кроме того, некоторые золотины в процессе денудации сплющиваются и превращаются в тонкие листочки. Золото в таком виде легко уплывает, особенно легко прилипнув к пузырькам воздуха. Это „пловучее золото“ может быть унесено на очень далекие расстояния от коренного месторождения.

После того как золото в россыпи стабилизировалось, наступает период спокойного и длительного пребывания частиц его в одном месте. Однако это не значит, что золото не претерпевает никаких изменений: оно здесь подвергается значительным воздействиям ряда химических реагентов.

Прежде всего надо упомянуть те же реагенты, которые действовали в зоне окисления коренных месторождений: кислота, получающаяся в результате окисления сульфидов, окислы железа и марганца и хлористые соли, дающие свободный хлор. Окисление сульфидов идет в россыпи значительно интенсивнее, чем в сравнительно плотной породе коренного месторождения. Происходит также и образование коллоидных растворов золота вследствие дальнейшего разрушения породы, его вмещающей, и освобождения мельчайших частиц золота, а также вследствие осаждения золота из растворов в форме золя.

В тех случаях, когда россыпь находится в непосредственной близости к почве, вступает в действие еще один фактор, вызывающий миграцию золота: вещества, являющиеся результатом деятельности растений и микроорганизмов.

Очень интересные данные приводит Ф. Фрейзе,¹ наблюдавший миграцию золота под влиянием органических растворов в условиях тропического климата в некоторых месторождениях Бразилии. Ф. Фрейзе наблюдал, что золотые россыпи у восточной границы Минас Жерас в округах Пальмы и Муриаха, выработанные в 1908 и 1909 гг., в 1926 г. снова обогатились золотом. При этом металл по своему виду и составу не был похож на золото, добывавшееся ранее. В восточной части провинции Рио Ф. Фрейзе открыл несколько золотых россыпей; средняя проба их была 11.85 г золота на тонну. Россыпи были выработаны, и прииски, заросшие густой растительностью, снова были открыты в 1926 г. При опробовании оказалось, что содержа-

¹ F. W. Freise. Econ. Geol., 26, 421—431 (1931).

ние золота у плотика равно 4.66 г на тонну. Золото имело зеленоватый вид и не было похоже на добытое здесь раньше. Наконец, Фрейзе приводит пример вторичного обогащения отвалов в центре Минас Жерас. Эти отвалы, содержавшие 0.48 г золота на тонну, через несколько лет обогатились до содержания 3.69 г на тонну.

После установления этих фактов Фрейзе задался целью ближе познакомиться с появлением „нового золота“ и с его качествами.

Оказалось, что „новое золото“ ведет себя значительно пассивнее по отношению ко ртути и к цианистым растворам, чем первичное золото. „Новое золото“ напоминает „черное золото“, часто находимое в россыпях Бразилии. Это „черное золото“ называется так потому, что покрыто темной корочкой („рубашкой“ русских золотоискателей) из окислов железа и гуминовых веществ. После снятия кислотой с „черного золота“ корочки оно оказалось тождественным „новому золоту“. Эти наблюдения привели к мысли, что золото в отвалы приносится растворами, содержащими гумусовые вещества, и там осаждается.

С целью воспроизвести эти процессы Фрейзе проделал опыты. Прежде всего были сделаны опыты растворения золота в гуминовой кислоте. Делалась вытяжка из бурых углей (растворением в щелочах), высушивалась и снова растворялась в воде в определенной концентрации. Золото в виде пластинок, предварительно взвешенных, помещалось в бутылки, в которые наливались растворы. Бутылки приводились в качательное движение. Один ряд опытов был поставлен с растворами гуминовых кислот, минерализованными одной или несколькими солями в той же концентрации, как в грунтовой воде.

Другие опыты были поставлены в чистых растворах. Условия опытов варьировались. В табл. 23 приведены результаты опытов Фрейзе.

Из таблицы следует:

1. Гуминовые кислоты, даже сильно разведенные, оказывают действие на металлическое золото, если время реакции было достаточно велико и если было исключено влияние кислорода. Кислород быстро разрушает органические соединения (окраска раствора при этом меняется).

2. В дистиллированной воде и в воде, из которой удален воздух, растворы гуминовых кислот сохраняют свою активность по отношению к золоту; в дождевой воде эта активность меньше. Углекислые и двууглекислые соли разрушают гуминовые кислоты; меньшее влияние имеют сульфаты, бисуль-

Растворение золота в гуминовых кислотах при различных условиях (опыты Фрейзе)

Крепость раствора гумуса в %	Род воды	Золото, подвергшееся испытанию		Условия растворения	Продолжительность (часы)	Растворимость золота	
		форма и толщина в мм	проба			мг	%
0.10	Дождевая вода без запаха	Пластинка 0.01	850	Без движения	24	8.354	0.05
		Пыль 0.01	850		48	15.228	0.91
0.50	Дождевая вода без запаха	Пластинка 0.01	1000	Постоянное движение	24	11.182	1.14
					48	23.075	2.35
2.50	Дистилл. вода без запаха	Пыль 0.005—0.01	900	Без движения	72	25.553	2.59
					24	2.134	0.005
4.00	Дождевая вода без запаха	То же	900	Медленное движение	48	2.664	0.0062
					24	следы	0
10.11	Дождевая вода	Пыль 0.002—0.08	600	Медленное движение + воздух	48	следы	0
					24	32.551	3.68
5.0	Дистилл. вода с K_2CO_3	То же	900	Без движения	48	65.001	7.21
					24	27.161	11.08
10.00	Дистилл. вода с K_2CO_3 и 1% $NaHCO_3$	То же	30	Без движения	24	27.101	3.11
					48	111.402	12.50
10.00	Дистилл. вода с 5% KNO_3 , 5% $NaCl$	То же	900	Без движения	192	168.249	19.28
					300	175.455	20.21
10.00	Вода с 5% Na_2SO_4 , 5% $Ca(HCO_3)_2$	То же	900	Без движения	24	23.450	1.56
					48	42.761	2.84
10.00	Дистилл. вода с 5% KNO_3 , 5% $NaCl$	То же	900	Без движения	72	70.111	4.66
					240	166.369	11.00
10.00	Дистилл. вода с 5% KNO_3 , 5% $NaCl$	То же	900	Без движения	48	следы	никакого действия
					96	следы	никакого действия
10.00	Дистилл. вода с 5% KNO_3 , 5% $NaCl$	То же	900	Без движения	12	следы	никакого действия
					12	следы	никакого действия

следы, через несколько часов никакого действия

фаты и нитраты и еще меньше хлориды. Влияние температуры не изучалось.

3. Проба золота как будто не оказывает влияния на его растворимость в растворах гуминовых кислот. Мелкодисперсное золото, осажденное щавелевой кислотой, растворяется легче, чем осажденное раствором сульфата закиси железа.

После описанных опытов были проделаны опыты растворения золота, находящегося в породе, с помощью естественных вод, содержащих гуминовые кислоты, из болот. Оказалось, что эти воды вымывают золото из породы. Воздух мешает этому процессу.

Наконец, были проделаны опыты на лотке 2.5 м ширины, 1.5 м глубины и 16 м длины с наклоном 2.5 м, закрытым сверху досками; на лоток насыпался песок или глина с заранее установленным содержанием золота. Время от времени песок в трех местах лотка в 3.10 и 15 м от входа раствора подвергался опробованию. Насыпанное вещество (песок или глина) было определенной тонкости. В головку лотка подводилась вода из болота; она была черного цвета и содержала 6—10% сырого гумуса. Количество воды, прошедшей через засыпанный лоток, замерялось у нижнего конца лотка при помощи резервуара, к которому вела трубка, пропущенная сквозь доски нижнего конца лотка. Этот резервуар давал возможность брать пробу воды, прошедшей через песок на лотке.

Опыты продолжались шестьдесят дней каждый; через каждые десять дней брались пробы. Результаты опытов приведены в табл. 24.

Перенос золота растворами

Вещество и золото, примешанное к нему, засыпанные в лоток (мг/кг)	Содержание золота в мг/кг,					
	10			20		
	на следующем расстоянии от					
	3	10	15	3	10	15
Песок; 50 мг золота на 1 кг; крупность песка 0.1—0.5 мм	31	11	3	26	11	7
Песок; 20 мг золота на 1 кг; крупность песка 0.05—0.1 мм	10	7	1	6	7	2
Песок и глина 25/75; 30 мг золота на 1 кг; крупность песка 0.08—0.2 мм	21	7	следы	16	9	1
Чистый каолин; 45 мг золота на 1 кг; крупность песка 0.1—0.5 мм	30	10	2	22	14	4

Выводы, которые можно сделать из этих опытов, таковы:

1. Перенос золота под влиянием вод, содержащих гуминовые вещества, очевиден.

2. Количество перенесенного золота зависит от проницаемости почвы: чем плотнее почва, тем с большими трудностями проникают в нее растворы, и тем медленнее перенос золота.

3. Почвы, не содержащие известняка или других углекислых солей, освобождаются от золота быстрее, чем содержащие их. Повидимому, углекислые соли связывают гуминовые кислоты. То же, что с известняком, наблюдается и с железными минералами.

Этими опытами и наблюдениями Фрейзе процесс переноса золота органическими растворителями установлен с несомненностью. Установлены также и условия, благоприятствующие растворению: восстановительная среда, отсутствие углекислых и двууглекислых солей и других связывающих гуминовые кислоты веществ (железо, марганец). Установлены также и условия, благоприятные для осаждения золота из растворов.

Вопрос об условиях растворения золота в гуминовых веществах исследован Фрейзе все же далеко не детально (влияние температуры совсем не было изучено, не исследовано действие чистых гуминовых кислот и т. д.). Дальнейшее изучение этого вопроса, несомненно, необходимо для понимания природных процессов. Возможно, что органические растворители типа гумусовых веществ смогут иметь и техническое применение.

Таблица 24

гуминовых веществ (опыты Фрейзе)

проверенное после следующего числа дней протекания воды

проверенное после следующего числа дней протекания воды											
30			40			50			60		
места входа воды в м											
3	10	15	3	10	15	3	10	15	3	10	15
16	15	12	13	18	13	11	22	13	10	25	13
5	8	3	3	—	5	2	—	9	следы	7	15
13	12	2	10	14	4	6	17	4	не исслед.		
не наблюденно						17	11	7	не исслед.		

Работа Фрейве нашла отклик в СССР. М. Г. Кожевников¹ подвергнул исследованию старые отвалы от переработки золотых россыпей в районе Мариинской тайги (Зап. Сибирь) на приисках по р. Кундустуюл, правому притоку р. Б. Кундат, в системе р. Кии. Давность отвалов измерялась промежутком времени от 20 до 40—50 лет. Эти отвалы лежали выше уровня грунтовых вод; таким образом, единственным источником растворов, омывающих их, были атмосферные осадки. Количество их за год колебалось от 550 до 680 мм, с максимумом в 156 мм в летние месяцы.

Минеральный состав отвалов глины (61%) и песчаный материал (39%); последний состоит из кварца, полевого шпата, амфибола и биотита. Тяжелая фракция представлена цирконом, титаном, лимонитом, ильменитом и измененными сульфидами.

Отвалы покрыты древесной и травянистой растительностью.

Золото было определено в пробах, взятых шурфами в разных местах россыпи с различных глубин через 1 м. Выделенное и взвешенное из каждой пробы золото проанализировано.

В том случае, если бы золото подверглось существенному воздействию растворов, состав его на различных глубинах был бы различен; неодинаково было бы содержание золота в поверхностном и глубинном слоях отвалов.

Исследование М. Г. Кожевникова показало полную равномерность содержания золота в отвалах в разных их частях и на разных глубинах. Качество золота различных проб также не отличалось. В отвалах было обнаружено очень небольшое количество золота, измененного процессами, происходящими в них; количество такого золота по отношению ко всему золоту отвалов очень мало (около 2.5%).

Если золото и растворялось в грунтовых водах, то в ничтожном количестве. Существенных изменений в распределении золота в толще отвалов за период времени 20—50 лет не произошло.

Повидимому, климатические условия Сибири отличаются от условий Бразилии настолько, что процесса миграции золота в сибирских условиях заметить нельзя.

Кроме того, дождевые и талые воды, орашавшие отвалы, были мало насыщены органическими веществами. Если бы отвалы орошались проточными водами, берущими начало в болотах или других богатых гумусовыми веществами источниках, то картина была бы другая.

¹ М. Г. Кожевников. Сборник Трудов Всес. треста Золоторазведка, вып. 1, стр. 7—33 (1935).

Б. Рухин приводит пример быстрой (в течение 16 лет)¹ миграции золота под влиянием болотных вод в канавах Дмитровского месторождения (Вост. Сибирь). Однако наблюдения Рухина не являются достаточно точными. Было бы чрезвычайно интересным эти наблюдения проверить на ряде объектов.

Погребенные россыпи Ю. Африки²

Месторождения золота Ю. Африки в настоящее время дают наибольшее количество металла среди мировых месторождений. Южная оконечность Африки представляет собой плато осадочных пород, залегающих поверх гранита и кристаллических сланцев. В кристаллические сланцы во многих местах внедряются граниты. Поверх сланцев залегают верхняя и нижняя системы плотных сланцев, кварцитов и конгломератов Витватерсранд общей мощностью до 5700 м. Конгломераты покрыты мощными слоями пород вулканических излияний (Вентерсдорнская свита). Возраст конгломератов с точностью не известен; они, вероятно, должны быть приурочены к кембрию или докембрию. Выше расположены осадочные породы „Почерстром“ с золотоносным слоем „Блек-Риф“ и свитой „Доломит“ и „Претория“. Еще выше залегают девонская система „Ватерберг“, состоящая из песчаников, и еще выше молодая система „Карро“. Последняя содержит каменный уголь и по возрасту относится к пермо-карбону. Каждая система отделяется от следующей слоем песчаника.

Осадочные породы залегают не горизонтально, а смяты в пологие складки. Весьма обычны сбросы и инъекции даек диабаз.

Золотоносными являются конгломераты нескольких горизонтов в свите Витватерсранд и Блек-Риф; наиболее продуктивны пласты, залегающие в верхней части Витватерсранда, включая сюда мощную толщу в 2000 м кварцитов и конгломератов. По своему строению, возрасту и богатству золотоносные конгломераты делятся на слои различной мощности, которые носят свои особые наименования. Из них наиболее продуктивен Маин-Риф-Ледер.

Галька в конгломератах мелкая, диаметром в среднем 5 см; она состоит из хорошо окатанных обломков стекловидного кварца; в меньшем количестве встречается галька более угловатого кварцита, дымчатого кварца и плотного сланца. Галька

¹ Б. Рухин. Сборник Трудов треста Золоторазведка, вып. 1, 61 (1935).

² Линдгрэн. Минеральные месторождения. Русский перевод, т. III, ОНТИ. Гл. ред. геол.-развед. литературы. М.—Л., 1935.

лежит на песчанике, сцементированном кремнеземом. В цементирующей гальку массу песчаника изобилует пирит (около 3% всей породы) в виде конкреций, замещающих кварц, и в форме кристаллов, представляющих две последовательные генерации. Кроме пирита, присутствуют серицит, кальцит, графит и минерал хлоритонд, похожий на хлорит. Золото отсутствует в гальке и целиком находится в цементирующем веществе. Оно образует очень мелкие угловатые кристаллические агрегаты и, реже, округленные частицы. Обычно оно связано с пиритом в виде крапленности в него или налета на поверхности его зерен. Видимое золото очень редко.

Конгломераты работаются до глубины более 2000 м. О происхождении месторождения были высказаны различные гипотезы, из которых наиболее вероятной является следующая. Конгломераты представляют собой огромную, образовавшуюся в дельте крупной реки, россыпь, которая была погребена и, оказавшись на большой глубине, подверглась значительным изменениям.¹ Здесь имело место действие подземных вод, действие повышенной температуры и т. д. В результате этого сложного воздействия рыхлые породы превратились в плотный цемент, некоторые минералы были растворены и замещены другими, золото подверглось частичному или полному переотложению. Современный пирит, по всей вероятности, образовался из магнетита, бывшего первоначально в россыпи, под влиянием подземных сульфидных вод.

Вместе с золотом в конгломератах находят и с выгодой добывают осмистый иридий.

Изложенное вкратце мнение Меллора и других исследователей о происхождении золотоносных конгломератов Рэнда нашло свое подтверждение в работе Шнейдергена,² доложенной международному геологическому конгрессу, происходившему в Йоганнесбурге в 1929 г.

ЗОЛОТО В РАСТЕНИЯХ

Выше уже было упомянуто о действии на золото некоторых органических веществ. Таким образом, было уже упомянуто о вхождении золота в биосферу. Прослеживая поведение золота во всех областях земной коры, нельзя не коснуться вопроса о роли растений в геохимической жизни золота.

¹ E. Muller. C. r. Congr. geol. intern. Canada, 895—900 (1913).

² H. Sneiderhöhn. Mineralische Bodenschätze in südlichen Africa. 33—37 (1931).

Многие авторы, начиная с Русель д'Арсе (1779), обнаружившего золото в вине, находили этот металл в растениях и растительных продуктах. ^{1, 2, 3, 4, 5}

Определения золота в растениях большей частью представляют собой случайные данные, позволяющие качественно установить, что золото во многих случаях всасывается растениями и отлагается в тех или иных его частях. Ясно, что попадание золота в тело растительного организма невозможно без растворения золота, находившегося в почве. Поэтому следует признать, что растворы, выделяемые корневыми волосками, способны растворять золото. Все ли растения способны рас-

Т а б л и ц а 25

Содержание золота и древесине

Дерево	Вес древесины в г	Весь золы в г	Количество полученного золота в мг	Содержание золота в древесине мг/г
Ель, возраст 18—20 лет, нижняя часть ствола на высоте 1 м от поверхности почвы	7851	33	0.01	1.27
То же дерево, верхняя часть ствола с ветвями на высоте 5 м	2617	40	1.015	6.00
Береза, ствол с ветвями; вырезано три куска через 1 м один от другого	8550	64	0.005	0.6
Осина; условия взятия пробы те же, что и у березы . . .	7371	100	0.015	2.0

творять и усваивать золото или только некоторые из них — не известно. Но во всяком случае число древесных и травянистых растений, в телах которых обнаружено золото, довольно велико.

Весьма интересны данные Немца⁶ и Бабичка, нашедших золото в маисе и установивших, что оно накапливается не во всех органах этого растения, а в его зернах. В золе зерен кукурузы эти авторы обнаружили 0.02 г золота на килограмм

¹ Liversidge. J. Ch. Soc., 71, 298 (1897).

² Cornic. C. r., 168, 513 (1919).

³ Berg. Bioch. Z., 198, 424 (1928).

⁴ Haber. Naturwissensch., 16, 588 (1928).

⁵ Григорьев. Сборник Трудов Иркутского гос. университета, № 17, 254 и 287 (1930) и мн. др.

⁶ B. Nemes. Ber. Deutsch. Botan. Ges., 53, 560 (1935); 54, 276 (1936).

зола. В пересчете на вес самих зерен это будет составлять около 1 мг на килограмм зерен.

Аналогичные данные можно найти и у других авторов, главным образом о золоте в древесных породах. Я приведу мало известные данные М. Г. Кожевникова¹ и Г. К. Кропачева о деревьях, произрастающих на золотоносных почвах россыпей в Кузнецком Алатау.

В табл. 25 (см. стр. 99) приведены эти наблюдения.

Большая концентрация золота в верхней части ствола по сравнению с нижней может служить доказательством того,

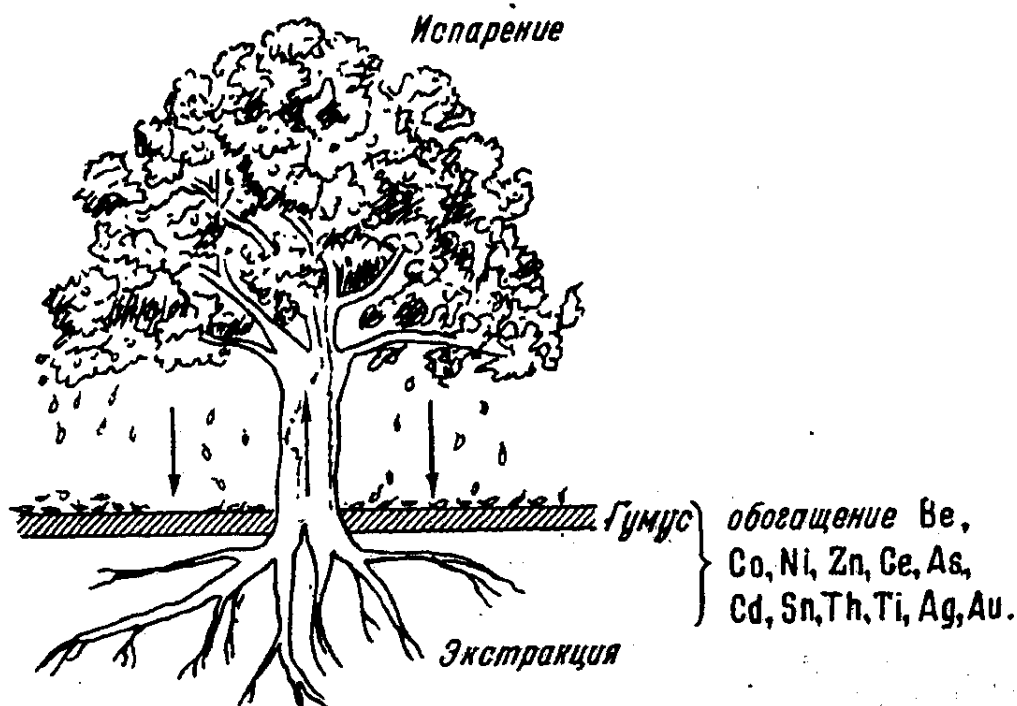


Рис. 36. Концентрация элементов в растительных остатках (по В. Гольдшмидту).

что золото всасывается растениями в растворенном виде. Форма нахождения золота в растениях не изучена.

Немец и некоторые другие авторы полагают, что золото может концентрироваться растениями. Сравнение содержания золота в растениях и в земной коре показывает, что в растениях концентрация золота меньше, чем среднее содержание золота в земной коре и не больше, чем в почве, где произрастают растения. Надо полагать, что растительные организмы всасывают золото вместе с питательными соками лишь постольку, поскольку оно содержится в почве, не обнаруживая к нему никакого пристрастия. Однако при содействии жизнедеятельности растительных организмов все же возможна некоторая

¹ М. Г. Кожевников. Сборник Трудов треста Золоторазведка, вып. 1, стр. 30 (1935).

концентрация золота, если эта деятельность продолжается долго. В пояснение этой мысли я привожу рис. 36.

Корни растений поднимают растворы в ствол и крону деревьев; листья и сухие ветки падают на поверхность земли и здесь разрушаются. Золото корнями дерева собирается из толстого почвенного слоя и переходит в ветки, листья; отсюда оно вместе с сухими листьями падает и скапливается в поверхностном слое. Опавшие листья гниют и превращаются в гумус, который вымывается дождевой водой. Слаборастворимые вещества будут оставаться и постепенно накапливаться в поверхностном слое. В условиях постоянного окислительного влияния воздуха золото до некоторой степени может считаться малорастворимым веществом. Поэтому оно должно накапливаться в поверхностном слое лесистых местностей. В. М. Гольдшмидт¹ приводит данные о накоплении некоторых элементов в старом березовом и дубовом лесах в Германии, Сабабург, к северу от Касселя.

В табл. 26 приведены результаты исследований В. М. Гольдшмидта.

Таблица 26

Концентрация элементов во время гниения дубового и березового гумуса в г/т

Вещество	B ₂ O ₃	MnO	NiO	GeO ₂	As ₂ O ₅	Ag	Au
Почва (песок) . .	7	400	20	5	—	—	—
Зола свежих березовых листьев .	5000— 10000	20000	50	5	—	—	—
Зола дубового гумуса	200	2400	100	70	—	1	—
Зола березового гумуса	30	1400	100	70	500	5	0.5

Конечно, такого рода концентрация золота может быть очень незначительной и должна ограничиваться очень небольшими участками. Кроме того, во многих случаях гумус не окисляется очень быстро, и тогда наступят благоприятные условия для растворения золота в растворах гумусовых кислот и для его рассеяния.

Изложенными причинами объясняется отсутствие биогенных месторождений золота.

¹ V. M. Goldschmidt. J. Ch. Soc., Apr. 1937, 655—673.

Что касается содержания золота в организмах животных, то здесь имеются лишь самые случайные наблюдения.¹ Никаких „золотых“ организмов на земле не водится.

ЗОЛОТО В ИСКОПАЕМЫХ УГЛЯХ

Многие редкие элементы концентрируются в каменных углях. Этот вопрос изучали В. М. Гольдшмидт² и его сотрудники. Определению благородных металлов была посвящена специальная работа, в которой приводятся анализы золы ряда различных каменных углей Англии и Рурского бассейна (см. табл. 27).

Таблица 27

Содержание благородных металлов в золе каменных углей в г/т

Название	Происхождение	Содержание золы в %	Ag	Au
Антрацит	Лянгенбраун, Рур	2.3	5—1	—
Дурит	} Брассерт, Вестфалия	1.9	0.5	—
Кларит		0.9	5	0.5
Каменный уголь .	Хартлей (Англия)			
	Верхний главный пласт	1.1	10	0.5
	Главный пласт	3.1	10	0.5
Каменный уголь, кокс	Нижний главный пласт	1.2	5	0.5
	Рудольф, Коприх близ Нейроде	1.6	5—10	1
То же	из другой части рудника	4.3	5	0.5
" "	" "	14.1	10	0.5
" "	" "	27.5	5	0.5

Если пересчитать среднее содержание золота в золе на массу самого угля и сравнить содержание золота в углях с кларком золота, то получаются следующие цифры:

В золе каменного угля	0.5 г/т
В каменном угле	0.01 "
В земной коре (кларк)	0.01 "

Таким образом, в каменных углях нет никакой повышенной концентрации золота. Средняя его концентрация в земной коре и в растительных осадках — одинаковы.

¹ А. П. Виноградов. Труды Биогеохимической лаборатории Акад. Наук СССР, 1935, вып. III.

² V. M. Goldschmidt. Nachr. ges. d. Wiss. Göttingen. Mat.-Phys. Kl. 4, 38/III, № 38 (1933).

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЗОЛОТА В РУКАХ ЧЕЛОВЕКА

Золото — это один из первых металлов, ставших известным человеку; его добывание относится к древнейшим ремеслам, которыми занимались люди еще на грани каменного и бронзового веков. Поэтому золотые месторождения, особенно легко доступные и богатые в тех местностях, где человек живет давно, выработаны. Месторождения Испании, Германии, Франции, а у нас в СССР месторождения Олонцкого края давно истощены. О „золоте Рейна“ осталась лишь память в народных сказаниях. В настоящее время золото добывается либо из труднодоступных месторождений, либо в тех местностях, куда нога человека ступила сравнительно недавно: на окраинах нашего культурного мира. Приведенная на рис. 87 карта мира¹ с обозначенными на ней месторождениями показывает, где, главным образом, расположены золотопромышленные районы. Это Ю. Африка, Аляска, восточная часть Сев. Америки, Сибирь.

Человек, таким образом, в значительной степени изменил географическое распределение золота на земном шаре. Добытое золото очень тщательно сохраняется. Безвозвратные потери золота очень невелики. Таким образом, добываемое золото почти не возвращается в круговорот природы, а накапливается в руках человечества. Ни один металл не накапливался в человеческих руках в такой доле, как золото. Человечество владеет совершенно ничтожной долей имеющегося в земной коре никеля, меди, железа. Но доля золота, попавшая в распоряжение людей, далеко не ничтожна: она составляет более 40 000 т.

Если считать человека частью природы и выделить все вещества, так или иначе прошедшие через его руки, в особую геосферу, „антропосферу“, то золото этой антропосферы составит приблизительно одну стотысячную часть, или 0.001% всего золота земной коры.

Около половины этого золота находится в настоящее время в подвалах банков США.

РАССЕЯНИЕ ЗОЛОТА

Большинство геохимических процессов, рассмотренных мною выше, приводили к концентрации золота. Процессов рассеяния золота я касался очень мало. Необходимо рассмотреть эти процессы несколько подробнее.

¹ Взято из книги Э м м о н с а „Gold Deposits of World“, 1937 (границы СССР исправлены).

Процессы эрозии коренных пород ведут к концентрации золота в россыпях только некоторой, небольшой доли золота. Часть золота при этом перетирается, образует суспензии, коллоидные и истинные растворы и уносится текучими водами в моря, океаны или замкнутые водные бассейны. Анализами

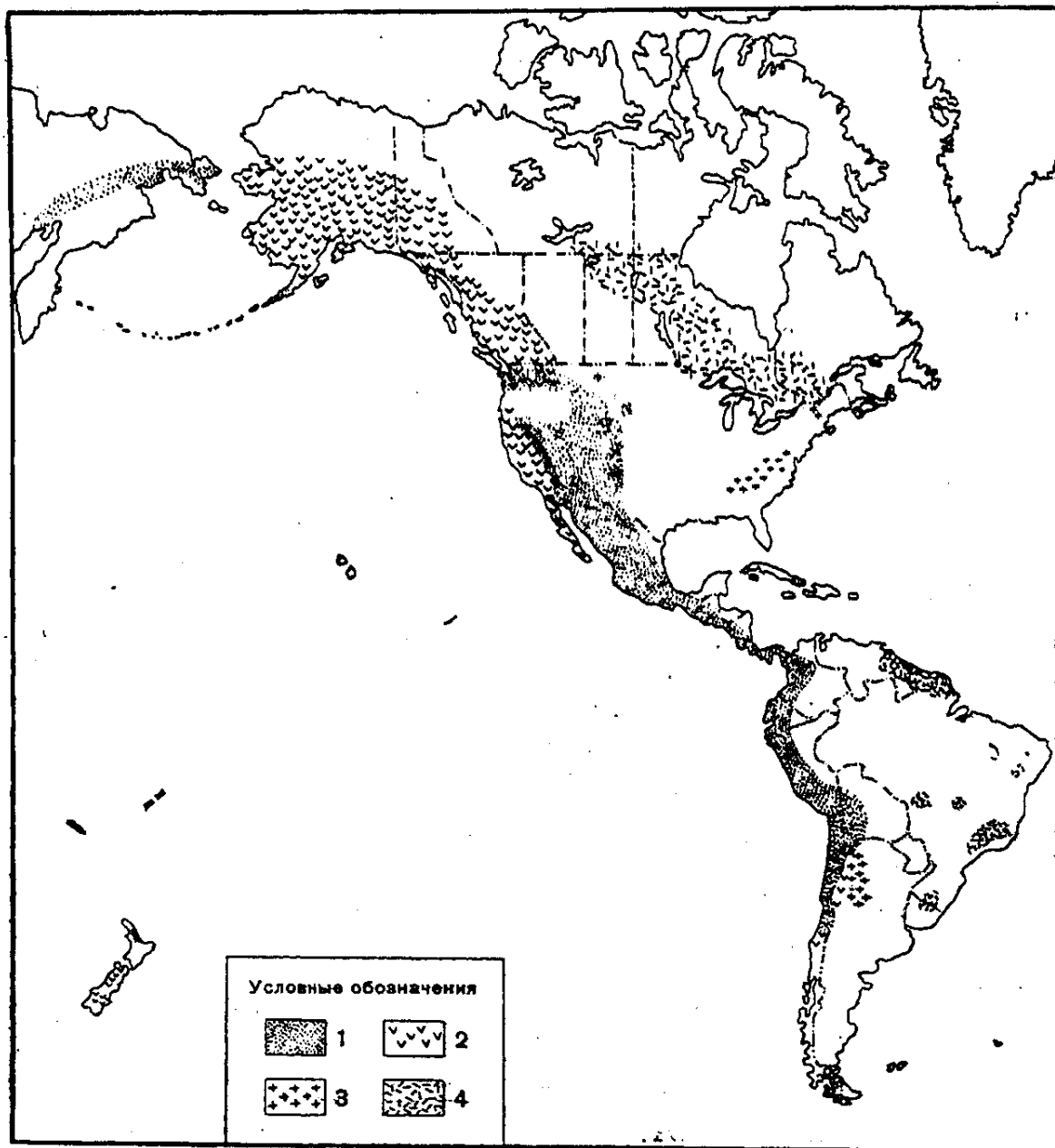


Рис. 37. Карта золотых месторождений мира (по Эммонсу).

1 — третичный, 2 — мезозой, 3 — палеозой, 4 — прекембрий.

установлено, что вода рек, протекающих в золотоносных районах, содержит золото. Так, например, по данным Балей-золото, вода р. Унды обогащена золотом (содержит несколько миллиграммов на литр). „Пловучее золото“ в виде тонких пластинок или чешуек также сносится текучими водами и попадает в моря или оседает на песчаных косах и берегах реки.

Принимая во внимание непрерывность и постоянное действие текущих вод на золото, надо полагать, что общее количество сносимого в моря металла достигает очень большой величины.

Так, например, р. Амур выносит в море около 1 кг золота в час или приблизительно 8.5 т в год. Этот расчет сделан по минималь-

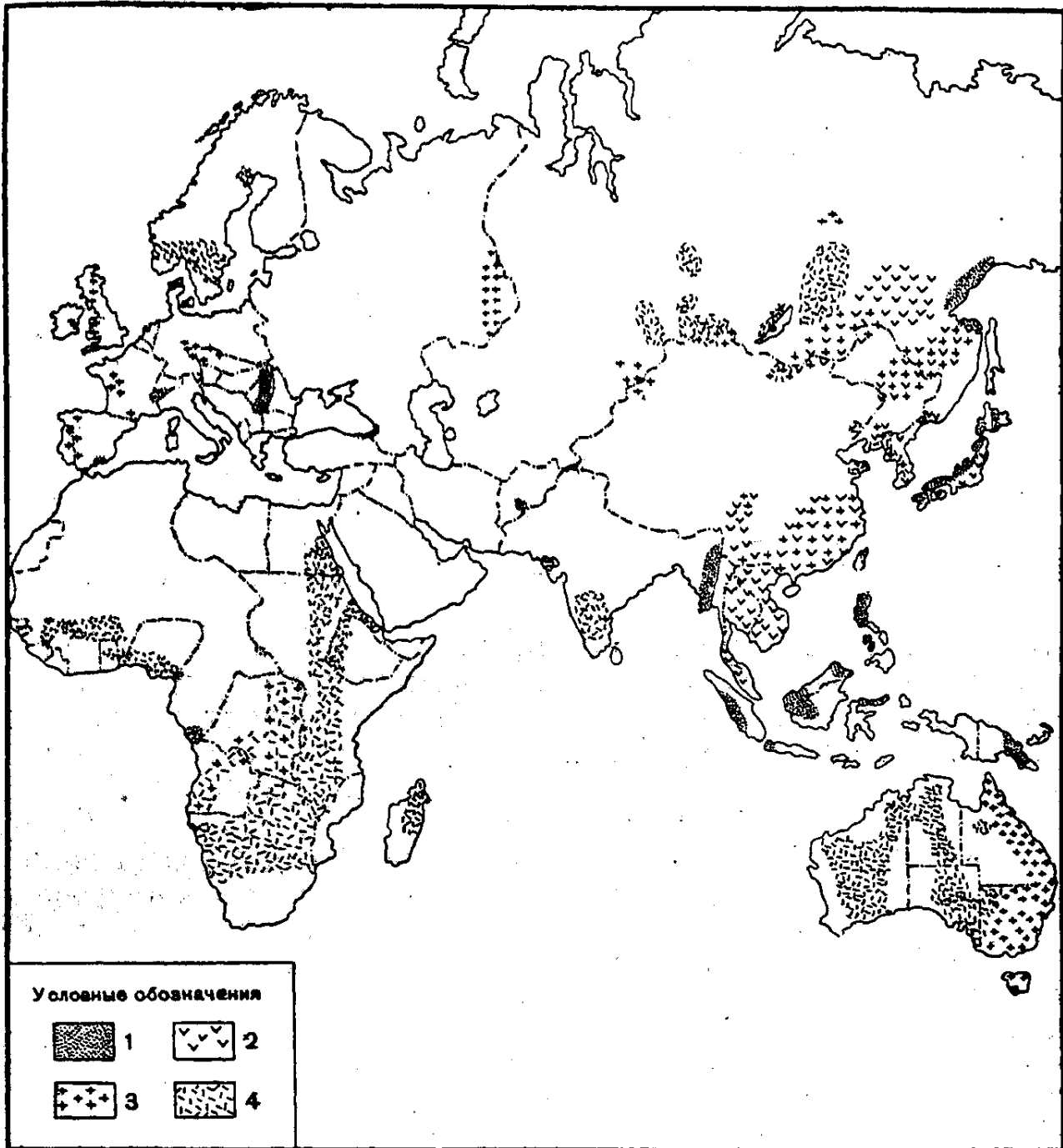


Рис. 37а. Карта золотых месторождений мира (по Эммонсу).

1 — третичный, 2 — мезозой, 3 — палеозой, 4 — прекембрий.

ному содержанию золота в воде Амура. Настоящая цифра, вероятно, гораздо больше. Некоторая часть золота разносится вместе с пылью ветрами, особенно в местностях с сухим климатом.

Этими путями золото, ранее концентрировавшееся в россыпях и жилах, рассеивается, превращается в вещество, приме-

шанное в весьма малых количествах к самым разнообразным веществам.

Однако, помимо рассеянного золота, получившегося распылением и растворением ранее концентрированного металла, в природе имеется и золото, не поддавшееся концентрации во время тех процессов, которые мною описаны выше. В до-

Т а б л и ц а 28

Содержание серебра и золота в горных породах и минералах в мг/кг

Горная порода	Происхождение	Ag	Au
Гранит	Ю. Норвегия	+	+
"	Гарц	+	+
"	Анды	—	—
Лава	Везувий	0.2	+
Эклогит	Норвегия	+	+
Бронзит	Тироль	+	+
Базальт	Швеция	+	+
Апатит	Альпы	2	+
Колумбит	Норвегия	2	0.05
Хромит	Штейнмарк	+	—

казательство существования рассеянного золота такого происхождения привожу таблицу анализов некоторых распространенных пород, взятую из работы И. и В. Ноддак¹ (табл. 28).

Незначительные следы золота (менее 0.002 мг/кг), обозначенные в таблицах знаками плюс, в общей сложности составляют значительную массу металла.

Интересно отметить, что в огромном большинстве осадочных пород (сланцы, известняки, мрамор и пр.) золото найдено не было или содержание его в них в значительно меньших количествах, чем в породах эруптивных.

И. и В. Ноддак дают анализы следующих осадочных минералов и пород (табл. 29).

Т а б л и ц а 29
Содержание серебра и золота в осадочных минералах и породах в мг/кг

Минерал	Происхождение	Ag	Au
Карналлит	Страссфурт	нет	нет
Каинит	"	нет	нет
Каменная соль	Величка	нет	нет
Гипс	"	нет	нет
Малахит	Урал	30	+
Марганцовый шпат	Гарц	8	+
Псилометан	Гарц	50	2
Пирролюзит	Богемия	4	0.2

Таким образом, только вещества, обладающие большой адсорбирующей способностью, как марганцовые минералы, содержат определяемые количества золота. Но эти количества все же редко превышают сколько-нибудь заметно кларк золота для земной коры. В общем надо сказать, что в осадочных породах золота содержится значительно менее, чем во всей земной коре в целом.

даже в осадочных породах золота содержится значительно менее, чем во всей земной коре в целом.

¹ I. u. W. Noddack. Z. phys. Ch., 154, 214 (1931).

Отношение кларка земной коры к среднему содержанию того же элемента в исследуемой геосфере, области или объекте, по предложению В. И. Вернадского, названо „кларком концентрации“. Применяя этот термин к содержанию золота в различных частях земной коры, можно написать таблицу „кларков концентрации“.

Кларки концентрации золота

Кларк земной коры	1	Атмосфера	0
Осадочные породы	0.1	„Антропосфера“	0.001
Гидросфера	0.005		

КРУГОВОРОТ ЗОЛОТА В ПРИРОДЕ

Если принять, что все осадочные горные породы произошли из пород изверженных, необходимо также признать, что общее содержание золота в тех и других породах должно быть одинаково. На самом же деле этого нет. Золото рассеивается повседневно, но этот процесс не уравнивает кларков концентрации. Следовательно, золото выходит куда-то из сферы нашего наблюдения.

Благодаря этому обстоятельству нельзя составить ясного представления о круговороте золота в природе. Мы знаем только часть цикла, но не весь.

Мы знаем замкнутые моря, которые полностью высохли. Примером такого моря может служить Пермское море, ныне не существующее. Однако в отложениях этого моря золота в повышенных количествах не найдено. Не обнаруживалось концентрации золота и в сухих солях и рапе других закрытых водоемов.

Задачей будущих геохимических исследований является изучение недостающих частей цикла в круговороте золота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что золото стало известно людям задолго до начала истории человечества, а изучение и использование золота сопутствует всей истории науки и техники, химия и геохимия золота разработаны гораздо хуже, нежели химия и геохимия таких „молодых“ элементов, как рений, радий и т. п.

История золота в земной коре прослеживается, начиная с процесса дифференциации первичных магм и до процессов денудации золотосодержащих коренных пород. Есть довольно много данных о процессах переосаждения золота в зоне выветривания и окисления, а также о процессах образования россыпей.

Можно найти некоторые качественные данные о поведении золота в связи с жизнедеятельностью организмов.

Однако цикл золота в земной коре остается не замкнутым. Нам совершенно не известна судьба золота, непрерывно рассеивающегося в морской и океанической водах и в осадочных образованиях, но не накапливающегося там до того же уровня концентрации, какой имеется в первичных породах.

В балансе золота в земной коре существует сальдо, не покрытое еще нашими знаниями. Подводя итог сказанному, здесь нужно отметить следующее:

1. Работами последних лет выяснен общий геохимический характер золота: оно является сидерофильным, а отчасти халькофильным элементом.

2. Исследование минералов группы золота продвинулось весьма мало. Исследования, которые спорадически ведутся в различных местах, все же дали за последние годы кое-что новое: сделаны анализы золота с более полными данными о содержании главных и второстепенных составляющих элементов. Исследованы некоторые физические свойства самородного золота, позволяющие сделать заключение о месте происхождения самородков (коренные месторождения) и о характере генезиса их (осаждение их растворов). Изучены немногочисленные образцы „вторичного“ или „переосажденного“ золота из россыпей. Произведены исследования серебристого золота из Балая и медистого золота из Карабаша.

Весьма важны работы последних лет о распределении золота в рудах по крупности зерна.

Весьма недостаточны наши знания о теллуристых минералах золота.

3. Количественная геохимия золота значительно продвинулась вперед: установлен кларк золота для земной коры ($5 \cdot 10^{-7} \%$) более точный, чем это было до работ Ноддак и Гольдшмидта. Определены кларки отдельных геосфер. Однако для осадочных пород наши познания о распространенности и распределении в них золота еще далеко недостаточны.

4. С большой долей достоверности можно проследить процессы концентрации золота при дифференциации основных и кислых магм. Благодаря экспериментальным исследованиям последнего времени в значительной мере расшифрован процесс привноса и отложения золота в гидротермальных жилах. Отложение золота происходит из щелочных (вероятно, гидросульфидных) растворов вследствие понижения растворимости его с падением температуры на всем протяжении гидротермального процесса. Золото при этом откладывается на всех минералах, находящихся в данный момент в жилах. Образование коллоидных растворов из истинных должно иметь широкое

распространение в природе. Коллоидные растворы легко разрушаются многими минералами, и особенно легко сульфидами. В этом, вероятно, находится разгадка преимущественной ас-

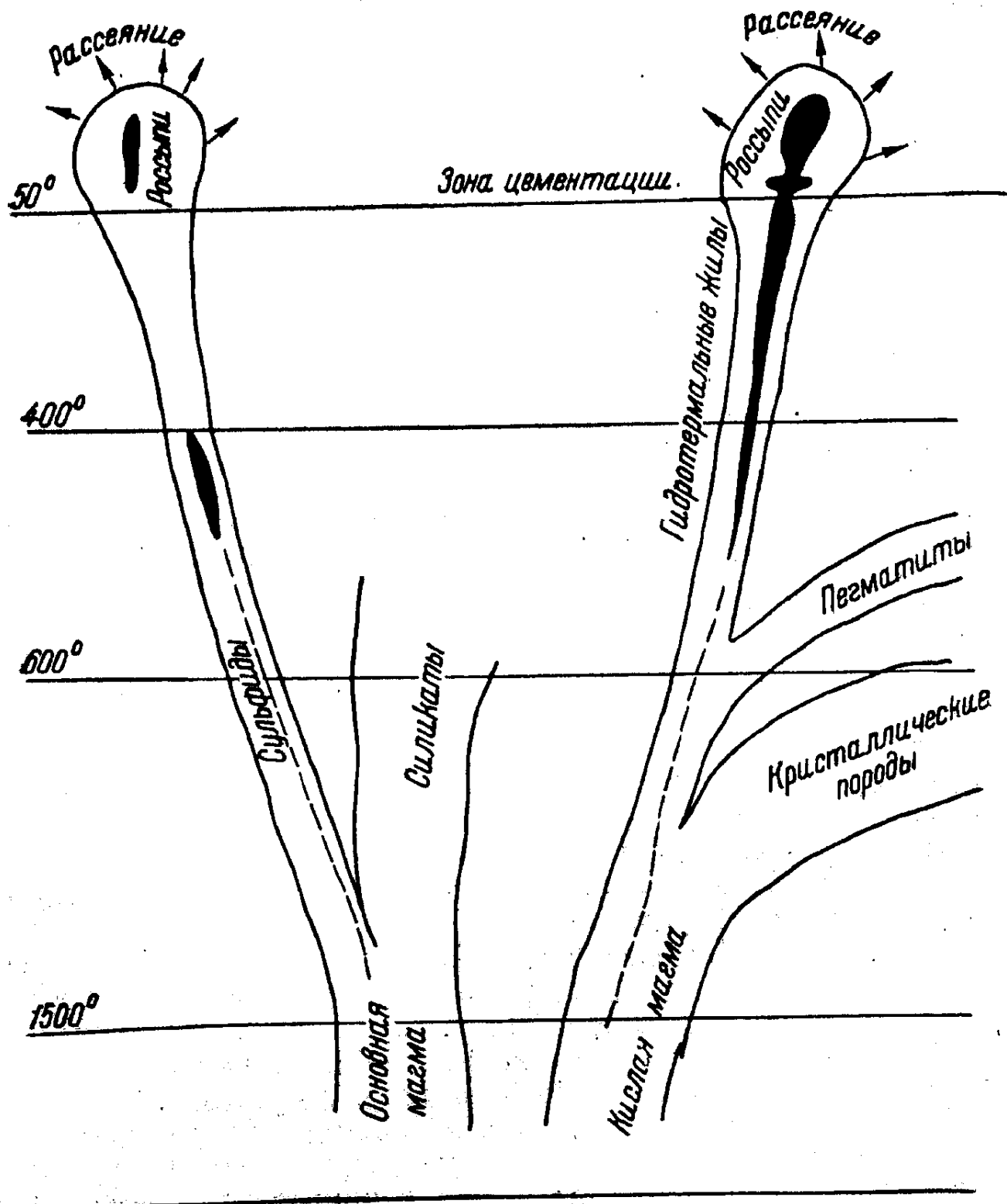


Рис. 38. Диаграмма концентрации золота.

социации золота с сульфидами в месторождениях. В огромном большинстве до сих пор изученных случаев золото в жилах является одним из поздних, низкотемпературных минералов.

При дифференциации основных магм золото концентри-

руется в сульфидных минералах, происшедших из расплавленной сульфидной фракции магмы.

5. Исследованы экспериментально и наблюдениями в поле процессы, происходящие в зоне окисления золотых месторождений. Установлены вероятные химические реакции растворения и осаждения золота. Установлена также весьма малая подвижность золота в условиях зоны окисления.

6. Общий ход процессов концентрации золота можно представить себе наглядно в форме диаграммы (рис. 38).

7. Сделана попытка энергетической характеристики некоторых месторождений золота, с помощью предложенных А. Е. Ферсманом величин — ВЭК.

8. Исследованы геохимические процессы растворения и переотложения золота в россыпях (Фрейзе, Кожевников, Ивсен и др.).

9. Весьма интересны данные (Немец, Корначев, Гольдшмидт и др.) о нахождении золота в растениях и их ископаемых остатках.

10. Работами ряда ученых (Ноддак, Гольдшмидт, Заславский, Ферсман) установлен кларк золота для метеоритов. Он примерно в 10 раз больше, чем кларк (1939) для земной коры.

Исследования ближайшего будущего в области геохимии золота, мне представляется, должны идти в двух направлениях.

Первое — экспериментальная геохимия золота — изучение веществ и процессов, возможных в естественных условиях. Сюда относятся реакции растворения, осаждения, процессы переноса, коагуляции и т. д. Также необходимо производить синтезы минералов и сравнение синтетически полученных веществ с естественными минералами.

Второе — геохимия месторождений золота — подробное геохимическое исследование месторождений различных типов, как магматических, так жильных и россыпных. Необходимо не только геохимическое, петрографическое, минералогическое изучение, но и тщательные химические анализы золота, минералов и пород его вмещающих, исследование физических свойств золота, а также определение энергетического уровня ионов, игравших роль в образовании месторождений.

Только на основе хорошего, надежно документированного фактического материала можно будет нарисовать полную картину геохимического цикла золота в природе, раскрыть механизм „рождения“ золота в формах, доступных для добывания.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ЗОЛОТУ¹

ОБЩАЯ

- В. И. Вернадский. Опыт описательной минералогии; т. I. Самородные элементы. СПб., 1908, стр. 264—414.
Наиболее полная сводка данных о самородном золоте и о месторождениях в России с указанием источников до 1907 г.; изложены геохимические воззрения автора. История золота.
- C. Hintze. Handbuch d. Mineralogie. I, L., 1898.
Минералогический обзор, далеко не полный.
- H. Leitmeier. Doelter's Handbuch d. Mineralchemie. 3. Dr. u. L., 1922, 186.
Сводка химических данных.
- W. Lindgren. Mineral deposits. 3 Edit. N.-Y. and London, 1928.
Обзор главнейших типов месторождений, в том числе и месторождений золота.
- В. Обручев. Геологический обзор золотоносных районов Сибири. I. Западная Сибирь. СПб., 1911; II. Средняя Сибирь, СПб., 1915. (Обзор не закончен.)
- Phillips. Ore Deposits. London, 1896.
Обзор, ныне устаревший.
- E. J. Dunn. Geology of Gold. London, 1929.
Обзор месторождений Ю. Африки, Австралии и Новой Зеландии. Содержит интересную сводку о самородном золоте и фотографии.
- Акад. В. И. Вернадский. История минералов земной коры, т. I, вып. II. Ленинград, 1927, стр. 262—291.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ЗОЛОТЕ

- W. H. Emmons. Gold deposits of the World. 1937.
Сводка данных о месторождениях золота, главным образом американских, с указанием литературы.
- F. Buschendorf. Primärsone alter Goldquarzgänge. Zeitschr. f. prakt. Geol., 34, 1—16 (1926).
- F. Buschendorf. Die primären Gold-Erze Ficht. Neues Jahrb. f. Mineral., 42 (1930).
- G. Berg. Vorkommen und Geochemie d. miner. Rohstoffe. Leipzig, 1929, p. 274—291. Русский перевод Г. Берг. Геохимия месторождений полезных ископаемых. 2-е изд. М.—Л., 1937, стр. 290—307.
- А. Е. Ферсман. К геологии золота. Докл. Акад. Наук СССР, 1931, стр. 199—204.
- А. Е. Ферсман. Геохимия, т. IV. Ленинград, 1939, стр. 262—272. Глава, посвященная геохимии золота. Указана главнейшая литература по геохимии золота.
- P. Niggli. Ore deposits of magmatic origin. 1929.
- В. Lindgren. Success. of Min. and Temp. in Ore-deposits of magmat. Affiliat., Trans. Am. Inst. Min. Met. Eng., Mai 1936.

¹ Кроме того, см. подстрочные примечания.

- D. F. Hewett. Zonal relation of Gold. Trans. Am. Inst. Min. Met. Eng., 96, 305—346 (1931).
- I. Anderson. Essential criteria in examining Gold-Quartz-Mine. Eng. Min. J., 136, 445 (1935).
- René van Aubel. Geochimie de l'ore. Annuaire Soc. Géol. Belgique, 57, 131—150 (1934).
- V. Goldschmidt u. Ch. Peters. Zur Geochemie d. Edelmetalle. Nachr. Gesellsch. d. Wiss. Göttingen. Nat.-Phys. Kl. 1932, 377—401. (Русский перевод: Изв. Инст. по изучению платины и других благородных металлов, 1934, вып. 12).
- О. Е. Звягинцев. Геохимия золота. Сборник Унив. физико-химии им. Н. Д. Зелинского, вып. 3, М., 1939, стр. 48—64.

ПО ОТДЕЛЬНЫМ ВОПРОСАМ

Месторождения и их генезис

- G. Rose. Reisen am Ural, II, 1842, стр. 402, 407, 424. (О месторождениях золота на Урале.)
- П. Карпинский. О месторождениях золота. СПб., 1840.
- А. П. Карпинский. Очерк полезных ископаемых Европейской России и Урала. СПб., 1882.
- Я. Самойлов. Минералогия Нагольного края. СПб., 1906, стр. 90 и Записки Минералог. общ., 43, СПб., 1905, стр. 239.
- А. Герасимов. Геология. Карта Ленского золотоносного района. Описание, лист III, 6, СПб., 1907, стр. 143.
- А. Я. Булыничков. Золоторудные формации Кузнецкого Алатау. Сборник, посвященный М. А. Усову. Томск, 1933.
- Н. Н. Горюстаев. Золоторудное месторождение Советского рудника в Североенисейской тайге. Труды треста Золоторазведка и Нигризолото, вып. 3, М., 1936, стр. 7—79.
- В. Н. Натаров. Геохимия Аятинского месторождения рудного золота. Труды треста Золоторазведка и Нигризолото, вып. 4, М., 1937, стр. 3—47.
- В. К. Монич. Геологический очерк Бериккульского золотопромышленного района. Труды треста Золоторазведка и Нигризолото, вып. 7, М., 1937, стр. 82—107.
- А. И. Педашенко. О генезисе и парагенезисе руд золотых месторождений. Материалы по изуч. Охотско-Колымского края, 1936, сер. I, IX, стр. 75—102.
- С. А. Юшко. О минералогической форме золота и его ассоциациях в колчеданных рудах Урала. Изв. Акад. Наук СССР, сер. геолог. 1936, стр. 435—440.
- F. Alfeld. Typen bolivian. Goldlagerstätten. Centralbl. f. Min. 1937 (A), 240—253.

Золотые россыпи

- Р. В. Нифонтов. Геология россыпей. Труды треста Золоторазведка и Нигризолото, вып. 6, М., 1937, стр. 5—136.
- E. V. Szádeczky-Kardos. Über sekundäre Umwandlungen des Goldes in den Donauablagerungen des ungarischen Kisalföld. Kgl. ungar. Palatin-Joseph Univ. Sopron, 8, 285—300 (1936).

Зона окисления месторождений

- W. H. Emmons. The enrichment of Ore Deposits. Wash., 1917. (Русский перевод В. Эммонс. Вторичное обогащение рудных месторождений. М.—Л., 1935, стр. 278—325).

- С. С. Смирнов. Зона окисления сульфидных месторождений. Л.-М., 1936, стр. 170—178.
G. Berg. Zeitschr. f. prakt. Geol., 43, 17, 65 u. 89 (1935).

Коллоидное золото в природе

- W. Lindgren. Trans. Am. Inst. Min. Eng., 126, 356—376 (1937).
C. Frondel. Stability of colloid Gold under hydrotherm. Condition. Econ. Geol., 33, 1—20 (1938).

О кристаллической форме золота и самородном золоте

- Е. Дана. Zeitschr. f. Krist., 12, 224 (1886); 18, 15 (1892).
П. Еремеев. Горн. журнал. СПб., 1887, III.
Авдеев. Горн. журнал. СПб., 1889, II, 511—514.
А. А. Смирнов. Минералы группы самородного золота. „Минералы СССР“, I, 1940.
С. Ф. Жемчужный. Физико-химич. исследование золотых самородков. Труды Института физико-химич. анализа, 1922, II, вып. I.
Bramhall a. D. L. Dowie. Miner. Magazin, 24, 260 (1936).

О растворении золота и о природных растворах золота

- S. P. Ogruslo. Econ. Geol., 30, 400 (1935).
Г. П. Кропачев. Советская золотопромышленность, 1935, № 8, стр. 46.
О. Е. Звягинцев и И. А. Паульсен. Докл. Акад. Наук СССР, XXVI, № 7., стр. 655—696 (1940).

Практические руководства к поискам золота

- А. В. Ферман. Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых. М.—Л., 1939, стр. 391—393.
I. L. Idriese. Prospecting for Gold. Sydney. 1936, 6-е изд.
E. M. Savage. Prospecting for Gold and Silver. 1936.

Статистические и справочные данные

- Gold Resources of the World (XV Geol. Congr. 1928. Johannesburg. 1931).
Mineral Resources. (Dep. of Min. USA). XLV, 300—306 (1937).
Б. В. Невский. Мировая добыча золота в 1939 г. Золотая промышленность, 1940, № 4.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Свойства золота	4
Физические свойства золота	4
Сплавы золота	6
Химические соединения золота	10
Поведение золота в пирометаллургических процессах	12
Золото в метеоритах	13
Минералы, содержащие золото	15
Самородное золото	15
Медистое золото	24
Серебристое золото и электрум	25
Кристаллическая структура и другие физические свойства само- родного золота, медистого золота и электрума	27
Палладистое золото, или порпецит	34
Родистое золото, или родит, иридиевое и платинистое золото	34
Теллуриды золота	35
Количественная геохимия золота	36
Процессы концентрации золота и месторождения	38
Концентрация золота при кристаллизации основных магм	38
Концентрация золота при остывании кислых (гранитных) магм	42
Процессы осаждения золота из щелочных растворов	50
Примеры месторождений золота гидротермального происхождения	58
Энергетическая характеристика месторождений	74
Процессы, идущие в зоне окисления золотых месторождений	76
Коррозия поверхности частиц золота	76
Растворение золота	77
Осаждение золота	82
Миграция золота	86
Вторичное золото	88
Образование россыпей	89
Погребенные россыпи Ю. Африки	97
Золото в растениях	98
Золото в ископаемых углях	102
Концентрация золота в руках человека	103
Рассеяние золота	105
Круговорот золота в природе	107
Заключение	107
Основная литература по золоту	111

Редактор издательства Р. С. Рубинштейн

Подписано к печати 11/II 1941 г. РИСО № 1488-641. А-34802. Объем 7¹/₂ печ. л. и 3 вкл.
7.63 уч.-изд. л. Тираж 1000 экз. Цена книги 6 руб.

Над. типография К. Маттисена, г. Тарту ЭССР. Валикраави № 4 — Заказ № 307 1941 г.