



## РУДОГЕННЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СИБИРИ

В. Г. Ворошилов

Рассмотрены особенности строения аномальных геохимических полей золоторудных месторождений Сибири. Показано, что золотое оруденение сопровождается аномальными геохимическими полями концентрически-зонального строения с накоплением Au, Cu, Bi, Ag, As, Pb, Zn, Te в центре структур, а Ni, Co, Cr, V, Ti – по их периферии. Предложена методика ранжирования рудогенных геохимических полей, минимизирующая влияние ландшафтных условий ведения поисковых работ.

**Ключевые слова:** золоторудные месторождения, аномальные геохимические поля, интерпретация геохимических данных, вихревые структуры.

## ORE GENIC GEOCHEMICAL FIELDS OF HYDROTHERMAL GOLD-ORE DEPOSITS IN SIBERIA

V. G. Voroshilov

The paper considers the structure feature of anomalous geochemical fields of gold-ore deposits of Siberia. It is shown that gold mineralization is accompanied by anomalous geochemical fields with concentric zonal structure and accumulation of Au, Cu, Bi, Ag, As, Pb, Zn, Te in central structures, and Ni, Co, Cr, V, Ti at their periphery. The ranking technique of ore genic geochemical fields, minimizing the influence of landscape conditions for prospecting is suggested.

**Keywords:** gold-ore deposits, anomalous geochemical fields, geochemical data interpretation, vortex structures.

Исследованные нами месторождения относятся к трем основным золоторудным формациям, развитым на территории Сибири: 1) золотополисульфидно-кварцевой, 2) золотоскарновой и 3) золото(мышьяковисто)-сульфидной. Кроме того, изучены геохимические поля золотосодержащих колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая, традиционно относимых к золотосульфидной формации [6].

Кварцево-жильные золоторудные месторождения широко распространены в Алтае-Саянской складчатой области и долгое время являлись основным геолого-промышленным типом коренного оруденения. Все они пространственно ассоциируют с магматическими массивами диорит-гранодиоритового состава, сопровождаются окolorудными изменениями березитового типа и имеют сходный минералогический состав и близкие геохимические характеристики. Аномальные геохимические поля *золотополисульфидно-кварцевой* формации имеют концентрически-зональное строение с накоплением во внутренних зонах Au, Ag, Bi, Pb, Zn, Cu, Te, As. Дополнительно во внутренней зоне могут быть выделены три пространственно обособленные ассоциации: 1) Au, Ag, Bi, Te; 2) Au, Pb, Zn, Cu; 3) Au, As. На крупных месторождениях все они промышленно золотоносны. На мелких рудопроявлениях высокие содержания золота ассоциируют в геохимических полях только с Ag, Bi, Te из-за слабого развития полиметаллической и мышьяковой минерализаций.

Для периферии рудных тел свойственно развитие в березитах ассоциации Cr, Ni, Co, обусловленной вкрапленностью слабозолотоносного пирита. На мелких рудопроявлениях, где зональность развита слабо, эта ассоциация объединяется с полиметаллической и мышьяковой.

Аномальные структуры геохимических полей (АСГП) месторождений *золотоскарновой* формации различных минеральных типов в целом сходны и характеризуются концентрическим строением с центростремительным типом зональности. В центральных частях АСГП, к которым приурочены золоторудные тела, накапливаются золото и комплекс элементов-спутников, набор которых несколько варьирует в зависимости от типа оруденения. Внешняя граница рудных тел, в которой развита пиритовая и пирит-магнетитовая минерализация, фиксируется во всех типах месторождений ассоциацией Co, Ni, Cr, V, а по периферии АСГП и вдоль рудоконтролирующих структур накапливаются Ba, Mn, иногда Ti. Однотипно также распределение в АСГП повышенных значений показателей относительной концентрации (ОК) родственных элементов [8]. Показатель ОК, предложенный Ю. Г. Щербаковым [8], показывает отношение концентраций в пробе геохимически родственных элементов (например, Pb/Zn), нормированных по недифференцированным хондритам.

Различия в характере пространственных взаимоотношений золота и элементов-спутников обусловлены, видимо, разной степенью эволюции гидротермальной системы, в ходе которой происходит многократное экстрагирование и перераспределение золота. В наиболее завершеном



виде этот процесс проявлен на месторождениях синюхинского типа. Здесь практически все золото сконцентрировано в поздней борнит-халькозиновой минерализации и тесно ассоциирует с Cu, Ag, Bi, Te. Галенит, сфалерит, арсенопирит слабозолотоносны, соответственно, Pb, Zn, As геохимических ассоциаций с золотом не образуют и типичны для периферии рудных тел. На месторождениях Майско-Лебедского рудного поля в равной степени золотоносны полиметаллическая и медно-теллуру-висмутовая ассоциации. В скарново-магнетитовых месторождениях Казского рудного поля золото связано с галенит-сфалерит-халькопиритовой минерализацией, частично с пирит-арсенопиритовой. Следовательно, Au ассоциирует здесь с Pb, Zn, Cu и в меньшей мере с As.

Таким образом, можно констатировать, что золото последовательно накапливалось вначале с пиритом и арсенопиритом, затем с галенитом, сфалеритом и халькопиритом и, наконец, с теллуридами и сульфосолями в ассоциации с поздними сульфидами меди. Каждый последующий процесс сопровождался перераспределением золота и относительным накоплением его в поздних ассоциациях.

Обнаруженные различия в характере геохимических связей золота можно связать с разным уровнем среза гидротермальных систем ранга рудных районов. В региональном масштабе наибольшим эрозионным срезом характеризуется Казское рудное поле, наименьшим – Синюхинское, промежуточным – Майско-Лебедское.

Типичным представителем *золото(мышьяковисто)-сульфидной* рудной формации является Олимпиадинское месторождение Енисейского кряжа. Аномальная геохимическая структура Главного рудного тела, соответствующая по размерам рангу месторождения, имеет ярко выраженное концентрическое строение, типичное для гидротермальных месторождений: рудоподводящие структуры и внешняя периферия рудных тел маркируются ассоциацией Ni, Cr, V, во внутренней зоне концентрируются золото и комплекс наиболее тесно связанных с ним элементов-спутников. На Олимпиадинском месторождении это в основном As и Sb, в значительно меньшей мере – Ag, Cu, W. Околорудным слюдисто-карбонатно-кварцевым метасоматитам свойственно накопление Mn и Ba.

Чем масштабнее гидротермальный процесс, тем отчетливее пространственное обособление геохимических ассоциаций. На участках снижения интенсивности оруденения ассоциации частично перекрываются.

Анализ опубликованных данных показывает, что сходная зональность проявляется и на других крупнообъемных месторождениях золота прожилково-вкрапленного типа в черносланцевых толщах. В частности, на месторождениях Бакырчикского рудного района установлена тесная кор-

реляция золота с As, Sb, Ag, W, что обусловлено ассоциацией основной массы золота с ранней пирит-арсенопиритовой минерализацией [1]. Полиметаллическая ассоциация менее золотоносна, а Co, Ni, V, Ba имеют с золотом отрицательную корреляцию и пространственно приурочены к периферии рудных тел.

Для золоторудных месторождений в черносланцевых толщах Патомского нагорья геохимическая зональность сходная [7].

Геохимические поля золотосодержащих месторождений *колчеданно-полиметаллической* формации имеют как общие для всех гидротермальных месторождений черты, так и специфические особенности. В пределах Рудного Алтая субширотные рудоконтролирующие нарушения определяются по аномальным концентрациям Ti, V, Mn. На их пересечении с тектоническими структурами северо-западного простирания формировались ареалы вулканизма, которые фиксируются в геохимическом поле ассоциациями Ni, Cr, Co (базальтоидный вулканизм) и Mo, Sn (кислые вулканы). В металлогеническом отношении эти структуры соответствуют рангу рудных узлов. Приуроченность к ним аномальных концентраций Cu, Pb, Zn, Ag маркирует положение отдельных рудных полей и месторождений. В АСГП ранга рудных узлов золотосеребряные месторождения занимают периферическое положение. Это связано с тем, что наиболее интенсивные геохимические ореолы, определяющие положение центра АСГП, ассоциируют с базальтоидным вулканизмом, а золотосеребряное оруденение приурочено к кислым вулканитам.

В масштабах месторождений внешний контур АСГП и рудоподводящие разрывы отмечаются ассоциацией Ti, V, Cr, Co, Ni. Отношение кобальта к никелю возрастает по мере приближения к рудным телам, достигая максимума в их зальбандах и фланговых частях, где развита пирит-арсенопиритовая минерализация. Во внутренних зонах аномальных структур (рудные тела и их ближайшее окружение) накапливается широкий спектр элементов, главным образом Cu, Pb, Zn, Ba, Ag, As, Mo. В их размещении устанавливается хорошо выраженная зональность: барий тяготеет к виссячим бокам рудных тел, молибден – к лежащим, а серебро и мышьяк – к выклиниванию рудных линз по простиранию. Зональность ассоциации Cu, Pb, Zn выражается в усилении с глубиной роли вначале цинка, а затем меди. Соответственно, максимальные значения показателя ОК Pb:Zn характерны для виссячих боков рудных тел, причем они прослеживаются вдоль рудоконтролирующих разрывов на сотни метров в надрудное пространство. Для подрудной части также типичны аномалии показателя ОК Pb:Zn, но малоинтенсивные и непротяженные.

АСГП месторождений с промышленными концентрациями золота и серебра сходны по



строению, но отличаются более высокими концентрациями Ba, Ag, As, Au, Sb, Te.

Таким образом, рудогенные геохимические поля гидротермальных золоторудных месторождений имеют концентрически-зональное строение с накоплением золота в центральных частях аномальных структур. Набор халькофильных элементов-индикаторов золотого оруденения и их количественные соотношения варьируют весьма значительно, тем не менее для конкретных типов месторождений можно выделить типоморфные геохимические ассоциации, отражающие состав золотоносных минеральных парагенезисов. Например, для месторождений золотополисульфидно-кварцевой формации Кузнецкого Алатау это Au-Cu-Pb-Zn-Ag-As, для золото(мышьяковисто)-сульфидной формации Енисейского края – Au-As-Sb-W, для золото-медно-скарновых месторождений Горного Алтая – Au-Cu-Ag-Bi.

Спектр сидерофильных и литофильных элементов, образующих аномальные концентрации в геохимических полях гидротермальных месторождений золота, в целом однотипен и включает в себя Ni, Co, V, Cr, Mn, Ba, реже Ti. В большинстве случаев эти элементы обладают отчетливым пространственным антагонизмом по отношению к золоту и сопровождающим его халькофильным элементам.

В масштабах рудных узлов и районов часто информативны элементы, маркирующие рудогенерирующий магматизм: Mo, Be, Y, Sn. Аномалии этих элементов нередко имеют кольцевой (вихревой) характер и приурочены к магматогеенным кольцевым структурам диаметром до десятков километров. Вихревая структура аномальных геохимических полей часто картируется также в масштабах месторождений и даже отдельных рудных тел [3, 5]. Самоподобие разноранговых АСГП указывает на универсальность механизма их формирования и возможность использования структуры рудогенного геохимического поля для прогноза оруденения [4].

Реализацию такой методики прогнозирования сопровождают две основные проблемы: 1) геометризация зонально построенных АСГП, 2) ранжирование рудогенных геохимических полей в сложных ландшафтно-геологических условиях.

Математические процедуры геометризации аномальных геохимических полей разрабатываются достаточно давно. К настоящему времени оформились четыре группы методов, позволяющих реализовать разные подходы к объективному решению этой задачи [2]:

1) выделение квазиоднородных, с геохимической точки зрения, областей пространства (кластер-анализ наблюдений, система «Геоскан», искусственные нейронные сети);

2) выявление устойчивых ассоциаций элементов и анализ их пространственного размеще-

ния (факторный, дискриминантный, регрессионный методы);

3) вычисление показателей общей интенсивности перераспределения химических элементов (энергия рудообразования, дисперсия геохимического спектра, ранговая дисперсия);

4) вычисление коэффициентов зональности на основе идеи универсальной вертикальной геохимической зональности или центробежно-центростремительной дифференциации элементов в гидротермальном процессе.

Комплексное использование этих методов позволяет минимизировать элемент субъективности при геометризации аномальных структур геохимических полей и повысить объективность прогноза оруденения по геохимическим данным.

В сложных ландшафтно-геологических условиях, когда аномальные геохимические поля представлены лишь фрагментами, структурировать их перечисленными методами не всегда удастся. Необходим дополнительный независимый критерий ранжирования АГП, в качестве которого должен выступать геологический объект, происхождение которого тесно связано с формированием АГП и который в одинаковой степени идентифицируется в любой ландшафтно-геохимической обстановке.

К объектам такого типа можно отнести выявляемые при дешифрировании спектрозональных космических снимков кольцевые структуры, обладающие естественной иерархией. Гидротермальные системы и связанные с ними геохимические поля имеют причинно-следственную и пространственную связь с указанными структурами [3, 4]. Следовательно, естественная иерархия кольцевых структур, отмечаемая на космоматериалах, может быть использована в качестве независимого инструмента ранжирования рудогенных геохимических полей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Томского политехнического университета. Проект: ВИУ\_ИПР\_114\_2014.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бакырчик** (геология, геохимия, оруденение) [Текст] / В. А. Нарсеев, Ю. В. Гостев, А. В. Захаров [и др.]. – М. : ЦНИГРИ, 2001. – 174 с.

2. **Ворошилов, В. Г.** Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз масштабности оруденения [Текст] / В. Г. Ворошилов // Геология рудных месторождений. – 2009. – Т. 51, № 1. – С. 3–19.

3. **Ворошилов, В. Г.** Вихревая природа рудогенных геохимических полей [Текст] / В. Г. Ворошилов // Изв. ТПУ. – 2012. – Т. 321, № 1. – С. 46–51.

4. **Ворошилов, В. Г.** Механизмы формирования и методы выявления разноранговых аномальных геохимических полей [Текст] / В. Г. Воро-



шилов, Ю. С. Ананьев // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 8. – С. 41–45.

5. **Григорьев, С. А.** Отражение в геохимическом поле рудообразующей системы в качестве объекта геохимических поисков [Текст] / С. А. Григорьев // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 5. – С. 8–13.

6. **Методика** разведки золоторудных месторождений [Текст] / Под ред. Г. П. Воларович. – М. : ЦНИГРИ, 1991. – 344 с.

7. **Объемная** геолого-геохимическая модель мезотермального золоторудного месторождения Чертово Корыто (Патомское нагорье) [Текст] / Р. Ю. Гаврилов, И. В. Кучеренко, В. Г. Мартыненко, А. В. Верховин // Изв. ТПУ. – 2009. – Т. 315, № 1. – С. 30–43.

8. **Щербаков, Ю. Г.** Геохимические индикаторы золоторудных полей [Текст] / Ю. Г. Щербаков // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36, № 9. – С. 42–52.

© В. Г. Ворошилов, 2014