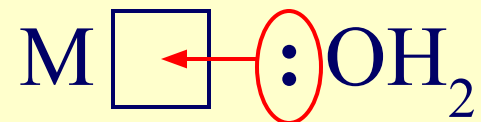


# Химия элементов. Лекция 6

Комплексные соединения: типы и классификация. Методы получения и разрушения. Решение задач.

# Типы комплексных соединений.

## 1. Аквакомплексы

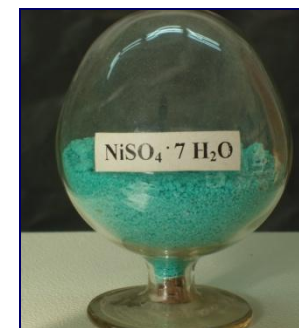
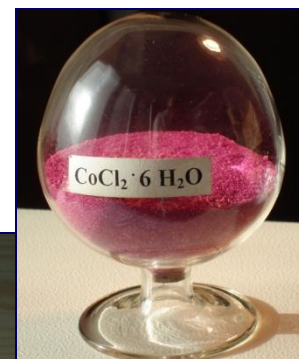
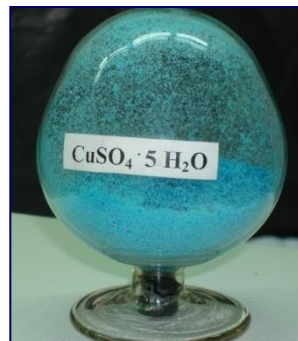


В водных растворах:

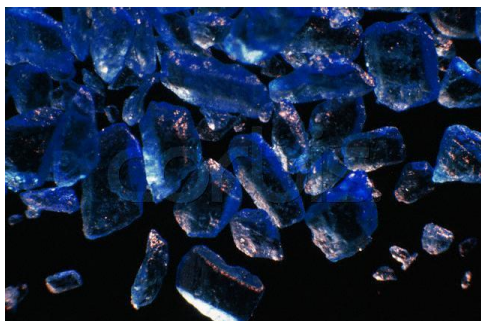
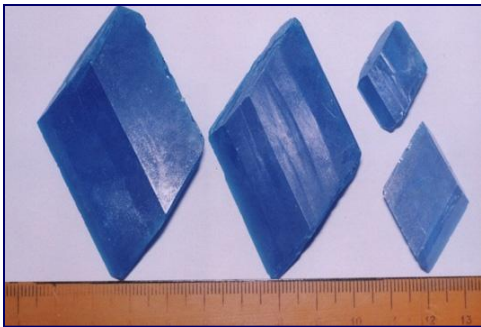
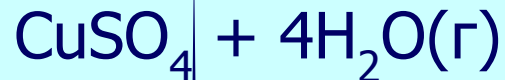
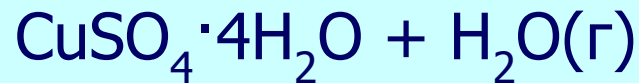
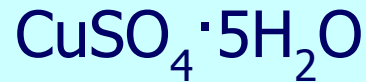
- $[\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$
- $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$
- $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+} \dots$

Кристаллогидраты:

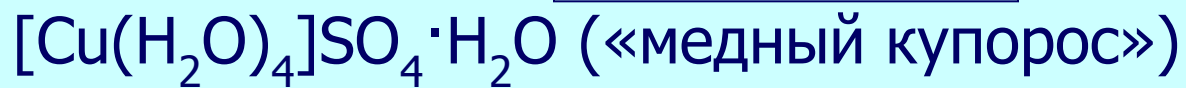
- $[\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{SO}_4$
- $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Cl}_3$
- $[\text{K}(\text{H}_2\text{O})_6][\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6](\text{SO}_4)_2$
- $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4]\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$



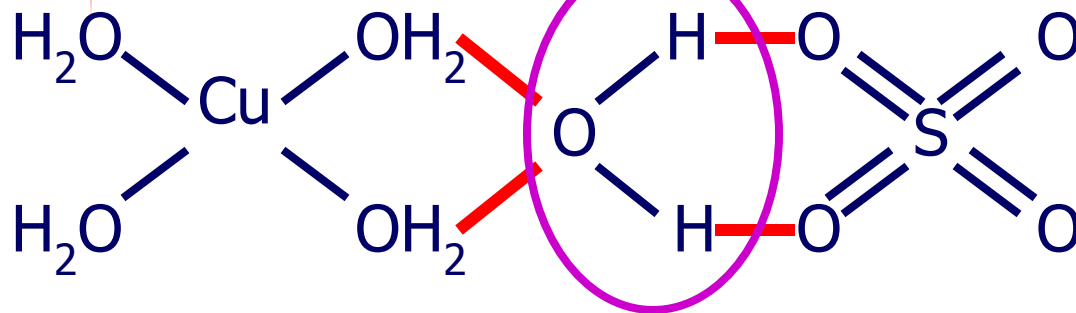
## Термич. разложение:



Кристаллогидрат



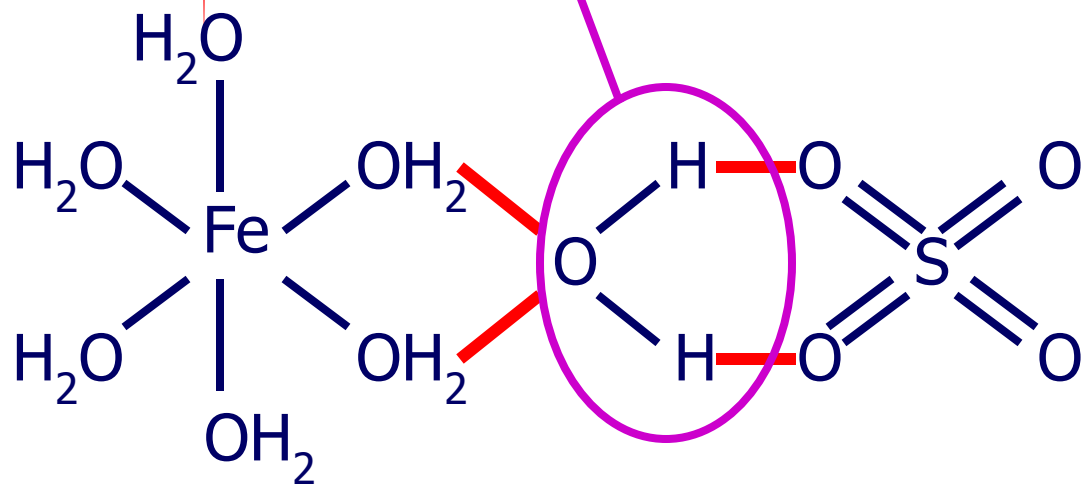
Аквакомплекс



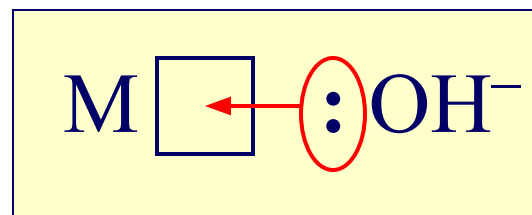
Кристаллогидрат



Аквacomплекс



## 2. Гидроксокомплексы



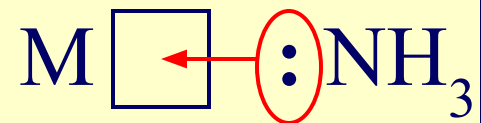
Получение:

- $Zn(OH)_2 + 2OH^-(\text{изб.}) = [Zn(OH)_4]^{2-}; pH \gg 7$

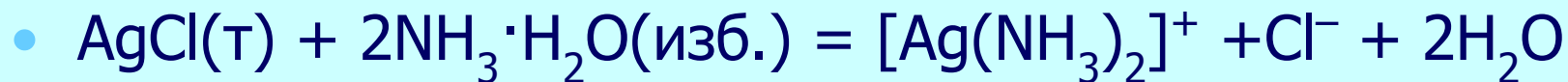
Разрушение:

- $[Zn(OH)_4]^{2-} (+H_3O^+)$
- $\square + CH_3COOH; CO_2; NH_4^+$  (сл.к-ты,  $pH \approx 7$ )
- $Zn(OH)_2(\tau)$
- $\square + H_3O^+$  (сильн.к-ты,  $pH < 7$ )
- $[Zn(H_2O)_4]^{2+}$
- Образование гидроксокомплексов характерно для амфотерных элементов.

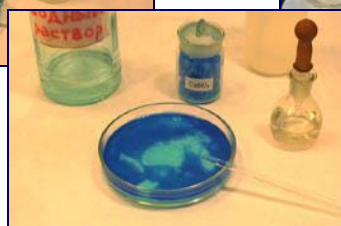
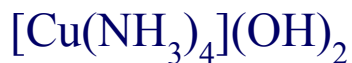
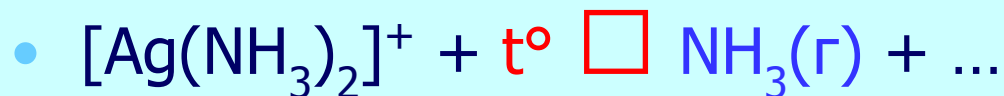
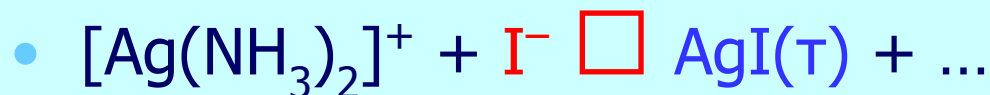
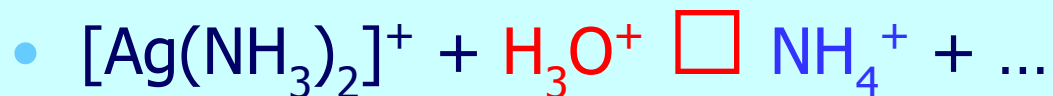
### 3. Аммины (аммиакаты)



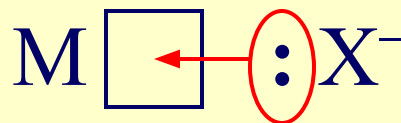
Получение:



Разрушение:



## 4. Ацидокомплексы



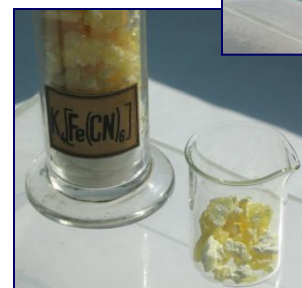
Получение:

- $HgI_2(\tau) + 2I^{-}(\text{изб.}) = [HgI_4]^{2-}$
- $[Fe(H_2O)_6]^{3+} + 6NCS^{-} = [Fe(NCS)_6]^{3-} + 6H_2O$

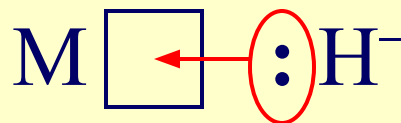
Разрушение:

- $[HgI_4]^{2-} + S^{2-} = HgS(\tau) + 4I^{-}$
- $[Fe(NCS)_6]^{3-} + 4F^{-} = [FeF_4]^{-} + 6NCS^{-}$

Получение и разрушение тиоцианатного к-са Fe(III)



## 5. Гидридокомплексы



Получение:

- $4 \text{NaH} + \text{B}(\text{OCH}_3)_3 = \text{Na}[\text{BH}_4] + 3\text{CH}_3\text{ONa}$  (при  $250^\circ\text{C}$ )
- $4 \text{LiH} + \text{AlCl}_3 = \text{Li}[\text{AlH}_4] + 3\text{LiCl}$
- $3 \text{Li}[\text{BH}_4] + \text{AlCl}_3 = \text{Al}[\text{BH}_4]_3 + 3\text{LiCl}$

Разрушение:

- $\text{Na}[\text{AlH}_4] + 4 \text{H}_2\text{O} = \text{NaOH} + \text{Al}(\text{OH})_3 + 4 \text{H}_2\uparrow$  (OBR)
- $2 \text{Na}[\text{BH}_4] + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{B}_2\text{H}_6\uparrow + 2 \text{H}_2\uparrow$  (OBR)



$\text{Li}[\text{AlH}_4]$



$\text{Na}[\text{BH}_4]$

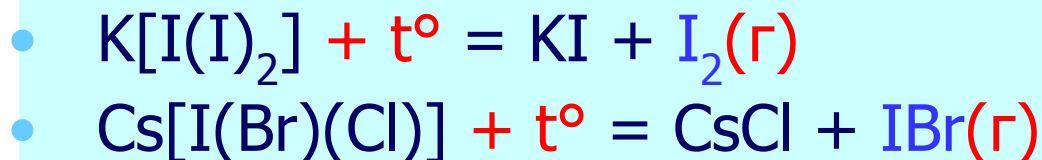


## 6. Анионгалогенаты $M[\text{Э}\Gamma'_m\Gamma''_n]$ (Э, $\Gamma'$ и $\Gamma''$ – галогены)

Получение:

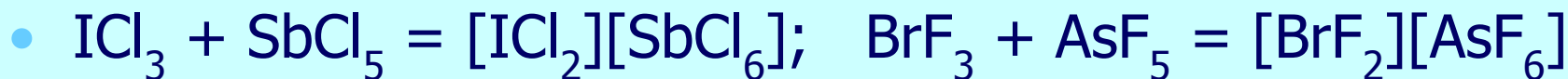


Разрушение:

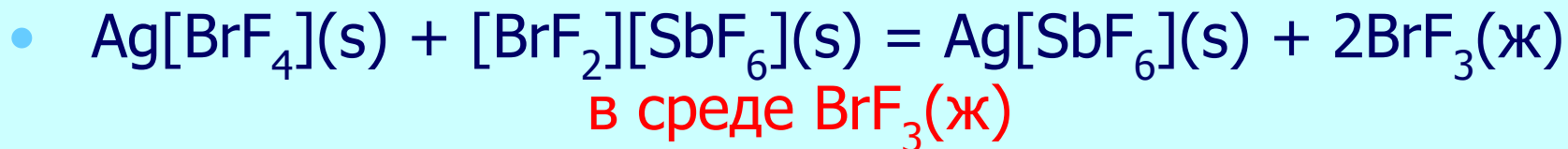


## 7. Катионгалогены $[\text{Э}\Gamma'_m\Gamma''_n]\text{Z}$ (Э, $\Gamma'$ и $\Gamma''$ – галогены)

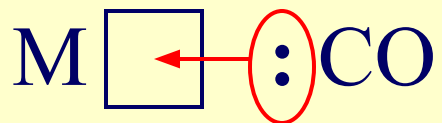
Получение:



Свойства:



## 8. Карбонилы



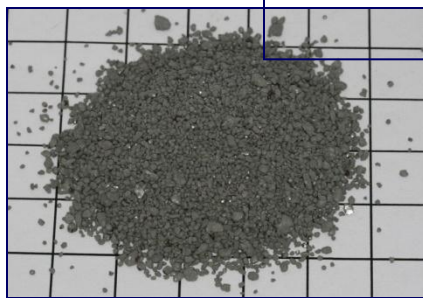
Получение:

- $\text{Ni}(\tau) + 4\text{CO}(\text{г}) = [\text{Ni}(\text{CO})_4](\text{ж})$  (ниже  $50\text{ }^\circ\text{C}$ )  
тетракарбонилникель(0)

Разрушение:

- $[\text{Ni}(\text{CO})_4](\text{ж}) + t^\circ = \text{Ni}(\tau) + 4\text{CO}(\text{г})$  (выше  $200\text{ }^\circ\text{C}$ )
- $[\text{Ni}(\text{CO})_4] + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{разб.}) = \text{NiSO}_4 + 4\text{CO}\uparrow + \text{H}_2\uparrow$

Высокочистое железо  
(карбонильный метод  
очистки)



Состав карбонильных комплексов:  $[\text{Cr}(\text{CO})_6]$ ,  $[\text{Mn}_2(\text{CO})_{10}]$ ,  $[\text{Fe}(\text{CO})_5]$ ,  $[\text{Co}_2(\text{CO})_8]$  и др.

## Правило Сиджвика для определения состава комплексов



Н.-В. Сиджвик  
(1873 –1952)

- Устойчивым является комплекс, в котором реализована 18-эл-ная оболочка из s-, p- и d-электронов M и x эл. пар лигандов (L)
- ${}_{26}\text{Fe}^0 [\text{Ar}]3d^64s^2 || {}_{36}\text{Kr}$
- $18 - 8 = 10e^-$
- или  $36 - 26 = 10e^-$
- $x = 10/2 = 5$  эл.пар (5 молекул CO)
- $[\text{Fe}(\text{CO})_5]$  пентакарбонилжелезо

## Правило Сиджвика (примеры)

- \*  ${}_{27}\text{Co}^0 [\text{Ar}]3d^74s^2 \parallel {}_{36}\text{Kr}$
- \*  $18 - 9 = 9e^-$ ;
- \*  $x = 9/2 = 4,5$  (?)
- \* радикал  $[\cdot\text{Co}(\text{CO})_4]$
- \* тетракарбонилкобальт  
(неуст.)
- \* димер  $[\text{Co}_2(\text{CO})_8]$  (уст.)  
октакарбонилдикобальт

- ${}_{23}\text{V}^0 [\text{Ar}]3d^34s^2 \parallel {}_{36}\text{Kr}$
- $18 - 5 = 13e^-$ ;
- $x = 13/2 = 6,5$  (?)
- радикал  $[\cdot\text{V}(\text{CO})_6]$  (неуст.)
- или компл.соединение  
состава  $\text{K}[:\text{V}^{-\text{I}}(\text{CO})_6]$   
гексакарбонилванадат(-I)  
калия (уст.)

## 9. π-комплексы

L – этилен  $C_2H_4$ , бензол  $C_6H_6$ ,  
циклопентадиен  $C_5H_6$  и т.п.

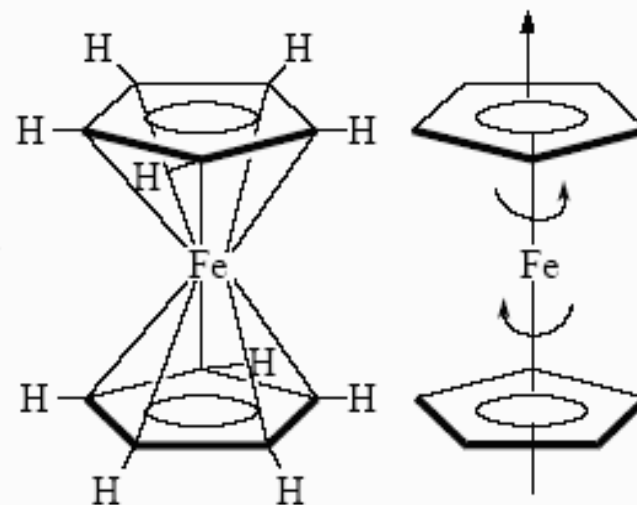
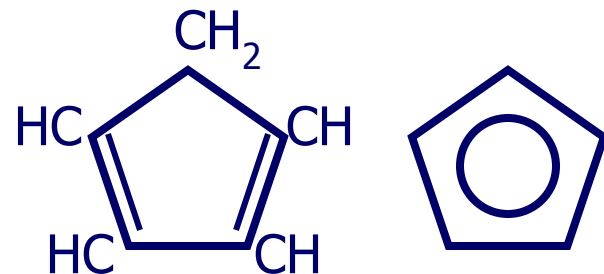
- **Получение:**
- циклопентадиен  $C_5H_6$  – слабая кислота HL
- $2 Na + 2HL = 2NaL + H_2 \uparrow$   
циклопентадиенилнатрий
- $FeCl_2 + 2Na(C_5H_5) (+thf) =$   
 $= [Fe^{+II}(C_5H_5)_2] + 2NaCl$   
(в среде тетрагидрофурана)

Другие π-комплексы:

$[Cr(C_6H_6)_2]$  – дибензолхром,

$[Mn^I(CO)_3(cp)]$  – цимантрен,

$[Co(cp)_2]OH$

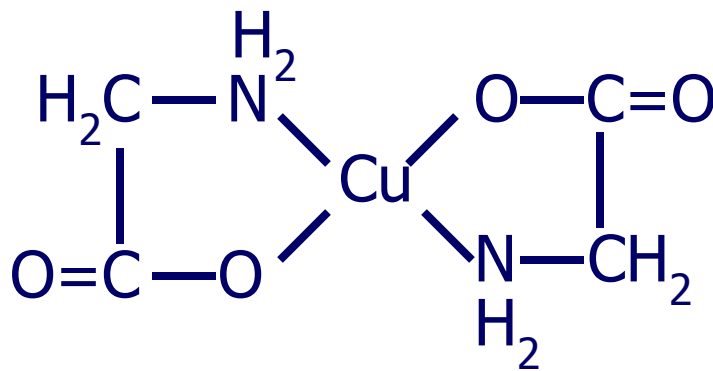


бис(циклопентадиенил)железо

$[Fe(C_5H_5)_2]$  (ферроцен)

## 10. Хелаты

- Внутр. сфера состоит из **циклич. группировок**, включающих **M** (комплексообразователь)
- $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$  –  $\alpha$ -аминоуксусная кислота (глицин)
- $\text{Cu}(\text{OH})_2 + 2 \text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} =$   
 $= [\text{Cu}(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2] + 2 \text{H}_2\text{O}$
- $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO}^-$  (глицинат-ион) - бидентатный лиганд





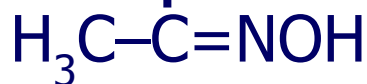
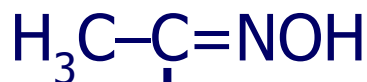
Л. А. Чугаев  
(1873–1922)

## Реакция Чугаева

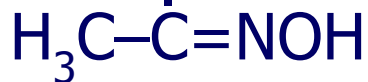
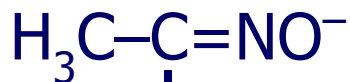
- $$\text{Ni}^{2+} + 2 \text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{L} =$$

$$= [\text{Ni}(\text{HL})_2](\text{т}) + 2\text{NH}_4^+ + 2\text{H}_2\text{O}$$

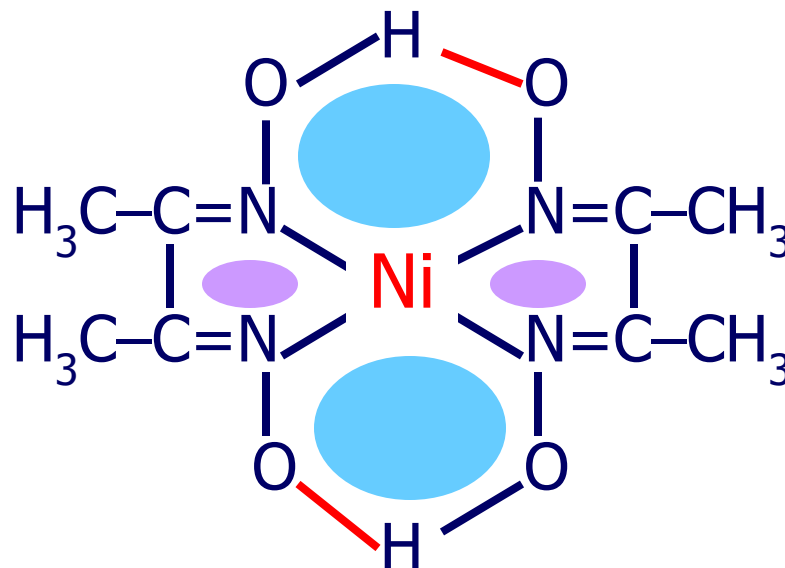
бис(диметилглиоксимато)никель(II)



диметилглиоксим  $\text{H}_2\text{L}$



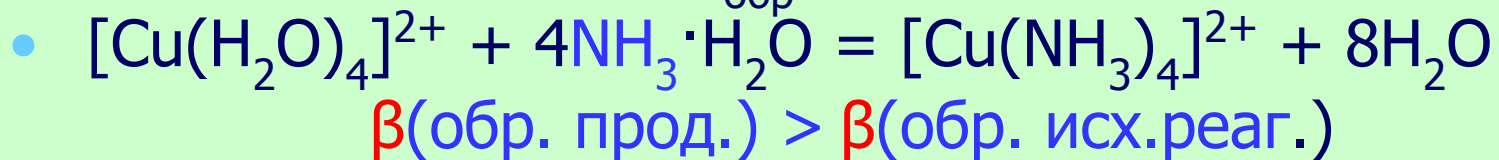
диметилглиоксимато-ион  $\text{HL}^-$



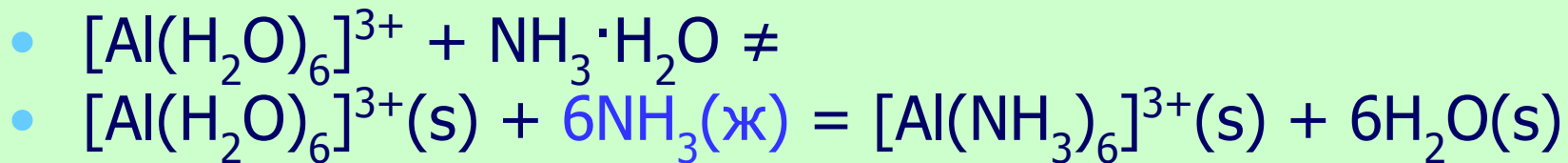
## Методы синтеза комплексных соединений

- **Реакция обмена лигандов**

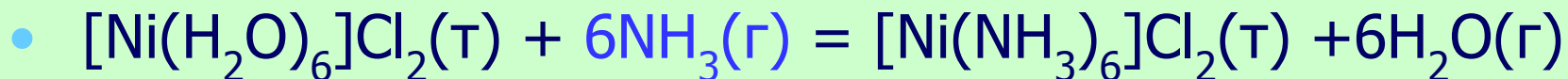
А) в водном растворе ( $\beta_{\text{обр}}$ , принцип Ле Шателье):



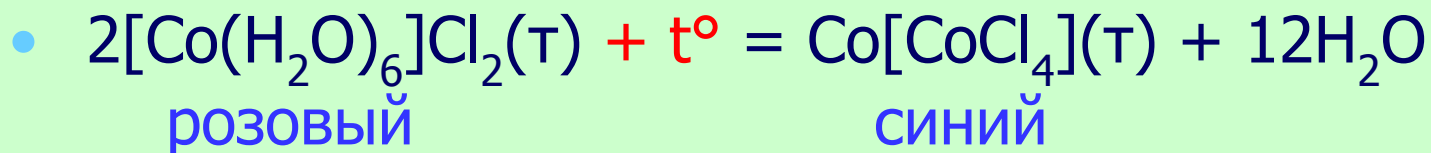
Б) в неводном растворителе:



В) без растворителя:



Г) внутримол. обмен лигандов в тв. фазе:





# Методы синтеза комплексных соединений

## Д) ОВР + реакции обмена лигандов

+Ок.+ L

- $[\text{Co}^{\text{II}}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+} \rightarrow [\text{Co}^{\text{III}}\text{L}_6]^{3+}$
- Ок.:  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{KNO}_2$  ... L –  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$  ...
- Примеры:
- $2\text{Co}^{\text{II}}\text{Cl}_2 + 12\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 = 2[\text{Co}^{\text{III}}(\text{NH}_3)_6](\text{OH})\text{Cl}_2$
- $\text{Co}^{\text{II}}\text{Cl}_2 + 7\text{KNO}_2 + 2\text{CH}_3\text{COOH} =$   
 $= \text{K}_3[\text{Co}^{\text{III}}(\text{NO}_2)_6]\downarrow + \text{NO}\uparrow + 2\text{KCl} + 2\text{CH}_3\text{COOK} + \text{H}_2\text{O}$   
+ Вс
- $[\text{Ni}^{\text{II}}(\text{CN})_4]^{2-} \rightarrow [\text{Ni}^0(\text{CN})_4]^{4-}$

## Решение задач. 1. Растворение осадка при комплексообразовании

- $\text{AgBr}(\tau) \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{Br}^-$ ;  $\text{ПР}_{\text{AgBr}} = 7,7 \cdot 10^{-13}$
- $\text{Ag}^+ + 2 \text{SO}_3\text{S}^{2-} \rightleftharpoons [\text{Ag}(\text{SO}_3\text{S})_2]^{3-}$ ;  $\beta_{\text{обп}} = 4 \cdot 10^{13}$
- $\text{AgBr}(\tau) + 2 \text{SO}_3\text{S}^{2-} \rightleftharpoons [\text{Ag}(\text{SO}_3\text{S})_2]^{3-} + \text{Br}^-$ ;
  - $K_c = ?$

$$K_c = \frac{[\text{Ag}(\text{SO}_3\text{S})_2^{3-}][\text{Br}^-][\text{Ag}^+]}{[\text{SO}_3\text{S}^{2-}]^2 [\text{Ag}^+]} = \text{ПР}_{\text{AgBr}} \times \beta_{\text{обп}}$$

$$K_c = \text{ПР}_{\text{AgBr}} \times \beta_{\text{обп}} = 7,7 \cdot 10^{-13} \times 4 \cdot 10^{13} = 30,8 \gg 1$$

Наблюдается растворение осадка (смещение равновесия вправо  $\rightarrow$ )

## Решение задач. 2. Реакция обмена лигандов

- $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+} + 6 \text{CN}^- \rightleftharpoons [\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-} + 6 \text{NH}_3$  ;
  - $K_c = ?$
- $\text{Co}^{3+} + 6 \text{NH}_3 \rightleftharpoons [\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$  ;  $\beta_{\text{обp}(1)} = 1,6 \cdot 10^{35}$
- $\text{Co}^{3+} + 6 \text{CN}^- \rightleftharpoons [\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$  ;  $\beta_{\text{обp}(2)} = 1,0 \cdot 10^{64}$

$$K_c = \frac{[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-} [\text{NH}_3]^6 [\text{Co}^{3+}]}{[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+} [\text{CN}^-]^6 [\text{Co}^{3+}]} = \frac{\beta_{\text{обp}(2)}}{\beta_{\text{обp}(1)}}$$

$$K_c = \beta_{\text{обp}(2)} / \beta_{\text{обp}(1)} = (1,0 \cdot 10^{64}) / (1,6 \cdot 10^{35}) = 6,2 \cdot 10^{29} \gg 1$$

Наблюдается смещение равновесия вправо →

## Решение задач. 3. Разрушение комплекса

- $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+} + 4 \text{H}_3\text{O}^+ \rightleftharpoons [\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+} + 4 \text{NH}_4^+$  ;
  - $K_c = ?$
- $\text{Cu}^{2+} + 4 \text{NH}_3 \rightleftharpoons [\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$  ;  $\beta_{\text{обp}} = 7,9 \cdot 10^{12}$
- $\text{NH}_4^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O}^+$  ;  $K_k = 5,75 \cdot 10^{-10}$

$$K_c = \frac{[\text{Cu}^{2+}] [\text{NH}_4^+]^4 [\text{NH}_3]^4}{[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}] [\text{H}_3\text{O}^+]^4 [\text{NH}_3]^4} = \frac{1}{\beta_{\text{обp}} K_k^4}$$

$$K_c = 1 / (7,9 \cdot 10^{12} \cdot 5,75^4 \cdot 10^{-40}) = 1,16 \cdot 10^{20} \gg 1$$

Наблюдается разрушение аммиачного комплекса в кислотной среде (смещение равновесия вправо  $\rightarrow$ )

## Решение задач. 4. Направление реакции

- $\text{CuCN(т)} + \text{H}_2\text{O} + \text{HCN} \rightleftharpoons [\text{Cu}(\text{CN})_2]^- + \text{H}_3\text{O}^+$ 
  - $K_c = ?$
- $\text{Cu}^+ + 2\text{CN}^- \rightleftharpoons [\text{Cu}(\text{CN})_2]^-$ ;  $\beta_{\text{обр}} = 1,0 \cdot 10^{24}$
- $\text{HCN} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CN}^- + \text{H}_3\text{O}^+$ ;  $K_k = 4,93 \cdot 10^{-10}$
- $\text{CuCN(т)} \rightleftharpoons \text{Cu}^+ + \text{CN}^-$ ;  $\text{ПР}_{\text{CuCN}} = 3,2 \cdot 10^{-20}$

$$K_c = \frac{[\text{Cu}(\text{CN})_2^-][\text{H}_3\text{O}^+][\text{CN}^-][\text{Cu}^+][\text{CN}^-]}{[\text{HCN}][\text{CN}^-]^2[\text{Cu}^+]} = \beta_{\text{обр}} \cdot K_k \cdot \text{ПР}_{\text{CuCN}}$$

$$K_c = 1,0 \cdot 10^{24} \cdot 4,93 \cdot 10^{-10} \cdot 3,2 \cdot 10^{-20} = 1,6 \cdot 10^{-6} \ll 1$$

Растворение осадка не наблюдается (равновесие смещено влево  $\leftarrow$ )