

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ПАЛЛАДИЯ(II)
С ЭЛЕМЕНТАРНЫМИ АМИНОКИСЛОТАМИ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ
СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ© 2023 г. Г. П. Жарков^а, *, М. А. Ястремская^а, А. В. Павлушин^а,
Ю. С. Петрова^а, Л. К. Неудачина^а^аУральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

*e-mail: gennady.zharkov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.08.2022 г.

После доработки 25.09.2022 г.

Принята к публикации 03.10.2022 г.

Методом спектрофотометрического титрования при $I = 1.0$ моль/л ($\text{HClO}_4 + \text{NaClO}_4$) и $t = 25 \pm 1^\circ\text{C}$ изучен процесс комплексообразования акваиона палладия(II) с глицином (Gly), β -аланином (β -Ala) и таурином (Tau) в водном растворе. Установлено, что в условиях эксперимента в системе H-Pd-Gly при pH 0 образуется монокомплекс, а при pH 1 – моно- и бис-комплексы. В системе $\text{H-Pd-}\beta\text{-Ala}$ при pH 1 образуется монокомплекс, а при pH 2 – моно- и бис-комплексы. В системе H-Pd-Tau при pH 1 и 2 образуется монокомплекс. Рассчитаны значения молярных коэффициентов поглощения: максимум поглощения глицинатного монокомплекса $[\text{PdGly}(\text{H}_2\text{O})_2]^+$ приходится на $\lambda = 370$ нм и $\epsilon = 203$ л/(моль см), а бис-комплекса $[\text{PdGly}_2]^0$ – на $\lambda = 325$ нм и $\epsilon = 274$ л/(моль см); β -аланинатного $[\text{Pd}\beta\text{-Ala}(\text{H}_2\text{O})_2]^+$ и тауринатного $[\text{PdTau}(\text{H}_2\text{O})_2]^+$ монокомплексов – на $\lambda = 365$ нм, $\epsilon = 342$ и 297 л/(моль см) соответственно; β -аланинатного бис-комплекса $[\text{Pd}\beta\text{-Ala}_2]^0$ – на $\lambda = 330$ нм и $\epsilon = 549$ л/(моль см). Рассчитаны логарифмы концентрационных констант образования глицинатных ($\lg\beta_1 = 15.03 \pm 0.07$, $\lg\beta_2 = 28.97 \pm 0.28$), β -аланинатных ($\lg\beta_1 = 13.94 \pm 0.05$, $\lg\beta_2 = 25.24 \pm 0.06$) и тауринатных ($\lg\beta_1 = 9.74 \pm 0.08$) комплексов палладия (II).

Ключевые слова: глицин, β -аланин, таурин, спектрофотометрия

DOI: 10.31857/S0044457X22601377, EDN: JCKMXP

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что комплексные соединения палладия(II) проявляют биологическую активность [1–4]. Однако данных по изучению процессов комплексообразования палладия(II) с биополимерами сравнительно немного [5, 6]. Это связано с тем, что константы образования комплексов Pd^{2+} определить сложнее, чем константы образования комплексов других двухзарядных катионов, таких как Cu^{2+} , Ni^{2+} или Zn^{2+} .

Одной из основных проблем является стабильность акваиона Pd^{2+} только в очень кислых растворах, медленный гидролиз происходит при $\text{pH} > 1$. В связи с этим равновесия с участием акваиона Pd^{2+} должны быть исследованы при значениях $\text{pH} < 1$. Метод pH-потенциометрии недостаточно точен при определении констант устойчивости комплексов в области $\text{pH} < 2$, так как в области высокой концентрации протонов и невысокой концентрации катионов металла процесс комплексообразования не будет приводить к

существенному изменению величины pH, т.е. к такому изменению, которое превышало бы в 3–10 раз ошибку эксперимента [7]. Более надежным в этом случае считается метод спектрофотометрии. Важным преимуществом данного метода является также возможность сделать выводы о строении исследуемых комплексов ионов металлов на основе спектров поглощения их растворов [7].

В литературе описан синтез глицинатных и β -аланинатных кристаллических комплексов палладия(II) и исследование их структуры различными методами [8–11]. Однако методом спектрофотометрии процесс комплексообразования палладия(II) с элементарными аминокислотами в водном растворе исследован только для глицинатных систем [12–14]. Похожее исследование систем, содержащих β -аминокислоты, в частности β -аланин и таурин, ранее проводилось методом pH-потенциометрии [15, 16], который не подходит для данных систем.

Цель настоящей работы – исследование процесса комплексообразования палладия(II) с эле-

ментарными β -аминокислотами в водном растворе методом спектрофотометрии. В работе при $I = 1.0$ моль/л ($\text{HClO}_4 + \text{NaClO}_4$) и $t = 25 \pm 1^\circ\text{C}$ определены максимумы поглощения обнаруженных комплексов и концентрационные константы их образования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали кристаллические аминокислоты квалификации “х. ч.” с содержанием основного вещества 99.9% без дальнейшей очистки.

Приготовление рабочего раствора с содержанием 0.04 моль/л палладия(II) и 1 моль/л хлорной кислоты проводили по следующей методике. На аналитических весах брали навеску металлического палладия массой 0.2661 г, к нему добавляли 10 мл 37%-ной соляной кислоты ($\rho = 1.182$ г/см³) квалификации “х. ч.”, по каплям приливали 58%-ную азотную кислоту ($\rho = 1.356$ г/см³) квалификации “х. ч.” до полного растворения металлического палладия. Затем раствор охлаждали до комнатной температуры. Небольшими порциями присыпали гипофосфит натрия $\text{Na}(\text{PH}_2\text{O}_2)$ до полного обесцвечивания раствора. Полученную палладиевую чернь обрабатывали дистиллированной водой до нейтральной реакции на хлорид-ионы (качественная реакция с нитратом серебра(I)). Промытую палладиевую чернь растворяли в 1.1 г 58%-ной азотной кислоты при небольшом нагреве. После растворения палладиевой черни приливали 15.5 г 65%-ного раствора хлорной кислоты ($\rho = 1.556$ г/см³) квалификации “х. ч.”. Кипятили до появления густых белых паров. Количественно переносили раствор в мерную колбу объемом 100.0 мл, дистиллированной водой объем доводили до метки. Содержание хлорной кислоты уточняли алкалометрическим титрованием аликвотной части рабочего раствора с рН-потенциометрической индикацией к.т.т.

рН-потенциометрическое титрование проводили 0.2 М раствором NaOH , приготовленным из фиксаналя. Величину рН измеряли на иономере И160-МИ фирмы ООО “Измерительная техника”. Калибровку иономера проводили с использованием стандартных буферных растворов 1.68, 6.86 и 9.18 с учетом зависимости их рН от температуры.

Комплексообразование в системах $\text{H}-\text{Pd}-\text{L}$ изучали методом спектрофотометрического титрования. Титруемые растворы с постоянной концентрацией Pd^{2+} 0.001 моль/л готовили с содержанием HClO_4 , равным 1, 0.1 и 0.01 моль/л. Для поддержания ионной силы растворов постоянной к каждому из них добавляли NaClO_4 в таком количестве, чтобы суммарная концентрация HClO_4 и NaClO_4 была равна 1 моль/л. Аликвотные части

(10.0 мл) титруемого раствора помещали в серию полимерных стаканов. В качестве растворов титрантов использовали 0.1 М растворы аминокислот, порции титрантов от 0 до 1.0 мл дозировали с шагом 0.1 мл. Таким образом получили серию растворов с постоянной концентрацией Pd^{2+} 0.001 моль/л и переменной концентрацией лигандов от 0 до 0.01 моль/л при различном содержании HClO_4 , равном 1, 0.1 и 0.01 моль/л, и постоянной ионной силе 1 моль/л.

Регистрацию спектров поглощения проводили через 24 ч после приготовления серии растворов. В качестве раствора сравнения использовали дистиллированную воду. Растворы последовательно помещали в кварцевую кювету с толщиной поглощающего слоя $l = 1$ см. Между порциями растворов кюветы промывали этиловым спиртом и высушивали. Для каждого раствора снимали спектры поглощения с помощью спектрофотометра Evolution 350 фирмы Thermo Fisher Scientific (США) в диапазоне длин волн 190–600 нм с шагом 1 нм.

Константы образования исследуемых комплексов рассчитывали по данным спектрофотометрического титрования с помощью комплекса программ ChemEqui [17]. В программе реализуется метод наименьших квадратов для вычисления равновесных констант и связанных величин на основе экспериментальных результатов практически любого физико-химического метода. Равновесные константы рассчитываются путем поиска наилучшего соответствия экспериментальных данных и предполагаемой химической модели равновесной системы. В данной работе в рамках одного алгоритма обрабатывались кривые титрования при 41-й длине волны от 300 до 500 нм с шагом 5 нм, минимизация осуществлялась методом Гаусса–Ньютона, в основе метода лежит поиск минимума суммы квадратов разностей $(A_{\text{calc}} - A_{\text{exp}})^2$. Для расчета A_{calc} на каждом шаге по текущим оценкам равновесных констант производили расчет равновесных концентраций. Для этого был применен закон сохранения массы вещества в форме системы уравнений (1), где C_{H} , C_{M} и C_{L} – аналитические (общие) концентрации базисных компонентов, а $[\text{H}]$, $[\text{M}]$ и $[\text{L}]$ – их равновесные концентрации. При моделировании предполагали, что в системе устанавливаются равновесия общего вида (2) с константами равновесий (3). В расчетах использовали константы образования протонированных форм лигандов: глицина – $\lg\beta_{101} = 9.66$, $\lg\beta_{201} = 12.10$ ($I = 1.0$ моль/л, $t = 25^\circ\text{C}$); β -аланина – $\lg\beta_{101} = 10.14$, $\lg\beta_{201} = 13.81$ ($I = 1.0$ моль/л, $t = 25^\circ\text{C}$); таурина – $\lg\beta_{101} = 8.90$ ($I = 0.1$ моль/л, $t = 25^\circ\text{C}$) [18]. Оценку точности величин $\lg\beta_{ijk}$ осуществляли с помощью подпрограммы анализа устойчивости решения.

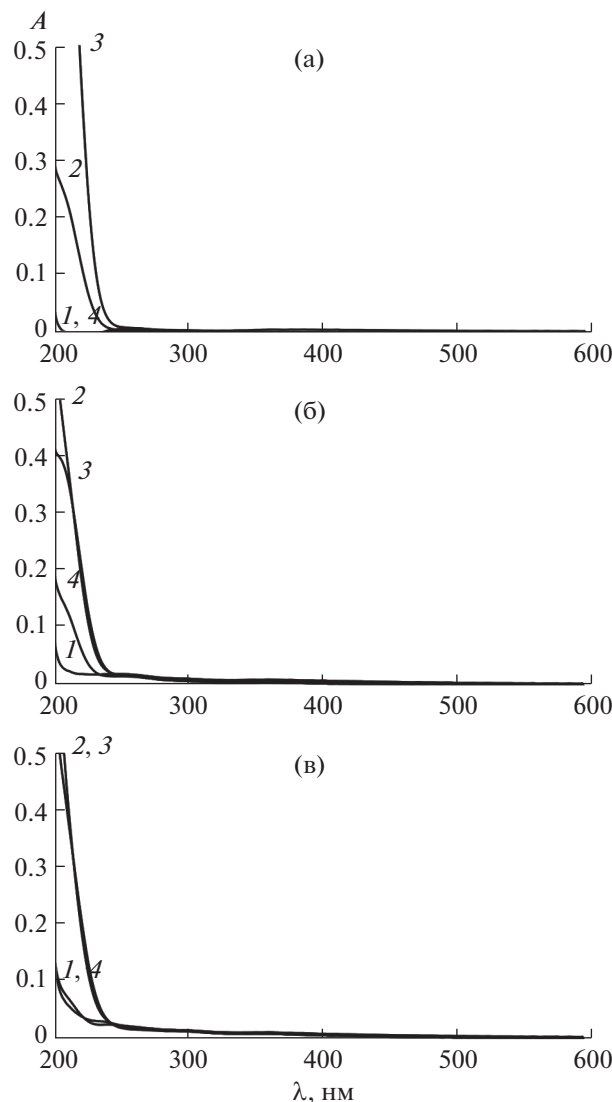


Рис. 1. Спектры поглощения систем H–Gly (а), H–β-Ala (б) и H–Tau (в): $C_{\text{HClO}_4} = 1$ моль/л, 1 – $C_{\text{L}} = 0$ моль/л, 2 – $C_{\text{Gly}} = 0.01$ моль/л, 3 – $C_{\beta\text{-Ala}} = 0.01$ моль/л, 4 – $C_{\text{Tau}} = 0.01$ моль/л ($I = 1.0$ моль/л ($\text{HClO}_4 + \text{NaClO}_4$), $t = 25 \pm 1^\circ\text{C}$, $l = 1$ см).

$$\begin{cases} C_{\text{H}} = [\text{H}] + \sum i\beta_{ijk} [\text{H}]^i [\text{M}]^j [\text{L}]^k \\ C_{\text{M}} = [\text{M}] + \sum j\beta_{ijk} [\text{H}]^i [\text{M}]^j [\text{L}]^k, \\ C_{\text{L}} = [\text{L}] + \sum k\beta_{ijk} [\text{H}]^i [\text{M}]^j [\text{L}]^k \end{cases} \quad (1)$$



$$\beta_{ijk} = \frac{[\text{H}_i\text{M}_j\text{L}_k]}{[\text{H}]^i [\text{M}]^j [\text{L}]^k}. \quad (3)$$

Определение числа поглощающих форм осуществляли методом Уоллеса и Каца с помощью программы TRIANG [19]. Метод основан на определении ранга матрицы светопоглощения A .

Ранг матрицы определяют приведением матрицы к треугольному виду по методу исключения Гаусса и последовательным сравнением диагональных элементов с полученной матрицей ошибок E [20].

Для уточнения максимумов собственного светопоглощения частиц в программном пакете OriginPro проводили аппроксимацию рассчитанных спектров собственного светопоглощения встроенной пиковой функцией Бигауссиан (Bigaussian). Данная функция описывает левый и правый фронты пика двумя кусочно-заданными гауссианами, представленными в виде:

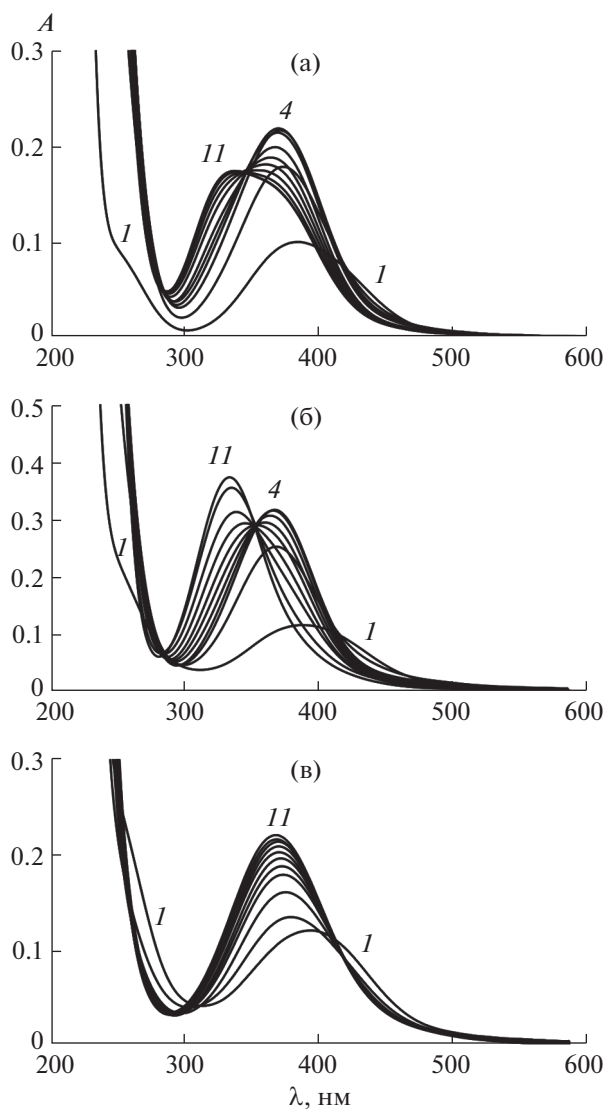


Рис. 2. Спектры поглощения систем H–Pd–L: $C_{Pd} = 0.001$ моль/л; а – $C_{HClO_4} = 0.1$ моль/л, L = Gly; б – $C_{HClO_4} = 0.01$ моль/л, L = β -Ala; в – $C_{HClO_4} = 0.01$ моль/л, L = Tau; C_L : 1 – 0, 2 – 0.001, 3 – 0.002, 4 – 0.003, 5 – 0.004, 6 – 0.005, 7 – 0.006, 8 – 0.007, 9 – 0.008 моль/л, 10 – 0.009, 11 – 0.1 моль/л ($I = 1.0$ моль/л ($HClO_4 + NaClO_4$), $t = 25 \pm 1^\circ C$, $l = 1$ см).

$$\begin{cases} \varepsilon = a \exp\left(-0.5\left(\frac{\lambda - b}{c}\right)^2\right) (\lambda < b) \\ \varepsilon = a \exp\left(-0.5\left(\frac{\lambda - b}{d}\right)^2\right) (\lambda > b), \end{cases} \quad (4)$$

где a – высота пика, b – центр пика, c и d – ширина левого и правого фронтов пика.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительно были зарегистрированы спектры систем в отсутствие палладия(II) с переменной концентрацией лигандов 0 и 0.01 моль/л при различном содержании $HClO_4$, равном 1, 0.1

и 0.01 моль/л, и постоянной ионной силе 1 моль/л (рис. 1). На основании рис. 1 можно сделать вывод, что в условиях эксперимента в диапазоне длин волн от 300 до 500 нм различные формы аминокислот не поглощают. Таким образом, при построении химической модели их поглощение в диапазоне длин волн от 300 до 500 нм учитывать не требуется.

По данным серии спектров систем H–Pd–L (рис. 2) в диапазоне длин волн от 300 до 500 нм с шагом 20 нм получали квадратные матрицы светопоглощения A (11 строк, 11 столбцов), где строки соответствуют i -ой длине волны, столбцы – величине оптической плотности, измеренной при i -ой длине волны в j -ом растворе серии. С по-

Таблица 1. Число поглощающих частиц в исследуемых системах в условиях эксперимента

Система	pH	<i>n</i>
H–Pd–Gly	0	2
	1	3
H–Pd–β-Ala	0	1
	1	2
	2	3
H–Pd–Tau	0	1
	1	2
	2	2

мощью программы TRIANG [19] проводили расчет экспериментального ранга матрицы светопоглощения *A*, который равен числу поглощающих частиц *n*. Результаты расчета представлены в табл. 1. Выводы, полученные методом Уоллеса и Каца, хорошо согласуются с выводами, полученными изобестическим методом. Например, на рис. 2а имеются две изобестические точки при $\lambda = 350$ и 420 нм, свидетельствующие о наличии трех поглощающих частиц в системе H–Pd–Gly при pH 1.

С помощью комплекса программ ChemEqui [17] рассчитаны логарифмы общих концентрационных констант образования обнаруженных комплексов в исследуемых системах. Результаты расчета представлены в табл. 2. Полученные величины хорошо согласуются с литературными данными. На основании данных табл. 2 можно сделать вывод, что в ряду лигандов глицин–β-аланин–таурин устойчивость комплексов палладия(II) закономерно понижается.

Таблица 2. Общие концентрационные константы образования моно- и бис-комплексов в исследуемых системах ($I = 1.0$ моль/л (HClO₄ + NaClO₄), $t = 25 \pm 1^\circ\text{C}$)

Система	$\lg\beta_1$	$\lg\beta_2$	Источник
H–Pd–Gly	15.03 ± 0.07	28.97 ± 0.28	Настоящая работа
	н.д.	26.84*	[12]
	15.25	27.5	[14]
	10.38**	19.29**	[15]
H–Pd–β-Ala	н.д.	17.58***	[16]
	13.94 ± 0.05	25.24 ± 0.06	Настоящая работа
	8.73*	15.79*	[15]
H–Pd–Tau	9.74 ± 0.08	н.д.	Настоящая работа
	н.д.	13.34***	[16]

* $I = 0.15$ моль/л (KCl), $t = 20^\circ\text{C}$. ** $I = 0.5$ моль/л (KNO₃), $t = 20^\circ\text{C}$. *** $I =$ нет данных, $t = 27^\circ\text{C}$. Примечание: н.д. – нет данных.

Руководствуясь рекомендациями комиссии по равновесным процессам Международного союза теоретической и прикладной химии (ИЮПАК), константы, полученные в работах [15, 16], можно считать сомнительными, так как для их определения применялся метод pH-потенциометрии [6]. В работе [15] при общих концентрациях базисных компонентов 0.001 моль/л исследование комплексообразования проводилось в диапазоне pH от 2 до 10. Это не согласуется с результатами настоящей работы. Существование глицинатных и β-аланинатных моно- и бис-комплексов при тех же общих концентрациях базисных компонентов было доказано в диапазоне pH от 0 до 2. При повышении pH существенный вклад вносит процесс гидролиза. В работе [15] влияние гидролиза не учитывалось. Более того, в работах [15, 16] исследование комплексообразования палладия(II) с некоторыми аминокислотами проводилось в присутствии хлорид-ионов, но при расчете констант их влияние не учитывалось.

С помощью комплекса программ ChemEqui [17] были рассчитаны спектры собственного поглощения частиц $\epsilon-f(\lambda)$ (рис. 3), обнаруженных в исследуемых системах. Полученные зависимости с помощью OriginPro аппроксимировали встроенной функцией Бигауссиан (Bigaussian). Спектральные характеристики некоторых частиц в водном растворе представлены в табл. 3.

На рис. 4 представлены рассчитанные по предполагаемой модели и полученные экспериментально профили спектрофотометрического титрования системы H–Pd–β-Ala при pH 2. Для количественной оценки адекватности модели были рассчитаны коэффициенты детерминации R^2 . Значения рассчитанных коэффициентов детерми-

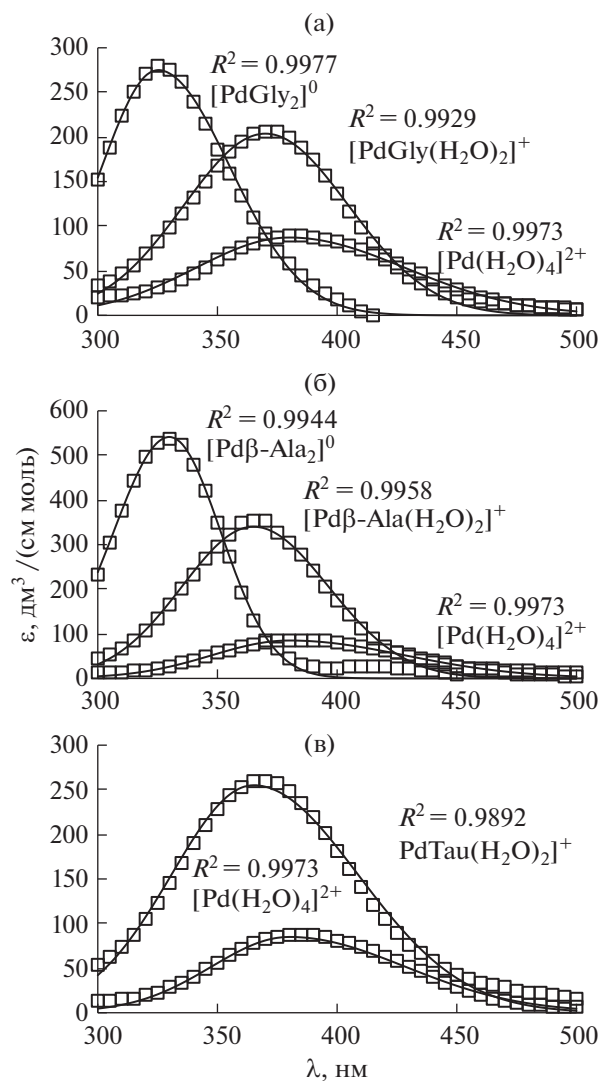


Рис. 3. Спектры собственного поглощения частиц в системах: а – Н–Pd–Gly; б – Н–Pd–β-Ala; в – Н–Pd–Tau.

нации лежат в диапазоне 0.9–0.99, что свидетельствует о весьма высокой адекватности модели.

При сопоставлении положения экспериментально наблюдаемого максимума $d-d$ -полосы поглощения при 380 нм с литературными данными (табл. 3) установлено, что в системе Н–Pd присутствует частица $[\text{Pd}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$ с хромофором $[\text{Pd}; 4\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}]$. С ростом концентрации глицина до 0.01 моль/л при pH 0 в спектрах системы Н–Pd–Gly наблюдается смещение положения максимума $d-d$ -полосы поглощения к 370 нм и одновременный рост ее интенсивности. При сравнении с литературными данными (табл. 3) установлено, что в системе Н–Pd–Gly при pH 0 с ростом концентрации глицина до 0.01 моль/л образуется ча-

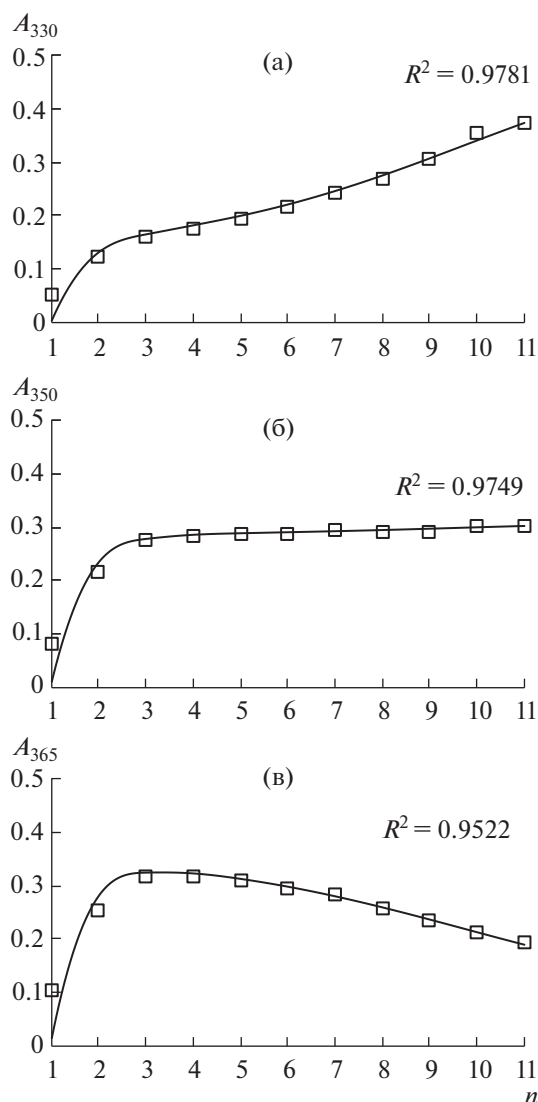


Рис. 4. Профили спектрофотометрического титрования системы Н–Pd–β-Ala при pH 2 и $\lambda = 330$ (а), 350 (б), 365 нм (в).

стица $[\text{PdGly}(\text{H}_2\text{O})_2]^+$ с хромофором $[\text{Pd}; 2\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}; \text{N}_{\text{NH}_2}; \text{O}_{\text{COO}}]$. В диапазоне концентраций глицина от 0.005 до 0.01 моль/л при pH 1 в спектрах системы Н–Pd–Gly (рис. 2а) наблюдается смещение положения максимума $d-d$ -полосы поглощения к 325 нм. При сравнении с литературными данными (табл. 3) установлено, что в системе Н–Pd–Gly при pH 1 в диапазоне концентраций глицина от 0.005 до 0.01 моль/л образуется частица $[\text{PdGly}_2]^0$ с хромофором $[\text{Pd}; 2\text{N}_{\text{NH}_2}; 2\text{O}_{\text{COO}}]$.

Незначительное отличие в положении максимумов $d-d$ -полос, соответствующих образующимся в системах Н–Pd–L комплексам, может быть обусловлено схожим составом их внутренней координационной сферы. Следовательно,

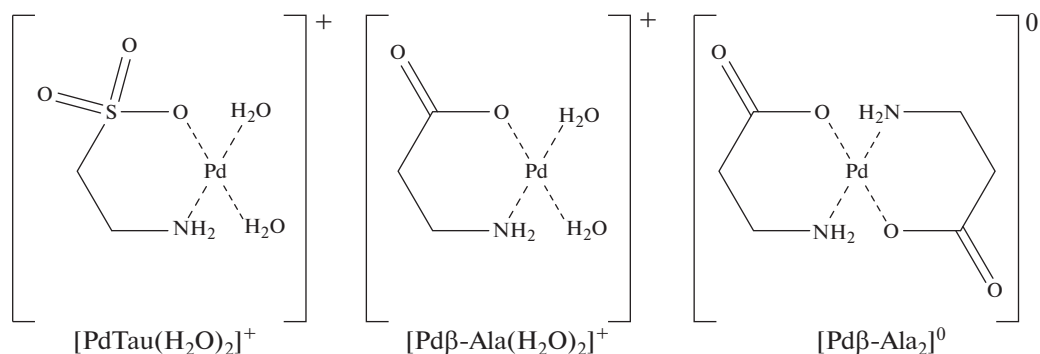


Рис. 5. Предполагаемые структуры комплексов палладия(II) с элементарными β-аминокислотами в водном растворе.

Таблица 3. Спектральные характеристики некоторых частиц в водном растворе

Частица	λ_{max}	ϵ_{max}	Состав хромофора	Источник
$[\text{Pd}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$	380	86	$[\text{Pd}; 4\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}]$	Настоящая работа
	380	83		[21]
	380	84		[22]
	379	78		[23]
	380	83		[24]
$[\text{PdGly}(\text{H}_2\text{O})_2]^+$	370	203	$[\text{Pd}; 2\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}; \text{N}_{\text{NH}_2}; \text{O}_{\text{COO}}]$	Настоящая работа
	370	208		[14]
$[\text{PdGly}_2]^0$	325	274	$[\text{Pd}; 2\text{N}_{\text{NH}_2}; 2\text{O}_{\text{COO}}]$	Настоящая работа
	322	270		[14]
	325	278		[12]
$[\text{Pd}\beta\text{-Ala}(\text{H}_2\text{O})_2]^+$	365	342	$[\text{Pd}; 2\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}; \text{N}_{\text{NH}_2}; \text{O}_{\text{COO}}]$	Настоящая работа
$[\text{Pd}\beta\text{-Ala}_2]^0$	330	539	$[\text{Pd}; 2\text{N}_{\text{NH}_2}; 2\text{O}_{\text{COO}}]$	
$[\text{PdTau}(\text{H}_2\text{O})_2]^+$	365	254	$[\text{Pd}; 2\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}; \text{N}_{\text{NH}_2}; \text{O}_{\text{SO}_3}]$	

комплексы палладия(II) с элементарными β-аминокислотами в водном растворе могут иметь структуру, представленную на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании данных спектрофотометрического титрования с помощью комплекса программ ChemEqui [17] рассчитаны значения логарифмов констант образования комплексов в системах $\text{H}-\text{Pd}-\text{L}$, где L – глицин, β-аланин и таурин. Установлено что в ряду лигандов глицин–β-аланин–таурин устойчивость моно- и бис-комплексов палладия(II) закономерно понижается. Рассчитаны также основные спектральные характеристики образующихся комплексов. С использованием спектральных характеристик высказаны предположения о структуре комплексов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем благодарность д. х. н. В.П. Соловьеву за подробную инструкцию по оформлению входных данных, вносимых в программу ChemEqui.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства “Приоритет-2030”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Salishcheva O.V., Prosekov A.Yu., Moldagulova N.E. et al.* // Proceedings of Universities. Appl. Chem. Biotechnol. 2022. V. 11. № 4. P. 651.
<https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-4-651-662>
2. *Batyrenko A.A., Mikolaichuk O.V., Ovsepyan G.K. et al.* // Russ. J. Gen. Chem. 2021. V. 91. № 6. P. 1260.
<https://doi.org/10.1134/S1070363221060426>
3. *Denisov M.S., Dmitriev M.V., Eroshenko D.V. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. № 1. P. 56.
<https://doi.org/10.1134/S0036023619010054>
4. *Efimenko I.A., Dobrynina N.A., Shishilov O.N. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2012. V. 38. № 4. P. 233.
<https://doi.org/10.1134/S1070328412020029>
5. *Kiss T., Sovago I., Gergely A.* // Pure Appl. Chem. 1991. V. 63. № 4. P. 597.
<https://doi.org/10.1351/pac199163040597>
6. *Sovago I., Kiss T., Gergely A.* // Pure Appl. Chem. 1993. V. 65. № 5. P. 1029.
<https://doi.org/10.1351/pac199365051029>
7. *Бек М., Надьнал И.* // Исследование комплексообразования новейшими методами. М.: Мир, 1989.
8. *Isaeva E.I., Gorbunova V.V., Nazarova A.M.* // Russ. J. Gen. Chem. 2020. V. 90. № 12. P. 2296.
<https://doi.org/10.1134/S1070363220120129>
9. *Appleton T.G., Bailey A.J., Bedgood D.R. et al.* // Inorg. Chem. 1994. V. 33. № 2. P. 217.
<https://doi.org/10.1021/ic00080a008>
10. *Nakayama K., Komorita T., Shimura Y.* // Bull. Chem. Soc. Jpn. 1984. V. 57. № 10. P. 2930.
<https://doi.org/10.1246/bcsj.57.2930>
11. *Bondarenko V.S., Gabuda S.P., Mal'chikov G.D. et al.* // J. Struct. Chem. 1977. V. 17. № 3. P. 412.
<https://doi.org/10.1007/BF00746658>
12. *Kozachkova A.N., Tsaryk N.V., Dudko A.V. et al.* // Russ. J. Phys. Chem. A. 2012. V. 86. № 10. P. 1570.
<https://doi.org/10.1134/S0036024412100123>
13. *Shoukry M.M., Khairy E.M., Saeed A.* // J. Coord. Chem. 1988. V. 17. № 4. P. 305.
<https://doi.org/10.1080/00958978808073921>
14. *Anderegg G., Malik S.C.* // Helv. Chim. Acta. 1976. V. 59. № 5. P. 1498.
<https://doi.org/10.1002/hlca.19760590511>
15. *Kollmann J., Hoyer E.* // J. Praktische Chem. 1974. V. 316. № 1. P. 119.
<https://doi.org/10.1002/prac.19743160116>
16. *Farooq O., Ahmad N., Malik A.U.* // J. Electroanal. Chem. Interfacial Electrochem. 1973. V. 48. № 3. P. 475.
[https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(73\)80379-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(73)80379-1)
17. *Solov'ev V.P., Baulin V.E., Strakhova N.N. et al.* // J. Chem. Soc. 1998. V. 2. № 6. P. 1489.
<https://doi.org/10.1039/a708245b>
18. NIST Critically Selected Stability Constants of Metal Complexes, Version 8.0, 2004
19. *Wallace R.M., Katz S.M.* // J. Phys. Chem. 1964. V. 68. № 12. P. 3890.
<https://doi.org/10.1021/j100794a511>
20. *Хартали Ф., Бёргес К., Оллок Р.* // Равновесия в растворах. М.: Мир, 1980.
21. *Anderegg G., Wanner H.* // Inorg. Chim. Acta. 1986. V. 113. № 2. P. 101.
[https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(00\)82229-X](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)82229-X)
22. *Elding L.I.* // Inorg. Chim. Acta. 1972. V. 6. P. 647.
[https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(00\)91874-7](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)91874-7)
23. *Rasmussen L., Jørgensen Chr.K., Sjövall J. et al.* // Acta Chem. Scand. 1968. V. 22. P. 2313.
<https://doi.org/10.3891/acta.chem.scand.22-2313>
24. *Shi T., Elding L.I.* // Inorg. Chem. 1996. V. 35. № 3. P. 735.
<https://doi.org/10.1021/ic950935u>