Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова,

УДК 550.84:519.2

# ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗОЛОТОКВАРЦЕВОГО ОРУДЕНЕНИЯ

И.Н.КРИШУК, Г.С.МОГИЛЬНЫЙ

Вопрос о генезисе золотого оруденения в черносланцевых толщах до сих пор остается одним из спорных вопросов в геологии. В статье предлагается геохимическая модель золотокварцевого оруденения на основе результатов изучения геохимических особенностей региона.

Метаморфизм и магматическая деятельность – вот два основных процесса преобразования минерального вещества земной коры, определяющие концепции гидротермального минералообразования. В связи с этим, вероятно, правильным является рассмотрение метаморфогенно-гидротермальных и магматогенно-гидротермальных месторождений. Как показывает практика, метаморфогенно-гидротермальные месторождения цветных и редких металлов обладают обычно существенно большими ресурсами по сравнению с магматогенно-гидротермальными. Особенно это относится к урану и золоту. Интересно отметить, что 75 % золота в мире добывается из месторождений, залегающих в метаморфических породах. Чаще всего это зеленокаменные породы (Буряк, 1865; Неронский, 1985 и др.).

Рассмотрим на примере золотокварцевого оруденения одного из районов СССР метаморфогенно-гидротермальную концепцию его формирования. Золотое оруденение приурочено к субмеридиональной полосе в западной части крупного синклинория, впервые выделенной Ю.А.Билибиным в самостоятельную металлогеническую единицу в 1939 г. В геологическом строении этой части синклинория участвуют породы терригенного комплекса от нижнего карбона до нижней юры включительно (литологически контрастная черносланцевая формация). В многокилометровой толще монотонных глинистых пород наиболее литологически неоднородны низы нижней перми. На рассматриваемой территории расположены полифазные массивы гранитоидов и однофазные мелкие штоки гранитов, граноди-оритов и габбро-диоритов. Широко представлен комплекс трещинных интрузий: дайки кислого, среднего и реже основного состава. Они локализуются и среди осадочных пород, образуя дайковые пояса, и в массивах гранитоидов. На основании взаимоотношений даек с массивами и между собой выделяется ряд возрастных групп.

Складчатая структура изучаемой части синклинория довольно сложна, в ее пределах выделяется ряд протяженных линейных складок погружающихся на северо-северо-восток. В южной и северной частях синклинория оси региональных структур имеют субмеридиональное простирание, в средней же части, осо-

бенно между двумя широтными глубинными разломами, оси складок ориентированы в северо-восточном направлении (35-40°).

В западной структурно-формационной зоне синклинория выделяются три продольных блока, имеющих неодинаковую глубину залегания фундамента и различный характер складчатости терригенной толщи. Наиболее прогнутой частью синклинория является центральная структурно-формационная зона, которая в свою очередь также имеет блоковое строение.

Мелкая складчатость высоких порядков широко развита в западной структурно-формационной зоне синклинория. Н.Г.Андриянов [2] считает, что на площади синклинория проявлены две фазы складчатости, разделенные по времени внедрением трещинных интрузий диоритового ряда, при этом вторая фаза (наложенная мелкая складчатость) тесно связана с динамотермальным метаморфизмом. Выделяются три линейные зоны интенсивных дислокаций и ряд более мелких участков интенсивной складчатости в зоне влияния одного из глубинных разломов северо-северо-восточного простирания.

Разрывные нарушения имеют широкое развитие и во многом определяют структурный облик рассматриваемой территории. Глубинные (скрытые) разломы по пространственной ориентировке относятся к двум основным системам: северо-северо-восточного и субширотного простирания. Разломы северо-северо-восточного простирания разделяют центральную и западную структурно-формационные зоны. Зоны влияния этих разломов трассируются сериями мелких штоков гранитоидного состава, различными по составу и возрасту дайками, а также полосой метаморфизованных пород. Разломы субширотного простирания обычно проявляются цепочками штоков и массивов гранитоидов, зонами повышенной трещиноватости сколового типа.

Весьма многочисленны также открытые разрывные нарушения.

Метаморфический пояс, развитый в пределах рассматриваемой территории, имеет сложное кулисообразное строение, связанное с принадлежностью отдельных метаморфических полос к зонам влияния различных глубинных разломов, которое в южном направлении нередко сближаются либо вообще смыкаются между собой. Детальными петрографическими исследованиями [1,2] установлена зональность регионального плутонического метаморфизма, выражающаяся в закономерной смене ассоциаций новообразованных минералов по терригенным породам кварц-полевошпатового состава: зона эпигенеза – глубинный эпигенез и начальный метагенез: мусковит + серицит + хлорит + лейкоксен; зона хлорита – серицит-хлоритовая субфация зеленосланцевой фации метаморфизма: хлорит + серицит + биотит + мусковит + пирит; зона биотита – биотит-хлоритовая и эпидот-альмандиновая субфации зеленосланцевой фации метаморфизма: биотит + хлорит + калишпат + альбит + эпидот + пирит + апатит + пирротин; зона ставролита – ставролит-альмандиновая субфация зеленосланцевой формации метаморфизма: биотит + ставролит + эпидот + альбит + калишпат + пирротин + хлорит.

Зональное строение метаморфических полос, перемежающихся с площадями, на которых осадочные породы находятся лишь в стадии эпигенетических изменений усложняет общее строение пояса.

В различной степени преобразованные (метаморфизованные) породы подвергались также воздействию контактового метаморфизма, связанного с внедрением гранитоидных плутонов и штоков.

Золотокварцевое оруденение, развитое в пределах синклинория, представлено двумя типами месторождений. К первому относятся минерализованные меридиональные зоны дробления и кварцевые жилы широтного простирания с общим содержанием сульфидов до 5 %. Этот тип хорошо изучен. Месторождения второго типа, представленные маломощными согласными кварцевыми жилами в межпластовых трещинах отслоения (на контакте тонко- и грубозернистых пород) и "лестничными" жилами в трещинах растяжения (в грубозернистых, хрупких пластах песчаников), изучены хуже. Рудными телами в них являются только узкие участки ("ленты"), располагающиеся во флексурных перегибах на крыльях складок и в замках осложняющих складок высоких порядков. Главные рудные минералы: золото (самородное), арсенопирит, галенит, сфалерит, пирит. Общее содержание сульфидов до I,5 %.

Очевидно, что золотое оруденение рассматриваемой площади является результатом сложного взаимодействия всех процессов геологического развития региона, каждый из которых (осадконакопление, магматизм, метаморфизм) как следствие тектонических движений нашел свое отражение в геохимическом поле изучаемой территории.

Геохимическое поле изучено на площади 275 км$^2$, в пределах северного фланга одного из рудных узлов территории. Использованы результаты сколкового опробования обнажений коренных пород и крупноглыбовых элювиально-делювиальных отложений. Математическая обработка результатов спектрального анализа проведена М.М.Омельченко в ИВЦ ЛГИ на ЭВМ ЕС-I022 по имеющимся стандартным программам АСОИ "Геология", разработанным В.И.Мишиным.

Для изучения структуры геохимического поля использовался метод главных компонент. Полученная матрица значений факторных нагрузок допускает следующую интерпретацию:

I. Фактор I - фактор кремнекислотности, так как высокими положительными значениями этого фактора характеризуются пробы алевролитов (породы с минимальными содержаниями $SiO_2$), в пробах песчаников значения фактора близки к нулю, а высокими отрицательными его значениями характеризуются кварцевые жилы.

2. Факторы П, IУ-УI (табл.I) - их типоморфные и антагонистические полиэлементные геохимические ассоциации позволяют сопоставить их с ассоциациями, выделенными нами по результатам опробования пород различных субфаций зеленосланцевой фации метаморфизма (материалы Н.Г.Андриянова [I,2] ).

3. Фактор Ш - его типоморфная и антагонистическая ПГА характерны для гидротермальных образований, генетически связанных с кислым интрузивным магматизмом; рудопроявления с $W$ и $Bi$ известны в регионе в экзоконтактах массивов и мелких штоков гранитоидов.

Для получения геохимической характеристики непосредственно рудных объектов были опробованы рудные тела и их первичные ореолы на ряде место-

Таблица 1

Обобщенный ряд региональной метаморфической зональности

| Степень метаморфической измененности осадочных пород | Геохимические ассоциации | |
|---|---|---|
| | по [1,2] | Факторный анализ |
| Глубинный эпигенез и начальный метагенез ("зона эпигенеза") | As, Co, Cu, Zn, Ag | Фактор IY ("фактор эпигенеза") + (0,74 As + 0,43 Co + 0,23 Ag + 0,21 Ni + + 0,21 Mo + 0,16 Cu) - (0,44 Ti + 0,25 Cr + + 0,23 V + 0,18 Zn + 0,13 Sb + 0,07 Mn + + 0,07 Sn) |
| Серицит-хлоритовая субфация ("зона хлорита") | Zn, As, Co, Ni, Cu | Фактор YI ("фактор хлорита") + (0,45 Zn + 0,26 Ag + 0,12 As + 0,12 Ti + + 0,07 V) - (0,81 Mn + 0,12 Mo) |
| Биотит-хлоритовая и эпидот-альмандиновая субфации ("зона биотита") | Pb, Sn, Co, Ni, Cu | Фактор II ("фактор биотита") + (0,79 Sb + 0,73 Pb + 0,67 Sn) - (0,35 Cr + + 0,634 Ti + 0,34 V + 0,23 Cu + 0,22 Mo + + 0,20 Co + 0,17 Zn + 0,10 Mn + 0,08 W) |
| Ставролит-альмандиновая субфация ("зона ставролита") | Ag, As, Zn | Фактор Y ("фактор ставролита") + (0,62 Ag + 0,47 Mn + 0,38 Ti + 0,23 Zn + + 0,23 As + 0,19 Sb + 0,16 Cu) - (0,36 Ni + + 0,20 Bi + 0,13 V + 0,12 Mo + 0,07 W) |

рождений. Математическая обработка результатов спектрального анализа проведена по аналогичной схеме: решена прямая задача факторного анализа.

Полученная матрица значений факторных нагрузок (табл.2) допускает следующую интерпретацию:

I. Фактор I - фактор "кремнекислотности", аналогичный фактору I.

2. Фактор II - его типоморфная ПГА характеризует его как интегральный рудный фактор, так как высокими положительными значениями его отличаются пробы из кварцевых жил.

3. Фактор III - его типоморфная и антагонистическая ПГА отражают латеральную зональность от рудных тел (месторождений) во вмещающие породы: (Ag, As, Zn) ← (Mo, Pb, Sb, Sn). Высокими положительными значениями этого фактора отличаются пробы песчаников, вмещающих оруденение.

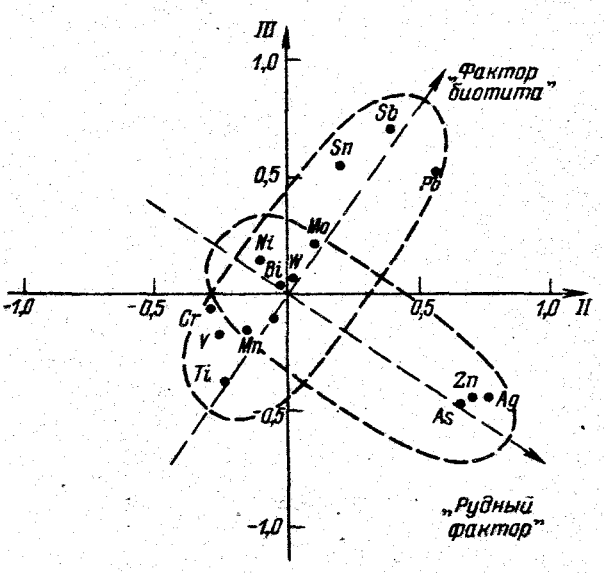



Рис.1. Диаграмма факторных нагрузок (факторы I' и III')

Таблица 2

Матрица значений факторных нагрузок ($R$-модель факторного анализа, $n = 156$)

| Переменная | Главные факторы | | | Общность |
|---|---|---|---|---|
| | I′ | II′ | III′ | |
| Ti | +0,62 | -0,21 | -0,37 | 0,57 |
| V | +0,83 | -0,25 | -0,17 | 0,78 |
| Cr | +0,80 | -0,29 | -0,06 | 0,73 |
| Mn | +0,22 | -0,14 | -0,16 | 0,09 |
| Co | +0,72 | -0,04 | -0,09 | 0,53 |
| Ni | +0,64 | -0,08 | +0,12 | 0,43 |
| Cu | +0,69 | 0,00 | -0,12 | 0,49 |
| Zn | +0,18 | +0,67 | -0,43 | 0,67 |
| As | -0,04 | +0,62 | -0,46 | 0,60 |
| Mo | +0,76 | +0,10 | +0,17 | 0,62 |
| Ag | +0,22 | +0,72 | -0,43 | 0,75 |
| Sn | +0,52 | +0,21 | +0,56 | 0,62 |
| Sb | +0,16 | +0,43 | +0,67 | 0,66 |
| W | +0,14 | +0,03 | +0,07 | 0,02 |
| Pb | +0,27 | +0,59 | +0,52 | 0,69 |
| Bi | -0,11 | -0,03 | +0,04 | 0,01 |
| Вклад | 26,39 | 13,48 | 11,83 | 51,70 |

Примечание. Значение фактора, равное $\pm 0,17$, означает, что гипотеза отличия значений факторных нагрузок от $0$ с уровнем значимости, меньшим 5 %, справедлива.

Взаимоотношение выделенных ассоциаций на диаграмме, графически отображающей значение факторных нагрузок (рис.I) таково, что, используя процедуры аналитического вращения (например, варимаксного) можно получить ассоциации рудогенных элементов, соответствующие "фактору биотита" и совокупности ассоциаций, характерных для трех различных субфаций метаморфизма (см. табл.I). Подобная картина свидетельствует, по нашему мнению, о многостадийности формирования оруденения и генетической связи его с региональным плутоническим метаморфизмом.

Однако, помимо плутонического метаморфизма, сопровождавшего основную фазу складчатости, значительное влияние на морфологию и вещественный состав рудных тел оказал динамотермальный метаморфизм (наложенная мелкая складчатость). Надо согласиться с предположением А.В.Кокина [3,4] о том, что под воздействием высоких температур и давлений произошло разложение сульфидов и выделение содержавшегося в них золота.

При изучении геохимического поля по результатам сколкового опробования были выделены также факторы УП и УШ (рис.2). Используя процедуры аналитического вращения, можно получить ассоциации рудогенных элементов, от-

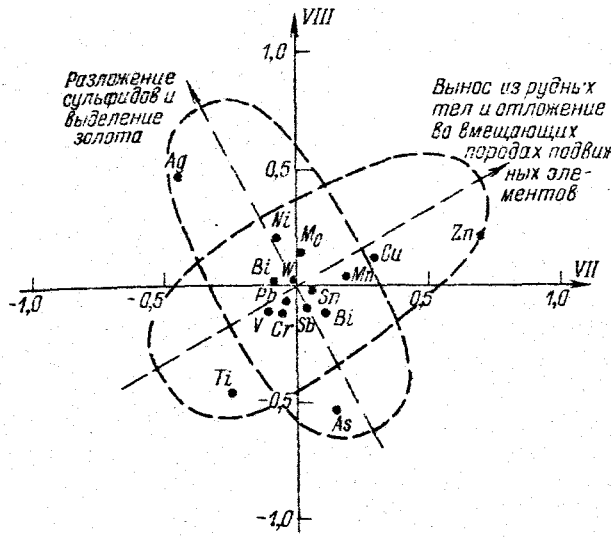



Рис.2. Диаграмма факторных нагрузок (факторы УП и УШ)

ракающие процесс разложения сульфидов и выделение Au и Ag, а также вынос более подвижных (по сравнению с Au и Ag) элементов во вмещающие породы. Можно наметить зональность отложения, характерную для динамотермально метаморфизованных кварцевых жил (от кварцевых жил во вмещающие породы): (Au, Ag) → As → (Cu, Zn), которая осложняет зональность гидротермальных образований, сформировавшихся в процессе регионального плутонического метаморфизма.

Изложенные результаты изучения особенностей геохимического поля, а также известные гипотезы о генезисе золотого оруденения изученной площади [4–6] позволяют предложить следующую геохимическую модель формирования золотокварцевых месторождений региона.

В ходе накопления мощных толщ терригенного материала происходило обогащение его элементами группы "магматических эманаций" (As, Cl, S и др.) за счет деятельности подводных гидротерм, однако, такое обогащение не было достаточным для формирования промышленных концентраций.

Формирование рудных тел началось во время основной фазы складчатости и связано с началом метаморфических процессов на более глубоких чем современный эррозионный уровень горизонтах. Под влиянием высоких температур и давлений происходило перераспределение петрогенных и рудогенных элементов в количествах, достаточных для образования изучаемых месторождений.

В начале метаморфического изменения из пород выносились легкоподвижные элементы (Cl, P, As и др.), не образовавшие собственных минералов в породах терригенного комплекса. Судя по высокому коэффициенту перераспределения As (см. табл.I, значение факторной нагрузки As на "фактор эпигенеза"), эта стадия гидротермально-метасоматической деятельности представлена широко известной в регионе импрεньяционной арсенопиритизацией [3].

По мере увеличения температуры растворов большую подвижность в них приобретают Zn, Ag, Ti, V. Продолжается вынос легкоподвижных элементов Ag, As и др. (см. табл.I, типоморфная ПГА "фактора хлорита").

По нашему мнению, на этих стадиях гидротермально-метасоматической деятельности были образованы промышленные концентрации Au на путях движения растворов, которыми служили межпластовые трещины отслоения на контактах тонко- и грубозернистых разностей пород в оформившихся к тому времени моноклиналях и зоны пересечения открытых разрывных нарушений, сопровождающих глубинные разломы северо-северо-восточного и субширотного направлений. Учитывая незначительные масштабы возможного перераспределения $SiO_2$ низкотемпературными растворами, можно предположить, что таким образом были сформированы узкие участки согласных кварцевых жил ("рудные ленты")и "рудные столбы", соответственно в первом и во втором случае).

При дальнейшем увеличении температуры, увеличении, а затем уменьшении щелочности (щелочно-кислотная волна по Д.С.Коржинскому) последовательно приобретали подвижность Pb, Sb, Sn на первом этапе – типоморфная ПГА "фактора биотита", Ag, Ti, Mn на втором – типоморфная ПГА "фактора ставролита", но при этом доля рудного вещества в общей массе переносимого материала была незначительной и не могла обеспечить создания рудных концентраций во всем объеме кварцевых жил.

Так, по нашему мнению, в результате гидротермально-метасоматических процессов, связанных с региональным метаморфизмом, были сформированы субпластовые кварцевые жилы относительно простой морфологии с узкими участками, несущими промышленную минерализацию.

В процессе динамотермального метаморфизма (наложенная мелкая складчатость) помимо усложнения морфологии согласных жил произошло разложение части сульфидов, выделение содержащегося в них золота, вынос части подвижных элементов во вмещающие породы. На этом же этапе происходило и выполнение кварцем радиальных трещин растяжения в пластах грубозернистых пород (образование "лестничных жил").

Процессы основной и наложенной складчатости разделены по времени внедрением трещинных интрузий кислого состава, что также наложило отпечаток на вещественный состав кварцевых жил (появление ассоциации W + + Bi + Ag + Cu).

Надо сказать, что подобные предположения, подкрепленные различными фактическими материалами, частично высказывались Н.Г.Андрияновым, А.В.Кокиным и М.К.Силичевым [1,4,6]. Предлагаемая геохимическая модель оруденения представляет практический интерес и может быть использована для интерпретации материалов поисковых геохимических работ и оценки перспектив территории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрияно в Н.Г. О взаимоотношении процессов метаморфизма и золоторудной минерализации в Южно-Верхоянском синклинории. – ДАН СССР, 1973, т. 211, № 2, с. 1112-1114.

2. Андрияно в Н.Г. Динамотермальный метаморфизм терригенных пород в западной части Южно-Верхоянского синклинория. – В кн.: Новости геологии Якутии, 1973, вып.3, с. 72-74.

3. К о к и н А.В. Мышьяковая Южно-Верхоянская геохимическая провинция. – Геология и геофизика, 1985, № 1, с. 74–81.

4. К о к и н А.В. Геохимические аспекты генетической модели месторождений золотокварцевой и золото-висмут-кварцевой формации Юго-Восточной Якутии. – В кн.: Геологические модели эндогенных рудных формаций. Тезисы II Всесоюз. совещ. Новосибирск, Наука, 1985. Т. 2, с. 140–141.

5. С а з о н о в В.Н. Золото в гидротермальном процессе (на примере площадного и локального метасоматоза). Свердловск, изд. Уральск. науч. центра, 1985, 50 с.

6. С и л и ч е в М.К. Модель формирования стратифицированных месторождений малосульфидной золото-кварцевой формации Южного Верхоянья. – В кн.: Генетические модели эндогенных рудных формаций. Тезисы II Всесоюз. совещ. Новосибирск, Наука, 1985. Т. 2, с. 180–181.