

УДК 544.726

## ИОННЫЙ ОБМЕН В СИСТЕМЕ: СУЛЬФОКАТИОНИТ DOWEX 50, ВОДНЫЙ РАСТВОР НИКОТИНОВОЙ КИСЛОТЫ И $\text{FeCl}_3$

© 2024 г. Г. Н. Альтшулер<sup>a, \*</sup>, Е. В. Остапова<sup>a</sup>, О. Г. Альтшулер<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, Кемерово, Россия

<sup>b</sup>Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

\*e-mail: altshulerh@gmail.com

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.

После доработки 30.10.2023 г.

Принята к публикации 02.11.2023 г.

Выполнено экспериментальное исследование равновесного распределения катионов между сульфокатионитом Dowex 50 и водным раствором никотиновой кислоты и хлорида железа в интервале значений pH раствора 1–3. Показано, что концентрация протона, катиона железа и их комплексов с никотиновой кислотой в ионите существенно зависит от pH раствора. Содержание двухзарядных комплексов железа с никотиновой кислотой в полимере может достигать значения, соответствующего полной ионообменной емкости ионита. Предложен метод расчета противоионного состава фазы сульфокатионита по константам равновесия бинарного обмена протона сульфокатионита на катион железа, протонированной формы никотиновой кислоты или двухзарядного комплекса железа с никотиновой кислотой.

**Ключевые слова:** сульфокатионит Dowex 50, никотиновая кислота, катионы железа, ионный обмен

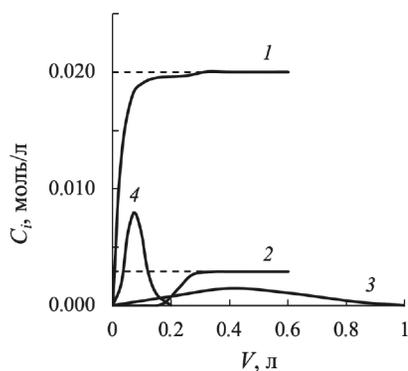
**DOI:** 10.31857/S0044453724080096, **EDN:** PKDRAK

Пиридинкарбоновые кислоты и их производные, обладающие высокой биологической активностью, находят широкое применение в медицине и сельском хозяйстве в качестве пищевых добавок, активных противоопухолевых, антибактериальных и гипополипидемических агентов в лекарственных средствах [1, 2]. Например, никотиновая (3-пиридинкарбоновая) кислота применяется при лечении пеллагры, в комплексной терапии атеросклероза, входит в состав систем для парентерального питания [3–5]. Пиридинкарбоновые кислоты могут взаимодействовать с ионами ряда металлов, присутствующих в организме человека, включая переходные металлы. Координационные соединения переходных металлов с биологически активными веществами вызывают значительный интерес в связи с тем, что они зачастую обладают более выраженными фармакологическими свойствами, чем свободные лиганды [6–10]. Показано [11], что стабильность комплексов никотиновой кислоты в водных растворах возрастает в ряду катионов переходных металлов, достигая наибольшего значения в случае катионов железа. Железо – жизненно важный микроэлемент, который регулирует кислородный обмен, участвует в окислительно-восстановительных реакциях, синтезе гормонов и ферментов, поддерживает работу нервной и иммунной систем [12, 13].

Иммобилизация пиридинкарбоновых кислот и их комплексов с переходными металлами в полимерах создает возможность для целевой доставки биологически активных соединений в желудок или кишечник при пероральном введении, улучшения органолептических свойств пищевых добавок. Ранее с целью получения инновационных лекарственных препаратов пролонгированного действия выполнена [14] лигандная сорбция никотиновой кислоты Fe-содержащим сульфокатионитом КУ-2 из ее водных растворов при pH 3.3–3.6 и показано, что в полимерной фазе никотиновая кислота присутствует в составе комплексных катионов  $[\text{FeL}]^{2+}$ . Цель данной работы – исследовать зависимость противоионного состава сульфокатионита Dowex 50 от состава водного раствора смеси никотиновой кислоты и  $\text{FeCl}_3$  в интервале pH 1–3; показать возможность расчета противоионного состава сульфокатионита по константам равновесия бинарных ионных обменов в системе, включающей сульфокатионит Dowex 50 и водный раствор смеси никотиновой кислоты с  $\text{FeCl}_3$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Материалы.** Сульфокатионит Dowex 50W-X4 (44473 Supelco) – сульфированный сополимер



**Рис. 1.** Выходные кривые: 1 – сорбции никотиновой кислоты, 2 – сорбции железа (III) из водного раствора при pH 1.69 на Dowex 50, 3 – десорбции никотиновой кислоты водой, 4 – десорбции железа (III) раствором HCl.

стирола с 4 мас. % дивинилбензола – имеет гелевую структуру, содержит в виде ионогенных групп только  $\text{SO}_3\text{H}$ -группы. Полная динамическая ионообменная емкость ионита составляла 5.0 м-экв на 1 г H-формы сухого полимера или 2.0 моль однозарядных катионов на 1 л собственного объема фазы набухшего ионита. Истинный объем ионита определяли центрифугированием 5 мл слоя зерен ионита в изопиестических условиях с последующим вычитанием объема отделенного равновесного раствора [15]. Никотиновая (3-пиридинкарбонная) кислота (“G. Amphray Laboratories”, India) содержала не менее 99.5% основного вещества. Растворы электролитов готовили из  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (АО “Альфахимпром”, Россия) квалификации “чда”,  $\text{HNO}_3$  (ООО “Михайловский завод химических реактивов”, Россия) квалификации “х.ч.”.

**Методики.** Равновесное распределение компонентов между водными растворами никотиновой кислоты, хлорида железа и сульфокатионитом Dowex 50 изучали динамическим методом при температуре 298 К. Через ионообменную колонку, заполненную H-формой полимера, пропускали многокомпонентные водные растворы до установления равновесия (до совпадения концентрации железа (III) и никотиновой кислоты, а также pH исходного раствора и фильтрата). Составы растворов выбирались так, чтобы никотиновая кислота и железо в них находились преимущественно в виде катионов  $[\text{H}_2\text{L}]^+$ ,  $[\text{FeL}]^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ . Концентрация никотиновой кислоты в исходных растворах составляла 0.02 моль/л, концентрация хлорида железа –  $2.9 \times 10^{-3}$  моль/л. Значения pH исходных растворов устанавливали добавлением азотной кислоты. После достижения состояния равновесия проводили десорбцию никотиновой кислоты дистиллированной водой, затем десорбцию железа 10% раствором HCl.

Концентрацию никотиновой кислоты в растворах контролировали кислотно-основным титрованием и спектрофотометрически при  $\lambda = 262.7$  нм и pH 6.86 с помощью спектрофотометра СФ-46. Концентрацию железа (III) в растворах определяли методом комплексонометрического титрования.

На рис. 1 приведены выходные кривые, описывающие изменение концентрации никотиновой кислоты и железа (III) в фильтрате при их сорбции на 1 мл катионита Dowex 50 из водного раствора при pH 1.69 или в элюате при последующей десорбции. Количество кислоты и железа, сорбированное слоем ионита, соответствует площади, ограниченной штриховой линией, показывающей концентрацию компонента в исходном растворе (0.02 моль/л никотиновой кислоты и 0.0029 моль/л  $\text{FeCl}_3$ ), кривыми 1 для кислоты и 2 для железа, а также осью ординат. Количество десорбированных кислоты или железа из той же ионообменной колонки соответствует площади под кривой 3 или 4. Данные по сорбции и десорбции компонентов в пределах ошибки совпадают. Погрешность экспериментально измеренных концентраций оценивалась с доверительной вероятностью 0.95.

Концентрации индивидуальных компонентов в растворах ( $C_i$ ) рассчитывали с помощью программы HySS2009 (Hyperquad Simulaton and Speciation) [16]. Концентрацию компонентов в полимере ( $\bar{C}_i$ ) рассчитывали в молях на литр собственного объема фазы набухшего ионита.

ЭПР-спектры получены для образцов сульфокатионита Dowex 50 в Fe-форме и катионита Dowex 50, приведенного в равновесие с раствором, содержащим 0.0029 М  $\text{FeCl}_3$  и 0.02 М никотиновой кислоты при pH 2.05. Регистрацию спектра электронного парамагнитного резонанса выполняли на ЭПР спектрометре Bruker EMX micro 6/1 (“Брукер EMX”, Германия) при комнатной температуре. Обработку спектров выполняли в рамках пакета программ Bruker WinEPR.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим термодинамическую систему, включающую сульфокатионит Dowex 50, водный раствор никотиновой кислоты и хлорида железа (III).

В водном растворе никотиновой кислоты и хлорида железа протекают обратимые реакции (1) – (6) (таблица 1). На рис. 2 приведен рассчитанный по программе HySS2009 катионный состав раствора, содержащего 0.02 моль/л никотиновой кислоты и 0.0029 моль/л  $\text{FeCl}_3$ . Видно, что в диапазоне pH от 0 до 3.5 в растворе присутствует значительное количество протонов, а также катионы  $[\text{H}_2\text{L}]^+$ ,  $[\text{FeL}]^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ . Концентрации катионов  $[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$  и  $[\text{Fe}(\text{OH})_2]^+$  не превышают  $10^{-4}$  и  $10^{-5}$  моль/л соответственно. Концентрация комплексного

**Таблица 1.** Константы равновесия процессов комплексообразования в растворе и ионного обмена с участием никотиновой кислоты, протонов и катионов железа (III)

Реакция		lgK <sub>i</sub>	Ссылки
L <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> = HL	(1)	4.72	[17]
HL + H <sup>+</sup> = [H <sub>2</sub> L] <sup>+</sup>	(2)	6.71	[17]
Fe <sup>3+</sup> + L <sup>-</sup> = [FeL] <sup>2+</sup>	(3)	5.5	[17]
Fe <sup>3+</sup> + (OH) <sup>-</sup> = [Fe(OH)] <sup>2+</sup>	(4)	-2.67	[18, 19]
[Fe(OH)] <sup>2+</sup> + (OH) <sup>-</sup> = [Fe(OH) <sub>2</sub> ] <sup>+</sup>	(5)	-3.18	[18]
[Fe(OH) <sub>2</sub> ] <sup>+</sup> + (OH) <sup>-</sup> = [Fe(OH) <sub>3</sub> ]	(6)	-1.90	[18]
$\overline{3H^+} + Fe^{3+} = \overline{Fe^{3+}} + 3H^+$	(7)	0.699	[20]
$\overline{H^+} + [H_2L]^+ = \overline{[H_2L]^+} + H^+$	(8)	0.544	[21]
$\overline{2H^+} + [FeL]^{2+} = \overline{[FeL]^{2+}} + 2H^+$	(9)	1.5±0.1	данная работа

Обозначения: HL – молекула никотиновой кислоты, L<sup>-</sup> – анион депротонированной никотиновой кислоты, [H<sub>2</sub>L]<sup>+</sup> – катион протонированной никотиновой кислоты, H<sup>+</sup> – протон, [FeL]<sup>2+</sup> – комплекс Fe<sup>3+</sup> с анионом депротонированной никотиновой кислоты, [Fe(OH)]<sup>2+</sup>, [Fe(OH)<sub>2</sub>]<sup>+</sup>, Fe(OH)<sub>3</sub> – комплексы Fe<sup>3+</sup> с гидроксид-анионом. Черта означает принадлежность к полимерной фазе. K<sub>(1)</sub> – K<sub>(6)</sub> – константы образования комплексов, л/моль; K<sub>(7)</sub> – K<sub>(9)</sub> – константы равновесия бинарных ионных обменов.

катиона [FeL]<sup>2+</sup> имеет максимальные значения в диапазоне рН от 2.3 до 2.75. При рН ≈ 2.75 концентрации катиона [FeL]<sup>2+</sup> равна концентрации катиона [H<sub>2</sub>L]<sup>+</sup>.

На рис. 3 представлены ЭПР-спектры катионита в Fe-форме и катионита Dowex 50, приведенного в равновесие с раствором никотиновой кислоты и хлорида железа (III). Оба спектра содержат четкие сигналы g ≈ 2.0 и g ≈ 4.3. Согласно [22], сигнал g=4.3 возникает в присутствии изолированных ионов Fe<sup>3+</sup>, а сигнал g=2.0 относится к взаимодействующим Fe<sup>3+</sup> центрам. Спектр образца, содержащего железо и никотиновую кислоту, отличается меньшим числом резонансных линий в области 0.25–0.30 Тл и двукратным увеличением соотношения интенсивностей основных резонансных линий при g ≈ 2.0 и g ≈ 4.3. Различия в спектрах отражает изменение окружения парамагнитных ионов Fe<sup>3+</sup> в полимерной фазе вследствие образования комплексного катиона [FeL]<sup>2+</sup>.

Сорбционные процессы в системе, включающей сульфокатионит Dowex 50 и водный раствор смеси никотиновой кислоты и хлорида железа (III), можно описать обратимыми реакциями катионного обмена (7) – (9) с участием катионов, присутствующих в растворе в значительных количествах.

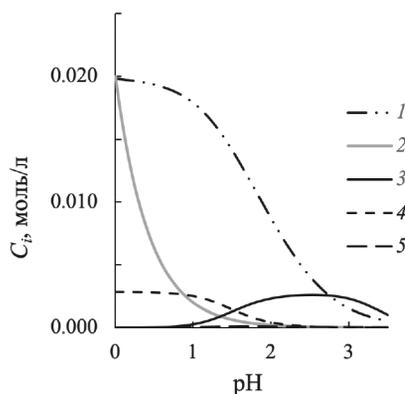
Для расчета компонентного состава фазы ионита используем систему уравнений, предложенную в работе [23] для расчета состава термодинамической системы, содержащей водный раствор пиколиновой кислоты и FeCl<sub>3</sub>, сульфокатионит Dowex 50

$$\begin{cases} \frac{\overline{C}_{Fe^{3+}}}{(\overline{C}_{H^+})^3} = K_{Fe/H} \cdot \frac{C_{Fe^{3+}}}{(C_{H^+})^3} \\ \frac{\overline{C}_{[H_2L]^+}}{\overline{C}_{H^+}} = K_{H_2L/H} \cdot \frac{C_{[H_2L]^+}}{C_{H^+}} \\ \frac{\overline{C}_{[FeL]^{2+}}}{(\overline{C}_{H^+})^2} = K_{FeL/H} \cdot \frac{C_{[FeL]^{2+}}}{(C_{H^+})^2} \\ 3\overline{C}_{Fe^{3+}} + \overline{C}_{[H_2L]^+} + 2\overline{C}_{[FeL]^{2+}} + \overline{C}_{H^+} = E. \end{cases} \quad (10)$$

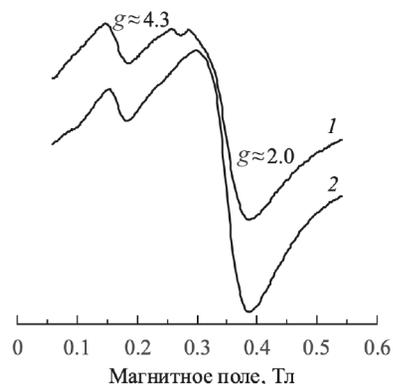
Здесь L – анион никотиновой кислоты; K<sub>Fe/H</sub>, K<sub>H<sub>2</sub>L/H</sub>, K<sub>FeL/H</sub> – константы равновесия бинарных ионных обменов; размерность концентрации компонентов и полной ионообменной емкости катионита (E) в системе уравнений (10) – моль/л.

Путем решения системы уравнений (10) можно рассчитать концентрации катионов Fe<sup>3+</sup>, [H<sub>2</sub>L]<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, [FeL]<sup>2+</sup> в сульфокатионите Dowex 50 в зависимости от концентрации этих катионов в равновесных растворах.

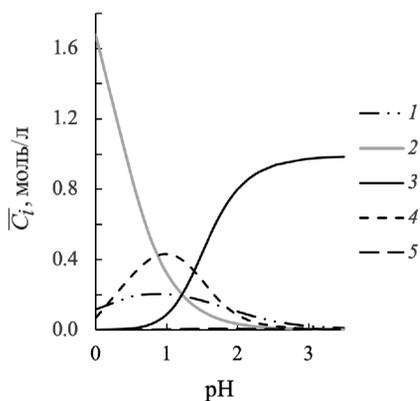
На рис. 4 приведены расчетные зависимости концентрации катионов в полимере ( $\overline{C}_i$ ) от рН равновесного раствора, содержащего 0.02 моль/л никотиновой кислоты и 0.0029 моль/л FeCl<sub>3</sub>. При высокой кислотности равновесного раствора (рН ≈ 0) практически все противоионы в сульфокатионите Dowex 50 представлены протонами. С увеличением рН раствора в полимере концентрации катионов Fe<sup>3+</sup> и [H<sub>2</sub>L]<sup>+</sup> сначала растут, достигая максимума при рН ≈ 1, и затем падают практически до нуля при рН ≈ 3. Зависимость  $\overline{C}_{[FeL]^{2+}}$  (рН)



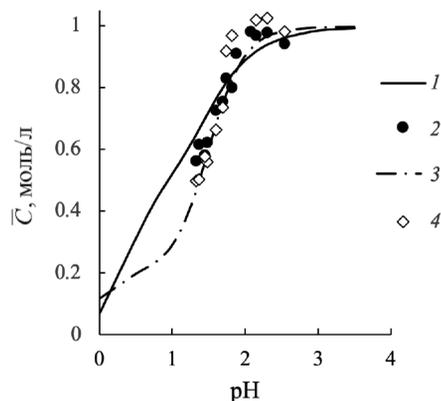
**Рис. 2.** Зависимости концентрации индивидуальных компонентов ( $C_i$ ) от pH водных растворов, содержащих 0.02 моль/л никотиновой кислоты и 0.0029 моль/л  $\text{FeCl}_3$ : 1 –  $C_{[\text{H}_2\text{L}]^+}$ , 2 –  $C_{\text{H}^+}$ , 3 –  $C_{[\text{FeL}]^{2+}}$ , 4 –  $C_{\text{Fe}^{3+}}$ , 5 –  $C_{[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}}$ .



**Рис. 3.** ЭПР-спектры: 1 – сульфокатионита Dowex 50 в Fe-форме, 2 – сульфокатионита Dowex 50, приведенного в равновесие с раствором никотиновой кислоты и  $\text{FeCl}_3$  при pH 2.05.



**Рис. 4.** Расчетные зависимости концентрации противоионов в сульфокатионите Dowex 50 от pH равновесных растворов, содержащих 0.02 моль/л никотиновой кислоты и 0.0029 моль/л  $\text{FeCl}_3$ : 1 –  $\bar{C}_{[\text{H}_2\text{L}]^+}$ , 2 –  $\bar{C}_{\text{H}^+}$ , 3 –  $\bar{C}_{[\text{FeL}]^{2+}}$ , 4 –  $\bar{C}_{\text{Fe}^{3+}}$ , 5 –  $\bar{C}_{[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}}$ .



**Рис. 5.** Зависимости концентраций железа и никотиновой кислоты в сульфокатионите Dowex 50 от pH равновесного раствора. Линии – расчет, маркеры – эксперимент;  $\bar{C}_{\text{Fe}}$  (1, 2),  $\bar{C}_{\text{Nic}}$  (3, 4).

представлена на рисунке s-образной кривой. При увеличении pH раствора в сульфокатионите растет концентрация комплексов  $\text{Fe}^{3+}$  с никотиновой кислотой. Расчет показывает, что при  $\text{pH} > 3$  концентрация  $[\text{FeL}]^{2+}$  в сульфокатионите Dowex 50 соответствует полной ионообменной емкости катионита.

В изученном интервале значений pH растворов концентрация никотиновой кислоты в полимере ( $\bar{C}_{\text{Nic}}$ ) равна сумме концентраций комплексных катионов  $[\text{FeL}]^{2+}$  и  $[\text{H}_2\text{L}]^+$ , т.е.  $\bar{C}_{\text{Nic}} = \bar{C}_{[\text{FeL}]^{2+}} + \bar{C}_{[\text{H}_2\text{L}]^+}$ , а концентрация железа (III) в полимере ( $\bar{C}_{\text{Fe}}$ ) равна сумме концентраций катионов  $\text{Fe}^{3+}$  и  $[\text{FeL}]^{2+}$  ( $\bar{C}_{\text{Fe}} = \bar{C}_{\text{Fe}^{3+}} + \bar{C}_{[\text{FeL}]^{2+}}$ ). На рис. 5 приведены концентрации никотиновой кислоты и железа (III) в ионите при различных

pH равновесного раствора, определенные экспериментально, и полученные суммированием концентраций соответствующих катионов, вычисленных по системе уравнений (10). Вид экспериментальных зависимостей  $\bar{C}_{\text{Nic}}$  и  $\bar{C}_{\text{Fe}}$  от pH аналогичен виду расчетных кривых. При увеличении pH раствора растет содержание никотиновой кислоты и железа в сульфокатионите. При  $\text{pH} > 2.5$  концентрации никотиновой кислоты и железа составляют примерно 1 моль/л. Это означает, что обменные центры ионита заняты двухзарядным комплексом  $[\text{FeL}]^{2+}$  и его содержание соответствует полной ионообменной емкости катионита.

Экспериментально установленные концентрации никотиновой кислоты и железа в полимере

в пределах ошибок измерений попадают в интервал расчетных составов. Среднее абсолютное отклонение ( $\Delta\bar{C}$ ) по массиву данных рассчитали по формуле

$$\Delta\bar{C} = \sum_{k=1}^s \left| \frac{(\bar{C}_{\text{Fe}_k \text{ экс}} - \bar{C}_{\text{Fe}_k \text{ расч}})}{s} \right| + \sum_{k=1}^s \left| \frac{(\bar{C}_{\text{Nic}_k \text{ экс}} - \bar{C}_{\text{Nic}_k \text{ расч}})}{s} \right|,$$

где  $s$  – число экспериментальных точек для каждого компонента. ( $\Delta\bar{C}$ ) для ионного обмена с участием никотиновой кислоты и железа составляет 0.05 моль/дм<sup>3</sup> и не превышает величину абсолютной погрешности при экспериментальном определении молярности компонентов в полимере (0.05 и 0.04 моль/дм<sup>3</sup> для 3-пиридинкарбоновой кислоты и железа соответственно). Погрешность величины  $\bar{C}_{i \text{ расч}}$  не превышает 0.02 моль/дм<sup>3</sup>.

Таким образом, в системе, включающей сульфокатионит Dowex 50 и водный раствор смеси никотиновой кислоты и соли железа (III), при pH растворов от 1 до 3 сорбционные процессы могут быть описаны уравнениями ионного обмена. Что позволяет при известном составе раствора рассчитать противоионный состав сульфокатионита Dowex 50 по константам равновесия бинарных обменов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института углекислотной и химического материаловедения Федерального исследовательского центра угля и углекислотной Сибирского отделения Российской академии наук (проект № 121031500194-5).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдатенков А.Т., Колядина Н.М., Шендрик И.В. Основы органической химии лекарственных веществ. М.: Химия, 2001. 188 с.
2. Sinthpoom N., Prachayasittikul V., Prachayasittikul S. et al. // Eur. Food Res. Tech. 2014. V. 240. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2354-1>
3. Cantarella L., Gallifuoco A., Malandra A., et al. // Enzyme and Microbial Technology. 2011. V. 48. № 4–5. P. 345. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2010.12.010>
4. Carlson L.A. // J. Intern. Med. 2005. V. 258. P. 94. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2796.2005.01528.x>
5. Villines T. C., Kim A. S., Gore R.S., et al. // Current Atherosclerosis Reports. 2012. V. 14. № 1. P. 49. <https://doi.org/10.1007/s11883-011-0212-1>
6. Chernyavskaya A.A., Loginova N.V., Polozov G.I. et al. // Pharm. Chem. J. 2006. V. 40. P. 413. <https://doi.org/10.1007/s11094-006-0141-4>
7. Singh K., Barwa M.S., Tyagi P. // Eur. J. Med. Chem. 2006. V. 41. P. 147. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2005.06.006>
8. Phaniband M.A., Dhumwad S.D. // Transit. Met. Chem. 2007. V. 32. P. 1117. <https://doi.org/10.1007/s11243-007-0295-2>
9. Yu L.C., Lai L., Xia R., Liu S.L. // J. Coord. Chem. 2009. V. 62. № 8. P. 1313. <https://doi.org/10.1080/00958970802590667>
10. Kaya A.A., Demircioglu Z., Celenk Kaya E., et al. // Heterocyclic Commun. 2014. № 20. P. 51. <https://doi.org/10.1515/hc-2013-0160>
11. Rahim S.A., Hussain S., Farooqu M. // Int. J. Chem. Sci. 2014. V. 12. № 4. P. 1299.
12. De Freitas J.M., Meneghini R. // Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis. 2001. V. 475. № 1–2. P. 153. [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(01\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(01)00066-5)
13. Goswami T., Rolfs A., Hediger M. A // Biochemistry and Cell Biology. 2002. V. 80. № 5. P. 679. <https://doi.org/10.1139/o02-159>
14. Альтшулер Г.Н., Остапова Е.В., Альтшулер О.Г. // Журн. физ. химии. 2021. Т. 95. № 8. С. 1194. [Altshuler G.N., Ostapova E.V., Altshuler O.G. // Rus. J. of Phys. Chem. A. 2021. V. 95. № 8. P. 1585. <https://doi.org/10.1134/S0036024421080045>
15. Pepper K.W., Reichenberg D., Hale D.K. // J. Chem. Soc. 1952. V. 10. P. 3129. <https://doi.org/10.1039/JR9520003129>
16. HySS2009. Hyperquad Simulation and Speciation, Protonic Software, Leeds (UK), Universita di Firenze, Firenze (Italy), 2009. <http://www.hyperquad.co.uk/hyss.htm>
17. IUPAC Stability Constants Database; <http://www.acadsoft.co.uk/scdbase/scdbase.htm>.
18. Никольский Б.П. Справочник химика. М.: Медиа, 2012. Т. 3. 490 с.
19. El-Dessouky M.A., El-Ezaby M.S., Shuaib N.M. // Inorg. Chim. Acta. 1980. 46:7–14. [https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(00\)84161-4](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)84161-4).
20. Никольский Б.П. Справочник химика. М.: Книга по требованию, 2013. Т. 4. 910 с.
21. Остапова Е.В., Лыршиков С.Ю., Альтшулер Г.Н. // ЖПХ. 2022. Т. 95. № 8. С. 1059. [Ostapova E.V., Lyrshchikov S. Yu., Altshuler G.N. // Rus. J. of Applied Chem. 2022. V. 95. P. 1223. <https://doi.org/10.1134/S1070427222080195>
22. Snockaert V., Maes K., Bellemans I. et al. // J. of Non-Crystalline Solids. 2020. V. 536. P. 120002. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120002>
23. Альтшулер Г.Н., Остапова Е.В., Лыршиков С.Ю., и др. // Журн. физ. химии. 2023. Т. 97. № 10. С. 1488. [Altshuler G.N., Ostapova E.V., Lyrshchikov S. Yu., et al. // Rus. J. of Phys. Chem. A. 2023. V. 97. № 10. P. 2282. <https://doi.org/10.1134/S0036024423100035>