

ISSN (Print) 2616-6836
ISSN (Online) 2663-1296

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

ХАБАРШЫСЫ

BULLETIN

of L.N. Gumilyov Eurasian
National University

ВЕСТНИК

Евразийского национального
университета имени Л.Н. Гумилева

ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ сериясы

PHYSICS. ASTRONOMY Series

Серия **ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ**

№3(132)/2020

1995 жылдан бастап шығады

Founded in 1995

Издается с 1995 года

Жылына 4 рет шығады

Published 4 times a year

Выходит 4 раза в год

Нұр-Сұлтан, 2020

Nur-Sultan, 2020

Нур-Султан, 2020

Бас редакторы:
ф.-м.ғ.д., профессор, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ
А.Т. Ақылбеков (Қазақстан)

Бас редактордың орынбасары

Гиниятова Ш.Г. ф.-м.ғ.к., доцент
Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ (Қазақстан)

Редакция алқасы

Арынгазин А.Қ.	ф.-м.ғ. докторы, Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ(Қазақстан)
Алдонгаров А.А.	PhD, Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Балапанов М.Х.	ф.-м.ғ.д., проф., Башқұрт мемлекеттік университеті (Ресей)
Бахтизин Р.З.	ф.-м.ғ.д., проф., Башқұрт мемлекеттік университеті (Ресей)
Даулетбекова А.Қ.	ф.-м.ғ.к., Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Ержанов Қ.Қ.	ф.-м.ғ.к., PhD, Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Жүмаділов Қ.Ш.	PhD, Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Здоровец М.	ф.-м.ғ.к., Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ(Қазақстан)
Қадыржанов Қ.Қ.	ф.-м.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Кайнарбай А.Ж.	ф.-м.ғ.к., Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Козловский А.Л.	PhD, Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Кутербеков Қ.А.	ф.-м.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Лущик А.Ч.	ф.-м.ғ.д., проф., Тарту университеті (Эстония)
Попов А.И.	ф.-м.ғ.д., проф., Латвия университеті (Латвия)
Морзабаев А.К.	ф.-м.ғ.к., Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Мырзақұлов Р.Қ.	ф.-м.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ(Қазақстан)
Нұрахметов Т.Н.	ф.-м.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Сауытбеков С.С.	ф.-м.ғ.д., проф., Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ (Қазақстан)
Салиходжа Ж.М.	ф.-м.ғ.к., Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Скуратов В.А.	ф.-м.ғ.д., проф., Біріккен ядролық зерттеулер институты (Ресей)
Тлеуқенов С.К.	ф.-м.ғ.д., проф., Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Усеинов А.Б.	PhD, Л.Н. Гумилев ат. ЕҰУ (Қазақстан)
Хоши М.	PhD, проф., Коши университеті (Жапония)
Шункеев Қ.Ш.	ф.-м.ғ.д., проф., Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе мемлекеттік университеті (Қазақстан)

Редакцияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ., Сәтбаев к-сі, 2, 402 б., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті.
Тел.: +7(7172) 709-500 (ішкі 31-428)
E-mail: vest_phys@enu.kz

Журнал менеджері: Г. Мендыбаева

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы.
ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ сериясы

Меншіктенуші: "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті" Коммерциялық емес акционерлік қоғам

Мерзімділігі: жылына 4 рет. Басуға 28.09.2020 ж. қол қойылды. Жазылу индексі: 76093

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігінде 27.03.2018ж.

№16999-ж тіркеу куәлігімен тіркелген.

Ашық қолданудағы электрондық нұсқа: <http://bulphysast.enu.kz/>

Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ., Қажымұқан к-сі, 12/1, 102 б., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті. Тел.: +7(7172)709-500 (ішкі 31-428)

© Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Editor-in-Chief

Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor, ENU
A.T. Akilbekov (Kazakhstan)

Deputy Editor-in-Chief

Giniyatova Sh.G., Candidate of Phys.-Math. Sciences,
Assoc. Prof., ENU (Kazakhstan)

Editorial Board

Aryngazin A.K.	Doctor of Phys.-Math. Sci., ENU (Kazakhstan)
Aldongarov A.A.	PhD, ENU (Kazakhstan)
Balapanov M.Kh.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., BashSU (Russia)
Bakhtizin R.Z.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., BashSU (Russia)
Dauletbekova A.K.	Candidate of Phys.-Math. Sci., PhD, ENU (Kazakhstan)
Hoshi M.	PhD, Prof., Kyushu University (Japan)
Kadyrghanov K.K.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., ENU (Kazakhstan)
Kainarbay A.Zh.	Candidate of Phys.-Math. Sci., ENU (Kazakhstan)
Kozlovskiy A.L.	PhD, ENU (Kazakhstan)
Kuterbekov K.A.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., ENU (Kazakhstan)
Lushchik A.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., University of Tartu (Estonia)
Morzabayev A.K.	Candidate of Phys.-Math. Sci., ENU (Kazakhstan)
Myrzakulov R.K.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., ENU (Kazakhstan)
Nurakhmetov T.N.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., ENU (Kazakhstan)
Popov A.I.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., University of Latvia (Latvia)
Sautbekov S.S.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., KazNU (Kazakhstan)
Salikhodzha Z. M	Candidate of Phys.-Math. Sci., ENU (Kazakhstan)
Skuratov V.A.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., Joint Institute for Nuclear Research (Russia)
Tleukenov S.K.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., ENU (Kazakhstan)
Useinov A.B.	PhD, ENU (Kazakhstan)
Yerzhanov K.K.	Candidate of Phys.-Math. Sci., PhD, ENU (Kazakhstan)
Zdorovets M.	Candidate of Phys.-Math. Sci., ENU (Kazakhstan)
Zhumadilov K.Sh.	PhD, ENU (Kazakhstan)
Shunkeyev K.Sh.	Doctor of Phys.-Math. Sci., Prof., Zhubanov University (Kazakhstan)

Editorial address: L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2, Satpayev str., of. 402,
Nur-Sultan, Kazakhstan 010008
Tel.: +7(7172) 709-500 (ext. 31-428)
E-mail: vest_phys@enu.kz

Managing Editor: G. Mendybayeva

Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University.
PHYSICS. ASTRONOMY Series

Owner: Non-profit joint-stock company "L.N. Gumilyov Eurasian National University"

Periodicity: 4 times a year. Signed in print 28.09.2020. Subscription index: 76093

Registered by the Ministry of Information and Communication of the Republic of Kazakhstan.

Registration certificate №16999-ж from 27.03.2018.

Available at: <http://bulphysast.enu.kz/>

Address of printing house: L.N. Gumilyov Eurasian National University, 12/1 Kazhimukan str.,
Nur-Sultan, Kazakhstan 010008;

tel.: +7(7172) 709-500 (ext. 31-428)

Главный редактор:
доктор ф.-м.н., профессор
А.Т. Акилбеков, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)

Зам. главного редактора

Ш.Г. Гиниятова к.ф.-м.н., доцент
ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)

Редакционная коллегия

Арынгазин А.К.	д.ф.-м.н., ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Алдонгаров А.А.	PhD, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Балапанов М.Х.	д.ф.-м.н., проф., БашГУ (Россия)
Бахтизин Р.З.	д.ф.-м.н., проф., БашГУ (Россия)
Даулетбекова А.К.	д.ф.-м.н., PhD, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Ержанов К.К.	к.ф.-м.н., PhD, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Жумадилов К.Ш.	PhD, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Здоровец М.	к.ф.-м.н., ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Кадыржанов К.К.	д.ф.-м.н., проф., ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Кайнарбай А.Ж.	к.ф.-м.н., ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Козловский А.Л.	PhD, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Кутербек К.А.	д.ф.-м.н., проф., ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Лущик А.Ч.	д.ф.-м.н., проф., Тартуский университет (Эстония)
Морзабаев А.К.	д.ф.-м.н., ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Мырзакулов Р.К.	д.ф.-м.н., проф., ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Нурахметов Т.Н.	д.ф.-м.н., проф., ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Попов А.И.	д.ф.-м.н., проф., Латвийский университет (Латвия)
Сауытбеков С.С.	д.ф.-м.н., проф., КазНУ им. аль-Фараби (Казахстан)
Салиходжа Ж.М.	к.ф.-м.н., ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Скуратов В.А.	д.ф.-м.н., проф., Объединенный институт ядерных исследований (Россия)
Тлеукиенов С.К.	д.ф.-м.н., проф., ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Усеинов А.Б.	PhD, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева (Казахстан)
Хоши М.	PhD, проф., Коши университет (Япония)
Шункеев К.Ш.	д.ф.-м.н., проф., АРГУ имени К. Жубанова (Казахстан)

Адрес редакции: 010008, Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2, каб. 402, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева.

Тел.: (7172) 709-500 (вн. 31-428)

E-mail: vest_phys@enu.kz

Менеджер журнала: Г. Мендыбаева

Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева.

Серия ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ

Собственник Некоммерческое акционерное общество "Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева"

Периодичность: 4 раза в год. Подписано в печать 28.09.2020 г. Подписной индекс: 76093

Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан.

Регистрационное свидетельство №16999-ж от 27.03.2018г.

Электронная версия в открытом доступе: <http://bulphysast.enu.kz/>

Адрес типографии: 010008, Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Кажимукана, 12/1, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева. тел.: +7(7172)709-500 (вн. 31-428)

Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ сериясы

№3(132)/2020

МАЗМҰНЫ

<i>Жасыбаева М.Б., Есмаханова К.Р.</i> Дарбу түрлендіруі және Фокас-Ленэллс теңдеуінің нақты бір солитонды шешімі	8
<i>Горлачев И., Глуценко Н., Иванов И., Киреев А., Курахмедов А., Платов А., Самбаев У., Здоровец М.</i> Нысаналы атомдарды ауыр иондармен қоздыруға арналған РІХЕ әдісінің шектері	14
<i>Ергалиев Д.С., Әбдірашев Ө.К., Жумабаева А.С.</i> Робототехникалық құрылғылар кешенін ақпараттық-метрологиялық қамтамасыз ету	25
<i>Қаптағай Г., Сандибаева Н., Байжадамова Л., Утебаева А.</i> Сутегін өндірудегі кобальт шпинелінің энергетикалық сипаттамаларын жақсартудағы азоттың рөлі	30
<i>Әбуова А.Ү., Инербаев Т.М., Әбуова Ф.Ү., Сазанбай А., Нураканов А.</i> Төмен өлшемді допирленген термоэлектрикте зарядтау динамикасы	36
<i>Ногай А.А., Стефанович С.Ю., Салиходжа Ж.М., Ногай А.С.</i> Қатты ерітінділеріндегі иондық өткізгіштік және фазалық ауысулар $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$	44
<i>Ногай А.С., Ускенбаев Д.Е.</i> Платинасыз катализаторлары бар NaFon мембраналарында поляризациялық және өткізгіш қасиеттері	51
<i>Бимуханов А.Н., Алдонгаров А.А.</i> $\text{Si}(\text{bzimpy})_2$ бейтарап гексакоординация кешенінің дұрыс геометриялық параметрлерін болжау үшін функционалдық үйлесімділік пен тығыздықтың функционалды теориясының негіз жиынтықтарын сынау	59
<i>Базарбек А.Б., Сағатов Н.Е., Инербаев Т.М., Ажилбеков А.Т.</i> Жоғары қысымда никель фосфидтерінің тұрақтылығын алғашқы принципті есептеу	67
<i>Карипбаев Ж.Т., Мусаханов Д.А., Лисицын В.М., Алпысова Г.К., Куженова А., Усеинов А.Б., Абдрахметова А.А., Байжуманов М.Ж.</i> Радиация өрісінде синтезделген YAG:Ce негізіндегі люминофорлардың импульстік фотолюминесценциясы	74

BULLETIN OF L.N. GUMILYOV EURASIAN NATIONAL UNIVERSITY. PHYSICS.
ASTRONOMY SERIES

№3(132)/2020

CONTENTS

<i>Zhassybayeva M.B., Yesmakhanova K.R.</i> Darboux transformation and exact one-soliton solution of the Fokas-Lenells equation	8
<i>Gorlachev I., Gluchshenko N., Ivanov I., Kireev A., Kurakhmedov A., Platov A., Sambayev Ye., Zdorovets M.V.</i> The limits of the PIXE method for excitation of target atoms by heavy ions	14
<i>Yergaliyev D.S., Abdirashev O.K., Zhumabaeva A.S.</i> Information and metrological support for the complex of robotic devices	25
<i>Kaptagay G., Sandibaeva N., Baikadamova L., Utebaeva A.</i> Role of nitrogen for enhancement energetically characteristics in producing hydrogen	30
<i>Abuova A.U., Inerbaev T.M., Abuova F.U., Sazanbay A., Nurakanov A.</i> Charging dynamics in a low-dimensional doped thermoelectric	36
<i>Nogai A.A., Stefanovich S.Yu., Salikhodja J.M., Nogai A.S.</i> Ionic conductivity and phase transitions in solid solutions $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$	44
<i>Nogai A.S., Uskenbayev D.E.</i> Polarizing and conductive properties in Nafion membranes with platinum-free catalysts	51
<i>Bimukhanov A.N., Aldongarov A.A.</i> Testing of combinations of Density Functional Theory functionals and basis sets for predicting correct geometrical parameters of neutral hexacoordinated $\text{Si}(\text{bzimpy})_2$ complex	59
<i>Bazarbek A.B., Sagatov N.E., Inerbaev T.M., Akilbekov A.T.</i> First principle calculations of the stability of nickel phosphides at high pressures	67
<i>Karipbaev Zh., Musahanov D., Lisitsyn V., Alpyssova G., Kukenova A., Usseinov A., Abdrahmetova A., Baizhumanov M.</i> Pulsed photoluminescence of YAG: Ce phosphors synthesized in the radiation field	74

ВЕСТНИК ЕВРАЗИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ Л.Н.ГУМИЛЕВА. Серия ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ

№3(132)/2020

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Жасыбаева М.Б., Есмаханова К.Р.</i> Преобразование Дарбу и точное односолитонное решение уравнения Фокаса-Ленэллса	8
<i>Горлачев И., Глуценко Н., Иванов И., Киреев А., Курахмедов А., Платов А., Самбаев Е., Здоровец М.</i> Пределы определения РИХЕ метода при возбуждении атомов мишени тяжелыми ионами	14
<i>Ергалиев Д.С., Абдирашев О.К., Жумабаева А.С.</i> Информационно-метрологическое обеспечение комплекса робототехнических устройств	25
<i>Каптагай Г., Сандибаева Н., Байкадамова Л., Утебаева А.</i> Роль азота в совершенствовании энергетических характеристик шпинели кобальта для производства водорода	30
<i>Абуова А.У., Инербаев Т.М., Абуова Ф.У., Сазанбай А., Нураканов А.</i> Зарядовая динамика в низкоразмерном допированном термоэлектрике	36
<i>Ногай А.А., Стефанович С.Ю., Салиходжа Ж.М., Ногай А.С.</i> Ионная проводимость и фазовые переходы в твердых растворах $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$	44
<i>Ногай А.С., Ускенбаев Д.Е.</i> Поляризационные и проводящие свойства в мембранах типа NaFоп с безплатиновыми катализаторами	51
<i>Бимуханов А.Н., Алдонгаров А.А.</i> Тестирование комбинаций функционалов и базисных наборов теории функционала плотности для предсказания правильных геометрических параметров нейтрального гексакоординационного комплекса $\text{Si}(\text{bzimpy})_2$	59
<i>Базарбек А.Б., Сагатов Н.Е., Инербаев Т.М., Акилбеков А.Т.</i> Первопринципные расчеты стабильности фосфидов никеля при высоких давлениях	67
<i>Карипбаев Ж.Т., Мусаханов Д.А., Лисицын В.М., Алтысова Г.К., Куженова А., Усеинов А.Б., Абдрахметова А.А., Байжуманов М.Ж.</i> Импульсная фотолуминесценция синтезированных в поле радиации люминофоров на основе YAG:Ce	74

МРНТИ: 29.19.31

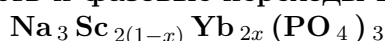
А.А. Ногай¹, С.Ю. Стефанович², Ж.М. Салиходжа¹, А.С. Ногай³

¹ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан
(E-mail: nogay06@mail.ru¹)

Ионная проводимость и фазовые переходы в твердых растворах



Аннотация: в данной статье установлены концентрационные интервалы существования однофазных твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ ($x = 0 - 0,03$), изучены закономерности, касающиеся проводящих свойств и фазовых переходов синтезированных образцов. Уточнены особенности ионной проводимости в α - и β -, γ -фазах исследуемых твердых растворов. Установлено поведение температур фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ и $T_{\beta \rightarrow \gamma}$, совершаемых в результате замещения атомов скандия на катионы иттербия в твердых растворах $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$.

Ключевые слова: поликристалл, ионная проводимость, фазовые переходы, твердые растворы, диэлектрическая фаза, суперионная-фаза.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2020-132-3-44-50>

Поступила: 24.08.2020/ Допущена к опубликованию: 21.09.2020

1. Введение. Актуальность исследования кристаллов из семейства NASICON связана с тем, что они уже применяются как конструкционные материалы [1]. Также ряд ученых работают над возможностью повышения энергетических параметров аккумуляторов с использованием $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ в качестве электродного материала [2-4]. Особенностью $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ является то, что он относится к семейству NASICON, обладает дипольным упорядочением сегнетоэлектрического типа и низкой ионной проводимостью в α -фазе, когда кристаллическая структура обладает моноклинным искажением с пр. гр. Вв, высокой ионной проводимостью в β -фазе и суперионной проводимостью в γ -фазе, [5]. Для выяснения роли редкоземельного элемента скандия в формировании проводящих свойств целесообразно изучить составы твердых растворов замещения, т.е. провести изовалентные замещения атомов скандия редкоземельными катионами иттербия.

В связи с этим вызывает интерес изучение характера изменения ионной проводимости и температур фазовых переходов в твердых растворах $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ при изовалентном замещении атомов скандия катионами иттербия с большим ионным радиусом, чем у атома скандия.

Целью настоящей работы является установление характера изменения дипольного упорядочения и проводящих свойств твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ и закономерности изменения температур фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ и $T_{\beta \rightarrow \gamma}$ в этих образцах при изовалентных замещениях атомов скандия катионами иттербия в анионном ромбоэдрическом кристаллическом каркасе $\{[\text{Sc}_{2(1-x)}\text{M}_{2x}(\text{PO}_4)_3]^{-3}\}_{3\infty}$.

2. Методика эксперимента.

Получение поликристаллов $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ и твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$, где (при $x=0,01$, $x=0,02$ и $x=0,03$) было осуществлено твердофазным синтезом по керамической технологии (из шихты: $3\text{Na}_2\text{CO}_3 + (2(x-1))\text{Sc}_2\text{O}_3 + (2x)\text{Yb}_2\text{O}_3 + 6\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, взятых в стехиометрических соотношениях путем двухстадийного обжига. Первый отжиг проводили при 970 К, а второй при 1070 К с дополнительными гомогенизирующими перетираниями.

Фазовая принадлежность и структурные параметры синтезированных образцов твердых растворов были исследованы рентгенографическими методами порошка на дифрактометре ДРОН - 3 ($\text{CuK}\alpha$ - излучение).

Нелинейно-оптические свойства фосфатов натрия-скандия и твердых растворов на его основе определялись методом генерации второй оптической гармоники от неодимового лазерного излучения.

Определение проводящих свойств кристаллитов поликристаллических образцов $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ и $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ проводили методом импедансной спектроскопии с помощью импедансметров ВМ - 507 и ВМ - 538 в интервале температур 295 - 573 К и в диапазоне частот $5 - 5 \cdot 10^5$ и $5 \cdot 10^5 - 10^8$ Гц. Для создания электродов на образцы наносили палладий, который рассматривался как идеально блокирующий электрод.

3. Результаты и обсуждения.

3.1 Результаты синтеза и рентгеновского исследования поликристаллов $\alpha - \text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ и твердых растворов $\alpha - \text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$.

Поликристаллические образцы твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ представляли собой таблетки диаметром 10 мм и толщиной 1,5 мм. Рентгенографическими измерениями была установлена однофазность приготовленных образцов в интервале концентрации $x = 0 - 0,03$. В работе [5] нами было установлено, что элементарная ячейка поликристалла $\alpha - \text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ при комнатной температуре имеет моноклинную структуру пр. гр. Vb с параметрами: $a = 16,090 \text{ \AA}$, $b = 9,076 \text{ \AA}$, $c = 8,956 \text{ \AA}$, $\gamma = 126,950$. Также рентгенографически было установлено, что параметры структуры и объем элементарной ячейки образцов твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ в пределах концентрации $x = 0 - 0,03$ практически не отличался от $\alpha - \text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ в виду малой концентрации допантов. Причем рентгеновские рефлексы для составов в интервале $0 < x < 0,03$ расщеплены, что указывает на наличие моноклинных искажений.

3.2 Результаты исследования теста на нецентросимметричность поликристаллов $\alpha - \text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ и твердых растворов $\alpha - \text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$.

Полярность поликристалла $\alpha - \text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ была установлена по исчезновению сигнала второй оптической гармоники, на температурной зависимости отношений интенсивностей $I_{2\omega}/I_{2\omega} \text{ SiO}_2(T)$ были определены температуры фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ из полярной α - в паразелектрическую β -фазу для $\alpha - \text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$, (см. рис. 1 а). Тест на нецентросимметричность, проведенный методом генерации второй оптической гармоники, показал полярность структур всех исследуемых твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Cr}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ в ограниченной области концентрации $x = 0 - 0,03$ (см. рис. 1 б), что характерно для сегнетоэлектриков. По исчезновению сигнала второй оптической гармоники на температурной зависимости $I_{2\omega}/I_{2\omega} \text{ SiO}_2(T)$ были определены температуры фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ из полярной α - в паразелектрическую β -фазу для $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Cr}_{2x}(\text{PO}_4)_3$.

Для наглядности на рис. 1 приведены температурные зависимости $I_{2\omega}/I_{2\omega} \text{ SiO}_2(T)$ для $\alpha - \text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ и твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Cr}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ с концентрациями $x=0,01$ и $x=0,03$.

Из рисунка 1 видно, что даже незначительное замещение атомов скандия катионами иттербия весьма значительно снижает температуры фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ представленных составов. По-видимому, такое поведение температур фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ связано с заметным различием ионных радиусов атомов скандия с замещаемыми атомами иттербия.

3.3 Результаты исследования теста на нецентросимметричность и ионной проводимости поликристалла $\alpha - \text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ и твердых растворов $\alpha - \text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$.

На рисунка 2 приведены зависимости ионной проводимости от обратной температуры для $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ и твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$, где $x=0,01$, $x=0,02$ и $x=0,03$.

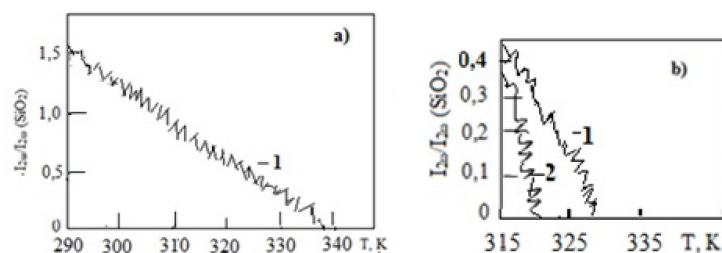


Рисунок 1 – Температурные зависимости относительной интенсивности сигнала второй оптической гармоники (относительно SiO_2) для а) поликристалла $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ и б) некоторых составов твердых растворов α – $\text{Na}_3\text{Sc}_2(1-x)\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$, где кривая 1 соответствует концентрации $x=0,01$, а 2 – концентрации $x=0,03$

На зависимости $\sigma(T)$ для поликристалла $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ (кривая 1 на рис.2) можно выделить три прямолинейных участка с различными значениями проводимости и энергии активации.

Пунктирными линиями на рисунке 2 (а) отмечены температуры фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ и $T_{\beta \rightarrow \gamma}$ для $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$. Особенно заметен скачок проводимости при переходе из α – в β – фазу, так как проводимость увеличивается примерно на порядок, а энергия активации существенно снижается в β – фазе (с $0,54 \rightarrow 0,36$ эВ). Эти изменения вполне согласуются со структурными данными, представленными в работах [5 - 7]. То есть при фазовом переходе $\alpha \rightarrow \beta$ происходит преобразование кристаллического каркаса из моноклинной в ромбоэдрическую структуру $Bb \rightarrow 3Rc$ с небольшими сверхструктурными рефлексиями), что приводит к частичному разупорядочению натриевых диполей, которые заполняли полости каркаса в α – фазе. Поэтому наблюдаемый скачок проводимости при $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ вполне закономерен.

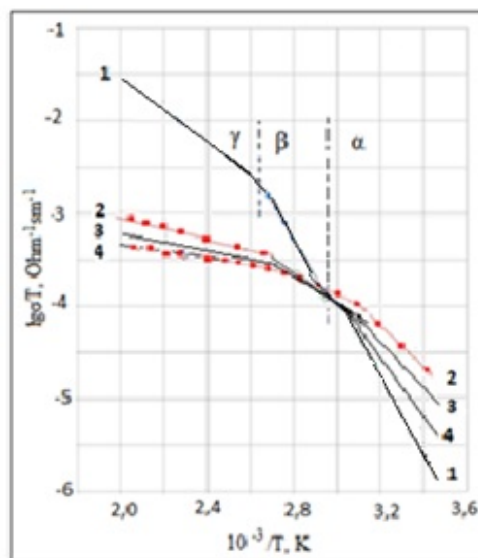


Рисунок 2 – Температурные зависимости проводимости для $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ (кривая -1) и твердых растворов: а) $\text{Na}_3\text{Sc}_2(1-x)\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$, где (кривые – 2 при $x = 0,01$; 3 при $x=0,02$; 4 при $x=0,03$)

Очередной скачок проводимости и снижение энергии активации происходит при фазовом переходе $T_{\beta \rightarrow \gamma}$, когда структура полностью переходит в ромбоэдрическую структуру $3Rc$.

Сопоставляя температурные зависимости ионной проводимости $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ (кривая 1) (см. рис.2 а) и твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_2(1-x)\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ (где $x = 0,01$ - кривая 2, $x = 0,02$ - кривая 3, $x = 0,03$ - кривая 4) можно отметить, что наблюдаются некоторая аналогия. Тем не менее наблюдается не значительное и последовательное увеличение проводимости в твердых растворах α – фазы, а для β – и γ – фаз $\text{Na}_3\text{Sc}_2(1-x)\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ постепенное снижение проводимости с повышением концентрации катионов иттербия.

При этом энергии активации исследуемых твердых растворов последовательно снижаются во всех трех фазах с повышением концентрации допантов (x). Данные температур фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$, установленные методом генерации второй оптической гармоники достаточно точно совпадали с температурами фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$, установленных с помощью температурной зависимости проводимости (см. рис.1). Более подробно данные по параметрам проводимости и температурам фазовых переходов исследуемых образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение проводящих свойств и температур фазовых переходов $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ и твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{M}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ где $\text{M}=\text{Cr}, \text{Yb}$

Составы/Параметры	$\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$	$\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$		
Ионный радиус М-катиона r_i , Å	$r_{\text{Sc}} = 0,83$	$r_{\text{Yb}} = 0,858$		
Концентрации допантов x	0	0,01	0,02	0,03
Проводимость σ_α , $(\text{Om}\cdot\text{cm})^{-1}$ при $T=293$ К	$8,16\cdot 10^{-6}$	$5,2\cdot 10^{-4}$	$6,45\cdot 10^{-5}$	$5,59\cdot 10^{-5}$
Энергия активации ΔE_α , eV при $T=293$ К	0,54	0,29	0,24	0,22
Проводимость σ_β , $(\text{Om}\cdot\text{cm})^{-1}$ при $T=343$ К	$1,7\cdot 10^{-4}$	$4,0\cdot 10^{-4}$	$1,66\cdot 10^{-4}$	$1,58\cdot 10^{-4}$
Энергия активации ΔE_β , eV при $T=343$ К	0,36	0,30	0,18	0,16
Проводимость σ_γ , $(\text{Om}\cdot\text{cm})^{-1}$ при $T=573$ К	$5,0\cdot 10^{-2}$	$9,6\cdot 10^{-4}$	$3,35\cdot 10^{-4}$	$3,2\cdot 10^{-4}$
Энергия активации ΔE_β , eV при $T=573$ К	0,20	0,15	0,14	0,12
Температуры фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$, К	339	332	325	318
Температуры фазовых переходов $T_{\beta \rightarrow \gamma}$, К	439	436	435	434

3.4 Об особенностях фазовых диаграмм твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{M}_{2x}(\text{PO}_4)_3$, где $\text{M}=\text{Cr}, \text{Fe}$.

На основе экспериментально установленных температур фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ и $T_{\beta \rightarrow \gamma}$ исследуемых твердых растворов были построены их концентрационные зависимости точек фазовых переходов (см. рис. 3). Незначительный разброс точек фазовых переходов на рисунке 3 может характеризовать наличие узких двухфазных областей.

Из рис.3 видно, что замещения атомов скандия в $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ катионами хрома приводит в твердых растворах $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Cr}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ к слабому уменьшению области диэлектрической α -фазы и ионной β -фазы и незначительному увеличению суперионной γ -фазы.

Полученные экспериментальные данные можно объяснить с кристаллохимической точки зрения. Так, замещение в кристалле $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ катионов скандия иттербием с ионным радиусом большим, чем у атома скандия, приводит к локальным процессам «растяжения» кристаллического каркаса $\{\{\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3\}^{-3}\}_{3\infty}$, относительно $\{\{\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3\}^{-3}\}_{3\infty}$. Поэтому повышение проводимости твердых растворов в полярной α -фазе можно связать с частичным снятием моноклинных искажений в α - $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ из-за деформации «растяжения» кристаллического каркаса $\{\{\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3\}^{-3}\}_{3\infty}$.

Снижение проводимости твердых растворов в суперионных β - и γ -фазах можно связать с уменьшением среднестатистического «канала проводимости» в кристаллическом каркасе $\{\{\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3\}^{-3}\}_{3\infty}$ из-за деформаций «растяжения» структуры при допировании

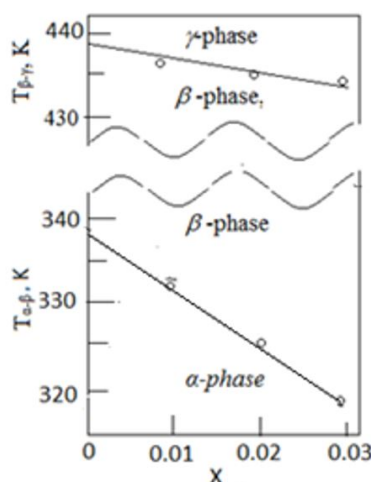


Рисунок 3 – Концентрационные зависимости температур фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ и $T_{\beta \rightarrow \gamma}$ образцов твердых растворов: 1 – $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ при $x=0,03$ (сплошная кривая), пунктирная линия характеризует наличие двухфазной области

катионами иттербия и нарушением регулярности кристаллического каркаса, вызванных замещаемыми катионами иттербия.

Значительное снижение температуры фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ с повышением концентрации допантов можно связать с появлением значительных локальных деформаций «растяжения» кристаллического каркаса, понижающих степень упорядоченности кристалла, что эквивалентно понижению энтропии системы. Более слабое снижение температуры фазовых переходов $T_{\beta \rightarrow \gamma}$ твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ можно объяснить переходом системы в равновесную, более высокосимметричную ромбоэдрическую γ -фазу.

Заключение.

На основе представленных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

1 Характер температурной зависимости ионной проводимости твердых растворов $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ сохраняется и для $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$, однако проводимость α -фазы образцов незначительно повышается, а ионно-проводящих β - и γ -фаз снижается. При этом энергия активации твердых растворов понижается как в диэлектрической α -фазе, так и в ионно-проводящих β - и γ -фазах по сравнению с $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$.

2. Повышение проводимости твердых растворов в диэлектрической α -фазе связано с частичным снятием моноклинного искажения в α - $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$, а снижение проводимости твердых растворов в ионно-проводящих β - и γ -фазах вызвано уменьшением среднестатистического канала проводимости из-за деформации «растяжения» кристаллического каркаса $\{[\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_2(\text{PO}_4)_3]^{-3}\}_{\infty}$, а также нарушением регулярности кристаллического каркаса.

3. Факт наличия снижения температур фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ и $T_{\beta \rightarrow \gamma}$ связан с появлением локальных деформаций «растяжения» анионного кристаллического каркаса, понижающих степень упорядоченности кристалла и энтропию системы.

4. Замещение атомов скандия М-катионами в твердых растворах $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ (в интервале концентрации $x=0-0,03$) приводит к значительному сужению области полярной диэлектрической α -фазы, т.к. при указанных замещениях температуры фазовых переходов $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ линейно понижаются.

Список литературы

- 1 Ellis L.B., Linda F. Sodium and Sodium-ion Energy Storage Batteries Current Opinion // Solid State Mater. Sci. – 2012. - V. 16. - P.168 –177.
- 2 Liu Y., Zhou Y., Zhang J., Xia Y., Chen T., and Zhang Sh. Monoclinic Phase $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$: Synthesis, Structure, and Electrochemical Performance as Cathode Material in Sodium-Ion Batteries // ACS Sustainable Chem. Eng – 2017. - V. 5. - P. 1306 -1314.
- 3 Kuganathan N. and Chronos A. Defect Chemistry and Na-Ion Diffusion in $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ Cathode Material // Materials – 2019. - V. 12. - P. 1348 -1357.
- 4 Bih H., Bih L., Manoun B., Azdouz M., Benmokhtar S., Lazor P.J. Raman Spectroscopic Study of the Phase Transitions Sequence in $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ and $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ at High Temperature // Journal of Molecular Structure – 2009. - V. 936. - P. 147.
- 5 Nogai A.S., Nogai A.A., Stefanovich S.Yu., Solikhodzha Zh.M., Uskenbaev D.E. Dipole Ordering and Ionic Conductivity in NASICON-Like Structures of the $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ Type // Solid State Physics – 2019. - V. 61. - № 11. - P. 1985-1992.
- 6 Nogai A.S., Stefanovich S.Yu., Bush A.A., Uskenbaev D.E., Nogai A.A. Dipole Ordering and Ionic Conductivity in NASICON-Like Structures of the $\text{Na}_3\text{Cr}_2(\text{PO}_4)_3$ Type // Solid State Physics - 2018. – V.60. - № 1. - P. 23-30

А.А. Ногай¹, С.Ю. Стефанович², Ж.М. Салиходжа¹, А.С. Ногай³

¹ Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

² М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті, Мәскеу, Ресей

³ С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

Қатты ерітінділеріндегі иондық өткізгіштік және фазалық ауысулар $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$

Аннотация. Осы мақалада $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ ($x = 0 - 0,03$) бір фазалы қатты ерітінділердің болуының шоғырлану аралықтары анықталған, синтезделген үлгілердің өткізгіш қасиеттері мен фазалық ауысуларына қатысты заңдылықтар зерттелген. Зерттеліп жатқан қатты ерітінділердің α -, β -, γ -фазаларындағы ион өткізгіштігінің ерекшеліктері нақтыланды. $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ қатты ерітінділерінде скандий атомдарына итербия катиондарын алмастыру нәтижесінде пайда болатын $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ және $T_{\beta \rightarrow \gamma}$ фазалық ауысуларының температурасы өзгерді.

Түйін сөздер: поликристалл, иондық өткізгіштік, фазалық ауысулар, қатты ерітінділер, диэлектрлік фаза, суперинион фазасы.

А.А. Nogai¹, S.Yu. Stefanovich², J.M. Salikhodja¹, A.S. Nogai³

¹ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Nur-Sultan, Kazakhstan

Ionic conductivity and phase transitions in solid solutions $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$

Abstract. In this article, the concentration intervals of the existence of single-phase solid solutions $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$ ($x = 0 - 0,03$) are established, the regularities concerning the conductive properties and phase transitions of the synthesized samples are studied. The features of ionic conductivity in the α -, β -, γ -phases of the solid solutions under study have been clarified. The behavior of the temperatures of the phase transitions $T_{\alpha \rightarrow \beta}$ and $T_{\beta \rightarrow \gamma}$, which occur as a result of the substitution of ytterbium cations for scandium atoms in solid solutions $\text{Na}_3\text{Sc}_{2(1-x)}\text{Yb}_{2x}(\text{PO}_4)_3$, has been established.

Keywords: polycrystal, ionic conductivity, phase transitions, solid solutions, dielectric phase, superionic-phase.

References

- 1 Ellis L.B., Linda F. Sodium and Sodium-ion Energy Storage Batteries Current Opinion, Solid State Mater. Sci., 16, 168 –177 (2012).
- 2 Liu Y., Zhou Y., Zhang J., Xia Y., Chen T. and Zhang Sh. Monoclinic Phase $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$: Synthesis, Structure, and Electrochemical Performance as Cathode Material in Sodium-Ion Batteries, ACS Sustainable Chem. Eng, 5, 1306 -1314 (2017).
- 3 Kuganathan N. and Chronos A. Defect Chemistry and Na-Ion Diffusion in $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ Cathode Material, Materials, 12, 1348 -1357 (2019). [in English]
- 4 Bih H., Bih L., Manoun B., Azdouz M., Benmokhtar S., Lazor P.J. Raman Spectroscopic Study of the Phase Transitions Sequence in $\text{Li}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ and $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ at High Temperature, Journal of Molecular Structure, 936, 147 (2009).
- 5 Nogai A.S., Nogai A.A., Stefanovich S.Yu., Solikhodzha Zh.M., Uskenbaev D.E. Dipole Ordering and Ionic Conductivity in NASICON-Like Structures of the $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ Type, Solid State Physics, 11(61), 1985-1992 (2019).

6 Nogai A.S., Stefanovich S.Yu., Bush A.A., Uskenbaev D.E., Nogai A.A. Dipole Ordering and Ionic Conductivity in NASICON-Like Structures of the $\text{Na}_3\text{Cr}_2(\text{PO}_4)_3$ Type, Solid State Physics, 1(60), 23-30 (2018).

Сведения об авторах:

Ногай А.А. - **основной автор**, докторант 3-го года обучения физико-технического факультета, кафедры технической физики, Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Стефанович С.Ю. - д.ф.-м.н., профессор кафедры химической технологии и новых материалов, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

Салиходжа Ж.М. - к.ф.-м.н., доцент кафедры технической физики, Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Ногай А.С. - д.ф.-м.н., профессор кафедры радиотехники, электроники и телекоммуникации, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, Нур-Султан, Казахстан.

Nogai A.A. - **main author**, 3-rd year PhD student of the Department of Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Stefanovich S.Y. - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Chemical Technology and New Materials, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

Solikhova Zh.M. - PhD, Associate Professor of the Department of Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Nogai A.S. - Doctor of Physics and Mathematics Science, Professor of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Nur-Sultan, Kazakhstan.