

УДК 552.321.1:550

## ВЫДЕЛЕНИЕ ОРЕОЛОВ РУДНЫХ СТАДИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОХИМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

**С.В. Ефремов<sup>1</sup>**

Институт геохимии СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Одной из главных задач поисковой геохимии является выделение геологического объекта на площади поисковых работ с оптимизацией финансовых затрат на горные и буровые работы. Одним из таких методов оптимизации является выделение ореолов продуктивной стадии минерализации.

В статье на примере вновь обнаруженного рудного объекта Au-Cu-Mo формации проиллюстрирован метод картирования минерализованных зон различных стадий рудообразования, включая продуктивную. Это значительно снижает площади поисковых геологических работ и в совокупности с геолого-тектоническими и геофизическими исследованиями позволяет более целенаправленно изучать глубинное строение рудного объекта.

В основу метода положен расчет ассоциаций элементов методом главных компонент и соотнесение полученных ассоциаций с реальными геологическими телами, образовавшимися при воздействии экзогенных или эндогенных процессов.

Соотнесение элементной ассоциации с каким-либо геологическим процессом обычно происходит на основе вводных данных о предполагаемом типе рудного объекта, геологическом строении территории, что позволяет применять справочные данные о геохимической характеристике горных пород и стадийности эндогенного процесса, используя выделенные минеральные ассоциации.

В нашем случае была использована модель эволюции гидротермальной системы, связанной с остывающим гранитоидным магматическим очагом. На основании ассоциаций минералов и концентрирующихся в них элементов было выполнено генетическое соотнесение элементных ассоциаций стадиям рудоотложения. Ореолы этих стадий были нанесены на геохимическую карту.

Полученная информация позволила оконтурить рудный объект, оценить величину эрозионного среза и высказать соображения по поводу его экономических перспектив.

*Ключевые слова:* геохимические ореолы; стадии рудоотложения.

## IDENTIFICATION OF ORE MINERALIZATION STAGE HALOS BY GEOCHEMICAL SURVEY RESULTS

**S.V. Efremov**

Institute of Geochemistry SB RAS, 1a Favorsky St., Irkutsk, Russia, 664033.

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

One of the main tasks of exploration geochemistry is identification of geological objects in the prospecting area with financial costs optimization for mining and drilling operations. Identification of the halos of productive stage of mineralization is one of the optimization methods.

The article on the example of a newly discovered ore object of Au-Cu-Mo formation illustrates the method of mapping mineralized zones of different stages of mineralization, including a productive one. The method allows to reduce the area of geological prospecting considerably and, together with geological, tectonic and geophysical studies provides a targeted study of the ore object deep structure.

The method is based on element association calculation by the principal component analysis and correlation of the obtained associations with real geological bodies formed under the influence of either exogenous or endogenous processes.

Usually the association of elements is compared with a geological process on the basis of input data on the estimated type of an ore object and geological structure of the territory that allows to use the reference data on the geochemical characteristic of rocks and stages of the endogenous process using identified mineral associations.

---

<sup>1</sup>Ефремов Сергей Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии СО РАН, зав. кафедрой геологии и геохимии полезных ископаемых ИРНИТУ, тел.: (3952) 429935, e-mail: esv@igc.irk.ru

Efremov Sergey, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Institute of Geochemistry SB RAS, Head of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals INRTU, tel.: (3952) 429935, e-mail: esv@igc.irk.ru

We have used the model of hydrothermal system evolution associated with the cooling granitoid magma chamber. On the basis of mineral associations and a list of elements concentrated in them we have performed a genetic correlation of the elemental associations and the stages of ore deposition. Halos of these stages have been plotted on a geochemical map.

The obtained information has helped to delineate the ore object, estimate the size of erosion zone and comment on its economic prospects.

*Keywords: geochemical halos; stages of ore deposition.*

**Введение.** Одной из главных задач поисковой геохимии является выделение геологического объекта на площади поисковых работ и оптимизация финансовых затрат на горные и буровые работы. Одним из таких методов оптимизации является выделение ореолов продуктивной стадии минерализации.

В большинстве случаев геохимическая аномалия, выделенная на площади работ, является полигенной и полихронной, образуется при сочетании ряда эндогенных и экзогенных процессов. При использовании обычных методов интерпретации геохимических данных, рекомендованных многочисленными справочниками и инструкциями, выделение аномалий, связанных с разными геологическими процессами, невозможно. Для выявления высокоперспективного рудного объекта приходится заверять каждую контрастную геохимическую аномалию, что приводит к существенному увеличению материальных издержек.

В этой статье рассмотрен один из методов выделения ореолов продуктивной стадии минерализации на примере гидротермального рудного объекта Au-Mo-Cu рудной формации.

**Методические подходы.** В основе метода лежит представление о том, что геохимическую характеристику образца определяет ассоциация слагающих его минералов. Эта ассоциация имеет относительное постоянство в пределах какого-либо геологического объекта (рудного тела, гранитоидного массива и т.д.) и может быть «вычленена» по корреляционным связям между химическими элементами, слагающими минералы ассоциации.

Основываясь на этом подходе, с помощью геохимических данных мы мо-

жем закартировать площадное распространение ассоциаций элементов, сопоставив их с ассоциациями минералов той или иной стадии рудоотложения.

Наиболее сложным в этом алгоритме является соотнесение элементной ассоциации с той или иной стадией минералообразования. Чтобы корректно провести генетическое соотнесение элементных ассоциаций, необходимо обладать знаниями по геохимии горных пород различного генезиса (магматического, осадочного и т.д.), знать химические составы минералов и концентрирующиеся в них элементы-примеси, иметь представление о стадийности эндогенного процесса, с которым может быть связана рудная минерализация.

Для генетического соотнесения обычно используются вводные данные о предполагаемом типе рудного объекта, геологическом строении территории, что позволяет применять справочные данные о геохимической характеристике горных пород, слагающих участок работ, и стадийности эндогенного процесса, используя выделенные минеральные ассоциации.

В нашем случае, учитывая имеющиеся данные, можно использовать модель эволюции гидротермальной системы, связанной с остывающим гранитоидным магматическим очагом [2]. Модель включает следующие стадии: магматическую (геохимическая характеристика гранитоидов); пневматолитовую (щелочной метасоматоз, грейзенизация); гидротермальную (высоко-, низко- и среднетемпературную). Ассоциации минералов, образование которых свойственно каждой стадии, даны в табл. 1 (по [2]). Список элементов, слагающих минералы и концентрирующиеся в них элементы-примеси, приведен в табл. 2 (по [1]).

## Стадийность процесса минералообразования

Этап	Стадия минералообразования	Главные минералы	Второстепенные минералы
Магматический	Основные породы	Оливин, пироксен, оксиды Fe, Ni, Cr	Магнетит, титаномагнетит, пирит, петландит, халькопирит
	Кислые породы	Кварц, полевые шпаты, слюды	Апатит, ортит, циркон, сфен, монацит, ксенотим
	Щелочные породы	Фельдшпатоиды, щелочные пироксены, амфиболы, магнезиальные слюды	Апатит, сфен, рутил, тантало-ниобаты, минералы редких земель
Пневматолитовый	Щелочной метасоматоз	Альбит, ортоклаз, биотит	Сфен, ортит, апатит, монацит, берилл, турмалин, кварц, арсенопирит, пирит, сфалерит, касситерит, молибденит, вольфрамит
	Кислотный метасоматоз (грейзенизация)	Кварц, мусковит,	
Гидротермальный	Касситерит-кварцевая вольфрамит-кварцевая молибденит-кварцевая	Кварц, касситерит, вольфрамит, молибденит	Турмалин, флюорит, топаз, мусковит, арсенопирит, пирит, халькопирит, сфалерит, магнетит
	Сфалерит-пирротиновая	Пирротин, сфалерит, халькопирит,	Кварц, хлорит, серицит, арсенопирит
	Пирит-карбонатная	Сидерит, пирит,	Магнетит, шеелит, пирротин, халькопирит, станин, сфен, галенит
	Карбонатно-сульфидная	Марказит, кальцит	Сидерит, халькопирит, сфалерит, пирротин, арсенопирит, галенит
	Галенит-сульфоантимонитовая	Кальцит, кварц, галенит, тетраэдрит, буланжерит, джемсонит	Теллуриды и селениды металлов.

## Химические элементы, входящие в состав минерала, и элементы-примеси

Минерал	Элемент
Альбит	Na, Sr
Апатит	P, Sr, F, Ce, Y
Берилл	Be, Na, K, Cs, Li
Биотит	K, Ba, Rb, Cs, F, Cl, Nb, Sn, Mo
Вольфрамит	W, Nb, Ta, Sc
Галенит	Pb, Ag, Zn
Ильменит	Ti, Fe, V
Кальцит	Sr
Касситерит	Sn
Ксенотим	Y, P
Магнетит	Fe, Ti, V, Cr
Молибденит	Mo, Re
Монацит	Ce, La, Y, Th, P
Мусковит	K, Ba, Rb, Cs, F, Mo
Ортоклаз	K, Ba, Rb, Cs, Pb, U, Mo
Пирит	Fe, Co, Ni
Пирротин	Fe, Ni, Co
Рутил	Ti, Nb, Ta, Zr, Hf
Сфалерит	Zn, Cd, Bi, Pb
Сфен	Ti, Zn, Sn
Топаз	F
Турмалин	B
Флюорит	P, F
Халькопирит	Fe, Cu

Используя эти данные, вполне возможно выполнить генетическое соотношение элементных ассоциаций с тем или иным геологическим процессом, стадиями его проявления. Построив карту распределения элементных ассоциаций, можно генетически классифицировать геохимические ореолы и легко выделить образования интересующей нас стадии рудоотложения.

Для расчета ассоциаций элементов использовался метод главных компонент. В основе метода лежит выделение факторов, влияющих на суммарную дисперсию в выборке. Ранжирование факторов осуществляется по величине вклада в суммарную дисперсию: чем больше

вклад, тем больше влияние. Число выделяемых факторов обычно определяется величиной вклада в суммарную дисперсию, в нашем случае он был ограничен 1%.

Теоретически каждый фактор может быть сопоставлен с тем или иным геологическим процессом, вносящим свой вклад в дисперсию. Для идентификации процесса используется ассоциация элементов, характеризующих каждый фактор. Для выделения факторов и расчета факторных нагрузок была использована корреляционная матрица, рассчитанная по стандартизированной выборке. Результаты генетического сопоставления приведены в табл. 3.

## Ассоциации элементов

Фактор	Генетическая интерпретация	Ассоциации элементов															
1	Вариации составов горных пород	SiO <sub>2</sub>	Ba	K <sub>2</sub> O	Pb	As	Be	Au	MnO	Zr	Mo						
		0,95	0,72	0,69	0,56	0,46	0,29	0,2	0,12	0,11	0,1						
		FeO	TiO <sub>2</sub>	V	CaO	Sc	Sr	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ni	Co	Y	Zn	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nb	Li	Se
		-0,96	-0,95	-0,95	-0,93	-0,92	-0,87	-0,87	-0,86	-0,86	-0,8	-0,8	-0,78	-0,63	-0,54	-0,25	-0,24
2	Пневматолитовая золото-мышьяковистая (золото + арсенопирит)	S	Cd	Au	As												
		0,58	0,44	0,41	0,24												
		Mo	MnO	Se	Li	Sb											
		-0,32	-0,29	-0,26	-0,12	-0,11											
3	Гидротермальная 1 высокотемпературная Cu-Mo (сульфиды меди, молибдена, железа)	Cu	S	Mo	Co	FeO											
		0,21	0,17	0,15	0,1	0,1											
		Te	Sb	Li	Be	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ba	As	Sr	Cd	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Se	Zn		
		-0,65	-0,58	-0,49	-0,32	-0,31	-0,31	-0,28	-0,24	-0,18	-0,12	-0,12	-0,11	-0,1	-0,1		
4	Гидротермальная 2 низкотемпературная (сульфосоли и теллуриды меди с золотом)	Mo	Te	Cu	Au	Sb											
		0,61	0,26	0,22	0,2	0,19											
		Pb	As	Co	Na <sub>2</sub> O	Li	Se	MnO									
		-0,34	-0,24	-0,22	-0,2	-0,17	-0,15	-0,13									

Примечание. В числителе (положительные значения) даны элементы «привноса», в знаменателе (отрицательные значения) – элементы «выноса».

**Геологическое строение и интерпретация геохимических данных.** Геологическое строение района работ определяется переслаиванием терригенно-осадочной и вулканогенной пачек горных пород раннепалеозойского возраста, имеющих северо-восточное простирание и моноклиналиное залегание с падением на северо-запад. Контакты вулканических и осадочных пород в большинстве случаев сорванные, тектонические с падением согласно залеганию геологических тел.

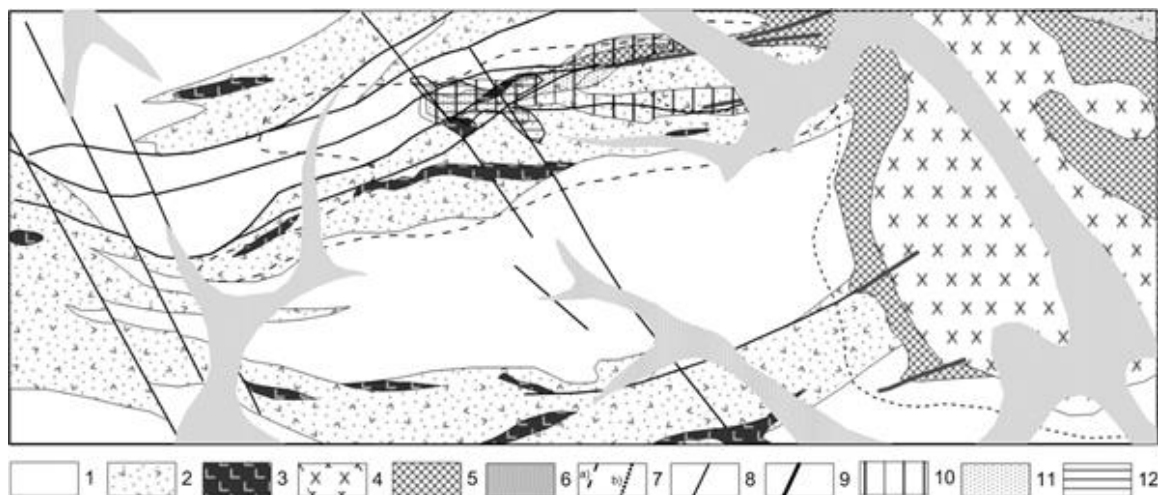
В восточной части вулканогенные и осадочные породы прорваны интрузией гранодиоритов раннемелового возраста. Вокруг интрузии отмечается зона грейзенизации и довольно обширный контактовый ореол. В пределах участка выделяется зона интенсивной пропилизации, развитая как в вулканических, так и в осадочных породах, что свидетельствует о ее наложенном характере.

На площади работ проводилась геохимическая съемка по вторичным

ореолам с размером ячейки опробования 50×100 м. Отобранные пробы были проанализированы методом ICP-AES на 45 элементов. Концентрации золота определялись атомно-адсорбционным методом.

Для построения полиэлементной геохимической карты было выбрано три элементных ассоциации, характеризующих разные стадии рудообразования: гидротермальная высокотемпературная (Cu-Mo) характеризует продуктивную стадию рудного объекта, пневматолитовая (Au-As) характеризует фронтальную зону рудного объекта, гидротермальная низкотемпературная (сульфосольная с Au) трассирует долгоживущие проницаемые зоны. Контрастные аномалии этих стадий рудоотложения нанесены на геологическую карту (рисунок).

Как видно на рисунке, ореолы продуктивной стадии минерализации выделяются в виде линейных зон, контролируемых разрывными нарушениями. Наиболее контрастные аномалии



**Геологическая карта участка работ с наложенными геохимическими ореолами различных стадий рудоотложения:**

1 – терригенные породы раннего палеозоя; 2, 3 – породы раннего палеозоя: 2 – вулканогенно-осадочные, 3 – интрузивные (габбро-диабазы); 4 – гранодиориты ( $J_1$ ); 5 – грейзены; 6 – четвертичные отложения; 7 – границы: а – пропилиты, б – роговики; 8 – разрывные нарушения; 9 – дайки аплитов; 10 – контрастные геохимические аномалии высокотемпературной гидротермальной продуктивной стадии минералообразования (Cu-Mo); 11 – контрастные геохимические аномалии низкотемпературной гидротермальной стадии рудообразования (сульфосоли и теллуриды меди с золотом); 12 – контрастные геохимические аномалии пневматолитовой стадии минералообразования (золото-мышьяковистая)

приурочены к северной линейной зоне, начинающейся от линейного тела грейзенов. К этой же зоне приурочен комплексный ореол, «трассирующий» распространение низкотемпературной гидротермальной стадии минерализации.

Подобное телескопирование геохимических ореолов, сопоставляемых с различными стадиями рудоотложения, обычно фиксирует наиболее проницаемые зоны и свидетельствует о высокой степени эндогенных преобразований в пределах рудного поля и перспективности рудного объекта. Эти аномалии фиксируют зоны разрушения первичных ореолов рудных тел гидротермального рудного объекта.

Ореол золото-мышьяковистой ассоциации расположен в западной части этой зоны, на пересечении с двумя разломами северо-западного простирания. Он фиксирует зону рассеянной минерализации, представленную золотоносным арсенопиритом, расположенным во фронтальной части первичного ореола рассеяния рудного объекта.

Появление ореола этой стадии рудоотложения позволяет оценить уровень эрозионного среза рудного объекта. Этот

уровень колеблется от рудного в пределах линейного тела грейзенов до незначительного в западной части зоны.

Все сделанные предположения были проверены в результате горных и буровых работ, выполненных при заверке комплексных геохимических аномалий. В восточной части зоны поверхностной горной выработкой и буровыми скважинами вскрыто рудное тело, обильная сульфидная минерализация вскрыта канавами и буровыми скважинами в западной части зоны.

Приведенный пример показывает эффективность использованной методики представления результатов геохимических методов поисков. Непосредственное картирование ореолов различных стадий минерализации позволяет не только зафиксировать места отложения минералов продуктивной стадии минерализации, но и получить генетическую информацию о рудном объекте и оценить его экономическую привлекательность.

Помимо этого, в совокупности с геолого-тектоническими и геофизическими исследованиями методика дает возможность проследивать залегание

минерализованных зон на глубине, что приводит к более эффективному изучению рудного объекта с использованием буровых скважин.

**Заключение.** Современные методы обработки геохимической информации позволяют значительно снизить затраты на проведение поисковых геологических работ. Рассмотренная в статье методика позволяет картировать минеральные образования различных стадий рудоотложения. Это значительно снижает площади поисковых геологических работ и в совокупности с геолого-тектоническими и геофизическими исследованиями позволяет более целенаправленно изучать глубинное строение рудного объекта.

В качестве примера были использованы результаты геохимических съемок по вторичным ореолам рассеяния на

впервые выделенном рудном объекте Au-Cu-Mo рудной формации.

При обработке геохимических данных были выделены ореолы различных стадий минерализации, включая продуктивную. Полученная информация позволила оконтурить рудный объект, оценить величину эрозионного среза и высказать соображения о его экономических перспективах.

#### **Библиографический список**

1. Макрыгина В.А. Геохимия отдельных элементов. Новосибирск: Гео, 2011. 195 с.
2. Флеров Б.Л. Оловорудные месторождения Яно-Колымской складчатой области. Новосибирск: Наука, 1976. 247 с.

*Статья поступила 02.06.2015 г.*