

УДК 622.342.1:622.342.2

Е.В. Нигай

РУДНЫЕ ФОРМАЦИИ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА РОССИИ

Проведен анализ рудных формаций и минерального состава золото-серебряных и золоторудных месторождений Дальневосточного региона, особенностей способов обогащения руд.

Ключевые слова: рудные формации, золото-серебряные и золоторудные месторождения, геохимическая специализация, технологии обогащения.

Семинар № 1

E.V. Nigay

THE ORE FORMATIONS, MINERAL AND GEOMECHANICAL PECULIARITIES OF FAR EAST DEPOSITS OF PRECIOUS METALS

The analysis of ore formations and mineral compound of ore-silver and ore-bearing deposits of Far East of Russia is carried out; the peculiarities of ore refinement methods are pointed out.

Key words: ore formatios, gold, silver and mixed ore deposits, geochemical specialization, refinement technology

Месторождения благородных металлов Дальневосточного региона (ДВР) весьма разнообразны по минеральному и геохимическому составу золото- и серебросодержащих руд. Состав руд указанных месторождений в подавляющих случаях определяется структурно-формационной принадлежностью золоторудных и золото-серебряных месторождений и условиями их формирования в различных геотектонических, палеогеографических, геолого-структурных, литолого-петрографических и палеогеоморфологических обстановках.

На минералого-геохимический состав промышленных золото- и сереб-

росодержащих руд рассматриваемых месторождений повлияли следующие факторы:

- минералого-петрографический состав вмещающих пород;
- температура кристаллизации основных рудообразующих минералов,
- интенсивность воздействия метаморфических, магматических и постмагматических процессов;
- тектонические подвижки;
- экзогенные процессы;
- степень гидротермальной проработки трещиноватых и раздробленных пород;
- близость (или удаленность) магматического очага или расплава от формируемого месторождения и пр.

На размах оруденения и разнообразии минералого-геохимической специализации золото-серебряных и золоторудных месторождений различных генетических типов определяющее влияние оказали длительность формирования золоторудных месторождений, многократность и интенсивность процессов тектоно-магматической активизации, сменявшихся периодами стабилизации и пенепленизации в разные этапы геологиче-

ской истории. Важную роль в формировании промышленных месторождений сыграли разновременные эпохи рудогенеза, связанные с формированием площадных и линейных золотоносных кор выветривания и их захоронением.

По наиболее характерному и хорошо изученному минеральному составу золото- и серебросодержащих руд основных месторождений благородных металлов Дальневосточного региона предшественниками разработана группировка данных месторождений по принадлежности к определенному рудно-формационному типу. К примеру, академиком Н.А. Шилов в начале 80-х годов была предложена типизация основных россыпеобразующих рудных формаций.

С целью первоначальной практической разбраковки рассматриваемых месторождений возможно выделение таких видов *золото-сереброрудных, комплексных золоторудных и собственно золоторудных формаций*, как:

- золото-серебряная;
- золото-молибден-медно-порфировая;
- золото-сульфидно-мышьяковая;
- золото-кварцевая убого- и мало-сульфидная;
- золото-кварцевая умеренно сульфидная;
- золото-сульфидная;
- золото-сурьмяная;
- золото-урановая;
- золото-скарновая;
- золото-вольфрамовая;
- золото-полиметаллическая;
- серебро-золоторудная.

Основные минералы, присутствующие в рудах выделяемых нами рудных формаций известных золото-серебряных и золоторудных месторождений Дальневосточного региона, отражены в табл. 1. Каждое из приведенных месторождений имеет оп-

ределенное сочетание минералов, свойственных указанным типам рудных формаций, свои парагенетические ассоциации рудных минералов.

В рудах месторождений *золото-серебряной формации*, запасы серебра в которых имеют промышленное значение, присутствуют такие характерные для этой формации минералы, как акантит, аргентит, канфилдит, голдфилдит, фрейбергит, теллур, адуляр. Отношение серебра к золоту высокое.

Золото-молибден-медно-порфировая рудная формация характеризуется значительным преобладанием молибден- и медьсодержащих минералов - молибденита, халькопирита, малахита, азурита и др.

Золото-сульфидно-мышьяковая рудная формация, характерными представителями которой являются Майское и Учаминское месторождения, содержит в значительном количестве минералы, содержащие сульфиды (пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит и др.) и мышьяк (арсенопирит). Тонкодисперсное микроскопическое золото размерностью от долей микрометра и мельче (до долей нанометра) с содержаниями 12-40 г/т и выше содержится в арсенопирите и пирите.

Золото-кварцевая убого- и мало-сульфидная рудная формация кварцево-жильного геолого-структурного типа оруденения по ассоциации рудных металлов близка к золото-серебряной, но отличается от нее незначительными содержанием серебра и серебросодержащих минералов. Содержание сульфидов минимальное, от 1—2 до 5 %. Данную рудную формацию можно отнести к собственно золоторудной. К ней относится почти половина месторождений благородных металлов региона, пространственно приуроченных к вулканоген-

ным и вулканогенно-плутоно-генным областям Дальнего Востока.

Золото-кварцевая умеренно сульфидная рудная формация отличается от предыдущей значительным количеством сульфидов (5—20 %). *Золото-сульфидная рудная формация* отличается высоким содержанием сульфидов -халькопирита, пирита, лимонита, арсенопирита.

Золото-сурьмяная кварцево-жильная рудная формация представлена на крупном золоторудном с сурьмой месторождении Кючус (Якутия) и на крупных сурьмяных с золотом рудных месторождениях Сарылах и Сентачан (Якутия), характеризующихся повышенными содержаниями золота в рудах (на месторождении Сентачан среднее содержание золота по месторождению равно 51,5 г/т). Комплексный состав руд отличается весьма существенным преобладанием антимонита над другими рудными минералами. Месторождения отличаются также уникальными содержаниями сурьмы (более 20—25 %) и ее крупными запасами - свыше 100 тыс. т. На Сарылахском месторождении добыто 104,8 тыс. т сурьмы и 13, 4 т золота [1]. Содержание золота в арсенопирите на этом месторождении составляют 100—400 г/т, в пирите — 8,5—58,2 г/т [2].

Золото-урановая рудная формация, характеризующаяся значительным преобладанием в рудах урансодержащих минералов - уранинита, браннерита и др., содержит также самородное золото, серебросодержащие минералы (аргентит, акантит) и флюорит.

Руды *золото-скарновой формации*, имеющей распространение на месторождениях Скарновое, Скарновое-2 и Участке Рябиновом (Хабаровский край), в большом количестве содержат такие железосодержащие минералы, как магнетит и гематит.

Золото-вольфрамовая рудная формация отличается от вышеперечисленных спецификой состава руд, в которых доминируют вольфрамсодержащие минералы — шеелит и вольфрамит (Харгинское золоторудное месторождение и вольфрамовое с золотом месторождение Восток-2).

Руды *золото-полиметаллической формации* на примере Березитового месторождения характеризуются наличием свинец-, цинк-, серебро-золото-кадмий- и медьсодержащих минералов (помимо самородного золота и серебра). Золото, серебро, свинец, цинк, кадмий и медь характеризуются промышленно интересными содержаниями и могут являться основными полезными компонентами при разработке Березитового комплексного месторождения. Данная рудная формация по набору рудных минералов и геохимической специализации имеет большое сходство со свинцово-цинковой формацией, представленной полиметаллическими месторождениями Дальнегорского рудного района. Отличие золото-полиметаллической рудной формации от свинцово-цинковой состоит в профилирующей роли золота в месторождениях золото-полиметаллической формации. В месторождениях свинцово-цинковой формации золото имеет второстепенное значение из-за небольшого количества запасов.

Некоторое сходство с золото-полиметаллической рудной формацией по составу полезных компонентов имеет *сереброрудная с золотом или серебро-полиметаллическая формация*, широко проявленная в сереброрудных месторождениях Омсукчанского прогиба. Отличие, разумеется, в том, что основным полезным компонентом в месторождениях серебро-полиметаллической формации является серебро.

Таблица 1
**Рудные формации и минеральный состав золото-серебряных
и золоторудных месторождений Дальневосточного региона**

Рудная формация	Рудообразующие минералы	Месторождения
1. Золото-серебряная	Кварц, адуляр, халцедон, альбит, серицит, самородное золото, самородное серебро, хлорит, гидрослюда, аргентит, акантит, родонит, родохрозит, манганокальцит, полибазит, кюстелит, канфильдит, голдфилдит и др.	Белая Гора (3,4)*, Буринда (26-72), Дурминское (6-12), Хаканджа (6,9), Родниковое (10,7) и др.
2. Золото-молибден-медно-порфировая	Кварц, калишпат, хлорит, турмалин, пирит, халькопирит, гематит, магнетит, молибденит, сфалерит, малахит, азурит, ковеллин, арсенипирит, вульфенит, борнит, самородное золото и др.	Боргуликан (0,4), Пионерское (6-10) и др.
3. Золото-сульфидно-мышьяковая	Арсенипирит, самородное золото, антимонит, пирит, пирротин, марказит, сфалерит, галенит, касситерит, станнин, платина, буланжерит и др.	Майское (12), Учаминское (7-12) и др.
4. Золото-кварцевая убого- и малосульфидная	Кварц, самородное золото, пирит, халькопирит, арсенипирит, пирротин, канфильдит, аргентит, фрейбергит, науманит, полибазит, голдфилдит, адуляр, марказит, магнетит, гидрослюда и др.	Карамкен (15), Кубакинское (20-45), Многовершинное (10-23), Буринда (26-72), Бамское (8,4), Агинское (43,7), Токур (7-14), Покровское (7-8), Каральвеем (38,8), Озерковское (17,3-2,4), Авлякан (31,1), Етара (53,6) и др.
5. Золото-кварцевая умеренно сульфидная (золото-сульфидно-кварцевая)	Кварц, пирит, арсенипирит, самородное золото, самородная платина, сперрилит, иридомин, галенит, сфалерит, адуляр, серицит, сфалерит и др.	Наталкинское (4,5), Нежданинское (5,1); Маломыр (2,5), Албазино (8) и др.
6. Золото-сульфидная	Халькопирит, пирит, пирротин, тремолит, кварц, кальцит, лимонит, гематит, карбонаты (кальция, магния, марганца)	Лебединое (> 20), Куранахское (2,7) и др.
7. Золото-сурьмяная	Антимонит, кварц, пирит, арсенипирит, самородная сурьма, сфалерит, ауристобит, магнетит, лимонит, аргентит и др.	Сарылах (10,4), Сентачан (51,5), Кючус (8,7), Дяпле (4,5)

8. Золото-урановая	Уранинит, пирит, самородное золото, адуляр, карбонаты, флюорит, кварц, аргентит и др.	Лунное (2,6), Эльконская группа урановых месторождений (Республика Саха)
9. Золото-скарновая	Гематит, магнетит, кварц, кальцит, самородное золото, карбонаты (кальция, магния, марганца) и др.	Скарновое, Рябиновый, Скарновое-2 (11,4-28,7) и др.
10. Золото-вольфрамовая	Кварц, шеелит, самородное золото, альбит, арсенопирит, редко - пирит, пирротин, галенит, <u>антимонит и др.</u>	Харгинское (8-27), Восток-2
11. Золото-полиметаллическая	Сфалерит, галенит, гранат, пирит, пирротин, хлорит, альбит, биотит, апатит, кальцит, халькопирит, самородное золото, аргентит, кварц, серицит, самородное серебро и др.	Березитовое (3,3),
12. Сереборудная с золотом (серебро-полиметаллическая)	Кварц, хлорит, адуляр, галенит, электрум, кюстелит, самородное серебро, теллуриды и селениды серебра, самородное золото, хлорит, турмалин, халькопирит, пирит, аргентит, акантит, родонит, родохрозит, гидрослюда и др.	Дукат (Ag - 5-16,4 кг/т), Арылах (Ag - 0,35 кг/т), Гольцовое, Лунный

*В скобках даны средние содержания золота по месторождению, в г/т.

По составу основных рудообразующих минералов, которые определяют геохимическую специализацию золоторудных формаций месторождений, мы выделили соответствующие им *минеральные типы* золото- и серебросодержащих руд с характерным геохимическим набором основных полезных компонентов и элементов-спутников (табл. 2). Выделенные минеральные типы руд находятся в тесной взаимосвязи с рудными формациями и характерным составом рудообразующих минералов, перечисленных в предыдущей таблице.

В табл. 3 представлена характеристика золота руд различных минеральных типов (на примере месторождений ДВР), в которой приведена характеристика золота по пробности, отношению золота к серебру и попутные компоненты.

Как видно из табл. 3, наиболее низкопробным золотом характеризуются руды серебро-кварц-хлорит-адулярового золотосодержащего минерального типа серебро-полиметаллической формации, значения пробы варьируют от 318 до 567, отношение золота к серебру равно 1:350—1:550. Золото-серебро-кварц-адуляр-серицитовый и золото-молибденит-малахит-азурит-гематитовый минеральные типы, которым соответствуют золото-серебряная и золото-молибден-медно-порфириновая формации, также характеризуются более низкопробным по сравнению с другими минеральными типами золотом, значения пробы варьируют от 600 до 760 единиц. Высокопробное золото содержится в рудах золото-лимонит-гематит-сульфидного минерального типа (Куранах, Лебединое). Остальные минеральные типы имеют средние значения пробности, варьирующие в пределах 700—800 единиц. К примеру, в серебросодержащих золо-

то-кварц-пирит-арсенопиритовом и золото-сфалерит-галенит-пиритовом минеральных типах руд золото имеет средние значения пробности: 700—750, 650—850.

От минерального состава руд различных формационных типов, сульфидности руд, количества вредных примесей, крупности золота и формы его нахождения в золотосодержащих минералах зависит степень извлекаемости золота из руд (табл. 4).

Высоким процентом извлекаемости характеризуются легкообогатимые руды золото-кварцевой убого- и малосульфидной формации. Руды серебрудной и золото-серебряной формаций являются обычно такими же легкообогатимыми, с высокой степенью извлекаемости золота из руд. Низкая извлекаемость у руд золото-сульфидно-мышьяковой (Майское, Учаминское) и золото-урановой (Лунное) формаций, в которых большая часть тонкодисперсного золота содержится в арсенопирите и пирите. Остальные формационные типы золотосодержащих руд обладают средними значениями извлекаемости золота и смешанным по обогатимости типом руд.

В табл. 5 представлены основные типы золотосодержащих руд месторождений Дальневосточного региона по обогатимости.

Наименее простой и малозатратный способ обогащения — достаточно устаревший традиционный гравитационно-флотационный, который может использоваться при освоении небольшими золотодобывающими предприятиями (старательскими артелями) мелких по запасам золоторудных месторождений (от 1—5 до 15 т) убого- и малосульфидной золоторудных и золото-серебряных формаций с легкоизвлекаемым золотом. Таких месторождений, имеющих широкое распространение в пределах вулканогенно-

Таблица 2

Геохимическая специализация основных минеральных типов золото-серебряных и золоторудных месторождений Дальневосточного региона

Минеральный тип руд	Геохимическая специализация	Месторождения
1 .Золото-серебро-кварц-адуляр-серицитовый	Au, Ag, Hg, Bi, Mn, Sb, Zn и др.	Белая Гора, Дурминское, Хаканджа и др.
2 .Золото-молибденит-малахит-азурит-гематитовый серебряносодержащий	Au, Ag, Mo, Cu, Pb, Fe и др.	Боргуликан, Пионерское, Рябиновое (Якутия) и др.
3 .Золото-арсенопирит-пирит-сульфидный	Au, Pt, Ir, Os, Mo, Sb, As, S, Ag и др.	Майское, Учаминское и др.
4 .Золото-кварц-пирит-арсенопиритовый серебряносодержащий	Au, Ag, Hg, Sn, Bi, Sn, Cu, Fe, Te, As, S и др.	Карамкен, Озерковское, Покровское, Кубакинское, Многовершинное, Буринда, Бамское, Агинское, Каральвеем и др.
5 .Золото-платина-пирит-арсенопирит-кварцевый серебряносодержащий	Au, Pt, Ni, Co, As, S и др.	Наталкинское, Нежданинское, Маломыр и др.
6 .Золото-лимонит-гематит-сульфидный	Au, Ag, As, S, Ca, Mn, W, Te, Fe, Cu, Mo, Pb, Zn, Bi и др.	Лебединое, Куранах и др.
7.Золото-кварц-антимонитовый	Au, Ag, Sb, Te и др.	Сарылах, Сентачан, Дяппе, Кючус
8 .Золото-уранинит-пирит-адуляр-карбонатный	Au, U, Mo, Ag, S и др.	Лунное (Республика Саха)
9. Золото-магнетит-гематит-карбонатный	Au, Fe, Mg, Ca и др.	Скарновое, Рябиновый, Скарновое-2 и др.
10 .Золото-шеелит-вольфрамит-кварц-арсенопиритовый	Au, W, As, S, Hg и др.	Харгинское, Восток-2
11 .Золото-сфалерит-галенит-пиритовый серебряносодержащий	Au, Ag, Cu, Zn, Pb, Cd и др.	Березитовое
12.Серебро-кварц-хлорит-адуляровый золотосодержащий	Ag, Au, Zn, Pb, Te и др.	Дукат, Арылах, Гольцовое, Лунный (Магаданская область)

252 Таблица 3
**Характеристика золота руд различных минеральных типов в месторождениях
 Дальневосточного региона**

Минеральный тип	Доминирующая пробыность золота	Отношение золота к серебру	Попутные полезные компоненты	Месторождения
1. Золото-серебро-кварц-адуляр-серицитовый	600—760	1:10—1:40	Ag, Mn	Белая Гора, Дурминское, Хаканджа, Мутновское и др.
2. Золото-молибденит-мала-хит-азурит-гематитовый	625—720	1:1,5—1:3	Mo, Cu, Ag	Боргуликан, Пионерское, Рябиновое (Якутия) и др.
3. Золото-арсенопирит-пирит-сульфидный	830—890	1:10	Pt, Ir, Os, Ag, W, Be	Майское, Учаминское и др/
4. Золото-кварц-пирит-магнетит-арсенопиритовый серебро-содержащий	650—850	1:1—1:4	Ag, Hg, Bi	Карамкен, Кубакинское, Многовершинное, Буринда, Бамское, Агинское, Каральвеем, Озерковское, Покровское и др.
5. Золото-пирит-арсенопирит-карбонат-кварцевый платино- и серебро-содержащий	700—820	1:5—1:20	Pt, Ag	Наталкинское, Нежданинское, Маломыр и др.
6. Золото-лимонит-гематит-сульфидный	800—990	5:1 —10:1	Cu, Ag	Лебединое, Куранах и др.
7. Золото-кварц-антимонитовый	650—890	1:1—2:1:	Sb	Сарылах, Сентачан, Дяппе, Кючус
3. Золото-уранинит-пирит-адуляр-карбонатный	Н.д.	1:5	U, Ag	Лунное (Якутия)
9. Золото-магнетит-гематит-карбонатный	Н.д.	Н.д.	Fe	Скарновое, Рябиновый, Скарновое-2
10. Золото-шеелит-кварц-альбит-арсенопиритовый	636, 850—910	2:1—5:1	W, Ag	Харгинское, Восток-2
11. Золото-сфалерит-галенит-пиритовый серебро-содержащий	747	1:4—10	Ag, Cu, Zn, Pb	Березитовое и др.
12. Серебро-кварц-хлорит-адуляровый золотосодержащий	318—567	1:350—1:550	Ag, Zn, Pb	Дукат, Арылах, Гольцовое, Лунный (Магаданская область)

Таблица 4
Извлекаемость золота различных рудно-формационных типов месторождений ДВР

Рудная формация	Доминирующая крупность золота, мм	Сульфидность РУД, %	Извлекаемость золота из руд, %	Месторождения
1. Золото-серебряная	0,001—0,1	1—10	74—96,5	Белая Гора, Дурминское, Хаканджа и др.
2. Золото-молибден-медно-порфировая	0,01—1,0	1—10	74—94	Боргуликан, Пионерское, Рябиновое (Якутия) и др.
3. Золото-сульфидно-мышьяковая	0,0001—0,01; преобладает тонкодисперсное золото	10—20	60	Майское, Учаминское и др.
4. Золото-кварцевая убого- и малосульфидная	0,1—1,0	1—5	92—98	Карамкен, Кубакинское, Многовершинное, Буринда, Бамское, Каральвеем, Агинское, Озерковское, Покровское и др.
5. Золото-кварцевая умеренно сульфидная (золото-сульфидно-кварцевая)	0,01—0,1	2—5	63—74, 85—93	Наталкинское, Нежданинское, Маломыр и др.
6. Золото-сульфидная	0,01—0,1	5—40	>90	Лебединое, Куранах и др.
7. Золото-сурьмяная	0,01—0,1	5—10	35—70	Сарылах, Сентачан, Дяппе, Кючус
8. Золото-урановая	0,0001—0,1; преобладает тонкодисперсное золото	3—10	60	Лунное
9. Золото-скарновая	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Скарновое, Рябиновый Скарновое-2 и др.
10. Золото-вольфрамовая	0,1—1,0	1—10	>85	Харгинское, Восток-2
11. Золото-полиметаллическая	0,1—0,2	5—10	83—96	Березитовое
12. Сереброрудная с золотом	0,01—0,08	1—10	93,7—Au 85,0—Ag	Дукат, Арылах, Гольцовое, Лунный

Таблица 5

Типы золотосодержащих руд месторождений Дальневосточного региона по обогатимости

Типы руд по обогатимости	Основной способ обогащения	Примеры месторождений
1. Легкообогатимые руды, часто с видимым золотом (крупностью в десятые доли мм и больше) золото-кварцевой и золото-адуляр-серебряной формаций преимущественно кварцево-жильного геолого-структурного типа	Гравитационно-флотационный	Токурское, Бамское, Кубакинское
	Гравитационный, с цианированием хвостов	Многовершинное, Покровское, Каральвеем, Агинское, Аметистовое, Лебединое, Белая Гора, Озерновское
	Гравитационный, с металлургическим переделом концентратов	Дукат (сереброрудное с золотом)
2. Смешанный тип руд средней обогатимости золото-кварцево-сульфидной, золото-сульфидной, золото-полиметаллической и др. формаций с мелким и тонкодисперсным золотом (сотые доли мм, мкм) зон минерализации с прожилково-вкрапленными рудами и штокверковым геолого-структурным типом оруденения	Кучное выщелачивание	Маломыр, Среднеканское
	Предварительное окисление, бактериальное обогащение, кучное выщелачивание	Боргуликан
3. «Упорные» или труднообогатимые руды с высоким содержанием вредных примесей, золото микроскопическое тонкодисперсное (нм, сотые доли мкм), в том числе в пирите и игольчатом арсенопирите (Майское месторождение) в минерализованных сульфидизированных зонах	Гравитация, флотация, цианирование и гидрометаллургия	Хаканджа
	Предварительное окисление и кучное выщелачивание	Березитовое
	Предварительное окисление, бактериальное обогащение, цианирование	Майское, Учаминское

-плутоногенных областей Приморья, Хабаровского края, Магаданской области, Чукотки, Камчатки и др. субъектов, насчитывается свыше 45 % от всего количества месторождений благородных металлов различных рудно-формационных типов.

К высокочрезвычайно трудным технологиям обогащения труднообогатимого тонкодисперсного золота, содержащегося в золотоносных пирите и

арсенопирите, можно отнести метод бактериального обогащения, цианидные и бесцианидные технологии, извлечение золота нефтью. В настоящее время они применимы только на крупных золотодобывающих предприятиях с большим уставным капиталом, имеющих возможность приобретения новых высокоэффективных, но дорогостоящих новых технологий.

■ ■ ■

— **Коротко об авторе** —

Нигай Е.В. — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Лаборатории проблем освоения рудных и нерудных месторождений открытым способом Института горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, nlgay@khv.ru