
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ КОРЕННОГО ЗОЛОТА

Н.Н. Трофимов, А.И. Рычков

Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Рассмотрены рациональные комплексы поисковых методов коренных золоторудных объектов различного ранга, включающие выявление, интерпретацию и оценку геохимических аномалий.

При проведении поисковых работ большое значение имеет рациональное комплексование поисковых методов, подразумевающее минимальный набор методов прогноза и поисков, надежно и в минимальный срок обеспечивающих обнаружение полезного ископаемого. Последовательность применения этих методов увязывается со стадийностью геолого-разведочных работ (ГРП). Выбор комплекса поисковых методов происходит следующим образом. Сгруппировав поисково-оценочные критерии золотого оруденения в соответствии с масштабом объектов прогноза (золоторудный район, поле, месторождение), описывается поисковая модель прогнозируемых объектов разного ранга. Далее определяется тот минимальный набор поисковых методов, с помощью которых может быть установлено наличие или отсутствие соответствующих групп поисковых критериев и признаков.

В качестве примера можно описать комплексы методов поисков рудных объектов различного ранга для золото-серебряного оруденения в вулканогенных толщах. На стадии геологосъемочных работ масштаба 1 : 200 000 осуществляется выявление потенциальных рудных районов и рудных узлов. Как известно, они сопровождаются обширными площадями калиевого метасоматоза, гидрогеохимическими аномалиями Hg, Sb, Zn, Cu, Ag, Au, литохимическими аномалиями Hg, Sb, As, Zn, Cu, Sn и Au. Это предопределяет постановку на этом этапе атмогеохимической съемки, гидрогеохимических поисков и поисков по литохимическим потокам рассеяния. Данные поисковые методы предваряются проведением геотектонического, морфоструктурного и формационного анализа исследуемой территории и проводятся в опережающем по отношению к геологическому картированию варианте.

На стадии геологосъемочных работ масштаба 1 : 50 000 (1 : 25 000) выявляется сумма признаков потенциального рудного поля. Основным геохимическим методом здесь являются поиски по вторичным ореолам рассеяния (остаточным или наложенным), позволяющие выделять полиэлементные геохимические аномалии элементов — спутников золота. Опробование выходов коренных пород позволяет выделить поля вулканитов с резкими вариациями соотношений Ag/Au. Эти виды поисковых работ идут в комплексе со специализированным геологическим картированием в масштабе 1 : 50 000—1 : 25 000, наземной гамма-спектрометрии, гравиметрии и магнитометрии в масштабе 1 : 50 000. Указанные работы

дают возможность выделить поля кварц-гидрослюдистых метасоматитов, зоны калиевого метасоматоза, поля и каркасы даек, скрытые интрузии гранитоидов, а также сбросы, разломы, зоны сгущения трещиноватости. Выявление перечисленных признаков обеспечивает выход на потенциальное рудное поле.

На площади рудного поля на стадии поисковых работ соответствующими методами выявляются признаки, указывающие на наличие или отсутствие рудных тел. Ведущий метод — детальное специализированное геологическое картирование в масштабе 1 : 10 000 обеспечивает выявление благоприятных для локализации геолого-структурных элементов. Он дополняется геохимической съемкой масштабов 1 : 10 000—1 : 5000 по вторичным ореолам рассеяния или, если территория открыта, по первичным ореолам. При этом выделяются геохимические ореолы Au, Ag, As, Sb, Hg, K. Эти методы комплексуются с методами магниторазведки в масштабе 1 : 10 000, электроразведочными методами ЕП и ВП. Кроме того, проходка магистральных канав позволяет выявить непосредственные признаки оруденения: колломорфно-полосчатые агрегаты кварца, самородные золото и серебро, сульфосоли серебра, гидроокислы марганца.

На поисково-оценочной стадии работ необходимо выявить крупные рудные тела и рудные столбы. Главной задачей геохимических исследований здесь является опробование всех горных выработок и буровых скважин и обработка и интерпретация полученных данных с целью определения уровня эрозионного среза вскрытого оруденения, его промышленной значимости, уточнения формационной принадлежности. В качестве коэффициентов зональности для золото-серебряного оруденения в вулканогенных толщах можно использовать мультипликативное индикаторное отношение $Au \cdot Ag / Mo \cdot W$, значения которого более 10 говорят о надрудном срезе. Детальная документация буровых скважин и их геохимическое опробование дополняются скважинными геофизическими методами.

По мере увеличения детальности работ резко растет их стоимость. Поэтому чрезвычайно важно уже на ранних стадиях исследований своевременно отбраковать заведомо безрудные аномалии и сконцентрировать усилия на перспективных. Установление целесообразности дальнейшего изучения геохимической аномалии основывается на данных ее интерпретации и оценки. На всех стадиях ГРП проводится качественная оценка формационной принадлежности и количественная оценка прогнозных ресурсов геохимических аномалий по категориям достоверности P_3 , P_2 и P_1 . При обработке материалов поисков по вторичным ореолам рассеяния (остаточные ореолы) и первичным ореолам возможно количественное определение уровня эрозионного среза геохимических аномалий.

Качественная оценка формационной принадлежности геохимической аномалии проводится в первую очередь по ее элементному составу. В общем случае геохимический спектр аномалии золоторудных месторождений представлен золотом, сурьмой, мышьяком, серебром, свинцом, цинком, молибденом, медью, висмутом, кобальтом, никелем, вольфрамом, бериллием. Несомненно, что во вторичных геохимических полях (вторичные ореолы рассеяния, потоки рассеяния, био-геохимические ореолы и т.д.) набор элементов-индикаторов золотого оруденения будет определяться особенностями миграции их в этих средах.

В табл. 1 приведены геохимические спектры (ранжированные по убыванию среднеаномальные значения, выраженные в единицах местного геохимического фона) для первичных, вторичных ореолов и потоков рассеяния элементов-индикаторов на одном из золоторудных месторождений.

Таблица 1

Геохимические спектры ореолов и потоков рассеяния на золоторудном месторождении в геофонах [1]

Ореолы	Au	Sb	As	Bi	Ag	Sn	Pb	Cu	Zn	W
Первичные ореолы	700	495	108	44	22	7,3	6,0	3,2	2,2	1,3
Вторичные ореолы	500	671	147	108	19,3	5,6	4,9	4,5	—	—
Потоки рассеяния	50	52	19	2,0	1,9	2,0	1,8	1,7	—	1,7

Из этих данных следует, что максимальным коэффициентом концентрации (K_k) в первичных и вторичных ореолах характеризуется основной компонент руд — золото ($K_k > 700$). На втором месте (500—700) находится сурьма, также образующая рудные скопления промышленного характера. Третий ведущий компонент ореолов (100—150) — это мышьяк, основной минерал которого — арсениопирит — является главным концентратором золота. Таким образом, эти три элемента с максимальными коэффициентами концентрации в первичных ореолах сохраняют свою ведущую роль во вторичных ореолах и потоках рассеяния, позволяя уже по данным поверхностного опробования определять формационный тип аномалии в коренном залегании.

На стадии детальных работ оценку формационной принадлежности геохимических аномалий можно провести по рядам поперечной геохимической зональности [2]. В частности, для кварц-золоторудных проявлений она выглядит следующим образом:



Чрезвычайно важным аспектом оценки геохимических аномалий является определение их прогнозных ресурсов. Последнее базируется на установленной А.П. Солововым (1985) природной пропорциональной зависимости между продуктивностью коренного оруденения и продуктивностью его вторичных геохимических ореолов рассеяния. В частности для литохимических ореолов

$$M = k M_p; P = k P_p,$$

где M , M_p — линейная продуктивность соответственно ореола и рудного тела по профилю; P , P_p — соответственно площадные продуктивности вторичного литохимического ореола и коренного оруденения; k — местный коэффициент продуктивности.

Количественная интерпретация данных при региональных, поисковых и детальных литохимических съемках подчиняется последовательному рассмотрению содержаний металла в геохимических аномалиях — ореолах и потоках рассеяния, их продуктивности и прогнозных ресурсов металла в объектах постепенно возрастающей достоверности.

Расчет прогнозных ресурсов P_3 (1 : 200 000), P_2 (1 : 50 000), P_1 (1 : 10 000) и указанных выше параметров подробно изложены в работах А.И. Соловова [1]

и в действующей Инструкции по геохимическим методам поисков рудных месторождений [2].

Оценка прогнозных ресурсов по данным поисков, по остаточным вторичным ореолам рассеяния базируется на знании значений коэффициентов остаточной продуктивности k . Их величины определяются в каждом конкретном случае и зависят от ландшафтно-геохимических условий работ. В качестве примера можно привести значения k для одного из золоторудных месторождений северо-востока РФ, залегающего в интенсивно дислоцированных толщах среднего триаса, прорванных маломощными дайками кварцевых и кварц-полевошпатовых порфиров [1] (табл. 2).

Таблица 2

Сопоставление продуктивностей первичных и вторичных ореолов в главной рудной зоне месторождения

Ореолы	Au	As	Sb	Ag	Pb	Cu
Первичные	1,00	15 246	1 875	10,00	596,6	521,4
Вторичные	1,10	24 684	1 857,6	12,00	1 088,7	579,2
k	1,1	1,62	0,99	1,20	1,82	1,11

Доля забалансовых руд (α) для конкретных типов месторождений определяется в результате опытно-методических работ. При отсутствии таких данных для жильных золото-кварцевых и золото-серебряных месторождений можно принять $\alpha = 0,3$.

Чрезвычайно важным моментом при определении прогнозных ресурсов является оценка глубины их подсчета. Обычно она выбирается по геологическим данным, а при отсутствии таковых для золоторудных проявлений принимается равной 100 м. Однако при наличии в районе работ аналогичного, достаточно изученного в коренном залегании оруденения оценка глубины подсчета или, правильнее, уровня эрозионного среза успешно проводится по геохимическим данным. С этой целью на эталонном объекте определяется ряд геохимической зональности элементов-индикаторов первичных ореолов золотого оруденения, устанавливаемый чаще всего путем сравнения элементов по величине их показателей зональности, рассчитанных в аномальных сечениях на нескольких гипсометрических уровнях аномальной зоны, которые представляют собой отношение продуктивности ореола одного элемента к сумме продуктивностей ореолов всех элементов-индикаторов проявлений рудной формации в данном сечении. Ниже приведены ряды геохимической зональности элементов-индикаторов для некоторых типов золоторудных месторождений (снизу вверх):

— высокотемпературные (Be, W, Au, As¹, Ni, Co), Bi, Mo, Cu, Zn (Pb, Ag, As², Sb);

— среднетемпературные (Co, W, Be), Bi (Sn, Mo), Cu, Au, Zn, Pb, (Ag, Sb);

— низкотемпературные (W, Bi, Sn), Mo, (Cu, Zn), Pb, Au, (As, Sb), Ba, Hg.

На основе этих рядов определяются наиболее важные элементы — индикаторы зональности ореолов, используемые для оценки уровня эрозионного среза аномалии. Такими будут элементы, максимально удаленные друг от друга в рядах

зональности. В качестве критерия оценки уровня эрозионного среза геохимических аномалий используются коэффициенты зональности, представляющие собой отношение произведений или сумм средних содержаний или линейных продуктивностей элементов, имеющих максимальные значения показателей зональности соответственно в надрудных и подрудных частях рудных зон. Последующее сравнение его с аналогичным параметром, рассчитанным на эталонном объекте, позволит оценить уровень эрозионного среза аномальной зоны и, как следствие, глубину подсчета прогнозных ресурсов полезных ископаемых.

В последние годы появились работы, в том числе работы авторов статьи, в которых отмечается первостепенная роль для поисков скрытых эндогенных месторождений, включая золоторудные, литохимических методов с использованием в качестве поисковых индикаторов химических элементов, склонных к широкому рассеянию и образующих далеко проникающие ореолы. К таким элементам относятся йод, бром, хлор, ртуть, сурьма, мышьяк, бор, барий, часто серебро, щелочные элементы. Все они участвуют в эндогенном рудообразовании, обладают высокой подвижностью и входят в низкотемпературную ассоциацию элементов, характерную для фронтальных зон эндогенных ореолов рудных месторождений. Большинство из них в практике поисковой геохимии не используются.

Основной особенностью ореолов высокоподвижных элементов, установленной на всех месторождениях, где они были изучены, является их преимущественное и широкое развитие в надрудных горизонтах. Протяженность надрудных ореолов этих элементов намного превышает ореолы рудных элементов и их спутников. Имеется целый ряд примеров выявления скрытого оруденения по ореолам высокоподвижных элементов на поверхности при отсутствии позитивной информации по ореолам прямых элементов-индикаторов.

Особое место среди этих элементов занимает йод, ореолы которого на золоторудных месторождениях имеют максимальную надрудную протяженность. Высокая миграционная способность йода связана главным образом с его полным рассеянием в природе, что, в свою очередь, определяется его физико-химическими свойствами. Главное значение при этом имеет исключительно большой ионный радиус ($2,2 \cdot 10^{-10}$ м), практически полностью исключающий возможность изоморфного вхождения йода в кристаллические решетки других минералов, и низкий ионный потенциал (0,45 эВ), ограничивающий энергетические возможности при построении собственной кристаллической решетки. Ювенильные минералы йода неизвестны, все его природные соединения вадозные, возникают и существуют только в приповерхностных условиях. Основная форма его нахождения в природе — свободная, в виде йодид-иона в поровой и капиллярной влаге горных пород, что и обуславливает его высокие проникающие способности. Йод образует наиболее протяженные ореолы, мало зависящие от физико-химических свойств пород. Он возглавляет ряды зональности и проникает через литологические экраны, недоступные для других элементов. Наложенные ореолы йода фиксируют оруденение в скрыто-погребенном залегании под лессовыми отложениями, оползнями, моренами и т.д. при мощности аллохтона до 100 м.

Оценка эрозионного уровня аномалий (степени сохранности оруденения) по коэффициентам зональности, в числителях которых высокоподвижные элементы, отличается максимальной точностью вследствие их высокой контрастности для различных геохимических уровней.

Оценка масштаба прогнозируемого оруденения представляет собой одну из наиболее сложных задач оценки геохимических аномалий. Поэтому имеющиеся формулы должны применяться осторожно и в комплексе с другими критериями оценки. К числу таких критериев, в частности, могут относиться закономерная связь параметров рудных тел (мощность, содержание, продуктивность) и окаймляющих их первичных ореолов, увеличение размеров выноса некоторых элементов из зон рудолокализации по мере увеличения интенсивности (содержания, мощности) оруденения. Последняя особенность легла в основу расчета коэффициентов интенсивности, представляющих собой отношение произведений содержаний групп промышленно ценных элементов и элементов группы выноса. Сравнение данного параметра с аналогичным параметром эталонного объекта, рассчитанного на адекватном по уровню эрозионного среза сечении, позволяет приблизительно оценить масштаб оруденения. В целом, интерпретация геохимических аномалий должна вестись с обязательным учетом геолого-структурной обстановки и в комплексе с результатами исследования другими поисковыми методами.

Важным моментом ведения геохимических поисков является привлечение для оценки вторичных ореолов рассеяния критериев, основанных на особенностях состава и строения первичных ореолов золота и его элементов — индикаторов. С этой целью проводится сопряженное изучение первичных и вторичных ореолов. Там, где вторичные ореолы являются полными аналогами первичных ореолов, индикаторные параметры, используемые при оценке геохимических аномалий, одинаковы или близки по величине. Однако, учитывая возможность миграции золота и его элементов — спутников в приповерхностных условиях, этот вариант будет встречаться далеко не всегда. Поэтому при расчете методических критериев оценки используют химические элементы, стабильные в зоне гипергенеза. Стабильность их оценивается по коэффициенту соответствия k_c , определяемому как отношение средних содержаний элементов в аномальных породах на участке сопряженного опробования. Ранжируя элементы по возрастанию по k_c , получают ряды подвижности элементов в зоне гипергенеза. Ряд подвижности элементов на золоторудных месторождениях северо-востока РФ [1] имеет следующий вид (цифровые обозначения около каждого элемента обозначают коэффициент соответствия): $Ag_{0,49}$, $Sb_{0,79}$, $Cu_{1,12}$, $Au_{1,15}$, $As_{1,56}$, $Pb_{1,76}$.

На основе установленных рядов подвижности проводят выбор элементов-индикаторов, вторичные ореолы рассеяния которых в большей степени соответствуют первичным ореолам и поэтому являются более надежными индикаторами. Это элементы правой части ряда подвижности, устойчивые в гипергенных условиях и имеющие $k_c > 1$.

Описанные в статье методики рационального комплексирования поисковых методов и интерпретация и оценки геохимических аномалий значительно снижают стоимость работ и повышают их надежность и эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Григорян С.В., Морозов В.И.* Вторичные литохимические ореолы при поисках скрытого оруденения. — М.: Наука, 1985.
- [2] Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. — М.: Недра, 1983.
- [3] *Соловов А.П.* Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1985.

GEOCHEMICAL PROSPECTING OF ENDOGENIC GOLD DEPOSITS

N.N. Trofimov, A.I. Rychkov

Engineering faculty
Peoples' Friendship Russian University
Miklucho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

Rational complex of prospecting methods for endogenic gold deposits which are of different scale and significance is studied and distinguished. Prospecting aims and tasks at the geological and explorations legs as far as methods of geochemical investigations are offered. Special attention is paid to anomalies finding out and appreciation of its ore formation and economic value.