

В.Б. ЧЕКВАЙДЗЕ, С.А. МИЛЯЕВ, И.З. ИСАКОВИЧ, Б.С. ЗЕЛИКСОН

КОМПЛЕКСНЫЕ ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ И ОЦЕНКЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Рассмотрена методика разбраковки геохимических аномалий, основанная на комплексном анализе околорудных метасоматических, минералогических и геохимических (элементных и ионных) ореолов, как на эндогенном уровне, так и в зоне гипергенеза. Методика базируется на поисковых петрографо-минералого-геохимических моделях ожидаемых рудных объектов и разработанных на их основе комплексах поисковых и оценочных критериев. Приведены примеры исследований аномалий на золоторудных полях.

Общеизвестны трудности, возникающие при интерпретации и оценке многочисленных геохимических аномалий, выявляемых при площадных съемках по вторичным и первичным ореолам. Одним из возможных путей решения этой проблемы является расширение круга индикаторов оруденения с охватом различных уровней организации вещества — породного, минерального, элементного, что возможно при комплексном исследовании околорудных метасоматических, минералогических и геохимических ореолов. Преимущество данной методики — возможность суммирования «поисковых вкладов» трех (или четырех при учете ионных форм) независимых групп критериев с существенным повышением достоверности прогнозных оценок. Методика апробировалась на золоторудных полях Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, Центрально-Колымского региона, Северного и Восточного Казахстана, Узбекистана, Урала, Закарпатья и в ряде случаев способствовала выявлению новых рудоносных площадей и вскрытию ранее неизвестных рудных тел.

Базис рассматриваемой методики — поисковые многофакторные (петрографо-минералого-геохимические) модели рудных объектов, ожидаемых на исследуемой площади. Модели строятся на основе эталонных месторождений, а в случае отсутствия таковых или при выходе на новые площади — на основе уже разработанных обобщенных моделей формационных типов оруденения.

Модельные характеристики околорудных метасоматических ореолов следующие: формационный тип, минеральный состав главных пороодообразующих ассоциаций, стадийность (этапность), латеральная и вертикальная зональности, особенности проявления объектов различных рангов и масштабов.

Параметры минералогических ореолов включают характеристики нерудных образований и разнообразных проявлений рудной минерализации. Первые относятся к весьма типичным для обрамления золоторудных месторождений прожилковым ореолам: кварцевым, карбонатным, флюоритовым, баритовым, полевошпатовым, турмалиновым и т. д. Они образуют изолированные пятнистые скопления или выдержанные прожилковые систе-

мы, соответствующие направлениям разрывных нарушений, зон трещиноватости, контактов интрузивных и дайковых образований и других структурных элементов, нередко играющих и рудоконтролирующую роль.

Даже при простом визуальном сравнении состава и интенсивности развития прожилковых образований обычно выявляются их заметные различия в разных частях околорудного пространства. Такие различия еще явственнее выступают при систематическом картировании прожилковой минерализации с учетом ее разнообразных количественных характеристик. В итоге возможно получение ряда новых минералогических критериев, которые можно использовать на разных стадиях геолого-разведочных работ, способствуя выявлению в пределах рудных полей локальных участков с промышленным оруденением (в том числе и погребенным), а также вскрытию деталей внутренней структуры рудных зон.

Следует заметить, что генетическая природа прожилковых образований может быть самой разнообразной: диагенетической, автосоматической, регионально-метаморфической и т. д. В то же время выявляются определенные группы прожилков, тесно пространственно связанные с оруденением. Они формируются в процессе предрудных метасоматических изменений, сопровождают стадии рудообразования и завершают их в виде продуктов отложения минерального вещества из остаточных (отработанных) рудоносных растворов.

Помимо нерудной прожилковой минерализации в состав минералогических ореолов входят вкрапленные и прожилково-вкрапленные выделения рудных минералов: пирита, пирротина, халькопирита, сфалерита, галенита, арсенопирита, гематита и других образований эндогенной зоны, переходящих в условиях гипергенеза в гидроксиды железа, ярозит, скородит.

Ведущие параметры минералогических ореолов: минеральный состав, стадийность минералообразования, текстурно-структурные особенности минеральных агрегатов, кристалломорфологические особенности отдельных минералов, различные типоморфные характеристики минералов (цвет, ва-

риации в содержании основных и второстепенных компонентов и др.).

Параметры эндогенных геохимических ореолов следующие: элементный состав ореолов; геохимический спектр аномального поля [6]; коэффициент формационной принадлежности вида: $V_c = \frac{As \cdot Sb \cdot Pb}{Co \cdot W \cdot Mo}$;

коэффициент интенсивности оруденения K_u [1,4]; геохимические показатели вертикальной зональности, рассчитанные по программе «НЮ-2» [7]; ранжированные ряды поперечной зональности; линейные продуктивности ореолов (M_p); прогнозные ресурсы по геохимическим данным (Q_H) [5].

Следует заметить, что коэффициент формационной принадлежности V_c разработан на основе обобщения материалов по большому числу разнотипных золоторудных месторождений. Над чертой приводятся концентрации элементов, характерных для средне-низкотемпературного рудоотложения, под чертой — количества элементов высокотемпературной ассоциации. Выбранный коэффициент для золоторудных объектов характеризуется размахом более, чем в 2 млн. раз. При этом месторождения золотосеребряного типа характеризуются значениями V_c до $n \cdot 1000$, золотосульфидного типа — до $n \cdot 100$, а на объектах золотосульфидно-кварцевого и золотокварцевого типов интервал значений рассматриваемого показателя составляет $n \cdot 10 - n \cdot 10^{-3}$.

Коэффициент интенсивности оруденения (K_u), предложенный С.В. Григорьяном [1], также представляет собой отношение произведений содержаний (или продуктивностей) элементов, но над чертой обозначаются элементы, привносимые в рудном процессе, а под чертой — выносимые. Такого рода мультипликативные показатели в ряде случаев устойчиво коррелируют с запасами золота в рудных телах и рудоносных зонах.

Эндогенные индикаторы в зоне гипергенеза при модельных построениях выявляют при изучении сопряженных профилей, включающих детально откартированные и опробованные (по канавам, скважинам и т. д.) эндогенные минералого-геохимические ореолы и расположенные непосредственно над ними профили опробования рыхлых отложений по выработкам или поверхности (рис. 1).

В зоне гипергенеза околорудные метасоматические и минералогические ореолы выявляются и изучаются путем исследования обломочной фракции литохимических проб (1—3 или 2—3 мм) из рыхлого чехла. Обломки данной фракции цементируют (полистиролом или эпоксидной смолой) в брикет, из которого изготавливают шлифы и аншлифы. Брикеты-шлифы и брикеты-аншлифы включают не менее 10 обломков пород (обычно 20—30), что позволяет с высокой достоверностью картировать нижележащие зоны метасоматитов и минералогических ореолов при мощности элювиально-делювиального чехла до 8 м. По сопряженным профилям изучаются также и вторичные ореолы рассеяния элементов.

При поисковых работах в зоне гипергенеза весьма перспективен ионно-потенциметрический метод, основанный на применении ионно-селективных электродов для широкого круга ионов —

NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , NO_3^- , J^- , Cl^- , Bg^- и др., а также pH и Eh.

Применение метода основано на существовании в верхних (почвенных) горизонтах элювия—делювия слабых солевых ореолов, связанных с погребенной эндогенной минерализацией. Происхождением эти ореолы обязаны в первую очередь биогенной и сорбционной аккумуляции химических элементов в почвенном слое. Обменные химические реакции, гидратация и сорбция ведут к «закреплению» солевого ореола, придавая ему свойства устойчивого геологического образования. При смачивании исходной пробы водой часть элементов из солевого ореола переходит в раствор и может быть проанализирована.

Исследования позволили установить устойчивые связи определенных групп ионов и потенциалов с определенными типами золотого оруденения. Так, для золотокварцевого и золотосульфидного оруденения в углеродистых терригенных толщах наиболее характерны аномалии pH/Eh, для вулканогенных золотосеребряных месторождений — аномалии NH_4^+ , для объектов золотосульфидно-кварцевой формации в интрузивных и метаморфических породах — K^+ , Na^+ , NH_4^+ , причем положение рудных тел наиболее отчетливо опреде-

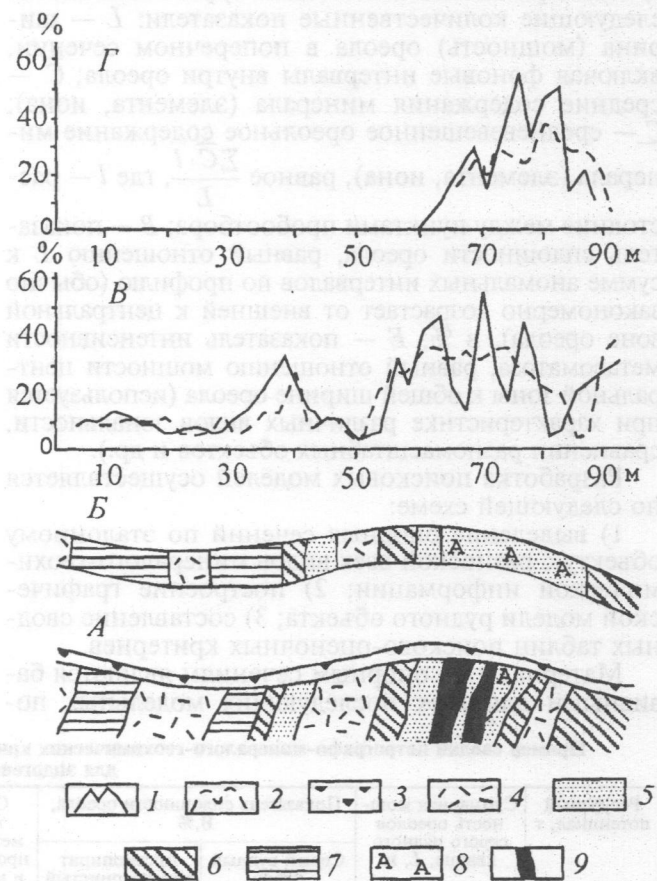


Рис. 1. Эндогенные околорудные метасоматические ореолы в зоне гипергенеза, Наталкинское золоторудное месторождение, разведочная линия +80: А — вмещающие породы и эндогенная минерализация; В — то же в виде обломков в рыхлом чехле; графики распределения по профилю: В — серицитизации, Г — альбитизации; 1, 2 — ореолы на графиках: 1 — эндогенный, 2 — гипергенный; 3 — рыхлые образования; 4 — рудовмещающие породы; 5—7 — серицитизация: 5 — интенсивная, 6 — умеренная, 7 — слабая; 8 — альбитизация; 9 — рудная зона

ляется с помощью мультипликативного показателя $\frac{K^+ \cdot NH_4^+}{(Na^+)^2}$.

Особое значение ионно-потенциметрический метод имеет при поисках в «закрытых» районах при большой мощности рыхлого (в том числе и аллохтонного) чехла, когда остальные минералого-геохимические методы оказываются не эффективными.

В некоторых случаях (в частности, на ряде объектов золотоуглеродистой формации) ионно-потенциметрические ореолы оконтуривают с поверхности рудные тела в близком соответствии с данными по первичным и вторичным геохимическим ореолам. На ряде месторождений вулканогенного золотосеребряного типа установлена тесная корреляционная зависимость запасов металлов в рудных телах от содержания аммония во вторичных ореолах. Эти и другие данные позволяют в определенных условиях проводить разбраковку геохимических аномалий и участков рудопроявлений на основе только ионно-потенциметрических съемок (без проведения минералого-геохимического опробования).

Для параметров комплексных ореолов, используемых при составлении моделей, рассчитываются следующие количественные показатели: L — ширина (мощность) ореола в поперечном сечении, включая фоновые интервалы внутри ореола; \bar{C} — средние содержания минерала (элемента, иона); \underline{C} — средневзвешенное ореольное содержание минерала (элемента, иона), равно $\frac{\sum C \cdot l}{L}$, где l — расстояние между пунктами пробоотбора; B — показатель сплошности ореола, равный отношению L к сумме аномальных интервалов по профилю (обычно закономерно возрастает от внешней к центральной зоне ореола), в %; E — показатель интенсивности метасоматоза, равный отношению мощности центральной зоны к общей ширине ореола (используется при характеристике различных видов зональности, сравнении разномасштабных объектов и др.).

Разработка поисковых моделей осуществляется по следующей схеме:

1) выделение опорных сечений по эталонному объекту с разноской всех видов минералого-геохимической информации; 2) построение графической модели рудного объекта; 3) составление сводных таблиц поисково-оценочных критериев.

Материалы по опорным сечениям являются базисными для всех последующих модельных по-

строений. Именно по таким материалам ореольное пространство подразделяется на серии латеральных и вертикальных зон, выявляются корреляционные признаки, оценивается их относительная информативность, намечаются массивы для математических расчетов количественных характеристик ореолов (L , C , B и др.).

Графическая модель эталонного объекта отражает наиболее общие черты отдельных групп параметров (околорудных метасоматических, минералогических, геохимических) с той или иной степенью абстрагирования от конкретных значений. В большинстве случаев графическая модель носит иллюстративный характер, хотя по целому ряду позиций она представляется весьма важной для восприятия и целенаправленного применения поисково-оценочных критериев.

Обычно для составления модели привлекается наиболее изученный разрез через месторождение (при необходимости возможно и дополнение планами поверхности и погоризонтными). На этот разрез выносятся наиболее типичные параметры каждого вида ореолов с вариациями в зависимости от положения в латеральной и вертикальной зональности. Применительно к околорудным метасоматическим параметрам в качестве модельных характеристик обычно используются группы измененных пород, обладающих индикационными свойствами по отношению к различным зонам. Аналогичным образом выбираются определенные ассоциации минералов и элементов. Восстанавливаются данные по эродированной части месторождения с отображением реальных или предполагаемых надрудных продуктов. Примеры графических моделей представлены в [8, 9].

Комплект таблиц поисково-оценочных критериев является основным инструментом при переходе к интерпретации и оценке аномалий. При этом преследуется достижение следующих целей: а) идентификация ожидаемого типа оруденения; б) установление ранга ожидаемого рудного объекта; в) приближение к местам рудолокализации по латерали; г) оценки уровня эрозионного среза и направления приближения к рудному объекту на глубине; д) оценка масштаба оруденения. Последние три позиции могут быть дифференцированы в зависимости от ранга рудного объекта (месторождения, рудного тела и т.д.). Указанный перечень табличных материалов составляется отдельно для эндогенной и гипергенной обстановок (таблица).

Разновидность поисковой модели — математическая модель, представляющая собой обобщенное

Пример сводки петрографо-минералого-геохимических критериев количественной оценки масштаба золотого оруденения для эндогенной обстановки

Ресурсный потенциал, т	Суммарная мощность ореолов серого рудного кварца, L , м	Показатель сплошности ореола, B , %		Суммарная мощность метасоматитов промежуточной и центральной зон, м	$Ku = \frac{Au \cdot As \cdot Bi}{Co \cdot V \cdot Mn}$	Линейная продуктивность, м г/т		Средняя мощность ореолов Au, м
		Серый рудный кварц	Арсенопирит тонкозернистый «порфиробластический»			Au	Bi	
100	>250	>70	>80	>300	> n	>300	>500	>200
100–50	250–120	70–40	80–40	300–200	$n - n \cdot 10^{-1}$	300–200	500–200	200–100
50–10	120–25	40–10	40–10	200–50	$n \cdot 10^{-2} - n \cdot 10^{-3}$	200–50	300–25	100–50
10–1	25–5	10–1	10–1	50–5	$n \cdot 10^{-4} - n \cdot 10^{-6}$	50–5	25–2	50–5

Примечание. Ku — коэффициент интенсивности оруденения.

пространственно упорядоченное трехмерное изображение содержаний типоморфных метасоматитов, минералов и надфоновых концентраций рудных элементов. В основе математических моделей лежат данные детального изучения эталонных месторождений, хорошо вскрытых по латерали и на глубину. Методика и примеры их построения описаны в [2].

Здесь отметим, что модели данного вида позволяют получить более точную количественную оценку местоположения скрытого оруденения по латерали и вертикали (в пределах ореольного пространства), уровня эрозионного среза аномалий и прогнозных ресурсов выявляемого рудного объекта.

Обращаясь к характеристике работ по интерпретации и оценке геохимических аномалий, необходимо отметить, что рассматриваемая методика предполагает как последовательное укрупнение масштаба поисковых работ на аномалиях (от 1:50 000 к 1:10 000 и крупнее), так и разработку аномалий, выявленных при различных крупномасштабных съемках по вторичным и первичным ореолам.

Схема работ по первому из названных вариантов приведена на рис. 2. В результате площадной литохимической съемки по вторичным ореолам устанавливаются аномалии, отвечающие рангу потенциальных рудных полей и крупных месторождений. Первые дифференцируются на отдельные аномальные участки, соответствующие месторождениям и являющиеся исходными объектами для последующих исследований.

На таких объектах осуществляется комплексное минералого-геохимическое опробование по 2–3 профилям вкостр господствующего простирания рудоконтролирующих геологических структур. По результатам ионно-потенциометрического метода в полевых условиях возможно оконтуривание рудоносного участка с выявлением деталей его внутреннего строения, предварительное определение генетической природы аномалии. При достижении положительных результатов возможен переход к геохимическим съемкам масштаба 1:10 000. При отсутствии таковых или в случае неопределенных данных используются материалы изучения

трех видов ореолов в зоне гипергенеза (околорудных метасоматических, минералогических и геохимических) и последующее сопоставление с моделью эталонного объекта.

По результатам комплексного изучения аномалии производится ее интерпретация, разработка и оценка с заключением о степени перспективности и необходимости вскрытия горными выработками и скважинами. На данном этапе может возникнуть необходимость уточнения местоположения потенциальных рудоносных зон и перед вскрытием аномалии производится литохимическая съемка участка в масштабе 1:10 000–1:5 000.

После получения данных проходки горных выработок и скважин в силу вступает комплекс индикаторов эндогенного оруденения и соответствующие поисковые модели объектов в ранге рудных

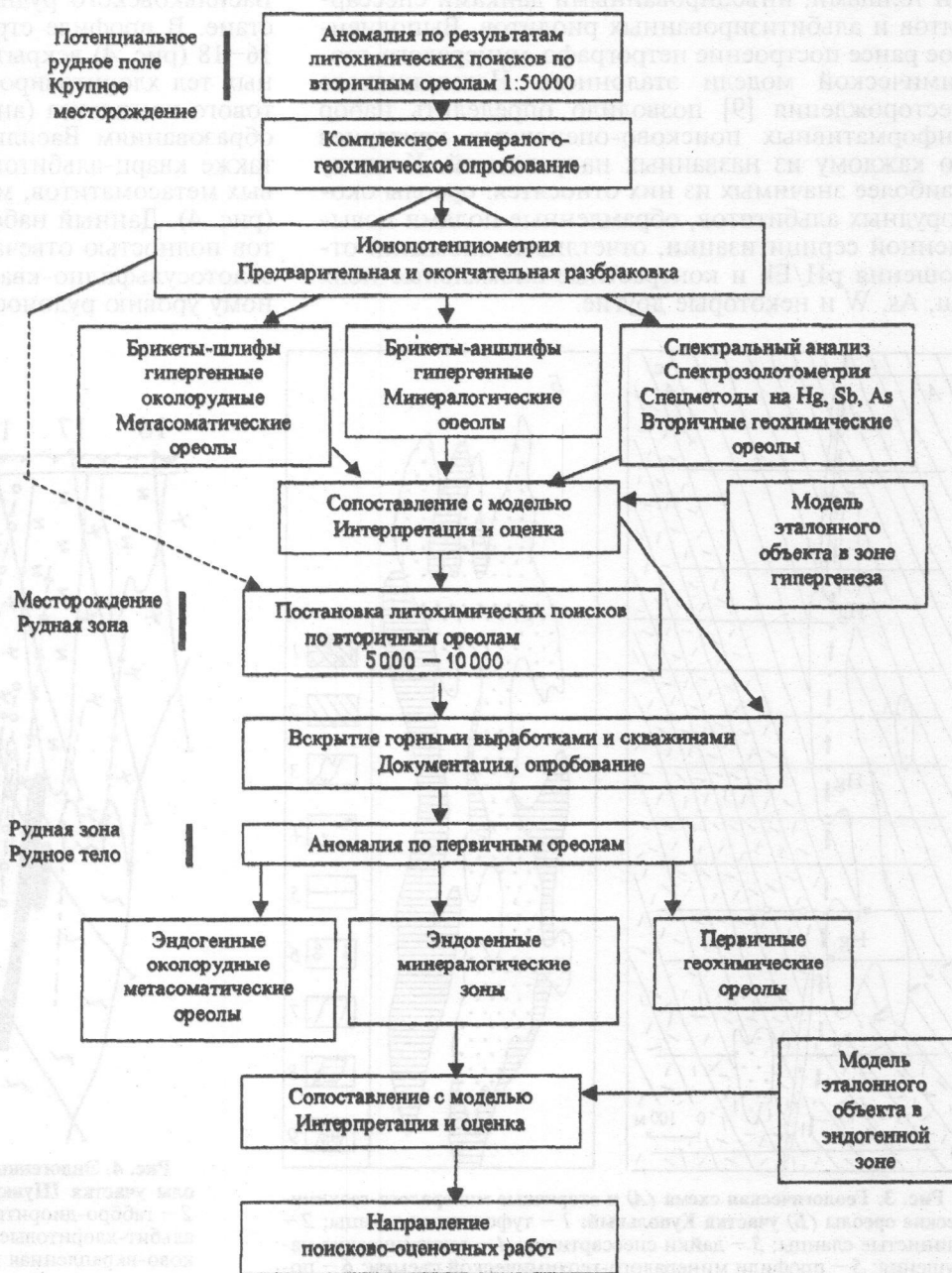


Рис. 2. Схема применения комплексной петрографо-минералого-геохимической методики при интерпретации и оценке геохимических аномалий

зон и рудных тел. Итог исследования аномалий — подготовка объекта к стадии оценочных работ.

Помимо данного варианта применения методики, при котором последовательно укрупняется масштаб работ, возможна отработка аномальных полей, выявленных при любых видах крупномасштабных съемок (крупнее 1:50 000) с соответствующей ориентацией на выявление рудного объекта определенного ранга и применением необходимого комплекса критериев согласно позиции исследуемой аномалии в приведенной схеме (рис. 2).

Рассмотрим некоторые примеры комплексных исследований на аномальных участках.

Участок Купольный расположен в пределах Наталкинского рудного поля в Центрально-Колымском регионе. Вмещающие породы на участке представлены туфо-терригенными верхнепермскими толщами, инъецированными дайками спессартитов и альбитизированных риолитов. Выполненное ранее построение петрографо-минералого-геохимической модели эталонного Наталкинского месторождения [9] позволило определить набор информативных поисково-оценочных критериев по каждому из названных направлений. К числу наиболее значимых из них относятся: ореолы оклорудных альбититов, обрамленные полями повышенной серицитизации, отчетливые аномалии отношения pH/Eh и контрастные аномальные поля Au, As, W и некоторые другие.

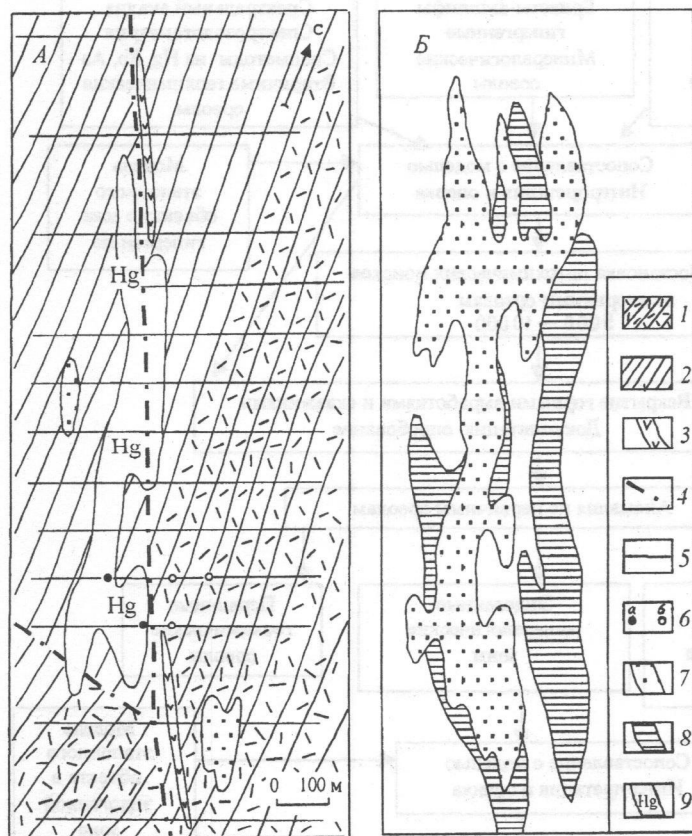


Рис. 3. Геологическая схема (А) и вторичные минералого-геохимические ореолы (Б) участка Купольный: 1 — туфогенные сланцы; 2 — глинистые сланцы; 3 — дайки спессартитов; 4 — тектонические нарушения; 5 — профили минералого-геохимической съемки; 6 — поисковые скважины: а — с промышленными рудными подсечениями; б — с эндогенными ореолами; 7 — аномалии показателя pH/Eh ; 8 — вторичные ореолы альбитовых метасоматитов; 9 — ореолы ртути

Участок Купольный выявлен нами в процессе мелкомасштабных рекогносцировочных работ по появлению в единичных пробах с поверхности аномальных значений рудогенных элементов в сочетании с наличием обломков альбитовых метасоматитов. В дальнейшем на его площади проведена ионно-потенциометрическая съемка масштаба 1:10 000 и по контуру показателя pH/Eh предварительно определены границы потенциально рудоносной площади. Последующая постановка полного комплекса методов позволила наметить перспективные на обнаружение рудных тел наталкинского типа аномальные зоны (рис. 3) и представить обоснование для проведения буровых работ. Вновь пробуренными скважинами на Купольном участке вскрыты промышленные золоторудные тела.

Участок Шункурколь приурочен к южной части Васильковского рудного поля в Северном Казахстане. В профиле структурно-поисковых скважин 16–18 (рис. 4) вскрыта серия линзо- и жилкообразных тел хлоритизированных пород габбро-диоритового комплекса (аналогичного рудовмещающим образованиям Васильковского месторождения), а также кварц-альбитовых и хлорит-кварц-альбитовых метасоматитов, мощностью от 1–2 до 10–15 м (рис. 4). Данный набор метасоматических продуктов полностью отвечает, согласно модели эталона золотосульфидно-кварцевого оруденения, надрудному уровню рудоносных структур [8].

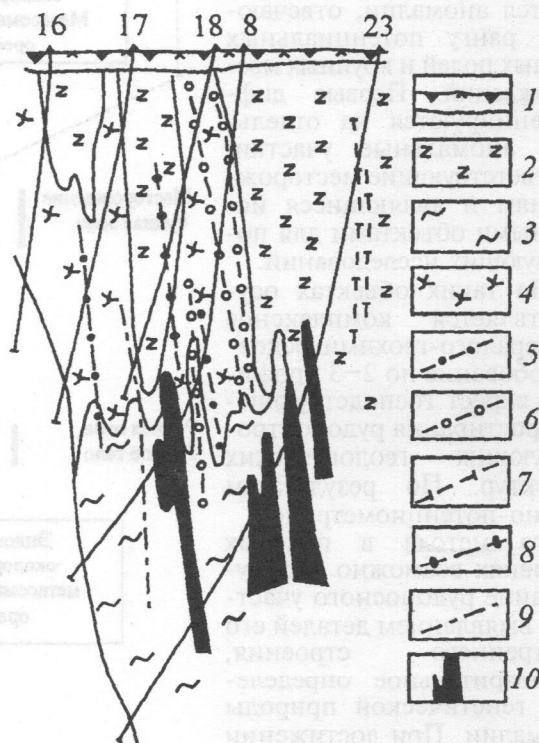


Рис. 4. Эндогенные минералого-геохимические ореолы участка Шункурколь: 1 — рыхлые отложения; 2 — габбро-диориты; 3 — лиственито-березиты; 4 — альбит-хлоритовые метасоматиты; 5–9 — прожилково-вкрапленная минерализация: 5 — серого «рудного» кварца, 6 — молочно-белого кварца, 7 — турмалина, 8 — флюорита, 9 — пирита; 10 — ореолы Au, As, Sb с рудными подсечениями

Таким образом, на участке была выявлена «околорудная метасоматическая» аномалия, сопровождающаяся ореолом прожилков серого кварца, пирита, флюорита и других минералов, типичных для околорудного ореола прожилковой минерализации. Небезынтересно отметить, что геохимические аномалии ни в одной из указанных скважин не были зафиксированы. Аномалии появились лишь на более значительных глубинах.

Поскольку под альбит-хлоритовыми метасоматитами (зон осаждения оснований) в соответствии с моделью уместно ожидать вскрытие рудовмещающих лиственито-березитов, была пробурена скважина 8, показавшая наличие на глубинах 650–850 м серии маломощных (3–5 м) зон выщелачивания васильковского типа (рис. 4). По керну скважины установлены геохимические ореолы Au, As, Ba, V. Следующая скважина 23, заданная для вскрытия зон изменения на нижележащих горизонтах, выявила мощный раздув лиственито-березитов на глубинах 700–1100 м и наличие многочисленных интервалов с приближающимися к промышленным содержаниями Au. Участок рассматривается как весьма перспективный на обнаружение скрытого месторождения золотосульфидно-кварцевого типа.

В заключение отметим преимущества рассматриваемой комплексной методики по сравнению с традиционными приемами разбраковки геохимических аномалий: повышается достоверность прогнозных оценок за счет суммирования данных, полученных различными методами; появляется возможность взаимопроверки результатов, полученных при использовании четырех независимых групп критериев, относящихся соответственно к породному, минеральному, элементному и ионному уровням организации вещества; осуществляется опережающая оценка аномальной площади непосредственно в поле путем использования ионо-потенциометрического метода, особенно эффективного в условиях закрытых территорий с развитыми резко ослабленными наложенными ореолами; производится отбраковка ландшафтных, техногенных и иных «ложных» геохимических аномалий, для которых не характерны вторичные метасоматические и минералогические ореолы.

Дальнейшее развитие комплексной методики может быть направлено на расширение круга высокоэффективных индикаторов оруденения в пределах каждой из используемых групп критериев, а также на совершенствование методов математической обработки больших массивов информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорян С.В. Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке рудных месторождений. М.: Недра, 1990. 408 с.
2. Миляев С.А., Чекваидзе В.Б., Исакович И.З. Количественная минералого-геохимическая модель Васильковского золоторудного месторождения // Отечественная геология. 1994. № 7. С. 36–42.
3. Многофакторные поисковые модели золоторудных месторождений / М.М. Константинов, В.А. Нарсеев. М.: ЦНИГРИ, 1989. 119 с.
4. Овчинников Л.Н. Прикладная геохимия. М.: Недра, 1990. 248 с.
5. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1985. 94 с.
6. Соловов А.П., Матвеев А.А. Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.: Изд-во МГУ, 1985.
7. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / Под ред. А.П. Соловова. М.: Недра, 1990. 335 с.
8. Чекваидзе В.Б. Поисковая минералого-геохимическая модель золото-сульфидно-кварцевого оруденения // Сов. геология. 1987. № 1. С. 121–126.
9. Чекваидзе В.Б., Исакович И.З., Миляев С.А. Минералого-геохимические ореолы Наталкинского золоторудного месторождения // Руды и металлы. 1999. № 6. С. 43–50.

ЦНИГРИ

Рецензент — А.Н. Роков