

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.6>**ТВЕРДЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ ХЛОРИДОВ НАТРИЯ И КАЛИЯ В ПОРИСТЫХ СЛОЯХ АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ И АМИНОАЦЕТАТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ПВХ НА ВОЛОКНАХ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ТКАНИ**

Научная статья

**Кобрин М.Р.<sup>1,\*</sup>, Баринов Р.А.<sup>2</sup>, Фридман А.Я.<sup>3</sup>, Цивадзе А.Ю.<sup>4</sup>, Явич А.А.<sup>5</sup>, Титова В.Н.<sup>6</sup>, Горбунов А.М.<sup>7</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7</sup> Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (kobrin92[at]ya.ru)

**Аннотация**

Синтезированы две линейки твердых электролитов, которые состоят из донорного растворителя – пористого слоя из глицинатных производных ПВХ, привитых к микрочастицам аэросила и к волокнам целлюлозной ткани, и растворенных в них аквакомплексов хлоридов натрия и калия. Исследованы сорбционные характеристики растворителей по содержанию хлоридов и воды. Методом ИК-спектроскопии исследовано влияние сорбируемых хлоридов на состав твердого электролита, зависимость тока от напряжения в цепи Pt (+) – раствор MCl – мостик из твердого электролита – раствор MCl - Pt (-) и внутреннее сопротивление исследуемых растворов (где М – Na или K). Показано, что лимитирующей стадией движения зарядов в цепи является их перенос через твердый электролит. Для каждого электролита с хлоридом калия напряжение начала движения ионов оказалось ниже, а скорость движения ионов выше, чем у электролита с хлоридом натрия.

**Ключевые слова:** аэросил, слой, целлюлозная ткань, твердые электролиты, сорбция, ионная проводимость, хлорид натрия, хлорид калия.

**SOLID ELECTROLYTES OF SODIUM AND POTASSIUM CHLORIDES IN POROUS LAYERS OF AMORPHOUS SILICON DIOXIDE AND AMINOACETATE DERIVATIVES OF PVC ON CELLULOSE FABRIC FIBRES**

Research article

**Kobrin M.R.<sup>1,\*</sup>, Barinov R.A.<sup>2</sup>, Fridman A.Y.<sup>3</sup>, Tsivadze A.Y.<sup>4</sup>, Yavich A.A.<sup>5</sup>, Titova V.N.<sup>6</sup>, Gorbunov A.M.<sup>7</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7</sup> The Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (kobrin92[at]ya.ru)

**Abstract**

Two lines of solid electrolytes were synthesized, which consist of a donor solvent, a porous layer of glycinat derivatives of PVC grafted to aerosil microparticles and to cellulose fabric fibers, and dissolved sodium and potassium chloride aquacomplexes. The sorption characteristics of the solvents in terms of chloride and water content were studied. Infrared spectroscopy was used to study the effect of sorbed chlorides on the solid electrolyte composition, the current-voltage dependence in the Pt (+) – MSI solution – solid electrolyte bridge – MSI solution - Pt (-) and the internal resistance of the studied solutions (where M is Na or K). It was demonstrated that the limiting stage of charge movement in the circuit is their transfer through the solid electrolyte. For each electrolyte with potassium chloride, the voltage of the beginning of ion movement was lower and the ion movement rate was higher than that of the electrolyte with sodium chloride.

**Keywords:** aerosil, layer, cellulose tissue, solid electrolytes, sorption, ionic conductivity, sodium chloride, potassium chloride.

**Введение**

Материалы с растворами серноокислых натрия и калия в композиционном в пористом донорном растворителе на подложке из целлюлозной ткани (далее твердый электролит) ведут себя как  $H^+$  проводящие мостики [1]. Электролиты построены таким образом, что в порах растворителя имеются многоядерные комплексы  $\{[M(H_2O)_iL]_2SO_4\}_n$ , где L - группировки донорных амино-,  $O=Si(O-)_2$  и  $O=Si(O-)-O-CH<$  и  $-COO^-$  групп и амфипротонных  $O=Si(O-)-OH$  групп, входящих в структуру стенок пор. Электропроводность электролитов в пределах  $6 \cdot 10^{-8} - 1,1 \cdot 10^{-7}$  См, что, согласно [2], [3], характерно для диэлектриков с ионной проводимостью. Движение  $H^+$  происходит в комплексах с участием водородных связей из  $H_2O$  и  $O=Si(O-)-OH$ .

Ион  $Cl^-$ , так же как  $SO_4^{2-}$  известен как мостиковый лиганд [4], то есть в твердых растворах MCl, весьма вероятно образование аналогичных комплексов. Вместе с тем  $Cl^-$  и  $SO_4^{2-}$  отличаются зарядом, числом неподеленных электронных пар и размером. В этой связи представляло интерес проследить влияние замены аниона на хлорид-ион на характеристики материалов.

Цель исследования:

- синтезировать твердые электролиты с комплексами на основе MCl в растворителе с разным содержанием аэросила и методом ИК –Фурье-спектроскопии исследовать их строение;

- измерить ионную проводимость электролитов и зависимость тока в цепи катод- раствор MCl – электролит (мостик) – раствор MCl – анод от напряжения на электродах и рассчитать величины напряжения начала движения и константы скорости движения  $H^+$  в электролите, как находящимся на воздухе электрохимическим мостиком;

- сопоставить состав электролитов MCl и  $M_2SO_4$  их электропроводность и показатели  $H^+$  проводимости и проследить влияние природы анионов на указанные характеристики.

**Экспериментальная часть и результаты**

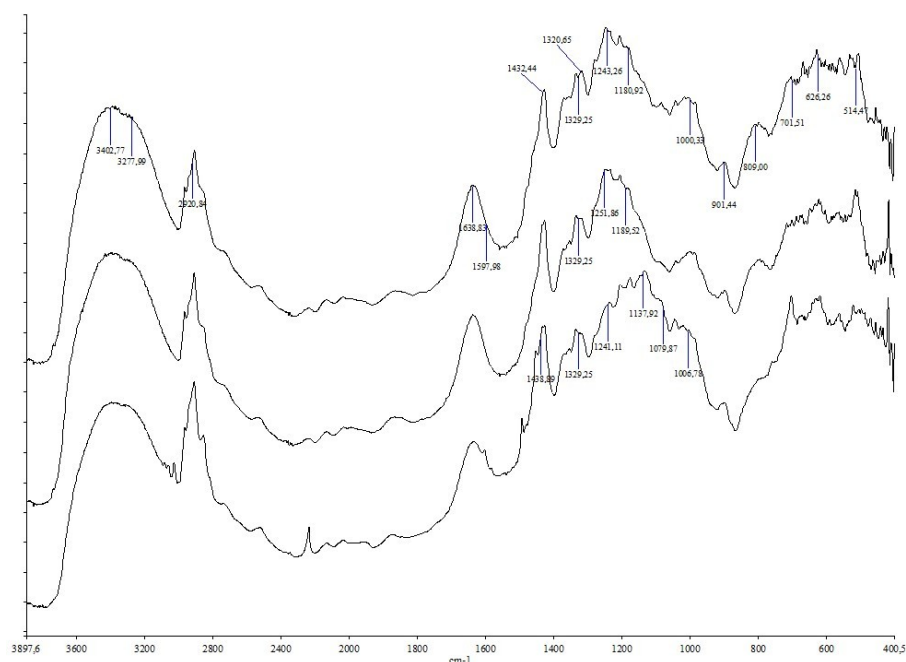
Величины содержания  $MCl$  и воды в хлоридсодержащих электролитах и содержания  $M_2SO_4$  и воды в сернокислых электролитах приведены в таблице 1. Сами электролиты были приготовлены по методике [1].

Таблица 1 - Состав электролитов с  $MCl$  и  $M_2SO_4$ DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.6.1>

Соль	Содержание, ммоль/г					
	I		II		III	
	Соль	H <sub>2</sub> O	Соль	H <sub>2</sub> O	Соль	H <sub>2</sub> O
NaCl	2,88	1,87	3,79	3,56	3,28	4,17
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,64	1,56	2,84	3,61	3,89	7,01
KCl	1,56	2,15	2,42	3,74	2,01	5,99
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3,11	2,04	5,22	3,90	6,84	5,85

Из таблицы 1 видно, что значения содержания солей и воды в электролитах зависят от состава растворителя и природы катиона и аниона. Содержание  $NaCl$  для каждого хлоридсодержащего растворителя больше, чем  $KCl$ , тогда как содержание  $Na_2SO_4$  в сернокислых твердых электролитах меньше чем  $K_2SO_4$ . Содержание ионов  $Na^+$  и  $K^+$  в хлоридсодержащих электролитах меньше, чем в соответствующих сернокислых электролитах. Среднее число  $n_{aq}$  молекул воды, приходящихся на один катион, в I( $NaCl$ ), II( $NaCl$ ) и III( $NaCl$ ) равно 0.65, 0.94 и 1.27, а в I( $KCl$ ), II( $KCl$ ) и III( $KCl$ ) – 1.38, 1.54 и 2.98. Во всех случаях этих количеств недостаточно, для формирования первой сольватной оболочки ионов. В I( $Na_2SO_4$ ), II( $Na_2SO_4$ ) и III( $Na_2SO_4$ )  $n_{aq}$  равно 0.47, 0.63 и 0.9 и в I( $K_2SO_4$ ), II( $K_2SO_4$ ) и III( $K_2SO_4$ ) – 0.33, 0.37 и 0.43, то есть для одного и того же растворителя и катиона  $n_{aq}$  в  $MCl$  больше, чем в  $M_2SO_4$ .

ИК спектры электролитов приведены на рис. 1-2. Для сравнения, спектры исходных растворителей приведены в [6].

Рисунок 1 - ИК спектры I( $NaCl$ ), II( $NaCl$ ), III( $NaCl$ ), I( $KCl$ ), II( $KCl$ ), III( $KCl$ )DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.6.3>

Примечание: часть 1

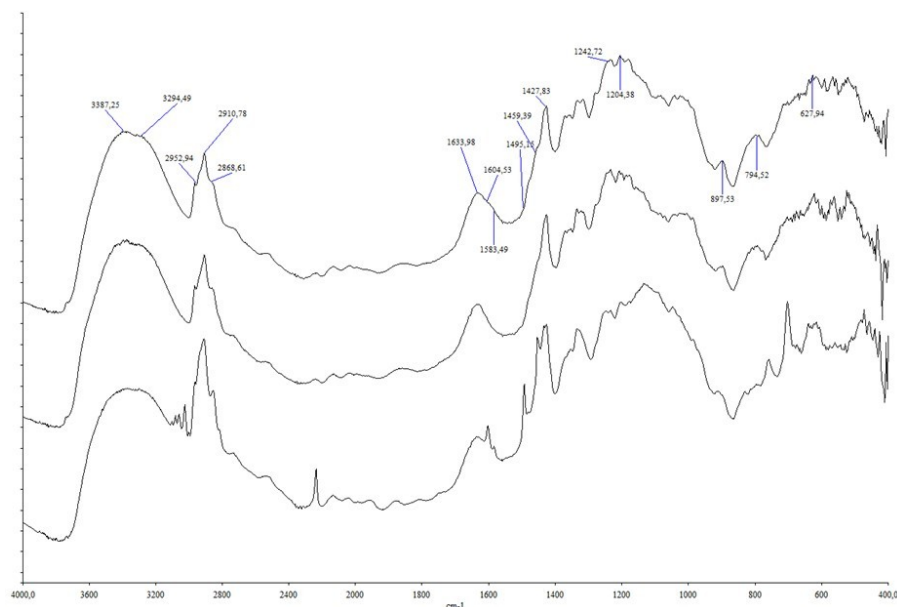


Рисунок 2 - ИК спектры I(NaCl), II(NaCl), III(NaCl), I(KCl), II(KCl), III(KCl)  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.6.4>

*Примечание: часть 2*

Из рисунков 1-2 видно, что спектры электролитов полосы в областях  $3400$  и  $3280\text{ см}^{-1}$  колебаний водородных связей в целлюлозе, в  $2960 - 2900\text{ см}^{-1}$  C-H колебаний в целлюлозе и полимере,  $1870$  и  $1248\text{ см}^{-1}$  – C=O и C-O колебаний в эфирных группах пластификатора в ПВХ, а также полосы  $807$ ,  $752$  и  $694\text{ см}^{-1}$  каркасных колебаний в аэросиле, такие же как в спектрах растворителей [7], [8], [9]. Это указывает на то, что образование сольваток комплексов не сказывается на строении подложки и кремнеоксидных структур в объеме частиц. В спектрах электролитов наблюдается некоторое смещение полос и изменение их формы в области  $1440 - 1400\text{ см}^{-1}$  колебаний карбоксильных групп, в области  $1240 - 1080\text{ см}^{-1}$  скелетных колебаний с участием C-N связей в сетках циклических аминов, Форма и интенсивность полос около  $895$  и  $800\text{ см}^{-1}$  – Si-O- Si колебаний спектрах I(NaCl) и I(KCl) в отличие от формы и интенсивности полос в I, полос около  $805$  и  $800\text{ см}^{-1}$  в II(NaCl) и II(KCl) – от II, и полос около  $895$  и  $807\text{ см}^{-1}$  III(NaCl) и III(NaCl) от III. Это можно объяснить дорно- акцепторными взаимодействиями катионов с донорными амино-, - Si-O-Si группами и донорным атомами кислорода из силанольных групп. В спектрах растворителей имеется полоса  $1010\text{ см}^{-1}$  в силанольных группах [10], которая в спектрах электролитов сдвигается в длинноволновую область до  $1004 - 998\text{ см}^{-1}$ . Полосы  $1636$ ,  $1606\text{ см}^{-1}$  области O-H деформационных колебаний в  $\text{H}_2\text{O}$  I,II и III [11] спектре I(NaCl) и I(KCl) смещаются до  $1630$  и  $1600\text{ см}^{-1}$  и  $1633$  и  $1598\text{ см}^{-1}$ , в спектрах III(NaCl) и III(NaCl) – до  $1638$  и  $1597\text{ см}^{-1}$ . в спектрах II(NaCl) и II(KCl) имеется одна полосе  $1631\text{ см}^{-1}$ . Это указывает на влияние MCl на структуры водородных связей.

Спектры электролитов MCl были сопоставлены со спектрами электролитов  $\text{M}_2\text{SO}_4$ , приведенными [6]. Установлено, что спектры электролитов MCl в областях  $1440 - 1400\text{ см}^{-1}$ ,  $1240 - 1080\text{ см}^{-1}$ , около  $895$ ,  $805 - 796\text{ см}^{-1}$  коррелируют со спектрами соответствующих электролитов с сольваток комплексами  $\{[\text{M}(\text{H}_2\text{O})_j\text{L}]_2\text{SO}_4\}_n$ . Судя по составу I(MCl), I I(MCl) и III(MCl) и их ИК – спектрам, очевидно, что в них находятся многоядерные комплексы  $[\text{M}(\text{H}_2\text{O})_j\text{LCl}]_n$ . Сферы  $\text{M}^+$  в этом комплексе такие же как в  $\{[\text{M}(\text{H}_2\text{O})_j\text{L}]_2\text{SO}_4\}_n$ ,  $\text{Cl}^-$  дислоцированные в объеме пор, вступают как мостики.

В табл. 2 приведены значения электропроводности электролитов MCl и для сравнения электролитов  $\text{M}_2\text{SO}_4$  [6].

Таблица 2 - Электропроводность электролитов

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.6.5>

Соль	$\sigma, 10^{-7}$		
	I	II	III
NaCl	4,87	4,35	3,57
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	2,0	1,02	0,92
KCl	5,88	5,55	4,76
$\text{K}_2\text{SO}_4$	1,11	0,83	0,66

Растворитель состоит из двух твердых фаз. Одна – аэросил, а другая - полимер из сочлененных циклических аминов с  $-\text{CH}_2\text{COO}^-$  заместителями, макромолекулы которого окружают микрочастицы аэросила, а отдельные их

участки привиты к развитой поверхности аэросила через O=Si(-O-)-O- CH< группы. Электропроводность зависит от подвижности ионов. В первой подвижность катионов и анионов ниже, чем во второй. Как видно из таблицы 2, для одного и того же растворителя  $\sigma$  электролитов MCl больше, чем  $M_2SO_4$ . В электролитах MCl ионы  $Na^+$  более подвижны, а в электролитах  $M_2SO_4$  менее подвижны, чем  $K^+$ .

Зависимости  $J$  от  $E$  приведены на рис 3.

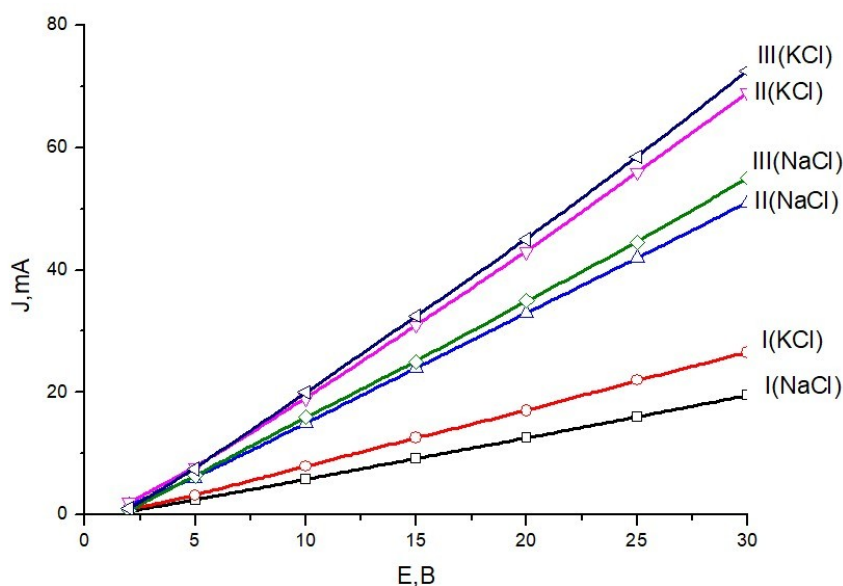


Рисунок 3 - Зависимости тока от напряжения в цепи катод- раствор MCl- электролит- раствор MCl – анод  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.6.6>

Из рисунка 3 видно, что зависимость линейная. Электропроводность 3 моль/л растворов MCl на порядки выше, чем электропроводность твердых электролитов. Это указывает на то, что ток в цепи определяется скоростью переноса зарядов через мостик. В растворах MCl, так же как в случае  $M_2SO_4$ , на аноде образуются  $H^+$ , а на катоде  $OH^-$ . Подвижность  $OH^-$  меньше, чем  $H^+$ . Следовательно, зависимости  $J$  от  $E$  соответствуют зависимости скорости переноса  $H^+$  через электролит от напряжения на электродах. Она описывается уравнением  $J/F = k_{ck} (E - E_{нач})$  [5]. Значения  $E_{нач}$  и  $k_{ck}$  приведены в таблице 3. Для сравнения в той же таблице приведены значения  $E_{нач}$  и  $k_{ck}$  для электролитов I( $Na_2SO_4$ ), II( $Na_2SO_4$ ), III( $Na_2SO_4$ ), I( $K_2SO_4$ ), II( $K_2SO_4$ ) и III( $K_2SO_4$ ).

Таблица 3 - Напряжение начала движения  $H^+$  и константа скорости переноса в электролитах

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.6.7>

Электролит	$U_0$ , В	$k_{ck} 10^5$ , г-экв/секВ
I(NaCl)	1,53	0,70
I( $Na_2SO_4$ )	0,12	0,19
I(KCl)	1,59	0,97
I( $K_2SO_4$ )	0,1	0,39
II(NaCl)	1,66	1,86
II( $Na_2SO_4$ )	0,21	0,29
II(KCl)	1,93	2,47
II( $K_2SO_4$ )	0,2	0,81
III(NaCl)	1,59	1,97
III( $Na_2SO_4$ )	0,28	0,38
III(KCl)	2,0	2,59
III( $K_2SO_4$ )	0,22	1,24

Движения  $H^+$  в электролитах NaCl начинается при меньшем  $E_{нач}$ , чем для KCl, как видно из таблицы 3. В случае  $Na_2SO_4$  – при большем  $E_{нач}$ , чем  $K_2SO_4$ . Во всех электролитах с солями калия величины  $k_{ck}$  больше, чем с солями натрия. Движение  $H^+$  в электролитах с  $M_2SO_4$  начинается при меньших значениях  $E_{нач}$ , чем с MCl, тогда как  $k_{ck}$  для электролитов MCl выше чем с  $M_2SO_4$ . Во всех случаях  $k_{ck}$  возрастает с увеличением массовой доли аэросила.

**Заключение**

Исследования показали, что состав электролитов, величины ионной проводимости, а также значения напряжения, при котором начинается движение  $H^+$  в цепи и  $k_{ck}$  движения  $H^+$  в электролите, как в электрохимическом мостике, для солей натрия и калия зависят от природы аниона. В  $SO_4^{2-}$  имеются 10 неподеленных электронных пар, а в  $Cl^-$  – четыре пары. Как мостиковый лиганд  $SO_4^{2-}$  может координировать до 6 катионов, а  $Cl^-$  – до четырех. Протяженность фрагмента  $2M-O_2SO_2-2M$  примерно равна  $2r_{\text{катион}} + r_{\text{анион}}$ . Расчеты с использованием значений  $r$  согласно [11] показали, что эти величины в серноокислых твердых электролитах для  $Na^+$  составляет 0.49 нм, а для  $K^+$  – 0.56 нм, а  $M-Cl-M$  – для  $Na^+$  – 0.37 нм, а для  $K^+$  – 0.45 нм. Следовательно, в электролитах  $M_2SO_4$  в одних и тех же порах упаковка комплексов больше, чем в электролитах  $MCl$ . Этим можно объяснить, что содержание  $M^+$  в электролитах с  $MCl$  меньше, чем  $M_2SO_4$ , а  $n_{aq}$  в электролитах в  $MCl$  больше, чем в  $M_2SO_4$ , а также влияние указанных факторов на подвижность анионов.

Растворитель построен таким образом, что из раствора с анодом  $H^+$  попадая в поры полимера притягиваются к анионам. Значение  $pK$  для  $HSO_4^-$  около 3, а для  $HCl$  – менее 0.5, то есть сродство к  $H^+$  у  $SO_4^{2-}$  существенно больше, чем у  $Cl^-$ . При этом  $SO_4^{2-}$  менее гидратирован чем  $Cl^-$ . Соответственно, перенос  $H^+$  из раствора в электролит  $M_2SO_4$  происходит при меньшем  $E_{нач}$ , чем с  $MCl$ . Перенос  $H^+$  через электролит, как было показано в [1] происходит по эстафетному механизму. Как отмечалось выше  $k_{ck}$  для электролитов  $MCl$  выше чем для  $M_2SO_4$ . В движении  $H^+$  участвуют атомы водорода из  $H_2O$  и  $O=Si(O)-OH$  групп. В электролитах  $M_2SO_4$  величины  $n_{aq}$  меньше, чем в электролитах  $MCl$ , то есть в эстафете в электролитах  $M_2SO_4$  участвует меньшее число атомов водорода, чем в электролитах  $MCl$ . Этим можно объяснить, что  $k_{ck}$  движения  $H^+$  в электролитах  $MCl$ , больше, чем  $M_2SO_4$ .

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Рецензия**

Таланова И.О., Ивановская государственная медицинская академия, Иваново, Российская Федерация  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.6.7>

**Review**

Talanova I.O., Ivanovo State Medical Academy, Ivanovo, Russian Federation  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.128.6.7>

**Список литературы / References**

1. Кобрин М.Р. Твердые электролиты сольватоккомплексов сульфатов калия и натрия в пористых слоях аморфного диоксида кремния и аминокетатных производных ПВХ на волокнах целлюлозной ткани / М.Р. Кобрин, А.Я. Фридман, А.Ю. Цивадзе и др. // Международный научно-исследовательский журнал. — 2022. — 10(124).
2. Поплавко Ю.М. Физика активных диэлектриков / Ю.М. Поплавко, Л.П. Переверзева, И.П. Раевский; под ред. В.П. Сахненко. — Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009. — 480 с.
3. Mohd Z. Structural, electrical conductivity and dielectric behavior of  $Na_2SO_4$ —LDT composite solid electrolyte / Z. Mohd, I. Rafiuddin // Journal of Advanced Research. — 2016. — Vol. 6. — p. 135-141
4. Скопенко В.В. Координационная химия / В.В. Скопенко, А.Ю. Цивадзе, Л.И. Савранский и др. — М.: Академкнига, 2007. — 487 с.
5. Кобрин М.Р. Материал в виде слоя аэросила с привитыми макромолекулярными циклическими аминокетатами на целлюлозной ткани / М.Р. Кобрин, А.Ю. Цивадзе, А.Я. Фридман и др. // Наукосфера. — 2022. — 4-2. — с. 332-336.
6. Кобрин М.Р. Матричные электролиты на основе пористых слоев аморфного диоксида кремния с привитыми аминокетатными производными ПВХ на целлюлозной ткани и аквакомплексов сульфата натрия / М.Р. Кобрин, А.Я. Фридман, А.Ю. Цивадзе и др. // Международный научно-исследовательский журнал. — 2022. — 8(122). — DOI: [10.23670/IRJ.2022.122.70](https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.70).
7. Накамото К. ИК спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / К. Накамото. — Москва: Мир, 1991.
8. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры минералов / И.И. Плюснина. — М.: МГУ, 1977.
9. Hospodarova V. Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials / V. Hospodarova, E. Singovszka, N. Stevulova // American Journal of Analytical Chemistry. — 2018. — 6. — p. 303-310.
10. Ocana M. The variability of the infrared powder spectrum of amorphous  $SiO_2$  / M. Ocana V. Fornes C.J. Serna // Journal of Non-Crystalline Solids. — 1989. — 107. — p. 187-192.
11. Эткинс П. Физическая химия / П. Эткинс, Дж. де Паула. — М.: Мир, 2007. — 494 с.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Kobrin M.R. Tverdye jelektrolity sol'vatokompleksov sul'fatov kalija i natrija v poristyh slojah amorfnoho dioksida kremnija i aminoacetatnyh proizvodnyh PVH na voloknah celljuloznoj tkani [Solid electrolytes of solvate complexes of potassium and sodium sulfates in porous layers of amorphous silicon dioxide and PVC aminoacetate derivatives on cellulose fabric fibers] / M.R. Kobrin, A.Y. Fridman, A.J. Tsivadze et al. // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2022. — 10(124). [in Russian]
2. Poplavko Ju.M. Fizika aktivnyh dijelektrikov [Physics of active dielectrics] / Ju.M. Poplavko, L.P. Pereverzeva, I.P. Raevskij; ed. by V.P. Sahnenko. — Rostov on Don: JuFU, 2009. — p. 480. [in Russian]
3. Mohd Z. Structural, electrical conductivity and dielectric behavior of  $Na_2SO_4$ —LDT composite solid electrolyte / Z. Mohd, I. Rafiuddin // Journal of Advanced Research. — 2016. — Vol. 6. — p. 135-141

4. Skopenko V.V. Koordinacionnaja himija [Coordination Chemistry] / V.V. Skopenko, A.J. Civadze, L.I. Savranskij et al. — M.: Akademkniga, 2007. — p. 487 [in Russian]
5. Kobrin M.R. Material v vide sloja ajerosila s privitymi makromolekuljarnymi ciklicheskim aminoacetatami na celljuloznoj tkani [Material in the form of an aerosil layer with grafted macromolecular cyclic aminoacetates on cellulose fabric] / M.R. Kobrin, A.J. Tsvadze, A.Y. Fridman et al. // Naukosfera. — 2022. — 4-2. — p. 332-336.[in Russian]
6. Kobrin M.R. Matrichnye jelektrolity na osnove poristyh sloev amorfnogo dioksida kremnija s privitymi aminoacetatnymi proizvodnymi PVH na celljuloznoj tkani i akvakompleksov sul'fata natrija [Matrix electrolytes based on porous layers of amorphous silicon dioxide with grafted aminoacetate PVC derivatives on cellulose fabric and sodium sulfate aquacomplexes] / M.R. Kobrin, A.Y. Fridman, A.J. Tsvadze et al. // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2022. — 8(122). — DOI: 10.23670/IRJ.2022.122.70. [in Russian]
7. Nakamoto K. IK spektry i spektry KR neorganicheskih i koordinacionnyh soedinenij [IR and RAMAN spectra of inorganic and coordination compounds] / K. Nakamoto. — Moscow: Mir, 1991. [in Russian]
8. Pljusnina I.I. Infrakrasnye spektry mineralov [Infrared spectra of minerals] / I.I. Pljusnina. — M.: MSU, 1977. [in Russian]
9. Hospodarova V. Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials / V. Hospodarova, E. Singovszka, N. Stevulova // American Journal of Analytical Chemistry. — 2018. — 6. — p. 303-310.
10. Ocana M. The variability of the infrared powder spectrum of amorphous SiO<sub>2</sub> / M. Ocana V. Fornes C.J. Serna // Journal of Non-Crystalline Solids. — 1989. — 107. — p. 187-192.
11. Jetkins P. Fizicheskaja himija [Physical chemistry] / P. Jetkins, Dzh. de Paula. — M.: Mir, 2007. — 494 p. [in Russian]