

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ РАСТВОРОВ

УДК 544.032.732:544.3.032.1:[54-386:[546.302+547.898]]

КОНСТАНТЫ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПЛЕКСОВ НИКЕЛЯ(II) С КРИПТАНДОМ[2.2.2] В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЭТАНОЛА

© 2023 г. В. А. Исаева^{а,*}, Е. И. Погодина^а, А. С. Католикова^а, В. А. Шарнин^а

^аИвановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия

*e-mail: kvol1969@gmail.com

Поступила в редакцию 22.09.2022 г.

После доработки 27.10.2022 г.

Принята к публикации 28.10.2022 г.

Потенциометрическим методом при $T = 298\text{ K}$ и $\mu \rightarrow 0$ определены константы устойчивости комплексов никеля(II) с криптаном[2.2.2] в водно-этанольных растворах с переменной концентрацией органического соразтворителя. Установлено, что в растворе возможно образование моноядерного, биядерного и протонированного криплатов никеля(II), устойчивость которых возрастает при увеличении содержания этанола. С использованием литературных данных рассчитаны значения энергии Гиббса переноса иона никеля(II) из воды в водно-этанольный растворитель. Дана оценка вкладов пересольватации реагентов в водно-этанольных смесях в изменение устойчивости комплексов никеля(II) с криптаном[2.2.2].

Ключевые слова: криптан[2.2.2], ион никеля(II), комплексообразование, константа устойчивости, водно-этанольный растворитель

DOI: 10.31857/S0044453723040155, **EDN:** TFXMBE

Криптанты — объемные макроциклические мультидентантные лиганды с узловыми атомами азота или углерода и донорными атомами кислорода, серы или азота в составе циклов. Криптантные комплексы демонстрируют наибольшую устойчивость при геометрическом соответствии размера трехмерной полости макроцикла и катиона металла. Способность макроциклических соединений селективно связывать, переносить, разделять катионы определяет практическое применение криптантов. Криптанты используются в качестве экстрагентов для металлов [1, 2], высокоселективных сорбентов [3, 4], как контрастные агенты для магнитно-резонансной томографии [5–7], в качестве катализаторов межфазных процессов [8, 9], применяются в электрохимии [10, 11], в хроматографии [12, 13], для синтеза супрамолекулярных полимеров [14, 15]. Активное применение на практике криптантов и их комплексных соединений стимулирует исследования, связанные с определением термодинамических и кинетических параметров процессов образования криплатов металлов как в водных растворах, так и неводных средах [16–20].

Нами ранее были определены константы кислотно-основных равновесий криптана[2.2.2] в водно-этанольных и водно-диметилсульфоксидных растворах [21, 22], а также исследованы состав, структура и устойчивость координационных

соединений иона меди(II) с криптаном[2.2.2] в водной и водно-этанольных средах [23, 24]. Цель настоящей работы — изучение влияния состава водно-этанольного растворителя на устойчивость комплексных соединений криптана[2.2.2] с ионом никеля(II).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для определения констант равновесия реакций комплексообразования иона никеля(II) с криптаном[2.2.2] методом потенциометрического титрования использовали стеклянный электрод, на работоспособность которого в водно-этанольных смесях указывается в работе [25]. В качестве электрода сравнения применяли хлор-серебряный электрод. Для уменьшения диффузионного потенциала на концах электролитического мостика внутренний раствор электрода сравнения готовили на основе водно-этанольного растворителя соответствующего состава. Измерения выполняли при температуре 298 K в интервале концентраций этанола (EtOH) в растворе 0.0–0.5 мол. доли. Ограничение диапазона концентраций органического соразтворителя вызвано ухудшением растворимости криплатов никеля(II). В каждой точке состава водно-этанольного растворителя проводили два титрования по разным методикам. При титровании раствора крип-

Таблица 1. Константы устойчивости комплексов никеля(II) с криптаном[2.2.2] в водном и водно-этанольных растворах при 298 К

X_{EtOH} , мол. доли	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\lg K_1^\circ \pm 0.09$	4.58	4.83	5.17	5.37	5.67	5.81
$\lg \beta_2^\circ \pm 0.2$	11.7	11.8	11.9	11.9	11.9	12.1
$\lg K_3^\circ \pm 0.2$	2.5	2.6	2.8	2.9	2.9	3.0

танда[2.2.2] в ячейке (5×10^{-3} моль/л) раствором титранта, содержащим перхлорат никеля(II) (3×10^{-2} моль/л) и хлорную кислоту (5×10^{-2} моль/л), обеспечивали отсутствие избытка концентрации никеля(II) относительно лиганда. При титровании раствора криптанда[2.2.2] в ячейке (5×10^{-3} моль/л) раствором титранта, содержащим перхлорат никеля(II) (6×10^{-2} моль/л) и хлорную кислоту (4×10^{-2} моль/л) обеспечивали создание избытка концентрации никеля(II) относительно лиганда.

Эксперимент проводили в отсутствие фонового электролита при малых концентрациях веществ. Ионная сила раствора в потенциометрической ячейке в конце титрования не превышала 0.02, поэтому полученные значения констант устойчивости комплексов принимали за стандартные ($\mu \rightarrow 0$). Погрешность определения констант оценивали, как частное отклонение отдельных измерений от среднего значения измеряемой величины, исходя из обработки результатов не менее двух параллельных опытов по каждой из методик.

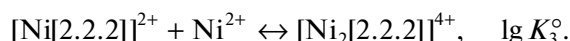
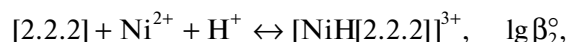
В работе использовали криптан[2.2.2] (Merck KGaA, Германия, содержание основного компонента $\geq 99\%$), хлорную кислоту (“х.ч.”), перхлорат никеля(II) (“х.ч.”) без дополнительной очистки. Концентрацию HClO_4 определяли титрованием точных навесок буры в присутствии метилового оранжевого. Содержание основного вещества в $\text{Ni}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ определяли титрованием гексагидрата перхлората никеля(II) раствором трилона Б в среде аммиачного буферного раствора в присутствии индикатора мурексида. Этанол (“ректификат”) перегоняли при атмосферном давлении, остаточное содержание воды учитывали при приготовлении растворов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В трехмерной объемной молекуле криптанда[2.2.2] узловые атомы азота соединены тремя оксиэтиленовыми цепочками, каждая из которых содержит два эфирных атома кислорода: $\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{N}$.

Размещаясь в полости криптанда, катионы d -металлов способны образовывать моноядерные

комплексы состава 1 : 1. Некоторые работы по исследованию процессов комплексообразования криптанов с ионами d -металлов [24, 26, 27] демонстрируют также возможность образования в растворе протонированных и биядерных криптантных комплексов. При постановке потенциометрического эксперимента ставилась задача обеспечить протекание равновесных процессов в растворах никеля(II) с криптаном[2.2.2] в условиях образования моноядерного, протонированного и биядерного криптантных комплексов:



Координационные равновесия сопровождаются реакциями протонирования криптанда[2.2.2] и процессом автопротолиза растворителя, что учитывалось при обработке результатов потенциометрического титрования по программе РНМЕТР [28]. Константы протолитических равновесий криптанда[2.2.2] для водно-этанольных смесей определены нами ранее в отдельном эксперименте [21], константы автопротолиза водно-этанольного растворителя взяты из [29]. Одновременный расчет констант устойчивости ($\lg K_1^\circ$, $\lg \beta_2^\circ$ и $\lg K_3^\circ$) не представлялся возможным ввиду высокой корреляции определяемых величин. Поэтому константы устойчивости моноядерного и протонированного криптантов никеля(II) рассчитывали по результатам титрования в условиях отсутствия избытка иона-комплексообразователя по отношению к лиганду. Полученные величины использовали при расчете константы устойчивости биядерного криптантного комплекса по результатам титрования в условиях создания избытка иона никеля(II) относительно лиганда.

Константа устойчивости моноядерного комплекса никеля(II) с криптаном[2.2.2] в водном растворе определена при $T = 298 \text{ К}$ в работе [30] ($\lg K_1 = 4.4$, $\mu = 0.05(\text{CH}_3)_4\text{NClO}_4$) и в работе [31] ($\lg K_1 \leq 3.5$, $\mu = 0.1(\text{Et}_4\text{NClO}_4)$). Полученное нами значение константы устойчивости $[\text{Ni}[2.2.2]]^{2+}$ в водном растворе (табл. 1) хорошо согласуется с более надежными данными [30]. Сведений о константах образования в растворе протонированного и биядерного комплексов никеля(II) с криптаном[2.2.2] в доступной литературе нами не найдено.

Диаграммы долевого распределения частиц в зависимости от pH среды, построенные с использованием полученных констант образования криптантов никеля(II) и констант протонирования криптанда[2.2.2] [21] показывают, что образование протонированного и биядерного криптантов никеля(II) в водном растворе характеризуется

малым выходом этих частиц (рис. 1а). Это приводило к сложностям в выборе методики и концентрационных условий постановки эксперимента и расхождению результатов параллельных опытов, вследствие чего возникала достаточно большая погрешность определения величин $\lg \beta_2^\circ$ и $\lg K_3^\circ$. Добавление в водный раствор этанола способствовало увеличению выхода протонированного и биядерного криптантных комплексов никеля(II) (рис. 1б).

Повышение концентрации в водном растворе этанола приводит к росту констант устойчивости моно- и биядерного комплексов никеля(II) с криптаном[2.2.2] (табл. 1). Изменение величины $\lg \beta_2^\circ$ в водно-этанольных растворах не превышает заявленную погрешность ее определения (табл. 1), поэтому нельзя достоверно утверждать о росте константы устойчивости протонированного криптата никеля(II), однако полагаем, что имеется тенденция незначительного повышения устойчивости комплексной частицы $[\text{NiH}[2.2.2]]^{3+}$.

При сопоставлении степени воздействия состава смешанного растворителя на устойчивость мооядерных комплексов никеля(II) и меди(II) с криптаном[2.2.2] (рис. 2) было отмечено, что с ростом концентрации этанола в растворе для криптата никеля(II) наблюдается больший прирост $\lg K_1^\circ$, чем для криптата меди(II) [24]. Константа устойчивости биядерного комплекса криптана[2.2.2] как с ионом никеля(II), так и ионом меди(II) [24] в водно-этанольных смесях возрастает незначительно (рис. 2). Прослеживается аналогия во влиянии состава водно-этанольного растворителя на устойчивость комплексов никеля(II) и меди(II) с макроциклом и нециклическими *N*-донорными лигандами. Прирост устойчивости мооядерного криптата никеля(II) в водно-этанольном растворе ($\Delta \lg K_1^\circ = 1.23$ при $X_{\text{EtOH}} = 0.5$ мол. доли) сопоставим с приростом устойчивости комплекса никеля(II) с этилендиамином (En) ($\Delta \lg K = 1.34$ при $X_{\text{EtOH}} = 0.5$ мол. доли) [32] (рис. 2а), для комплекса меди(II) в диапазоне концентраций этанола в растворе 0.0–0.4 мол. доли рост устойчивости составляет менее 0.5 лог. ед. [24], при этом повышения устойчивости комплекса меди(II) с этилендиамином в этой области составов растворителя не наблюдается [33] (рис. 2а). Биядерный криптит меди(II) образуется за счет присоединения второго иона металла к мооядерному комплексу без вхождения в полость лиганда [23, 27]. Если допустить подобную структуру для $[\text{Ni}_2[2.2.2]]^{4+}$, то представляется логичным, что в водно-этанольных растворах прирост ступенчатых констант устойчивости биядерных комплексов никеля(II) и меди(II) [24] с криптаном[2.2.2] соизмерим с приростом кон-

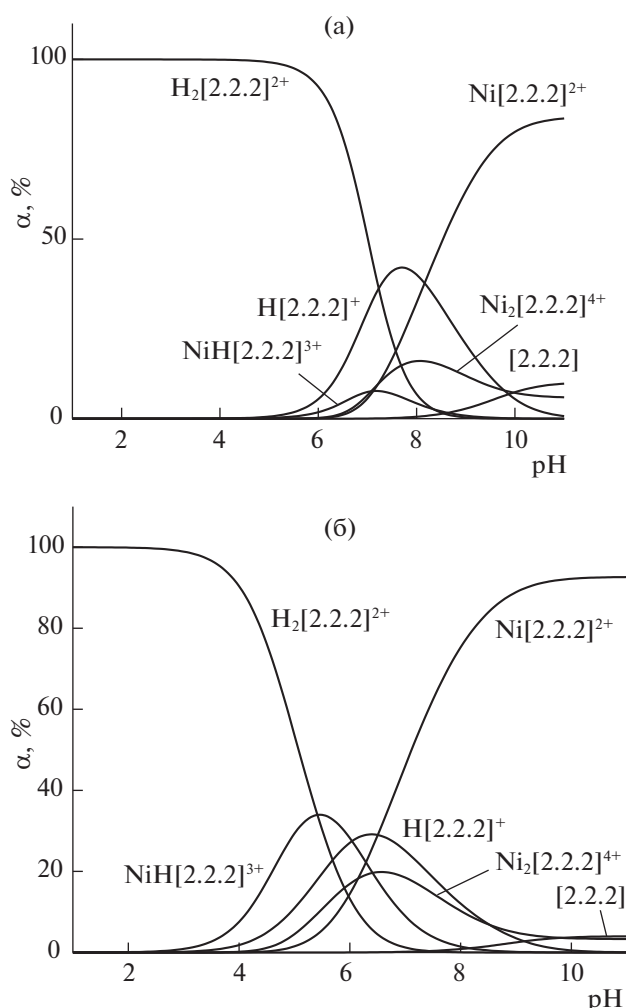


Рис. 1. Диаграммы долевого распределения частиц в зависимости от pH при мольном соотношении Ni^{2+} : криптан[2.2.2], равном 1 : 1, в водном растворе (а) и водно-этанольном растворе при $X_{\text{EtOH}} = 0.5$ мол. доли (б).

стант устойчивости моноаммиакатов никеля(II) [34] и меди(II) [35] соответственно (рис. 2б).

Влияние состава водно-этанольного растворителя на устойчивость протонированных комплексов никеля(II) и меди(II) с криптаном[2.2.2] различается. При повышении концентрации этанола в растворе для комплекса $[\text{CuH}[2.2.2]]^{3+}$ уменьшение константы его устойчивости [24] идет симбатно с уменьшением константы протонирования криптана[2.2.2] [21]. Константа устойчивости $[\text{NiH}[2.2.2]]^{3+}$ возрастает при повышении концентрации этанола в смеси. Различное влияние концентрации этанола в растворе на значения констант устойчивости $[\text{NiH}[2.2.2]]^{3+}$ и $[\text{CuH}[2.2.2]]^{3+}$ полагаем можно объяснить при сопоставлении величин изменения констант протонирования криптана[2.2.2] ($\Delta \lg K^\circ = -0.6$ [21]) и

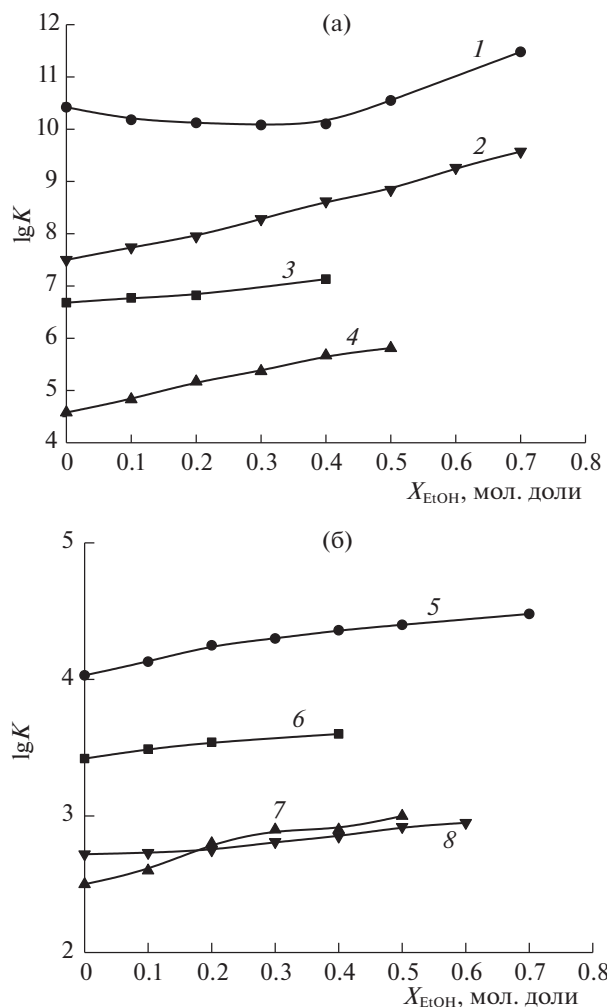


Рис. 2. Влияние водно-этанольного растворителя на константы устойчивости комплексов никеля(II) и меди(II): 1 – [CuEn]²⁺, 2 – [NiEn]²⁺, 3 – [Cu[2.2.2]]²⁺, 4 – [Ni[2.2.2]]²⁺, 5 – [CuNH₃]²⁺, 6 – [Cu₂[2.2.2]]⁴⁺, 7 – [Ni₂[2.2.2]]⁴⁺, 8 – [NiNH₃]²⁺; $\mu = 0$ (1, 3–8) и 0.3 (2).

констант устойчивости мооядерных комплексов никеля(II) ($\Delta \lg K_1^\circ = 1.1$) и меди(II) ($\Delta \lg K_1^\circ = 0.4$ [24]) (изменения констант даны в диапазоне состава растворителя от 0.0 до 0.4 мол. доли этано-

Таблица 2. Изменение энергии Гиббса ($\Delta_{tr}G^\circ(\text{Ni}^{2+})$, кДж/моль) переноса иона Ni^{2+} из воды в водно-этанольный растворитель при 298 К и значениях $X_{\text{EtOH}} = 0.1$ – 0.6 мол. доли (I и II – расчет с использованием значений $\Delta_{tr}G^\circ(\text{ClO}_4^-)$ по данным [40] и [41] соответственно)

Данные	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
I	4.4	6.8	8.3	9.4	10.0	10.3
II	0.6	0.4	1.5	3.2	5.6	
[34]	2.2	–1.2	–6.0	–8.6	–9.7	–8.9

ла). Сумма двух величин для комплексов меди(II) ($\Delta \lg K(\text{H}[2.2.2]^+) + \Delta \lg K([\text{Cu}[2.2.2]]^{2+}) = -0.6 + +0.4 = -0.2$) имеет отрицательное значение, как и величина изменения константы устойчивости $[\text{CuH}[2.2.2]]^{3+}$ ($\Delta \lg \beta_2^\circ = -0.8$ [24]). Для протонированного комплекса никеля(II) в той же области составов растворителя изменение константы ($\Delta \lg \beta_2^\circ = 0.2$) является положительной величиной, как и сумма величин изменения константы протонирования криптанда[2.2.2] [21] и константы устойчивости мооядерного криптатного комплекса никеля(II) ($\Delta \lg K(\text{H}[2.2.2]^+) + \Delta \lg K([\text{Ni}[2.2.2]]^{2+}) = -0.6 + 1.1 = 0.5$).

При оценке вкладов пересольватации участников процесса комплексообразования в изменение устойчивости криптатов *d*-металлов полагают [36, 37], что величины изменения ΔG° переноса свободного криптанда и мооядерного криптатного комплекса из воды в водно-органические смеси практически равны и в значительной мере компенсируют друг друга, поскольку ион металла в комплексной частице экранирован полостью макроцикла от растворителя. Соответственно, изменение ΔG° реакции образования $[\text{Ni}[2.2.2]]^{2+}$ должно определяться в основном изменением энергии Гиббса переноса иона никеля(II) из воды в водно-этанольный растворитель:

$$\Delta_{tr}G_{r1}^\circ = \Delta_{tr}G^\circ([\text{Ni}[2.2.2]]^{2+}) - \Delta_{tr}G^\circ([2.2.2]) - \Delta_{tr}G^\circ(\text{Ni}^{2+}), \quad (1)$$

$$\Delta_{tr}G_{r1}^\circ = -2.303RT(\lg K_{l\text{mix}}^\circ - \lg K_{lw}^\circ), \quad (2)$$

где $\lg K_{l\text{mix}}^\circ$ и $\lg K_{lw}^\circ$ – константа устойчивости в водно-этанольном растворителе и в воде соответственно.

Однако приведенные в работе [34] значения энергии Гиббса переноса Ni^{2+} из воды в водно-этанольные смеси отрицательны практически во всей области составов смешанного растворителя (табл. 2), что не может способствовать росту константы устойчивости мооядерного криптата никеля(II). Исходя из того, что для других *d*-металлов (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+}) значения $\Delta_{tr}G^\circ$ положительны во всей области составов водно-спиртового растворителя [38, 39], мы предположили наличие ошибки в работе [34] при определении значений $\Delta_{tr}G^\circ(\text{Ni}^{2+})$. Авторами [34] по изменению общего давления и состава пара над системой вода–этанол–электролит определена энергия Гиббса переноса перхлората никеля(II) из воды в водно-этанольный растворитель и при делении на ионные составляющие использованы собственные значения $\Delta_{tr}G^\circ$ перхлорат-иона:

$$\Delta_{tr}G^\circ(\text{Ni}^{2+}) = \Delta_{tr}G^\circ(\text{Ni}(\text{ClO}_4)_2) - 2\Delta_{tr}G^\circ(\text{ClO}_4^-). \quad (3)$$

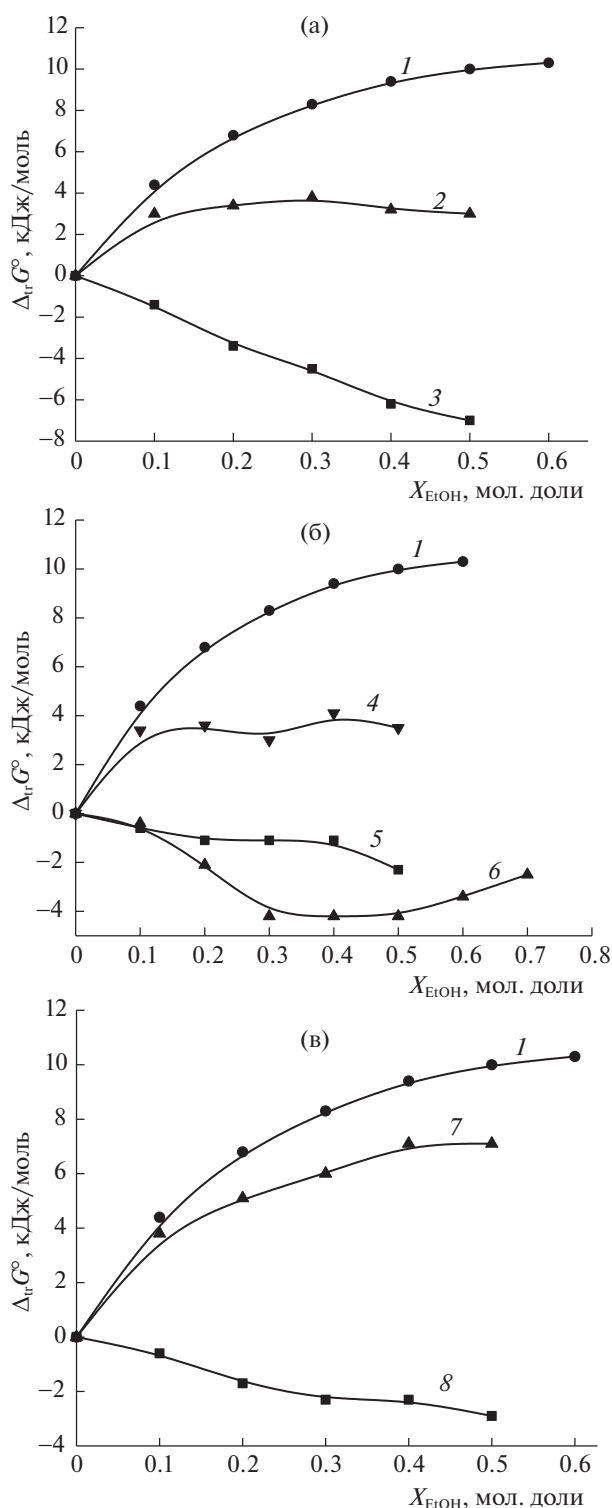


Рис. 3. Изменение энергии Гиббса реакций образования мооядерного (а), протонированного (б) и биядерного (в) комплексов никеля(II) с криптаном[2.2.2] и переноса реагентов из воды в водно-этанольные смеси: 1 – $\Delta_r G^\circ(\text{Ni}^{2+})$, 2 – $(\Delta_r G^\circ([\text{Ni}][2.2.2]]^{2+}) - \Delta_r G^\circ([2.2.2])$, 3 – $\Delta_r G^\circ_{\text{r1}}$, 4 – $(\Delta_r G^\circ([\text{NiH}[2.2.2]]^{3+}) - \Delta_r G^\circ([2.2.2]))$, 5 – $\Delta_r G^\circ_{\text{r2}}$, 6 – $\Delta_r G^\circ(\text{H}^+)$, 7 – $(\Delta_r G^\circ([\text{Ni}_2[2.2.2]]^{4+}) - \Delta_r G^\circ([\text{Ni}[2.2.2]]^{2+}))$, 8 – $\Delta_r G^\circ_{\text{r3}}$.

Полагаем, что значения $\Delta_r G^\circ(\text{Ni}^{2+})$, представленные авторами [34], недостоверны в виду высокой погрешности определения ΔG° переноса перхлорат-иона из воды в водно-этанольный растворитель. В работах [40, 41] по растворимости солей определены химические потенциалы переноса некоторых ионов из воды водно-этанольные смеси, что позволило автору [42] представить численные значения $\Delta_r G^\circ(\text{ClO}_4^-)$ для водно-этанольных смесей. Данные [34] о $\Delta_r G^\circ$ перхлорат-иона превышают значения $\Delta_r G^\circ(\text{ClO}_4^-)$, рассчитанные в [42] на основе данных [40, 41], более, чем в 2 раза. Поэтому в настоящей работе, используя результаты работ [40, 41] и значения $\Delta_r G^\circ((\text{NiClO}_4)_2)$ [34], рассчитали по уравнению (3) величины $\Delta_r G^\circ$ переноса иона Ni^{2+} из воды в водно-этанольный растворитель. Рассчитанные нами значения $\Delta_r G^\circ(\text{Ni}^{2+})$ для водно-этанольного растворителя (табл. 2), независимо от источника данных о $\Delta_r G^\circ(\text{ClO}_4^-)$, положительны, что согласуется с данными для других d -металлов, и представляются более надежными, чем результаты расчетов [34].

При анализе сольватационных вкладов реагентов в изменение энергии Гиббса реакций образования криптантных комплексов никеля(II) использовали значения $\Delta_r G^\circ(\text{Ni}^{2+})$, рассчитанные нами по источнику данных о параметрах пересольватации перхлорат-иона [40], так как они получены на основе допущения о равенстве $\Delta_r G^\circ(\text{Ph}_4\text{As}^+) = \Delta_r G^\circ(\text{BPh}_4^-)$, что рекомендуется Маркусом (Marcus Y.) [42].

Как следует из рис. 3а, рост отрицательного значения изменения энергии Гиббса реакции образования $[\text{Ni}[2.2.2]]^{2+}$ с повышением концентрации этанола в растворе определяется в основном ослаблением сольватации иона металла. Изменение энергии Гиббса переноса свободного криптанта[2.2.2] и его комплекса с никелем(II) в значительной мере взаимокompенсируют друг друга, поскольку ион-комплексобразователь огражден от растворителя полостью макроцикла.

Образование протонированного криптата никеля(II) характеризуется, предположительно (по аналогии с протонированным криптатом меди(II) [23, 27]), вхождением ионов Ni^{2+} и H^{2+} внутрь полости криптанда[2.2.2]. Несмотря на то, что в полости макроцикла инкапсулировано два иона, при переходе от воды к водно-органическому растворителю разница в изменениях энергий Гиббса переноса протонированной комплексной частицы и свободного лиганда практически равна аналогичной разнице в изменениях энергий Гиббса переноса для мооядерного комплекса: $\Delta_r G^\circ([\text{Ni}[2.2.2]]^{2+}) - \Delta_r G^\circ([2.2.2]) \approx (\Delta_r G^\circ([\text{NiH}[2.2.2]]^{3+}) - \Delta_r G^\circ([2.2.2]))$ (рис. 3а и 3б).

Изменение энергии Гиббса реакции образования протонированного комплекса в водно-органических растворителях зависит в основном от изменений энергий Гиббса переноса ионов водорода и никеля(II). Ослабление сольватации иона-комплексобразователя нивелируется усилением сольватации протона [38], определяя тем самым незначительное изменение устойчивости протонированного криптата никеля(II) в водно-этанольных смесях (рис. 3б).

При образовании $[\text{Ni}_2[2.2.2]]^{4+}$ разница в изменении значений $\Delta_{\text{tr}}G^\circ$ моноядерного комплекса и биядерного комплекса в водно-этанольном растворителе достаточно велика ($(\Delta_{\text{tr}}G^\circ([\text{Ni}_2[2.2.2]]^{4+}) - (\Delta_{\text{tr}}G^\circ([\text{Ni}[2.2.2]]^{2+})) > 7$ кДж/моль) и сопоставима с величиной $\Delta_{\text{tr}}G^\circ(\text{Ni}^{2+})$ (рис. 3в), что определяет малое изменение устойчивости биядерного криптата никеля(II).

Таким образом, в настоящей работе установлено, что в водно-этанольных растворах увеличение концентрации органического соразтворителя способствует повышению устойчивости комплексов никеля(II) с криптаном[2.2.2]. Показано, что изменение устойчивости моноядерного и протонированного криптаных комплексов определяется в основном изменением сольватного состояния иона-комплексобразователя и иона водорода, изменение устойчивости биядерного криптата никеля(II) зависит от пересольватации в водно-этанольном растворителе всех участников равновесного процесса.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам при Президенте Российской Федерации, проект № МК-923.2022.1.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dilber G., Kantekin H., Basaran D. et al. // Pak. J. Anal. Environ. Chem. 2014. V. 15. № 2. P. 20.
2. Salman A.D., Juzsakova T., Jalhoom M.G. et al. // J. Sustainable Metallurgy. 2022. V. 8. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00484-7>
3. Taurozzi J.S., Redko M.Y., Manes K.M. et al. // Separat. Purificat. Technol. 2013. V. 116. P. 415. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.06.005>
4. Amendola A., Bergamaschi G., Boiocchi M. et al. // Chem. Sci. 2014. V. 5. P. 1820. <https://doi.org/10.1039/c3sc53504e>
5. Ekanger L.A., Polin L.A., Shen Y. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2015. V. 54. № 48. P. 14398. <https://doi.org/10.1002/anie.201507227>
6. Bailey M.D., Jin G-X., Carniato F. et al. // Chem. A Europ. J. 2021. V. 27. № 9. P. 3114. <https://doi.org/10.1002/chem.202004450>
7. Leone L., Guarnieri L., Martinelli J. et al. // Chem. A Europ. J. 2021. V. 27. № 46. P. P. 11811. <https://doi.org/10.1002/chem.202101701>
8. Kuntzsch M., Lamparter D., Bruggener N. et al. // Pharmaceutic. 2014. V. 7. P. 621. <https://doi.org/10.3390/ph7050621>
9. Blevins D.W., Rigney G.H., Fang M.Y. et al. // Nucl. Medic. Biolog. 2019. V. 74–75. P. 41. <https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2019.07.008>
10. Mauthner G., Scherf U., Emil J.W., List E.J.W. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 133501. <https://doi.org/10.1063/1.2773756>
11. Zejli H., Hidalgo-Hidalgo de Cisneros J.L., Naranjo-Rodriguez I. et al. // Anal. Lett. 2007. V. 40. № 14. P. 2788. <https://doi.org/10.1080/00032710701577906>
12. Woodruff A., Pohl C.A., Bordunov A., Avdalovic N. // J. Chromatogr. A 2003. V. 997. № 1–2. P. 33. [https://doi.org/10.1016/s0021-9673\(03\)00550-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(03)00550-8)
13. Vanatta L.E., Woodruff A., Coleman D.E. // J. Chromatogr. A 2005. V. 1085. № 1. P. 33. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.01.048>
14. Wang F., Zhang J., Ding X. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2010. V. 49. P. 1090. <https://doi.org/10.1002/anie.200906389>
15. Wang Q., Cheng M., Tian L. et al. // Polym. Chem. 2017. V. 8. P. 6058. <https://doi.org/10.1039/c7py01096f>
16. Lenora C.U., Staples R.J., Allen M.J. // Inorg. Chem. 2020. V. 59. № 1. P. 86. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b03605>
17. Trautnitz M.F.K., Haas T., Schubert H., Seitz M. // Chem. Commun. 2020. V. 56. P. 9874. <https://doi.org/10.1039/d0cc04050a>
18. Gholiee Y., Salehzadeh S. // J. Mol. Liquid. 2020. V. 309. P. 113149. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113149>
19. Vashistha V.K., Kumar A. // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 6. P. 834. <https://doi.org/10.1134/s0036023621060218>
20. Bondarev N.V. // Russ. J. Gen. Chem. 2021. V. 91. № 3. P. 409. <https://doi.org/10.1134/S1070363221030117>
21. Исаева В.А., Шарнин В.А. // Журн. физ. химии. 2018. Т. 92. № 4. С. 600. <https://doi.org/10.7868/S0044453718040131>
22. Исаева В.А., Гамов Г.А., Шарнин В.А. // Журн. физ. химии. 2022. Т. 96. № 5. С. 687. <https://doi.org/10.31857/S0044453722050132>
23. Исаева В.А., Гамов Г.А., Шарнин В.А. // Журн. неорган. химии. 2021. Т. 66. № 11. С. 1577. <https://doi.org/10.31857/S0044457X2111009X>
24. Исаева В.А., Кипятков К.А., Гамов Г.А., Шарнин В.А. // Журн. физ. химии. 2021. Т. 95. № 5. С. 758. <https://doi.org/10.31857/S0044453721050162>
25. Бургер К. Сольватация, ионные реакции и комплексобразование в неводных средах. М.: Мир, 1984. — 256 с.

26. *Arnaud-Neu F., Spiess B., Schwing-Weill M. J.* // J. Am. Chem. Soc. 1982. V. 104. № 21. P. 5641.
<https://doi.org/10.1021/ja00385a014>
27. *Spiess B., Arnaud-Neu F., Schwing-Weill M. J.* // Helv. Chim. Acta. 1979. V. 62. № 5. P. 1531.
<https://doi.org/10.1002/hlca.19790620518>
28. *Бородин В.А., Козловский Е.В., Васильев В.П.* // Журн. неорган. химии. 1986. Т. 31. № 1. С. 10.
29. *Woollej E.H., Hurkot D.G., Herber L.G.* // J. Phys. Chem. 1970. V. 74. № 22. P. 3908.
<https://doi.org/10.1021/j100716a011>
30. *Buschmann H.-J., Cleve E., Schollmeyer E.* // J. Coord. Chem. 1997. V. 42. P. 127.
<https://doi.org/10.1080/00958979708045285>
31. *Arnaud-Neu F., Spiess B., Schwing-Weill M. J.* // Helv. Chim. Acta. 1977. V. 60. № 8. P. 2633.
<https://doi.org/10.1002/hlca.19770600815>
32. *Невский А.В., Шорманов В.А., Крестов Г.А.* // Ко-
орд. химия. 1989. Т. 5. № 11. С. 1576.
33. *Михеев С.В., Фадеев Ю.Ю., Шарнин В.А., Шорманов
В.А.* // Журн. неорган. химии. 1994. Т. 39. № 9.
С. 1502.
34. *Невский А.В., Шорманов В.А., Крестов Г.А.* // Ко-
орд. химия. 1983. Т. 9. № 3. С. 391.
35. *Шарнин В.А.* // Журн. общ. химии. 1999. Т. 69. № 9.
С. 1421.
36. *Chanton M.K., Kolthoff I.M.* // J. Solut. Shem. 1985. V. 14.
№ 1. P. 1. [https://link.springer.com/article/10.1007/
BF00646725](https://link.springer.com/article/10.1007/BF00646725)
37. *Cox B.G., Garsia-Rosas J., Schneider H.* // J. Am.
Chem. Soc. 1981. V. 103. № 6. P. 1384.
<https://doi.org/10.1021/ja00396a016>
38. *Kalidas C., Hefter G., Marcus Y.* // Chem. Rev. 2000.
V. 100. № 3. P. 819.
<https://doi.org/10.1021/cr980144k>
39. *Чанкина Т.И., Парфенюк Т.И.* // Изв. вузов. Химия
и хим. технолог. 2009. Т. 52. № 5. С. 21.
40. *Blandamer M.J., Briggs B., Burgess J. et al.* // J. Chem.
Soc. Farad. Trans. 1. 1988. V. 84. № 8. P. 2703.
<https://doi.org/10.1039/F19888402703>
41. *De Ligny C.L., Bax D., Alfenaar M., Elferink M.G.L.* //
Recl. Trav. Chim. Pays Bas. 1969. V. 88. № 10. P. 1183.
<https://doi.org/10.1002/recl.19690881005>
42. *Marcus Y.* // Chem. Rev. 2007. V. 107. № 9. P. 3880.
<https://doi.org/10.1021/cr068045r>