

**Физико-химические процессы образования гидротермальных
Ni-Co-As (\pm U-Ag), Co-S-As (\pm Au-W) и Cu-Co-As (\pm Sb-Ag) месторождений**

д.г.-м.н. Лебедев В.И.



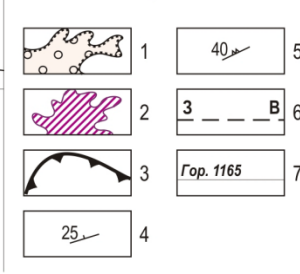
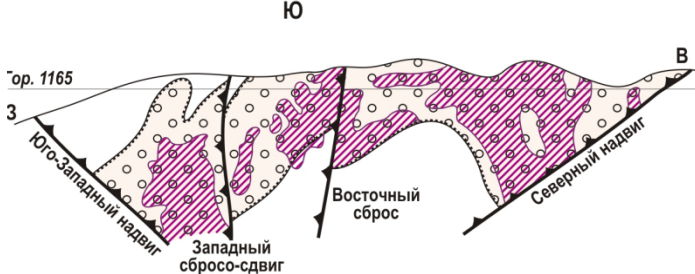
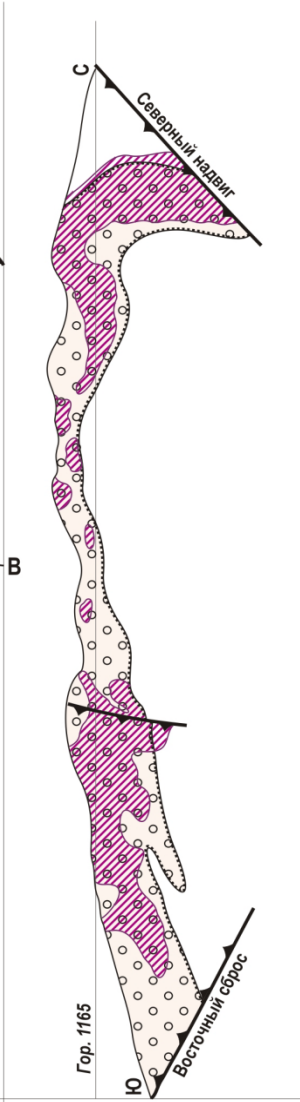
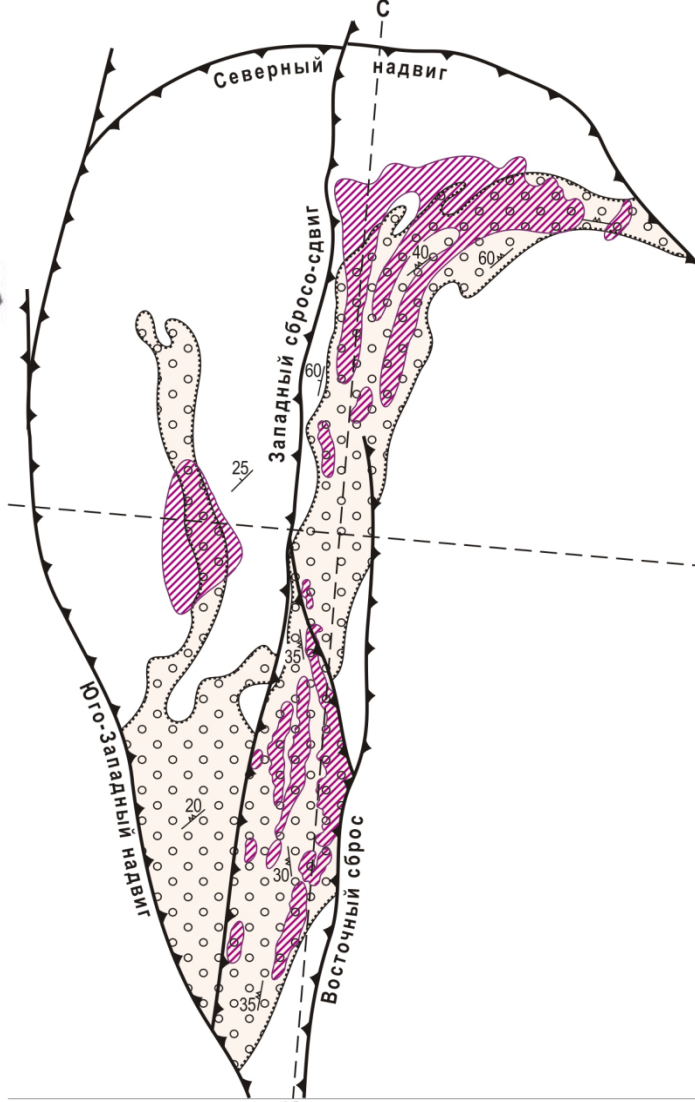
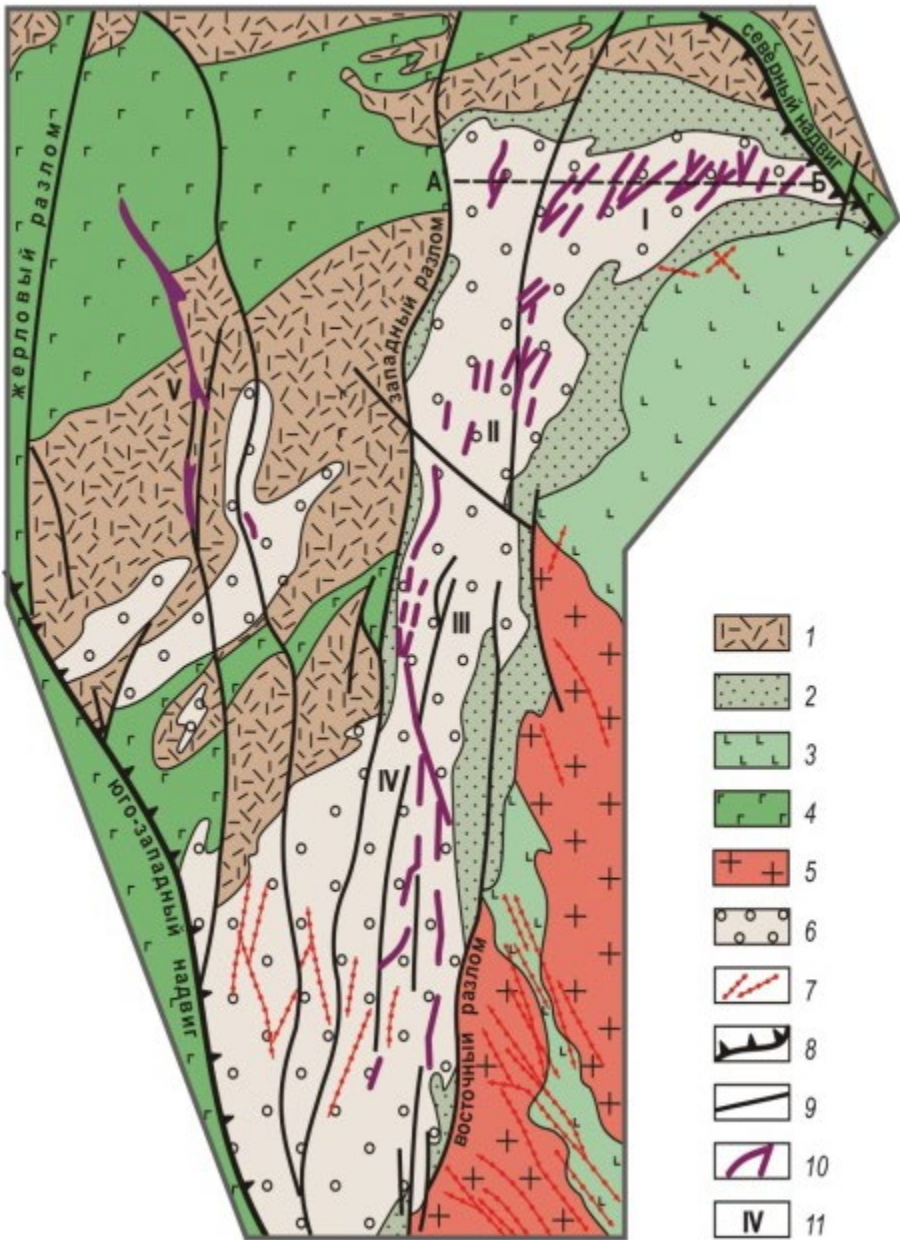
1- отложения кайнозоя; 2-мезозойские наложенные грабен-синклинали; 3-терригенно-вулканогенные комплексы среднего-позднего девона и карбона; 4-структурно-вещественные комплексы герцнид Колывань-Томской, Рудно-Алтайской и Монголо-Алтайской систем; 5-каледонско-герцинские структурно-вещественные комплексы Салаира, Горного Алтая и Северо-Западной Монголии; 6-каледонские структурно-вещественные комплексы Западного Саяна, Тувы, Горного Алтая и Северо-Западной Монголии: а) флишоидные формации, б) молассоиды; 7-салаирские структурно-вещественные комплексы: а) океанические осадочно-вулканогенные, б) островодужные вулканогенно-осадочные; 8-структурно-вещественные комплексы байкалид Восточного Саяна и Хамардабан-Сангилен-Тарбагатайской складчато-блоковой системы; 9-выступы байкалид в складчатых сооружениях фанерозоя; 10-разломы; 11-геологические границы. Месторождения: 12-арсенидные никель-кобальтовые; 13-кобальтовые сульфоарсенидные; 14-кобальт-медные сульфоарсенидно-сульфосольные; 15-рудопроявления сульфидно-сульфосольных руд; 16-кобальтсодержащие объекты неясной формационной принадлежности; 17-сульфидно-сульфоарсенидные кобальтоносные скарны; 18-сульфоарсенидно-магнетитовые кобальтоносные скарны.

Схема размещения месторождений кобальтовых и кобальтсодержащих руд в структурах Алтае-Саянской складчатой области: 1-отложения кайнозоя; 2-мезозойские наложенные грабен-синклинали; 3-терригенно-вулканогенные комплексы среднего-позднего девона и карбона; 4-структурно-вещественные комплексы герцнид Колывань-Томской, Рудно-Алтайской и Монголо-Алтайской систе; 5-каледонско-герцинские структурно-вещественные комплексы Салаира, Горного Алтая и Северо-Западной Монголии; 6- каледонские структурно-вещественные комплексы Западного Саяна, Тувы, Горного Алтая и Северо-Западной Монголии: а) флишоидные формации, б) молассоиды; 7-салаирские структурно-вещественные комплексы: а) океанические осадочно-вулканогенные, б) островодужные вулканогенно-осадочные; 8-структурно-вещественные комплексы байкалид Восточного Саяна и Хамардабан-Сангилен-Тарбагатайской складчато-блоковой системы; 9-выступы байкалид в складчатых сооружениях фанерозоя; 10-разломы; 11-геологические границы. Месторождения: 12-арсенидные никель-кобальтовые; 13-кобальтовые сульфоарсенидные; 14-кобальт-медные сульфоарсенидно-сульфосольные; 15-рудопроявления сульфидно-сульфосольных руд; 16-кобальтсодержащие объекты неясной формационной принадлежности; 17-сульфидно-сульфоарсенидные кобальтоносные скарны; 18-сульфоарсенидно-магнетитовые кобальтоносные скарны.

Этапы формирования кобальтового оруденения АССО

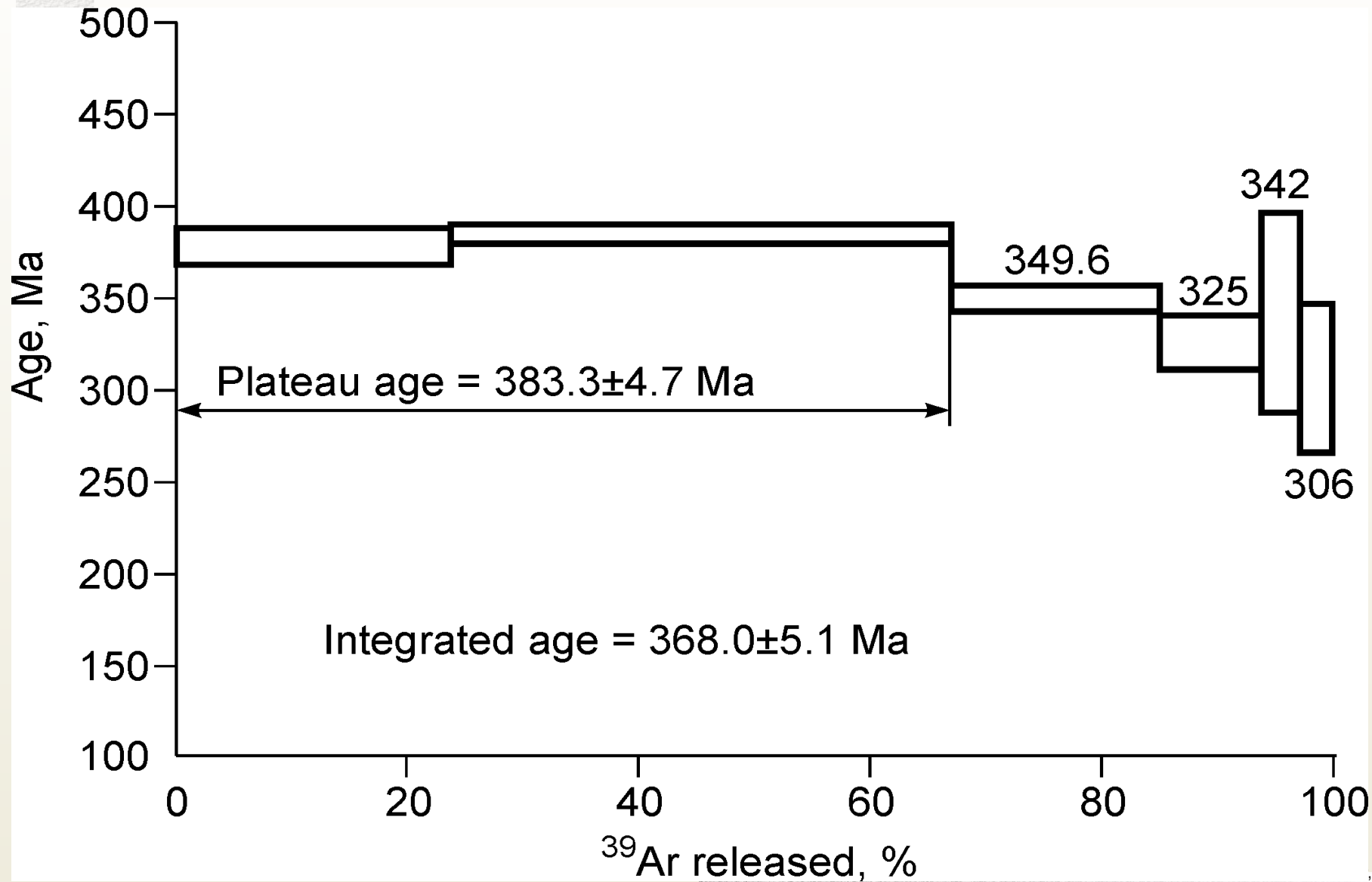
Тип	D-C ₁	P ₂ -T ₁	J ₃ -K ₁
Co-As	Юстыдское Владимировское Абаканское (Co) (409 млн. л.) Каракульское	Чергакское	
Ni-Co-As	Хараджуль (409 млн. л.) Бутрахтинское	Асхатин-Гол Хову-Аксы Бай-Тайга (242- 282 млн. л.)	Кызылоюкское Хурен-Тайга
Cu-Co-As	Быструхинское Хараджуль (409 млн. л.) Бутрахтинское	Узун-Ой Могенбуренское	Каат-Тайга Сергеевское Джулукуль

Со *среднепалеозойским этапом ($D-C_1$)* связано образование кобальт-сульфоарсенидных *скарновых месторождений*: Хову-Аксы (ранние кобальтоносные скарны); кобальтовое сульфоарсенидное скарновое Владимировское (СВ Алтай); медно-кобальт-вольфрамовое Каракульское (ЮВ Алтай); кобальтовое арсенидное и медно-кобальтовое блеклорудное в Абаканском, Хараджульском и Бутрахтинском (Хакасия). По данным Н.Г. Прокопцева и др. (Прокопцев, 1960) кобальтоносные скарны Владимировского месторождения генетически связаны с габбро-диоритами Чарышского комплекса (D_3-C_1). Среднепалеозойский возраст кобальтового оруденения Каракульского, Юстыдского, Караюкского и др. в Юстыдском рудном узле (ЮВ Алтай) определен изотопно-геохронологическими исследованиями. Возраст гранитов составляет $355,7 \pm 8,6$ млн. лет (U-Pb-метод), а связанного с ним Sn-W(Ni), Cu-Co-W и Co-As оруденения – 352 ± 6 млн. лет (Ar-Ar-метод).





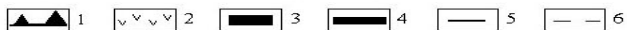
Хову-Аксы – абсолютный возраст



Хову-Аксы

Установлена последовательность многостадийного отложения минеральных парагенезисов метасоматического и гидротермального этапов формирования Ховуаксынской рудообразующей системы, на основе изучения включений маточных рассолов-растворов в минералах доарсенидного скарнового (турмалин, гранат, кварц, шабазит, пирит) и собственно кобальт-арсенидного жильного (из стадийных генераций кварц-барит-кальцит-арсенидных парагенезисов) определены физико-химические и термобарометрические параметры флюидного режима рудообразования

Минерал	ЭТАПЫ										
	Метасоматический					Дорудный VI	Гидротермальный Рудный				Пострудный XI
	I	II	III	IV	V		VII	VIII	IX	X	
андрадит	■										
гроссулар	■										
геденбергит	■										
диопсид											
маршалит	■										
клиноцоизит											
роговая обманка	■										
магнетит		■									
актинолит		■									
тремолит											
кварц			■		■	■	■	■	■	■	■
кальцит						■	■	■	■	■	■
пирит											■
пирротин											■
халькопирит											■
арсенипирит											■
кобальтин											■
хлорит											■
галенит											■
сфалерит											■
марказит											■
альбит				■	■						
ортоклаз				■	■						
пренит				■	■						
микроклин				■	■						
турмалин				■	■						
датолит				■	■						
талек				■	■						
халцедон				■	■						■
шабазит				■	■						■
никелин						■	■	■	■		
доломит						■	■	■	■		
хлоантит						■	■	■	■		
раммельсбергит						■	■	■	■		
серебро											■
висмут											■
шмальтин											■
леллингит											■
анксит											■
сидерит											■
борнит											■
теннантит											■
Со-скуттерудит											■
сафлорит											■
маусерит											■
полидимит											■
аргентит											■
мышьяк											■
барит											■
гематит											■
Тектоническое дробление, дайки	▲	▼	▲	▼	▲	▼	▲	▼	▲	▼	▲
Температура гомогенизации, °С; минерал	?	?	350-280, гранат	270-250, турмал.	290-230, кварц; 270-180, кальцит	35-80-40, кварц, кальцит	40-60-80-100, кварц, доломит, кальцит	110-70-40, кальцит	40-135, кальцит	160-100-40, кальцит, кварц	<40, кальцит
Давление, атм; минерал	?	?	?	?	>550-700, кальцит	от 200 до 2000, доломит + кальцит				?	Гидростатическое
Состав растворов			NaCl, CaCl ₂ , KCl	NaCl, CaCl ₂	NaCl, KCl	NaCl + CaCl ₂ + KCl + H ₂ O				NaCl, CaCl ₂	
Концентрация, вес. %			36	30-31	31-33	?	CO ₂	?	CO ₂	35	20-25

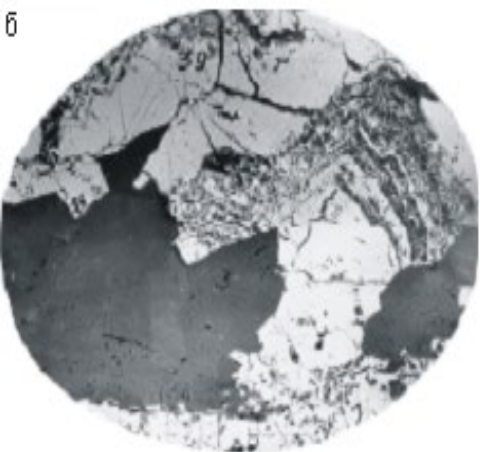
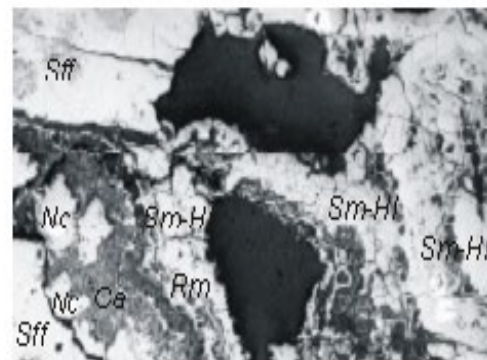
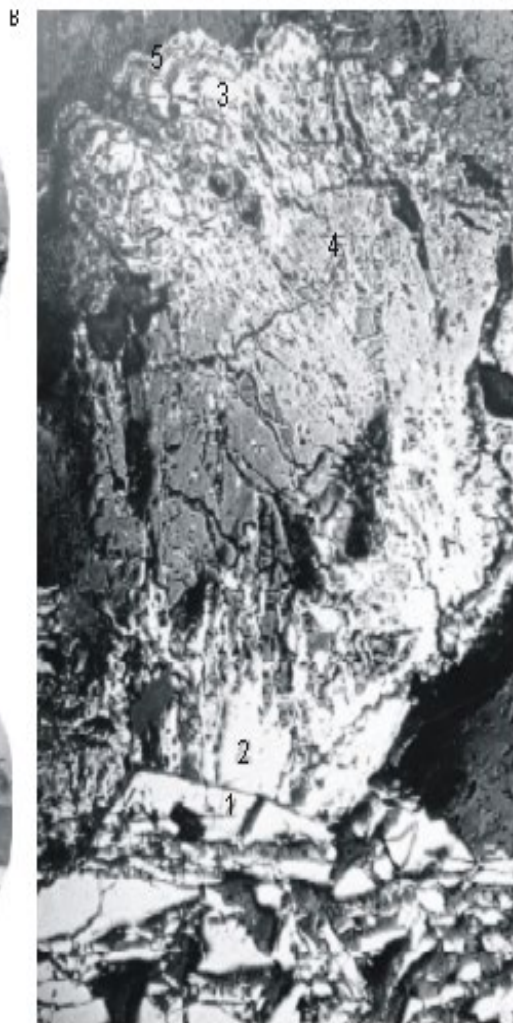
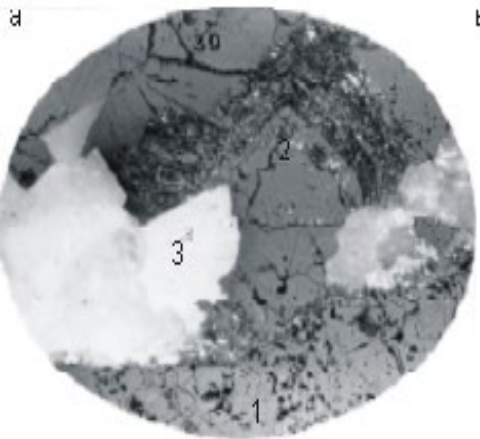


Последовательность и физико-химические параметры минералообразования (таблица 2)

1 — интенсивность дизъюнктивной тектоники; 2 — дайки основного состава; 3-6 — характер распространения минералов: 3 — главные, 4 — распространённые, 5 — второстепенные, 6 — редкие.
 I-XI — стадии: I — гранат-пироксен-скаполитовая, II — актинолит-магнетит-сульфидная, III — гранат-амфибол-сульфоарсенидная, IV — турмалин-полевошпатовая, V — халцедон-цеолит-сульфидная, VI — кварц-хлорит-карбонатная, VII — доломит-никелин-раммельсбергитовая, VIII — кальцит-скуттерудитовая, IX — кварц-сафлоритовая, X — сульфидно-сульфосоляная, XI — барит-карбонатная.

Обобщены результаты изучения условий послевыветшности формирования жильных систем и флюидного режима образования уникальных по вещественному составу и качеству руд месторождения Хову-Аксы (Тува).

Хову-Аксы



Последовательность выделения арсенидов в карбонатных жилах (Хову-Аксы)

Никелин-раммельсбергитовый парагенезис (Хову-Аксы)

Хову-Аксы

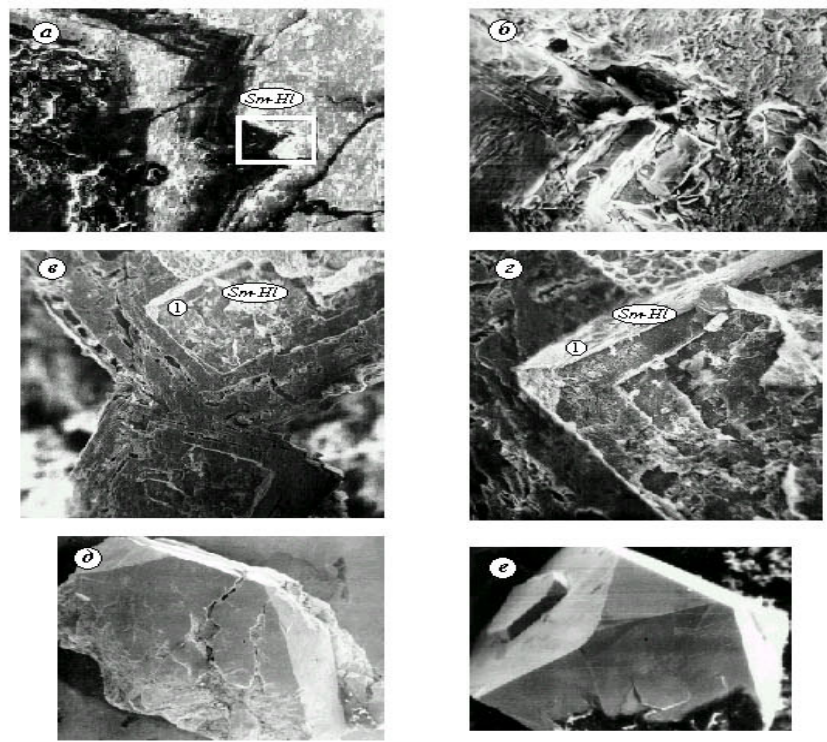


Фото 5-2. Формы выделения кристаллов шмальтин-хлоантита (шмальтин-хлоантитовый парагенезис) (Хову-Аксы)

a), б) чередование шмальтин-хлоантита и кальцита (*a* — увел. 45*; *б* — увел. 450*);
в), з) формы выделения кристаллов шмальтин-хлоантита при разных увеличениях (*в* — увел. 300*; *з* — увел. 1000*);
д) е) кристаллы шмальтин-хлоантита (*д* — увел. 300*; *е* — увел. 200*).

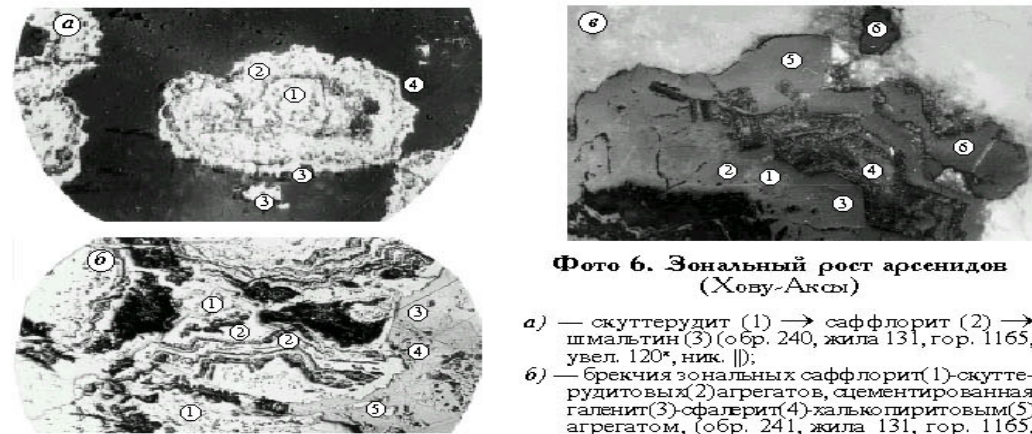
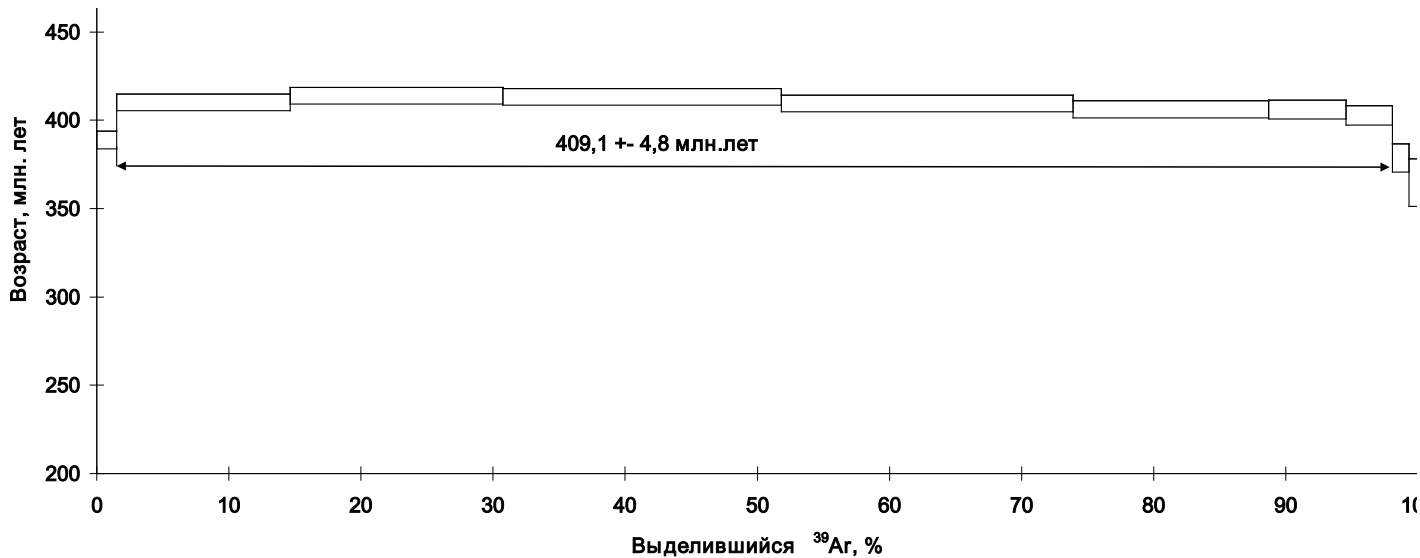


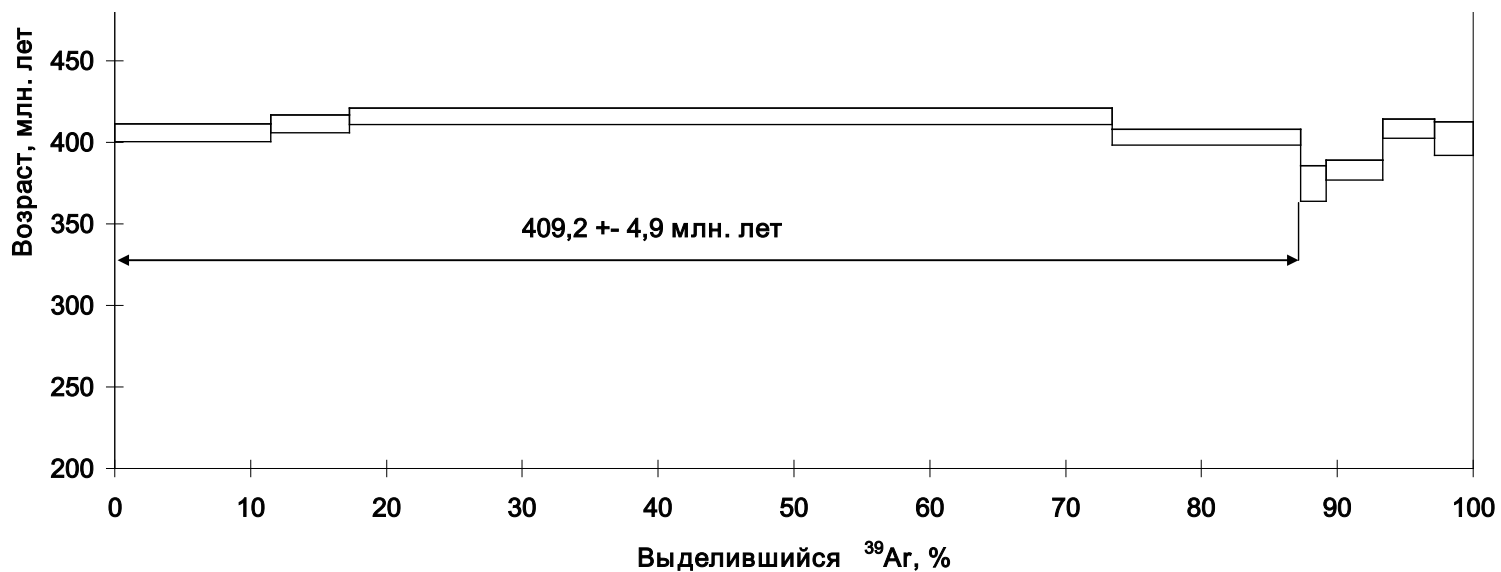
Фото 6. Зональный рост арсенидов (Хову-Аксы)

a) — скуттерудит (1) → саффорит (2) → шмальтин (3) (обр. 240, жила 131, гор. 1165, увел. 120*, ник. ||);
б) — брекчия зональных саффорит (1)-скуттерудитовых (2) агрегатов, сцементированная галенит (3)-сфалерит (4)-халькопиритовым (5) агрегатом, (обр. 241, жила 131, гор. 1165, увел. 40*, ник. ||);
в) — раммельсбергит (1) + никелин (2) совместно с хлоантитом (3) нарастают на захваченный в процессе роста кальцит (4); внешние зоны сложены кальцитом (4) и шмальтин-хлоантитом (5), зерна неправильной формы — галенит (6) (обр. 529-6, жила 115, гор. 1291, увел. 160*, ник. X)

Абсолютный возраст Co руд месторождений

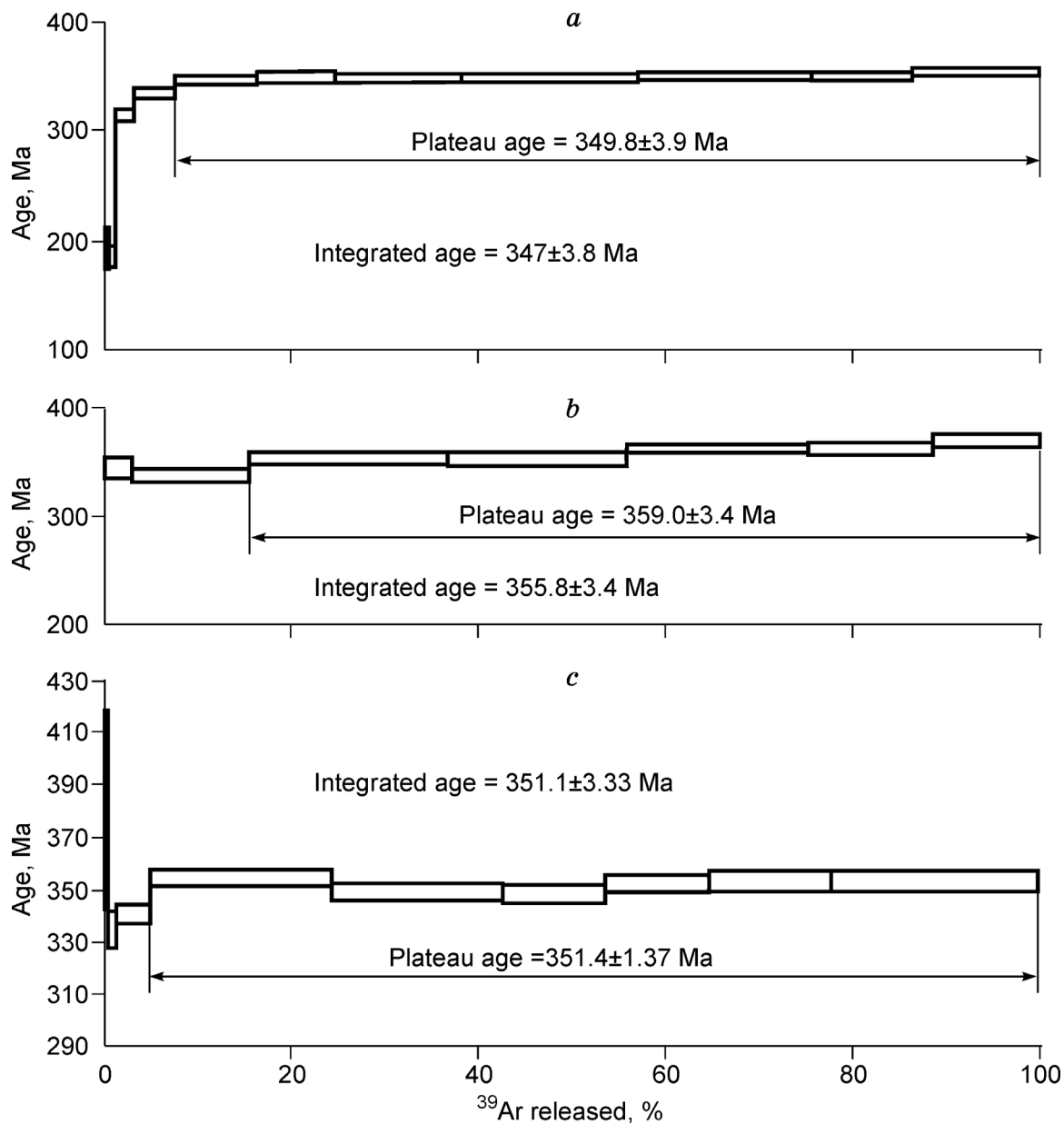


Абакан (1)



Хараджуль (2)

Абсолютный возраст руд и интрузива месторождений



a) Кара-куль (Cu-Co-W)

b) Юстыд (Sn-W)

c) гранитов Юстыдского массива

Возраст кобальтовых руд Владимировского месторождения определен Re-Os методом в аналитическом центре Чешской геологической службы (Прага) на термоионизационном изотопном масс-спектрометре (TIMS) по монофракции молибденита ($409,6 \pm 2,7$ Ma; содержание Re = $27,05 \pm 0,08$ (ppm), ^{187}Os (ppb) = $116,4 \pm 0,7$). Методом сканирующей микроскопии (SEM), в рудах Владимировского месторождения был установлен уранинит, который продатирован U-Th-Pb методом (406 млн. лет).

Состав и возраст уранинита Владимировского месторождения

№№ проб	PbO	ThO ₂	UO ₂	Ma
1	4,62	9,31	78,18	413,3
2	4,91	3,05	86,09	409,2
3	4,64	0,97	86,89	387,1
4	4,62	5,55	85,81	383,9
5	4,66	0	84,64	399,6
6	4,84	0	87,52	401,8

K-Ar методом продатированы: Тимофеевский габбро-диоритовый шток (370 млн. лет), который также как и Владимировский относится к первой фазе Майорского комплекса, а также граниты третьей фазы Кирилловского массива (384 млн. лет).

U-Pb и Th-Pb методами продатировано оруденение Кумирского U-Sc-REE месторождения (393 ± 7 и 402 ± 10 млн. лет соответственно).

Позднемезозойский этап (J_3-K_1) формирования Co оруденения выделяется на основе имеющихся геологических данных о локализации никель-кобальтового арсенидного и медно-кобальтового сульфоарсенидно-сульфосольного оруденения среди юрских (J_{1-2}) терригенных, гипсоносных отложений Каргинского грабена (ЮЗ Тува, СЗ Монголия). Кобальтовое и ассоциирующее с ним полиметаллическое (Cu, Pb, Zn) и баритовое оруденение наложено на юрские конгломераты, чем обозначается нижняя граница его формирования. В то же время, среди меловых терригенных отложений, несогласно перекрывающих ниже-среднеюрские в восточной части Каргинского грабена, кобальтовая минерализация отсутствует, но отмечаются проявления медистых песчаников. Осадочно-диагенетическая минерализация такого типа более широко развита в югу в пределах локальных меловых прогибов Хархиринского хребта (Цаган-Шибетинская зона). В медистых песчаниках установлены повышенные содержания As, Sb, Ni, Co, Ag, Bi – элементов весьма характерных для кобальтового оруденения Каргинского грабена. К востоку от рассматриваемого района никель-кобальтовая арсенидная минерализация пространственно ассоциирует со щелочными интрузиями с карбонатитами (Улатай-Чозский район), возраст которых составляет 118-120 Ma.

Получены датировки даек Чуйского лампрофирового комплекса из кобальтоносных полей (186-230 Ma), причем большинство их попадало в интервал 206-212 Ma. Ранее K-Ar и Rb-Sr методами (Оболенская, 19..) для минетт и керсантитов среднее значение соответствовало – 210 ± 20 Ma, рубежу триас-юра. Rb-Sr методом для минетт была получена изохрона, соответствующая возрасту 259 ± 1 млн. лет. Учитывая широкий диапазон полученных K-Ar датировок, а также фактор большой устойчивости Rb-Sr системы и воздействию внешних условий по сравнению с K-Ar системой, нами принят возраст лампрофиров 245 ± 1 Ma [Третьякова и др., 2010]. Близкие значения возраста устанавливались и для биотитовых лампрофиров в структурах Хархиринской зоны и Толбонурского рудного узла Западной Монголии (210, 230, 270 ± 10 Ma).

Получены качественные $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ датировки по возрасту лампрофиров Юстыдского рудного узла: для дайки минетты из района Озерно-Асхатинского рудного поля по биотиту получен возраст $244 \pm 2,5$ Ma, а для минетты из верховья р. Кок-Узек (Южно-Чуйский дайковый пояс) – $236,8 \pm 0,6$ Ma.

По лампроитовым дайкам Чуйского комплекса (Южно-Чуйский дайковый пояс) были получены $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ датировки равные $244.0 \pm 0.8 - 245 \pm 0.7$ Ma [Врублевский и др., 2004]. Учитывая соотношение даек минетт с арсенидной кобальтовой, серебряно-сурьмяной и ртутной минерализацией, которые накладываются на дайки, полученные датировки для этих типов минерализации соответствуют значению $244 \pm 2,5$ Ma – рубежу P_2-T_1 .

С раннемезозойским этапом (P_2-T_1) связано образование Ni-Co-As оруденения ЮВ Алтая, ЮЗ Тувы, СЗ Монголии, а также Cu-Co-S-As сульфосольного в Южно-Чуйском хребте. Эти типы оруденения наложены на все образования палеозойского возраста, включая магматические и осадочные породы девона и дайки долеритов P-T возраста. При этом рудные тела с кобальтовой минерализацией пересекаются дайками лампрофиров Чуйского комплекса, возраст которых составляет 246-240 Ma (Ar-Ar-метод) [Борисенко и др., 2003; Врублевский и др., 2004]. В Юстыдском рудном узле установлено наложение серебро-сурьмяной минерализации (238 Ma, Ar-Ar-метод) на никель-кобальт-арсенидную (месторождение Асхатин-Гол). В СЗ Монголии на Сагсайском месторождении зафиксировано наложение ртутного оруденения на никель-кобальт-арсенидное. Возраст ртутного оруденения этого региона составляет 231-234 Ma [Борисенко и др., 2003]. Таким образом, верхняя граница раннемезозойского этапа находится в интервале 246-238 Ma, а нижняя – определяется возрастом долеритов (P_2-T_1), на которые накладывается кобальтовое оруденение. Изотопно-геохронологические исследования показали, что период формирования такого оруденения – 258-250 Ma (U-Pb-метод), соответствует рубежу перми и триаса.

Моделирование условий гидротермального рудообразования кобальтовых месторождений

Проведено обобщение результатов изучения состава металлоносных флюидов, связанных со становлением щелочных и щелочно-базитовых интрузивов и даек в рудных полях кобальтовых месторождений гидротермального генезиса, формировавшихся в различных геодинамических обстановках. Для определения физико-химических параметров рудоотложения по флюидным включениям в минералах использовались как традиционные, так и новые инструментальные методы термобарогеохимии: термо- и криометрия; КР-спектроскопия; LA-ICP-MS. Результаты оценки концентрации рудных и петрогенных элементов в индивидуальных флюидных включениях послужили основой термодинамического моделирования условий совместного переноса и отложения Au, Co, Ni, Ag, Pt, Pd и др. рудных элементов, а также расчета ряда равновесных состояний гидротермальной системы, по составу близкой к природным рудообразующим системам кобальтовых месторождений (Co-As, Ni-Co-As и Cu-Co-As). Выявлены физико-химические факторы отложения самородных золота, серебра, ртутистого серебра, платины и палладия в рудах этих месторождений. Полученные новые данные послужат основой для разработки корректных генетических моделей рудообразующих систем Co месторождений и помогут решать проблемы их поиска.

Физико-химические параметры флюидов включений в минералах руд Co месторождений

Месторождение, район	T, °C гомогенизации	Концентрация NaCl-экв. (масс.%); состав газовой фазы	Источник
Co-U-As			
Владимирское Акджилга (Киргизия) Каракуль	280 – 50	27.0 – 18	Третьякова и др., 2010
	280 – 50	32.5 - 20	
	280 - 180		
Ni-Co-U-Au-As			
Бу-Аззер (Марокко) Хову-Аксы (АССО) Асхатин-гол АССО)	250 – 50	39.0 – 15; CH ₄ , CO ₂	Борисенко и др., 1971, Лебедев и др., Лебедев, 1998
	250 – 50	35 - 28	
		31.5 – 18; CO ₂	
Ag-Ni-Co-U-As			
Актепе (Киргизия) Яхимов (Чехия) Залеси (Чехия) Silver Century, Silverfield (Канада) Конгсберг (Норвегия)	280 – 50	22.0 – 1.9; CO ₂ , CH ₄	Коваленкер и др., 1994 Борисенко, 1999, Dolnichek et al., 2009 Scott, O'Connor, 1971 Kerrich et al., 1986 Segalstad, 2000
	210 – 70	38.0 – 2.5	
	130 -80	28.5 – 0; CO ₂ , CH ₄	
		40.0 – 1.5; CO ₂ , CH ₄	
	275 - 127	35 – 0	
Cu-Co-U-As			
Хараджувль Бутрахта	145 – 105	29 – 15; CO ₂	
	115 – 60	29 - 15	

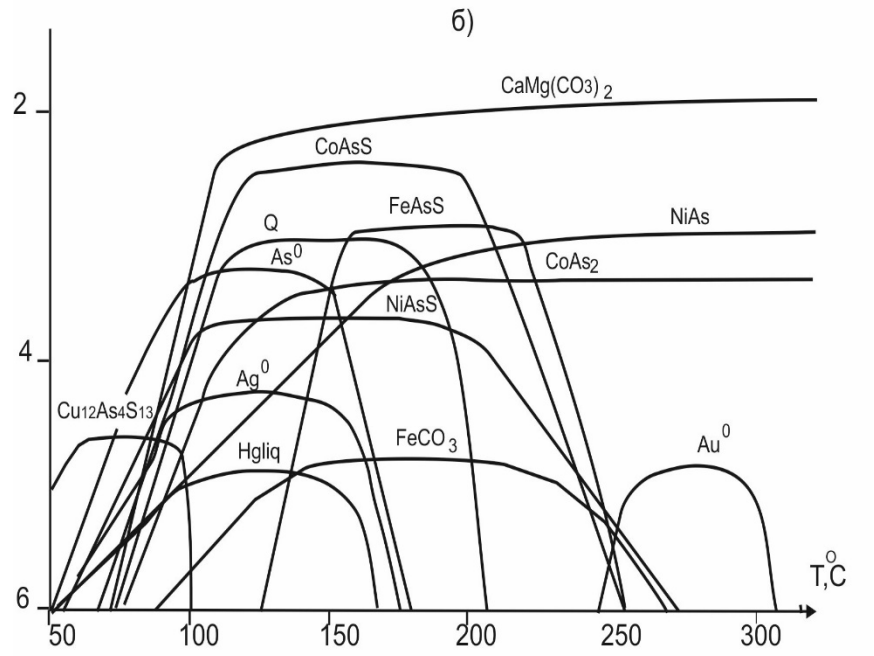
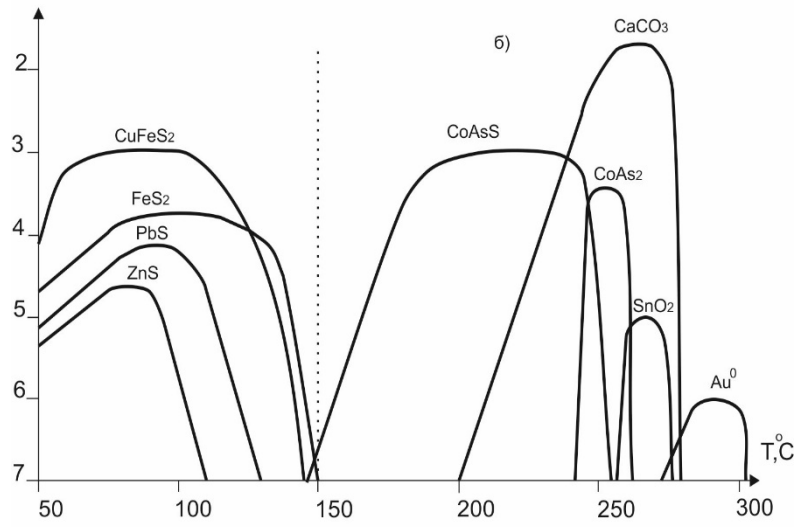
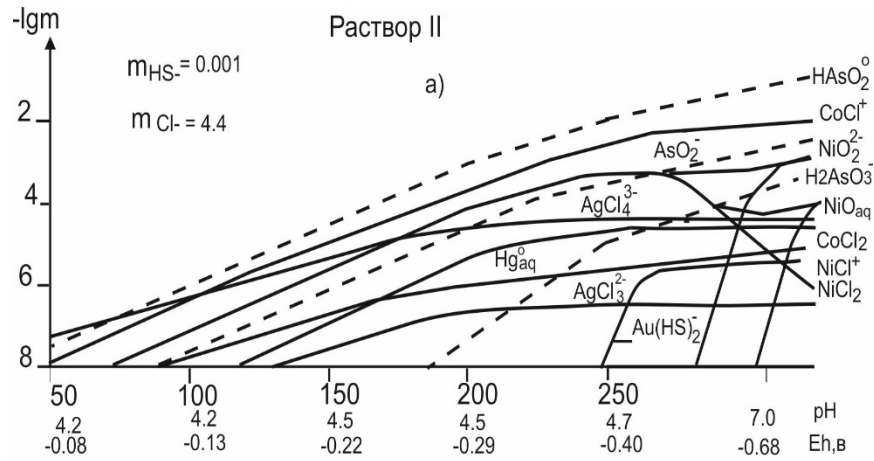
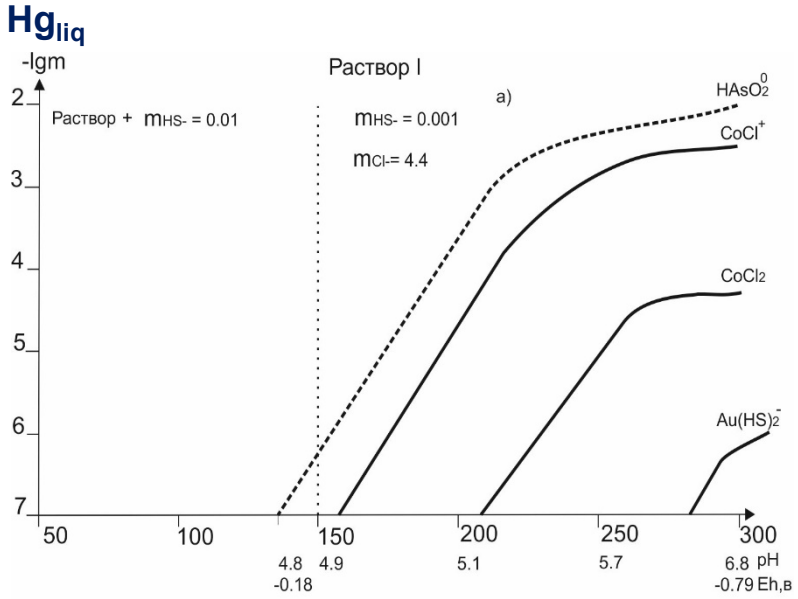
Равновесные концентрации (моль/кг Н₂О) компонентов в исходных модельных растворах

Компоненты	Раствор I при Т = 300°C	Раствор II при Т = 300°C	Раствор III при Т = 300°C	Раствор IV при Т = 50°C	Раствор V при Т = 200°C	Раствор VI при Т = 150°C
	pH= 6.8 Eh= -0.79в	pH = 7.0 Eh= -0.68в	pH = 5.8 Eh= -0.52в	pH= 4.5 Eh = -0.11в	pH= 4.2 Eh= - 0.22в	pH= 3.0 Eh= - 0.12в
HS-	1.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻³	9.00·10 ⁻⁴	1.00·10 ⁻²
SO ₄ ²⁻	1.00·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻⁴	7.00·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻⁵
Na ⁺	1.40	1.00	1.00	4.50	5.10	5.10
Cl ⁻	4.40	4.40	4.40	5.20	5.30	5.30
Co ²⁺	5.00·10 ⁻³	5.00·10 ⁻³	5.00·10 ⁻⁵	5·10 ⁻³ - 5·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻²	1.00·10 ⁻³
Ni ²⁺	-	5.00·10 ⁻⁴	1.00·10 ⁻³	3·10 ⁻³ - 7·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻⁴	1.00·10 ⁻⁶
HCO ₃ ⁻	1.93·10 ⁻²	1.50·10 ⁻¹	4.10·10 ⁻²	2.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻²	9.10·10 ⁻³
Fe ²⁺	1.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻²	1.00·10 ⁻²	1.00·10 ⁻⁴	1.00·10 ⁻²	1.00·10 ⁻³
SiO _{2aq}	9.61·10 ⁻³	5.90·10 ⁻³	6.80·10 ⁻³	2.30·10 ⁻⁴	5.90·10 ⁻³	1.80·10 ⁻³
H ₂ AsO ₃ ⁻	2.00·10 ⁻²	2·10 ⁻² -8·10 ⁻²	2·10 ⁻² - 8·10 ⁻²	1.00·10 ⁻⁴	1.00·10 ⁻²	1.00·10 ⁻³
Ca ²⁺	1.50	1.20	1.70	0.25	0.10	0.10
K ⁺	-	-	-	4.00·10 ⁻²	4.00·10 ⁻³	4.00·10 ⁻³
Mg ²⁺	-	5.00·10 ⁻¹	-	6.00·10 ⁻²	2.00·10 ⁻³	2.00·10 ⁻³
Ag ⁺	-	1·10 ⁻⁵ -1.5·10 ⁻³ (*)	5·10 ⁻⁴ -2.5·10 ⁻³ (**)	5.00·10 ⁻⁵	5.00·10 ⁻⁵	5.00·10 ⁻⁴
Cu ⁺	2.00·10 ⁻⁴	1.00·10 ⁻⁶	1.00·10 ⁻⁶	2.00·10 ⁻⁴	2.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻³
Pb ²⁺	1.00·10 ⁻⁵	-	-	1.00·10 ⁻⁴	1.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻³
Zn ²⁺	1.00·10 ⁻⁵	-	-	1.00·10 ⁻⁴	1.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻³
Al ³⁺	-	-	-	1.00·10 ⁻²	-	-
Ba ²⁺	-	-	-	1.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻³	1.00·10 ⁻³
Pt ²⁺	-	-	-	1.00·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻⁴	-
Pd ²⁺	-	-	-	1.00·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻⁴	-
Au ⁺	1.00·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁵ -5·10 ⁻⁴ (***)	-	-	1.00·10 ⁻⁷	-
Sb(OH) ₃	-	-	-	-	1.00·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻⁶
Sn ²⁺	1.00·10 ⁻⁵	-	-	-	-	-
Hg ²⁺	-	1.00·10 ⁻⁵	1.00·10 ⁻⁵	-	-	-
UO ₂ ²⁺	-	-	-	-	1.00·10 ⁻⁴	1.00·10 ⁻⁴

Примечание. Концентрация серебра и золота в модельных растворах соответствует: (*) = 1-150 г/т; (**) = 54-270 г/т; (***) = 2-100 г/т в рудах

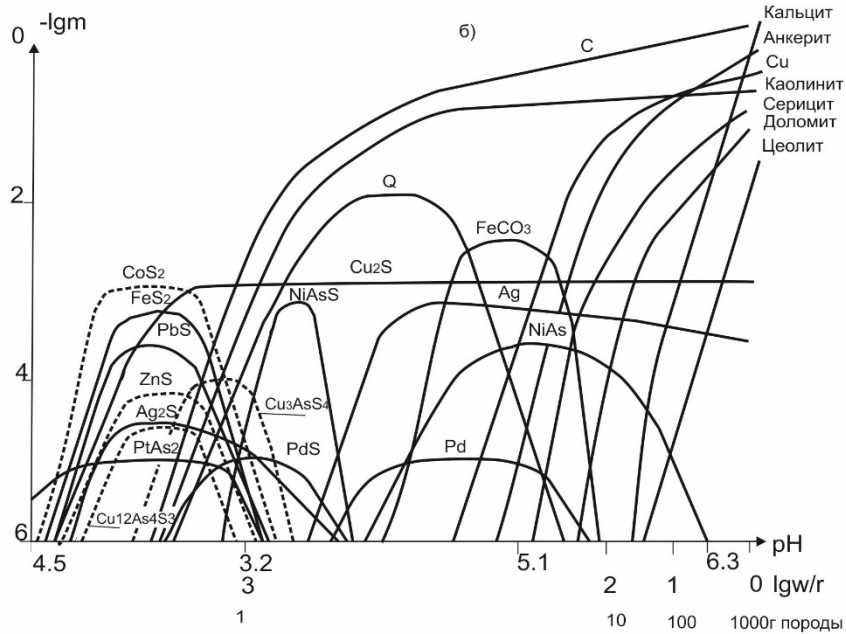
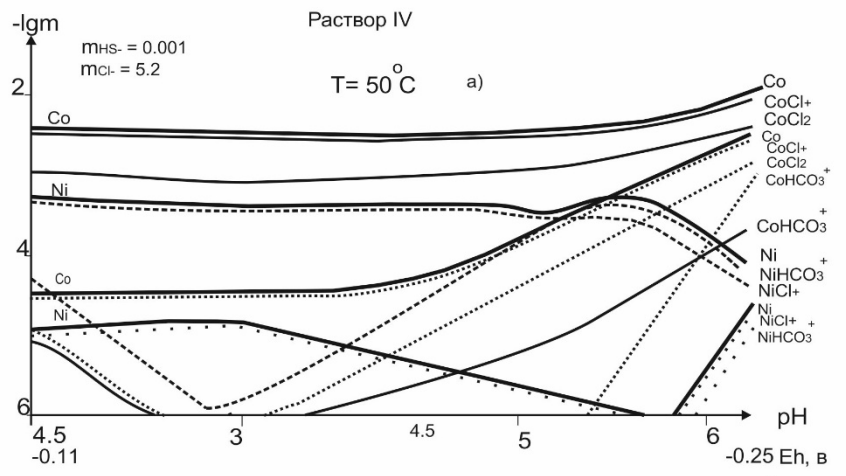
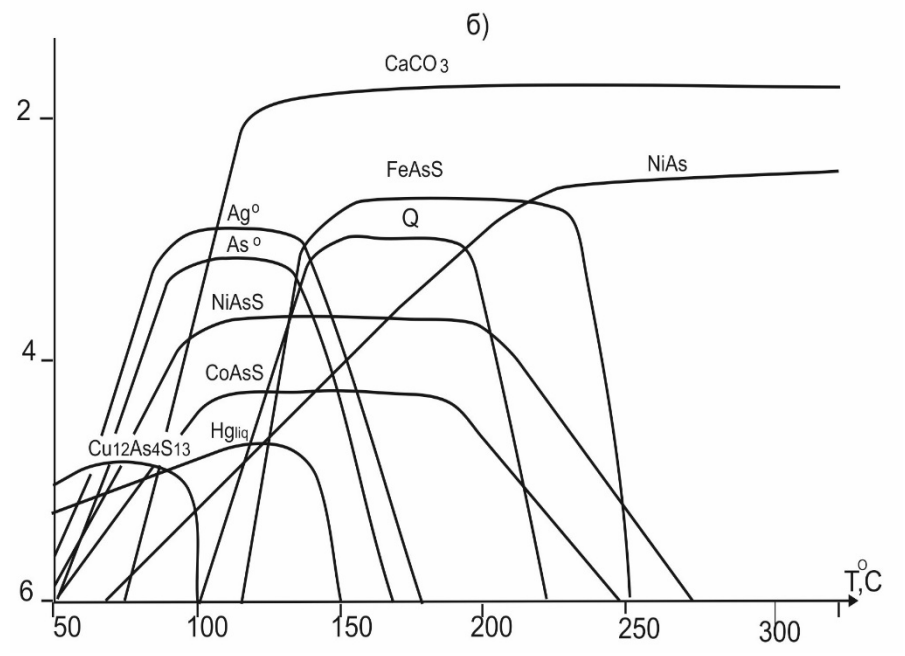
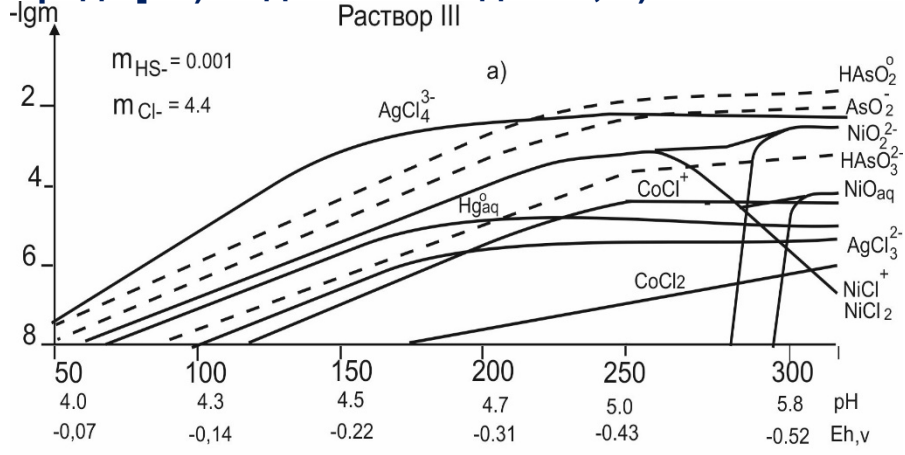
1. Концентрация основных химических форм As, Co, Au в модельном растворе (I) в зависимости от T, Eh, pH раствора: а) модель охлаждения; б) отложение минеральных фаз;

2. Концентрация основных химических форм As, Ni, Co, Ag, Hg и Au в модельном растворе (II) в зависимости от его T, Eh, pH: а) модель охлаждения; б) отложение минералов Ni, Co, Cu, Ag⁰, Au⁰, Hg_{liq}



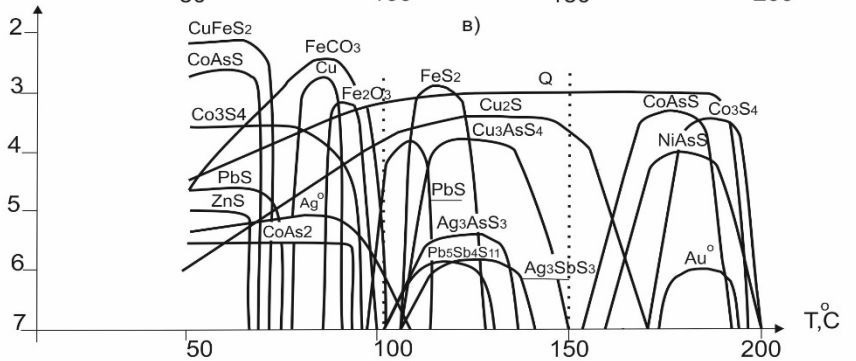
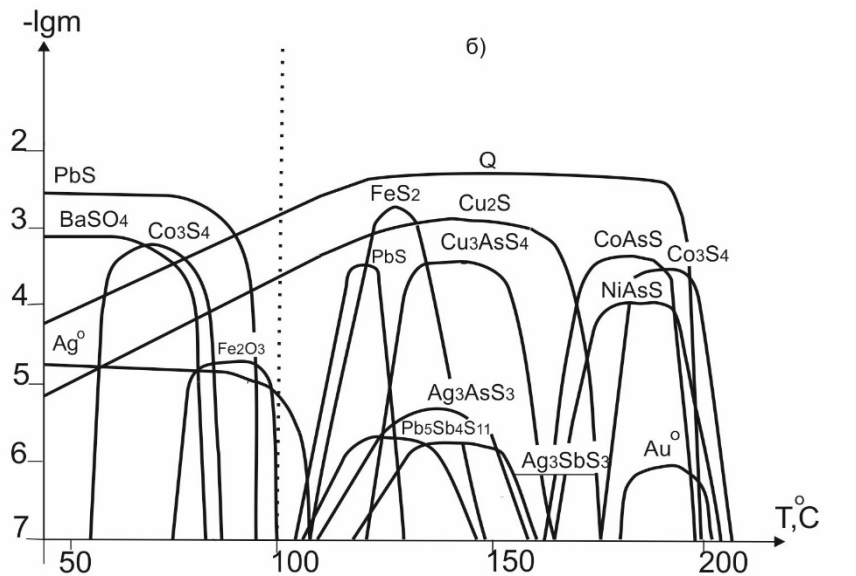
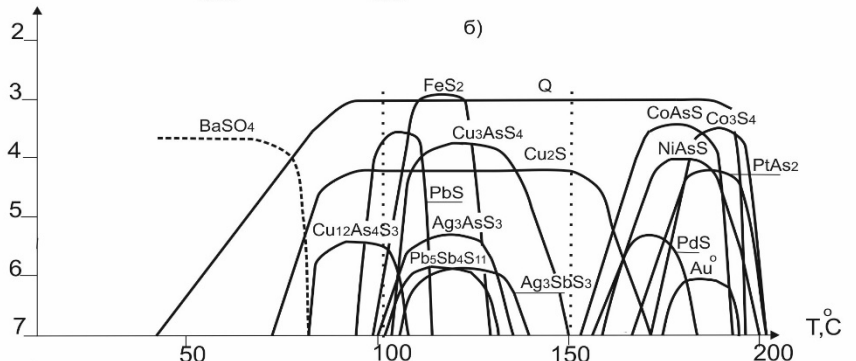
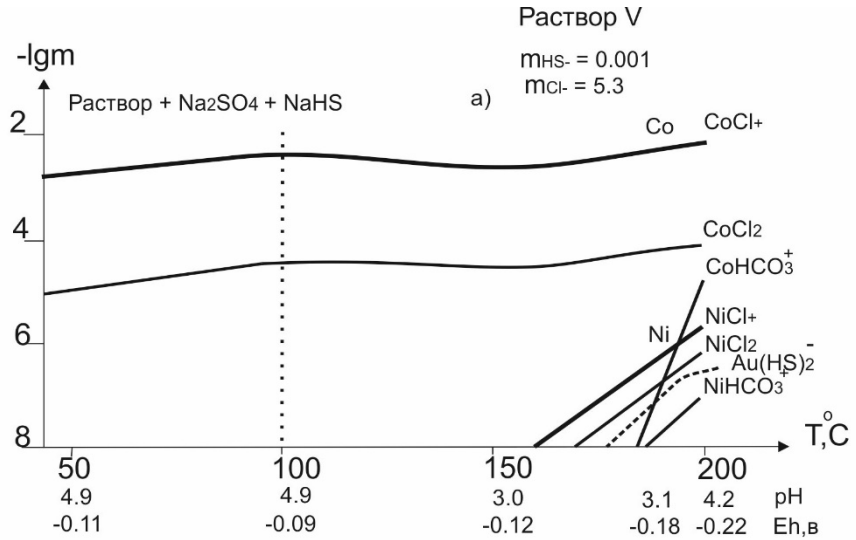
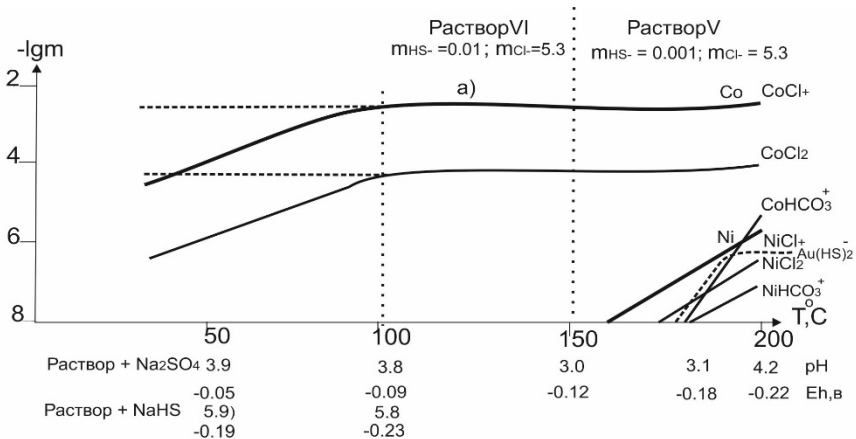
3. Концентрация основных химических форм As, Ni, Co, Ag и Hg в модельном растворе (III) в зависимости от T, Eh и pH раствора: а) модель охлаждения; б) отложение минералов Ni, Co, Ag°, Au°, Hg_{liq}

4. Результат моделирования процесса взаимодействия хлоридно-сульфидного раствора IV при T=50°C с медистым сланцем Мансфельда [модель раствор-порода, где (w)-кг раствора, (r)-кг породы]: а) модель охлаждения; б) отложение минералов Ni, Co, Ag°, Au°, Hg_{liq}



5. Результаты моделирования процесса охлаждения: раствора V при T=200-150°C, раствора VI при T=150-100°C ж процесса смешения: раствора VI при 100°C с Na₂SO₄ (б), с NaHS (в)

6. Результаты моделирования процесса: охлаждения (а) растворов V и VI в интервале T=200-100°C и процесса смешения (б) раствора при T=100°C с Na₂SO₄ + NaHS



Возможная металлоносность растворов по Co и Ni (моль/кг H₂O) при 50°C

	Исходные	После титрования породы
Co	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-2} - 7.6 \cdot 10^{-3}$
Co/Ni	10 : 1	
Ni	$5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}$
Co	$7 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-3} - 6.7 \cdot 10^{-3}$
Co/Ni	1 : 4	
Ni	$3 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-4} - 3.3 \cdot 10^{-4}$
Co	$5 \cdot 10^{-4}$	$7.6 \cdot 10^{-3}$
Co/Ni	7 : 1	
Ni	$7 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$

Содержания благородных металлов в рудах гидротермальных кобальтовых месторождений АССО

Месторождение	Тип	Регион	Au (г/т)	Ag (г/т)	Pt (г/т)	Pd (г/т)
Каракуль	Co-As	Алтай	0,03-3,2	5,0-26	до 0,15	до 0,11
Владимировское	Co-As	Алтай	0,043-0,54	4,3-160	до 0,12	до 1,08
Абаканское	Co-As	Хакасия	до 0,2	до 3,1	0,01	до 0,02
Могенбурен	Cu-Co-As	Тува	до 0,0058	до 140	-	-
Мерген-булак	Cu-Co-As	Монголия	до 0,024	12-1200	-	-
Сергиевское	Cu-Co-As	Монголия	до 0,46	до 34	-	-
Хараджуль	Cu-Co-As	Хакасия	0,45-1,2	84-493	0,01	до 0,016
Хову-Аксы	Ni-Co-As	Тува	до 1	до 290	-	-
Асхатин-гол	Ni-Co-As	Тува	до 1	70-1700	-	-
Акольское	Ni-Co-As	Тува	0,015	до п*1 кг/т	-	-
Сагсайское	Hg(Co)	Монголия	до 4,5	до 140	-	-

Изотопный состав кислорода и углерода в растворах кобальтовых месторождений

Месторождение, Район	Минерал	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ H_2O раствора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	D^{13}C , ‰	T, °C гом.
Бу-Аззер (Марокко) Хову-Аксы	доломит	от -1.0 до + 3.7	от -6.3 до +5.9	от +0.5 до -6.5	280-170
	кальцит	от 0.0 до + 1.6			240-140
	кальцит	от + 2.5 до +3.7	от -4.5 до +4.8	от +0.5 до -6.5	260-110
Кобальт-Онтарио Актепе	кальцит		От + 0,9 до + 6,4	От - 2,3 до - 4,1	160-100
	кальцит	от -8.0 до -22.0			130-80

Выводы:

1. Для большинства собственно кобальтовых месторождений установлен последевонский нижний возрастной предел оруденения, в то время как о верхнем возрастном пределе можно судить по факту пересечения арсенидными жилами даек долеритов, датируемых ранним мезозоем.

2. Для рудных полей в контурах рассмотренных кобальтоносных зон характерны:

а) размещение на участках пересечения региональных разломов глубинного заложения, характеризующихся длительным пульсационным развитием с отчётливой кобальт-мышьяковой геохимической минерализацией;

б) расположение в непосредственной близости от областей накопления соленосных отложений и контроль их размещения интервалами зон глубинных разломов, которые были активизированы в позднем палеозое и мезозое;

в) приуроченность к относительно жёстким структурным блокам площадью 15–20 км², в пределах которых напряжённость складчатых форм обусловлена влиянием разрывной тектоники;

г) тесная пространственно-структурная связь зон рудоотложения с самостоятельными малыми интрузивами субщелочных гранитоидов повышенной основности и полями развития даек пёстрого состава (долеритов, лампрофиров, лимбургитов, габбро-диабазов, микрогаббро, плагиопорфиров, андезитов, трахисиенитов, сиенит-порфиров, гранофиров);

3. Кобальтоносные зоны Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии вмещают месторождения, отличающиеся сходством минерального состава и физико-химических условий гидротермального рудообразования.
4. Термодинамически обоснована полигенность источников вещества и растворов в формировании собственно кобальтовых месторождений, а также важная роль процессов смешения и разбавления эндогенных растворов метеорными водами.
5. Реализована методика исследования особенностей генезиса собственно кобальтовых гидротермальных месторождений, включающая: минералогическое изучение состава руд различных формационных типов; геохимические исследования продуктивной кобальтовой минерализации для выяснения особенностей распределения Au, Ag и ЭПГ в рудах разных минеральных типов; сравнительный анализ состава растворов и газовой фазы флюидных включений.
6. Определены параметрические характеристики состава рудообразующих флюидов разных типов кобальтовых месторождений для решения вопроса о роли физико-химических факторов в накоплении повышенных концентраций в них благородных металлов.
7. На основе термодинамического компьютерного моделирования установлены главные факторы рудоотложения на кобальтовых месторождениях, выявлены физико-химические параметры отложения самородных золота и серебра, а также ртутистого серебра, платины и палладия в рудах этих месторождений.

Спасибо за внимание!

