

Лекция 12

Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых.

Геохимические поиски – один из наиболее эффективных и широко применяемых методов выявления и количественной оценки рудных месторождений.

Метод базируется на четырех фундаментальных положениях геохимии и теории геохимического поля и его локальных аномалий.

Разработан и впервые применен в СССР в 30-е годы прошлого столетия .

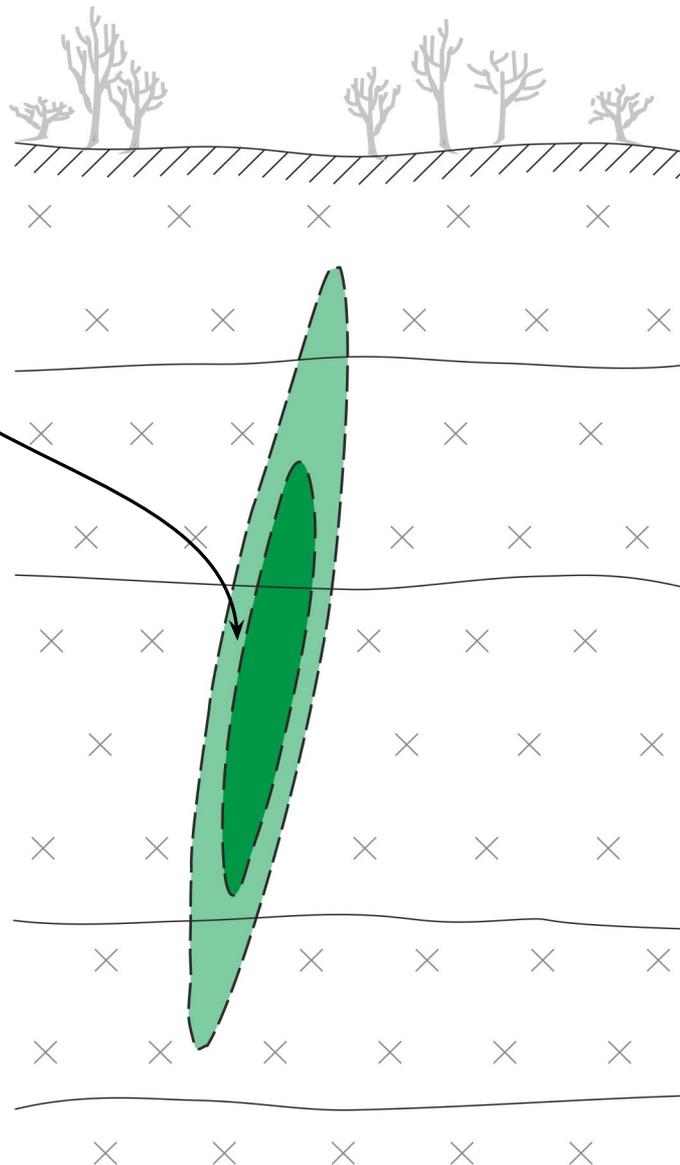
Первичные ореолы рудных месторождений

Рудное тело и его первичный ореол

✓ Граница кондиционные/
/некондиционные
содержания носит
экономический характер;

✓ площадь первичных
ореолов в плоскости
разреза нередко
значительно превышает
площадь рудного тела;

✓ по масштабу рудной
минерализации:
промышленное рудное
тело (месторождение) →
непромышленное
рудопроявление →
рудная точка →
минералогическая
находка



Уровни среза:

слепой

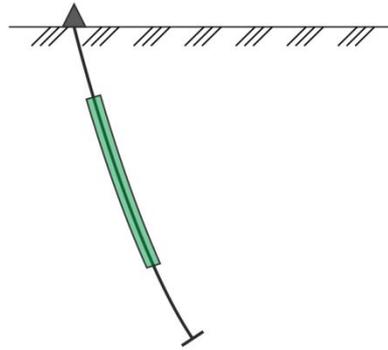
надрудный

рудный

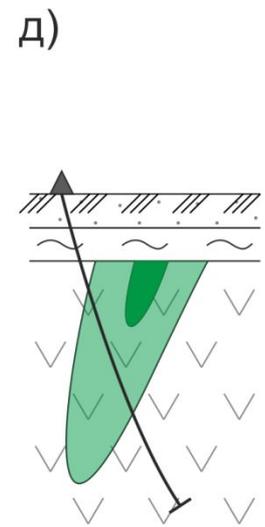
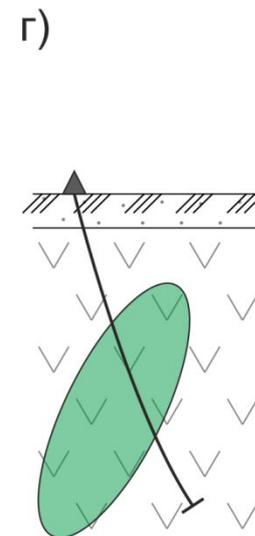
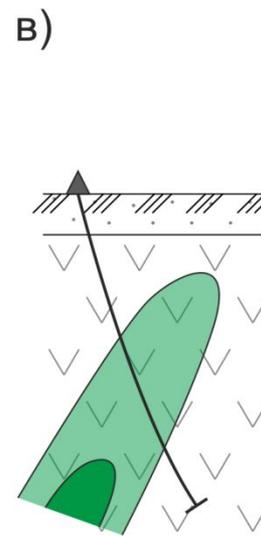
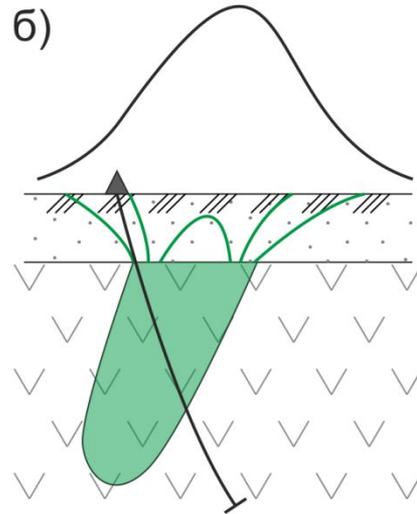
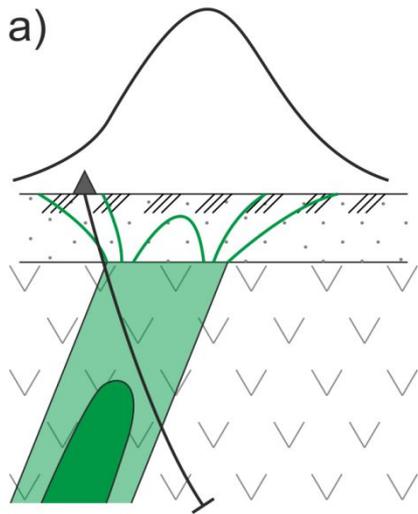
подрудный

рудное тело и
его первичный ореол
ликвидированы

Скважиной пересечена непромышленная минерализация...

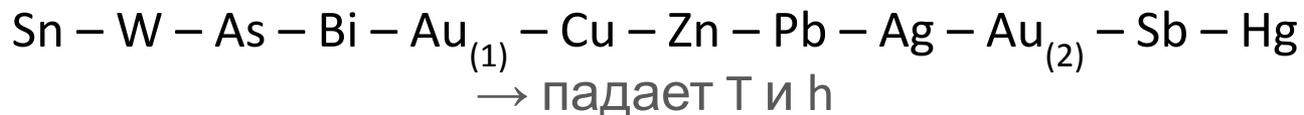


Возможные варианты:

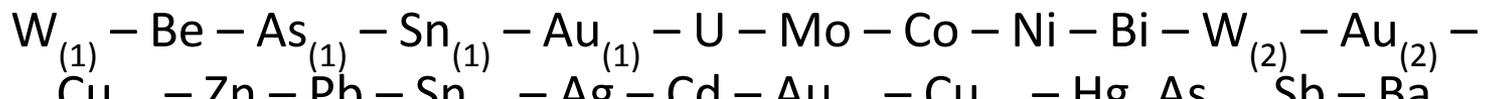


Зональность рудоотложения

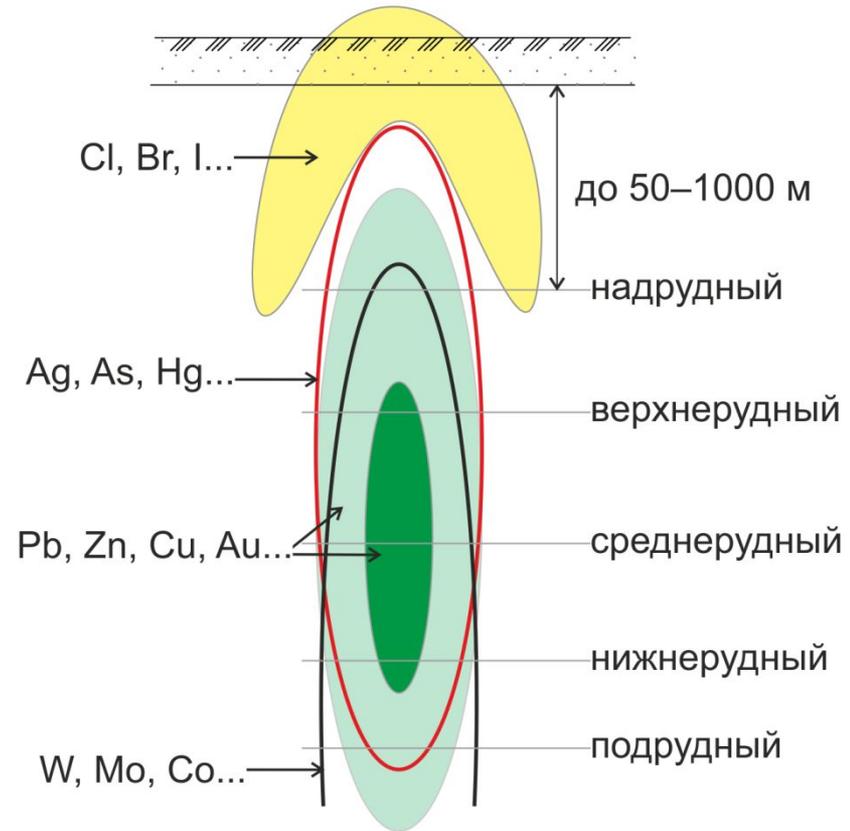
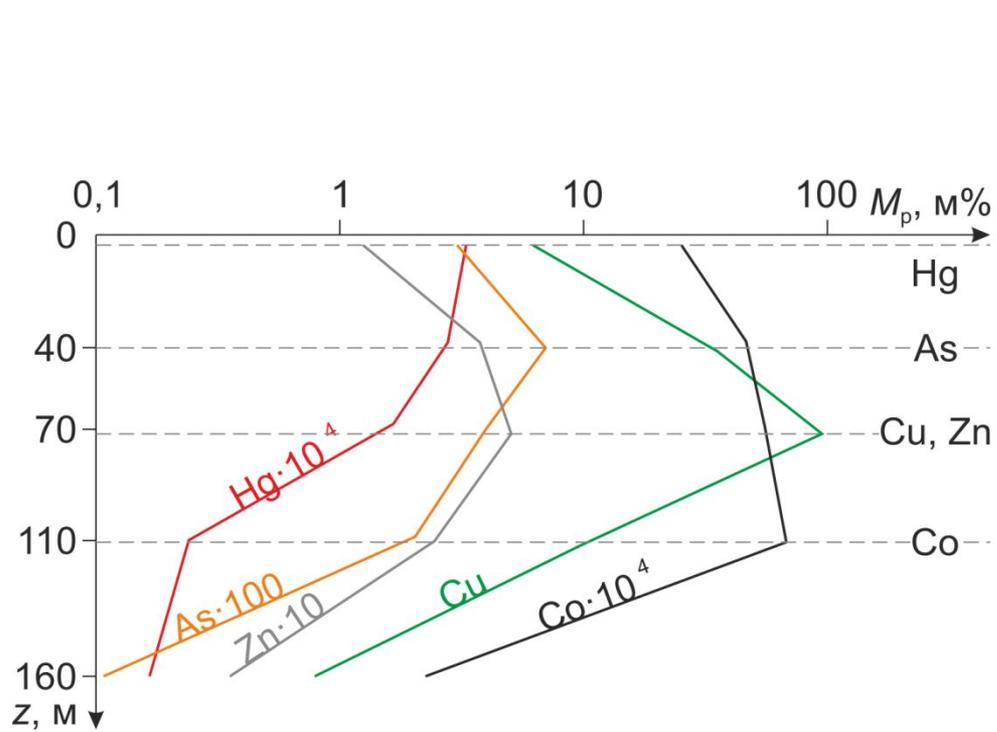
- ✓ Осаждение рудных минералов из гидротерм вследствие ΔT , Δp , Δp_H , ΔE_h , взаимодействия раствор – вмещающие породы – другие воды;
- ✓ поскольку состав гидротерм многокомпонентный, а условия осаждения различных компонентов разные, возникает зональность (минералогическая, химическая);
- ✓ зональность по падению (осевая, вертикальная), простиранию (продольная) или по мощности (поперечная) рудной зоны;
- ✓ один из первых предложенных вертикальных рядов — Уильям Эммонс, 1924 г.:



- ✓ обобщенный ряд (>300 месторождений):



Вертикальная зональность гидротермальных месторождений



Геохимическая зональность месторождений

- ✓ Магматические месторождения:
ликвационная, кристаллизационная
дифференциация

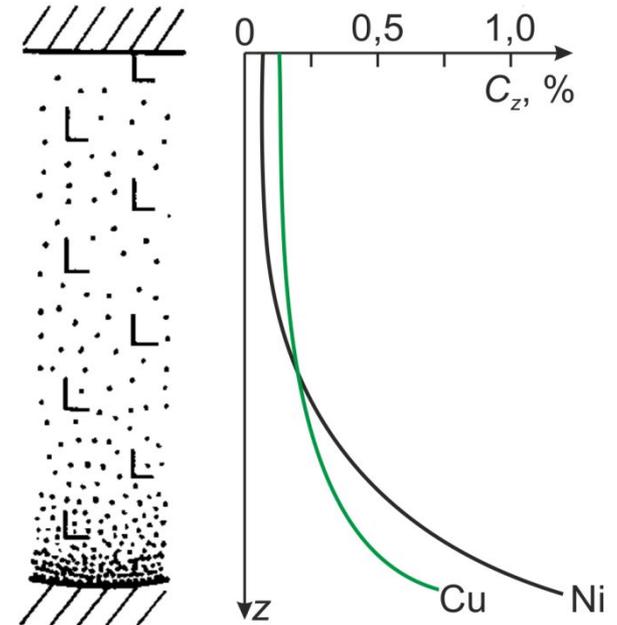
Пентландит $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ $\rho = 4,6-5 \text{ г/см}^3$ →
Халькопирит CuFeS_2 $\rho = 4,1-4,3 \text{ г/см}^3$

- ✓ Осадочные месторождения: литолого-
стратиграфический, фациальный контроль
+ геохимические барьеры

Триады Страхова (по мере удаления от
береговой линии:

Al – Fe – Mn (гумидный литогенез)

Cu – Pb – Zn (аридный литогенез)



Теоретическое распределение содержаний металла

В простейшем случае:

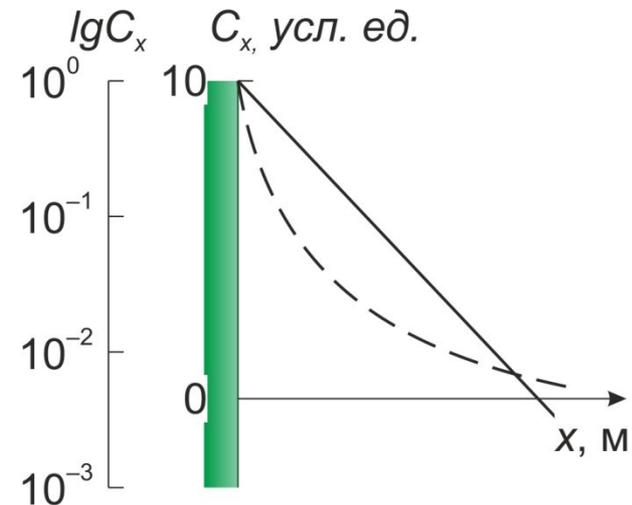
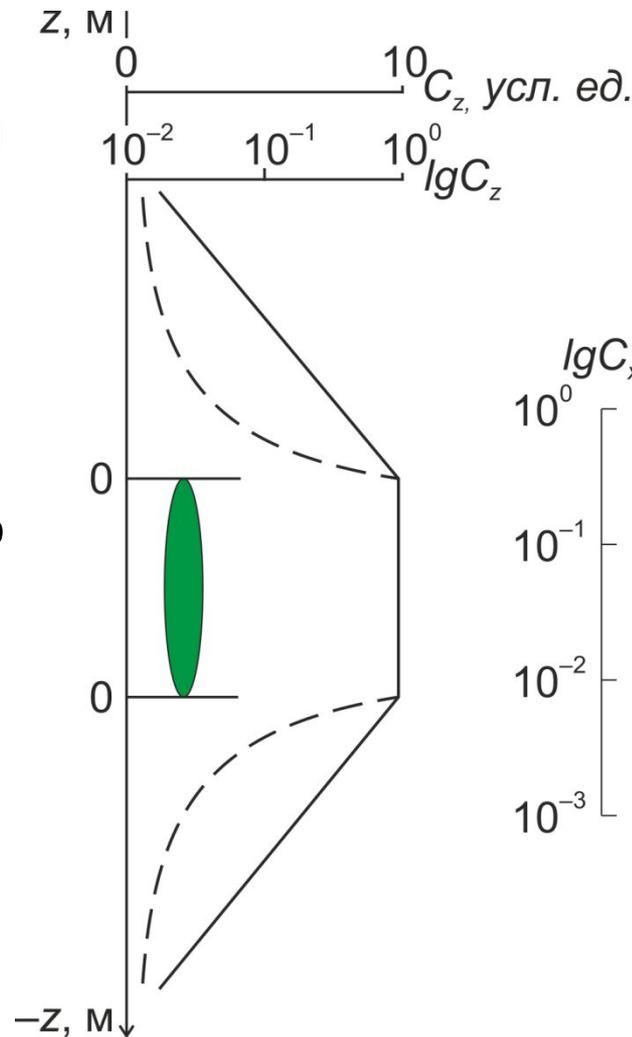
- ✓ в рудной зоне концентрация рудного элемента постоянна и равна C_0 (условия насыщения);
- ✓ в надрудном и подрудном первичном ореоле изменение концентраций по экспоненциальному закону:

$$C_z = C_0 e^{-\lambda_1 z} + C_\Phi$$

($\lambda_1 \equiv$ условия инфильтрационного рудоотложения)

$$C_x = C_0 e^{-\lambda_2 x} + C_\Phi$$

($\lambda_2 \equiv$ диффузия в боковые породы)



Показатели зональности

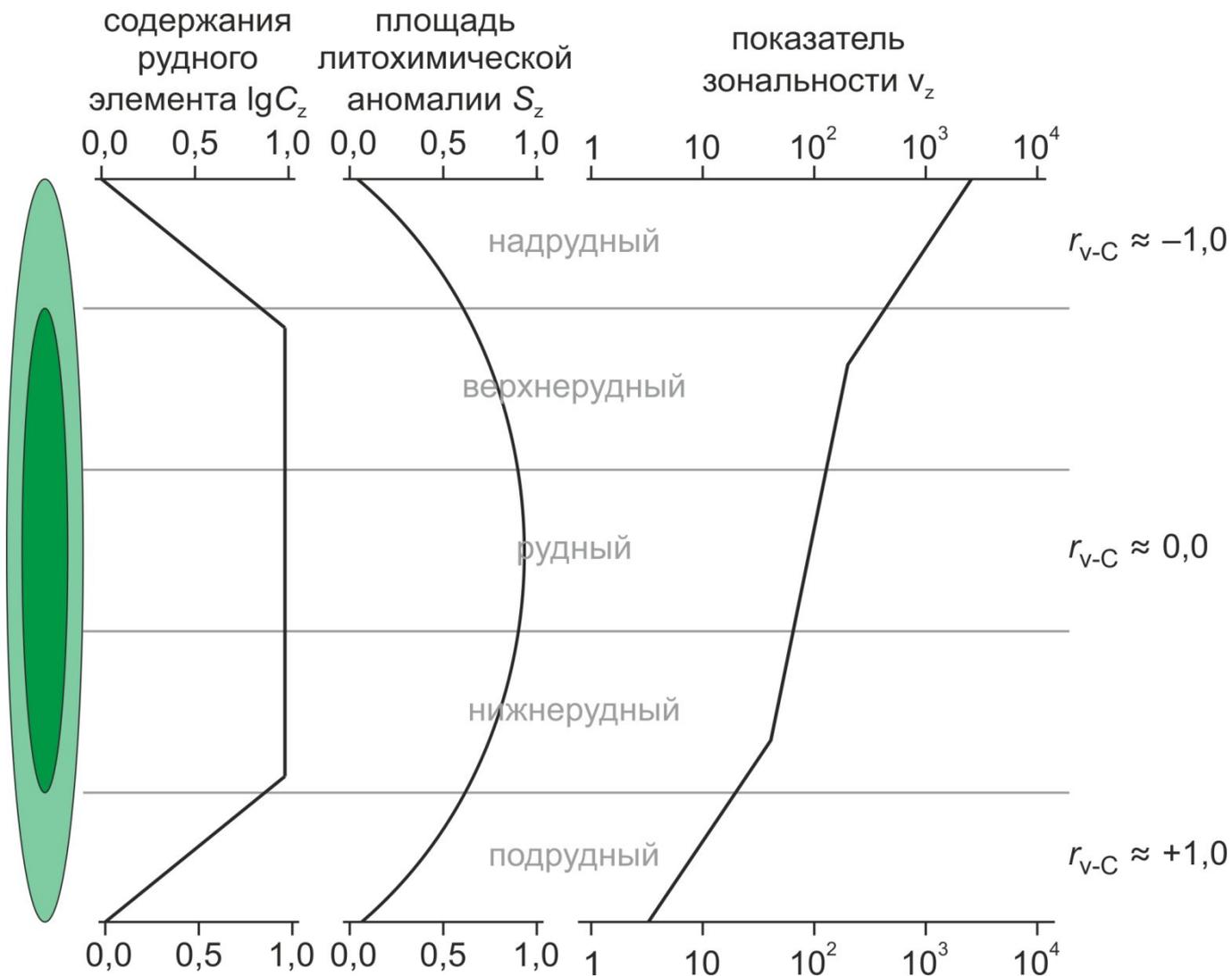
- ✓ Изменение абсолютных содержаний не является зональностью;
- ✓ Геохимическая зональность — отражение зональности минералогической (соотношение между количествами минералов, появление новых минеральных форм, изменение состава примесей);
- ✓ Зональность рассматривается в контуре $C > C_A$;
- ✓ Например, $v = \text{Pb} / \text{Zn}$, где символы элементов — это их продуктивности (м%, м²%) или содержания;
- ✓ Могут быть отношения нескольких элементов: $v = \text{AgPbZn}/\text{CuBiCo}$;

✓ Как правило,

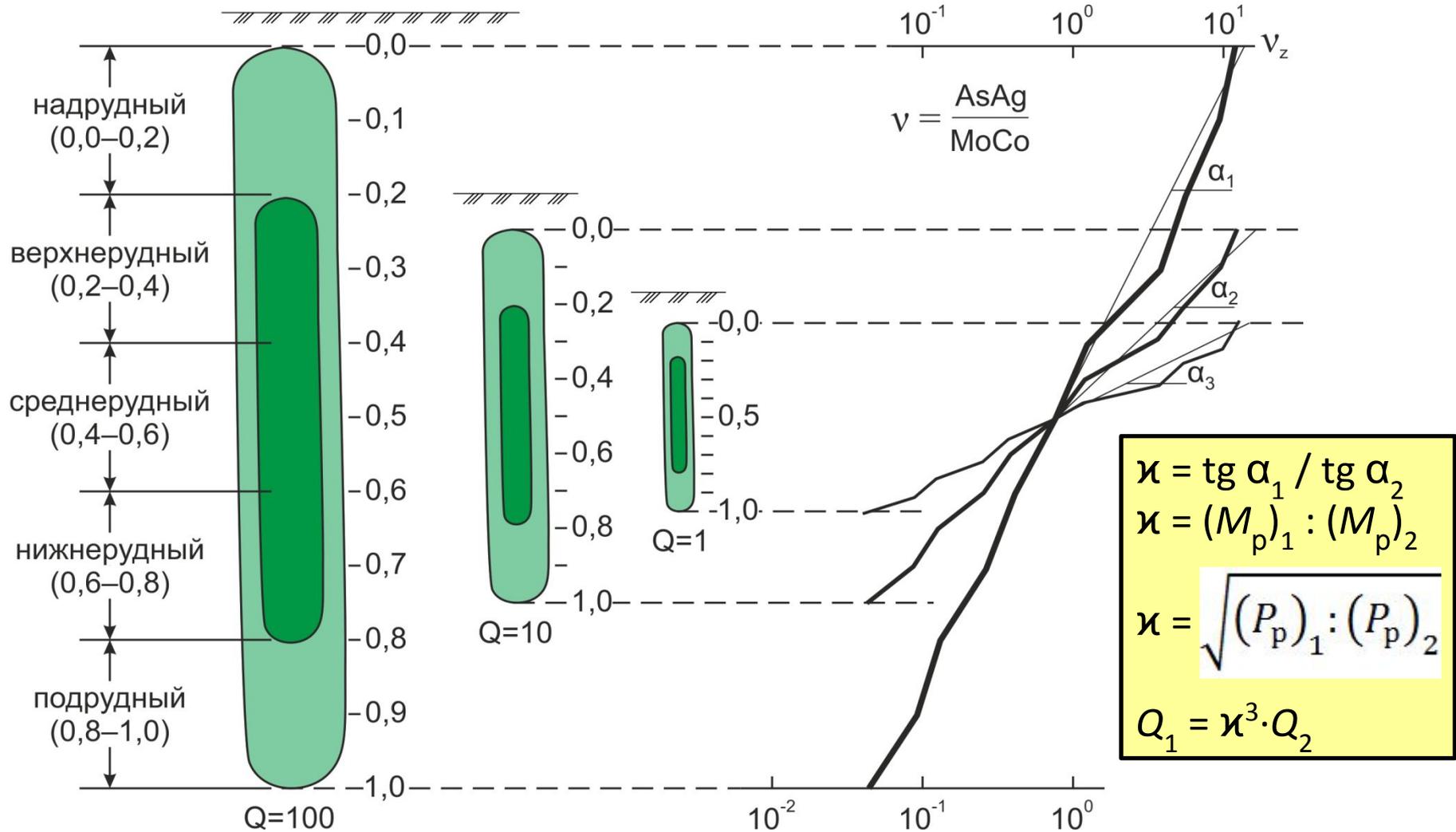
✓ Векторная величина $\text{grad } v = \frac{dv}{dS} = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}$

(x — направление вкост, y — по простиранию, z — по падению)

Решение поисково-оценочных задач



Генетически однотипные месторождения различной крупности



Исследование вертикальной зональности месторождений

1. Опробование:
 - керн скважин и стенки подземных выработок, погоризонтное (через 50–100 м),
 - желательно с выходом в обе стороны в область фона;
 - эталонные месторождения должны быть опробованы в максимально полном охвате (в идеале интервал 0,0–1,0);
2. Анализ (на 35–40 элементов);
3. Изображение результатов анализа (графики, разрезы, карты);
4. Выбор интервалов расчета продуктивностей или содержаний;
5. Определение рядов зональности (по центрам тяжести графиков парных отношений между элементами);
6. Поиск показателей зональности:
 - монотонно изменяющихся;
 - высококонтрастных.

программа

НЮ-2

Ню-2: входные данные (пример)

Медно-порфировое месторождение Находка,

Чукотка:

RL	От	До	Ag	As	Au	Bi	Cd	Cu	Fe	Mn	Mo	Pb	Sb	Se	Te	Zn
			г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	%	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т	г/т
RL32	0	100	1.5	69	0.2	2.7	0.8	1893	2.9	693	24.3	57	6.0	5.3	5.2	184
RL32	100	200	1.7	73	0.2	2.9	1.0	1203	3.2	938	37.4	95	8.5	5.5	5.4	212
RL32	200	300	1.0	64	0.2	2.6	0.6	1415	2.8	535	57.4	25	7.0	5.6	5.0	73
RL32	300	400	0.9	58	0.2	2.6	0.8	2027	2.9	838	56.7	48	4.4	5.1	5.0	138
RL32	400	500	0.5	14	0.1	2.5	0.7	2329	2.7	394	42.0	31	4.1	5.0	5.0	87
RL32	450	500	0.5	14	0.1	2.5	0.7	2329	2.7	394	42.0	31	4.1	5.0	5.0	87
RL32	500	600	1.2	47	0.3	2.5	3.0	2020	3.4	1178	9.4	303	3.3	5.8	5.0	623
RL33	0	100	0.9	88	0.1	2.6	0.6	2256	3.4	409	21.9	32	8.8	5.8	5.1	87
RL33	100	200	0.8	133	0.1	2.7	0.6	2318	3.5	373	24.8	23	13.1	6.1	5.1	81
RL33	200	300	0.9	84	0.2	2.8	0.5	2956	3.4	319	35.3	15	8.4	6.5	5.1	56
RL33	300	400	0.6	96	0.1	2.7	0.6	2423	3.2	321	47.9	21	7.9	5.6	5.6	40
RL33	400	500	0.5	109	0.1	2.5	1.0	1883	2.7	270	35.9	58	12.2	5.5	5.1	97
RL33	500	600	0.3	15	0.0	2.5	0.6	2630	2.1	147	53.5	14	4.6	5.3	5.0	32
RL34	0	100	0.7	112	0.2	2.5	0.5	1419	3.9	620	14.9	24	9.3	5.5	5.1	70
RL34	100	200	0.8	104	0.2	2.6	0.6	1411	3.8	731	19.9	29	8.4	5.4	5.0	93
RL34	200	300	1.6	140	0.3	2.7	0.8	2464	3.7	658	25.7	65	10.5	6.5	5.5	169
RL34	300	400	1.3	113	0.4	2.7	1.0	3019	4.7	707	20.4	66	7.4	5.9	5.1	162
RL34	400	500	1.5	151	0.4	3.1	0.9	4774	4.5	629	16.8	52	8.1	7.3	5.1	129

Ню-2: результаты расчетов (пример)

RL32

Центры тяжести графиков парных отношений:

Pb	Cd	Zn	Cu	Fe	Se	Te	Mn	Bi	Au	Mo	Sb	Ag	As
5.01	4.84	4.76	4.47	4.20	4.18	4.16	4.16	4.12	4.10	4.02	3.68	3.61	3.39

Ряд зональности (сверху вниз): Pb–Cd–Zn–Cu–Fe–Se–Te–Mn–Bi–Au–Mo–Sb–Ag–As

<...> (аналогичные данные для RL33, RL34)

Коэффициенты ранговой корреляции между рядами:

	RL32	RL33	RL34
RL32	1.00	0.49	0.38
RL33	0.49	1.00	–0.10
RL34	0.38	–0.10	1.00

Общий ряд зональности (сверху вниз): Cu–Pb–Cd–Zn–Se–Fe–Te–Mo–Bi–Au–Ag–Mn–As–Sb

Показатели первого порядка:

Число рассмотренных показателей: 91

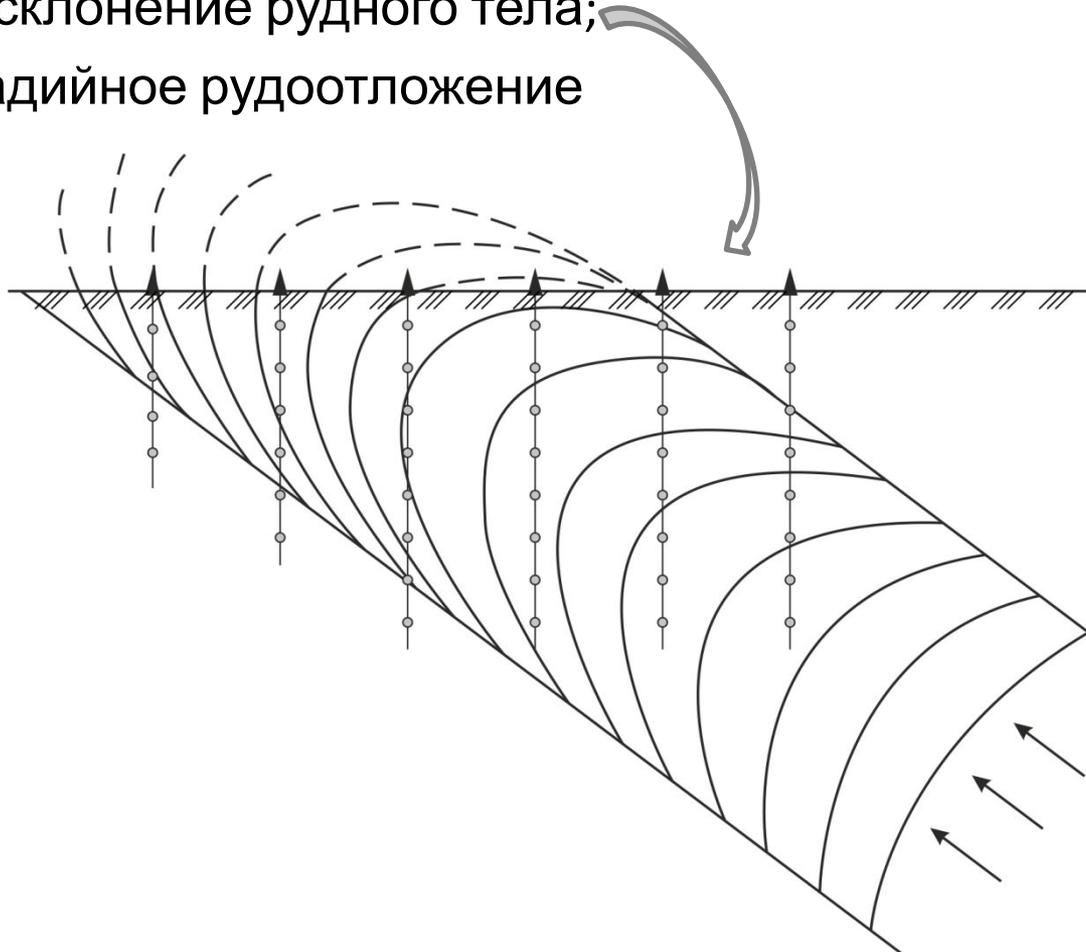
Число монотонных показателей: RL32 – 1 (Ag/Cd убыв.), RL33 – 2 (Bi/Fe возраст., Mn/Te убыв.), RL34 – 8 (Ag/Sb возраст., As/Cu убыв., As/Sb возраст., Au/Fe возраст., ...)

Число общих монотонных показателей – 0

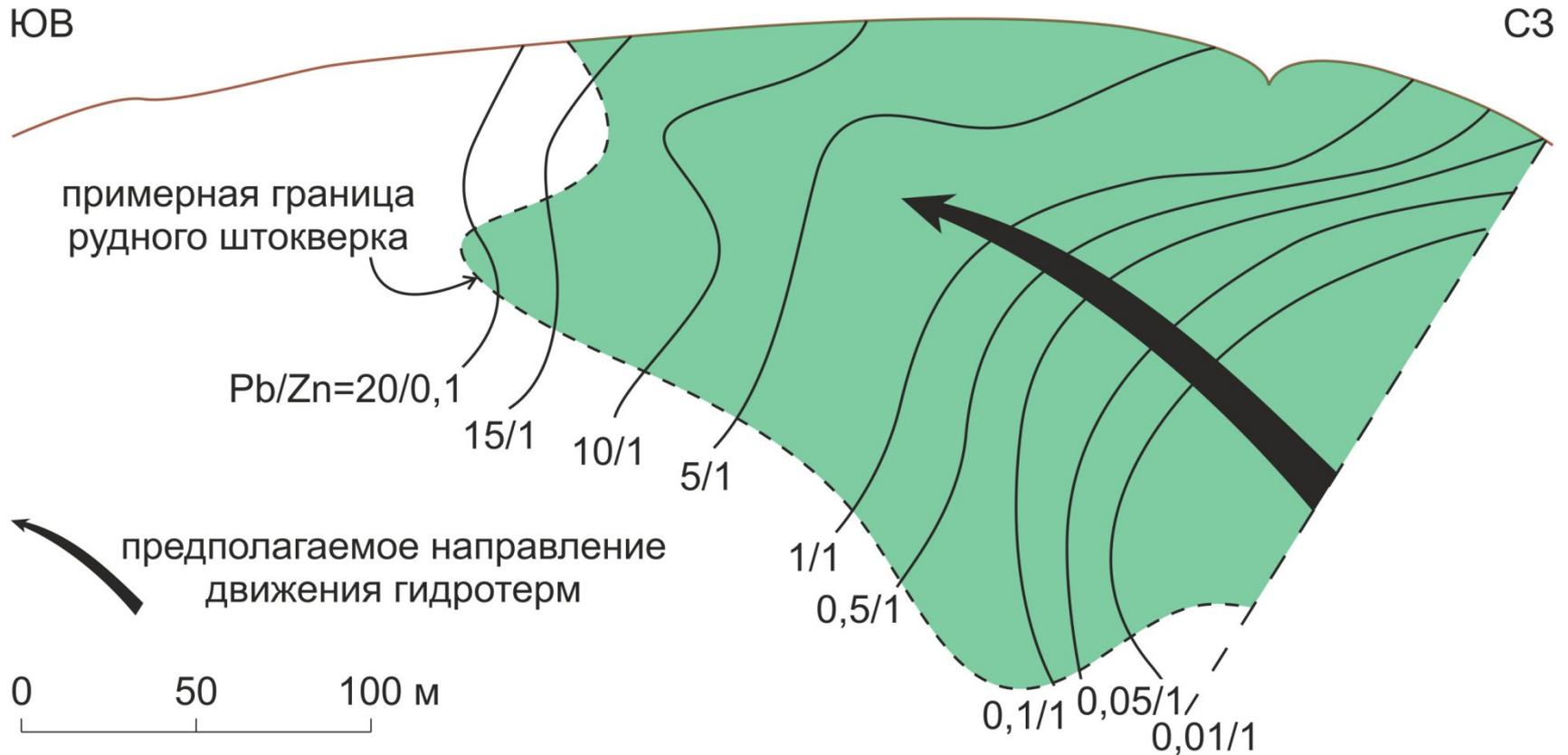
<...> (аналогичные данные для показателей второго порядка)

Трудности в выявлении зональности

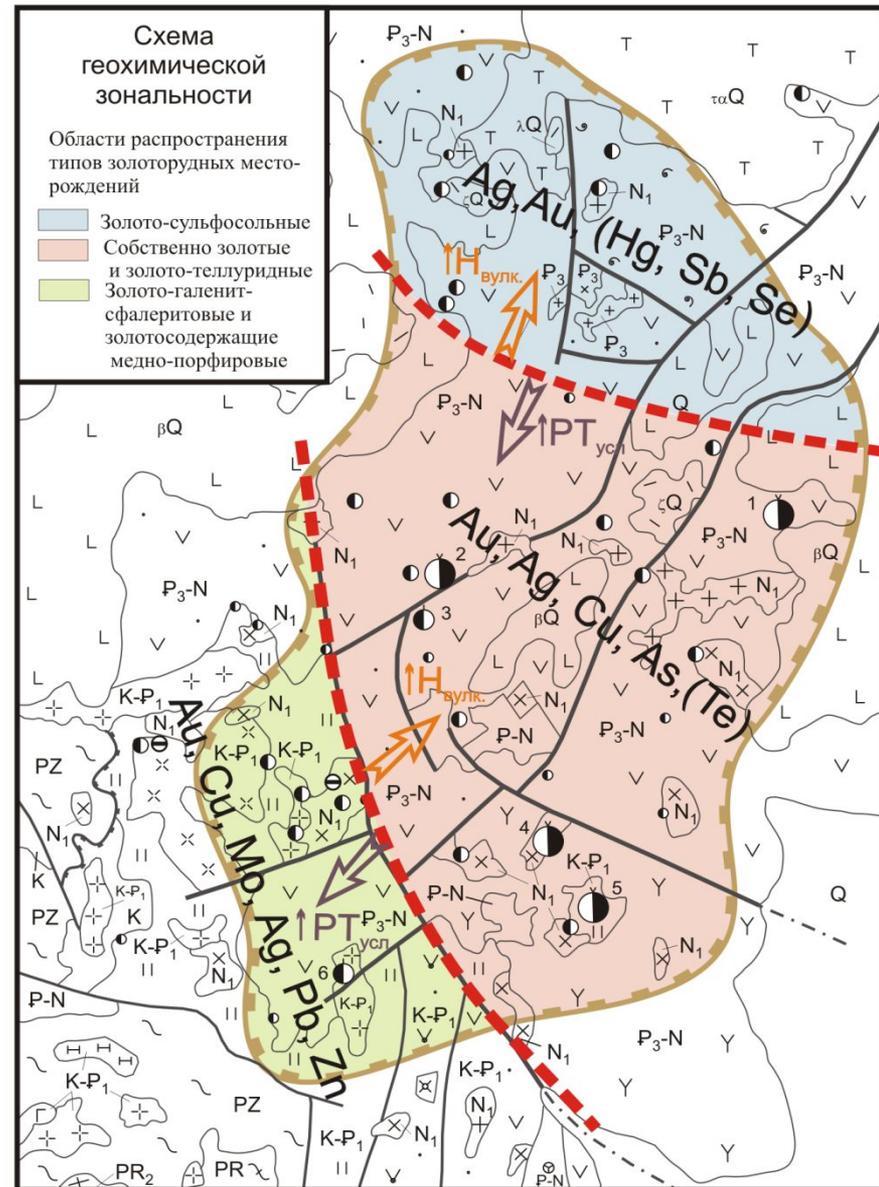
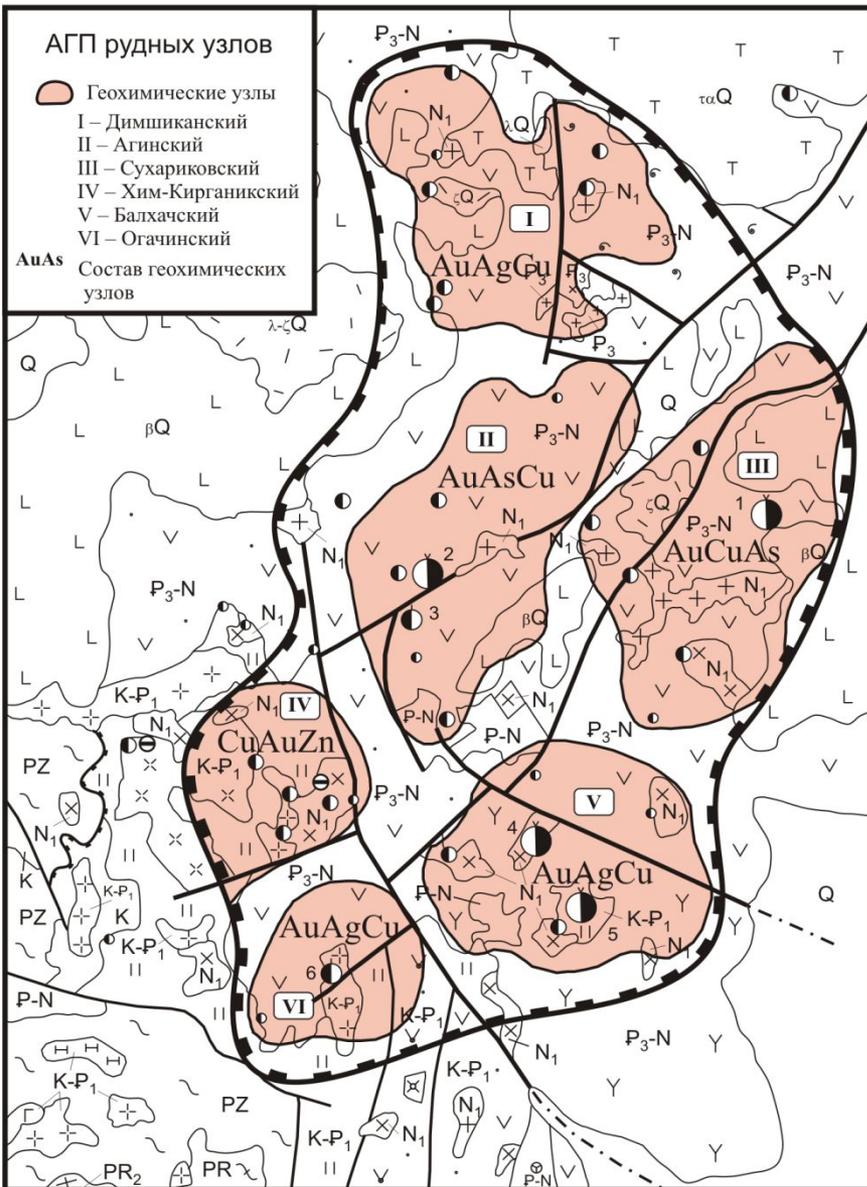
- ✓ Кулисообразное размещение рудных тел (совмещение порудного ореола одного рудного тела с надрудным ореолом другого);
- ✓ «центриклинальная» зональность;
- ✓ пологое склонение рудного тела;
- ✓ многостадийное рудоотложение



Блайклиппен, Гренландия (по У. Х. Гроссу)

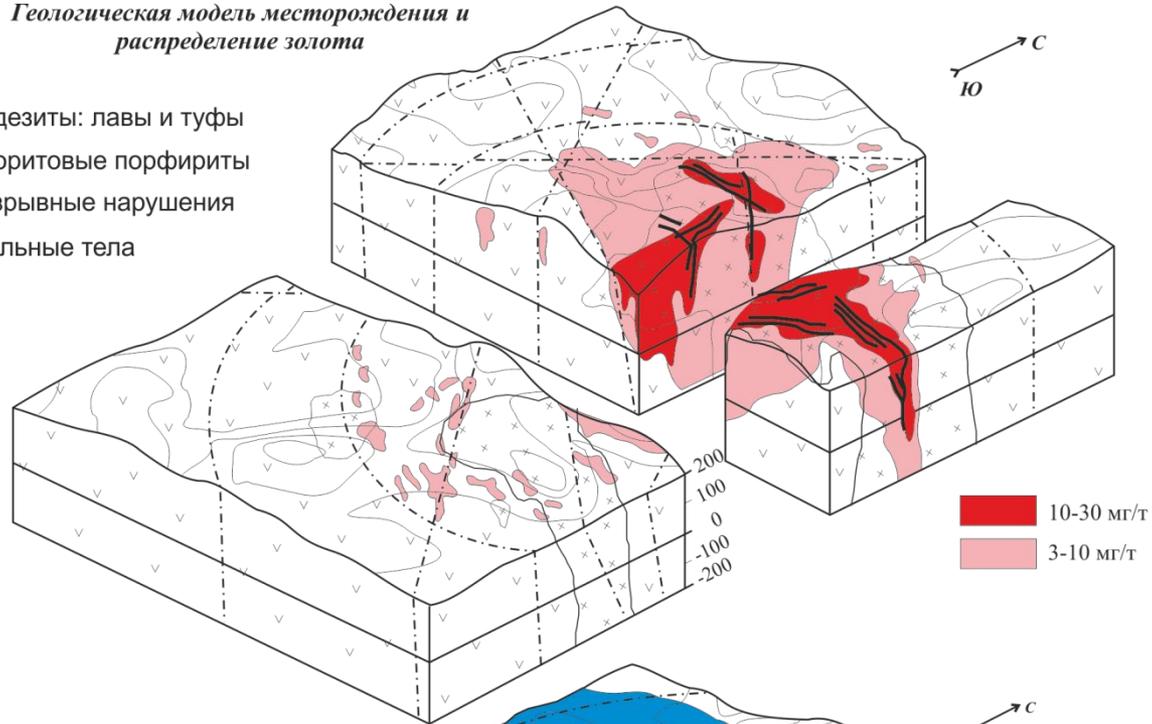


АГП рудных узлов и схема геохимической зональности ЦКРР

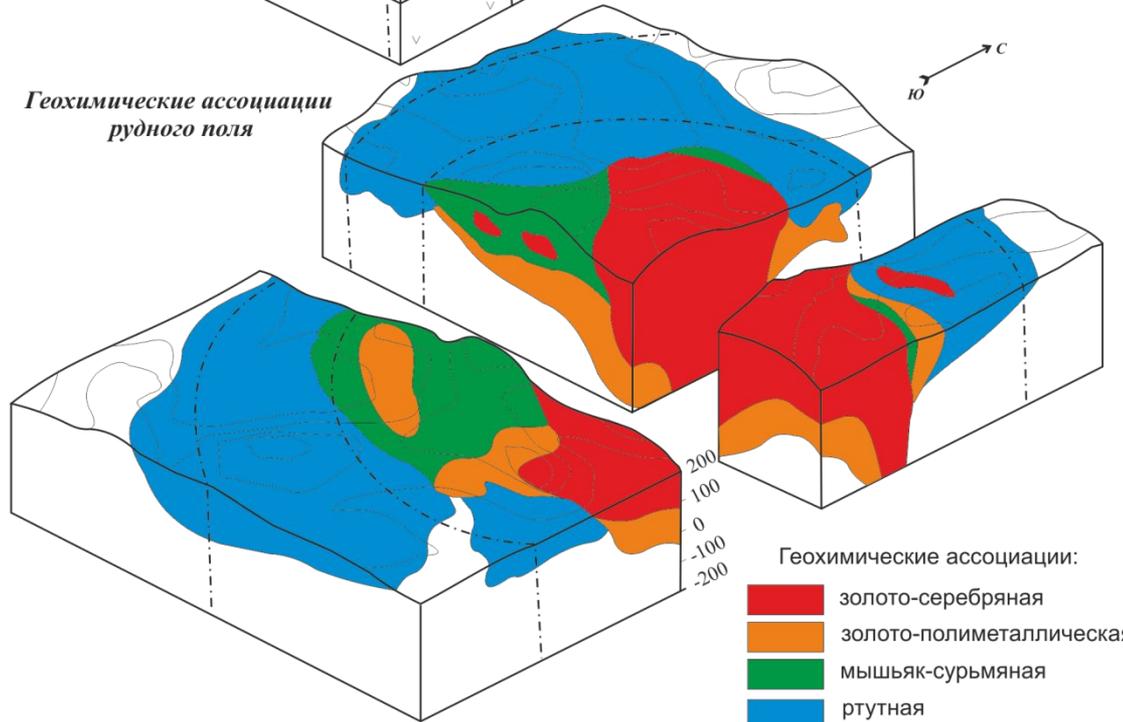


Геологическая модель месторождения и распределение золота

- ∇ ∇ ∇ Андезиты: лавы и туфы
- x x x Диоритовые порфириды
- Разрывные нарушения
- Жильные тела

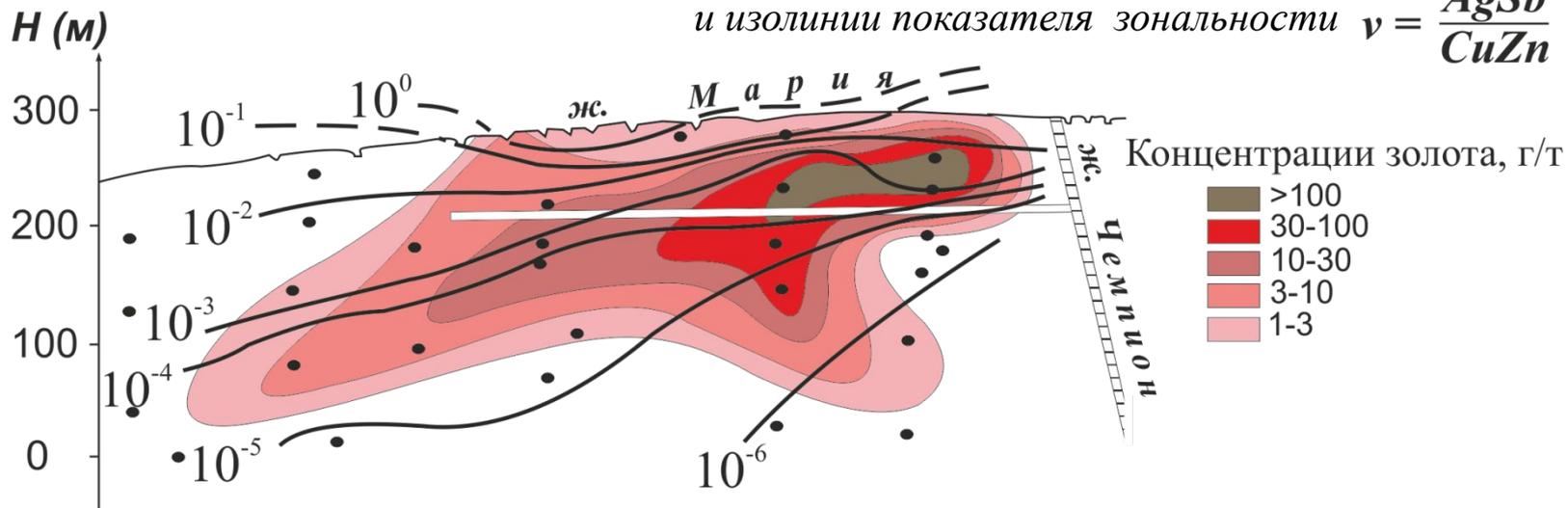


Геохимические ассоциации рудного поля

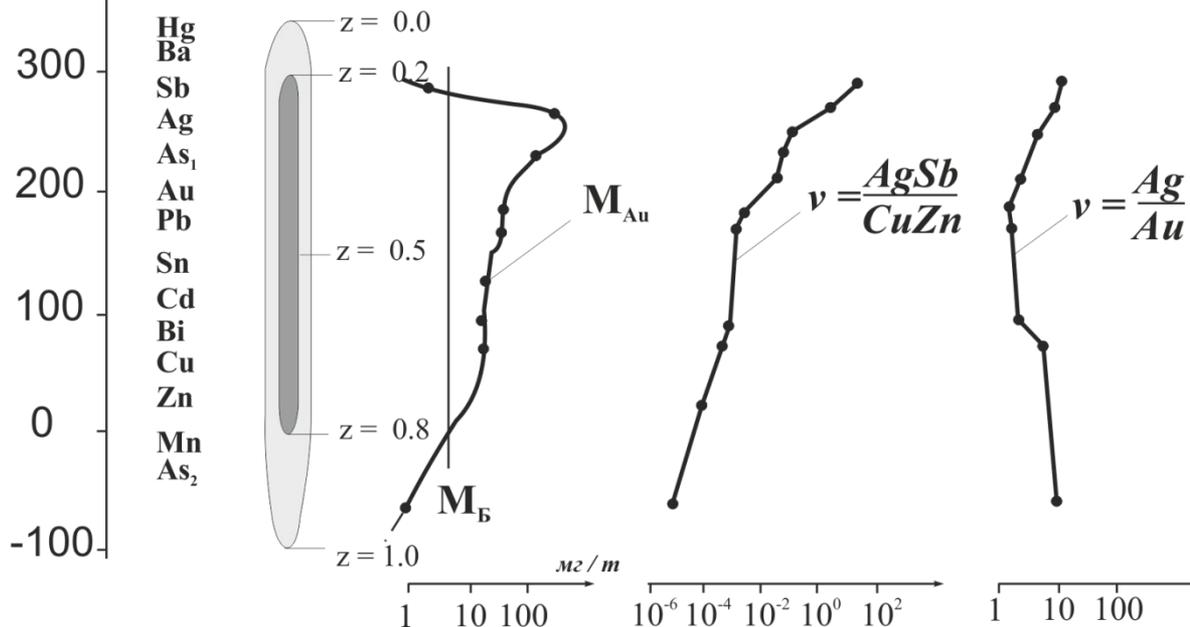


Продольная зональность Распределение золота

и изолинии показателя зональности $\nu = \frac{AgSb}{CuZn}$



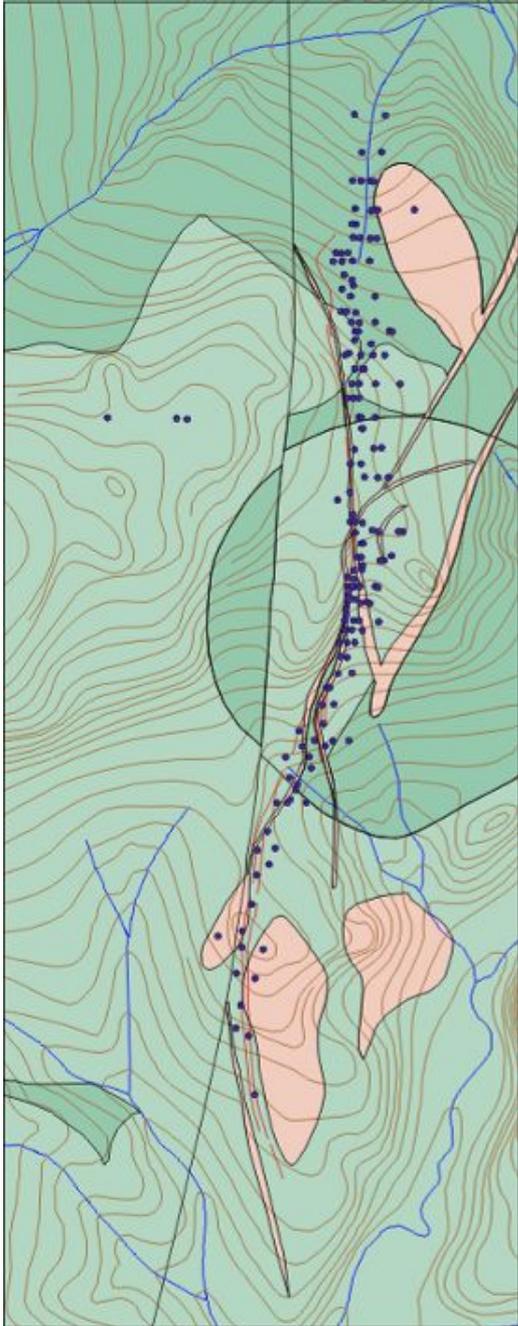
Вертикальная зональность



Крупнейшее в России золото-серебряное месторождение Купол (Чукотка)

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

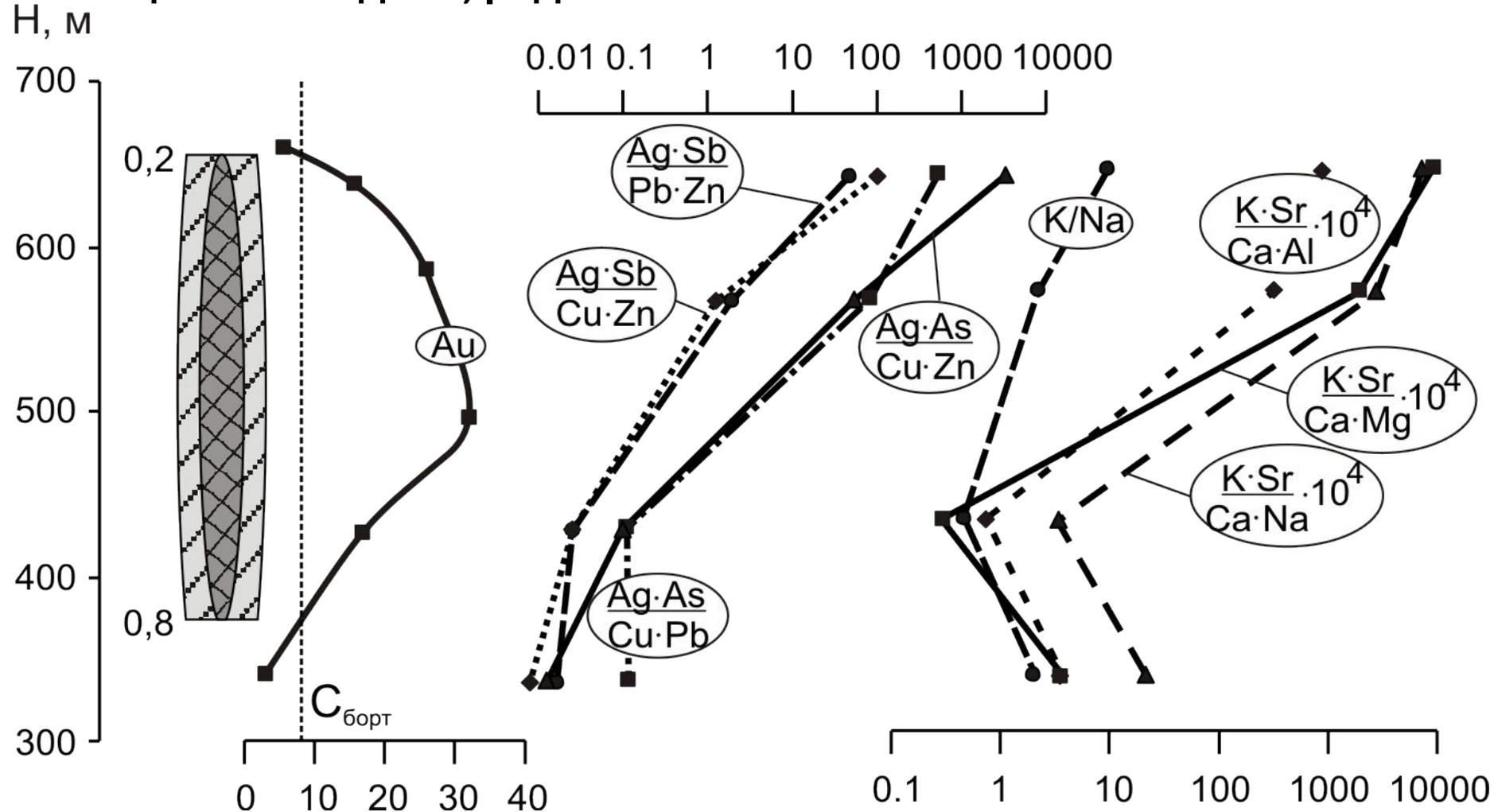
- λK_2 Поздний мел. Риолиты, риодациты
- αK_2 Поздний мел. Андезиты
- K_2 Верхний мел. Туфы среднего состава
- Кварцевые жилы
- Геологические границы
- Тектонические нарушения
- Скважины



По материалам ООО
«Bema-Gold»

км 0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 км

Обобщенные модель, ряды и геохимические показатели зональности



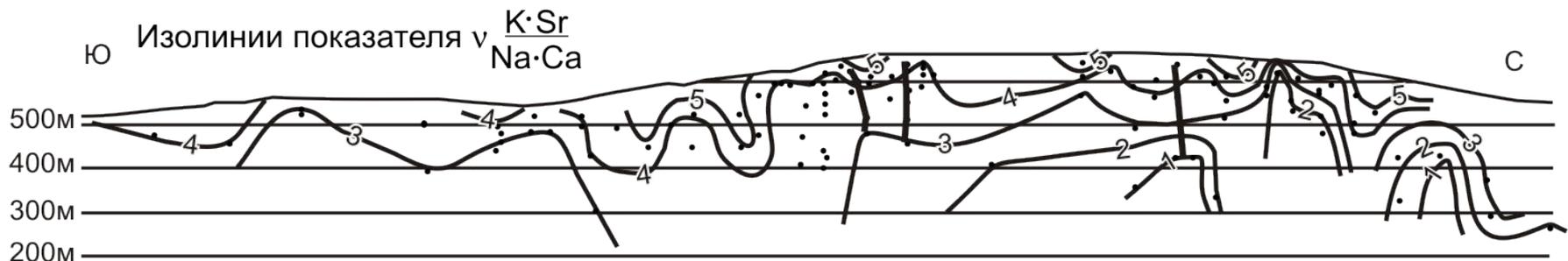
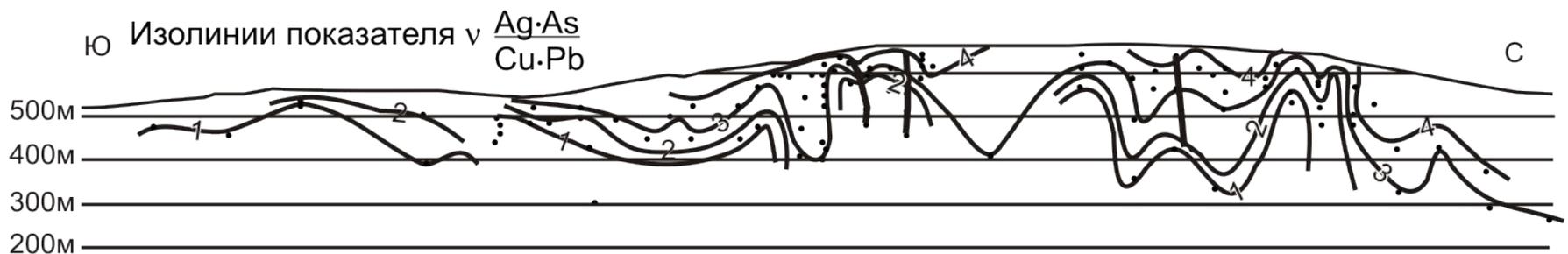
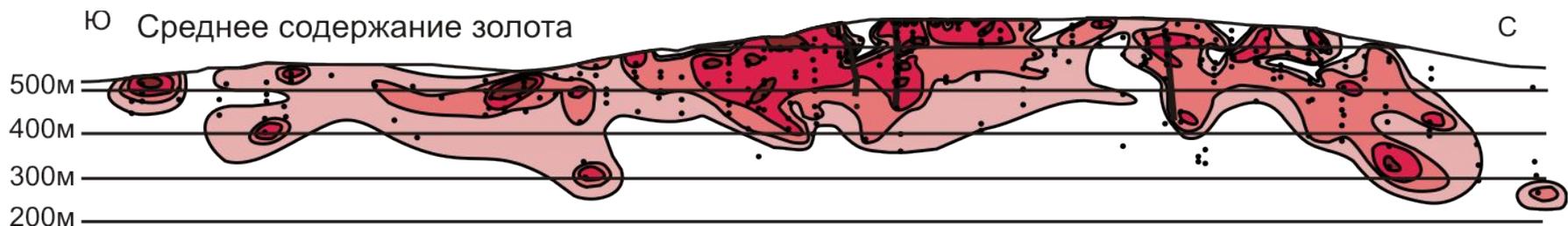
Zn-Cu-Pb-As₍₁₎-Mo₍₁₎-W-Sb-Ag-Au-As₍₂₎-Mo₍₂₎

Mg-Fe-Ca-Al-Na-V-Sc-Sr-K

$$V_A = \frac{Ag \cdot As \cdot Sb}{Cu \cdot Pb \cdot Zn}$$

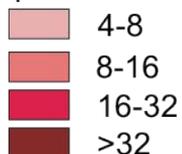
$$V_B = \frac{K \cdot Sr \cdot Sc}{Na \cdot Ca \cdot Al \cdot Mg}$$

Месторождение Купол. Проекция на вертикальную плоскость. Распределение золота, изолинии показателей зональности



Условные обозначения:

Содержание золота в первичных ореолах в г/т:



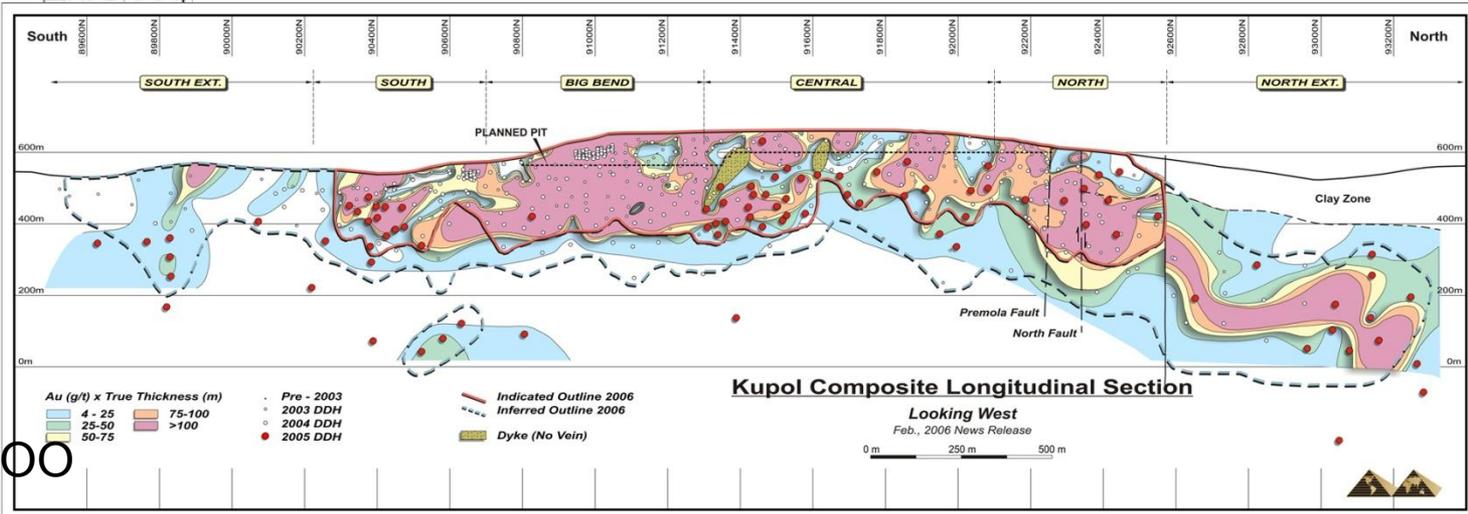
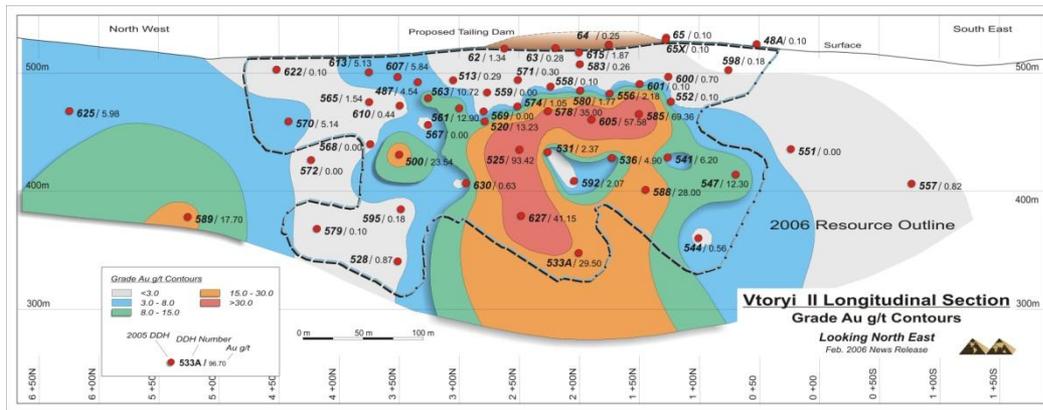
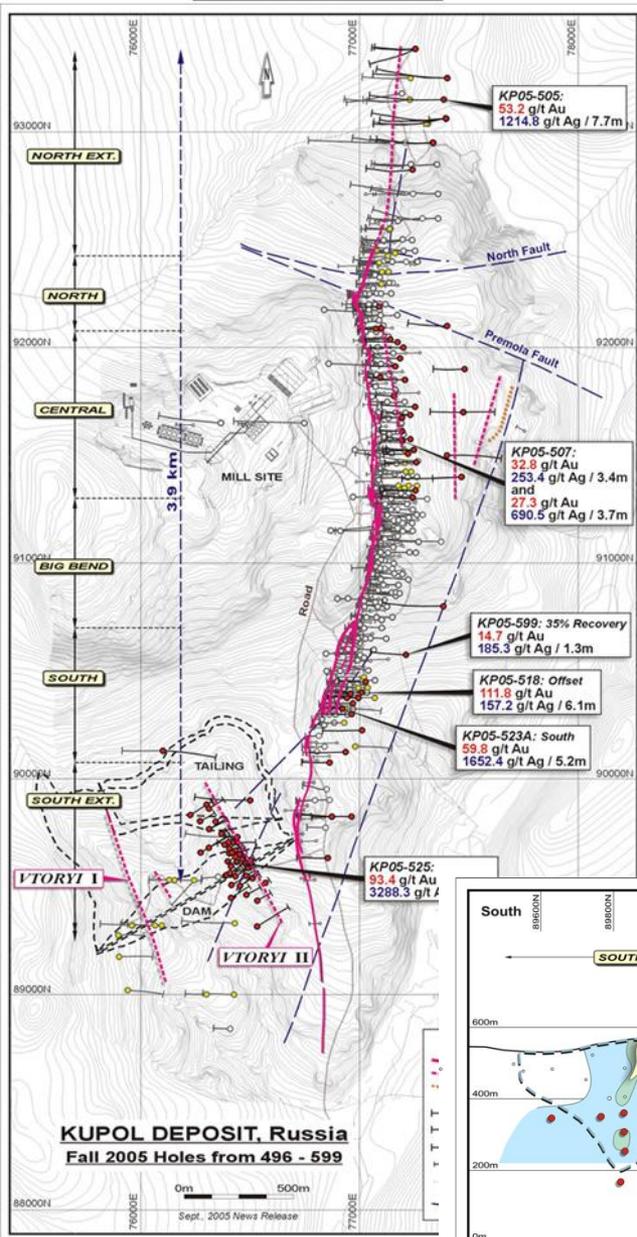
изолинии показателя зональности и его условное значение:

$\frac{Ag \cdot As}{Cu \cdot Pb}$	1 - 0,1; 2 - 1; 3 - 10; 4 - 100.
$\frac{K \cdot Sr}{Na \cdot Ca}$	1 - 0,0001; 2 - 0,001; 3 - 0,01; 4 - 0,1; 5 - 1.



• скважины
 сечения, по которым была найдена зональность месторождения

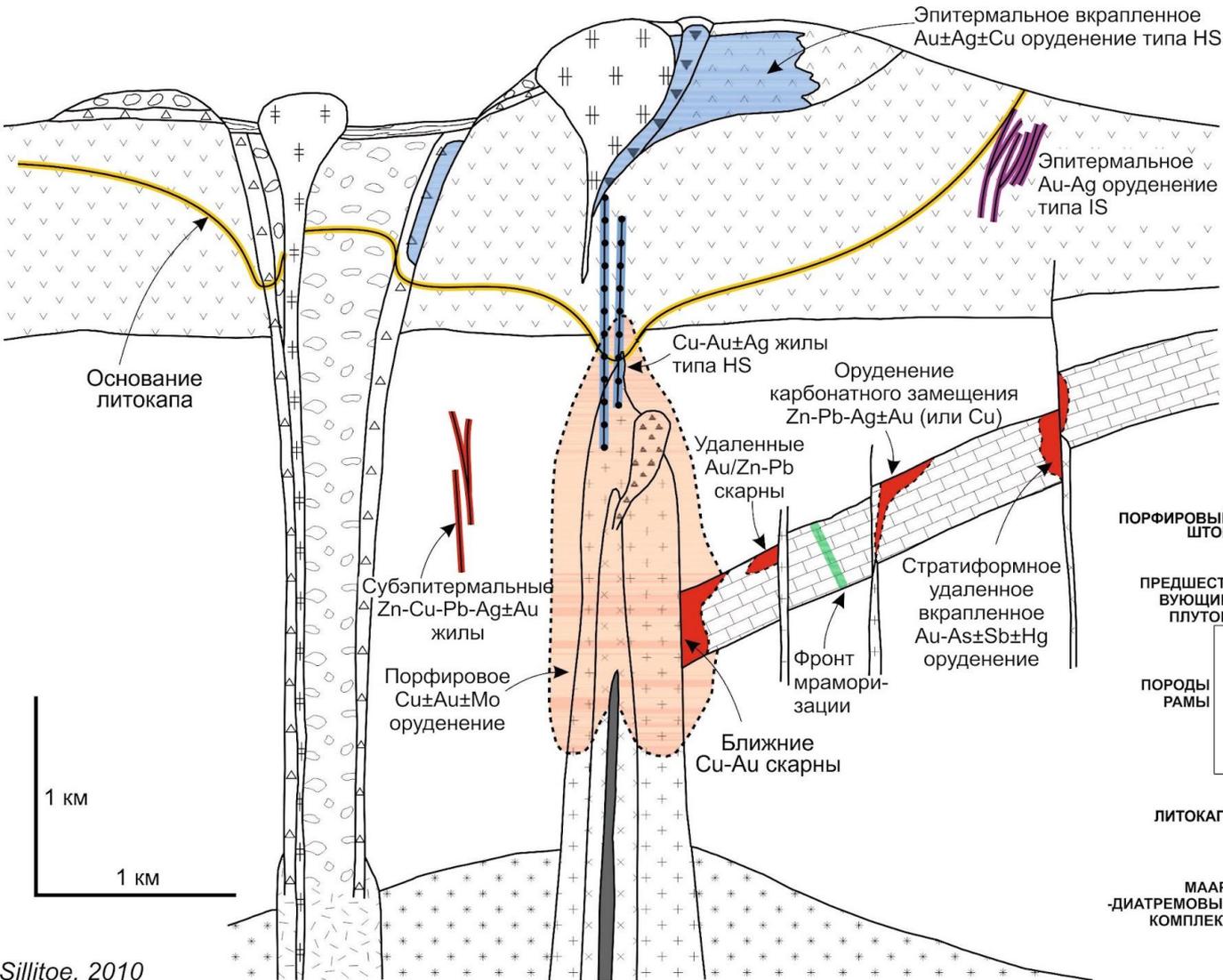
Купол. Распределение золота



Ряды вертикальной зональности отложения рудных элементов и показатели зональности, рекомендуемые для оценки уровня среза золото-серебряных месторождений

Минеральный тип	Ряды вертикальной зональности (снизу-вверх)	v	Численные значения v для верхне-, средне- и нижнерудного уровней		
			v _{верх}	v _{ср}	v _{ниж}
золото-теллуридный	Cu – As – W – Bi – Pb – Mo – Sb – Ag – Au	<u>Ag×Au</u> W×Bi	10 ¹ -10 ³	10 ⁻¹ -10 ¹	10 ⁻³ -10 ⁻¹
золото-селенидный	Mn – Zn – W, Co – Cu – Pb – As – Mo – Ag – Au – Sb	<u>Ag×Sb</u> Cu×Mn	10 ⁻² -10 ⁰	10 ⁻⁴ -10 ⁻²	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁶
золото-сульфосольный	Cu – Zn – Pb – Mo – Sb – Mn – As – Au – Ag – Ba	<u>Ag×Sb</u> Cu×Zn	10 ¹ -10 ²	10 ⁻¹ -10 ¹	10 ⁻³ -10 ⁻¹
золото-аргентитовый	Cu – Zn – Sn, As – W – Mo, Pb – Mn – Au, Ag – Sb	<u>Au×Sb</u> Pb×As	10 ⁻¹ -10 ⁰	10 ⁻³ -10 ⁻¹	10 ⁻⁵ -10 ⁻³
золото-галенит-сфалеритовый	Mn – Zn – Cu – Sn – Pb – Bi – Mo – Ag – As – Au – Ba – Sb – Hg	<u>Ag×Sb</u> Cu×Zn	10 ⁻² -10 ⁰	10 ⁻⁴ -10 ⁻²	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁶
золото-полисульфидный	As – Mn – Zn – Cu – Au – Ag – Pb – Mo – Sb	<u>Sb×Ag</u> Cu×As	10 ⁻² -10 ⁻¹	10 ⁻³ -10 ⁻²	10 ⁻⁴ -10 ⁻³

Модель порфирово-эпитептермальной системы



Условные обозначения

	▲ ▲ ▲ ▲	Позднерудные порфиры
ПОРФИРОВЫЙ ШТОК	× × × ×	Синрудные магмато-гидротермальные брекчи
	+ +	Синрудные порфиры
ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ ПЛУТОН	* * *	Ранние порфиры
	+	Равномернозернистые интрузивные породы
ПОРОДЫ РАМЫ	⊕ ⊕	Дацитовый купол
	△ △ △ △	Фельзитовые туфы
	▽ ▽ ▽ ▽	Андезитовые лавы
	□	Субвулканическое основание / Горизонт карбонатов
ЛИТОКАП	▽ ▽ ▽	Фреатические брекчи
МААР-ДИАТРЕМОВЫЙ КОМПЛЕКС	⊕ ⊕	Дацит-порфиоровый экструзивный купол
	— — — —	Озерные отложения
	○ ○ ○ ○	Поздние фреатоматгматические брекчи
	△ △ △ △	Ранние фреатоматгматические брекчи
	▲ ▲ ▲ ▲	Позднерудные порфиры

Латеральная зональность НРП

Области контрастных значений мультипликата $(AuAgTe/CuMoBiSe) \cdot 1000$:

-  повышенные значения (>300), характерные для скважин, вскрывших благородно-метальную минерализацию
-  средние значения ($0,1-10$), отвечающие области развития бедных медно-порфировых руд
-  низкие значения ($<0,1$), соответствующие богатым борнитовым рудам

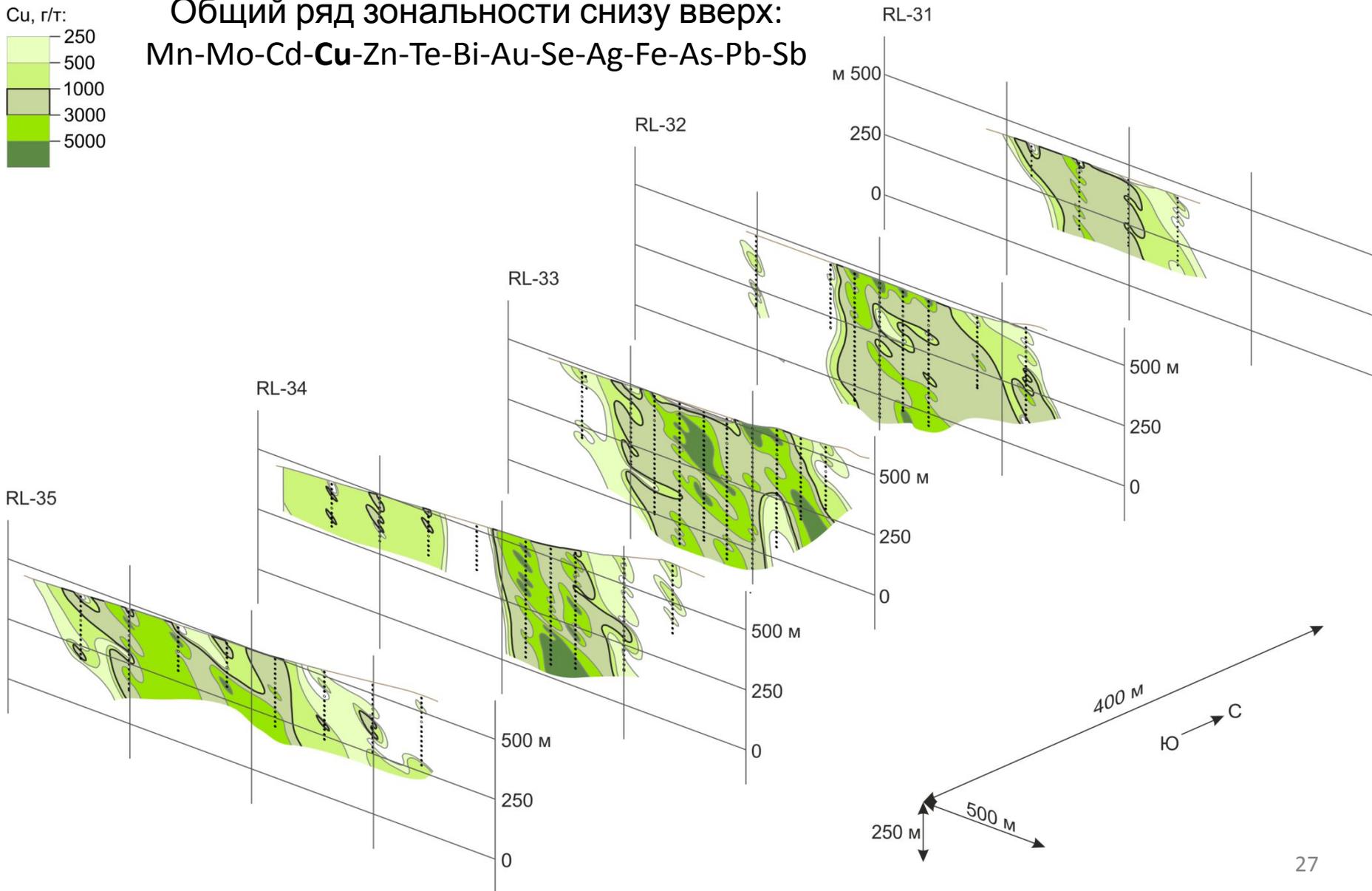
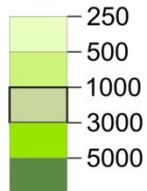


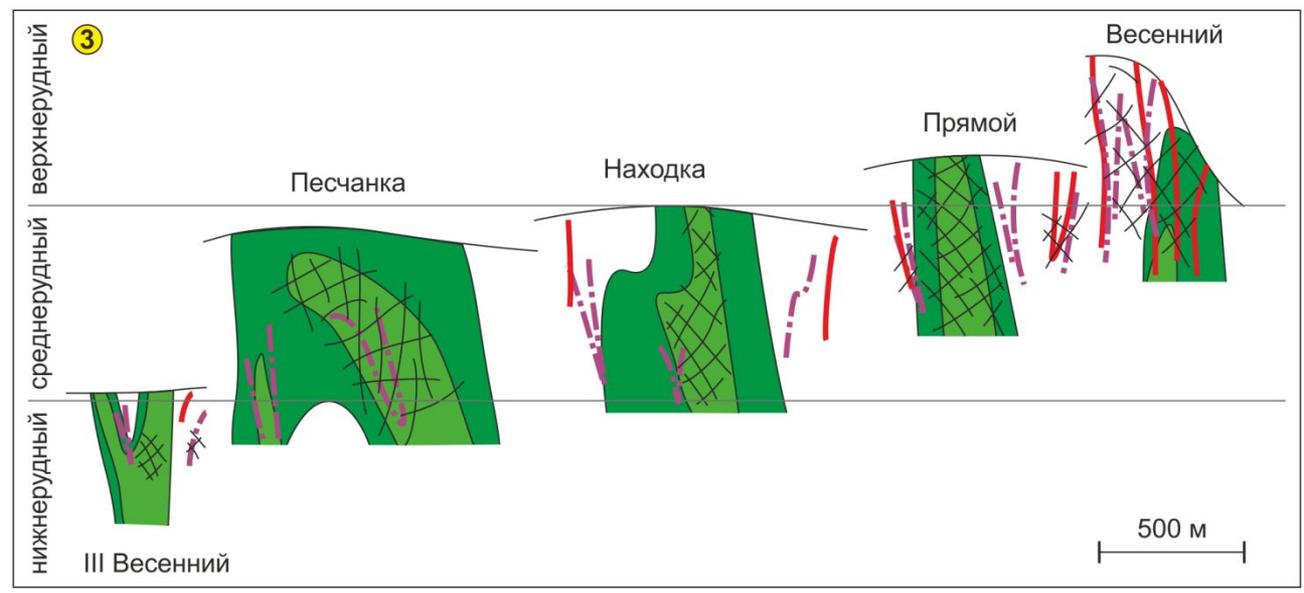
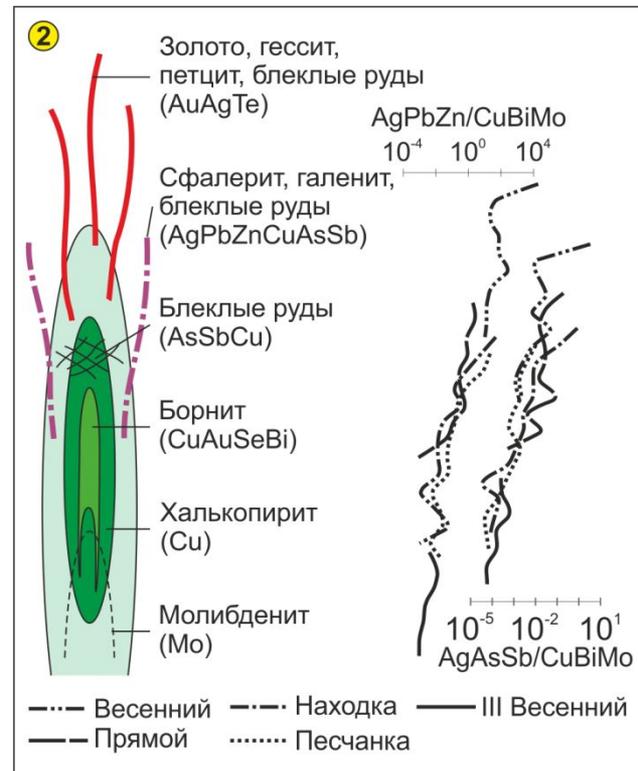
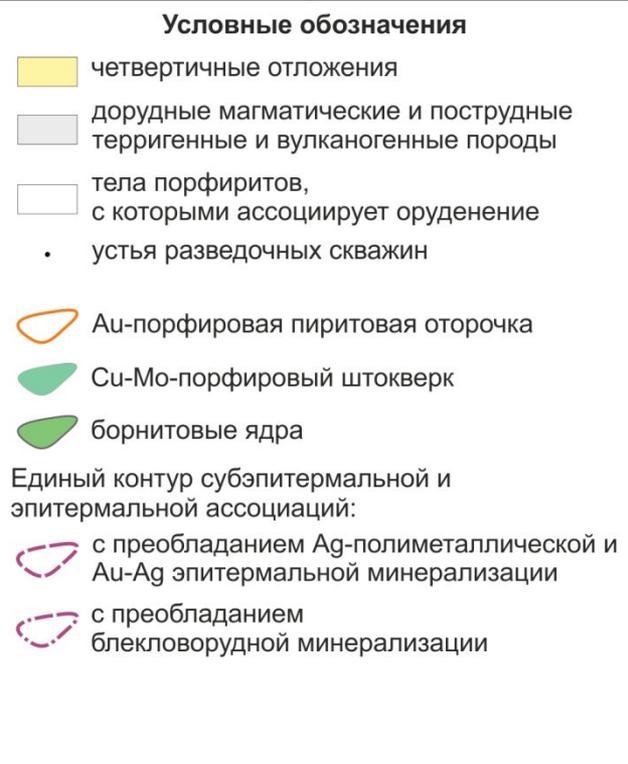
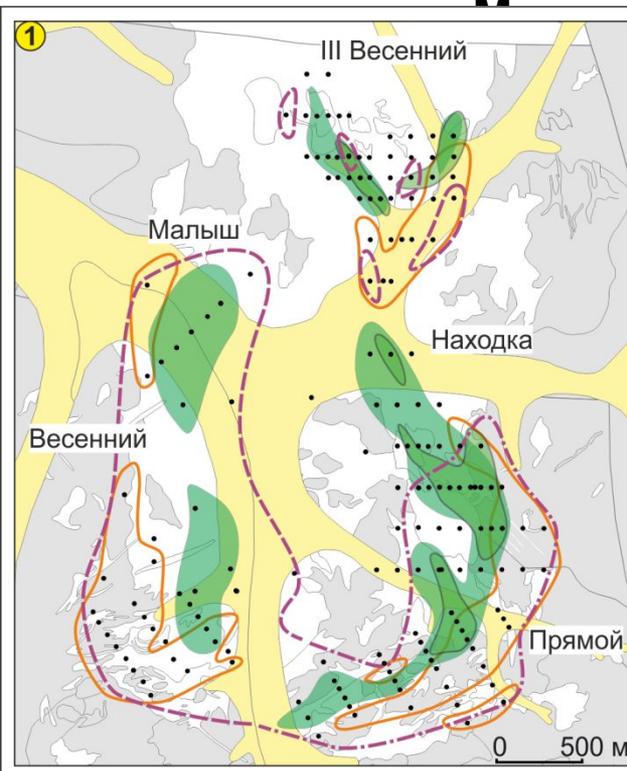
Вертикальная зональность Находкинской ПЭС

Участок Находка

Общий ряд зональности снизу вверх:
Mn-Mo-Cd-Cu-Zn-Te-Bi-Au-Se-Ag-Fe-As-Pb-Sb

Cu, г/т:

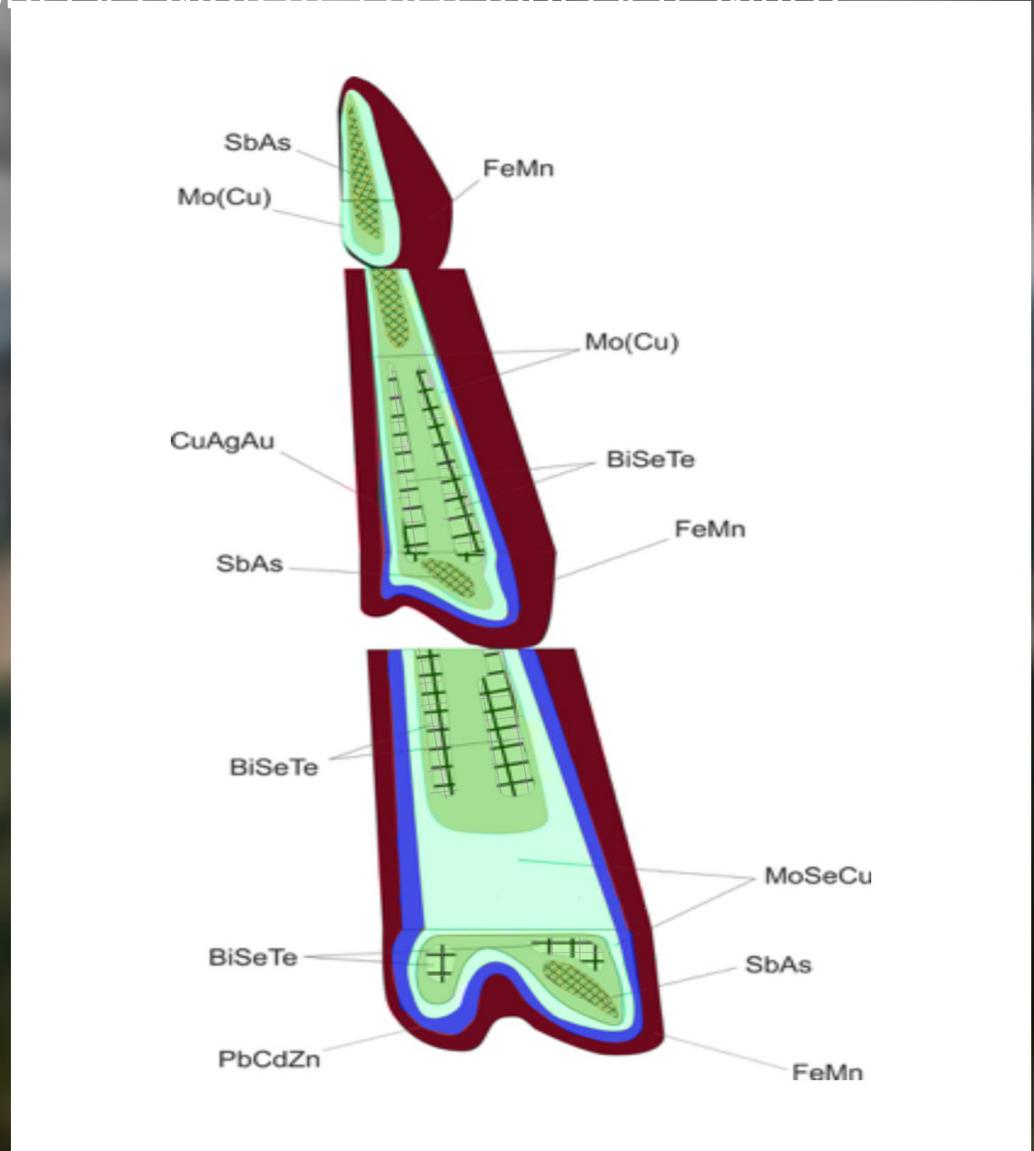
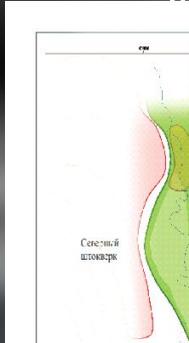




Распределение факторов в рудном кластере месторождения Песчанка

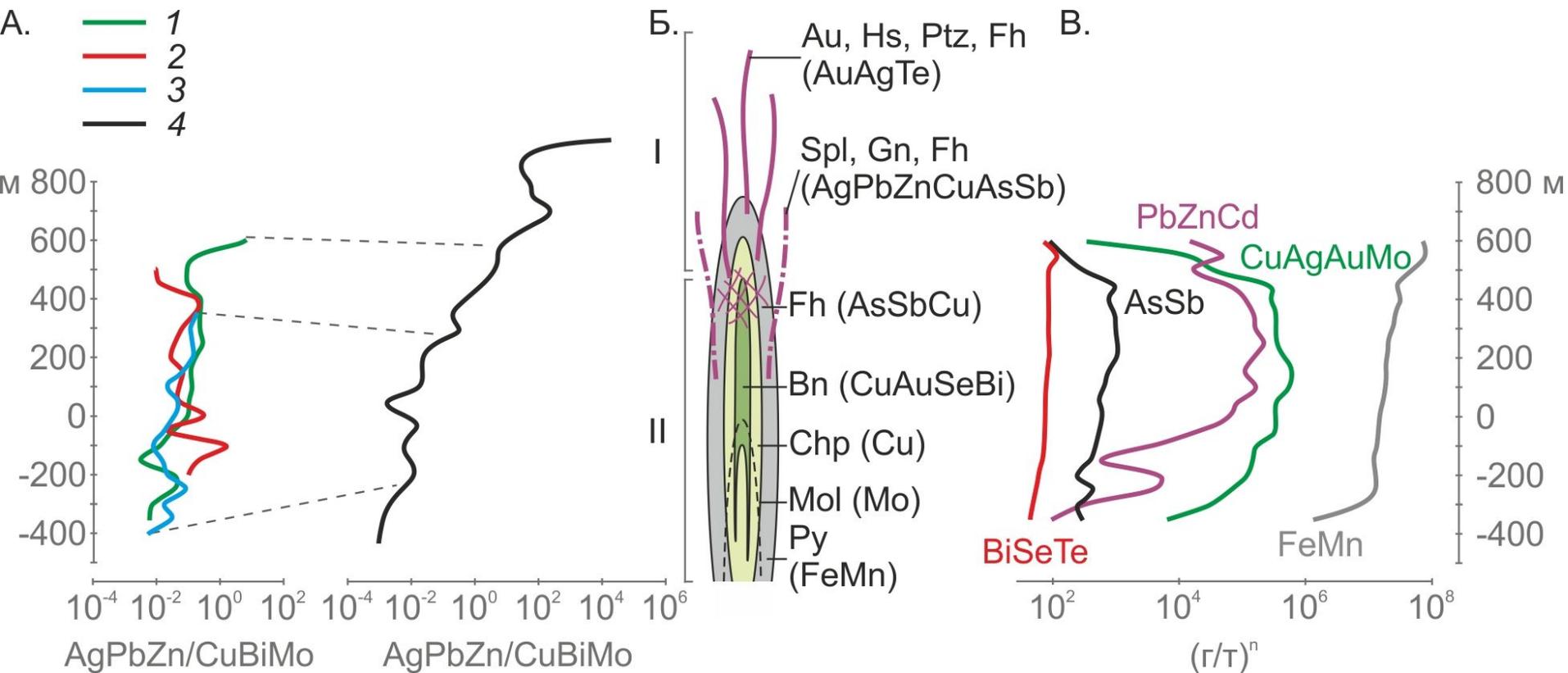
Латеральная геохимическая зональность:

SbAs{Cu}-(CuAuAg)- BiTe(Se)-Mo{Cu}- PbZn-{BiTe(Se)}- MnFe



Первичная геохимическая зональность ПЭС

Показатели вертикальной геохимической зональности ПЭС



Вертикальная геохимическая зональность (снизу-вверх): [As-Bi-Se-Te-Sb]-Mn-Mo-Au-Fe-Cu-Ag-Pb-Zn

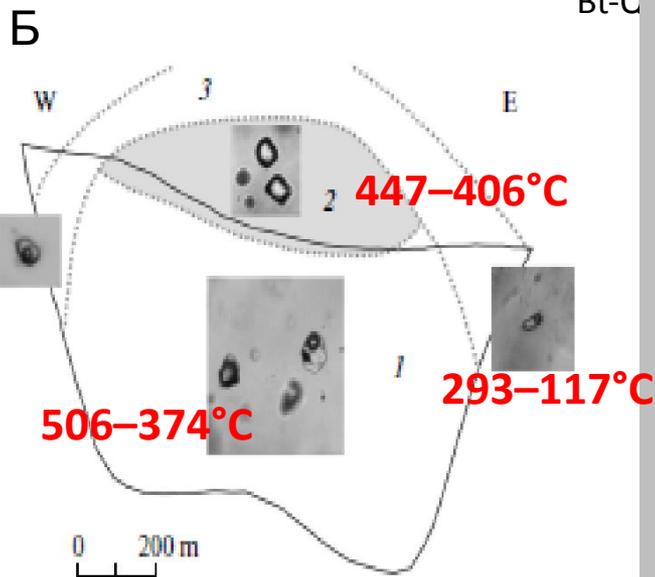
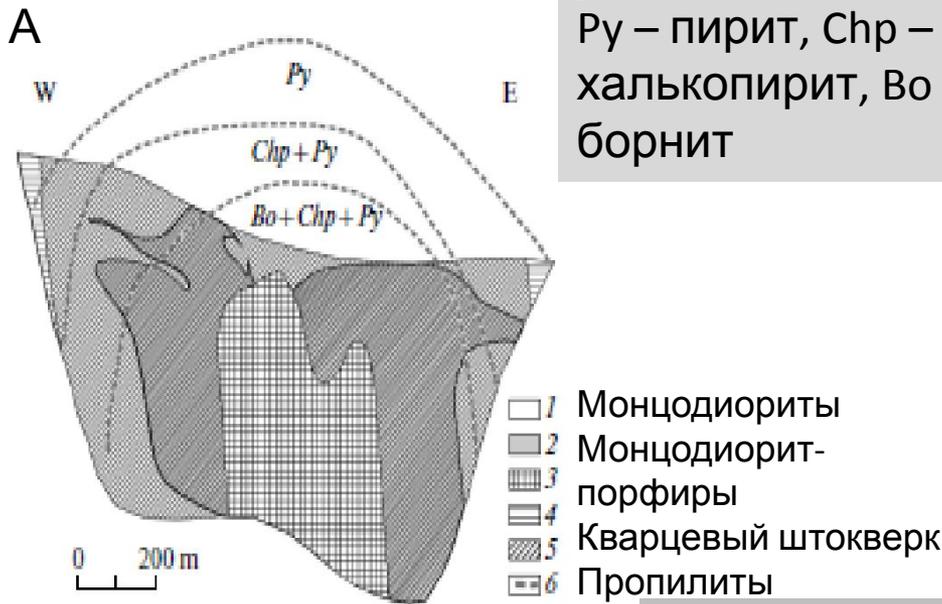
Осевая геохимическая зональность (снизу-вверх):

[As-Sb-Bi-Se-Te]-Mo-Au-Fe-Cu-Mn-Ag-Pb-Zn

По опорным разрезам изучено распределение основных рудных элементов на глубину и выявлен показатель зональности $AgPbZn/CuBi (Au)Mo$, применимый для оценки уровня эрозионного среза ПЭС.

Минералогия метасоматитов и руд

Газово-жидкие включения. Песчанка.



- Газовые включения в раннем кварце характеризуют верхнюю часть кварцевого штокверка медно-порфировой системы
- Кварц содержит высокотемпературный Na-K хлоридный рассол и газовые включения
- Кровля высоко температурной зоны с богатыми рудами находится в 20 м ниже уровня современного рельефа
- **Рудоносный штокверк слабо эродирован и прогнозируется до глубины 1 км (что подтверждается данными глубокого бурения и глубинной геофизики)**

Порядок проведения геологоразведочных работ

Этап, стадия	Объект изучения	Съемка по первичным ореолам
Этап I. Работы общегеологического и минерагенического назначения		
Стадия 1. Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых	Территория РФ, ее крупные геолого-структурные, административные, экономические, горнорудные и нефтегазоносные регионы, шельф и исключительная экономическая зона, глубинные части земной коры, районы с напряженной экологической обстановкой, районы интенсивного промышленного и гражданского строительства, мелиоративных и природоохранных работ и др.	
Этап II. Поиски и оценка месторождений		
Стадия 2. Поисковые работы	Бассейны, рудные районы, узлы и поля с оцененными прогнозными ресурсами категорий P_3 и P_2	
Стадия 3. Оценочные работы	Проявления и месторождения полезных ископаемых с оцененными прогнозными ресурсами категорий P_2 и P_1	
Этап III. Разведка и освоение месторождений		
Стадия 4. Разведка месторождений	Месторождения полезного ископаемого с оцененными запасами по категориям C_2 и C_1 и прогнозными ресурсами категории P_1	
Стадия 5. Эксплуатационная	Эксплуатационные этажи, горизонты, блоки, уступы, подготавливаемые для очистных работ	

Литохимическая съемка первичных ореолов

Помимо опробования керн скважин для исследования зональности...

- ✓ Площадное опробование коренных пород (в случае хорошей обнаженности)
 - Профили вкрест простирания рудных зон
 - 100×10 м (1 : 10000), 50×10 м (1 : 5000), 20×5 м (1 : 2000)
- ✓ Опробование искусственных обнажений (канавы, шурфы и др.)

Решаются задачи:

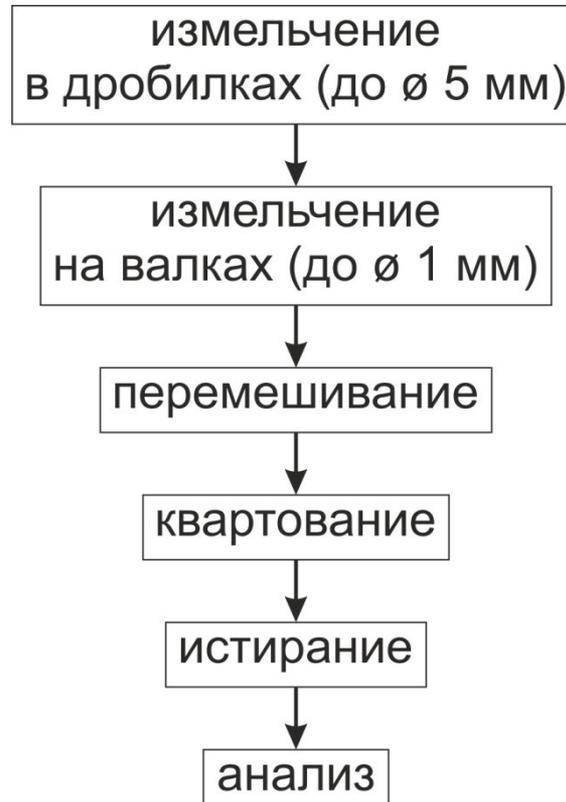
- ✓ Выявление и интерпретация первичных ореолов;
- ✓ Определение формационной природы оруденения;
- ✓ Установление уровня эрозионного среза;
- ✓ Установление элементов залегания рудных тел;
- ✓ Оценка масштабов оруденения;
- ✓ Оценка перспектив рудоносности на глубину и на флангах;
- ✓ Корректировка направления разведочных работ.

Отбор проб

- ✓ Из естественных и искусственных обнажений
- ✓ Сопровождается геологической документацией



Пробоподготовка и анализ



Методы анализа: ПКСА, ICP AES, химико-спектральный

Оценка прогнозных ресурсов

Если вскрыто слепое рудное тело с продуктивностью надрудных ореолов P_p [м²%], необходимо с помощью поправочного множителя η пересчитать продуктивность на уровень 0,2:

$$P_p^* = \eta P_p$$

Тогда ресурсы Q_H^* [т] на полную протяженность (от $z=0,2$ до $z=0,8$) рудного интервала

$$Q_H^* = \frac{1}{40} P_p^* H_{\text{полн}} \alpha$$

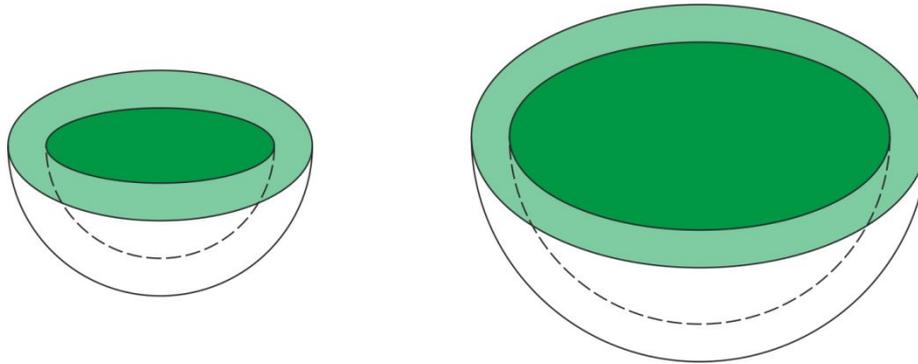
α — коэффициент, учитывающий долю забалансовых руд.

Если рудное тело вскрыто на горизонте $z_i > 0,2$, оценка ресурсов ведется на поправочный коэффициент H_i :

$$H_i = H_{\text{полн}} \frac{0,8 - z_i}{0,6}$$

Учет доли забалансовых руд (α)

Для модели сферической залежи:



Объект	R	Условные запасы металла			α
		всего Q_H	в руде	в перв. ореоле	
Рудопроявление	0,3	0,461	0,027	0,434	0,059
Мелкое м/р	1,0	2,4	1,0	1,4	0,417
Среднее м/р	2,15	14,26	10,0	4,26	0,701
Крупное м/р	4,64	115,88	100,0	15,88	0,863
Уникальное м/р	10,0	1067,4	1000,0	67,4	0,937