УДК 546.732:546.742:546.712+547-386

# СИНТЕЗ, КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ СО СПИРОКАТИОНАМИ: (Spiro)<sub>2</sub>MCl<sub>4</sub>, (Spiro = 2,8-ДИОКСО-5-АЗОНИЯСПИРО[4.5]ДЕКАН ИЛИ 2-ОКСО-5-АЗОНИЯСПИРО[4.4]НОНАН, М = Mn, Ni, Co)

© 2021 г. М. А. Захаров<sup>1, \*</sup>, Э. А. Вятчанина<sup>1</sup>, А. С. Иванов<sup>1</sup>, М. А. Быков<sup>1</sup>, Е. В. Карпова<sup>1</sup>, К. А. Пасешниченко<sup>1</sup>, Л. А. Асланов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия \*e-mail: max@struct.chem.msu.ru Поступила в редакцию 12.01.2021 г. После поработки 25.03.2021 г.

Принята к публикации 29.03.2021 г.

Синтезированы металлсодержащие ионные жидкости со спирокатионами 2,8-диоксо-5-азонияспиро[4.5]декан (MorphOx) и 2-оксо-5-азонияспиро[4.4]нонан (PyrOx) и тетрахлоридометаллат-

анионами  $MCl_4^{2-}$  (M = Mn, Ni, Co). Методом PCA определено их кристаллическое строение (CIF files CCDC № 2033482 (MorphOx<sub>2</sub>CoCl<sub>4</sub>), 2033483 (PyrOx<sub>2</sub>CoCl<sub>4</sub>), 2033484 (PyrOx<sub>2</sub>MnCl<sub>4</sub>) и 2033485 (PyrOx<sub>2</sub>NiCl<sub>4</sub>)). Соединения PyrOx<sub>2</sub>MCl<sub>4</sub> являются изоструктурными. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии определены температуры фазовых переходов полученных соединений.

*Ключевые слова:* металлсодержащие ионные жидкости, кристаллическая структура, термические свойства

DOI: 10.31857/S0132344X21090103

Мировое потребление энергии с каждым годом растет. Отчасти эта потребность может быть удовлетворена за счет возобновляемых источников энергии. Прерывистый характер работы солнечных батарей и ветряных генераторов требует разработки накопителей энергии с большой емкостью, высокой плотностью энергии и низкой стоимостью. Такими накопителями являются проточные аккумуляторы, которые исследуются последнее время довольно интенсивно [1–3].

Одним из перспективных решений являются проточные аккумуляторы на основе ионных жидкостей (ИЖ). Ионные жидкости – это соединения, полностью состоящие из ионов, с температурой плавления ниже некоторой температуры, которую часто определяют равной 100°С, однако есть работы, где максимальная температура плавления ИЖ приравнивается 150 или 250°С [4–6]. В определении ИЖ указание максимальной температуры задает ненужное ограничение [7]. Одно из преимуществ ИЖ по сравнению с молекулярными растворителями в том, что растворимость в них полярных и ионных соединений [7] гораздо выше, что приводит к повышению плотности тока [3]. ИЖ имеют широкие электрохимические окна, благодаря нулевой упругости паров, отвечают требованиям пожаробезопасности. Последние тридцать лет ИЖ изучаются крайне интенсивно. Их используют в качестве растворителей [8, 9], катализаторов [8, 10], молекулярных магнитов [11–13], электролитов для аккумуляторов [14, 15] и многого другого. Для выявления закономерности изменения свойств от строения и состава необходимо знать кристаллическую структуру, но в случае жидкостей это сопровождается сильными осложнениями [16]. Неоспоримые преимущества для определения атомной структуры веществ дает метод рентгеноструктурного анализа (**PCA**), однако для ИЖ он часто бесполезен, так как они образуют аморфные (стекловидные) состояния.

Одним из направлений разработки ИЖ с высокой электрохимической устойчивостью, невысокой вязкостью и низкой молекулярной массой являются ИЖ со спирокатионами [17–21]. Введение атома кислорода в цепочку циклоалкана спирокатиона уменьшает температуру плавления и вязкость ИЖ [22, 23].

Металлсодержащие ионные жидкости всегда привлекали внимание ученых, о применении их в различных областях можно прочитать в работах [24–26]. Ранее мы опубликовали результаты исследования металлсодержащих ИЖ [27, 28].

В настоящей работе мы представляем синтез, кристаллическое строение и термические свойства новых ионных жидкостей со спирокатионами, содержащими один (2-оксо-5-азонияспиро[4.4]нонан (**PyrOx**)) или два атома кислорода (2,8-диоксо-5-азонияспиро[4.5]декан (**MorphOx**)), и галогенметаллатными анионами  $MCl_4^{2-}$  (M = Mn, Ni, Co), а именно тетрахлорокобальтат(II) 2,8-диоксо-5-азонияспиро[4.5]декана (MorphOx<sub>2</sub>CoCl<sub>4</sub>) (I), тетрахлорокобальтата(II) 2-оксо-5-азония-спиро[4.4]нонана (PyrOx<sub>2</sub>CoCl<sub>4</sub>) (II), тетрахлороникелата 2-оксо-5-азонияспиро[4.4]нонана (PyrOx<sub>2</sub>NiCl<sub>4</sub>) (III), тетрахлороманганата(II) 2-оксо-5-азонияспиро[4.4]нонана (PyrOx<sub>2</sub>MnCl<sub>4</sub>) (IV).

Структура спирокатионов 2-оксо-5-азонияспиро[4.4]нонан (PyrOx) и 2,8-диоксо-5-азонияспиро[4.5]декан (MorphOx) представлена на схеме.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали следующие реагенты:  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $MnCl_2 \cdot 6H_2O$  (все "ч. д. а.");  $P_4O_{10}$  ("ч.");  $CICH_2CH_2OH$ , пирролидин, морфолин, параформ, диэтиловый эфир,  $CH_2Cl_2$  (все "х. ч.").

Синтез хлоридов РугОхСl и MorphOxCl проводили согласно следующей схеме взаимодействия: (0.4 моль) амин + (0.4 моль) параформ + (0.4 моль) хлорэтанол = (150 мл  $Et_2O$ ) = Spiro<sup>+</sup>Cl<sup>-</sup> (амин = пирролидин/морфолин, Spiro<sup>+</sup> = = PyrOx/MorphOx).

К смеси параформа и хлорэтанола в диэтиловом эфире добавляли амин. Смесь перемешивали и кипятили с обратным холодильником в течение 3-4 ч. Далее смесь остужали до комнатной температуры при перемешивании. После охлаждения смесь разделялась на два слоя. Верхний слой декантировали, а нижний слой смешивали с водой, фильтровали, а примеси из фильтрата 3 раза экстрагировали хлористым метиленом. Водный раствор после этого упаривали досуха и сушили при 100°C в вакуумном шкафу. Выход 87.5% (PyrOxCl) и 89% (MorphOxCl).  $T_{пл}(PyrOxCl) = -24^{\circ}C$ ,  $T_{пл}(MorphOxCl) = 33^{\circ}C$ .

SMP <sup>1</sup>H PyrOxCl (CD<sub>3</sub>CN; 293 K; δ, м.д.): 2.18 (м., 4H), 3.56 (м., 4H), 3.70 (т., J = 7.7 Γμ, 2H), 4.28 (т., J = 7.7 Γμ, 2H), 4.74 (c., 2H); SMP <sup>1</sup>H MorphOxCl (CD<sub>3</sub>CN; 293 K; δ, м.д.): 3.54 (м., 2H), 3.80 (м., 4H), 3.94 (т., J = 7.5 Гц, 4H), 4.26 (т., J = 7.5 Гц, 2H), 5.00 (с., 2H).

Найдено, %: С 50.13; Н 7.78; СI 20.72; N 7.76; О 13.61. Для С<sub>7</sub>Н<sub>14</sub>NOCl

вычислено, %: С 51.38; Н 8.62; Сl 21.66; N 8.56; О 9.78. Найдено, %: С 45.92; Н 7.04; Cl 18.82; N 7.19; О 21.03. Для C<sub>7</sub>H<sub>14</sub>NO<sub>2</sub>Cl

вычислено, %: С 46.80; Н 7.86; Cl 19.74; N 7.80; O 17.80.

Синтез металлсодержащих ионных жидкостей I–IV проводили согласно следующей общей схеме взаимодействия:  $2Spiro^+Cl^- + MCl_2 \cdot 6H_2O =$ = Spiro<sub>2</sub>MCl<sub>4</sub> + 6H<sub>2</sub>O (Spiro = PyrOx/MorphOx; M = Mn, Co, Ni).

В стеклянный бюкс с крышкой помещали 2 г Spiro<sup>+</sup>Cl<sup>-</sup> (11.13 ммоль MorphOxCl или 12.22 ммоль PyrOxCl), затем добавляли эквимолярное количество кристаллогидрата  $MCl_2 \cdot 6H_2O$  (M = Mn, Co, Ni). Смесь нагревали до 70–80°С при перемешивании в течение 2–3 ч на магнитной мешалке до полной гомогенизации. Полученное вязкое вещество помещали в эксикатор с  $P_4O_{10}$  до выпадения кристаллов, в случае соединения IV кристаллы получали после перекристаллизации из ацетонитрила. Соединения MorphOx<sub>2</sub>CoCl<sub>4</sub> (I) и PyrOx<sub>2</sub>CoCl<sub>4</sub> (II) представляют собой темно-синие призматические кристаллы, устойчивые на воздухе. Выход I 94%, II – 95%.

Найдено, %: С 33.80; Н 5.40; Сl 29.32; N 5.97; О 14.00; Со 11.51. Для (C<sub>7</sub>H<sub>14</sub>NO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>Co (I)

вычислено, %: С 34.38; Н 5.77; Сl 28.99; N 5.73; О 13.08; Со 12.05. Найдено, %: С 36.11; Н 5.72; Cl 29.88; N 5.71; О 10.05; Со 12.53. Для (C<sub>7</sub>H<sub>14</sub>NO)<sub>2</sub>CoCl<sub>4</sub> (II)

вычислено, %: C 36.78; H 6.17; Cl 31.02; N 6.13; O 7.00; Co 12.89.

Соединение PyrOx<sub>2</sub>NiCl<sub>4</sub> (III) представляет собой изумрудно-зеленые призматические кристаллы устойчивые на воздухе. Выход III 95%.

Найдено, %: С 36.34; Н 5.80; Cl 31.22; N 5.80; Ni 12.23; O 8.61; Для (C<sub>7</sub>H<sub>14</sub>NO)<sub>2</sub>NiCl<sub>4</sub> (III)

вычислено, %: С 36.80; Н 6.18; СІ 31.04; N 6.13; Ni 12.85; О 7.00.

Соединение  $PyrOx_2MnCl_4$  (IV) представляет собой лимонно-желтые призматические кристаллы, устойчивые на воздухе. Выход IV 98%.

Найдено, %: С 36.70; Н 5.58; СІ 31.89; N 5.71; О 8.50; Mn 11.62. Для (C<sub>7</sub>H<sub>14</sub>NO)<sub>2</sub>MnCl<sub>4</sub> (IV)

вычислено, %: С 37.11; Н 6.23; Cl 31.30; N 6.18; O 7.06; Mn 12.12.

Образцы всех полученных металлсодержащих ИЖ исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе

КООРДИНАЦИОННАЯ ХИМИЯ том 47 № 9 2021

Параметр	Значение			
	Ι	II	III	IV
Брутто-формула	(C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> Co	(C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> NO) <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> Co	(C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> NO) <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> Ni	$(C_7H_{14}NO)_2Cl_4Mn$
M	489.13	457.13	456.89	453.13
Излучение (λ, Å)	$MoK_{\alpha}$ (0.71073)	$CuK_{\alpha}$ (1.54186)	$CuK_{\alpha}$ (1.54186)	$CuK_{\alpha}$ (1.54186)
Сингония	Моноклинная	Моноклинная	Моноклинная	Моноклинная
Пр. гр.	$P2_{1}/c$	$P2_{1}/c$	$P2_{1}/c$	$P2_{1}/c$
<i>a</i> , Å	9.4341(4)	10.4116(3)	10.2935(3)	10.4721(3)
<i>b</i> , Å	16.8689(5)	14.0842(6)	14.0071(4)	14.2173(5)
<i>c</i> , Å	13.2475(7)	13.7810(5)	13.7230(4)	13.8639(4)
β, град	95.803(4)	90.022(3)	90.412(2)	89.984(2)
<i>V</i> , Å <sup>3</sup>	2097.44(16)	2020.83(13)	1978.56(10)	2064.13(11)
Ζ	4	4	4	4
ρ(выч.), г/см <sup>3</sup>	1.549	1.502	1.534	1.458
Температура, К	293(2)	293(2)	293(2)	293(2)
μ, мм <sup>-1</sup>	1.348	11.597	6.459	10.036
F(000)	1012	948	952	940
Область θ, град	2/28.8	4.2/88.8	4.3/73.0	4.2/73.0
Общее число рефлексов	31252	30252	15128	15802
Число независимых рефлексов ( <i>R</i> <sub>int</sub> )	5350 (0.119)	4614 (0.152)	3846 (0.0367)	3926 (0.059)
Число рефлексов с $I > 2\sigma(I)$	2292	1585	3280	2510
Число уточняемых пара- метров	227	209	209	209
GOOF no $F^2$	0.843	0.773	1.031	0.875
$R_1$ по $I > 2\sigma(I)$	0.0582	0.0560	0.0262	0.0386
<i>wR</i> <sub>2</sub> (по всем данным)	0.1412	0.1512	0.0691	0.1001
Остаточная электронная плотность (min/max), <i>е</i> Å <sup>-3</sup>	-0.675/0.597	-0.499/0.403	-0.387/0.251	-0.243/0.421

Таблица 1. Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения I-IV

Netzsch DSC-204 F1. Измерительную систему калибровали согласно стандарту ISO 11357-1 по параметрам фазовых переходов стандартных веществ ( $C_6H_{12}$ , Hg, бензойная кислота, Ga, KNO<sub>3</sub>, In, Sn, Bi, CsCl, чистота 99.99%). Систематическая ошибка температурной калибровки (определена по In) составляет 0.1°.

Образцы тестировали в стандартных алюминиевых ячейках ( $V = 56 \text{ мм}^3$ , d = 6 мм), завальцованных крышкой с отверстием (отношение площади дна ячейки к площади отверстия составляло ~40) в потоке (40 мл/мин) азота ("ос. ч.") при скорости нагревания 5 К/мин. Экспериментальные данные обрабатывали с помощью пакета анализа NETZSCH Proteus Analysis согласно стандарту ISO/CD 11358. РСА проведен для образцов I–IV с использованием монокристального рентгеновского дифрактометра StadiVari Pilatus 100 К. Кристаллические структуры расшифрованы прямыми методами (программа SHELX-97 [29]) и уточнены полноматричным методом наименьших квадратов. Все атомы, кроме атомов водорода, уточнены анизотропно (программа SHELXL в пакете программ SHELX-97 [29]). Атомы водорода заданы геометрически и не уточнялись. Для обработки данных использована программа WinGX [30]. Рисунки структур подготовлены с использованием программы Diamond 3.0 [31]. Кристаллографические данные и детали съемки даны в табл. 1.

Параметры кристаллических структур депонированы в Кембриджском банке структурных данных (ССDС № 2033482 (I), 2033483 (II), 2033484 (IV) и 2033485 (III)) и их можно получить у авторов.



**Рис. 1.** Фрагмент структуры I. Тепловые эллипсоиды с вероятностью 50%. Нумерация атомов водорода не приведена для ясности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Независимая часть элементарной ячейки структуры I состоит из двух катионов MorhOx и одного аниона  $CoCl_4^{2-}$  (рис. 1). Катион состоит из двух циклов: морфолинового и оксазолидинового, объединенных общим атомом азота. Оба катиона имеют одинаковую конформацию, причем в катионе морфолиновый цикл имеет конформацию кресла, а оксазолидиновый цикл – конформацию полукресла. Каждый анион CoCl<sub>4</sub><sup>2-</sup> окружен девятью катионами по вершинам искаженной трехшапочной тригональной призмы, четыре из них с атомом N(1) и пять — с атомом N(2). Катион с атомом азота N(1) окружен пятью анионами по вершинам искаженной тетрагональной пирамиды, а катион с атомом азота N(2) – четырьмя анионами по вершинам искаженного тетраэдра. При помощи слабых водородных связей (ВС) С…О (расстояние от 3.036(7) до 3.538(9) Å) катионы образуют трехмерный каркас, причем катионы N(2) связаны только с катионами N(1), а катионы N(1) связаны также с другими катионами N(1). Внутри каркаса из катионов располагаются анионы CoCl<sub>4</sub><sup>2-</sup>, контактирующие с катионами через слабые ВС С···Сl 3.542(5)-3.821(5) Å (рис. 2).

Соединения II—IV изоструктурны. Рассмотрим строение на примере структуры II. Независимая часть элементарной ячейки структуры II состоит из двух катионов РугОх и одного аниона  $CoCl_4^{2-}$  (рис. 3). Катион состоит из двух циклов: пирролидинового и оксазолидинового, объединенных общим атомом азота. Конформации циклов в обоих независимых катионах приближены к конформации "конверт", причем пирролидиновый цикл содержит атомы углерода в одной плоскости и атом азота, находящийся вне этой плоскости. На рис. 4а в катионе N(1) атомы углерода C(12)-C(13)-C(14)-C(15) лежат в одной плоскости, а атом N(1) отклоняется из этой плоскости: клапаном конверта является C(12)-N(1)-C(15), в катионе N(2) (рис. 4б) в одной плоскости лежат атомы C(5)-C(6)-C(7)-C(8), а клапаном конверта является C(5)-N(2)-C(8). Конформация оксазолидинового цикла содержит атомы N-C-С-О в одной плоскости, а атом углерода между атомами азота и кислорода относится к клапану конверта. В катионе N(1) атомы N(1)-C(10)-C(11)-O(2) лежат в плоскости, а атом C(9) находится в вершине клапана; в катионе N(2) в плоскости лежат атомы N(2)-C(3)-C(4)-O(1), а атом С(2) расположен в вершине клапана. Два катиона представляют собой конформационные диастереомеры, так как могут переходить друг в друга только при изменении конформации и не являются зеркальным отображением друг друга. Так, например, если в катионе N(1) оба клапана на двух циклах (С(9) в оксазолидиновом цикле и



**Рис. 2.** Водородные связи в структуре I. Атомы водорода не показаны для ясности. Штриховыми линиями обозначены водородные связи.



**Рис. 3.** Фрагмент структуры II. Подписи к атомам водорода не показаны для ясности. Вероятность тепловых эллипсоидов 50%.

N(1) — в пирролидиновом) выгнуть в противоположную сторону, то он совпадет с катионом N(2). Такие же конформации катионов встречаются в структуре PyrOxBF<sub>4</sub> [23].

Между катионами действуют слабые ВС С– Н…О, которые объединяют катионы в слои, перпендикулярные оси *а*. Причем катион N(1) соединен с двумя катионами N(2) через BC C(12)···O(1) 3.26(1) Å и C(8)···O(2) 3.382(9) Å, а катион N(2) связан с двумя катионами N(1) через BC C(12)···O(1) 3.26(1) Å и C(8)···O(2) 3.382(9) Å и одним катионом N(2) (симметрически связан-



Рис. 4. Конформации двух независимых катионов N(1) (а) и N(2) (б) в структурах II-IV.



**Рис. 5.** Водородные связи в структуре II. Атомы водорода не показаны для ясности. Штриховыми линиями обозначены водородные связи.

ным с ним центром инверсии) через две BC C(5) O(1) 3.301(8) Å.

Каждый анион  $CoCl_4^{2-}$  окружен восемью катионами по вершинам искаженной тетрагональной антипризмы, четыре из них с атомом N(1) и четыре – с атомом N(2). Оба катиона окружены четырьмя анионами по вершинам искаженного тетраэдра каждый. При помощи ВС С–H…Cl

(расстояния С…Сl варьируются от 3.434(8) до 3.688(9) Å) анионы сшивают слои катионов в трехмерный каркас (рис. 5).

Результаты ДСК всех полученных металлсодержащих ионных жидкостей представлены в табл. 2. Образец IV имеет в ряду представленных соединений самую низкую температуру плавления, немного выше комнатной температуры. Об-

Образец	$T_{\rm пл},$ °С	$\Delta H_{\rm пл}$ , кДж/моль	$T_{\phi.\pi}, ^{\circ}\mathrm{C}^{*}$	$\Delta H_{ m \phi. \pi},$ кДж/моль
Ι	118.2	27.964		
II	75.2	2.749	61.1	18.714
III			63.7	128.203
IV	26.8	12.851		

Таблица 2. Результаты ДСК металлсодержащих ИЖ

\*  $T_{\phi,\Pi}$  = температура фазового перехода.

разец I имеет температуру плавления немного выше 100°С, тем не менее, данное соединение можно относить к ионным жидкостям в силу ионного строения и сходства с остальными образцами ионных жидкостей, представленных в данной работе. Для образца II обнаружено два фазовых эндотермических перехода, один из которых может соответствовать плавлению (75.2°С), а другой – переходу твердое–твердое (61.1°С). Для образца III зафиксирован экзотермический переход, что связано, по-видимому, с каким-то химическим превращением. Для установления природы переходов в образцах II и III необходимы дополнительные исследования.

Температуры плавления ИЖ II-IV меньше, чем температура плавления ИЖ І. Отсюда можно сделать предположение, что наличие дополнительного атома кислорода в катионе ИЖ приводит к повышению температуры плавления. Это можно объяснить тем, что атом кислорода образует дополнительные водородные связи. Так, в структуре I четыре атома кислорода катионов образуют семь уникальных водородных связей, в то время как в структуре II два атома кислорода образуют лишь четыре водородные связи. Такие экспериментальные факты уже ранее встречались [23]. В пользу такого предположения говорит и то, что, по нашим данным, температура плавления образца (MorphOx)<sub>2</sub>MnCl<sub>4</sub> составляет  $39.3^{\circ}$ C, что выше температуры плавления образца IV.

Таким образом, в настоящей работе синтезированы четыре новые металлсодержащие ионные жидкости со спирокатионами 2,8-диоксо-5-азонияспиро[4.5]декан (MorphOx) и 2-оксо-5-азонияспиро[4.4]нонан (PyrOx) и тетрахлоридометаллат-анионами  $MCl_4^{2-}$  (M = Mn, Ni, Co). Определена их кристаллическая структура методом PCA, все соединения с катионом РугОх изоструктурны. Методом ДСК определены температуры фазовых переходов полученных соединений. Температура плавления ИЖ при переходе от катиона РугОх к катиону MorphOx растет, что можно предположительно объяснить увеличением количества атомов кислорода в катионе.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### КООРДИНАЦИОННАЯ ХИМИЯ том 47 № 9 2021

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования МГУ им. М.В. Ломоносова.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-08-00672а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Soloveichik G.L. // Chem. Rev. 2015. V. 115. P. 11533.
- 2. Winsberg J., Hagemann T., Janoschka T. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2016. V. 55. P. 2.
- Noack J., Roznyatovskaya N., Herr T., Fischer P. // Angew. Chem. Int. Ed. 2015. V. 54. P. 9776.
- 4. Асланов Л.А., Захаров М.А., Абрамычева Н.Л. Ионные жидкости в ряду растворителей. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2015. 272 с.
- 5. Злотин С.Г., Махова Н.Н. // Успехи химии. 2010. Т. 79. № 7. С. 603.
- 6. *Marcus Y.* Ionic Liquid Properties. From Molten Salts to RTILs. Springer, 2016. 244 p.
- MacFarlane D.R., Kar M., Pringle J.M. Fundamentals of Ionic Liquids. From Chemistry to Applications. Wiley-VCH Verlag GmbH&Co., 2017. 248 p.
- 8. Vekariya R.L. // J. Mol. Liq. 2017. V. 227. P. 44.
- Greaves T.L., Drummond C.J. // Chem. Rev. 2015. V. 115. P. 11379.
- Dai C., Zhang J., Huang C., Lei Z. // Chem. Rev. 2017. V. 117. P. 6929.
- Yoshida Y., Tanaka H., Saito G. et al. // Inorg. Chem. 2009. V. 48. P. 9989.
- Yoshida Y., Saito G. // J. Mater. Chem. 2006. V. 16. P. 1254.
- Hayashi S., Hamaguchi H.-O. // Chem. Lett. 2004. V. 33. P. 1590.
- 14. *Hapiot P., Lagrost C. //* Chem. Rev. 2008. V. 108. P. 2238.
- Watanabe M., Thomas M.L., Zhang S. et al. // Chem. Rev. 2017. V. 117. P. 7190.
- Hayes R., Warr G.G., Atkin R. // Chem. Rev. 2015. V. 115. P. 6357.
- Ue M., Ida K., Mori S. // J. Electrochem. Soc. 1994.
   V. 141. P. 2989.
- 18. *Clough M.T., Geyer K., Hunt P.A. et al.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2016. V. 18. P. 3339.

- Yu C., Iwama E., Ueda T. et al. // J. Phys. Chem. C. 2020. V. 124. P. 12230.
- 20. Nguyen H.V.T., Lee S., Kwak K., Lee K.-K. // Electrochim. Acta. 2019. V. 321. P. 134649.
- Xu L., Gao J.-X., Chen X.-G. et al. // Dalton Trans. 2018. V. 47. P. 16995.
- 22. Devarajan T., Higashiya S., Dangler C. et al. // Electrochem. Commun. 2009. V. 11. P. 680.
- 23. *Higashiya S., Filatov A. S., Wells C. C. et al.* // J. Mol. Struct. 2010. V. 984. P. 300.
- 24. *Estager J., Holbrey J. D., Swadzba-Kwasny M.* // Chem. Soc. Rev. 2014. V. 43. P. 847.
- 25. Brown L.C., Hogg J.M., Swadzba-Kwasny M. // Top. Curr. Chem. 2017. V. 375. P. 1.

- 26. *Meyer C., Werner S., Haumann M., Wasserscheid P. //* Ionic Liquids Completely UnCOILed: Critical Expert Overviews. Wiley & Sons, 2015. P. 107.
- 27. Захаров М.А., Филатова Ю.В., Быков М.А. и др. // Коорд. химия. 2020. Т. 46. № 4. С. 249 (Zakharov M.A., Filatova Y.V., Bykov M.A. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. № 4. Р. 268. https://doi.org/10.1134/S1070328420040077
- 28. Zakharov M.A., Fetisov G.V., Veligzhanin A.A. et al. // Dalton Trans. 2015. V. 44. P. 18576.
- 29. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. A. 2008. V. 64. P. 112.
- 30. Farrugia L.J. // J. Appl. Cryst. 1999. V. 32. P. 837.
- 31. Diamond. Crystal and Molecular Structure Visualization. Bonn: Crystal Impact, 2014.