ЖУРНАЛ НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ, 2022, том 67, № 10, с. 1453–1458

— ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 546.814-31+546.057

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКЦИЙ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ СЕРЕБРА(I) С НЕКОТОРЫМИ N-И N,N'-ЗАМЕЩЕННЫМИ ТИОМОЧЕВИНАМИ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ

© 2022 г. А. С. Самадов^{а,} *, И. В. Миронов^b, Г. З. Казиев^a, А. Г. Чередниченко^c, Э. Ф. Файзуллозода^d, А. Ф. Степнова^{a, c}

^а Московский педагогический государственный университет, ул. Кибальчича, 6, корп. 3, Москва, 129164 Россия ^bИнститут неорганической химии СО РАН, пр-т Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090 Россия ^cРоссийский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

^d Таджикский национальный университет, пр-т Рудаки, 17, Душанбе, 734025 Таджикистан

**e-mail: s.s.rasul@mail.ru* Поступила в редакцию 27.12.2021 г. После доработки 28.03.2022 г. Принята к публикации 27.04.2022 г.

Потенциометрическим методом в водном растворе изучены реакции комплексообразования серебра(I) с тиомочевиной (Tu), N-фенилтиомочевиной (Phtu), N,N'-дифенилтиомочевиной (Bphtu), N-ацетилтиомочевиной (Actu) и тиосемикарбазидом (Tsc) в интервале температур 278.2–328.2 К при ионной силе I = 0.11 моль/л (0.1 NaNO₃ + 0.01 HNO₃). Показано, что процесс проходит с образованием комплексов различного состава согласно схеме Ag⁺ + i L = AgL⁺_i, где i = 1-3 и $C^{0}_{Ac^+} = (1-5) \times 10^{-5}$ моль/л. Определены термодинамические характеристики ($lg\beta_i, \Delta_r G^0, \Delta_r H^0$ и $\Delta_r S^0$) этих реакций. Установлено, что максимальный рост экзотермичности ($\Delta_r H^0$) наблюдается для второй ступени комплексообразования: AgL⁺ + L = AgL⁺₂. Исключением является реакция с тиосеми-карбазидом. Устойчивость монокоординированных комплексов изменяется в ряду: Actu < Tsc < Bphtu < Phtu < Tu, что хорошо коррелирует с константами протонирования органических лигандов. Для комплексов типа AgL⁺₂ и AgL⁺₃ с Phtu и Bphtu данная закономерность нарушается, что связано с влиянием фенильных заместителей на комплексообразующие свойства этих производных тиомочевины.

Ключевые слова: реакции комплексообразования, производные тиомочевины, комплексы серебра(I), термодинамика комплексообразования

DOI: 10.31857/S0044457X22100257

введение

Изучение равновесий в водных растворах соединений серебра(I) с тиомочевиной и ее производными представляет научный и практический интерес. Эти результаты могут быть использованы в гидрометаллургии при извлечении благородных металлов и серебра из вторичного сырья (электронный лом, ювелирные изделия и др.) [1-5]. В этом случае производные тиомочевины представляют собой селективные комплексообразующие агенты, способствующие эффективному извлечению требуемого компонента [6]. Другой областью применения комплексов серебра с серосодержащими органическими лигандами является медицина. Эти соединения могут проявлять широкий спектр антибактериальной [7, 8], противовирусной [9] и противоопухолевой [10] активности. Таким образом, определение констант равновесий образующихся комплексов в

водном растворе и влияния температуры на их устойчивость является актуальной и практически важной задачей.

Известно, что при взаимодействии серебра(I) с тиомочевиной и ее производными могут образовываться моно- и биядерные комплексы. В некоторых случаях эти соединения синтезированы, выделены в виде индивидуальных веществ и охарактеризованы [11-15]. Установлено, что в моноядерных комплексах Ag⁺ координируется с атомом серы лиганда, а в биядерных комплексах межлу атомами серы может образовываться мостиковая связь. Исследованы равновесия образования моно- и биядерных комплексов Ag(I) с тиомочевиной и некоторыми ее N-замещенными производными в водном растворе при 25°C с применением потенциометрических и спектрофотометрических методов анализа [16-20]. Установлено, что при низких концентрациях комплексо-

ряного электрода.

образователя ($C_{Ag^+} < 1 \times 10^{-4}$ моль/л) в растворе преимущественно присутствуют моноядерные комплексы [17], а при более высоких концентрациях — биядерные [16, 21]. Данные о константах устойчивости комплексов Ag(I) с N-фенилтиомочевиной (Phtu), N,N'-дифенилтиомочевиной (Bphtu), N-ацетилтиомочевиной (Actu) и тиосемикарбазидом (Tsc) при разных температурах и термодинамических характеристиках этих процессов в научной и технической литературе отсутствуют.

Цель работы — определение термодинамических характеристик равновесных реакций комплексообразования ионов серебра(I) с тиомочевиной (Tu), N-фенилтиомочевиной (Phtu), N,N'дифенилтиомочевиной (Bphtu), N-ацетилтиомочевиной (Actu) и тиосемикарбазидом (Tsc) в водном растворе при 278.2–328.2 К и ионной силе 0.11 моль/л (0.1 NaNO₃ + 0.01 HNO₃).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения исследований использовали нитрат серебра(I) "ч. д. а.", нитрат натрия "х. ч.", тиомочевину (Tu) "ос. ч.", N-фенилтиомочевину (Phtu) "х. ч.", N,N'-дифенилтиомочевину (Bphtu) "х. ч.", N-ацетилтиомочевину (Actu) "х. ч.", тиосемикарбазид (Tsc) "х. ч.". Исследования выполняли с помощью потенциометрического метода анализа. Индикаторным электродом служила серебряная проволока (содержание серебра >99.99%), а электродом сравнения — хлорсеребряный электрод. Солевой мост заполняли насыщенным раствором KNO₃ во избежание образования AgCl на границе с исследуемым раствором. ЭДС системы измеряли с помощью прибора Эксперт-001. Потенциометрическое титрование проводили в интервале температур 278.2–318.2 К с использованием жидкостного термостата U15. Отклонение температуры от заданных значений не превышало $\pm 0.1^{\circ}$ С. Предварительные проверки обратимости серебряного электрода при отсутствии лигандов и при разных температурах показали, что в этих условиях $C_{Ag^+} = [Ag^+]$. Наклон зависимости E = $= E^{\emptyset} + \theta \lg C_{Ag}$ в исследуемом интервале температур (θ) составлял от 55 до 63 мВ/рАд с возможным отклонением ±2 мВ, что соответствует теоретическому значению электродной функции. В ходе проведенных экспериментов применяли растворы AgNO₃ и лигандов с концентрациями $C_{Ag} = (1-5) \times 10^{-5}$ моль/л и $C_L = (0.1-10) \times 10^{-2}$ моль/л. Все растворы готовили непосредственно перед началом экспериментов с использованием прокипяченной дистиллированной воды. Ионную силу системы поддерживали постоянной раствором 0.1 моль/л NaNO₃ и 0.01 моль/л HNO₃. Стакан с рабочим раствором (30 мл) был закрыт крышкой с четырьмя отверстиями: для Ag-электрода, ввода титранта, термометра и трубки солевого мостика. Отверстия снабжены манжетами, обеспечивающими герметичность соединений. В ходе эксперимента раствор с заданной концентрацией C_{Ag}^0 титровали раствором лигандов и измеряли потенциал сереб-

Обработку экспериментальных данных для расчета констант устойчивости проводили с помощью нелинейного метода наименьших квадратов [16, 22]. Для этого на основе известных анали-с использованием констант равновесия первого приближения рассчитывали концентрации образующихся комплексов (AgL⁺_i, i = 1-3). Равновесные концентрации ионов [Ag⁺] определяли с помощью уравнения Нернста: $\Delta E = E - E^0 =$ $= \theta lg([Ag^+]/C_{Ag}^0) = -\theta lg(1 + \sum \beta_i \cdot [L]^i)$, где E^0 – по-тенциал Аg-электрода при $C_L = 0$ в исходном растворе с C_{Ag}^0 . Из рассчитанных $\Delta E_{\text{расч}}$ и экспериментальных $\Delta E_{_{Эксп}}$ значений потенциалов находили функцию $S^2 = \sum (\Delta E_{\text{расч}} - \Delta E_{_{ЭКсп}})$. Далее, варьируя величины констант, последовательно минимизировали среднее квадратичное отклонение S^2 , чтобы его значение по каждой экспериментальной точке составляло не более 1.5 мВ. Такие расчеты проводили для всех серий титрования при разных температурах. Стандартные отклонения $lg\beta_i$ оценивали при доверительном интервале P = 0.95 [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Потенциометрическое титрование проводили при $C_{Ag^+} = (1-5) \times 10^{-5}$ моль/л и T = 278.2 - 318 К. В случае низких концентраций комплексообразователя в изучаемых системах протекает моноядерное комплексообразование согласно схеме:

$$Ag^{+} + iL = AgL_{i}^{+}, \beta_{i}.$$
 (1)

В качестве примера можно рассмотреть результаты потенциометрического титрования для тиосемикарбазидных комплексов серебра(I) при разных температурах (рис. 1). При титровании для всех лигандов максимальное изменение значения потенциала наблюдали при соотношении $C_{\rm L}/C_{\rm Ag} \sim 2.0$, что свидетельствует об образовании

устойчивых комплексов AgL⁺₂. Кроме того, при $C_{\rm L} < 0.01$ моль/л при разных исследуемых температурах и различных лигандах значение наклона зависимости ($\Delta E/\Delta \lg C_{\rm L}$) $C_{\rm Ag} = 126-138$ мВ (рис. 1a), а при $C_{\rm L} \ge 0.01$ моль/л эта величина составляет ($\Delta E/\Delta \lg C_{\rm L}$) $C_{\rm Ag} = 180-196$ мВ (рис. 1б), что соответствует теоретическому значению (110-126)



Рис. 1. Зависимости потенциала серебряного электрода от логарифма общей концентрации тиосемикарбазида и $C_{Ag^+} = 1 \times 10^{-5}$ (a); 5×10^{-5} моль/л (б). T = 278.2 (I); 288.2 (2); 298.2 (3); 308.2 (4); 318.2 K (5). Точки соответствуют экспериментальным данным, сплошная линия – расчетным.

и 166-189 мВ/лог. ед. соответственно). Вышеуказанные рассуждения подтверждает рассмотрение частных производных $d \lg F/d \lg[L] = \overline{n}$, $F = 1 + \sum \beta_i [Tsc]^i$, где функция образования (\overline{n}) варьирует от 0 до 3. Такие концентрационные зависимости наблюдали для всех лигандов, кроме систем с N,N'-дифенилтиомочевиной, и при всех используемых температурах. Этот экспериментальный факт указывает на то, что в исследуемых системах образуются комплексы состава AgL_2^+ и AgL⁺. Значения констант устойчивости моно- и бис-координированных комплексов рассчитывали при $\bar{C}_{\rm L}$ < 0.01 моль/л, а константы *mpuc*-координированных комплексов были определены при более высоких концентрациях лигандов $(C_{\rm I} \ge 0.01 \text{ моль/л})$. Величину константы устой-

чивости комплекса AgBphtu⁺₃ не удалось определить из-за низкой растворимости N,N'-дифенилтиомочевины ($C_{Bphtu} \sim (4-5) \times 10^{-5}$ моль/л). Значения логарифмов констант устойчивости комплексов Ag⁺ с тиомочевиной и ее N- и N,N'замещенными в интервале температур 278.2– 318.2 К для реакции Ag⁺ + *i*L = AgL⁺_i (*i* = 1–3) приведены в табл. 1.

Анализ полученных результатов при ступенчатом комплексообразовании показал, что значения констант для *mpuc*-координированного ком-

плекса AgL_3^+ с использованными лигандами, кроме фенилтиомочевинных комплексов, заметно меньше, чем для моно- и *бис*-координированных комплексов. Это связано с необходимостью избыточного присоединения лигандов (более двух), что нехарактерно для ионов серебра (координационное число (**K** \mathbf{W}) = 2). Увеличение температуры закономерно приводит к уменьшению устойчивости комплексов для отдельных стадий комплексообразования. Значения констант монокоординированных N- и N,N'-замещенных комплексов ниже, чем монокоординированных тиомочевинных комплексов. В ряду Actu < Tsc < Bphtu < < Phtu < Tu устойчивость комплексов увеличивается. Данная закономерность прослеживается также с константами равновесия (К_Н лигандов) реакции протонирования лигандов $L + H^+ = HL^+$ (р $K_{Tsc} =$ = 1.85 [23], pK_{Bphtu} = 1.80, pK_{Phtu} = 1.59, pK_{Tu} = 1.15 [24]). Поскольку в исследованных производных тиомочевины атом водорода замещен на электроноакцепторные фрагменты ацетильных и фенильных групп, их влияние приводит к уменьшению основных свойств атома серы в лигандах и способствует уменьшению устойчивости комплексов. Установлено, что константа устойчивости N-ацетилтиомочевинных комплексов на 0.5-2.0 лог. ед. ниже, чем остальных комплексов, это связано с vменьшением донорных свойств атома серы лиганда за счет влияния ацетильной группы. Таким образом, полученные значения констант монокоординированных комплексов $\lg \beta_1$ (табл. 1) удовлетворительно коррелируют с константами протонирования соответствующих лигандов, что соответствует имеющимся литературным данным [25].

Характерно, что устойчивость *бис-* и *трис*-координированных комплексов изменяется следующим образом: Actu < Tsc < Tu < Phtu < Bphtu. Для второй и третьей ступени комплексообразования серебра с Phtu и Bphtu наблюдается исключение из общей закономерности, характерной

Лиганд	$\lg \beta_i$	278.2 K	288.2 K	298.2 K	308.2 K	318.2 K			
Tu	1	5.85 ± 0.10	5.70 ± 0.06	5.61 ± 0.10 [16]	5.33 ± 0.10	5.14 ± 0.09			
$pK_{Tu} = 1.15 [24]$	2	11.68 ± 0.08	11.07 ± 0.05	10.62 ± 0.03 [16]	10.24 ± 0.04	9.85 ± 0.03			
	3	14.25 ± 0.15	13.69 ± 0.10	13.05 ± 0.11 [16]	12.53 ± 0.08	12.00 ± 0.08			
Tsc	1	5.90 ± 0.11	5.68 ± 0.09	5.41 ± 0.10 [16]	5.23 ± 0.04	4.96 ± 0.04			
$pK_{Tsc} = 1.85 [23]$	2	11.34 ± 0.10	10.86 ± 0.08	10.36 ± 0.03 [16]	10.06 ± 0.05	9.73 ± 0.06			
	3	13.5 ± 0.15	12.95 ± 0.08	12.47 ± 0.10 [16]	11.84 ± 0.06	11.50 ± 0.03			
Actu	1	5.31 ± 0.10	5.15 ± 0.08	4.92 ± 0.04 [16]	4.86 ± 0.08	4.65 ± 0.06			
-	2	9.84 ± 0.06	9.42 ± 0.09	9.01 ± 0.07 [16]	8.63 ± 0.03	8.19 ± 0.05			
	3	12.24 ± 0.10	11.73 ± 0.09	11.01 ± 0.10 [16]	10.61 ± 0.08	9.92 ± 0.07			
Phtu	1	5.80 ± 0.10	5.69 ± 0.05	5.58 ± 0.08 [16, 17]	5.29 ± 0.10	$5{,}13\pm0.08$			
$pK_{Phtu} = 1.59 [24]$	2	11.86 ± 0.15	11.32 ± 0.10	10.77 ± 0.06 [16, 17]	10.32 ± 0.03	9.94 ± 0.06			
	3	15.81 ± 0.20	15.12 ± 0.12	14.19 ± 0.09 [16, 17]	13.44 ± 0.10	12.79 ± 0.04			
Bphtu	1	$5.11 \pm 0.06*$	—	5.56 ± 0.10 [16]	5.40 ± 0.08	5.27 ± 0.08			
$pK_{Bphtu} = 1.80 [24]$	2	$10.05\pm0.05*$	—	11.32 ± 0.09 [16]	10.80 ± 0.15	10.44 ± 0.09			

Таблица 1. Значения логарифмов констант устойчивости комплексов Ag(I) с тиомочевиной и ее производными при 278.2–318.2 К, I = 0.11 моль/л (0.1 NaNO₃ + 0.01 HNO₃)

* Данные константы получены при 328.2 К.

для первой ступени. Действительно, влияние фенильных заместителей на константы устойчивости комплексов может быть различным. С одной стороны, происходит снижение донорных свойств атома серы, а с другой – на устойчивость влияют гидрофобные свойства фенильных заместителей. Вклад каждого из эффектов определяет наблюдаемый результат для конкретного случая. Если комплекс имеет низкую устойчивость, то влияние гидрофобных свойств арильных заместителей можно не учитывать. Для высокоустойчивых комплексов серебра(I) влияние гидрофобных свойств таких заместителей, например на устойчивость бис- и трис-координированных комплексов, превосходит эффект от снижения донорных свойств серы, связанных с константой протонирования.

В ходе проведенных исследований с использованием уравнения Вант–Гоффа $\Delta G^0 = -RT \ln \beta_i =$ $= \Delta H^0 - T \Delta S^0$ были рассчитаны значения энергии Гиббса ($\Delta_r G^0$), энтальпии ($\Delta_r H^0$) и энтропии ($\Delta_r S^0$) реакций образования комплексов $Ag^+ + iL =$ $= AgL_{i}^{+}, i = 1-3$ (рис. 2). Термодинамические характеристики ($\Delta_r G^0$, $\Delta_r H^0$ и $\Delta_r S^0$) реакций образования комплексов серебра(I) с тиомочевиной и некоторыми ее производными приведены в табл. 2. Видно, что для всех лигандов величина энергии Гиббса ($\Delta_r G^0$, кДж/моль) имеет отрицательные значения, что говорит о самопроизвольном протекании процессов в водных растворах. При ступенчатом комплексообразовании $Ag^+ + iL = AgL_i^+$ и увеличении КЧ сродство ионов металла к лиганду уменьшается (особенно для *трис*-координированных комплексов) в следующей последовательности: $\Delta_r G_1^0 \leq \Delta_r G_2^0 \leq \Delta_r G_3^0$.

В изученных системах протекают экзотермические реакции, и наблюдаемое изменение энтальпии $\Delta_r H^0$ благоприятствует образованию комплексов. Максимальное смещение величины $\Delta_r H_2^0$ при ступенчатом комплексообразовании в отрицательную область наблюдается при образовании комплексов AgL⁺₂. Например, для тиомочевины $\Delta_r H_2^0 \sim -46.0$ кДж/моль, а значения энтальпий для других лигандов находятся в диапазоне ±5.0 кДж/моль от этой величины. Исключение составляют тиосемикарбазидные комплексы, для которых наблюдается обратная тенденция. Изменение энтальпии при присоединении третьего лиганда имеет меньшую величину, как и его ступенчатая константа устойчивости для комплекса

 AgL_{3}^{+} , что снижает вероятность протекания данного процесса.

Проведенные расчеты показали, что величина энтропии для монокоординированных комплексов Ag⁺ с Bphtu, Phtu и Tu имеет положительные значения, а для комплексов с остальными лигандами – отрицательные. В ряду Tsc < Actu < Tu < < Phtu < Bphtu значения $\Delta_{\mu}S^{0}$ увеличиваются. Такое изменение величины энтропии объясняется тем, что на первой стадии комплексообразования для Bphtu, Phtu и Tu, вероятно, происходит вытеснение координированных молекул воды из сольватационной оболочки катионов серебра(I), что не наблюдается в случае тиосемикарбазида и

1456



Рис. 2. Зависимости $\lg \beta_i$ от обратной температуры для комплексов серебра(I) с Tsc, AgTsc⁺ (*1*); AgTsc⁺₂ (*2*); AgTsc⁺₃ (*3*).

ацетилтиомочевины. *Бис*- и *трис*-координированные комплексы энтальпийно стабилизированы. Таким образом, наличие разных заместителей в молекуле тиомочевины различным образом влияет на ступенчатые значения энтальпии и энтропии. Соответствующие зависимости для реакции комплексообразования $Ag^+ + i L = AgL_i^+$ (i = 1-3) приведены на рис. 3. Отмечено, что общая энтальпийно-энтропийная зависимость для всех лигандов, за исключением систем с Тsc, имеет

монотонный характер.



Рис. 3. Зависимости $\Delta_r H^0$ от $\Delta_r S^0$ для реакции Ag⁺ + + $i L = AgL_i^+$ (i = 1-3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены равновесия комплексообразования серебра(I) с Tu, Actu, Tsc, Phtu, Bphtu при T == 278.2–328.2 К и ионной силе 0.11 моль/л (0.1 NaNO₃ + 0.01 HNO₃). Определены термодинамические характеристики lg β_i , $\Delta_r G^0$, $\Delta_r H^0$ и $\Delta_r S^0$ образующихся комплексов. Для монокоординированных комплексов устойчивость изменяется в ряду: Actu < Tsc < Bphtu < Phtu < Tu, который совпадает с рядом изменения констант протонирования лигандов. Для комплексов типа AgL⁺₂ и AgL⁺₃ с Phtu и Bphtu данная закономерность нарушается. Вероятно, для этих высокоустойчивых

Таблица 2. Термодинамические характеристики реакций комплексообразования Ag(I) с Tu и ее производными при 298.2 К (Ag⁺ + i L = AgL⁺_i, i = 1–3)

Лиганд	$\operatorname{AgL}_{i}^{+}$	$\lg \beta_i$	$\Delta_r G^0$, кДж/моль	$\Delta_r H^0$, кДж/моль	$\Delta_r S^0$, Дж/(моль К)
Tu	1	5.51	-31.45 ± 0.31	-30.17 ± 0.64	4.31 ± 0.87
	2	10.66	-60.88 ± 0.18	-76.31 ± 0.32	-51.79 ± 0.25
	3	13.07	-74.59 ± 0.52	$-95.92\pm0,76$	-71.54 ± 0.55
Tsc	1	5.43	-31.00 ± 0.37	-41.37 ± 0.65	-34.77 ± 2.37
	2	10.46	-59.72 ± 0.28	-71.40 ± 0.24	-39.18 ± 0.46
	3	12.44	-71.02 ± 0.62	-90.77 ± 1.52	-66.25 ± 2.15
Actu	1	4.97	-28.40 ± 0.24	-28.59 ± 0.15	-0.63 ± 0.05
	2	9.01	-51.43 ± 0.34	-72.59 ± 0.81	-70.97 ± 2.07
	3	11.09	-63.31 ± 0.87	-102.30 ± 0.35	-130.77 ± 2.42
Phtu	1	5.49	-31.32 ± 0.34	-29.30 ± 0.74	6.79 ± 1.08
	2	10.81	-61.71 ± 0.55	-82.18 ± 1.21	-68.64 ± 0.38
	3	14.22	-81.17 ± 0.83	-130.84 ± 2.71	-166.58 ± 1.44
Bphtu	1	5.56	-31.75 ± 0.35	-27.71 ± 0.82	13.55 ± 2.50
	2	11.29	-64.47 ± 0.46	-78.23 ± 0.25	-46.17 ± 0.64

систем влияние гидрофобных свойств арильных заместителей превосходит эффект от снижения донорных свойств серы, связанных с константой протонирования рассматриваемых лигандов. Максимальное изменение энтальпии ($\Delta_r H^0$) в отрицательную область значений наблюдается на второй ступени комплексообразования, когда ион металла координирует вторую молекулу орга-

нического лиганда: $AgL^+ + L = AgL_2^+, \Delta_r H_2^0 \sim -46 \pm 5$ кДж/моль. Исключением является реакция с Tsc. Величина $\Delta_r S^0$ для монокоординированных комплексов Ag⁺ с Bphtu, Phtu и Tu положительная, что, вероятно, связано с выходом координированных молекул воды из сольватационной оболочки иона Ag⁺. Энтальпийно-энтропийная зависимость для всех лигандов, кроме систем с Tsc, имеет монотонный характер. Проведенные исследования показали, что большинство использованных лигандов, по-видимому, не будут иметь заметных преимуществ при их практическом применении в гидрометаллургии по сравнению с тиомочевиной. Однако полученные результаты представляют интерес для формации, где играют роль не только процессы комплексообразования с соответствующим металлом, но и эффективность доставки и взаимодействия действующего вещества с биологической мишенью, а также его токсичность, которые в этом случае определяются особенностями строения органического лиганда.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Смольков А.А., Белобелецкая М.В., Медков М.А. и др. // Химическая технология. 2000. № 8. С. 5.
- Белобелецкая М.В. Экстракция золота и серебра из тиокарбамидных, тиоцианатных и смешанных тиокарбамидно-тиоцианатных растворов. Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Владивосток, 2004. 22 с.
- Calla-Choque D., Lapidus G.T. // Hydrometallurgy. 2020. V. 192. P. 105289. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105289
- Fupeng Liu, Jinliang Wang, Chao Peng et al. // Hydrometallurgy. 2019. V. 185 P. 38. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.01.017

- Yang Tao, Zhang Liang, Zhong Lvling et al. // Hydrometallurgy. 2018. V. 175. P. 1796. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.11.007
- Кальный Д.Б., Коковкин В.В., Миронов И.В. // Журн. общей химии. 2011. Т. 81. Вып. 5. С. 705.
- 7. Shuiping Chen, Guozhong Wu, Hongyan Zeng. // Carbohydrate Polymers. 2005. V. 60. № 1. P. 33. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.11.020
- Ewelina N., Marta S. Magdalena M. et al. // Current Medicinal Chem. 2019. V. 26. № 4. P. 664. https://doi.org/10.2174/0929867325666180228164656
- Finch R.A., Liu M.C., Cory A.H. et al. // Adv. Enzym Regul. 1999. V. 39. P. 3. https://doi.org/10.1016/S0065-2571(98)00017-X
- Elwakeel K.Z., Al-Bogami A.S., Guibal Eric. // Chem. Eng. J. 2021. V. 403. P. 126265. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126265
- 11. *Meena K., Muthu K., Rajasekar M. et al.* // J. Therm. Anal. Calorim. 2013. V. 112. P. 1077. https://doi.org/10.1007/s10973-013-3062-y
- Saeed A., Ivelina G., Muhammad H. et al. // J. Mol. Model. 2019. V. 25. № 90. P. 1. https://doi.org/10.1007/s00894-019-3970-2
- Saeed A.A., Isab A., Waqar A. // Inorg. Chem. Commun. 2002. V. 5 P. 816.
- 14. Graham A.B., Chaveng P., Saowanit S. et al. // Dalton Trans. 2010. V. 39 P. 4391. https://doi.org/10.1039/c001398f
- 15. Bowmaker G.A., Chaichit N., Pakawatchai C. et al. // Can. J. Chem. 2009. V. 87. P. 161.
- 16. *Самадов А.С., Миронов И.В., Горичев И.Г.и др.* // Журн. неорган. химии. 2020. Т. 65. № 7. С. 995. https://doi.org/10.31857/S0044457X2007017X
- 17. Самадов А.С., Миронов И.В., Горичев И.Г. и др. // Журн. общей химии. 2020. Т. 90. № 11. С. 1738. https://doi.org/10.31857/S0044460X20110141
- Domenico De Marco. // ISRN Inorg. Chem. 2013. V. 2013. P. 1.
- Самадов А.С., Горичев И.Г., Кузьменко А.Н. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2, химия. 2021. Т. 62. № 2. С. 152.
- De Marco D., Zona G. // Thermochim. Acta. 2002. V. 386. P. 173.
- 21. Lukinskas P., Savickaja I., Vita S. et al. // J. Coord. Chem. 2008. V. 61. P. 2528.
- 22. *Миронов И.В., Харламова В.Ю.* // Журн. неорган. химии. 2018. Т. 63. № 7. С. 933. https://doi.org/10.1134/S0044457X18070176
- 23. *Самадов А.С., Горичев И.Г., Файзуллоев Э.Ф. и др.* // Вестник Таджикского нац. ун-та. Сер. естественных наук. 2020. № 1. С. 200.
- 24. Головнев Н.Н., Новикова Г.В., Лешок А.А. // Журн. неорган. химии. 2009. Т. 54. № 2. С. 374.
- 25. Бек М. Химия равновесий реакций комплексообразования. М.: Мир, 1973. 359 с.