

К МИГРАЦИИ ЗОЛОТА В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

Л. Л. ШАБЫНИН

(Представлена проф. П. А. Удодовым)

До настоящего времени миграция золота в природных водах изучена слабо. В связи с этим затруднено применение гидрогеохимического метода для поисков золоторудной минерализации. Накопившийся опытный и литературный материал [1, 2, 6, 9] не дает ясного ответа на вопросы об условиях и формах миграции золота в природных водах золоторудных месторождений.

Автором в течение 1961—1964 гг. проводились полевые работы на золото-сульфидных месторождениях в районах с различными геологическими и климатическими обстановками. Краткая характеристика районов и результаты работ в каждом из них приводятся ниже.

1. Восточное Забайкалье. Полевые исследования проводились на площади Ара-Илинского рудного поля в районе зоны разлома, которая в структурно-металлогеническом отношении входит в Шилко-Олекминский золото-молибденовый пояс [7]. Площадь исследованного рудного поля, располагающегося в пределах этой зоны разлома, сложена широкоразвитыми палеозойскими биотитовыми, биотит-роговообманковыми гранитами и комплексом мезозойских малых интрузий диоритового состава. Кроме малых интрузий, мезозойский магматизм проявился в виде излияний кислых эффузивов типа фельзитов, фельзит-порфиров и их туфов, имеющих форму покрова, мощностью от 80 до 200 м, и перекрывающих зону разлома на отдельных участках.

Описываемая зона разлома имеет северо-восточное простирание и приурочена к гранитам, в различной степени дислоцированным. Она благоприятствовала проявлению гидротермальных процессов, выразившихся в хлоритизации, серицитизации, березитизации, турмалинизации и развитии кварцево-карбонатной минерализации. Золотооруденение приурочено к следующим структурным элементам: 1) к участкам сопряжения двух систем трещинных зон северо-восточного и северо-западного простирания; 2) к местам ограничения рудоносных прожилков тектонической глиной зон смятия; 3) вдоль даек кварцевых порфиров; 4) к системе оперяющих трещин субмеридионального направления.

Химический состав подземных вод района весьма сложный. Здесь встречаются гидрокарбонатные, хлоридные и сульфатные воды со всевозможными переходами из одного типа в другой. Особой пестротой отличаются воды, связанные непосредственно с зоной разлома. Последние, наряду со сложным химическим составом, характеризуются сложным комплексом микрокомпонентов. Спектральный анализ водных кон-

центратов, отобранных по методике ТПИ [10], показал наличие в этих водах 18 элементов: мышьяка, серебра, сурьмы, цинка, свинца, меди, висмута, никеля, кобальта, молибдена, бериллия, кадмия, бария, титана, марганца, хрома, ванадия, золота [7]. Столь обширный комплекс элементов обусловлен наличием различной сульфидной минерализации: золото-мышьяковой в северо-восточной части рудного поля и золото-висмутовой в юго-западной его части.

Золото в водах обнаружено в пробах из капежа штолен и в пробах из источников, которые дренируют подземные воды как четвертичных отложений, так и воды зоны разлома на участке, перекрытом толщей фельзитов.

2. Кузнецкий Алатау. Полевые исследования проводились в районе Саралинского рудного поля, сложенного мощной толщей эффузивно-осадочных и мелкими телами интрузивных пород, которые разбиты обильными тектоническими нарушениями, объединяющимися в несколько систем. Возраст толщи окончательно не установлен: одни считают его докембрийским, другие кембрийским. Геологическое строение рудного поля очень сложное. Здесь выделяется ряд свит, представленных сланцами различного состава, песчаниками, мраморизованными известняками, основными, средними и кислыми эффузивами. Эффузивные породы, подвергшиеся зеленокаменному изменению, слагают около 50% площади рудного поля. Интрузивные породы: диориты, габбро-диориты и плагиограниты — распространены мало. Однако жильные породы, участвуя в строении рудного поля, занимают около 30% его площади. Они представлены дайками кислого (альбититы, гранит-порфиры, пегматиты и аплиты) и основного состава (диабазы, диабазовые и лабрадоровые порфириды).

Руды месторождений Саралинского поля относятся к золото-сульфидному типу и представляют собой кварцевые жилы с бедным и умеренным содержанием сульфидов. Парагенетическая ассоциация основных минералов следующая: кварц, карбонаты, самородное золото, пирит, блеклые руды, халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит, антимонит. Золото в большинстве случаев устанавливается лишь химическим анализом и находится в дисперсном состоянии в сульфидах. Распространение его неравномерное.

Подземные воды рудного поля (исключая рудничные) по своему химическому составу преимущественно гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-хлоридные с минерализацией около 100 мг/л. Величины рН колеблются от 5,8 до 8,0. Золото встречено в четырех точках при содержании 0,5—1,5 мкг/л. Все эти точки приурочены к естественным выходам подземных вод. Наиболее характерными элементами-спутниками золота в водах является серебро, мышьяк, медь, свинец, цинк, никель.

3. Горный Алтай. Среднегорье. Исследованный участок располагается на стыке Лебедского геосинклинального прогиба с Бийским горстовым массивом в пределах единой разветвляющейся зоны глубинных разломов. Центральную часть района занимает вытянутый в широтном направлении диоритовый массив, который с запада срезается Турочакским гранитным плутоном, а к востоку погружается под толщу эффузивно-осадочных образований синий-кембрийского возраста. Состав массива сложный, варьирующий от пироксенитов до сиенит-диоритов с преобладанием диоритов и габбро-диоритов. Эффузивно-осадочная толща подразделяется на несколько свит и представлена основными эффузивами (пироксеновые порфириды, диабазы, миндалефиры, туфы и туфобрекчии), песчаниками, сланцами, битуминозными и мраморизо-

ванными известняками, мраморами. Непосредственно в пределах площади золоторудного проявления близ Турочакского гранитного массива, вследствие контактового метаморфизма, развиты скарны различного состава, роговики, метаморфизованные сланцы, наблюдается сильное окварцевание. Здесь же широко развиты закарстованные крупнозернистые мраморы. Оруденение, связанное с волластонитовыми и гранатовыми скарнами, относится к золото-медно-колчеданному типу. Наиболее распространенные минералы, с которыми связано золото, — борнит и халькопирит, реже халькозин, ковеллин и пирит. Основная ассоциация: золото — медь — серебро.

Подземные воды этого района однообразно гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-хлоридные с минерализацией около 50—60 мг/л рН вод преимущественно слабощелочное и нейтральное. Комплекс элементов в водах, отвечающий участкам с золото-сульфидной минерализацией, — свинец, медь, цинк, серебро. Золото не обнаружено ни в одной из точек опробования.

4. Рудный Алтай. Работы проводились на Зыряновском месторождении, заключенном в толщах эффузивно-осадочных пород средне-девонского и нижне-кембрийского возраста, сильно метаморфизованных и дислоцированных. Основной тектонической структурой района является Ревнюшенский антиклинорий ССЗ простираения. Само месторождение расположено на структуре второго порядка — Зыряновской антиклинали. Руда Зыряновского месторождения по существу представляет собой вмещающие породы, расположенные во внутренней части антиклинали и в той или иной степени метаморфизованные. Руды полиметаллические, сплошные и вкрапленные с преимущественным распространением последних.

Золото распространено довольно равномерно как в сплошных, так и во вкрапленных рудах. Присутствует оно, в основном, в самородном состоянии в тесной ассоциации с главными сульфидными минералами: галенитом, халькопиритом, сфалеритом и блеклыми рудами. Следует особо отметить, что во вмещающих породах и рудах, независимо от степени оруденения последних, содержание железа составляет 4—5%, из которых на долю двухвалентного железа приходится около 50% от общего содержания.

Среди подземных вод в районе выделены два водоносных горизонта: горизонт палеозойских отложений и горизонт кайнозойских отложений. Первый — преимущественно слабонапорный. По химическому составу его воды гидрокарбонатные с минерализацией около 400 мг/л и со слабощелочной реакцией (рН=7,0—7,5). Рыхлая толща кайнозойских отложений обводнена повсеместно. Химический состав этих вод также гидрокарбонатный с минерализацией около 100 мг/л и рН=7,2—8,2. Комплекс металлов в водах, отвечающий характеру оруденения, следующий: цинк, кадмий, медь, свинец, никель, кобальт, серебро. В рудничных водах содержание отдельных элементов, например цинка, достигает нескольких миллиграммов на литр (более 2,5). Золото же в водах не обнаружено.

Проведенные исследования показали, что независимо от типа оруденения золото-сульфидных месторождений, возможность миграции золота в природных водах на более или менее значительные расстояния определяется степенью карбонатности вмещающих пород. Так, в первых двух случаях (В. Забайкалье и Кузнецкий Алатау) мы имеем три типа оруденения: золото-мышьяковый, золото-висмутовый и золото-полиметаллический. Вмещающие породы по отношению к воде являются малоактивными и нейтральными [11]. Вследствие этого воды обладают

преимущественно кислым и нейтральным рН. В этих условиях, как указано выше, в водных концентратах золото обнаружено в отдельных, довольно редких точках.

Существенно карбонатная обстановка месторождения в Горном Алтае с золото-медно-колчеданным типом оруденения обусловила низкое содержание металлов в водах, в частности, золота, которое не обнаружено при чувствительности спектрального анализа на него 0,001%.

Значительная карбонатизация вмещающих пород Зырянского месторождения с золото-полиметаллическими рудами и относительно высокое содержание двухвалентного железа (около 2%) в породах и до 4—5 мг/л в водах, по-видимому, также обусловили отсутствие золота в водах, хотя содержание других металлов достигает значительных величин.

По работам ряда авторов [2, 1, 9 и др.] можно судить о миграции золота в природных водах в зависимости от степени карбонатности пород. Л. В. Разин и И. С. Рожков отмечают, например что «...анализы вод, фильтрующихся через золотоносные отложения куранахского типа, позволили установить, что в этих водах часто присутствует золото, и его тем больше, чем кислее среда природных вод. В трещинно-карстовых водах закарстованных известняков, расположенных ниже подошвы золотоносных карстовых полостей, золото не установлено». Они же отмечают для рудничных вод прямую зависимость содержания золота и количества ионов двухвалентного марганца и закисного железа и ограниченную миграционную способность золота. «За пределами рудоносных участков золото в исследуемых объектах не установлено».

Результаты полевых исследований и литературные данные привели к мысли проверить экспериментально-лабораторным путем влияние на

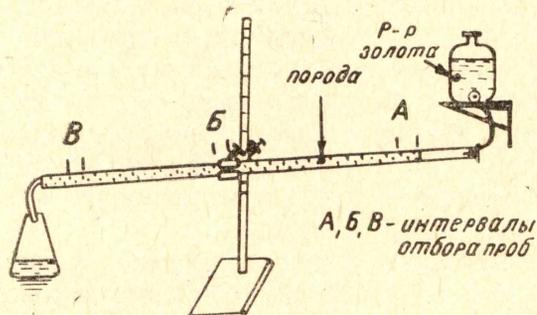


Рис. 1. Схема установки опыта.

миграцию золота сульфидов и карбонатов. С этой целью был поставлен ряд опытов с применением методики определения золота, предложенной К. С. Пахомовой и Т. А. Высоцкой [8]. Были взяты кварц, пирит, порфирит с содержанием 10% двухвалентного железа и известняк. Навески этих пород объемом 100 см³ с диаметром частиц 0,1—0,25 мм были загружены в трубки, которым придавался незначительный наклон в рабочем положении (рис. 1). Навеска кварца предварительно обрабатывалась царской водкой и затем промывалась до рН дистиллята. Пирит осадочного происхождения подобным образом обрабатывался раствором соляной кислоты для удаления карбонатов. Породы предварительно анализировались на содержание в них золота. Анализ показал только в одном из трех определений в пирите 0,0000029% золота. После предварительной обработки пород был приготовлен стандартный раствор металлического золота в царской водке с титром 5,929 мкг/л с рН=4.

Поставлено 5 опытов со следующими породами: кварц (первая трубка), кварц + 15% пирита (вторая трубка), кварц + 40% пирита (третья трубка), порфирит и известняк. Сквозь эти породы в течение 6 суток пропускался приготовленный раствор золота, причем пробы объемом 250 мл отбирались через сутки, двое и трое суток и анализировались на содержание золота (табл. 1).

В пробах раствора, пропускавшегося при тех же условиях сквозь порфирит и известняк, золото анализом не обнаружено.

Таблица 1

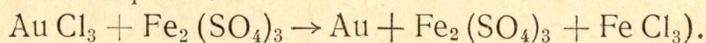
Время час.	Величина рН	Кварц	Кварц + 15 % пирита	Кварц + 40 % пирита
	Содержание золота			
24	рН	4,2	4,2	4,4
	Au мкг/л	597,3	14,53	2,799
48	рН	4,2	4,2	4,2
	Au мкг/л	389,3	2,053	1,959
72	рН	4,2	4,2	4,4
	Au мкг/л	507,4	8,439	5,713

Затем поинтервально из трубок (рис. 1) были отобраны образцы пород и проанализированы на золото (табл. 2).

Таблица 2

№ трубки	Породы	Интервал	Содержание золота %
1	Кварц	А	0,0735
		Б	0,0630
		В	0,0420
2	Кварц + 15 % пирита	А	0,2520
		Б	0,1850
		В	0,1260
3	Кварц + 40 % пирита	А	0,528
		Б	0,8400
		В	0,2940

Как показали анализы, основная масса золота извлекалась из раствора в первые моменты соприкосновения раствора с породами. Возможно, что выпадение золота из раствора обязано суммарному действию физических (адсорбция) и химических явлений (выпадение из раствора золота по реакции:



Содержание сульфат-иона, достигающего 75 мг/л, свидетельствует о возможности протекания такой реакции. В последнем случае золото должно было бы осаждаться на пирите. Для подтверждения этого предположения из интервала Б трубки третьей была отобрана проба и под биноклем рассортирована на пирит и кварц. Анализ показал, что содержание золота в пирите (0,5688%) в 2 раза превышает содержание золота в кварце (0,2857%).

Для выяснения формы миграции золота в условиях опыта при фильтрации раствора сквозь породы с различным содержанием сульфид-

дов был проведен электролиз суточных водных проб трубок первой и третьей. Диализ показал, что в анолите золота содержится в два-три раза больше, чем в католите. Отсюда можно предположить, что миграция золота происходит в виде отрицательного комплексного иона, возможно иона $[\text{AuCl}_4]^{-1}$, что согласуется с выводами В. М. Крейтера, С. А. Брусилковского, И. К. Баженова и др. [3, 5, 6] о формах миграции золота в природных водах.

Далее, для определения устойчивости адсорбированного золота сквозь эти же породы пропускался бидистиллят. Пробы равного объема отбирались также через сутки, двое и трое суток (табл. 3).

Таблица 3

Время (час.)	Величина рН	Кварц	Кварц + 15 % пирита	Кварц + 40 % пирита
	Содержание золота			
24	рН	4,0	4,0	4,0
	Ац мкг/л	0,1458	1,4000	1,7700
48	рН	5,8	4,0	4,0
	Ац мкг/л	0,804	2,5680	0,1555
72	рН	7,0	3,6	3,6
	Ац мкг/л	0,000	0,000	0,2019

После окончания этой серии вновь из каждой трубки поинтервально были отобраны пробы пород и проанализированы на содержание золота (табл. 4).

Таблица 4

№ трубки	Породы	Интервал	Содержание золота, %
1	Кварц	А	0,0260
		Б	0,0680
		В	0,1205
2	Кварц + 12 % пирита	А	0,0720
		Б	0,2440
		В	0,4120

По данным таблиц [1, 2, 3, 4] построены графики, иллюстрирующие поведение золота в водных растворах и породах в условиях опыта в зависимости от времени (рис. 2).

В первое время фильтрации стандартного раствора сквозь породы содержание золота в водах уменьшается, а затем незначительно увеличивается, что связано, возможно, с ограничением адсорбционной способности пород. При пропускании бидистиллята наблюдается обратная картина, которую можно объяснить необратимостью реакции выпадения золота из раствора. Лишь в случае большого количества сульфид-

дов происходит, очевидно, незначительное обратное растворение и вынос золота (рис. 2, в). Поведение золота, выпавшего из раствора, также довольно интересно. Если при пропускании стандартного раствора золото высаживалось в первые моменты соприкосновения его с породами, то при промывке пород бидистиллятом основная масса золота переместилась к концу трубки (рис. 2). Можно предположить, что золото, выделяясь из раствора, образует коллоидные частички, которые

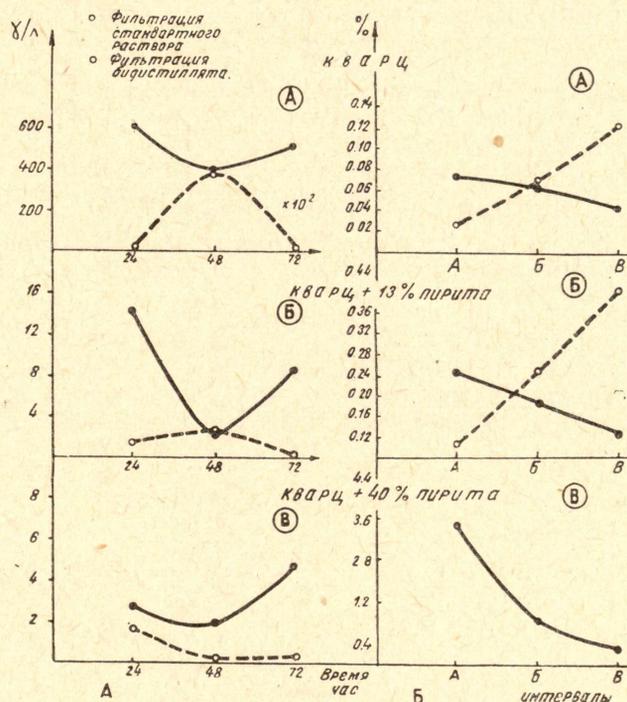


Рис. 2. А — определение золота в фильтрате при пропускании стандартного раствора и бидистиллята; Б — определение золота в породах, сквозь которые пропускались растворы.

даже слабым током воды переносятся по направлению ее движения и по мере уменьшения скорости фильтрации (примерно менее 3 мм/час) остаются на месте.

Выводы

1. Полевые исследования показали применимость гидрогеохимического метода при поисках золоторудных месторождений по элементам-спутникам золота в природных водах с использованием методики осаждения ТПИ.
2. Проведенные лабораторно-экспериментальные работы подтвердили выводы полевых исследований и позволили частично выяснить возможную форму миграционных соединений золота в природных водах с различными значениями рН.
3. Частично выяснена роль пирита и связанного двухвалентного железа в породах на миграцию золота в обстановке, имитирующей зону окисления сульфидных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. П. Албул, А. Д. Миллер. О возможности поисков золоторудных месторождений по гидрогеохимическим ореолам рассеяния. Тр. ВИТР, 1959.
 2. М. Н. Альбов. О формах миграции золота в зоне окисления рудных месторождений. Изв. АН СССР, сер. геол. 4, 1952.
 3. И. К. Баженов. Комплексные соединения и их роль в геохимических процессах. Мат. по геол. и пол. иск. Зап. Сибири, Томск, 1964.
 4. Н. И. Бродская, И. П. Вычужанина, З. В. Комаров, М. С. Лешинская. Концентрирование широкого круга элементов из природных вод на смешанном сорбенте с последующим спектральным определением. ВИТР, вып. 55, 1962.
 5. С. А. Брусиловский. О миграционных формах элементов в природных водах. Гидрогеохим. мат. т. 35. АН СССР, 1963.
 6. В. М. Крейтер. Поведение золота в зоне окисления. Госгеолтехиздат, 1958.
 7. В. М. Матусевич, Г. В. Шубин, Л. Л. Шабынин. Результаты гидрогеохимических исследований в пределах зоны разлома одного из районов Вост. Забайкалья. Матер. по геол. и пол. иск. Зап. Сиб., Томск, 1964.
 8. К. С. Пахомова, Т. А. Высоцкая. Определение золота при комплексных геохимических исследованиях. Тр. ЯФ СО АН СССР, сер. геол., вып. 16, 1963.
 9. Л. В. Разин, И. С. Рожков. К геохимии золота в коре выветривания и биосфере провинции многолетней мерзлоты на Алданском щите. Тр. ЯФ СО АН СССР, сер. геол., вып. 16, 1963.
 10. П. А. Удодов, И. П. Онуфриенок, Ю. С. Париков. Опыт гидрогеохимических исследований в Сибири. Изд. «Высшая школа», Москва, 1962.
 11. П. А. Удодов, И. Н. Онуфриенок, П. В. Кристалев. Химическая активность горных пород по отношению к ионам водорода. Опыт разр. гидрогеох. мет. поисков рудных месторождений. Госгеолтехиздат, 1959.
-