



Holterman's  
nugget, the  
greatest golden  
nugget in the  
world

# СУЛЬФОАРСЕНИ ДНЫЕ КОМПЛЕК- СЫ ЗОЛОТА В РУДНЫХ ГИДРО- ТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРАХ (ФИЗИКО – ХИМИ- ЧЕСКОЕ МОДЕЛИ- РОВАНИЕ)

Казьмин Л.А.,  
Вилор Н.В.,  
Павлова Л.А.

## **Цель:**

**определение физико-химических условий образования арсенопирит-пиритового парагенезиса и форм переноса золота на золоторудных месторождениях путем физико-химического моделирования**

## **Задачи:**

- 1. рассмотреть распределение As в ПИ и интервала существования мышьяковистого пирита  $\text{ПИ}_{\text{As}}$**
- 2. определение составов  $\text{ПИ}_{\text{As}}$  и их термодинамических функций для физико-химического моделирования**
- 3. расчет фазовых соотношений в АПИ-ПИ парагенезисе в зависимости от изменений температуры, рН, соотношения количества твердых сульфидов и раствора**
- 4. определить состав форм переноса As, Fe и Au**

## Прямая зависимость между содержаниями золота и мышьяка в рудах АПИ – ПИ минерального типа

Положительная статистическая геохимическая связь золота и мышьяка отражается полиномиальными, логарифмическими и линейными уравнениями корреляции:

**Месторождение**                      Зависимость:

**мышьяк (X) – золото (Y)**

**Сухой Лог**                      Au = -1,5996 + 0,052 As

**Голец Высочайший** Au = 12,226 + 1,657 ln As

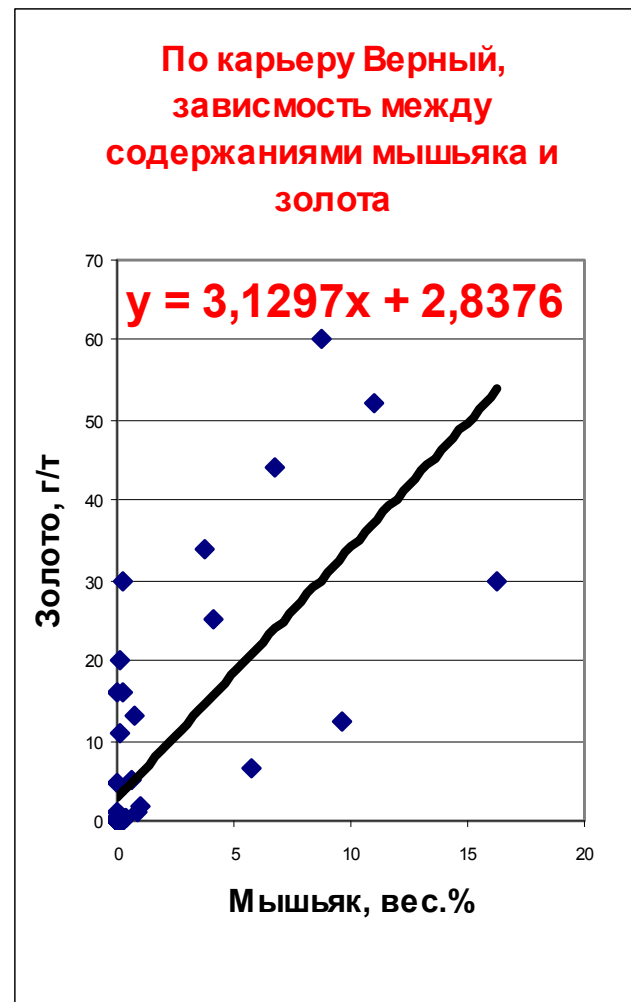
**Зона Первенец**                      Au = 11,968 - 0,0097 As + 3,9854 × 10<sup>-5</sup> As<sup>2</sup> - 8,7647 × 10<sup>-8</sup> As<sup>3</sup>

**Верный**                      Au = 2,591 + 3,197 As

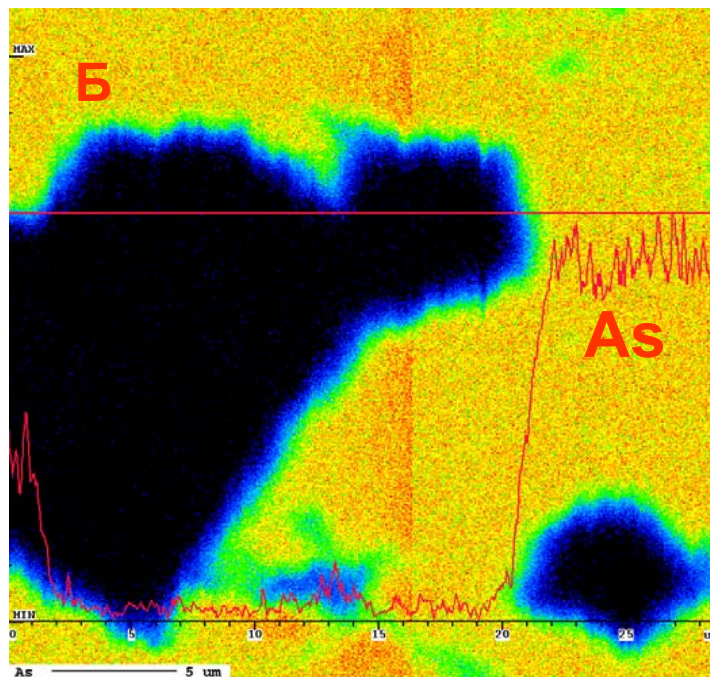
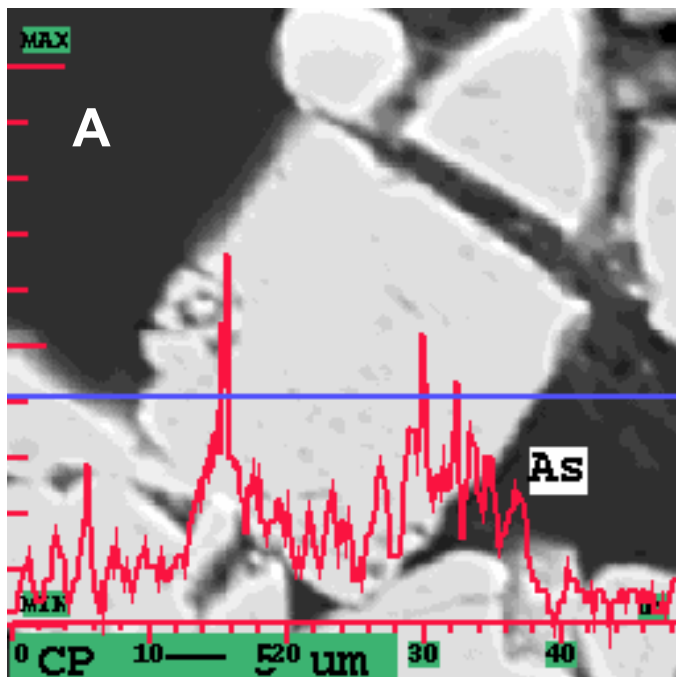
**Копыловский**                      Au = 0,5626 - 112,31 As + 7315,9 As<sup>2</sup> - 78579 As<sup>3</sup>

и коэффициентами корреляции от 0.3 (n=114) до 0.8 (n=37), n – число проб.

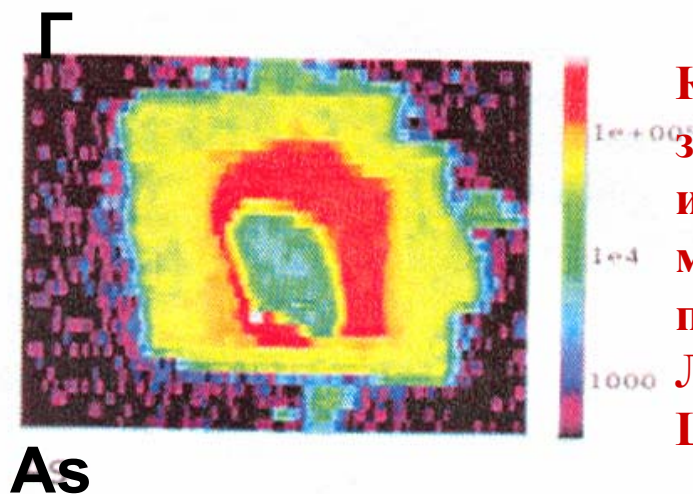
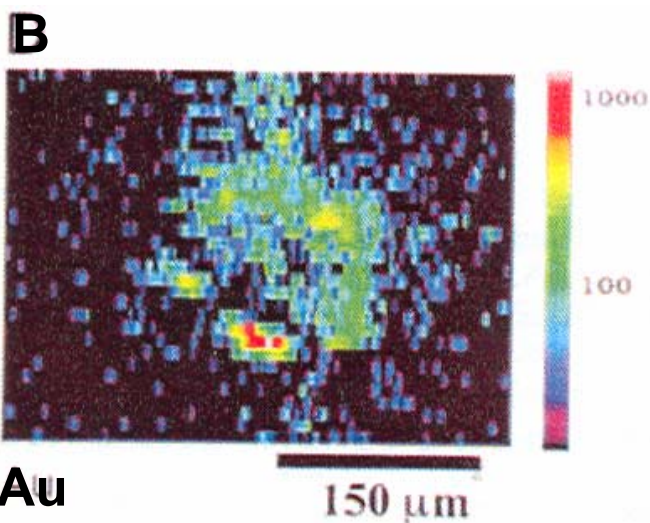
Наиболее устойчива корреляция Au – As в Вернинско – Александро-Невской части Маракано-Тунгусского узла.



# Распределение мышьяка в пирите золоторудных месторождений А, Б – Верный, В,Г – Сухой Лог



Распреде-  
ление мы-  
шьяка в  
пирите:  
квазизона-  
льное, зона-  
льное,  
однородное



Концентрации  
золота ассоци-  
ируют с «ядрами»  
мышьяковистого  
пирита, Сухой  
Лог (по данным  
Large et al., 2010)

**С и с т е м а Fe - As - S - Cl - Na - H - O**

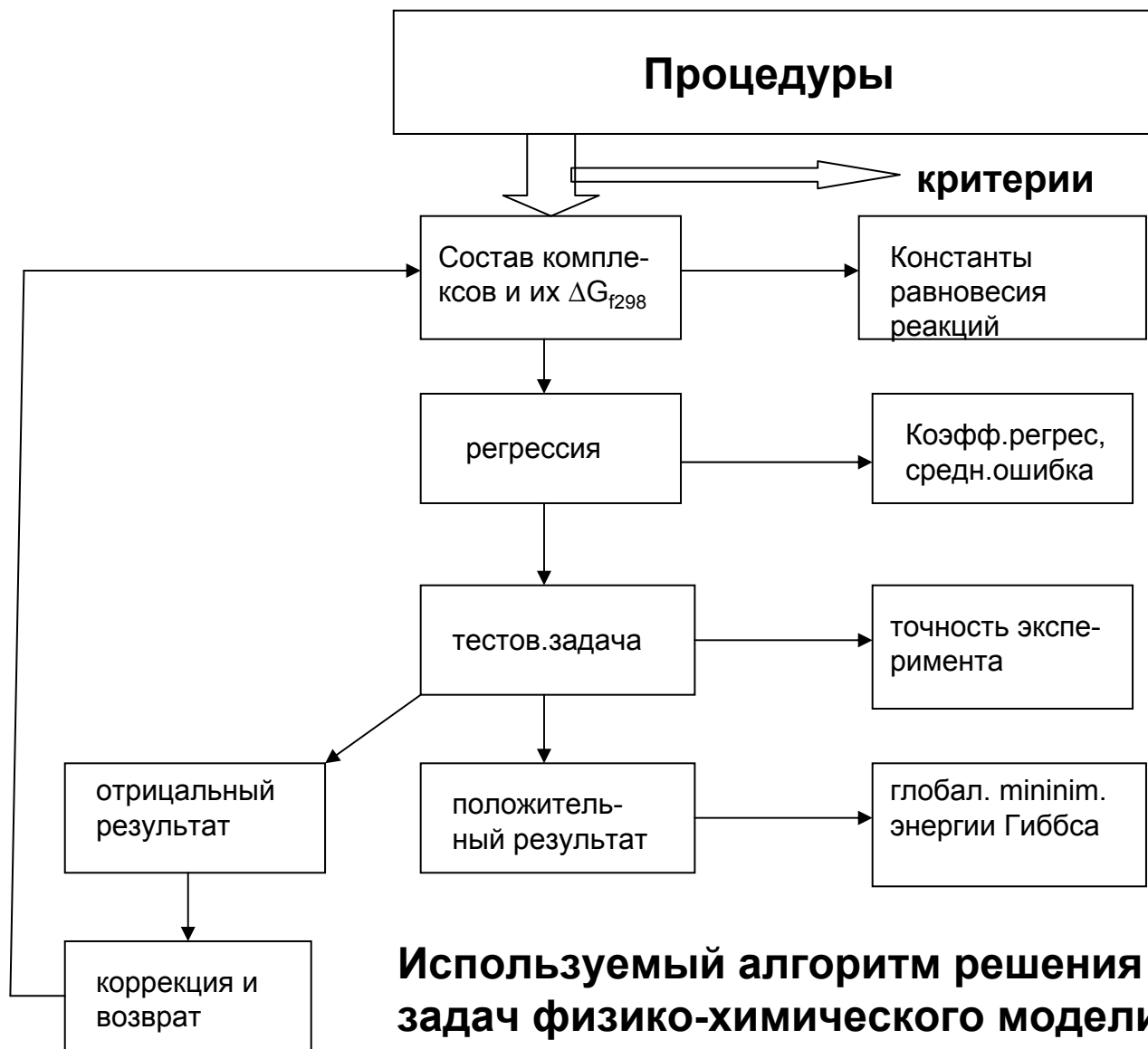
**Au - Fe - As - S - Cl - Na - H - O**

Раствор	Твердые фазы
HCl 0.1 ÷ 10 <sup>-6</sup> m NaOH 0.1 ÷ 10 <sup>-6</sup> m H <sub>2</sub> S 0.0 ÷ 0.001 m	<b>Золото</b> кристаллическое, металл <b>Пирит, FeS<sub>2</sub></b> 1 ÷ 10 <sup>-6</sup> m <b>Арсенопирит, FeAsS</b> 1 m для получения насыщенного раствора с заданным рН от 1.65 до 8.22
Параметры	
Температура, °С	Давление жидкой фазы
от 100 до 300	от давления насыщенных паров воды до 300 бар

**Состав  
рассчитываемых  
систем**

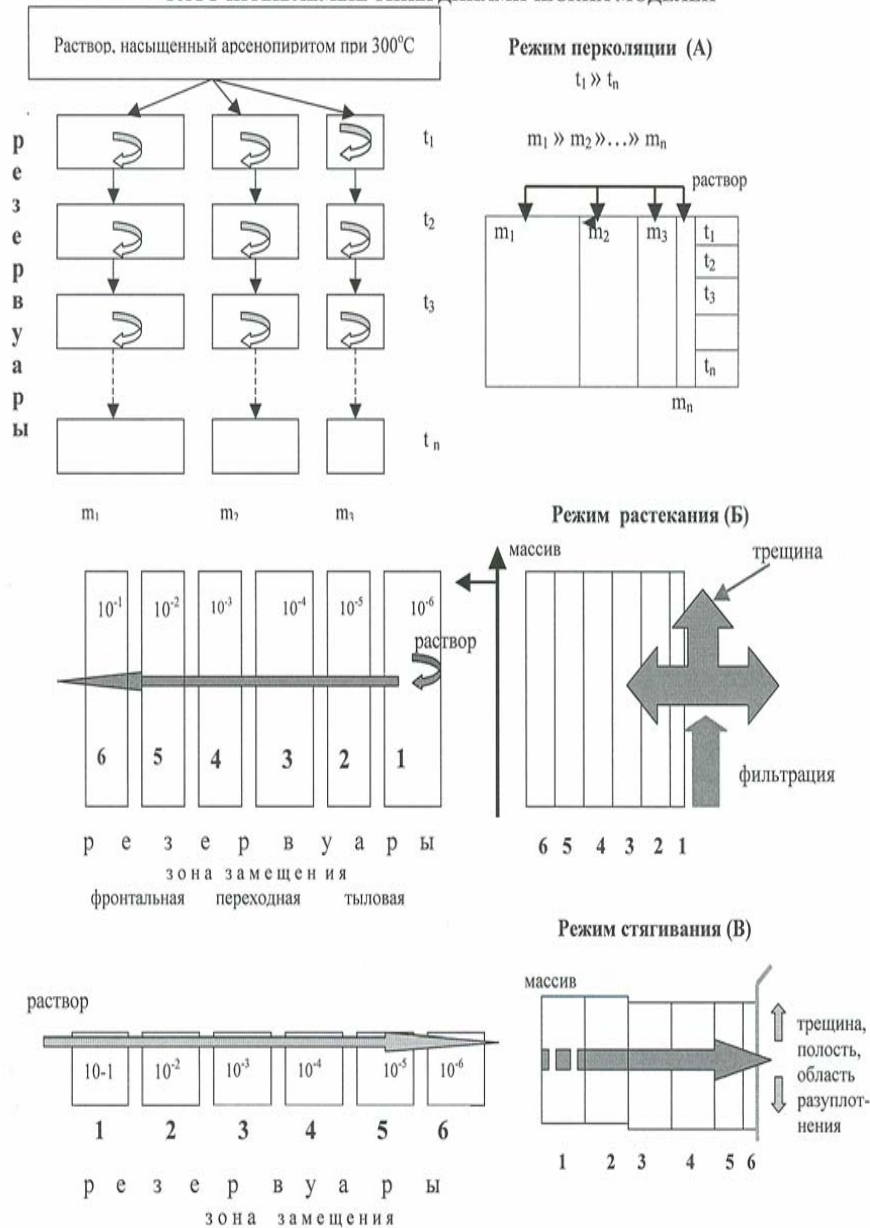
**Список зависимых  
компонентов**

<b>Раствор</b>	<b>Твердые фазы</b>	<b>Газовая фаза</b>
404,	50	105
В т.ч.: сульфидные, сулфоарсенидные комплексы золота и железа, сульфиды, сульфаты и др. окисленные водные формы серы, тиосульфаты, полисульфиды, серная, сернистая и др. сложные серные кислоты, мышьяковистые кислоты, арсенаты, арсениты, тиоарсениты, арсенаты Na и Fe	В т.ч.: сульфиды, оксиды Fe и As, элементарные Au, Fe и As, элементарная S	Ред-окс условия соответствуют буферам « <b>пирит - пирротин</b> », « <b>пирит - магнетит</b> », « <b>железо – магнетит</b> »

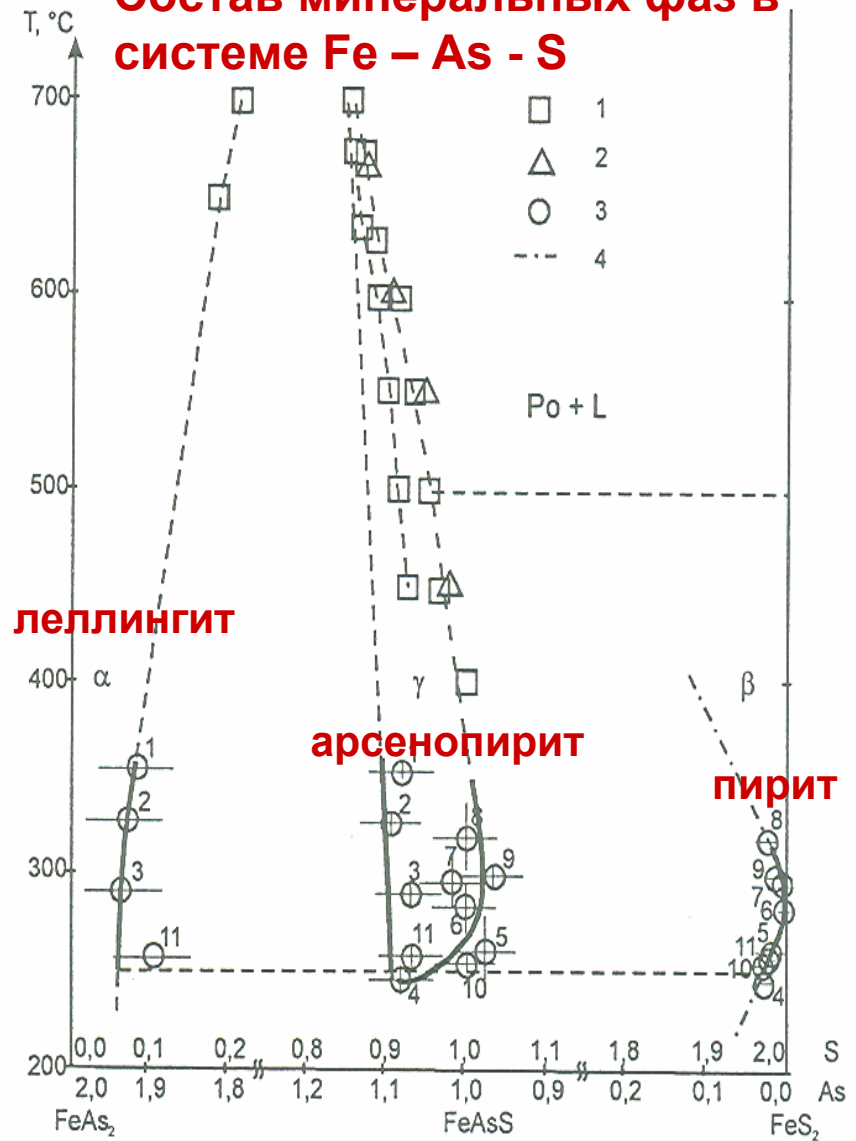


**Используемый алгоритм решения обратных задач физико-химического моделирования**

### РАССЧИТЫВАЕМЫЕ ТИПЫ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

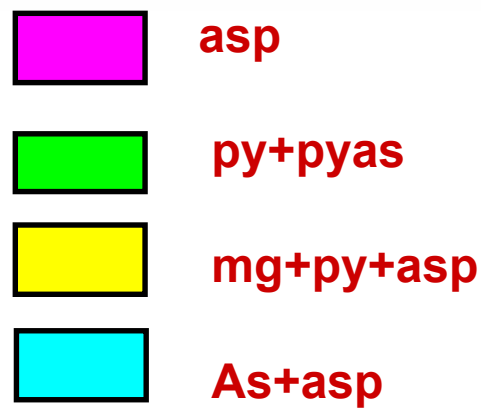
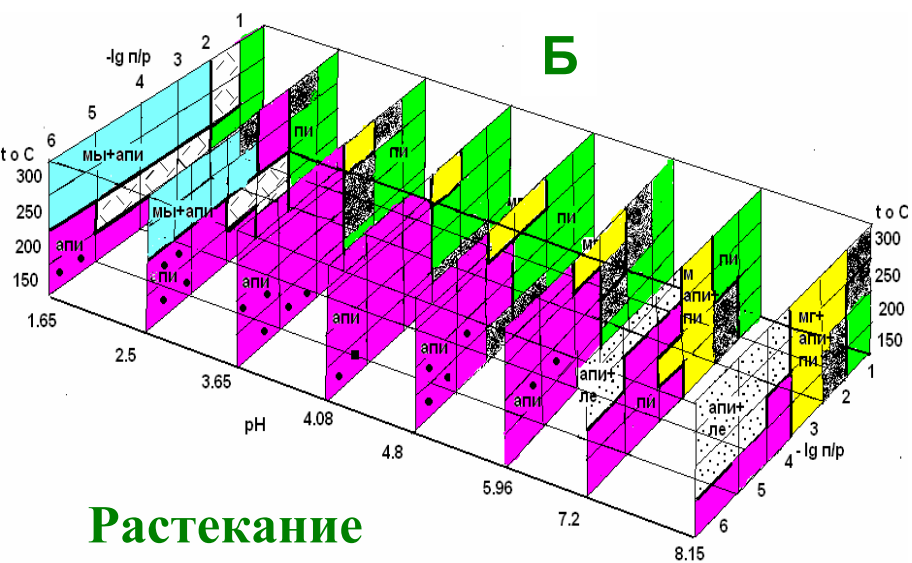
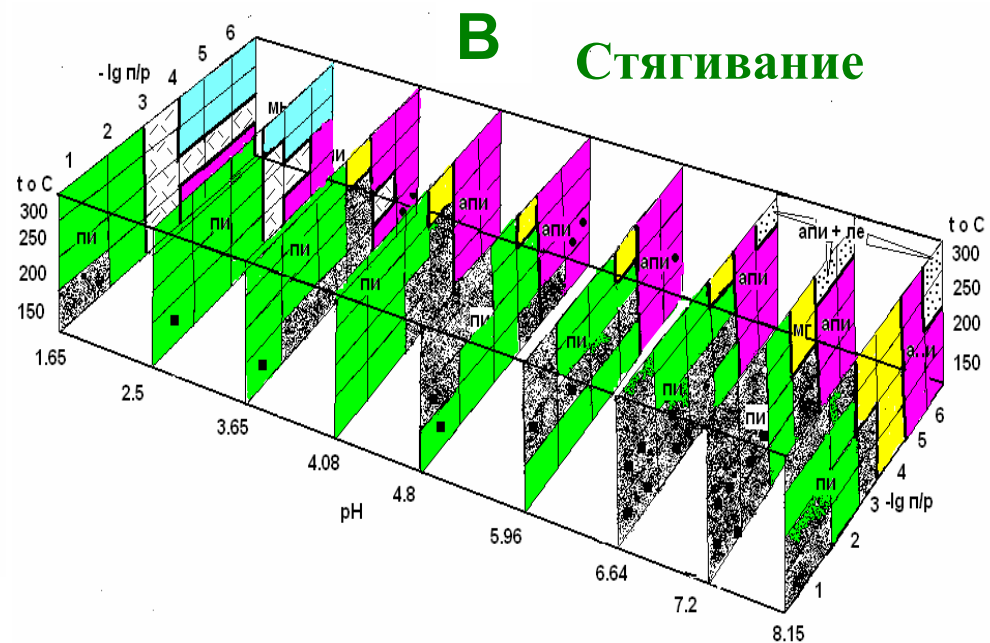
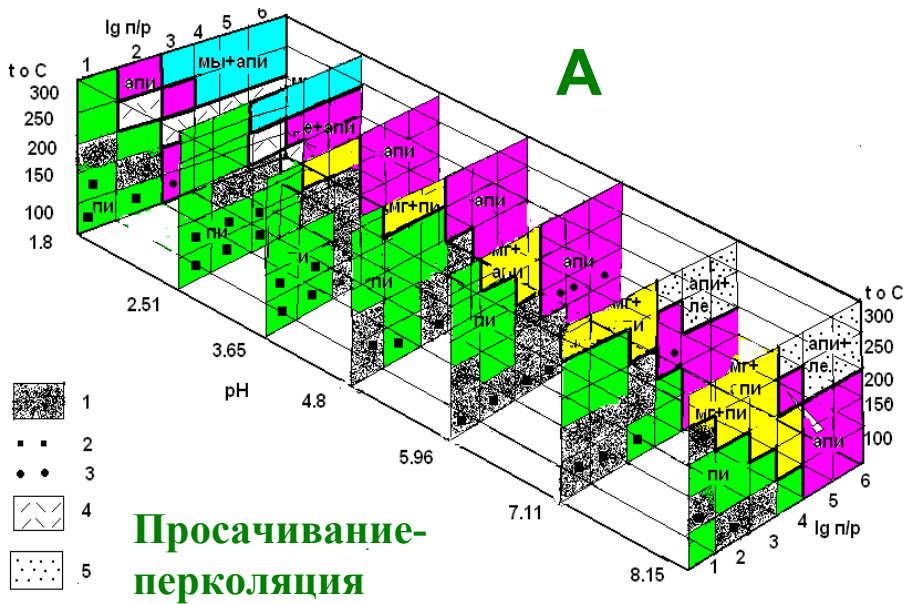


### Состав минеральных фаз в системе Fe - As - S



### Составы мышьяковистых пиритов

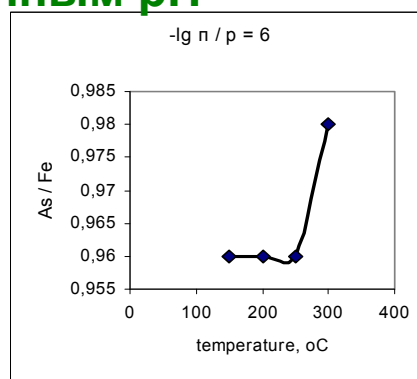
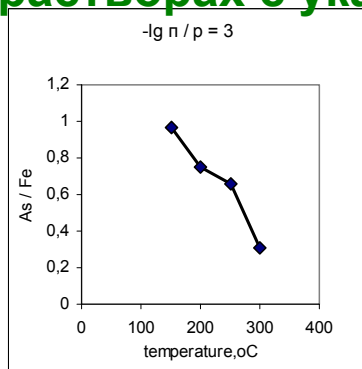
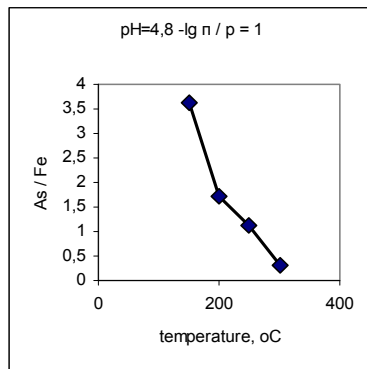
**ПИАс1** -  $\text{Fe}_{0.96875} \text{S}_2 \text{As}_{0.03125}$  (1 As замещает 1 Fe), **ПИАс2** -  $\text{FeS}_{1.96785} \text{As}_{0.03125}$  (1 AsS замещает 1 S<sub>2</sub>), **ПИАс3** -  $\text{FeS}_{1.93375} \text{As}_{0.03125}$  (1 As замещает 1 S<sub>2</sub> + 1 S вакансия), **ПИАс4** -  $\text{FeS}_{1.93375} \text{As}_{0.0625}$  (2 As<sup>-1</sup> замещает 1 S<sup>2-</sup>).  
 (Blanchard et al, 2007).



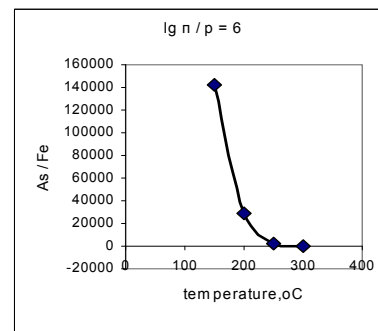
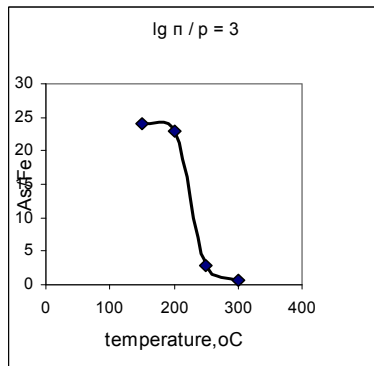
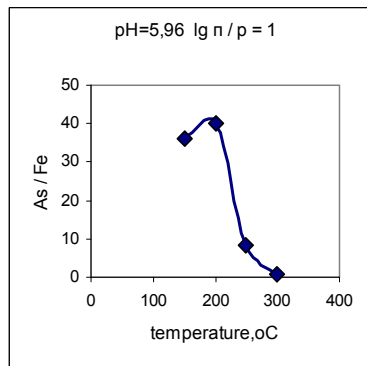
Результаты расчетов по  
трем типам моделей



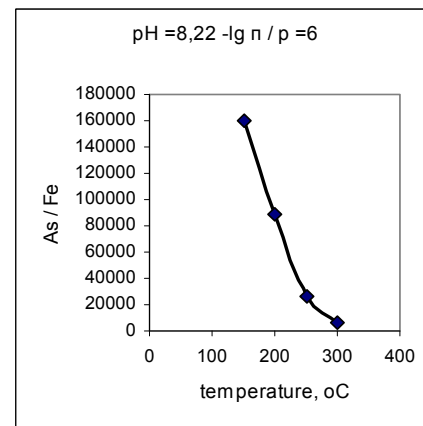
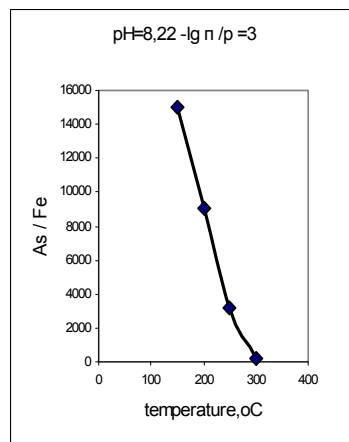
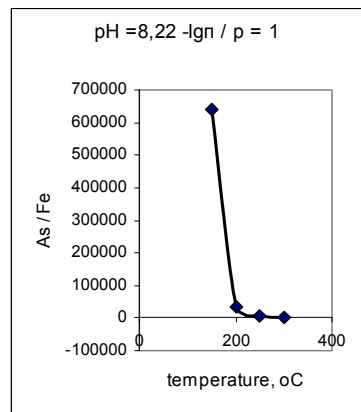
# Отношения $As_{p-p} / Fe_{p-p}$ , рассчитанные в сульфоарсенидных растворах с указанным pH



**pH = 4.8**

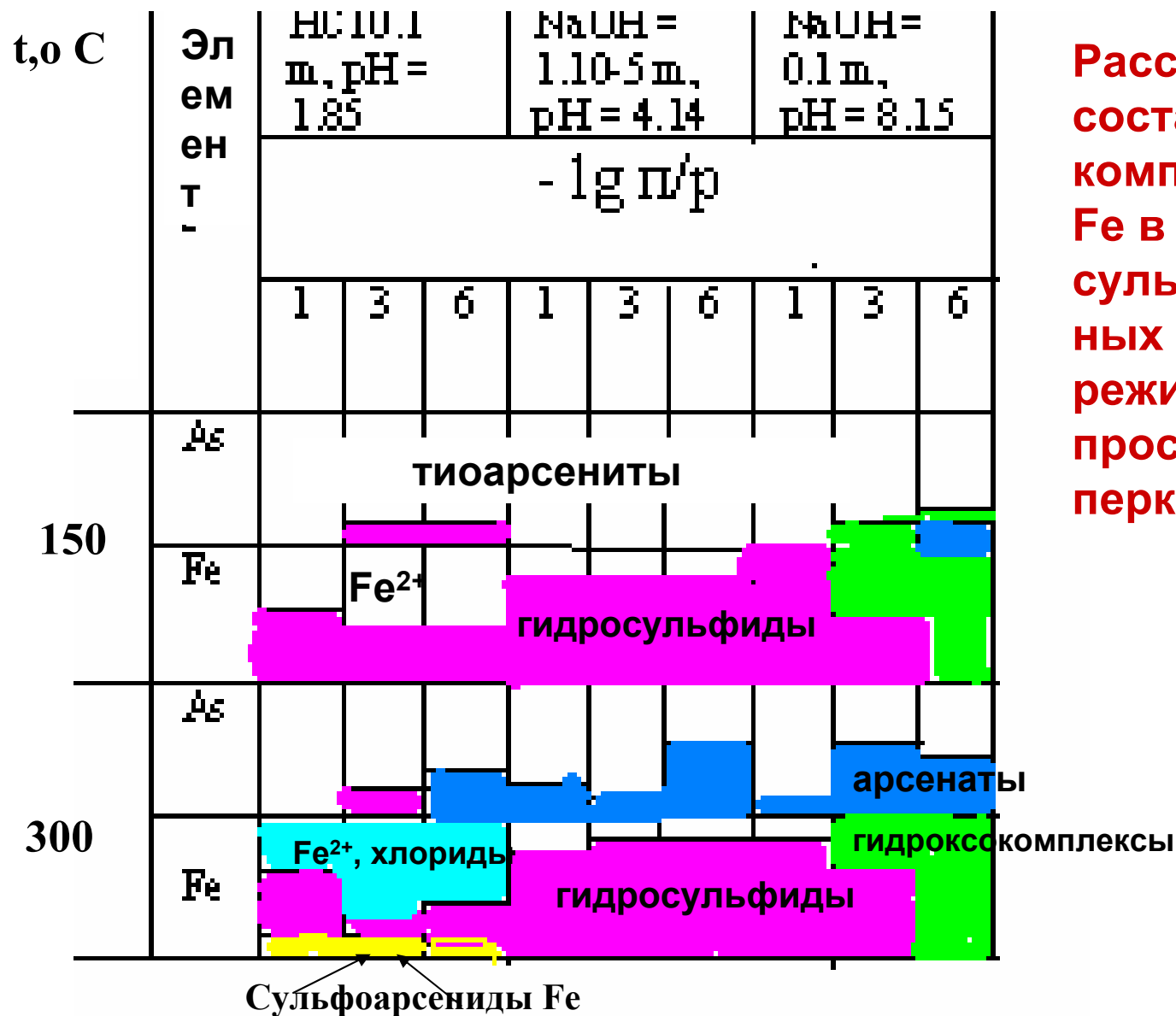


**pH = 5.96**

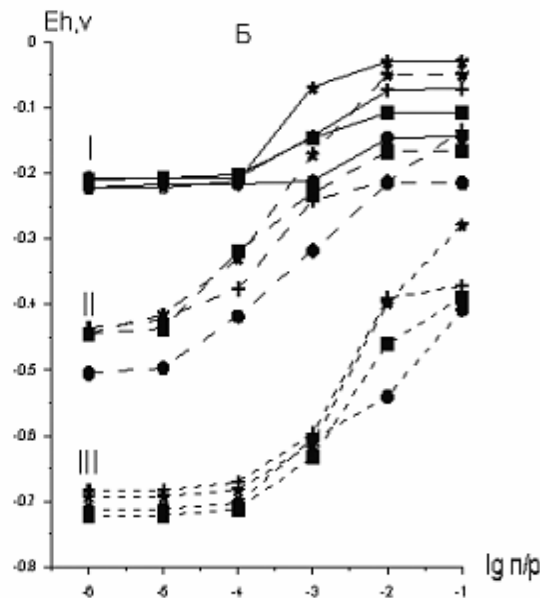
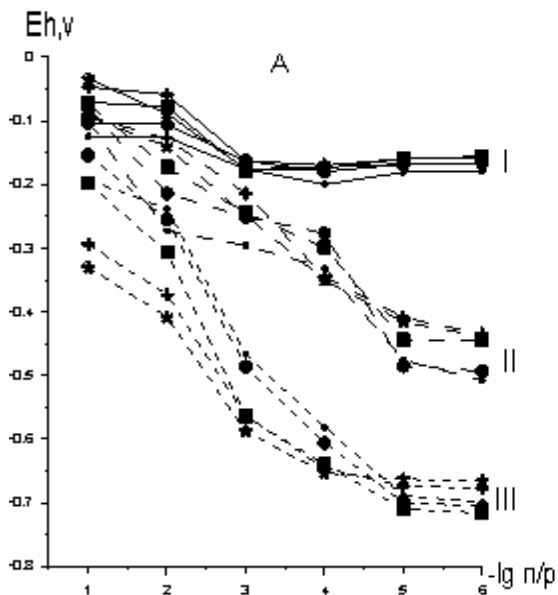


**pH = 8.22**

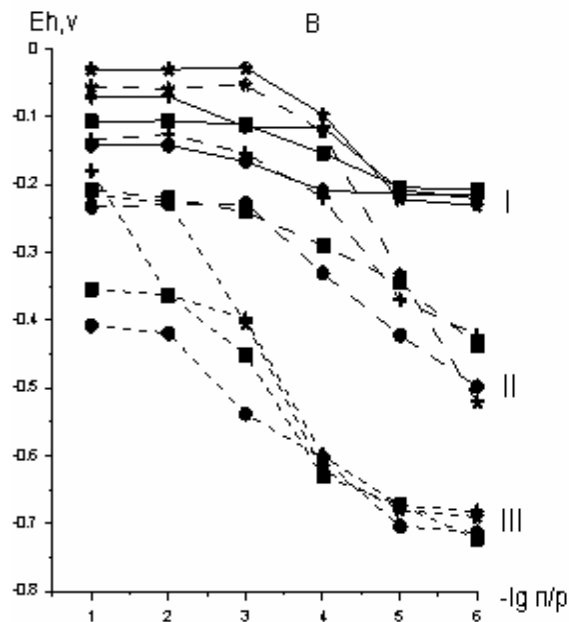
Отчетливо проявлено увеличение концентрации  $As_{p-p}$  с уменьшением температуры



Рассчитанный состав комплексов As и Fe в сульфидных растворах, режим просачивания - перколяции



pH: I. 3.64÷4.08;  
II. 5.96, III 8.22.

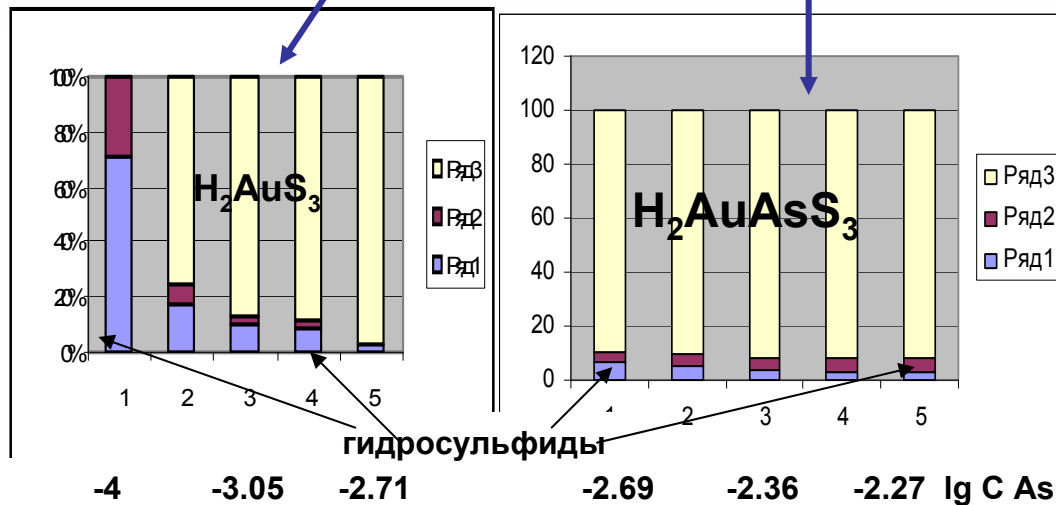


**Ред-окс потенциал  
сульфоарсенидного раствора при  
формировании арсенопирит-  
пиритового парагенезиса,  
рассчитанный в зависимости от pH и  
температуры. А – В режимы: А.  
перколяция, Б. растекание, В.  
стягивание**

**Температура, °С: 1. 150, 2. 200. 3. 250, 4. 300**

● - 1   ■ - 2   + - 3   \* - 4

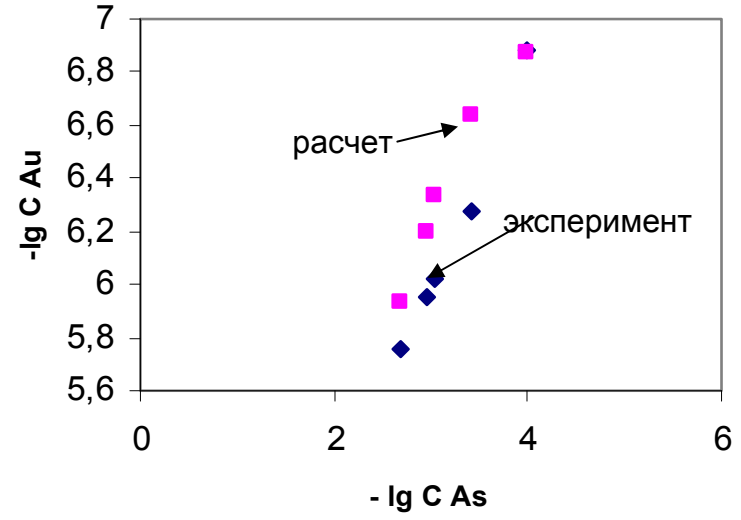
**Экспериментально установленная зависимость растворимости золота от концентрации мышьяка в растворе (Некрасов, 1988, 1991) буфер «Fe – Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>»**



**Расчитанные процентные доли комплексов золота в растворе при 200°C**

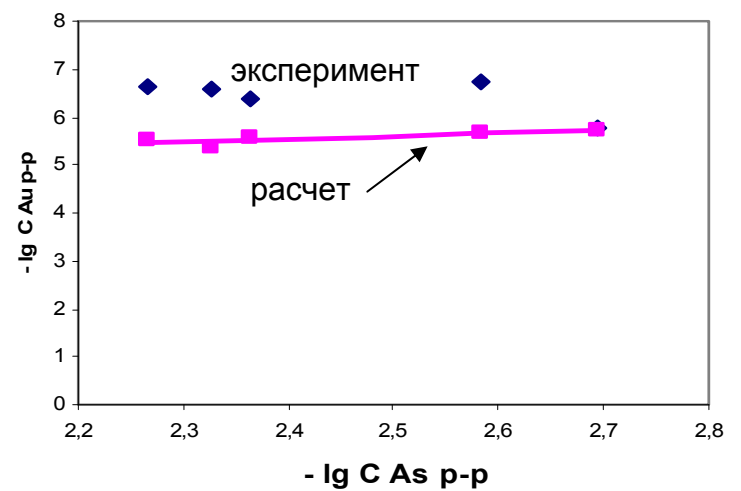
Зависимость между концентрациями As и Au в , интервал 1

**200°C, P=300бар**



Зависимость между концентрациями As и Au, интервал 2

**200°C, P=300 бар**



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- арсенопирит выделяется при взаимодействии сульфоарсенидного раствора с пиритизированным субстратом ранней рудной стадии в проницаемых участках как новообразование с замещением  $\text{FeS}_2$  на поверхности раздела фаз в парагенезисе с элементарным мышьяком, магнетитом или леллингитом в зависимости от pH и температуры;
- мышьяковистый пирит появляется в переходной зоне или за счет ограничения фильтрации сульфоарсенидного раствора; при уменьшении температуры ему сопутствуют сульфиды мышьяка;
- снижение температуры имеет следствием сепарацию в сульфоарсенидном растворе: концентрация мышьяка в нем увеличивается, а железа – снижается;
- в рудном растворе между участками с арсенопиритом и пиритом повышение окислительно-восстановительного потенциала на 0.5 В формирует геохимический барьер для осаждения растворенного золота;
- в сульфоарсенидных растворах золото переносится в форме сернисто-мышьяковистых, сульфоарсенидных комплексов, среди которых преобладает комплекс  $\text{H}_2\text{AuAsS}_3^0$

# Обогащительная фабрика ЗАО «Голец Высочайший»

Благодарю за внимание!

