Записки Ленинградского горного института имени Г.В.Плеханова.
Т. 129. Л., 1991

УДК 550.84

В.Ю.АБРАМОВ,
А.А.ПОТАПОВ

ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ И ПОТОКОВ РАССЕЯНИЯ ЗОЛОТА В УСЛОВИЯХ ПРИАМУРЬЯ

Целью гидрогеохимических исследований, проведенных авторами в районах распространения десяти золоторудных полей с различными ландшафтно-гидрогеохимическими условиями, являлась разработка методики поисков коренного оруденения. Исследования позволили также выявить генетическую связь золотоносных аллювиальных россыпей с коренными источниками, определить ряд закономерностей поведения золота в зоне гипергенеза. Установлено, что на поведение золота существенно влияет многолетняя мерзлота.

I. Гидродинамические аспекты формирования гидрогеохимических ореолов и потоков рассеяния

С р е д н е г о р н ы е б е з м е р з л о т н ы е л а н д ш а ф т ы. В горно-складчатых областях, где отсутствуют многолетнемерзлые породы, выделяют приповерхностный (горная верховодка) и трещинно-грунтовый стоки, которым соответствуют различные фоновые концентрации металлов в водах. Определение доли вод каждого типа в водном питании поверхностных водотоков и других опробуемых при поисках водопунктов имеет важное значение для понимания условий формирования гидрогеохимических ореолов и потоков рассеяния [2]. В рассматриваемых ландшафтах через фазу приповерхностного стока проходит объем воды, обычно в несколько раз превышающий трещинно-грунтовый сток [2].

Трещинно-грунтовые воды являются наиболее информативными при проведении гидрогеохимических поисков, поэтому определение их доли в водном балансе поверхностных водотоков является одной из необходимых операций при интерпретации результатов съемки.

В зависимости от состава материнских пород, по которым развиваются аккумулятивные поверхности, склоновые отложения подразделяются на обломочные аллювиально-делювиальные отложения, в основном на гранитоидах, и глинистые аллювиально-делювиальные отложения на вулканогенных, вулканогенно-осадочных, терригенно-осадочных отложениях (см. рисунок, а и б).

Первые характеризуются низкой степенью увлажненности в приповерхностной зоне, интенсивным водообменом; в подавляющем большинстве случаев на этих площадях происходит скрытая разгрузка грунтовых вод в речной аллювий. Непосредственная гидравлическая связь трещинно-грунтовых вод коре

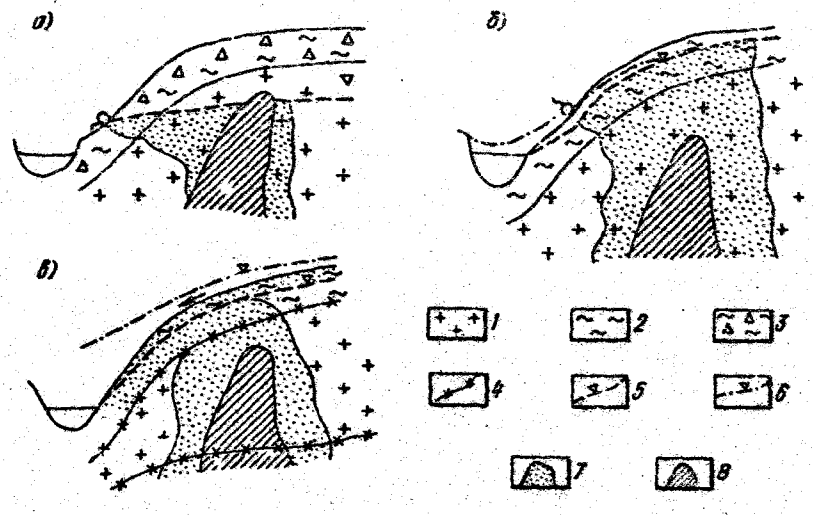


Схема формирования гидрогеохимического ореола рассеяния:
а и б - в безмерзлотных ландшафтах с развитием соответственно хорошо и плохо проницаемых склоновых отложений; в - в многолетнемерзлых породах
1 - коренные породы; 2 - глинистые склоновые отложения; 3 - грубообломочные склоновые отложения с песчано-глинистым заполнителем; 4 - граница многолетнемерзлых пород; 5 - уровень грунтовых вод; 6 - уровень напорных трещинных вод; 7 - гидрогеохимический ореол рассеяния; 8 - рудное тело

пород и вод хорошо проницаемых элювиально-делювиальных образований приводит к их смешению и совместной разгрузке в подрусловый аллювий.

Глинистые элювиально-делювиальные отложения на вулканогенных, вулканогенно-осадочных отложениях составляют основную массу всех склоновых отложений. Они более водообильны, в нижних частях склонов нередко водонасыщены по всему разрезу, что вызывает заболачивание долин. С другой стороны, развитие глинистых склоновых отложений затрудняет разгрузку трещинного водоносного горизонта, вызывая в нем подпор воды, наблюдаемый по изливающимся скважинам, расположенным на склонах.

Таким образом, описываемый ландшафт имеет двухъярусное гидрогеологическое строение: трещинно-грунтовые воды коренных горных пород и поровые воды глинистых склоновых отложений.

Глинистые склоновые отложения более емки по сравнению с коренными и с учетом их высокой водонасыщенности могут рассматриваться как самостоятельный водоносный горизонт, разгружающийся в виде сосредоточенных, нередко временных источников либо рассредоточенных выходов вдоль русел ручьев.

Поскольку основная часть минералов глинистых элювиально-делювиальных отложений имеет вторичное происхождение, то поровые воды по сравнению с трещинными имеют обычно меньшую минерализацию и более низкие фоновые концентрации микрокомпонентов.

Такое геологическое строение обусловливает разгрузку трещинно-грунтовых вод коренных пород лишь в верховьях ручьев или в виде восходящих

источников по разрывным нарушениям. Поэтому минерализация вод в поверхностных водотоках и концентрация золота и других микрокомпонентов закономерно снижается от истока ручья к его устью. При интерпретации результатов гидрогеохимической съемки в таких условиях целесообразно проводить регрессионный анализ изменения местного гидрохимического фона в зависимости от расстояния от истока ручья.

Ландшафты с многолетней мерзлотой. В районах с развитием многолетнемерзлых пород основной сток формируется за счет надмерзлотных вод деятельного слоя; сток подмерзлотных вод носит подчиненное значение (см. рисунок, в). Надмерзлотные воды питаются в основном за счет атмосферных осадков и талых вод, образующихся при оттайке многолетнемерзлых пород. Гидравлическая связь надмерзлотных и подмерзлотных вод затруднена. В зонах с прерывистой мерзлотой она осуществляется лишь по зонам таликов, которые часто приурочены к разрывным нарушениям и зонам интенсивной трещиноватости, где разгружаются напорные подмерзлотные воды. В условиях островной мерзлоты долинного типа связь двух типов вод проявляется в конце лета, когда сезонная мерзлота на склонах и водоразделах оттаивает, а доля трещинных вод в водном балансе поверхностных водотоков увеличивается. Подобное явление фиксируется по увеличению минерализации поверхностных вод в конце лета.

Среди исследованных мерзлотных ландшафтов есть как горные, так и равнинные. Принципиальных отличий в условиях водообмена и путях водной миграции вещества не выявлено. Отмечены лишь более высокие скорости движения в деятельном слое и в ручьях, а также большая плотность гидросети в горных районах.

Особенности водной миграции золота в различных ландшафтно-гидрогеохимических условиях

Исследованные авторами золоторудные поля находятся в различных геолого-гидрогеолого-геохимических условиях. Часть из них приурочена к гранитоидным массивам, часть – к метаморфическим (в основном сланцевым) или вулканогенно-осадочным комплексам пород. Рельеф местности меняется в широких пределах (от равнинного до среднегорного). Мерзлотная обстановка так же неодинакова: выявлены участки со сплошным развитием многолетней мерзлоты и районы, где многолетняя мерзлота вообще отсутствует.

Однако для всех рассматриваемых ландшафтов можно наметить следующую общую схему и основные этапы (стадии) формирования гидрогеохимических ореолов и потоков рассеяния рудных тел.

На первой стадии золото, содержащееся в рудном теле или коренных породах, переходит в водно-растворимое состояние. Далее, на второй стадии, происходит перемещение золота в водной среде с образованием гидрогеохимических ореолов рассеяния. При разгрузке подземных вод в поверхностные водотоки (третья стадия) образуются гидрогеохимические потоки рассеяния золота. На четвертой, заключительной стадии в поверхностном водотоке зо-

лото восстанавливается до элементного и иной становится форме его мигр. ции: раствор превращается во взвесь с последующим выпадением золота в донные осадки поверхностных водотоков.

Приведенная принципиальная схема, за исключением четвертой стадии, общеизвестна, однако каждый гидрогеохимический ландшафт характеризуется определенными особенностями водной миграции металлов.

Безмерзлотные ландшафты. Здесь следует различать интрузивные массивы с хорошо проницаемыми песчано-гравийно-галечными отложениями на склонах и в долинах и вулканогенно-осадочные структуры с плащом слабопроницаемых глинистых отложений на склонах.

В первом типе районов на первой стадии водного рассеяния (растворение рудных минералов) рудные минералы непосредственно взаимодействуют с инфильтрующимися атмосферными осадками. Инфильтрационные воды насыщены кислородом и другими химически активными компонентами (гумусовые кислоты, углекислый газ). Вступая в химические реакции, такие воды вызывают активное окисление и растворение золота:

$$Au^0 \rightleftharpoons Au^+ + \bar{e} \qquad \text{или} \qquad Au^0 \rightleftharpoons Au^{3+} + 3\bar{e}.$$

Затем катионы окисленного золота вступают во взаимодействие с находящимися в подземных водах лигандами, образуя комплексные ионы.

Золото проявляет амфотерные свойства, а следовательно, лучше растворяется при наличии окислителей в кислой и щелочной средах. Так как кислые воды встречаются довольно редко, а преобладают воды с околонейтральным или щелочным pH, то в подземных водах золото мигрирует в виде гидроксокомплексов и соответствующих им коллоидов.

В рудничных и ореольных водах золото-сульфидных, а также золото-кварцевых месторождений существенный вклад в образование комплексных ионов золота могут вносить тиосульфат-ионы, политионат-ионы [6], бромид- и йодид-ионы.

Гуминовые и фульвокислоты объединяют целый класс органических кислот, химические свойства которых зависят от состава функциональных групп. Например, из почв и торфов в непосредственной близости от золоторудных тел авторами были выделены йод, бром функциональных групп органических веществ, а также сера функциональных тиогрупп. При этом гумусовые кислоты, содержащие функциональные тиогруппы, либо восстанавливают золото до элементного, либо образовывают нерастворимые в воде комплексные соединения золота, т.е. выступают в качестве геохимического барьера. Таким образом, в зависимости от состава функциональных групп гумусовые кислоты могут выступать и в качестве геохимического барьера, и в качестве мигранта золота.

Особенности второй стадии рассеяния (формирование гидрогеохимических ореолов рассеяния) в рассматриваемой гидрогеологической структуре определяются наличием в ней свободного водообмена и, следовательно, большими скоростями фильтрации. В связи с этим основная роль в водном переносе

вещества, в том числе и золота, принадлежит конвекции. Диффузионное рассеяние имеет подчиненное значение. Гидрогеохимические ореолы вытянуты по потоку подземных вод. По мере движения от рудного тела ореольные воды, смешиваясь с фоновыми, постепенно разубоживаются.

Третья стадия в ландшафтах такого типа также имеет свою специфику. В силу хорошей проницаемости склоновых отложений и отсутствия выдержанных водоупоров в пределах развития гранитоидных массивов редко образуются ручьи малого порядка. Разгрузка ореольных вод в водотоки с большим транзитным потоком приводит к тому, что гидрогеохимические потоки слабо проявлены. Возможен, кроме того, вариант подруслового потока ореольных вод.

Четвертой стадии соответствует разубоживание гидрогеохимических потоков рассеяния золота. Помимо разбавления аномальных вод фоновыми в момент разгрузки (выхода вод на земную поверхность) происходит резкое изменение физико-химической обстановки: нарушается контакт коренная порода – вода, система становится открытой по отношению к кислороду и углекислому газу и pH подземных вод снижается в более кислую сторону: для трещинно-грунтовых вод pH = 7,8÷8,0; при разгрузке их на поверхность водородный показатель воды уменьшается до 7,0–7,2 по реакции $OH^- + CO_2 \rightarrow HCO_3^-$.

После выхода трещинно-грунтовых вод на дневную поверхность интенсифицируются окислительно-восстановительные процессы, приводящие к разрушению части комплексных ионов золота, сопровождающееся окислением лигандов и восстановлением золота [4]. Часть ионного золота восстанавливается металлами в элементном состоянии (самородные медь, железо, свинец и др.) и органическими веществами. В качестве восстановителя может выступать двухвалентное железо при его окислении до трехвалентного с одновременной адсорбцией на поверхности осадка $Fe(OH)_3$. Затем образуются псевдоколлоидные растворы золота, происходит их разрушение (коагуляция).

Гидрогеохимические потоки рассеяния золота не превышают 500 м. В пределах гидрогеохимических аномалий происходит преобразование форм миграции золота: от ионной формы к коллоидной и к взвеси. До 90 % золота выпадает из воды в пределах 500-метрового потока рассеяния.

Предложенный механизм преобразования различных форм золота в поверхностном водотоке подтверждается натурным экспериментом. При специальном опробовании одного из потоков рассеяния золота, проведенного по методике [7], выявилась следующая закономерность: по мере удаления от зоны разгрузки ореольных вод вниз по потоку доля ионного золота постепенно уменьшается; вблизи аномалии наблюдается рост концентрации золота, включенного в коллоидные частицы; на расстоянии 500–1000 м от источника практически все золото уже находится во взвешенном состоянии. Подобные результаты были получены и в работе [5].

Результаты экспериментальных работ позволяют сделать вывод о том, что в трещинно-грунтовых водах (ореольных водах) основной формой миграции золота являются его комплексные ионы. В потоке рассеяния золото восстанав-

ливается до элементного с образованием коллоидных, в конечном итоге, дисперсных форм его водной миграции.

Описанное явление вызывает выпадение золота из водных растворов и тем самым уменьшает протяженность гидрогеохимических потоков рассеяния золота, которая в среднем составляет около 500 м.

Выявленные гидрогеохимические аномалии золота в большинстве случаев находятся в головках известных аллювиальных золотоносных россыпей и характеризуют интенсивность их подпитки гидрогенным золотом.

В районах вулканогенно-осадочных структур с плащом слабопроницаемых глинистых отложений на склонах водоупорный плащ элювиально-делювиальных отложений создает напорный режим фильтрации в трещинных водах вулканогенных образований, а открытая их разгрузка происходит только в верхних частях склонов, где мощность водоупора минимальна, либо он отсутствует. Конвективный перенос водой золота, переход его из подземных вод в поверхностные - из ореола в поток (третья стадия) - происходит только в верховьях ручьев малого порядка. Через глинистый водоупор возможен только диффузионный перенос золота, однако наличие сорбционного барьера препятствует переходу его из гидрохимического ореола в поток. Указанное явление приводит не только к снижению минерализации поверхностных вод вниз по потоку, но и к разубоживанию гидрогеохимических потоков, образовавшихся в зоне разгрузки трещинных вод вулканогенов.

Физико-химические процессы перехода золота из самородного состояния в комплексные ионы на первой стадии и затем, в поверхностных водотоках, в коллоидные и дисперсные частицы (четвертая стадия) сохраняются и для описываемого типа структур.

Р а й о н ы с р а з в и т и е м м н о г о л е т н е й м е р з л о т ы. Основным фактором, обусловливающим специфику первой стадии (растворение рудных минералов) рассеяния в этих районах, является отсутствие непосредственного контакта рудных минералов с инфильтрующимися атмосферными осадками. Перемещению последних на глубину мешают многолетнемерзлые породы, создающие условия затрудненного водообмена. Основным физико-химическим процессом, приводящим к появлению в воде золота, служит электрохимическое растворение. Особую значимость этот процесс приобретает, когда в соседстве с золотом находятся разнообразные сульфидные минералы, обладающие различными электродными потенциалами и образующие многочисленные гальванические пары [8].

В мерзлотных ландшафтах, как и в безмерзлотных, в подземных водах золото мигрирует в виде комплексных ионов с органическими и неорганическими лигандами.

Вторая стадия (формирование гидрогеохимических ореолов рассеяния) в районах с развитием многолетней мерзлоты протекает при явном преобладании диффузионных процессов над конвективными. Процессы формирования гидрогеохимических ореолов рассеяния золота осложнены наличием температурного и электрического градиентов, направленных в зимний, наиболее продолжительный период от глубинных слоев к поверхности. При этом в резуль-

тате термоосмотических, термокапиллярных и электроосмотических процессов [1, 3] происходит вертикальная (снизу вверх) миграция рудных элементов, особенно катионов, вместе с пленочной незамерзшей водой через многолетнемерзлые породы. Таким образом, гидрогеохимический ореол рассеяния вытянут вертикально от подмерзлотных вод через мерзлые породы к надмерзлотным.

В летнее время при таянии сезонной мерзлоты золото из деятельного слоя переносится надмерзлотными водами в поверхностные водотоки. Миграция золота из деятельного слоя объясняется иногда аномальными свойствами талой воды [4].

Разубоживание гидрогеохимических аномалий (четвертая стадия) по ходу движения поверхностных водотоков происходит по ранее описанной схеме. Кроме того, в районах с развитием прерывистой и островной мерзлоты наблюдается одновременная разгрузка в поверхностные водотоки подмерзлотных вод (по таликовым зонам) и талых вод деятельного слоя. При смешении в ручье этих двух типов вод в различных соотношениях преимущественно талые воды имеют меньшую минерализацию и pH, большие концентрации хлоридионов и ионов натрия, чем преимущественно подмерзлотные воды. Каждый из двух указанных типов вод обладает собственным местным гидрохимическим фоном микрокомпонентов и золота. В связи с этим целесообразно предварительно проводить разделение всей совокупности точек опробования на две выборки (преимущественно талые и преимущественно подмерзлотные воды) по макрокомпонентному составу и оценивать аномальность вод в пределах каждой выборки раздельно с расчетом собственного местного гидрохимического фона.

В ландшафтах, характеризующихся развитием мерзлоты долинного типа, особое значение приобретают режимные наблюдения. Из-за постепенной оттайки сезонной мерзлоты в водном балансе ручьев постоянно увеличивается доля подмерзлотных вод, достигая максимума к сентябрю-октябрю. Так как металлоносность подмерзлотных вод выше, чем приповерхностных, то этот процесс способствует увеличению фоновых концентраций микрокомпонентов и золота в водах поверхностных водотоков. При интерпретации гидрохимического опробования плавное изменение содержаний можно учесть, лишь привлекая результаты режимных наблюдений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боровицкий В.П. О формировании ореолов рассеяния в подмерзлотных водах // Зап. ЛГИ. 1971. Т.62. Вып.2. С.51-59.

2. Кирюхин В.А. Проблемные вопросы гидрогеохимических исследований // Гидрогеохимические поиски месторождений полезных ископаемых. Новосибирск: Наука, 1990. С.5-10.

3. Макаров В.Н. Геохимические поля в районах криолитозоны и поиски месторождений полезных ископаемых: Автореф. докт. дис. / Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР. Якутск, 1990. 34 с.

4. О возможности образования гидрогенных месторождений золота / Л.В.Таусон, И.С.Ломоносов, Д.С.Глюк и др. // Докл. АН СССР. 1989. Т.306. № 4. 1989. С.960-965.

5. Плюснин А.М. Формирование водных потоков рассеяния золоторудных месторождений в гольцовых ландшафтах // Геохимия. 1987. № 8. С. 1153-1159.

6. Плюснин А.М., Мирокое А.Г., Беломестнова Н.В., Чернигова С.Е. Экспериментальное исследование окисления золотосодержащих сульфидов // Геохимия. 1990. № 1. С. 51-60.

7. Плюснин А.М., Погребняк Ю.Ф. Определение взвешенных и коллоидных форм золота в природных водах // Журнал аналитической химии. 1982. Т. 37. № 3. С. 541-543.

8. Свешников Г.В. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Л.,: Изд-во МГУ, 1987. 190 с.