

СТАНДАРТНЫЕ ЭНТАЛЬПИИ ОБРАЗОВАНИЯ L-АРГИНИНА И ПРОДУКТОВ ЕГО ДИССОЦИАЦИИ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ**А.И. Лыткин, В.В. Черников, О.Н. Крутова, П.Д. Крутов**

Александр Иванович Лыткин, Виктор Владимирович Черников, Ольга Николаевна Крутова*, Павел Дмитриевич Крутов

Кафедра аналитической химии, Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: alytk@mail.ru, kdvkonkpd@dsn.ru*

В зависимости от химической природы боковых радикалов аминокислоты можно разделить на ароматические и алифатические, а также аминокислоты, имеющие неполярные или полярные функциональные группы в боковых радикалах. Поскольку особенности отдельных аминокислот в белке определяются природой (физико-химическими свойствами) их боковых радикалов, находящихся в гидратном состоянии, представляется также чрезвычайно важным изучить термодинамические характеристики гидратации боковых радикалов аминокислот различной химической природы. Для получения эмпирических корреляций, которые устанавливали бы связь между термодинамическими параметрами взаимодействия растворенного соединения с растворителем и размером растворяемых молекул (имеющих разную физико-химическую природу), необходимо накапливать достаточное количество экспериментальных данных по теплотам растворения аминокислот и пептидов. Это позволило бы рассчитать вклады межмолекулярных взаимодействий для различных групп молекул. Препараты L-аргинин применяли без дополнительной очистки. До взвешивания вещество высушивали при температуре 110 °С. Измеряли теплоты растворения кристаллического L-аргинина с помощью изотермического калориметра с автоматической записью температурно-временной кривой. Производительность калориметрической установки проверялась в соответствии с общепринятыми калориметрическими стандартами: теплотой растворения кристаллического хлорида калия в воде и теплотой нейтрализации сильной кислоты с сильным основанием. Согласование между экспериментальными энтальпиями растворения KCl (кр) в воде и теплотой нейтрализации азотной кислоты раствором KOH с наиболее достоверными опубликованными данными свидетельствует об отсутствии явных систематических ошибок в работе калориметрической установки. Равновесные составы растворов рассчитывались с помощью программного обеспечения RRSU, при помощи прямой калориметрии измерялись теплоты растворения кристаллической аминокислоты в растворах воды и гидроксида калия при 298,15 К. Были рассчитаны стандартные энтальпии образования L-аргинина и продуктов его диссоциации в водных растворах.

Ключевые слова: термодинамика, аминокислота, растворы, калориметр, энтальпия

STANDARD FORMATION ENTHALPIES OF L-ARGININE AND PRODUCTS OF ITS DISSOCIATION IN AQUEOUS SOLUTION

A.I. Lytkin, V.V. Chernikov, O.N. Krutova, P.D. Krutov

Alexandr I. Lytkin, Viktor V. Chernikov, Olga N. Krutova*, Pavel D. Krutov

Department of Analytical Chemistry, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: alytk@mail.ru, kdvkonkpd@dsn.ru*

Depending on the chemical nature of side radicals, amino acids can be divided into aromatic and aliphatic ones, as well as amino acids that have non-polar or polar functional groups in their side radical. Since specific features of individual amino acids in the protein are determined by the nature (physicochemical properties) of their side radicals that exist in the hydrated state, it also seems extremely important to study the thermodynamic characteristics of hydration of side radicals of amino acids of different chemical nature. In order to obtain empirical correlations that would establish a relationship between the thermodynamic parameters of interaction of a dissolved compound with the solvent and the size of molecules being dissolved (that have different physicochemical nature), one needs to accumulate a sufficient amount of experimental data on heats of dissolution of amino acids and peptides. This would allow one to verify the additivity of contributions of intermolecular interactions for different groups of molecules. Reagent L-arginine was used without additional purification. Prior to weighing, the substance was dried at 110 °C. The heats of dissolution of crystalline L-arginine were measured using an isothermal-jacket calorimeter with automatic recording of the temperature-time curve. The performance of the calorimetric setup was verified in accordance with the conventional calorimetric standards: the heat of dissolution of crystalline potassium chloride in water and the heat of neutralization of a strong acid with a strong base. The agreement between the experimental enthalpies of dissolution of KCl (cr.) in water and the heats of neutralization of nitric acid with a KOH solution with the most reliable published data indicates that there are no evident systematic errors in the performance of the calorimetric setup. The equilibrium compositions of solutions were calculated using RRSU software. The heats of dissolution of crystalline amino acid in water and potassium hydroxide solutions at 298.15 K were measured by direct calorimetry. The standard enthalpies of formation of L-arginine and the products of its dissociation in aqueous solutions were calculated.

Key words: thermodynamics, amino acid, solutions, calorimeter, enthalpy

Для цитирования:

Лыткин А.И., Черников В.В., Крутова О.Н., Крутов П.Д. Стандартные энтальпии образования L-аргинина и продуктов его диссоциации в водном растворе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 2. С. 40–45

For citation:

Lytkin A.I., Chernikov V.V., Krutova O.N., Krutov P.D. Standard formation enthalpies of L-arginine and products of its dissociation in aqueous solution. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 2. P. 40–45

ВВЕДЕНИЕ

В литературе имеется большое количество данных [1-5] по константам ступенчатой диссоциации L-аргинина, работы выполнены при разных температурах и значениях ионной силы раствора, на фоне отличающихся по своей природе поддерживающих электролитов. Для того, чтобы можно было сравнивать значения констант ступенчатой диссоциации L-аргинина, полученные разными авторами, мы пересчитали величины pK_1 , pK_2 , pK_3 на нулевую ионную силу по уравнению Дэвиса. Тер-

модинамические константы ступенчатой диссоциации кислот определяли также графическим методом по уравнению (рис. 1):

$$pK^c = pK^o - \Delta Z^2 A \frac{\sqrt{I}}{1 + 1.6\sqrt{I}} + \delta \cdot I, \quad (1)$$

где pK^c и pK^o – отрицательные логарифмы концентрации и термодинамической констант диссоциации; ΔZ^2 – разность квадратов зарядов продуктов реакции и исходных веществ; A – постоянная предельного закона Дебая, равная 0,5107 при 25 °C; δ – эмпирический коэффициент; I – ионная сила раствора.

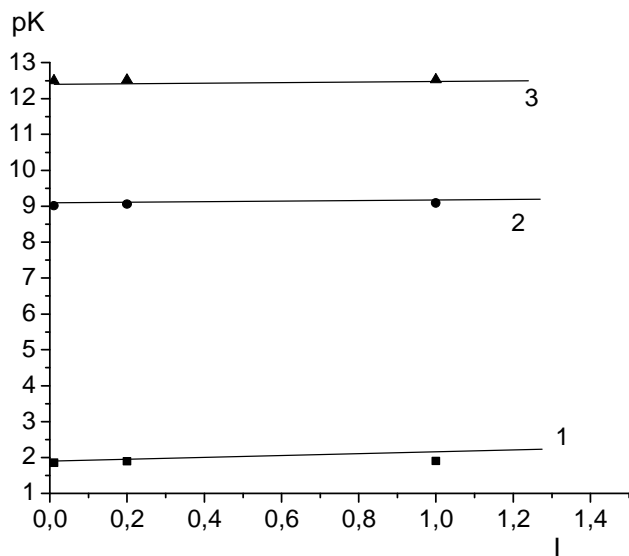


Рис. 1. Графическая обработка литературных данных по константам диссоциации L-аргинина при 298,15 К (1 – pK_1 ; 2 – pK_2 ; 3 – pK_3)

Fig. 1. Graphic processing of literature data on the dissociation constants of L-arginine at 298.15 K (1 – pK_1 ; 2 – pK_2 ; 3 – pK_3)

После графической обработки литературных данных [1-5] в качестве наиболее вероятных значений термодинамических констант диссоциации L-аргинина можно принять следующие величины: $pK_1^0 = 1,82 \pm 0,03$, $pK_2^0 = 8,99 \pm 0,05$ и $pK_3^0 = 12,48 \pm 0,05$. Энтальпий ступенчатой диссоциации аминокислоты были определены ранее в нашей лаборатории. На рис. 2 представлена диаграмма равновесий в водном растворе L-аргинина, построенная на основании расчетов равновесного состава растворов кислоты при различных значениях pH с использованием программы RRSU, подобная обработка данных была применена нами для сходных систем. [6].

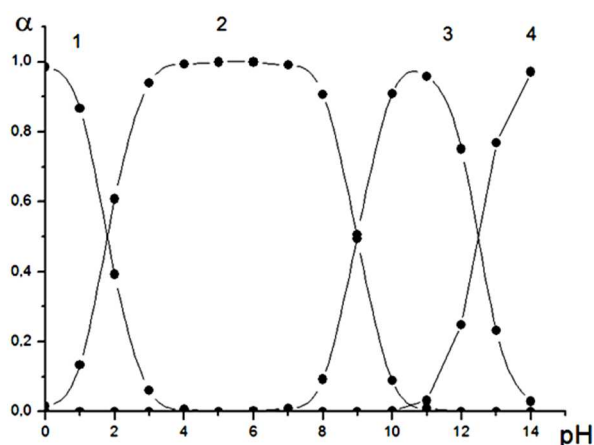


Рис. 2. Диаграмма равновесий в водном растворе L-аргинина при $T=298,15\text{K}$ и $I=0$ (1 – доля частицы H_3L^{2+} ; 2 – H_2L^+ ; 3 – HL^+ ; 4 – L^- соответственно)

Fig. 2. Diagram of equilibria in an aqueous solution of L-arginine at $T=298.15\text{K}$ and $I=0$ (1-particle fraction H_3L^{2+} ; 2 – H_2L^+ ; 3 – HL^+ ; 4 – L^- , respectively)

Целью настоящей работы является определение стандартных энтальпий образования L-аргинина и продуктов его диссоциации в водном растворе по энтальпиям растворения L-аргинина в воде и в водных растворах KOH при температуре 298,15 К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали препарат L-аргинина марки «х.ч» («Реахим»). Мы использовали препарат L-HArg, не содержащий в своем составе молекул воды или HCl. Производитель не указывает на наличие в препарате кристаллизационной воды или гидрохлорида, поэтому мы не рассматриваем возможность наличия в препарате форм $HG \cdot HCl$ или $HG \cdot 2H_2O$. Дополнительной очистке препарат не подвергался. Растворы KOH и HNO_3 готовили из реактивов квалификации «х.ч». Концентрацию рабочих растворов устанавливали обычными титриметрическими методами [7]. Исследуемое вещество перед взятием навесок высушивали при температуре 110 °С.

Таблица 1

Энтальпии растворения L- аргинина в воде при температуре 298,15 К

Table 1. Enthalpies of dissolution of L-arginine in water at 298.15 K

m, g	$m \cdot 10^3$, мольHG ±/1000 кг H ₂ O	C, моль H ₂ O/моль HL [±]	- $\Delta_{sol}H$ кДж/моль	$\Delta_f H^0(HG^{\pm}, p-$ р., pH ₂ O, гип. недисс., 298,15 К)
0,0105	1,431	38798	33,06±0,25*	-669,89
0,0120	1,635	33948	33,05	-669,88
0,0182	2,479	22383	33,05	-669,88
0,0242	3,297	16833	33,01	-669,84
0,0268	3,651	15200	33,02	-669,85
0,0299	4,074	13624	33,00	-669,83
0,0355	4,837	11475	32,97	-669,80
0,0622	8,475	6549	32,95	-669,78
0,0715	9,742	5697	32,91	-669,74
0,0921	12,549	4423	32,89	-669,72
0,3215	43,806	1267	32,79	-669,62

Примечание: * погрешность в тепловых эффектах растворения аминокислоты в воде

Note: * error of heat effects of dissolution of amino acids in water

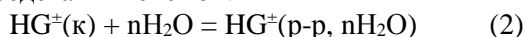
Измерения энтальпий растворения кристаллического L-аргинина проводили на калориметре с изотермической оболочкой и автоматической записью температуры [8]. Работа калориметрической установки была проверена по общепринятым калориметрическим стандартам – энтальпии растворения кристаллического хлорида калия в воде и теплоте нейтрализации сильной кислоты

сильным основанием. Согласование экспериментально полученных энтальпий растворения $KCl_{(к)}$ в воде и энтальпий нейтрализации сильной кислоты сильным основанием с наиболее надежными литературными данными [9] свидетельствует об отсутствии заметной систематической погрешности в работе калориметрической установки. Объем калориметрической жидкости составлял 42,53 мл. Навески аминокислоты взвешивали на весах марки ВЛР- 200 с точностью $2 \cdot 10^{-4}$ г. Экспериментальные данные по теплотам растворения L-аргинина в воде и в растворах КОН представлены в табл. 1-2. Доверительный интервал среднего значения ΔH вычисляли с вероятностью 0,95.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В литературе имеются надежные данные по теплотам сгорания L-аргинина [10]. Численные значения стандартных энтальпий сгорания L-аргинина [11] в кристаллическом состоянии составили (кДж/моль): $\Delta_c H^\circ = -3205,5 \pm 2,5$ и $\Delta_f H^\circ = -637,7 \pm 1,9$ соответственно.

Процесс растворения L-аргинина в воде можно представить схемой:



Стандартные энтальпии образования раствора L-аргинина при различных разведениях рассчитывали по уравнению:

$$\Delta_f H^\circ(HG^+, р-р, nH_2O, 298,15 K) = \Delta_f H^\circ(HG^+, к, 298,15 K) + \Delta_{sol} H(HG^+, к, 298,15 K), \quad (3)$$

где $\Delta_f H^\circ(HG^+, к, 298,15 K)$ – стандартная энтальпия образования кристаллического L-аргинина; $\Delta_{sol} H(HG^+, 298,15 K)$ – теплота растворения L-аргинина (табл. 1).

Теплота образования L-аргинина в водном растворе в исследуемом интервале концентраций практически не зависит от величины разведения, что неудивительно для столь больших разбавлений.

Стандартную энтальпию образования недиссоциированной молекулы L-аргинина в состоянии гипотетическом недиссоциированном при конечном разведении в водном растворе находили по уравнению:

$$\Delta_f H^\circ(HG^+, р-р, nH_2O, гип., недисс., 298,15 K) = \Delta_f H^\circ(HG^+, р-р, nH_2O, 298,15 K) + \alpha(G^-) \cdot [\Delta_{dis} H^\circ(3) + \Delta_{dis} H^\circ(2)] + \alpha(HG^+) \cdot \Delta_{dis} H^\circ(2) - \alpha(H_3G^{2+}) \cdot \Delta_{dis} H^\circ(1), \quad (4)$$

где $\alpha(G^-)$, $\alpha(HG^+)$, $\alpha(H_2G^+)$, $\alpha(H_3G^{2+})$ – доли частиц HG^+ , H_3G^{2+} , H_2G^+ , G^- соответственно; $\Delta_{dis} H^\circ(1) = 3,59$ кДж/моль, $\Delta_{dis} H^\circ(2) = 47,64$ кДж/моль, $\Delta_{dis} H^\circ(3) = 56,44$ кДж/моль – тепловые эффекты процессов

ступенчатой диссоциации аминокислоты, соответственно. Они были определены в работе [13] калориметрическим методом при $T = 298,15 K$ и ионной силе раствора 0,0. Расчет равновесий показывает, что вкладом второго члена можно пренебречь. Суммарный вклад третьего и четвертого слагаемых правой части уравнения (3) не превышал 0,20 кДж/моль и практически не изменялся в исследуемой области концентраций.

Стандартную энтальпию образования L-аргинина в гипотетическом недиссоциированном состоянии при бесконечном разведении находили экстраполяцией величин, полученных по уравнению (4), на нулевое значение моляльности раствора m . Точки в координатах $(-\Delta_f H^\circ(HL^\pm, р-р, nH_2O, гип. недисс. 298,15 K); m \cdot 10^3)$, удовлетворительно укладывались на прямую, зависимость оказалась линейной.

В результате по МНК найдена величина: $\Delta_f H^\circ(HG^+, р-р, H_2O, станд. с., гип. недисс., 298,15 K) = -669,9 \pm 1,9$ кДж/моль.

Стандартную энтальпию образования частицы G^- в водном растворе определяли, используя данные по теплоте растворения L-аргинина в растворах щелочи при соотношении эквивалентов не менее 1:2 (табл. 2).

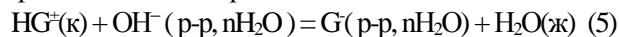
Таблица 2

Энтальпии растворения L- аргинина в растворе КОН при различных концентрациях и $T= 298,15 K$ (кДж/моль)

Table 2. Enthalpies of dissolution of L-arginine in a solution of KOH at different concentrations and $T = 298.15 K$

Масса навески, г	C°_{KOH} , моль/л	$-\Delta_{sol} H$ кДж/моль
0,0414	0,01065	25,85±0,26
0,0412		25,88±0,25
0,0413		25,89±0,25
0,0712	0,01852	28,12±0,28
0,0713		28,10±0,29
0,0712		28,17±0,28
0,0815	0,02140	29,05±0,27
0,0813		29,04±0,27
0,0815		29,01±0,28

Процесс растворения L-аргинина в растворе КОН можно представить схемой:



Расчет показал, что полнота протекания реакции (5) составляла не менее 99,9%.

Тепловые эффекты растворения L-аргинина в растворе КОН были экстраполированы на нулевое значение ионной силы раствора с помощью уравнения с одним индивидуальным параметром:

$$\Delta_f H_{(5)} - \Delta Z^2 \psi(I) = \Delta_f H_{(5)}^\circ + iI, \quad (6)$$

где $\Delta_f H_{(5)}$ и $\Delta_f H_{(5)}^0$ – тепловые эффекты процесса (5) при конечном и нулевом значениях ионной силы; i – эмпирический коэффициент; I – ионная сила раствора, ΔZ^2 – изменение квадратов зарядов реагирующих частиц, $\psi(I)$ – функция ионной силы, вычисляемая теоретически.

Используя полученные величины $\Delta_f H_{(4)}^0$ и значения $\Delta_f H^0(\text{OH}^-)$, р-р H_2O , станд. с., 298,15 К), $\Delta_f H^0(\text{H}_2\text{O})$, ж., 298,15 К), аналогичные представленным в работе [12], рассчитали стандартную энтальпию образования частицы L:

$$\Delta_f H^0(\text{G}^-, \text{p-p}, \text{H}_2\text{O}, \text{станд. с.}, 298,15 \text{ К}) = \Delta_f H^0(\text{HG}^\pm, \text{к}, 298,15 \text{ К}) + \Delta_f H^0(\text{OH}^-, \text{p-p}, \text{H}_2\text{O}, \text{станд. с.}, 298,15 \text{ К}) + \Delta_f H_{(5)}^0 - \Delta_f H^0(\text{H}_2\text{O}, \text{ж.}, 298,15 \text{ К}) = -637,67 + (-230,07) + (-22,52) - (-285,83) = -604,43 \text{ кДж/моль} \quad (7)$$

Стандартные энтальпии образования частиц HG^\pm , H_2G^+ и H_3G^{2+} в состоянии: станд. с., гип. недисс. находили по уравнениям:

$$\Delta_f H^0(\text{HG}^\pm, \text{p-p}, \text{H}_2\text{O}, \text{станд. с.}, \text{гип. недисс.}, 298,15 \text{ К}) = \Delta_f H^0(\text{G}^-, \text{p-p}, \text{H}_2\text{O}, \text{станд. с.}, \text{гип. недисс.}, 298,15 \text{ К}) - \Delta_{\text{dis}} H^0(\text{HG}^\pm, 298,15 \text{ К}) = -604,43 - 57,07 = -661,50 \text{ кДж/моль} \quad (8)$$

$$\Delta_f H^0(\text{H}_2\text{G}^+, \text{p-p}, \text{H}_2\text{O}, \text{станд. с.}, \text{гип. недисс.}, 298,15 \text{ К}) = \Delta_f H^0(\text{HG}^\pm, \text{p-p}, \text{H}_2\text{O}, \text{станд. с.}, \text{гип. недисс.}, 298,15 \text{ К}) - \Delta_{\text{dis}} H^0(\text{H}_2\text{G}^+, 298,15 \text{ К}) = -665,7 - 49,45 = -715,15 \text{ кДж/моль} \quad (9)$$

$$\Delta_f H^0(\text{H}_3\text{G}^{2+}, \text{p-p}, \text{H}_2\text{O}, \text{станд. с.}, \text{гип. недисс.}, 298,15 \text{ К}) = \Delta_f H^0(\text{H}_2\text{G}^+, \text{p-p}, \text{H}_2\text{O}, \text{станд. с.}, \text{гип. недисс.}, 298,15 \text{ К}) - \Delta_{\text{dis}} H^0(\text{H}_3\text{G}^{2+}, 298,15 \text{ К}) = -715,15 - 4,10 = -719,25 \text{ кДж/моль} \quad (10)$$

Здесь $\Delta_{\text{dis}} H^0(\text{HG}^\pm)$, $\Delta_{\text{dis}} H^0(\text{H}_2\text{G}^+)$, $\Delta_{\text{dis}} H^0(\text{H}_3\text{G}^{2+})$ – стандартные энтальпии ступенчатой диссоциации L-аргинина в водном растворе [13].

Значение стандартной энтальпии образования недиссоциированной молекулы L-аргинина $\Delta_f H^0(\text{HG}^\pm, \text{p-p}, \text{H}_2\text{O}, \text{станд. с.}, \text{гип. недисс.}, 298,15 \text{ К})$

удовлетворительно согласуется с ранее полученной величиной. В качестве наиболее вероятной принята среднеарифметическая величина по результатам двух независимых определений $\Delta_f H^0(\text{HG}^\pm, \text{p-p}, \text{H}_2\text{O}, \text{станд. с.}, \text{гип. недисс.}, 298,15 \text{ К}) = -665,7 \pm 1,9 \text{ кДж/моль}$.

Значения стандартных энтальпий образования L-аргинина и продуктов его диссоциации в водном растворе (табл. 3) являются ключевыми величинами в термохимии L-аргинина, открывают возможности проведения строгих термодинамических расчетов в системах этого соединения.

Таблица 3
Стандартные энтальпии образования L- аргинина и продуктов его диссоциации в водном растворе
Table 3. Standard enthalpies of formation of L-arginine and products of its dissociation in aqueous solution

Частицы	Состояние	$\Delta_f H^0(298.15\text{K})$, kJ/mol
HG +	к p-p., H ₂ O, станд. с., недисс.	-637,7±1,9 -665,7±1,9
H ₃ G ²⁺	p-p., H ₂ O, станд. с., гип. недисс.	-719,2±1,9
H ₂ G ⁺	p-p., H ₂ O, станд. с., гип. недисс.	-715,1±1,9
G ⁻	p-p., H ₂ O, станд. с.	-604,4±1,9

Работа выполнена в НИИ Термодинамики и кинетики химических процессов Ивановского государственного химико-технологического университета в рамках Государственного задания (базовая часть), проект № 4.7104.2017/89.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Torres J., Kremer C., Kremer E., Dominguez S.** The thermodynamics of the formation of Sm(III) mixed-ligand complexes carrying alpha-amino acids. *Inorg. Chim. Acta.* 2003. N 355. P. 175-178. DOI: 10.1016/S0020-1693(01)00812-X.
2. **Torres J., Kremer C., Kremer E., Pardo H.** Sm(III) Complexation with amino acids. Crystal structures of [Sm₂(Pro)₆(H₂O)₆](ClO₄)₆ and [Sm(Asp)(H₂O)₄Cl₂]. *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* 2002. N 21. P. 4035-4041. DOI: 10.1039/b204095f.
3. **Zhang F., Yajima T., Yamauchi O.** Electrostatic ligand-ligand interactions in ternary copper(II) complexes with 3, 5-diiodo-L-tyrosine and polar amino acids. *Inorg. Chim. Acta.* 1998. N 278. P. 136-142. DOI: 10.1002/0471227617.
4. **Khan F., Khan F.** Studies of coordination compounds of cadmium(II) and zinc(II) with amino acids as primary lig-

REFERENCES

1. **Torres J., Kremer C., Kremer E., Dominguez S.** The thermodynamics of the formation of Sm(III) mixed-ligand complexes carrying alpha-amino acids. *Inorg. Chim. Acta.* 2003. N 355. P. 175-178. DOI: 10.1016/S0020-1693(01)00812-X.
2. **Torres J., Kremer C., Kremer E., Pardo H.** Sm(III) Complexation with amino acids. Crystal structures of [Sm₂(Pro)₆(H₂O)₆](ClO₄)₆ and [Sm(Asp)(H₂O)₄Cl₂]. *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* 2002. N 21. P. 4035-4041. DOI: 10.1039/b204095f.
3. **Zhang F., Yajima T., Yamauchi O.** Electrostatic ligand-ligand interactions in ternary copper(II) complexes with 3, 5-diiodo-L-tyrosine and polar amino acids. *Inorg. Chim. Acta.* 1998. N 278. P. 136-142. DOI: 10.1002/0471227617.
4. **Khan F., Khan F.** Studies of coordination compounds of cadmium(II) and zinc(II) with amino acids as primary lig-

- ands and vitamin B6 (pyridoxine) as secondary ligand: A polarographic approach. *J. Indian Chem. Soc.* 1997. V. 74. N 1. P. 171-173.
5. **Yamauchi O., Odani A.** Stability constants of metal complexes of amino acids with charged side chains-Part I: Positively charged side chains. *Pure & Appl. Chem.* 1996. V. 68. N 2. P.469-496.
 6. **Lytkin A.I., Chernikov V.V., Krutova O.N., Skvortsov I.A.** Standard enthalpies of formation L-lysine and the products of its dissociation in aqueous solutions. *J. Therm. Anal. Cal.* 2017. V. 130. N 1. P. 457-460. DOI 10.1007/s10973-017-6134.
 7. **Золотов Ю.А.** Основы аналитической химии. М.: Высш. шк. 2001. 463 с.
 8. **Кочергина Л.А., Емельянов А.В., Крутова О.Н.** Термодинамика ступенчатой диссоциации L- фенилаланина и D,L-β-фенил-α-аланина в водном растворе. *Изв. вузов. химия и хим. технология.* 2011. Т. 54. Вып. 2. С. 95-98.
 9. **Archer D.G.** Thermodynamic Properties of the KCl+H₂O System. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 1999. V 28. N 1. P. 1-16. DOI: 10.1063/1.556034.
 10. **Yang X.W.** Determination of combustion energies of thirteen amino acids. *Thermochemical Acta.* 1999. V. 329. N 2. P. 109-115. DOI: 10.1016/S0040-6031(99)00002-7.
 11. **Лыткин А.И., Черников В.В., Крутова О.Н., Скворцов И.А., Корчагина А.С.** Термодинамические характеристики диссоциации L-аргинина в водном растворе. *Журн. физич. химии.* 2018. Т. 92. № 2. С. 257-260. DOI: 10.7868/S0044453718020164.
 12. **Лыткин А.И., Черников В.В., Крутова О.Н.** Стандартные энтальпии образования кристаллического DL-α-аланил-глицил-глицина и продуктов его диссоциации в водном растворе. *Журн. физич. химии.* 2018. Т. 92. № 1. С. 81–84. DOI: 10.7868/S0044453718010144.
 5. **Yamauchi O., Odani A.** Stability constants of metal complexes of amino acids with charged side chains-Part I: Positively charged side chains. *Pure & Appl. Chem.* 1996. V. 68. N 2. P.469-496.
 6. **Lytkin A.I., Chernikov V.V., Krutova O.N., Skvortsov I.A.** Standard enthalpies of formation L-lysine and the products of its dissociation in aqueous solutions. *J. Therm. Anal. Cal.* 2017. V. 130. N 1. P. 457-460. DOI 10.1007/s10973-017-6134.
 7. **Zolotov Y.A.** Fundamentals of analytical chemistry. M.: Vyssh. shk. 2001. 463 p. (in Russian).
 8. **Kochergina L.A., Emelyanov A.V., Krutova O.N.** Thermodynamics of stepwise dissociation of L - phenylalanine and D,L - β-phenyl-α-alanine in aqueous solution. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2011. V. 54. N 2. P. 95-98 (in Russian).
 9. **Archer D.G.** Thermodynamic Properties of the KCl+H₂O System. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 1999. V 28. N 1. P. 1-16. DOI: 10.1063/1.556034.
 10. **Yang X.W.** Determination of combustion energies of thirteen amino acids. *Thermochemical Acta.* 1999. V. 329. N 2. P. 109-115. DOI: 10.1016/S0040-6031(99)00002-7.
 11. **Lytkin A.I., Chernikov V.V., Krutova O.N., Skvortsov I.A., Korchagina A.S.** Thermodynamic characteristics of dissociation of L-arginine in aqueous solution. *Zhurn. phys. chem.* 2018. Т. 92. N 2. P. 257-260. DOI: 10.7868/S0044453718020164.
 12. **Lytkin A.I., Chernikov V.V., Krutova O.N.** Standard enthalpies of formation of crystalline DL-α-alanyl-glycylglycine and products of its dissociation in aqueous solution. *J. phys. chem.* 2018. V. 92. N 1. P. 81-84. DOI: 10.7868/S0044453718010144 (in Russian).

Поступила в редакцию 18.09.2017
Принята к опубликованию 27.12.2017

Received 18.09.2017
Accepted 27.12.2017