

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

№2(151)/ 2025

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

Астана, 2025
Astana, 2025

Бас редакторы:
Жумадилов К.Ш.,
PhD, проф., Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Бас редактордың орынбасары: Абуова Ф.У., PhD, доц., Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Редакция алқасы:

Ержанов Қ.Қ.	PhD, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Кайнарбай А.Ж.	ф.-м.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Козловский А.Л.	PhD, Ядролық физика институты, Астана, Қазақстан
Морзабаев А.К.	ф.-м.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Салиходжа Ж.М.	ф.-м.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Усеинов А.Б.	PhD, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Джансейтов Д.М.	PhD, Ядролық физика институты, Астана, Қазақстан
Шункеев К.Ш.	ф.-м.ғ.д., Қ.Жұбанов ат. АӨУ, Ақтөбе, Қазақстан
Исадыков А.Н.	PhD, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей
Шарафуллин И.Ф.	ф.-м.ғ.д., Башқұрт мемлекеттік университеті, Уфа, Ресей
Сакута С.Б.	ф.-м.ғ.д., Ұлттық зерттеу институты Курчатов институты, Мәскеу, Ресей
Лущик А.Ч.	ф.-м.ғ.д., Тарту университеті, Тарту, Эстония
Попов А.И.	ф.-м.ғ.д., Латвия университеті, Рига, Латвия
Хоши М.	PhD, Хиросима Университеті, Хиросима, Жапония
Тойода Ш.	PhD, Окаяма Ғылым Университеті, Окаяма, Жапония
Ертурк С.	PhD, Нийде Университеті, Нийде, Түркия
Килин Д.	PhD, Солтүстік Дакота мемлекеттік университеті, Фарго, АҚШ
Юлун Хан	PhD, Солтүстік Дакота мемлекеттік университеті, Фарго, АҚШ

Редакцияның мекенжайы: **010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2**
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 402 б.
Тел.: +7 (7172) 709-500, (ішкі 31-410).
E-mail: vest_phys@enu.kz

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ сериясы
Меншіктенуші: КеАҚ "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті"
Мерзімділігі: жылына 4 рет
Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігімен тіркелген
02.02.2021ж. № KZ66VPY00031918 қайта есепке қою туралы куәлігі
Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі 13/1
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті
Тел: +7 (7172)709-500 (ішкі 31-410). Сайт: <http://bulphysast.enu.kz>

Editor-in-Chief:

K. Zhumadilov,

PhD, Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Deputy Editor-in-Chief: F. Abuova, PhD, Ass. Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editorial board:

K. Yerzhanov	PhD, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan
A. Qainarbai	Candidate of Phys.-Math. Sciences, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan
A. Kozlovskiy	PhD, Institute of Nuclear Physics», Astana, Kazakhstan
A. Morzabaev	Candidate of Phys.-Math. Sciences, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan
Zh. Salikhodzha	Candidate of Phys.-Math. Sciences, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan
A. Useinov	PhD, L.N. Gumilyov ENU, Astana, Kazakhstan
D. Dzhanseytov	PhD, Institute of Nuclear Physics, Astana, Kazakhstan
K. Shunkeyev	Doctor of Phys.-Math. Sciences, K. Zhubanov University, Aktobe, Kazakhstan
A. Isadykov	PhD, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
I. Sharafullin	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Bashkir State University, Ufa, Russia
S. Sakuta	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Kurchatov Institute, Moscow, Russia
A. Lushchik	Doctor of Phys.-Math. Sciences, University of Tartu, Tartu, Estonia
A. Popov	Doctor of Phys.-Math. Sciences., University of Latvia, Riga, Latvia
M. Hoshi	PhD, Hiroshima University, Hiroshima, Japan
Sh. Toyoda	PhD, Okayama University of Science, Okayama, Japan
S. Yerturk	PhD, Niğde Ömer Halisdemir University, Niğde, Türkiye
Dmitri Kilin	PhD, North Dakota State University, Fargo, USA
Yulun Han	PhD, North Dakota State University, Fargo, USA

Editorial address: **2, Satpayev str., of. 402**

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, 010008

Tel.: **+7 (7172) 709-500, (ext. 31-410),**

E-mail: **vest_phys@enu.kz**

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

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

Rediscount certificate № KZ66VPY00031918 from 02.02.2021

Address of Printing Office: 13/1 Kazhimukan str., Astana, Kazakhstan 010008

L.N. Gumilyov Eurasian National University

Tel: +7 (7172) 709-500, (ext.31-410). Website: <http://bulphysast.enu.kz>

Главный редактор:
Жумадилов К.Ш.,
PhD, проф., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Зам. главного редактора: Абуова Ф.У., PhD, доцент, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Редакционная коллегия:

Ержанов К.К.	PhD, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Кайнарбай А.Ж.	к.ф.-м.н., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Козловский А.Л.	PhD, РГП «Институт ядерной физики», Астана, Казахстан
Морзабаев А.К.	к.ф.-м.н., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Салиходжа Ж.М.	к.ф.-м.н., ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Усеинов А.Б.	PhD, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Джансейтов Д.М.	PhD, РГП «Институт ядерной физики», Астана, Казахстан
Шункеев К.Ш.	д.ф.-м.н., Актюбинский региональный государственный университет имени К. Жубанова, Актобе, Казахстан
Исадыков А.Н.	PhD, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
Шарафуллин И.Ф.	д.ф.-м.н., Башкирский государственный университет, Уфа, Россия
Сакута С.Б.	д.ф.-м.н., Национальный исследовательский институт Курчатовский институт, Москва, Россия
Луцник А.Ч.	д.ф.-м.н., Тартуский университет, Тарту, Эстония
Попов А.И.	д.ф.-м.н., Латвийский университет, Рига, Латвия
Хоши М.	PhD, Университет Хиросимы, Хиросима, Япония
Тойода Ш.	PhD, Университет Науки Окаямы, Окаяма, Япония
Ертурк С.	PhD, Университет Нийде, Нийде, Турция
Килин Д.	PhD, Государственный университет Северной Дакоты, Фарго, США
Юлун Хан	PhD, Государственный университет Северной Дакоты, Фарго, США

Адрес редакции: **010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2**
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, каб. 402
Тел.: **+7(7172) 709-500, (вн. 31-410),**
E-mail: **vest_phys@enu.kz**

Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева

Серия ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ

Собственник: НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева» Периодичность: 4 раза в год
Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан Свидетельство о постановке на переучет № KZ66VPY00031918 от 02.02.2021 г.

Адрес типографии: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Кажымукана, 13/1,

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

Тел.: +7(7172)709-500 (вн.31-410). Сайт: <http://bulphysast.enu.kz>

Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ
ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ СЕРИЯСЫ

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

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

№2 (151)/2025

МАЗМҰНЫ/ CONTENTS/ СОДЕРЖАНИЕ

Астрономия сериясы – серия Астрономия – Astronomy series

Э. Элизальде

Стивен Вайнбергтің әлемді түсіндіруі және қазіргі космологияның шынайы тарихын талдау

E. Elizalde

Steven Weinberg's Explanation of the World and a Discussion of the True Story of Modern Cosmology.....

Э. Элизальде

Объяснение мира Стивена Вайнберга и анализ истинной истории современной космологии.....

8

К.К. Ержанов, А.М. Сергазина, Т.Р. Мырзақұл, Г.Б. Бауржан

Жалпыланған гравитациялық модельдердегі гравитациялық қызыл ауысу.....

K.K. Yerzhanov, A.M. Sergazina, T.R. Murzakul, G.B. Baurzhan

Gravitational Redshift in Generalized Gravity Models.....

К.К. Ержанов, А.М. Сергазина, Т.Р. Мырзақұл, Г.Б. Бауржан

Гравитационное красное смещение в обобщенных гравитационных моделях.....

23

Физика сериясы – серия Физика – Physics series

А.К. Сейтханова, А.Т. Нурбердиев, Б. Тасуов

Зонд теориясы негізінде төменгі температуралы және импульсті плазма ағынындағы иондар мен электрондардың концентрациясын анықтау.....

A.K. Seitkhanova, A.T. Nurberdiyev, B. Tassuov

Determination of the concentration of ions and electrons in a low-temperature and pulsed plasma flow based on the probe theory.....

А.К. Сейтханова, А.Т. Нурбердиев, Б. Тасуов

Определение концентрации ионов и электронов в низкотемпературном и импульсном потоке плазмы на основе теории зондов.....

32

М.Бахтин, Е. Кашкинбаев, М. Аумаликова, Д. Ибраева, А. Тәжединова, Н. Алтаева, С. Жаумитбай

Солтүстік Қазақстан және Шу-Сарысу уран провинциялары маңындағы елді мекендердегі радиациялық жағдайды салыстырмалы бағалау.....

M. Bakhtin, Ye. Kashkinbayev, M. Aumalikova, D. Ibrayeva, A. Tazhedinova, N. Altayeva, S. Zhaumitbay

Comparative assessment of the Radiation Situation in Settlements Near the North Kazakhstan and Shu-Sarysu Uranium Provinces.....

М. Бахтин, Е. Кашкинбаев, М. Аумаликова, Д. Ибраева, А. Тажединова, Н. Алтаева, С. Жаумитбай Сравнительная оценка радиационной обстановки в населённых пунктах, расположенных вблизи урановых провинций Северного Казахстана и Шу-Сарысу.....	45
А. Дәлелханқызы, Н. Қойлық, Г. Баймбетова, Г. Қаптағай, С. Тоқтарбай, А. Бейсебаева, А. Көпенбаева Уранның деформацияланған изотоптарының ядролық модельдеуіндегі әсерлесуші бозондар үлгісі.....	
A. Dalelkhankyzy, N. Koilyk, G. Baymbetova, G. Kaptagai, S. Toktarbay, A. Beisebayeva, A. Kopenbayeva Interacting boson modeling in the nuclear structure of deformed uranium isotopes.....	
А. Дәлелханқызы, Н. Койлық, Г. Баймбетова, Г. Қаптағай, С. Тоқтарбай, А. Бейсебаева, А. Көпенбаева Моделирование взаимодействующих бозонов в ядерной структуре деформированных изотопов урана.....	60
А.М. Досанбек, А.А. Баратова, А.М. Кабышев, К.Ж. Бекмырза, М.М. Кубенова «Delta ⁴ Phantom+» құрылғысын сутекті энергетикада және отын элементтерінде қолдану.....	
A.M. Dossanbek, A.A. Baratova, A.M. Kabyshev, K.Zh. Bekmyrza, M.M. Kubenova Quality Assurance Methods for Hydrogen Energy, Fuel Cells Using «Delta ⁴ Phantom+» Diode Matrix.....	
А.М. Досанбек, А.А. Баратова, А.М. Кабышев, К.Ж. Бекмырза, М.М. Кубенова Применение «Delta ⁴ Phantom+» в водородной энергетике и топливных элементах	77
Т.И. Зубарь, Н.Е. Андрейчик, Д.И. Тишкевич, А.В. Труханов Комплекстүзуші қоспаның аморфтандыру агенті бар CoNi электролиттік тұнба пленкаларының химиялық құрамы, микроструктурасы және магниттік қасиеттеріне әсері.....	
T.I. Zubar, N.E. Andreichyk, D.I. Tishkevich, A.V. Trukhanov Effect of a Complexing Additive on the Chemical Composition, Microstructure, and Magnetic Properties of Electrodeposited CoNi Films with an Amorphizing Agent.....	
Т.И. Зубарь, Н.Е. Андрейчик, Д.И. Тишкевич, А.В. Труханов Влияние комплексообразующей добавки на химический состав, микроструктуру и магнитные свойства электролитически осажденных пленок CoNi с аморфизирующим агентом.....	97
А.О. Мухаметжанова, К.Ш. Жумадилов, А.А. Баграмова, Ж.А. Байгазинов, Ж.О. Насилов, М.Т. Касымжанов, А.И. Иванников, В.Ф. Степаненко, М. Хоши PM-2.5 аэрозольдеріндегі бериллий-7 (⁷ Be) атмосфералық белсенділігі: қолданылуы, тенденциялары және экологиялық перспективалары.....	
A.O. Mukhametzhanova, K.Sh. Zhumadilov, A.A. Bagratova, Zh.A. Baigazinov, Zh.O. Nasilov, M.T. Kasymzhanov, A.I. Ivannikov, V.F. Stepanenko, M. Hoshi Atmospheric Activity of Beryllium-7 (⁷ Be) in PM2.5 Aerosols: Applications, Trends, and Environmental Perspectives.....	
А.О. Мухаметжанова, К.Ш. Жумадилов, А.А. Баграмова, Ж.А. Байгазинов, Ж.О. Насилов, М.Т. Касымжанов, А.И. Иванников, В.Ф. Степаненко, М. Хоши Атмосферная активность бериллия-7 (⁷ Be) в аэрозолях PM2.5: применение, тенденции и экологические перспективы.....	115
С.А. Пазылбек, А. Карейва, Б.Е. Жакупбаев, Д.К. Ескермесов, Б.З. Әбдіқадыр, М.Т. Катбаева, У.А. Муратбекова, Ж.К. Алипбекова, Ж.Т. Төлеуханова Мырыш кешенді қосылыстарының сипаттамасы, синтездеу әдістері және құрылымдық-фазалық қасиеттерін зерттеу	

S.A. Pazylbek, A. Kareiva, B.Ye. Zhakipbayev, D.K. Yeskermessov, B.Z. Abdikadyr, M.T. Katbayeva, U.A. Muratbekova, Zh.K. Alipbekova, Zh.T. Toleukhanova Investigation of the characteristics, synthesis methods, and structural-phase properties of zinc complex compounds..... С.А. Пазылбек, А. Карейва, Б.Е. Жакупбаев, Д.К. Ескермесов, Б.З. Абдикадыр, М.Т. Катбаева, У.А. Муратбекова, Ж.К. Алипбекова, Ж.Т. Толеуханова Исследование характеристик, методов синтеза и структурно-фазовых свойств цинковых комплексных соединений.....	136
Б.С. Сайлаубеков, А.И. Свирихин, М.С. Тезекбаева, Х.М. Девараджа, А.Қ. Әжібеков, А.В. Исаев, Р.С. Мухин, Ю.А. Попов Көп нуклондық берілу реакцияларын зерттеу үшін SHELS кинематикалық сепараторын және GABRIELA детекторлық жүйесін пайдалану B.S. Sailaubekov, A.I. Svirikhin, M.S. Tezekbayeva, H.M. Devaraja, A.K. Azhibekov, A.V. Isaev, R.S. Mukhin, Yu.A. Popov Use of SHELS kinematic separator and GABRIELA detection system for studying multinucleon transfer reactions..... Б.С. Сайлаубеков, А.И. Свирихин, М.С. Тезекбаева, Х.М. Девараджа, А.К. Ажибеков, А.В. Исаев, Р.С. Мухин, Ю.А. Попов Использование кинематического сепаратора SHELS и детектирующей системы GABRIELA для изучения реакций многонуклонных передач.....	158
Н.С. Солтанбек, Ф.У. Абуова, Т.М. Инербаев, А.У. Абуова, Ж.Е. Закиева, Т.Н. Жанғазы, Б.Н. Нұрмаханбетова, Н.А. Мерәлі Жартылай Гейслер матрицасындағы толық Гейслер қорытпасының нанобөлшектерін модельдеу: құрылымдық және электрондық қасиеттерін зерттеу..... N.S. Soltanbek, F.U. Abuova, T.M. Inerbayev, A.U. Abuova, Zh.Y. Zakiyeva, T.N. Zhangazy, B.N. Nurmakhambetova, N.A. Merali Modeling of full-Heusler alloy nanoparticles embedded in a half-Heusler matrix: Investigation of structural and electronic properties..... Н.С. Солтанбек, Ф.У. Абуова, Т.М. Инербаев, А.У. Абуова, Ж.Е. Закиева, Т.Н. Жанғазы, Б.Н. Нурмаханбетова, Н.А. Мерали Моделирование наночастиц полного соединения Гейслера в матрице сплава полу-Гейслера: исследование структурных и электронных свойств.....	177
И.А. Чупраков, Ю.М. Гледенов, Э. Сансарбаяр, А.К. Бекбаев, Б. Мұхаметұлы, Е.С. Коршиков, Н.Т. Темербулатова Иондау камерасы арқылы жылдам нейтрондарда $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ реакциясының альфа-спектрлерін өлшеу әдістемесі..... I.A. Chuprakov, Yu.M. Gledenov, E. Sansarbayer, A.K. Bekbayev, B. Mukhametuly, E.S. Korshikov, N.T. Temerbulatova Method of measuring alpha spectra of the reaction $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ on fast neutrons using an ionization chamber..... И.А. Чупраков, Ю.М. Гледенов, Э. Сансарбаяр, А.К. Бекбаев, Б. Мухаметұлы, Е.С. Коршиков, Н.Т. Темербулатова Методика измерения альфа-спектров реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ на быстрых нейтронах при помощи ионизационной камеры.....	192



IRSTI 06.81.23

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-8-22>

Review

Steven Weinberg's Explanation of the World and a Discussion of the True Story of Modern Cosmology

E. Elizalde* 

Institute of Space Sciences (ICE-CSIC & IEEC), Spain

(E-mail: elizalde@ice.csic.es)

Abstract. Should practicing physicists write books about the history of physics? Some historians strongly oppose this idea, believing that physicists generally cannot address historical issues objectively. However, it will be argued here that the specialists' view and analysis of the past is absolutely essential to complement that of historians in their own terms. To wit, even such a high-ranking figure as the late Steven Weinberg could not escape criticism from historians. Weinberg received strong criticism after the publication of his book *"Explaining the World: The Discovery of Modern Science"*, which he devoted to the history of physics from the ancient Greeks to the present day. He was accused of judging the past exclusively from the point of view of the present, that is, from what we now know with great certainty. The present article aims to show, with the help of this example and another one, how it is possible to find a healthy balance between these two confronting attitudes. In particular, it will be sustained that most of the scientists about whom history books are written, were considerably more intelligent than many of us, the present-day scientists, in spite that they often said all kinds of nonsense – if we judge them from a current perspective, with all the knowledge we now have accumulated. The main thesis of the paper will be that great care should be taken to try to balance as much as possible these two diametrically opposed approaches, and to show how this can be achieved in practice. All this will be explained in detail, with the help of several important, specific situations. The main results obtained and an analysis of the practical implications of the outcome of the research carried out here will be given in the closing section.

Keywords: history of science; Steven Weinberg; explain the world; whiggism; modern cosmology; cosmological revolutions.

Received 28.02.2025. Revised 05.05.2025. Accepted 02.06.2025. Available online 25.06.2025.

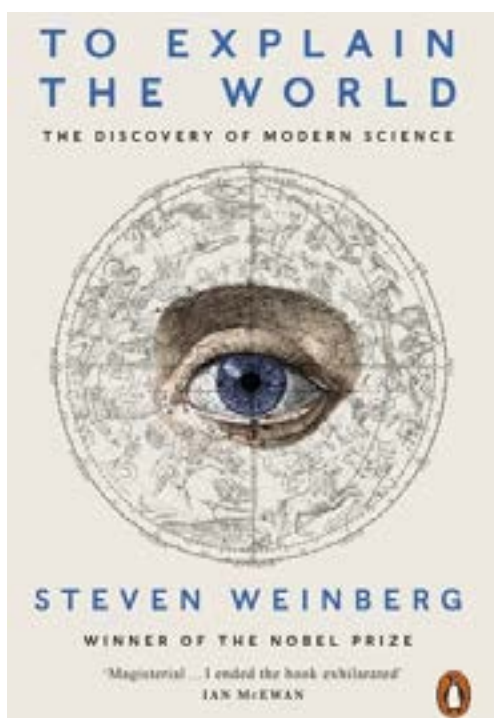
¹ *the corresponding author

Introduction

Steven Weinberg as a first reference

In the author's book *"The True Story of Modern Cosmology"*, published by Springer [1] (the previous version in Spanish, *"Modern Cosmology from its Origins"*, appeared in Ed. Catarata [2]), it is described in detail how, during the last century, sky observers and pioneering theoretical physicists shaped our current understanding of the universe while, at the same time, they turned cosmology into a modern science. But, before going into the details of this research, let us start by putting it in context. This will be done by taking as a reference another book: *"To Explain the World: Discovery of Modern Science"* [3], written in 2015 by the late Steven Weinberg, a great theoretical physicist who passed away in July 2021.

It will prove to be most appropriate to proceed in this way, taking into account the criticism (sometimes fierce) that active scientists-researchers at the various frontiers of knowledge usually receive from historians, when the former (dare) dedicate themselves to writing a book on the history of science. Taking this one as a paradigmatic example, we will now dwell on what happened to Weinberg himself, a physicist of an exceptional category, a myth, for many theorists. Not even a character of such a high level could escape criticism. We are talking about a great Nobel Prize winner who, as the also laureate Frank Wilczek wrote in Nature [4]: *"... took the fundamental understanding of nature to new levels of power and completeness, and played a key role in formulating and establishing the two standard models of current theoretical physics: the standard model of fundamental interactions and the standard model of cosmology"*.



Weinberg was undoubtedly a colossal theorist who unified two of the four fundamental forces of nature and shaped the image that physicists (and also ordinary people) now have of our universe. To be even more precise, some of his more qualified colleagues argue that Weinberg's really crucial contribution to particle physics was not just the unification of the weak forces and electromagnetism (important as that discovery is), but his definitive articulation of how effective quantum field theories, which have now become of major importance, should be treated precisely.

Weinberg wrote a number of excellent books, which have educated several generations of theoretical physicists. His popular work *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe* [5] made him universally known to the general public. We will not dwell further on his merits, since anyone reading this – if (unlikely) he/she does not know Weinberg well enough – has at disposal numerous recent and well-documented memories, with detailed explanations of all that he did (see, for example, the one in Physics Today [6]). An excellent discussion of his work appeared in an article in the *Revista de Física*, written by Luis Álvarez Gaumé (in Spanish) [7].

Weinberg received the said criticism after the publication of his book, already mentioned, *"Explaining the World: The Discovery of Modern Science"* [3] (Fig. 1), which he dedicated to the history of physics, from the ancient Greeks to the present day. This is indeed a brilliant and ambitious book where he expressed, among other things, his vision shared by many other scientists that genuine science transcends history and culture. The critics were especially harsh in his case, perhaps precisely because of his exceptional status, which allowed them to shine and get publicity, at his expenses (this is not seldom). Although it could also be understood as a reaction, to a certain extent understandable, to the contempt that historians have sometimes received from some active scientists. They are often reproached for not having made any relevant, original contribution to the advancement of science, and even for not adequately understanding current theories! When it was published, the book gave wings to the pens of the most combative historians and philosophers, who were very upset by Weinberg's approach to history. They accused him, among other things, of judging the past exclusively from the point of view of the present, that is, from what we now know about nature with great certainty. This view is often called the "Whig interpretation of history" and is characterized by viewing past events through the prism of a constant advance towards enlightenment, which completely ignores the dead ends and blind alleys that so often appear along the way. In other words, it is considered as *"history written by the winners"*.

In fact, it may seem surprising at first glance – when one thinks about it, that scientists maintain two apparently very different discourses on this issue and on the development of science in general. On the one hand, they take great satisfaction in proclaiming that we are continually acquiring knowledge, that we are learning more and more about how the world works. But it is also often claimed that it is good to be wrong, from time to time, to get weird results; and that the real root of future progress is that there are always things that we do not yet know how they work. We might add that the truly exciting part of science lies in realizing what we do not yet know, and how we can fill those important gaps.

It is a paradigmatic case that the moment we are in now in cosmology is a most exciting one in this sense. As is well known, the conclusion has been reached that we do not know what 95% of our universe is made of! All this discourse may seem rather contradictory, but in fact it is not at all: both attitudes or approaches complement each other smoothly; one could even say that they feed off each other, in a very positive and fruitful way.

Be that as it may, seen in perspective, what is unquestionable is that we are always progressing towards greater knowledge (especially if we admit that *knowing that we do not know* is also a form of knowing). To give an example, it must be clearly understood, to begin with, that the validity of Newtonian mechanics was never called into question by Einstein's discoveries: it just happened that its domain of applicability (thought by Newton to be *universal*, what proved not to be) was delimited clearly. From the side of active science, many historians are accused of not being able to understand a point as basic and elementary as this one. For it is a very clear fact that, despite our later discoveries, Newtonian mechanics remains exactly as valid as it was before the advent of general relativity and quantum physics; always, of course, *within its very wide domain of applicability*. And today we still use the equations derived from Newton's laws for many and very important applications in physics and engineering, which are not affected at all by the discoveries.

It is sometimes difficult to properly understand that science is, in fact, radically different from other forms of human knowledge, corresponding to many other areas. Because, in fundamental physics, there are some things that, like Newton's laws, we are absolutely certain to know completely and that *will never change*, no matter how much physics progresses and new and ever more advanced theories appear. Basic science is an increasingly accurate representation of how the Universe works, and this accuracy is constantly improving and expanding; it never goes backwards, under any circumstances (a highly recommendable reading in this respect is: "The best books on The History of Science", <https://fivebooks.com/best-books/history-science-matthew-cobb/>, by Matthew Cobb, in an interview with Jo Marchant).

In any case, by calling Plato "silly," Aristotle "tedious," and Galileo "behind his time," Weinberg's book commits – in the opinion of the aforementioned historians – all the sins that they usually attribute to Whiggism [8]. In his book, Weinberg gives them clear reasons for their criticism:

"I will approach the dangerous ground that contemporary historians most carefully avoid: judging the past according to the standards of the present. [...] Some historians of science avoid at all costs referring to current scientific knowledge in their studies of the science of the past. Quite the contrary, in my case, I will make full use of present knowledge to clarify the science of the past."

And, as another aspect of the subject, referring to the subtitle of the book, *"The discovery of modern science"*, Weinberg explains its profound significance, stating that it is a fact that science is not "constructed," but "discovered"; In the same way that agriculture was not built, but discovered: *"the physical reality of the Universe is what it is, and it is just waiting to be discovered."*

In sharp contrast to the above, Thomas Kuhn, among other great thinkers and historians, considers in his writings that linear and cumulative progress can generally be a problematic notion and that history should properly try to *understand the world of the past on its own terms*. Weinberg explicitly dismisses this idea in his book, stating clearly that: *"I do not share it."* The goal of his work is not, as he declares, *"to understand the past on its own terms,"* but *"to judge the past according to the standards of the present."* And he claims that it is precisely from this perspective that we should be able to understand the past in its own terms. And he claims that it is precisely from this point of view that Plato was *"foolish"* and Aristotle *"wrong about the laws of nature"* – though he admits that the latter was at the same time *"clear and serious"* in his statements. He also says that Galileo's emphasis on geometry over algebra *"left him behind"* what he might have achieved by proceeding otherwise. He also considers Bacon to have been overrated and adds that, despite the praise of Baconianism by several generations of thinkers, *"I am not clear that the work of any major scientist has ever been improved by reading Bacon."* Weinberg also believes that Descartes has been greatly overrated, noting that: *"It is remarkable how many mistakes Descartes made in so many aspects of his approach to nature."* Newton is, in this sense, one of the few who escapes his criticism, stating that his achievements *"provided the paradigm that all subsequent science followed as it became modern."* Let us leave it at that, for now.

Methodology

An example of the origins of modern cosmology

The extensive introduction above – on the orientation of Weinberg's book and the criticisms it received – should serve to put into context the historical approach to which the present author

tried to adjust in his own book. It may be summarized by saying, at the outset, that his intention was to place himself smoothly in the middle field of all the preceding considerations. We will now see how this could be realized.

It is very true that, as Kuhn states, linear and cumulative progress can generally be a "*rather problematic notion*" when thinking in a generic scientific field. There are many and very important examples that can be put on the table to support this statement. But it must also be considered that the concept of Science is extremely broad and varied, and that these considerations *can be of very different validity and applicability* in its various domains or areas of knowledge. Let us just recall here that more than one reputable specialist has even dared to imagine as a possibility (however remote) that the paradigm of natural selection in the evolution of species could falter and have to be drastically modified in the future. In this field, then, as well as in various areas of medicine and in many others, Kuhn's statement turns out to be absolutely valid and adequate. Particularly interesting is the discussion on this point that can be found in: "*The Whig History of Science: An Exchange*", by Arthur M. Silverstein, with the corresponding response by the same Steven Weinberg (<https://www.nybooks.com/articles/2016/02/25/the-whig-history-of-science-an-exchange/>).

However, quite on the contrary, in the field of fundamental physics, in the most basic and essential principles of physical reality, progress is indisputable, and the line, in constant ascent, that goes from the past to the present, and beyond, is clearly identifiable, in an objective and rigorous manner. Here, it is not possible to disagree with Weinberg.

The point where it is difficult to agree with Weinberg is that the vision of past formulations and discoveries in physics should be made exclusively with the eyes of what we know today. It is quite necessary (or at least very convenient) to adopt a more open criterion in this sense. A journey back in time (*gedanken Zeitrückreise*, as the author has often called it) is very essential in many cases. Sometimes, we must forget for a while everything that we now know and delve fully into certain episodes of past times, *reasoning only with the knowledge that was at hand at that time*. And this is what the present author does, quite often, in his book. With all the information in hand, each case is then analyzed. Although, at the same time, a well-deserved extra bonus is given to those scientists who were cleverer (or lucky, if you will), capable of finding the "right" path in those circumstances of the past, of discovering the path that truly led to the future knowledge that we now possess.

This has important value, of course, but always in a way that is a balanced and additional bonus, and not an "all or nothing" issue. It is also necessary to seriously consider the often-decisive influence of luck in these discoveries: chance is a very important factor, which is often too little talked about and which has in fact proven to be crucial in a good number of scientific discoveries of enormous importance. This is conveniently emphasized in various passages of the author's book (Fig. 2).

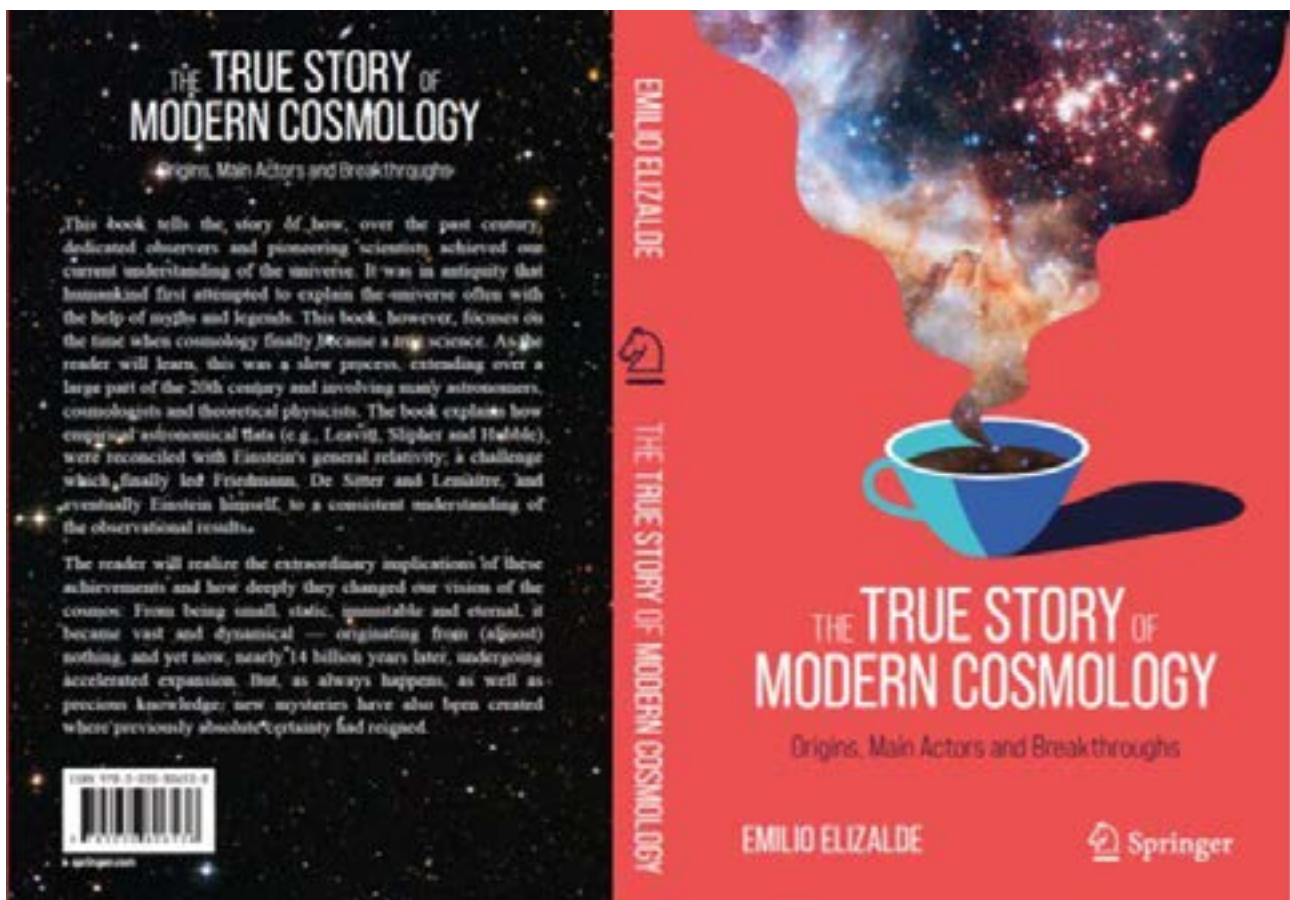


Fig. 2. The cover and back covers of “The True Story of Modern Cosmology: Origins, Main Actors and Breakthroughs”, recently published by Springer, aim to convey the book’s essence and objectives. On the front cover, the steam coming from a hot coffee cup draws a famous region of the Milky Way where stars are constantly being born from huge concentrations of dust and gas. The steam continues to spread, impregnating the entire book, all the way to the back cover, where we find a deep field image of the sky with some of the oldest stars in the universe, the furthest away from us. The image on the cover wants to convey the author’s kind advice that all the lessons in this book, about the birth and evolution of the universe, should be always taken in small sips, sitting in a comfortable place, while enjoying a cup of good, freshly brewed coffee, or the reader’s favorite drink. It is the best way to delve into this unique story of the cosmos.

Leaving aside the aforementioned rivalries between scientists and historians – which should be to a certain extent understandable for the reasons already mentioned – one of the great arguments for disagreement is the one just referred to above: while historians of science strictly place themselves, as good historians, in the era and circumstances in which the scientific discoveries took place, scientist-historians usually describe the past in terms of our current knowledge, thus giving a vision that is often radically different from the first. Thus, great historical figures who constructed excellent theories, according to the time in which they were proposed, but which were later shown to be completely wrong (think, for example, of the

theories that considered the Earth, or later the Sun, as the center of the Universe, or that of Aristotle's spheres) are absolutely minimized (even ridiculed, at times) by scientist-historians, due to the irrefutable fact, proven a posteriori, that those theories are now, and will ever be in the future, completely wrong.

It is, on the other hand, an indisputable reality that there is a very important difference between the progress of science and that of other disciplines of human culture. In fact, the most precious jewel of scientific knowledge is the fact that science is cumulative: we now know much more about the world, and in a better way, than we did a hundred years ago. This cannot be said in the same way, for example, of artistic creation, since no one can prove (this example is borrowed from Weinberg's) that Keats was a better writer than Shakespeare. Nor can anyone prove that among the works of writers after Keats there was any that improved on his. In a way, one could think that in literature we are going backwards! Or, at least, that we have not advanced at all in many centuries, depending on how you look at it. And the same could be said of many other fields, such as painting or music: who has so far managed to surpass Bach, Mozart or Beethoven? Well, in someone's opinion, it turns out that yes, all three may have been surpassed by far – by an esoteric musician whose name will nobody remember in ten years; but this will never be a universal opinion, since the overwhelming majority of people do not think at all like that guy. And the fact is that "better" does not really mean anything objective in these cultural contexts. Basic science, on the contrary, is progressive, since it is based on previous knowledge, all of which has been verified with extraordinary and indisputable rigor (some cheating will inevitably appear, from time to time, but this is soon uncovered and dismissed). The interesting thing about scientific knowledge is that this progress is incredibly non-linear, since it is quite true that mistakes are continually made and that the work that must be done to find the optimal way out – that is, the one that leads to the correct path of the occasional labyrinth that one stumbles into so many times – often turns out to be, in retrospect, the most interesting, the most exciting part of the research endeavor.

However, it often happens that when scientists describe aspects of the history of their own subject, especially in textbooks or popular books, they often forget about this more laborious part and do so in a way that makes it seem as if everything was flat, linear, and inevitably led to where we are now. That is one reason why some historians are so frustrated by scientists who write history. Professional historians love to dwell on all the derivations, on every single wrong theory that was developed in parallel with the one that has eventually proven to be correct, and they seem to find all these possibilities *equally exciting and valuable*. They have been trained to be critical of everything and to think very carefully, analyzing the many different aspects of history; so, it turns out that often the wrong theories can end up being as interesting or even more interesting – so that they devote pages and pages to them – *rather than to the right ones*. This is in sharp contrast to the way in which working scientists deal with past events, which is much more practical, direct, and aggressive, with little or *no understanding of mistakes made*.

To repeat it again, in the author's book, he has tried to find a healthy balance between both attitudes. In particular, it is defended that we should never think that our colleagues from the past were stupid. Most of the scientists about whom history books are written were considerably more intelligent than many of us. And yet, they often said all kinds of nonsenses, if we judge

them from a current perspective. Let us recall here the maps of the universe before Copernicus: Anaximander placed the stars closer to us than the Sun, and he did so with scientific criteria that were fully valid and reasonable in his time! This must be acknowledged. He could not do better! How could these very intelligent people believe things that we now know to be so palpably false? How did we manage to acquire the understanding we have today of things? What was the process followed to get here? To answer such questions honestly and properly, we have to try to reconstruct what scientists of the past thought in their own time and environment, with the knowledge available to them at their time. And the right way to do this is to forget, *if only for a moment*, all the theories and concepts that appeared later. This is a sane exercise, often performed in the author's version of the origins of cosmology as a science.

In the book, a very conscious attempt to try to balance as much as possible these two diametrically opposed approaches have been carried out. For a scientist working on theories and models that have been proven correct as of now (although also on some issues that are still being tested), it is difficult to abstract oneself from the perspective of the last century and the evolution that cosmological knowledge experienced, in the right direction (despite following an often tortuous path) until it ended up with the two cosmological revolutions that have been most clearly identified in the book, corresponding to this period (they will be described below). But at the same time, on many occasions, "journeys back in time", are undertaken, to immersing oneself fully in past eras and analyzing the facts within the strict framework of the knowledge that was available at those times (not more, nor less). In order to be able to appreciate its value in a more honest way: the value corresponding to the moment in which the model was proposed, and which may be radically different from the value that is currently given to it, seen in perspective from the knowledge that we have today. The author expects to have achieved this purpose. Albeit long, this has been a necessary discussion to adequately clarify the different approaches considered.

Discussion

Specific issues in the case under discussion

In the author's book, it is explained how, over the past century, pioneering observers and scientists succeeded in achieving our present understanding of the universe. Humanity had tried this repeatedly in ancient times, though often through the help of myths and legends. The book's story focuses essentially on the time when cosmology was finally able to become a genuine science. The reader will no doubt appreciate that this was a slow process, spanning much of the twentieth century and involving astronomers, cosmologists and theoretical physicists alike. It is explained, in all detail, how empirical astronomical data (Leavitt, Slipher and Hubble) were reconciled with Einstein's theory of general relativity – a challenge that was far from easy, fraught with many difficulties, but which ultimately led Friedmann, de Sitter and Lemaître, and finally Einstein himself, to an understanding of the observational results that was consistent with the theory.

The book provides explanations that are easy to understand, but at the same time absolutely rigorous. In short, it describes how we came to know the origin and expansion of our world. It also helps the reader to grasp in a colloquial way the deep meaning of general relativity and the

mystery of cosmic acceleration. And it shows *“in a masterful way”* (copying here the words of some reviews that have been written about the book) *“how research sheds new light on the paths that lead to the progress of our knowledge of the universe.”*

To be more specific, the book consists of the following nine chapters:

1. Introduction: The awakening of cosmic consciousness.
2. What is a scientific theory?
3. The first cosmological revolution of the 20th century.
4. The theory of general relativity and its main solutions.
5. The Hubble-Lemaître law and the expansion of the universe.
6. The Big Bang theory.
7. Towards the very moment of the creation of the universe.
8. The second cosmological revolution of the 20th century.
9. Conclusion.

Bibliography.

Index.

Overall, a 300-page history with almost the same number of images of some of the fundamental episodes that led to the birth of modern cosmology. For reasons described in the text, the origin of modern cosmology is argued to have taken place in the year 1912, at a time characterized as the moment when cosmologists *first had at their disposal the basic tools essential* to making it a true science. Namely, for the first time in history, they had at disposal the instruments and procedures necessary *to calculate the positions and velocities of distant celestial objects*. This objective was fully achieved when, later on, they were able to use the physical theories that emerged from the great revolutions of the first third of the twentieth century: the general theory of relativity and quantum mechanics. These theories made it possible to describe, with increasingly precise models, the origin, structure, evolution and behavior of the universe as a whole. And taken to extremes – although not strictly valid within these limits – these theories also provide a plausible idea of how and when the origin of the cosmos occurred and what its future evolution will be.

The book ends with a bibliography, containing some 250 references, and a final index, with entries for nearly 600 terms that appear in the text.

Main findings and a general discussion

The conclusions begin with a brief reference to Stigler's law of eponymy, which states that: *“no discovery is known by the name of the person who actually made it”*. This is a very strong statement, and several examples of it are considered, some of which have appeared along the text. Next, the final result that the author has reached after the exciting journey through the development of cosmology in the 20th century is particularly highlighted. The knowledge acquired during this hundred-year-long journey led him to the clear identification of two authentic revolutions of exceptional importance.

Such a statement may seem exaggerated, given that, however much we search in the literature, we seldomly find an explicit reference to such cosmological revolutions, in these same terms. However, under the perspective here taken, with the procedure and methods outlined in previous sections, it is eventually undeniable that astronomical observations throughout the 20th century completely changed our vision of the Universe:

- From being small, static, immutable and eternal, it became revealed to be enormous, expanding and having had an origin from "nothing" or "almost nothing" some 13.8 billion years ago (1st revolution).

- Later, it was also learned that its expansion accelerates without stopping, thus creating an absolute mystery where almost complete certainty had previously reigned, at least for a while (2nd revolution).

The first revolution can be framed, very precisely, in the period 1912-1932: starting with the discoveries of Leavitt and Slipher in 1912 and provisionally ending with those of Hubble, and with the inclusion of the theoretical advances made by Einstein, Friedmann, De Sitter and Lemaître. It reached its peak in 1929, with the publication of Hubble's results, which were confirmed in 1931. Finally, the scientific theory of the expansion of the universe with an origin in the past was adopted by specialists and formulated in the very famous Einstein-De Sitter model of 1932 [9].

However, its definitive completion still had to wait for three key, momentous events to occur later:

- An elaborate formulation of the Big Bang model.
- Its full corroboration, by the detection of the cosmic microwave background (CMB).
- And a major reshuffle (inflation), which would only come fifty years later, and which was, in fact, the prelude to the second cosmological revolution.

The second revolution occurred in the period 1985-2005, again a span of twenty years. It can be confirmed, with conclusive evidence, that it originated in the mid-1980s, with the first discussions on models of cold dark matter with a non-zero Λ term, which did fit the results of astronomical observations much better; and that, taken seriously, already implied that the universe expansion *should be accelerating*. It reached its peak in 1998-99, when the famous results of the SNIa supernovae appeared (Riess, Schmidt, Perlmutter et al.). But it could not be fully confirmed until about six years later, by the results from other very important observations. In particular, the precise analysis of the cosmic microwave background (CMB) radiation, results corresponding to the early formation processes of galaxies; additional and much more precise results from SNIa supernovae; data from the distributions of nearby galaxies; independent ones coming from baryon acoustic oscillations (BAO); and some more.

In other words, it is true that the Λ CDM theory, which was already being built since the mid-1980s around various results of cosmological observations, received its most striking boost thanks to the discovery of the accelerated expansion using Type Ia supernovae as standard candles. But these results did nothing more than *to confirm* what the theoretical adjustments of previous astronomical observations had already been stubbornly indicating for some time: that cosmic expansion was accelerating! And, in addition, the striking results obtained with the supernovae still required further independent, and more precise, verification by several other, independent procedures, for their definitive acceptance.

Both the modified gravity models and the use of Λ now provide solid theoretical frameworks, based on the fundamental laws of physics, to try to understand this surprising and extraordinary fact. But so far no one has been able to achieve this in a definitive and convincing way.

The *similarities between the two revolutions* mentioned are very remarkable:

- Their gestation period was exactly the same: *twenty years*.

- In addition, there were always some outstanding leaders who claimed to be the true (and only) discoverers, who *tried to claim all the credit* for the advances exclusively for themselves.
 - o Hubble and his Mount Wilson observatory, in the first case,
 - o Riess, Schmidt, Perlmutter and their SNIa observations, in the second.

In the book it is clearly argued that these claims are not sustainable, that they do not fit the reality of the facts. The history was much richer and more complex (as Nobel Prize laureate Jim Peebles dixit) and involved many other decisive contributions along the way that led to the findings and the final confirmation of the discoveries, in both cases.

Furthermore, it is also true that these two cosmological revolutions cannot be fully described by looking only at what happened during the respective twenty-year intervals. It must be admitted that the above is still an incomplete approach, a somewhat crude simplification. This is understandable, as it always happens that way when one aims at the description of any revolution. If we take the French Revolution as an example, it cannot be reduced to the events of July 14, 1789. Revolutions are always long, rather extended in time, and rarely occur in a linear or coherent way; however, they produce in the end great transformations in thought, in knowledge and in the organization of people and societies. Namely, if we refer to the most famous Scientific Revolution, as a second example, it took place during what historians sometimes call the “long 17th century,” which many specialists consider to have actually extended from the 16th century, when modern techniques began to be used to investigate anatomy and astronomy, all the way to Darwin himself, that is, well into the 19th century (although some authors cut it off earlier). Anyway, it is a very long period, in which much of what we now recognize as Science was slowly condensed and in which materialistic explanations were sought for the first time in all areas of research.

Conclusions

We have started with the late Steven Weinberg and ended up with James Peebles, both of them Nobel Prize laureates in Physics. According to what we have learned in the introspective research carried out above, it must be recognized that cosmological models are being reformulated continuously, as more and better astronomical data accumulate. There is no such linear path but a quite long and winding road to knowledge. However, one thing is very clear from this study: when we now look back at the last century and observe it in true perspective from the end to the beginning, strictly comparing our view of the universe at the end of the 19th century with the corresponding view at the end of the 20th century, we will appreciate that, certainly, the cosmological models are being reformulated continuously, as more and better astronomical data accumulate. However, one thing is very clearly manifested from this analysis. Namely, when we now look back at the last century and observe it in the mentioned perspective, it is then and only then that this vision from the outside, wide-ranging and with an open mind, suddenly opens our eyes to the following, amazing reality:

- Astronomical observations throughout the 20th century had extraordinary, almost unbelievable implications, which completely changed our view of the cosmos.
- From being small, static, immutable and eternal, it became enormous, expanding and it was discovered that it had had an origin from “nothing”, or “almost nothing” (1st revolution).

• Later, it was also discovered that its expansion is accelerating non-stop, thus creating an enormous mystery where absolute certainty had previously reigned (2nd revolution).

These are, without any doubt, two impressive revolutions in our knowledge of the cosmos. Two of the most extraordinary discoveries ever made in the entire History of Humanity.

And which, in turn, has given rise to another exciting era. Because our current lack of knowledge about the precise nature of dark matter and dark energy, that is, about 95% of the content of our universe, of the precise value of the Hubble constant, the mechanisms working at the origin and early evolution of the cosmos, and so on, open up a future before us that will undoubtedly be full of new and very intense emotions.

Acknowledgements. This work has been partially supported by the program Unidad de Excelencia María de Maeztu, CEX2020-001058-M, and by the Catalan Government, AGAUR project 2021-SGR-00171.

References

1. E. Elizalde, *The True Story of Modern Cosmology: Origins, Main Actors and Breakthroughs* (Springer-Nature, Berlín, 2021), available at: <https://www.springer.com/gp/book/9783030806538>
2. E. Elizalde, *Cosmología moderna desde sus orígenes* (Ed. Catarata, Madrid, 2020) (in Spanish), available at: https://www.catarata.org/libro/cosmologia-moderna-desde-sus-origenes_117625/
3. S. Weinberg, *To Explain the World: Discovery of Modern Science* (Harper Collins Publishers, New York, 2015), available at: <https://www.amazon.es/Explain-World-Discovery-Modern-Science/dp/0062346660> -
4. F. Wilczek, *Steven Weinberg (1933–2021), Theoretical physicist whose electroweak theory won the Nobel prize*, Nature 596, 183 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02170-w>, <http://www.nature.com/articles/d41586-021-02170-w>.
5. S. Weinberg, *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe* (Basic Books, 1977; 2nd Ed. 1993), available at: <http://slobodni-univerzitet-srbije.org/files/weinberg-stein-the-first-three-minutes.pdf>
6. *People & History*, Steven Weinberg (1933–2021), Physics Today (2021). DOI: DOI:10.1063/PT.6.4.20210803a, available at: <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.6.4.20210803a/full/>
7. L. Álvarez Gaumé, *Steven Weinberg: el fin de una época* (3-V-1933 - 23-VII-2021), Revista Española de Física 35-3, 31 (2021)), (in Spanish), available at: <http://revistadefisica.es/index.php/ref/article/view/2748>
8. J.G.A. Pocock, *The varieties of Whiggism from Exclusion to Reform: A history of ideology and discourse* (Cambridge University Press, 2010), available at: <https://www.cambridge.org/core/books/abs/virtue-commerce-and-history/varieties-of-whiggism-from-exclusion-to-reform-a-history-of-ideology-and-discourse/AFF2CA05BF3DA321F6F4F1B828524418> -
9. E. Elizalde, Einstein, *Barcelona, Symmetry & Cosmology: The Birth of an Equation for the Universe*, Symmetry 15, 1470 (2023). DOI: <https://doi.org/10.3390/sym15071470>, arXiv:2309.02477

Элизальде Э.

Ғарыш ғылымдары институты (ICE-CSIC & IEEC), Испания
(E-mail: elizalde@ice.csic.es)

Стивен Вайнбергтің әлемді түсіндіруі және қазіргі космологияның шынайы тарихын талдау

Аңдатпа. Физика саласында жұмыс істейтін ғалымдар физика тарихына арналған кітаптар жазуы керек пе? Кейбір тарихшылар бұған үзілді-кесілді қарсы, өйткені олардың айтуынша, физиктер тарихи мәселелерге объективті түрде қарай алмайды. Дегенмен, бұл мақалада мамандардың тарихты өз көзқарасымен бағалауы мен талдауы тарихшылардың көзқарасын толықтыру үшін аса маңызды екені дәлелденеді. Айталық, белгілі физик Стивен Вайнбергтің өзі де сынға ұшыраған. Ол «Explaining the World: The Discovery of Modern Science» атты кітабын ежелгі гректерден бастап қазіргі заманға дейінгі физика тарихына арнаған еді, алайда бұл еңбегі үшін тарихшылар тарапынан қатты сынға ұшырады. Себебі, Вайнберг өткенді қазіргі білім деңгейімен, яғни қазіргі көзқарас тұрғысынан бағалады деп айыпталды. Осы мақалада дәл осы мысал мен тағы бір жағдай арқылы екі түрлі көзқарастың арасындағы тепе-теңдікті қалай табуға болатыны көрсетіледі. Атап айтқанда, тарих кітаптарында баяндалатын ғалымдар қазіргі физиктерге қарағанда әлдеқайда зерек болғаны, бірақ қазіргі біліммен бағаласақ, олар кейде қисынсыз тұжырымдар айтқаны туралы ой қозғалады. Мақаланың негізгі тезисі – біржақты көзқарасқа жол бермей, бұл екі әдістемені үйлестіріп, тәжірибеде қалай жүзеге асыруға болатынын көрсету. Бұл мәселелер нақты мысалдармен және тәжірибелік талдаулармен толық ашылады. Зерттеу нәтижелері мен оның тәжірибелік маңызы соңғы бөлімде баяндалады.

Түйін сөздер: ғылым тарихы; Стивен Вайнберг; дүниені түсіндіру; виггизм; қазіргі космология; космологиялық төңкерістер.

Элизальде Э.

Институт космических наук (ICE-CSIC и IEEC), Испания.
(E-mail: elizalde@ice.csic.es)

Объяснение мира Стивена Вайнберга и анализ истинной истории современной космологии

Аннотация. Должны ли практикующие физики писать книги по истории физики? Некоторые историки категорически против, считая, что физики, как правило, не могут объективно освещать исторические вопросы. Однако в данной статье утверждается, что взгляд и анализ специалистов крайне важны для дополнения исторического подхода. Даже такой выдающийся учёный, как Стивен Вайнберг, подвергся критике со стороны историков. После публикации своей книги «Explaining the World: The Discovery of Modern Science», посвящённой истории физики от античных греков до современности, он был обвинён в том, что оценивает прошлое исключительно с позиции настоящего — опираясь на современные знания. Цель данной статьи — на этом и ещё одном

примере показать, как можно найти здоровый баланс между этими двумя противоположными подходами. В частности, подчеркивается, что многие из учёных, о которых пишут историки, были значительно умнее нас, современных исследователей, несмотря на то, что с нынешней точки зрения они нередко говорили странные вещи. Основной тезис статьи – необходимость соблюдения баланса между двумя противоположными взглядами и демонстрация того, как это можно реализовать на практике. Всё это будет подробно объяснено на ряде конкретных примеров. Основные выводы и анализ практических последствий проведённого исследования представлены в заключении.

Ключевые слова: история науки; Стивен Вайнберг; объяснение мира; виггизм; современная космология; космологические революции.

References

1. E. Elizalde, *The True Story of Modern Cosmology: Origins, Main Actors and Breakthroughs* (Springer-Nature, Berlín, 2021), available at: <https://www.springer.com/gp/book/9783030806538>
2. E. Elizalde, *Cosmología moderna desde sus orígenes* (Ed. Catarata, Madrid, 2020) (in Spanish), available at: https://www.catarata.org/libro/cosmologia-moderna-desde-sus-origenes_117625/
3. S. Weinberg, *To Explain the World: Discovery of Modern Science* (Harper Collins Publishers, New York, 2015), available at: <https://www.amazon.es/Explain-World-Discovery-Modern-Science/dp/0062346660>
4. F. Wilczek, *Steven Weinberg (1933-2021)*, Theoretical physicist whose electroweak theory won the Nobel prize, *Nature* 596, 183 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02170-w>, <http://www.nature.com/articles/d41586-021-02170-w>
5. S. Weinberg, *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe* (Basic Books, 1977; 2nd Ed. 1993), available at: <http://slobodni-univerzitet-srbije.org/files/weinberg-steven-the-first-three-minutes.pdf>
6. *People & History*, Steven Weinberg (1933–2021), *Physics Today* (2021). DOI: DOI:10.1063/PT.6.4.20210803a, available at: <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.6.4.20210803a/full/>
7. L. Álvarez Gaumé, *Steven Weinberg: el fin de una época (3-V-1933 - 23-VII-2021)*, *Revista Española de Física* 35-3, 31 (2021), (in Spanish), available at: <http://revistadefisica.es/index.php/ref/article/view/2748>
8. J.G.A. Pocock, *The varieties of Whiggism from Exclusion to Reform: A history of ideology and discourse* (Cambridge University Press, 2010), available at: <https://www.cambridge.org/core/books/abs/virtue-commerce-and-history/varieties-of-whiggism-from-exclusion-to-reform-a-history-of-ideology-and-discourse/AFF2CA05BF3DA321F6F4F1B828524418>
9. E. Elizalde, Einstein, *Barcelona, Symmetry & Cosmology: The Birth of an Equation for the Universe*, *Symmetry* 15, 1470 (2023). DOI: <https://doi.org/10.3390/sym15071470>, arXiv:2309.02477

Information about the author:

Elizalde E. – corresponding author, Professor, Research Professor Ad Honorem, Prof. H.C.m. Institute of Space Sciences (ICE-CSIC & IEEC), Campus UAB, Carrer de Can Magrans s/n, 08193 Bellaterra (Barcelona), Spain.

Элизальде Э. – автор для корреспонденции, профессор, доктор наук, профессор-исследователь Ад Хонорем, профессор Института космических наук (ICE-CSIC и IEEC), кампус UAB, Carrer de Can Magrans s/n, 08193 Беллатерра (Барселона), Испания.

Элизальде Э. – хат-хабар авторы, профессор, зерттеуші профессор Ад Хонорем, Ғарыш ғылымдары институтының профессоры (ICE-CSIC & IEEC), кампус UAB, Carrer de Can Magrans s/n, 08193 Bellaterra (Барселона), Испания.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



IRSTI 29.05.41

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-23-31>

Article

Gravitational Redshift in Generalized Gravity Models

K.K. Yerzhanov¹, A.M. Sergazina*¹, T.R. Murzakul², G.B. Baurzhan¹

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

(E-mail: almira_240794@mail.ru)

Abstract. This paper explores the phenomenon of gravitational redshift within the framework of extended gravity models, which go beyond the conventional Einsteinian General Relativity. The gravitational redshift is a key observable manifestation of spacetime curvature and serves as an important tool for testing theories of gravity. In the framework of general relativity (GR), it is explained as a consequence of time dilation in a gravitational field. This paper examines the features of the manifestation of gravitational redshift in various generalized gravitational theories and conducts a comparative analysis of the time predictions of these models with the results of observations, in particular, near compact objects and on cosmological scales. We establish a relationship between the redshift Z and the normalized scale factor $\alpha(t)$ of the universe, linking it through the Hubble parameter $H(T)$. We develop both analytical and numerical approaches to examine the time evolution of redshift. By solving the governing equations, we derive expressions for $Z, \alpha(T)$, and their derivatives concerning time. The results align with current cosmological observations and provide new insights into the dynamics of the universe's expansion. Additionally, visualizations of the evolution of the scale factor, its first and second derivatives over time, are presented. These findings contribute to a better understanding of the complex interaction between gravitational forces and cosmic expansion.

Keywords: Gravitational redshift; scale factor; Hubble parameter; cosmological models; generalized gravity.

Introduction

Perhaps one of the most important observable parameters of all cosmological objects is the so-called redshift, based on which a conclusion is drawn about the expansion of the universe. The essence of this phenomenon in cosmology is the shift of the emission spectrum lines of

Received 31.05.25. Revised 05.06.2025. Accepted 05.06.2025. Available online 25.06.2025

¹ *the corresponding author

luminous objects towards longer wavelengths. It is known that excited atoms of rarefied gases or vapors, which can occur when any chemical element is heated, emit light, the decomposition of which on a prism forms a linear spectrum consisting of separate colored lines. At the same time, each chemical element has a linear spectrum characteristic of it. This is due to the fact that the atoms of such elements, isolated from each other, emit light only of certain wavelengths. These waves have strictly defined resonant frequencies, which in special instruments – spectroscopes – are visible as dark or light lines in certain parts of the spectrum characteristic of this substance. The shift of these initial spectral lines of chemical elements towards longer wavelengths, towards the "red" side, is called redshift. In cosmology, redshifts are denoted by z and defined as a relative increase in wavelength $z = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda}$. More generally, this equation is written as follows $1 + z = \frac{a(t_0)}{a(t)} = \frac{v}{v_0} = \frac{\lambda}{\lambda_0}$. All values marked with the index 0 refer to the moment of wave reception. Since in the expanding universe, the wavelength of the received signal is longer than the emitted one. The value called the redshift parameter is equal to the relative increase in the wavelength of the received electromagnetic signal. The magnitude of the redshift depends on the relative speed of the objects – the transmitter, the wave generator, and the receiver, so the redshift allows you to determine this relative speed [5-6]. Gravitational redshift is a critical observational effect in cosmology, indicating the interaction between light and the gravitational field of an expanding universe [1]. In standard cosmological models, this phenomenon is typically described by the relation between redshift z , scale factor $a(t)$, and the Hubble parameter. However, more general gravity theories, which extend the framework of General Relativity, present new opportunities for exploring redshift in a broader context.

This study aims to derive both analytical and numerical solutions for the evolution of redshift within generalized gravity models. By considering a normalized scale factor, we analyze how redshift depends on time and the Hubble parameter, providing a detailed examination of the universe's expansion [2].

Theoretical Framework

The FLRW metric:

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2[dx^2 + dy^2 + dz^2] \quad (1)$$

$$X = -\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 \quad (2)$$

$$R = 6\left(\frac{\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2\right) \quad (3)$$

$F(R, X) = R + \alpha X^2 + \beta R^2$ – includes a quadratic curvature (as in the old inflationary models of the Starobinsky type) and a nonlinear kinetic term characterized by a nonlinear k – essence.

Connection with redshift:

$$1 + z = \frac{a_0}{a(t)} \quad (4)$$

It is possible to express $z(t)$ and study its evolution depending on the solutions of the equations flowing into the model $f(R, X)$.

The normalized scale factor $\alpha(t)$ is connected to the redshift z through the following equation:

$$1 + z = \frac{a_0}{a}, \quad (5)$$

From the definition of the Hubble parameter:

$$H = \frac{1}{H_0(t-t_0)} \quad (6)$$

This simplifies to:

$$dt = -\frac{dz}{(1+z)H(t)} \quad (7)$$

For simplicity, we assume a time-dependent Hubble parameter, which allows the equation to be solved numerically. Upon integrating, we obtain expressions for and, providing a time-evolving model for the redshift [3].

$$H = \frac{1}{H_0(t-t_0)}, \quad (8)$$

$$dt = -\frac{dz}{(1+z)H(t)} = -\frac{dz}{(1+z) \times \frac{1}{H_0(t-t_0)}} \quad (9)$$

Integrating Time and Redshift. By integrating both sides, we derive the explicit relationship between time and redshift:

$$\int \frac{dt}{(t-t_0)} = -H_0 \int \frac{dz}{1+z} \quad (10)$$

$$\int \frac{dt}{(t-t_0)} = \ln|t - t_0| + C_1 \quad (11)$$

$$\int \frac{dz}{1+z} = \ln|1 + z| + C_2 \quad (12)$$

The integrations yield:

$$\ln|t-t_0| = -H_0 \ln|1+z| + C \quad (13)$$

$$\ln|1 + z| = -\frac{\ln|t-t_0| - C}{H_0} \quad (14)$$

where C is the constant of integration. Rearranging this, we have:

$$|1 + z| = (t - t_0)^{-\frac{1}{H_0}} \times e^{-\frac{C}{H_0}} \quad (15)$$

The Final Formula for Redshift. The redshift z can now be expressed as:

$$z = \left((t - t_0)^{H_0} \times e^{-\frac{C}{H_0}} \right) - 1 \quad (16)$$

Results and discussion

This equation directly relates redshift z to the time t , considering the universe's expansion. We can derive the evolution equation for the redshift:

Physical Interpretation. This formula explains how the wavelength of light changes as the universe expands. In generalized gravity models such as $f(R, X)$, it plays a crucial role in describing the geometry and evolution of the universe.

The parameter H_0 defines the rate of expansion, while C corresponds to the initial conditions. The redshift z encodes the observational evidence of this expansion through light emitted by distant objects [4-8].

For simplicity, we assume a time-dependent Hubble parameter, which

allows the equation to be solved numerically. Upon integrating, we obtain expressions for and, providing a time-evolving model for the redshift.

Numerical Results and Graphical Representations

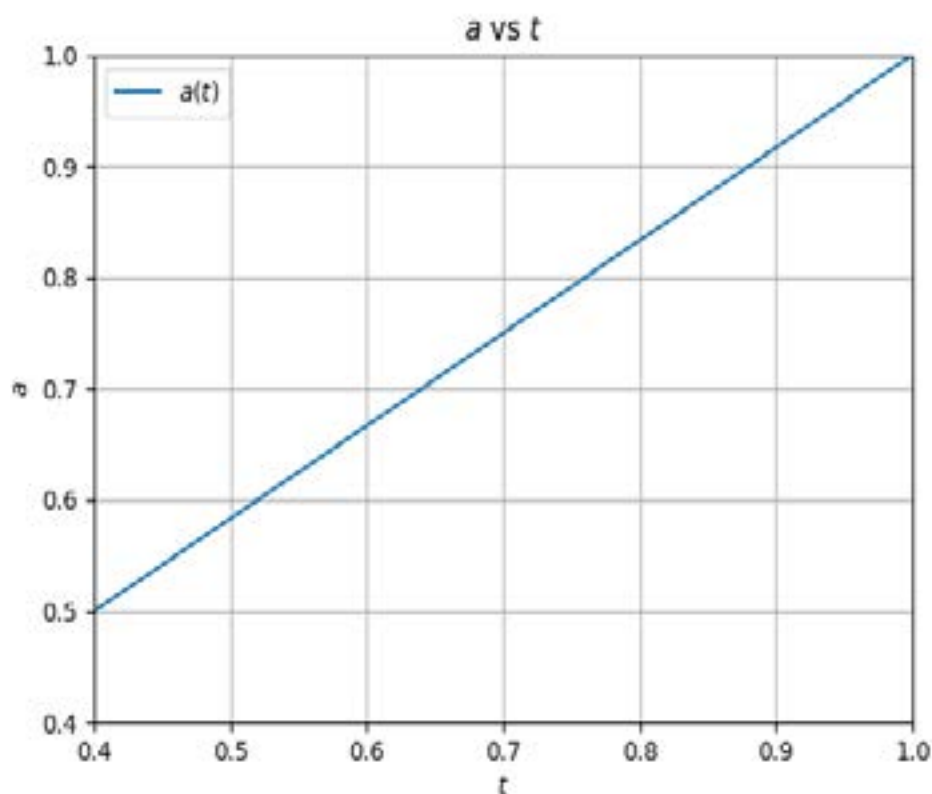


Figure 1. illustrates the linear increase of $a(t)$, consistent with an accelerating universe

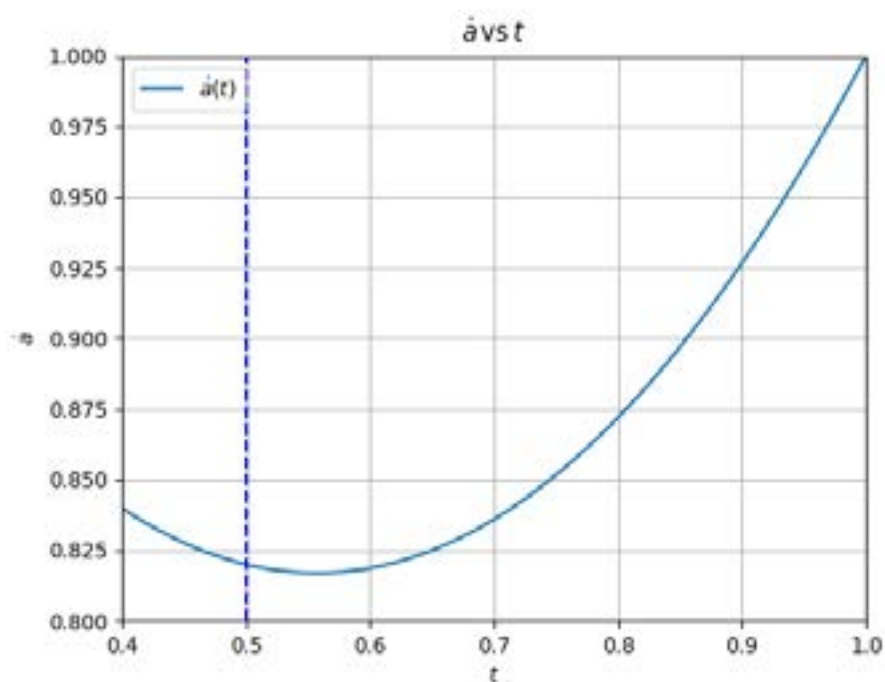


Figure 2. Highlights $\dot{a}(t)$, showing a slight deviation near specific intervals, indicating transition phases.

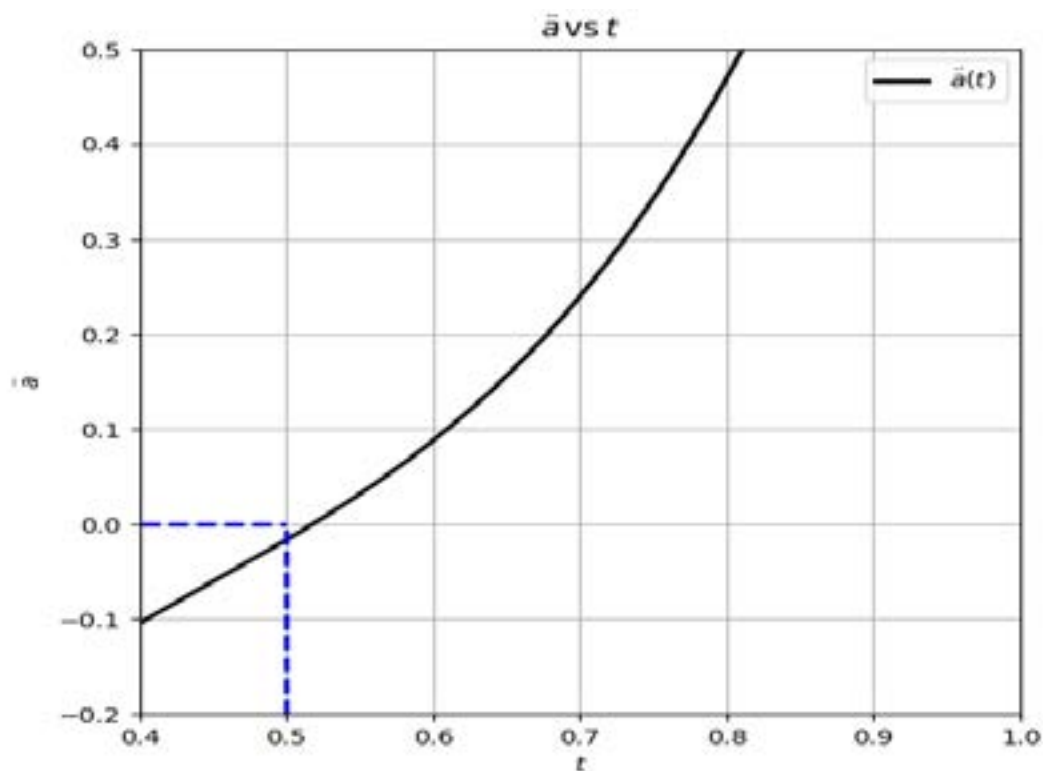


Figure 3. showcases $\ddot{a}(t)$, with the negative values transitioning to positive as the acceleration overtakes deceleration.

Graphical Analysis of $a(t)\dot{a}(t)$ and $\ddot{a}(t)$ Figures 1, 2, and 3 present the behavior of the scale factor $a(t)$, its first derivative $\dot{a}(t)$, and second derivative $\ddot{a}(t)$, respectively, over time.

Key Observations. From these graphs, it becomes evident that the scale factor exhibits a steady increase, while the acceleration $\ddot{a}(t)$ undergoes significant variation due to the effects of generalized gravity.

Figure 1 $a(t)$ increases linearly $a(t) \propto t^n$ $n > 1$ and $a(t) \propto e^{Ht}$. Figure 2 $a(t)$ – changes slightly. The variable acceleration model $a(t) \propto \sinh^{\frac{2}{3}}(\alpha t)$ and $a(t) \propto t^n + \gamma e^{\lambda t}$, as in the transition from matter to dark energy. Figure 3 $a(t)$ from negative to positive value.

The physical meaning $\dot{a}(t) \cdot \dot{a}(t) = \frac{d\dot{a}}{dt}$. This is the rate of change in the scale of space over time, that is, how much $\dot{a}(t > 0)$ – The universe is expanding, and $\dot{a}(t < 0)$ compression occurs (in a collapsing model), $\dot{a}(t)$ the bigger, the faster the expansion takes place.

The physical meaning $\ddot{a}(t) \cdot \ddot{a}(t) = \frac{d^2\dot{a}}{dt^2}$. This is an acceleration of the expansion or deceleration of the universe $\ddot{a}(t > 0)$ – the universe is expanding at an accelerating rate, $\ddot{a}(t < 0)$ – expansion slows down. $\ddot{a}(t) = 0$ the scale factor is uniform. This equation is included in the second-order equation $\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$.

Conclusion

The derived formulas and numerical results provide a comprehensive view of the relationship between the scale factor and redshift in generalized gravity models. This study emphasizes the utility of alternative approaches to describing the universe's dynamics. By considering extensions of classical general relativity, we gain deeper insights into the accelerating expansion of the universe.

The contribution of the authors

Yerzhanov K.K. – set tasks and general adjustments;

Sergazina A.M. – writing an article, collecting material;

Murzakul T.R. – plotting graphs;

Baurzhan G.B. – plotting graphs.

References

1. A. Einstein, *The foundation of the general theory of relativity*, Annalen der Physik, 49(7): p.769–822 (1916). DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19163480702>.
2. S. Weinberg, *Cosmology* (Oxford University Press, 2008).
3. C. W Misner, K.S. Thorne, J. A.Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman and Co., 1973).
4. S. Carroll, *Spacetime and geometry: An introduction to general relativity* (Addison Wesley, 2003).
5. K.K., Yerzhanov, B. Meirbekov, G. Baurzhan, R. Myrzakulov, *Cosmological solutions of $F(R,T)$ gravity model with k -essence*. Journal of Physics: Conference Series (2019), available at: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000739070400001>.
6. K.K. Yerzhanov, G. Baurzhan, A. Altaybaeva, R. Myrzakulov, *Inflation from the symmetry of the generalized cosmological model*, Symmetry 13(8)(2021), available at: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000554820300163>.
7. D. Momeni, K.K. Yerzhanov, R. Myrzakulov, *Quantized black hole and Heun function*, Canadian Journal of Physics 90(9): p.877–881, (2012), available at: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000308973200006>.

8. T. Ibrokhimov, Z. Turakhanov, F. Atamuratov, A. Abdujabbarov, K.K. Yerzhanov, G. Baurzhan, A. Abduvokhidov, *Testing regular scale-dependent black hole space time using particle dynamics: Shadow and gravitational weak lensing*, Physics of the Dark Universe 45, (2025), available at: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001398426900001>.

К.К. Ержанов¹, А.М. Сергазина*¹, Т.Р. Мырзакул², Г.Б. Бауржан¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Қазақ Ұлттық Педагогикалық Университеті, Алматы, Қазақстан

(E-mail: almira_240794@mail.ru)

Жалпыланған гравитациялық модельдердегі гравитациялық қызыл ауысу

Аңдатпа. Бұл мақалада Эйнштейннің жалпы салыстырмалылық теориясының шеңберінен шығатын кеңейтілген гравитациялық модельдер шеңберіндегі гравитациялық қызыл ығысу құбылысы зерттелген. Гравитациялық қызыл ығысу кеңістік-уақыт қисықтығының негізі байқалатын көрінісі болып табылады және гравитациялық теорияларды сынау үшін маңызды құрал ретінде қызмет етеді. Жалпы салыстырмалылық шеңберінде ол гравитациялық өрістегі уақыттың кеңеюінің салдары ретінде түсіндіріледі. Бұл жұмыс әртүрлі жалпыланған гравитациялық қызыл ығысу көрінісінің ерекшеліктерін қарастырады және бұл модельдердің болжамдарын бақылау нәтижелерімен, атап айтқанда, жинақы объектілердің жанында және космологиялық масштабта салыстырмалы талдау жүргізеді. Біз Хаббл параметрі арқылы байланыстыра отырып, қызыл ығысу мен ғаламның нормаланған масштаб факторы арасында байланыс орнатамыз. Біз redshift уақыт эволюциясын зерттеу үшін аналитикалық және сандық тәсілдерді әзірлейміз. Басқару теңдеулерін шеше отырып, өрнектерді аламыз үшін, және олардың туындылары уақытқа қатысты. Нәтижелер қазіргі космологиялық бақылауларға сәйкес келеді және ғаламның кеңею динамикасы туралы жаңа түсінік береді. Сонымен қатар, уақыт бойынша масштаб факторының эволюциясын, оның бірінші және екінші туындыларын визуализациялау ұсынылған. Бұл нәтижелер гравитациялық күштер мен ғарыштық кеңею арасындағы күрделі өзара әрекеттесуді жақсырақ түсінуге ықпал етеді.

Түйін сөздер: Гравитациялық қызыл ығысу; масштаб коэффициенті; Хаббл параметрі; космологиялық модельдер; жалпыланған ауырлық күші.

К.К. Ержанов¹, А.М. Сергазина*¹, Т.Р. Мырзакул², Г.Б. Бауржан¹

¹Евразийский национальный университет имени Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан

(E-mail: almira_240794@mail.ru)

Гравитационное красное смещение в обобщенных гравитационных моделях

Аннотация. В данной статье исследуется явление гравитационного красного смещения в рамках расширенных гравитационных моделей, которые выходят за рамки традиционной общей теории относительности Эйнштейна. Гравитационное красное смещение представляет

собой ключевое наблюдаемое проявление кривизны пространства-времени и служит важным инструментом для проверки теорий гравитации. В рамках общей теории относительности (ОТО) оно объясняется как следствие замедления времени в гравитационном поле. В этой работе рассматриваются особенности проявления гравитационного красного смещения в обобщенных гравитационных теориях, проводится сравнительный анализ предсказаний этих моделей с результатами наблюдений в частности, вблизи компактных объектов и на космологических масштабах. Мы устанавливаем взаимосвязь между красным смещением и нормализованным масштабным коэффициентом Вселенной, связывая его через параметр Хаббла. Мы разрабатываем как аналитические, так и численные подходы для изучения изменения красного смещения во времени. Решая основные уравнения, мы получаем выражения для и их производные по времени. Результаты согласуются с текущими космологическими наблюдениями и дают новое представление о динамике расширения Вселенной. Кроме того, представлены визуализации изменения масштабного коэффициента, его первой и второй производных с течением времени. Эти результаты способствуют лучшему пониманию сложного взаимодействия между гравитационными силами и космическим расширением.

Ключевые слова: гравитационное красное смещение; масштабный коэффициент; параметр Хаббла; космологические модели; обобщенная гравитация.

References

1. A. Einstein, *The foundation of the general theory of relativity*, Annalen der Physik, 49(7): p.769–822 (1916). DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19163480702>.
2. S. Weinberg, *Cosmology* (Oxford University Press, 2008).
3. C. W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman and Co., 1973).
4. S. Carroll, *Spacetime and geometry: An introduction to general relativity* (Addison Wesley, 2003).
5. K.K., Yerzhanov, B. Meirbekov, G. Baurzhan, R. Myrzakulov, *Cosmological solutions of $F(R,T)$ gravity model with k -essence*. Journal of Physics: Conference Series (2019), available at: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000739070400001>.
6. K.K.Yerzhanov, G.Baurzhan, A.Altaybaeva, R. Myrzakulov, *Inflation from the symmetry of the generalized cosmological model*, Symmetry 13(8)(2021), available at: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000554820300163>.
7. D.Momeni, K.K. Yerzhanov, R. Myrzakulov, *Quantized black hole and Heun function*, Canadian Journal of Physics 90(9): p.877–881, (2012), available at: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000308973200006>.
8. T.Ibrokhimov, Z.Turakhanov, F.Atamuratov, A.Abdujabbarov, K. K.Yerzhanov, G. Baurzhan, A. Abduvokhidov, *Testing regular scale-dependent black hole space time using particle dynamics: Shadow and gravitational weak lensing*, Physics of the Dark Universe 45, (2025), available at: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001398426900001>.

Information about authors:

Yerzhanov K.K. – PhD, Department of general and theoretical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Sergazina A.M. – corresponding author, doctoral student, Department of General and Theoretical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Myrzakul T.R. – PhD, Kaznpu, Almaty, Kazakhstan

Baurzhan G.B. – PhD, Department of Space Engineering and Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Ержанов К.К. – PhD, кафедра общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Сергазина А.М. – автор для корреспонденции, докторант кафедры общей и теоретической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Мырзакул Т.Р. – PhD, Кафедра КазНПУ им. Абая, Алматы, Казахстан

Бауржан Г.Б. – кафедра космической техники и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Ержанов К.К. – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жалпы және теориялық физика кафедрасы, Астана, Қазақстан

Сергазина А.М. – хат-хабар авторы, жалпы және теориялық физика кафедрасының докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Мырзакул Т.Р. – PhD, ҚазҰПУ, Алматы, Қазақстан

Бауржан Г.Б. – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, ғарыштық техника және технологиялар кафедрасы, Астана, Қазақстан



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



ХҒТАР 29.27.49

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-32-44>

Ғылыми мақала

Зонд теориясы негізінде төменгі температуралы және импульсті плазма ағынындағы иондар мен электрондардың концентрациясын анықтау

А.К. Сейтханова^{*1}, А.Т. Нурбердиев², Б. Тасуов³

¹Ә. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан

^{2,3} М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан

(E-mail: ainur1179@mail.ru)

Аңдатпа. Плазма – заттың төртінші күйі және квазибейтарап орта болғанымен, әдетте плазманы жоғарғы және төменгі температуралы, теңгерілген және теңгерілмеген, идеал және идеал емес деп қарастырамыз. Сәйкесінше, оларды зерттеуде әртүрлі әдістер мен құралдар қолдануымыз қажет. Бірақ біз бұл мақалада жасанды плазманың кей түрлеріне бірдей зерттеу теориясын қолдануға болатындығын көрсетеміз немесе алынған физикалық шамаларды тексеру мақсатында өзге әдісті қолданамыз. Зерттеу жұмыстары нәтижесінде төменгі температуралы плазмадағы (солғын разрядтағы) иондар мен электрондар концентрациясы электр зонды әдісі арқылы анықталды. Зертханада цилиндр типтес электр зондын қолданып, оған вольт-амперлік сипаттама жасауға болады. Бұдан бөлек, Фарадей цилиндрі көмегімен импульсті плазма ағынындағы иондардың энергиясы анықталды. Фарадей цилиндріне келіп түскен зарядтар ішкі электродтың бетіне соқтығысады. Нәтижесінде электр тізбегінде пайда болған тоқты осцилограф көмегімен тіркейміз. Фарадей цилиндрі көмегімен иондардың концентрациясын анықтаудың бірнеше әдістері бар. Бірақ біз төменгі температураны зерттеудегі электр зондқа қатысты теорияны қолданамыз. Мақала аясында осы екі әдіспен алынған плазмалардың құрамын, ондағы электрондардың жылдамдығын және олардың концентрациясын есептеуге арналған теңдеулерді қолдана отырып, плазманың квазибейтарап орта екенін дәлелдейміз.

Осыған дейін плазма параметрлерін анықтауға арналған құрылғы дайындалды. Жұмыс барысында егер зонд пішіні дұрыс дайындалмаған болса, онда балқу, тозандану секілді проблемалар туындайтыны анықталды. Бұл мақалада дайындалған зонд конструкциясының соңғы нұсқасы көрсетіледі.

Мақаланың зертханалық бөлімдері толығымен Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университетінің «физика техникалық факультетінде» жасалды.

Түйін сөздер: Плазма; иондар концентрациясы; квазибейтарап орта; Фарадей цилиндрі; электр зонды.

Жіберілді 29.04.2025. Өзгертілді 02.06.2025. Қабылданды 04.06.2025. Онлайн қол жетімді 25.06.2025.

¹ *хат-хабар үшін автор

Кіріспе

Плазманы зерттеуде әртүрлі қондырғылар мен құралдарды пайдаланудың мәні бар. Оны зерттеуде біршама қиындықтар мен қателіктер туындағандықтан түріне қарай әртүрлі әдістер мен құралдарды пайдалануға бекітеміз. Иондалу нәтижесінде плазма электрон, нейтрон және иондардан құралады да бейтарап орта болып қала береді. Оң және теріс көлемдік зарядтар концентрациясының өзара теңдігі – квазибейтараптық. Егер газдың иондалу деңгейі жартылай немесе толықтай орындалса да ол заттың төртінші агрегаттық күйіне ауысады.

Плазманың температурасы электрондардың, нейтрондардың және иондардың температураларынан тұрады. Төменгі температуралы плазмаларда электронның температурасы иондар мен нейтрондардың температураларынан елеулі көп болады.

Импульсті плазманы зерттеуде Фарадей цилиндрі қолданылады. Әрі қарай оның шамаларын есептеуде өзге әдіспен алынған мәнді салыстыру арқылы қателікті азайтуға болады. Фарадей цилиндріне жалғанған осцилографта пайда болатын сигнал арқылы иондардың жылдамдықтары көмегімен ондағы иондардың концентрациясын анықтау теориясы кеңінен тараған. Осы әдіс арқылы анықталған мәндерді зонд әдісі арқылы да тексеруге болады. Ал зонд теориясында плазманы локальді термодинамикалық теңдік орнаған деп қарастырып, Больцман заңы арқылы иондардың концентрациясын анықтаймыз.

Осы секілді зонд теориясын төменгі температуралы плазманы зерттеуде де қолданамыз. Мұнда біз цилиндр пішіндегі зондтың потенциалын вольтметр арқылы, ал оның бойынан өтетін ток күшін амперметр арқылы өлшеп аламыз.

Зондтық әдіс арқылы зерттеу жүргізуде туындайтын қиындықтар да біршама. Теориялық тұрғыдан соқтығыссыз плазмадағы зонд сипаттамасы жеткілікті және сапалы түрде болжанған. Егер, магнит өрісі немесе соқтығысулар пайда болса көптеген қиындықтар туындайды. Осы себептен туындайтын қателіктерді түзету жұмыстарын енгізіп, зондтық әдіспен жұмыс жасаймыз.

Зертхана барысында зондтың жинақтаушы ауданы өзгеретіні анықталды. Осының нәтижесінде ток күшінің мәні біршама өзгеретіндігі байқалды. Мақаланың бірден-бір өзектілігі ретінде осы мәселенің шешімі қарастырылады. Зондтың жинақтаушы ауданы қуатты разрядтармен жұмыс кезінде тозаңданып, балқу процессіне ұшырайды. Мұның алдын алу үшін арнайы конструкция жасалды.

Алдыңғы мақаламызда [1] жарық ағынының параметрлері арқылы плазма температурасын бағалауға арналған құрылғыны дайындау жайлы бірқатар жұмыстарда өлшеу қателіктері және зерттеу құрылғысын дайындау жайлы ақпараттармен бөлістік. Мұның осы мақаламен бірден-бір байланысы электродтардың қызып, тозаңдануы, тіпті жоғары қуат көзінде балқып кетуі болып табылады. Зонд әдісін қолдану барысында оның конструкциясы және материал түрі оның балқуына, тозаңдануына алып келеді.

Оқу-әдістемелік құралда [2] плазма ағынының электрондар концентрациясын анықтаудың спектрлік әдісі жазылған. Алайда, құрылғылардың сапасына байланысты оптикалық әдістегі жарық интенсивтілігі арқылы плазма температурасын өлшеу

жұмысында көптеген қателіктер орын алады және құрылғы бағасы көп жағдайда қолжетімсіз.

Мақалаға кіріспес бұрын тақырыпқа сәйкес бірнеше ғалымдардың жасаған зерттеулеріне әдеби шолу жұмысы жүргізіліп, зертханалық жұмыс барысында ондағы ескертулер ескерілді.

1 кесте. Зонд теориясы негізінде плазма параметрлерін анықтауға арналған зерттеулерге шолу

№	Зерттеушілер	Жұмыс атауы	Плазма түрі	Қолданылған әдіс	Негізгі нәтижелер	Жарияланған жылы
1	Regodón, Díaz-Cabrera, Fernández Palop, Ballesteros	Low Electron Temperature Plasma Diagnosis: Revisiting Langmuir Electrostatic Probes	Төмен температуралы плазма	Лэнгмюр зонды	Электрон тығыздығы мен температураны анықтау үшін IV сипаттамаларын талдау	2021
2	Hamad, Farok	Ion Source Plasma Parameters Measurement using Langmuir Probe	Аргон плазмасы	Цилиндрлік Лэнгмюр зонды	Электрон тығыздығы, температура, қалқымалы және плазма потенциалдарын өлшеу	2019
3	Peterson, Coumou, Larson, Shannon	Microsecond resolved electron density measurements with a hairpin resonator probe in a pulsed ICP discharge	Импульсті индуктивті байланысқан плазма	Шаш тәрізді резонатор зонды	Микросекундтық уақыттық рұқсатпен электрон тығыздығын өлшеу	2016
4	Поров және т.б.	Langmuir Probe Method for Precise Evaluation of the Negative-Ion Density in Electronegative Gas Discharge Magnetized Plasma	Электронегативті газ разряды	Лэнгмюр зонды	Теріс ион тығыздығын дәл анықтау	2013

5	Gonzalez және т.б.	New procedure to estimate plasma parameters through the q-Weibull distribution by using a Langmuir probe in a cold plasma	Суық плазма	Лэнгмюр зонды, q-Weibull үлестірімі	Плазма параметрлерін анықтаудың жаңа әдісі	2022
6	Xie және т.б.	Ion source plasma parameters measurement based on Langmuir probe with commercial frequency sweep	Ион көзі плазмасы	Лэнгмюр зонды, жиілік сканері	Электрон тығыздығы мен температураны жылдам өлшеу	2010
7	El Shaer және т.б.	Computerized Langmuir Probe Measurements in a Capacitively Coupled RF Discharge	Капацитивті байланысқан RF разряды	Компьютерлендірілген Лэнгмюр зонды	Электрон тығыздығының кеңістіктік таралуын өлшеу	2014
8	Chauhan, Prakash, Singh	Design and Development of Langmuir Probe Sensor for Electron Temperature and Electron Density Measurement of Plasma	Жалпы плазма	Лэнгмюр зонды	Электрон тығыздығы мен температурасын өлшеу үшін сенсорды жобалау	2013

Ескерту: Кестедегі мақалалар тізімі әртүрлі ғылыми журналдардан алынған, сондықтан 1 кестеге сілтеме жасау мүмкін емес.

Әдістеме

Зонд теориясы барысында мынадай шарттарды ескеру қажет:

Квазибейтарап ортада электрондардың жылдамдықтары бойынша таралуы – Максвеллдік болады;

Плазма арасында орналасқан зонд маңында қалыңдығы Дебай радиусының бірнеше мәніне тең көлемдік зарядтар қабаты пайда болады. Сондықтанда, экрандалу нәтижесі кезінде зондтың плазмаға әсерін елемейміз;

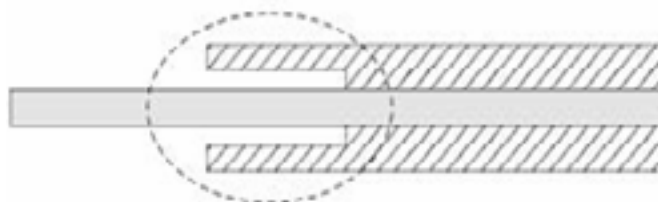
Цилиндрлік зондтың өлшемі көлемдік зарядтар қабатынан елеулі көп болады. Демек, зондтың жинақтаушы бетінің ауданы көлемдік зарядтың сыртқы қабатының ауданына тең және сол бетке келіп түскен зарядтар зонд потенциалынан тәуелді тебіледі немесе жұтылады.

Егер зондтың плазмамен салыстырғандағы потенциалы U зонд маңайындағы әсерге ұшырамаған плазманың потенциалынан U_0 кіші болса, онда электрондар тежеуіш өріске тап болады және көлемдік зарядтар қабатындағы электрондардың концентрацияларының таралуы Больцмандық заңдылықпен анықталады [3]:

$$n_e = n_{e0} e^{\left| \frac{e(U-U_0)}{kT_e} \right|} \quad (1)$$

Мұндағы n_{e0} – плазмадағы электрондардың концентрациясы, k – Больцман тұрақтысы, T_e – электрон температурасы.

Олардан бөлек зондтың жинақтаушы ауданының қуатты разрядтарда балқып, тозаң жинайтыны белгілі болды. Зонд жинайтын ток оның плазмамен шекаралас беткі ауданына тәуелді. Осылайша оқшаулаушы бетінде ток өткізгіш қабат пайда болады. Егер зондтың жұмыс беті осы қабатпен электрлік байланыста болса, тиімді жинақтаушы бет едәуір өзгереді, яғни ауданы ұлғаяды. Мұның алдын алу үшін арнайы конструкциялы (1 суретте үзік сызықтармен қоршалған аудан) зонд жасалды.



1 сурет. Зонд конструкциясы

Төменгі температуралы плазманы зерттеуде зонд теориясын қолдана отырып оның квазибейтараптық шартын дәлелдейміз. Ол үшін зертханада алынған вольт-амперлік сипаттамасын пайдаланып, ары қарай зонд теориясы арқылы мәндерді есептейміз.

Потенциал теріс болғанда электрондар зондқа жете алмайды да, токтың басым бөлігін иондар құрайды. Потенциал жоғарылаған сайын зондқа соғұрлым көп электрондар келеді. Зондтың қорытқы ток шамасы электрондар мен иондар ток күшінен құралады.

$$I = I_i + I_e \quad (2)$$

Молекулалық-кинетикалық теорияға сәйкес зондтағы ток күші келесіге тең [4]:

$$I = \frac{1}{4} S e n_e (\langle v_e \rangle - \langle v_i \rangle) \quad (3)$$

Мұндағы S – жинақтаушы бетінің ауданы, e – электрон заряды, ал $\langle v_e \rangle$, $\langle v_i \rangle$ болса –

электрондар мен иондардың жылулық қозғалысының орташа жылдамдықтары болып табылады. Электрондардың орташа жылдамдығы келесідей [5]:

$$\langle v_e \rangle = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m}} \quad (4)$$

m – электронның массасы, k – Больцман тұрақтысы. Иондардың массасы электрон массасынан елеулі көп екені белгілі. Сондықтан потенциал нөлге тең болған кездегі зонд арқылы өтетін токтың басым бөлігі электрондық болады [4]:

$$I_{e0} = \frac{1}{4} S e n_e \langle v_e \rangle \quad (5)$$

Қанығу тогы арқылы электрондардың концентрациясын келесідей өрнектейміз:

$$n_e = \frac{4I_{e0}}{S e v_e} \quad (6)$$

Электрондық токтың шамасы үлкен болғандықтан оның қанығу тогына жетуі күрделі, сондықтанда иондық ток шамасын пайдаланамыз. Осы жерден плазманың квазибейтарап орта екенін көре аламыз [6]:

$$n_e = \frac{I_i}{0,52 S e \sqrt{\frac{kT_e}{M}}} \quad (7)$$

Мұндағы M – плазма құраушы газ иондарының массасы, I_i – иондардың қанығу тогы.

Импульсті плазма ағынын зерттеуде Фарадей цилиндрін қолданамыз. Фарадей цилиндрі екі электродтан тұратын өлшеуіш құрал. Ішкі электроды көміртегіден, ал сыртқы электроды мыстан жасалған. Екеуінің арасындағы изоляция фотопластты цилиндрдің көмегімен жүзеге асырылған. Сыртқы электродтың бетіндегі саңылаудың диаметрі 150 мкм шамасында. Зерттелетін бөлшекке қарай цилиндрге оң немесе теріс заряд берілуі тиіс. Электродтардың арасын электрлік оқшаулау үшін фотопласт пайдаланамыз. Плазмада локальді термодинамикалық тепе-теңдік болса, осы жуықтауға сәйкес плазмада бөлшектердің таралуы Больцмандық болады [7]:

$$n_e = n_i = n_0 e^{-\frac{eU(r)}{kT_e}} \quad (8)$$

r – көлемдік заряд қабатының радиусы.

Иондардың жылдамдығын электрондардың температурасының шамасын пайдаланып, Бом критерийінің негізінде табуға болады [6]:

$$v_i = \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} \quad (9)$$

Мұндағы T_e – электрондардың температурасы, ал M_i – иондардың массасы, k – Больцман тұрақтысы.

Зонд маңындағы көлемдік зарядтың шекарасындағы иондар ағынының тығыздығы олардың концентрациялары мен жылдамдықтары арқылы анықталады:

$$j_i = en(r)v(r) \quad (9)$$

Мұндағы $n(r)$ – зонд маңындағы иондар концентрациясы, ал $v(r)$ – олардың зонд маңындағы ағынының жылдамдығы. Электрондардың концентрациясы көлемдік заряд шекарасында зондқа жақындаған сайын төмендей бастайды. Осыған байланысты көлемдік заряд шекарасындағы потенциалдың түрі келесідей болады [5]:

$$U_c \approx \frac{kT_e}{e} \quad (10)$$

Осы потенциалмен иондардың жылдамдығы анықталады [8]:

$$v(r) = \sqrt{\frac{2eU_c}{M_i}} \quad (11)$$

Зондтағы иондық ток өрнегі (9) мен (11) қатынастарын пайдаланып аламыз.

$$I_i = en_0 S_c \sqrt{\frac{2eU_c}{M_i}} \exp \left[-\frac{eU_c}{kT_e} \right] \quad (12)$$

S_c – көлемдік заряд қабатының ауданын (10) ескере отырып, (12) келесідей өрнектейміз:

$$I_i = en_0 S_c \sqrt{\frac{kT_e}{M_i}} \quad (13)$$

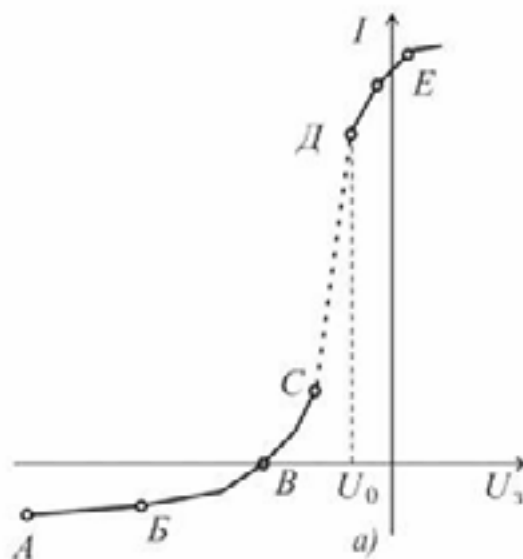
Фарадей цилиндірі зонд секілді жұмыс жасағандықтан цилиндрлік зонд үшін (13) төмендегідей жазылады:

$$I_i \approx 0,4en_0 S_c \sqrt{\frac{2kT_e}{M_i}} \quad (14)$$

Мұндағы M_i – плазма құраушы газ иондарының массасы. Алынған мәнді (7) өрнегіне қойып, бөлшектердің концентрациясын анықтауға болады.

Нәтижелер мен талқылау

Зертханада алынған нәтижелерге сәйкес вольт-амперлік сипаттаманың жалпы түрі тұрғызылды.



2-сурет. Зондтың вольт-амперлік сипаттамасы

Мұндағы A нүктесінде иондар зондтың маңайында көлемдік оң зарядтар қабатын құрайды да, сипаттама қанығуға жақындай түседі. Зондтағы қорытқы ток шамасының абсолют мәні төмендейді де, B нүктесінде 0 -ге тең болады. Бұл нүктедегі потенциал қалқымалы деп аталады. Егер кернеу шамасын азайта беретін болсақ, BC аралығында көлемдік зарядтар қабаты арасынан электрондар тоғы үлкейетінін көреміз. Кернеудің оң мәндерінде электрондар күшті өріс әсерінен зондтың бағытына қарай үдей қозғалады да, ал оң иондар кедергіге ұшырайды. Зондтың маңайында теріс көлемді зарядтар қабаты қалыптасып, DE бөлігінде сипаттама қанығуға жақын болады. Ал D нүктесінде $U_3 = U_0$ болған кезде, зондтағы ток бөлшектердің жылулық қозғалысының ағынымен ғана анықталады. Осы жерден (3) өрнек арқылы электрондар үшін орташа жылдамдық анықталды.

Осыған дейін совет ғалымдары плазманың квазибейтараптығын тәжірибелік түрде зерттеп, оның қасиеттерін дәлелдеген. Атап айтқанда, Леонид Арцимович пен оның әріптестері токамак құрылғыларында жүргізген зерттеулерінде плазманың квазибейтараптығын растаған. Бұл зерттеулерде плазмадағы оң және теріс зарядтардың теңгерімі, яғни квазибейтараптық, плазманың тұрақтылығы мен басқарылуы үшін маңызды фактор ретінде қарастырылған. Мысалы, 1971 жылы В.С. Муховатов пен В.Д. Шафранов "Plasma equilibrium in a Tokamak" атты мақаласында токамактағы плазманың тепе-теңдік жағдайын сипаттап, квазибейтараптықтың рөлін талдаған. Бұл мақалада плазманың токамак құрылғысындағы тепе-теңдік жағдайы мен квазибейтараптықтың маңыздылығы қарастырылған [9].

Сонымен қатар, Ю.К. Куриленков және әріптестері 2022 жылы "On the Plasma Quasineutrality under Oscillatory Confinement Based on a Nanosecond Vacuum Discharge" атты мақаласында плазманың квазибейтараптығын зерттеген. Бұл зерттеуде наносекундтық вакуумдық разряд негізінде плазманың квазибейтараптығы талданған [10].

Плазма параметрлерін зондық әдіспен анықтау алғашқыда оңай көрінгенімен процессте туындайтын қиындықтар жеткілікті. Зондтың беткі қабатына электрондардың шығу жұмысы тәуелді. kT_e шамасы бірнеше электронвольттан аспайтын болса, уақыт бойынша шаманың өзгеруі мен зонд бетінің әрбір бөлігі үшін шығу жұмысының айырмасы зонд сипаттамасына әсер етеді. Сондықтан зондты алғаш вакуумға орналастырған сәтте оны газсыздандырып, бірнеше секунд қыздыру қажет.

Иондар зонд бетінен екінші реттік электрондарды шығаратын болса, осы сәтте теріс зарядты зондқа иондар ағыны түсе бастайды. Сондықтан оң ығысу кезінде электрондар зондты тастап кете алмайды да ешқандай рөл атқармай қалады. Екінші реттік эмиссия эффектісін ескеру өте қиын болғандықтан оның алдын алады. Сондықтанда зонд екінші реттік эмиссия коэффициенті аз материалдан болуы қажет және ол төмен кернеуде жұмыс істеуі керек. Бірақ қуатты разрядтарда бұл эффектті алып тастау әрдайым мүмкін емес. Оған қоса мұнда униполяр доға пайда болуы да мүмкін. Бұл сәтте анодты көлемдік зарядтар қабатының шекарасы, ал катод қызметін зонд атқарады.

Кейде әлсіз иондалған плазмада зонд маңайындағы зарядтардың тығыздығы төмендеп кетуі мүмкін. Зонд пен оны оқшаулаған материалдан атомдар қоспасы бөлінеді. Бұл атомдар қозу нәтижесінде өзінен энергия бөледі де электрондық газ өткізгішін азайтып, оны суытады.

Эксперимент процессінде аталған проблемалар туындап, түзету жұмыстары жүргізілді. Нәтижесінде қажетті шамалар өлшеніп, Зонд теориясы төменгі температуралы және импульсті плазмаларының иондарының концентрациясын анықтауда қатар қолданылды.

Қорытынды

Бұл жұмыста плазманың параметрлері зерттелді. Дәлірек айтсақ зонд әдісі арқылы төменгі температуралы және импульсті плазманың иондар мен электрондар концентрациялары анықталды. Есептеулер жүргізу барысында екі жағдайда да зонд теориясы қолданылды.

Жұмыс барысында туындайтын қиындықтар мен проблемалар талқыланып, олардың шешімі нақтыланды. Алдыңғы мақалада [1] жарық ағынының параметрлері көмегімен плазма температурасын бағалауға арналған құрылғыны әзірлеу әдісі көрсетілген. Аталған қиындықтар ол кезде де туындады.

Алынған мәндерді өңдеуде зонд теориясының тиімділігі көрсетілді. Больцман заңы арқылы плазма ағынындағы бөлшектердің орташа жылдамдығы есептеліп, әрі қарай олардың концентрациялары анықталды. Плазманың квазибейтарап орта екендігі дәлелденді.

Жұмыстың бастапқы кезеңінде әдебиеттерге шолу жасалды. Нәтижесінде ұқсас зерттеулер [2] анықталды. Бірақ ол жерде бір теорияны плазманың басқа түрлеріне қолдану әдісі көрсетілмеген.

Плазма ағынының иондар мен электрондар концентрациясын анықтаудың маңызы зор. Ал бір теорияны басқа жағдайда қолдану өз тиімділігін береді. Нәтижесінде зонд теориясының қарапайымдылығы мен өзге әдістерге қарағанда тиімділігі көрсетілді.

Импульсті және төменгі температуралы плазманың параметрлерін анықтауда зонд теориясы қолданылып, осы теорияның негізінде теңдеулер жинақталып, иондардың концентрациясын анықтау үшін формулалар қорытылды.

Авторлардың қосқан үлесі

Сейтханова А.К., Нурбердиев А.Т. – мақаланың тұжырымдамасына үлес қосты;

Нурбердиев А.Т., Тасуов Б. – мақаланың рәсімделуіне үлес қосты.

Әдебиеттер тізімі

1. А.К. Сейтханова, А.Т. Нурбердиев, С. Тамаев, Б. Тасуов, Қ.Ш. Әбидин, *Жарық ағынының параметрлері арқылы плазма температурасын бағалауға арналған құрылғыны әзірлеу*, Торайғыров хабаршысы. Физика, математика және компьютерлік ғылымдар сериясы. №1, 207-217 б. (2025), <https://vestnik-pm.tou.edu.kz/storage/journals/130.pdf>
2. М.Қ. Досболаев, Ә.Б. Тәжен, *Плазманы зерттеу әдістері* (Қазақ университеті, Алматы, 2018).
3. M.A. Lieberman, *Principles of plasma discharges and materials processing*, (New York, Wiley, 1994).
4. K.I. Oyama, C.Z.Cheng, *Langmuir probe, An introduction to space instrumentation*, pp.63-75 (2013). DOI:10.5047/aisi.010
5. E.V. Shun'ko, *Langmuir probe in theory and practice* (BrownWalker Press, Universal Publishers, 2008).
6. A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, M.I. Pshikov, E.A. Usenov, *Measurement of the velocity of pulsed plasma flow at the pw-7 installation*, Herald of Kazakh-British technical university 21(3), p.273-280(2024). DOI: 10.55452/1998-6688-2024-21-3-273-280
7. M.K. Dosbolayev, Zh.B. Igibayev, T. Ramazanov, *Study of coaxial pulsed plasma thruster with graphite propellant*, Conference: 2024 IEEE International Conference on Plasma. DOI:10.1109/ICOPS58192.2024.10627004
8. A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, Zh.B. Igibayev, A. Utegenov, *Investigation of the plasma column evolution and dynamics in the PW-7 plasma accelerator*, Physical Sciences and Technology 10(1) (2023). DOI:10.26577/phst.2023.v10.i1.06
9. Y.K. Kurilenkov, V.P. Tarakanov, A.V. Oginov, S.Y. Gus'kov, I.S. Samoylov, *On the Plasma Quasineutrality under Oscillatory Confinement Based on a Nanosecond Vacuum Discharge*, p.567-573 (2022). DOI: 10.1134/S1063780X22200132
10. V.S. Mukhovatov, V.D. Shafranov, *Plasma equilibrium in a Tokamak*, Nucl. Fusion 11 (1971). DOI 10.1088/0029-5515/11/6/005

А.К. Сейтханова*¹, А.Т. Нурбердиев², Б. Тасуов³

¹Павлодарский педагогический университет имени А. Маргулана, Павлодар, Казахстан

^{2,3}Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан

(E-mail: ainur1179@mail.ru)

Определение концентрации ионов и электронов в низкотемпературном и импульсном потоке плазмы на основе теории зондов

Аннотация. Хотя плазма является четвертым состоянием вещества и квазинейтральной средой, мы обычно рассматриваем плазму как имеющую высокие и низкие температуры, равновесную и неравновесную, идеальную и неидеальную. Соответственно, нам необходимо использовать

различные методы и инструменты для их изучения. Однако в этой статье мы покажем, что ту же самую теорию исследования можно применить к некоторым типам искусственной плазмы, или же мы воспользуемся другим методом проверки полученных физических величин. В результате исследований методом электрического зонда определена концентрация ионов и электронов в низкотемпературной плазме (тлеющий разряд). В лабораторных условиях для снятия вольт-амперных характеристик можно использовать электрический зонд цилиндрического типа. Кроме того, энергия ионов в импульсном потоке плазмы определялась с помощью цилиндра Фарадея. Заряды, попадающие в цилиндр Фарадея, сталкиваются с поверхностью внутреннего электрода. В результате мы регистрируем ток, генерируемый в электрической цепи, с помощью осциллографа. Существует несколько методов определения концентрации ионов с использованием цилиндра Фарадея. Но мы будем использовать теорию, связанную с электрическим зондом при изучении низких температур. В данной статье мы докажем, что плазма является квазинейтральной средой, используя уравнения для расчета состава плазмы.

Ранее было подготовлено устройство для определения параметров плазмы. В ходе работы было выявлено, что при неправильной подготовке формы зонда возникают такие проблемы, как плавление и распыление. В данной статье представлена окончательная версия подготовленной конструкции зонда.

Лабораторные разделы статьи полностью разработаны на физико-техническом факультете Казахского национального университета имени аль-Фараби.

Ключевые слова: плазма; концентрация ионов; квазинейтральная среда; цилиндр Фарадея; электрический зонд.

A.K. Seitkhanova^{*1}, A.T. Nurberdiyev², B. Tassuov³

¹*Pavlodar Pedagogical University named after A. Margulan, Pavlodar, Kazakhstan,*

^{2,3}*M.Kh. Dulati Taraz University, Taraz, Kazakhstan,*

(E-mail: ainur1179@mail.ru)

Determination of the concentration of ions and electrons in a low-temperature and pulsed plasma flow based on the probe theory

Abstract. Although plasma is the fourth state of matter and a quasi-neutral medium, we usually consider plasma as having high and low temperatures, equilibrium and nonequilibrium, ideal and non-ideal. Accordingly, we need to use different methods and tools to study them. However, in this article, we will show that the same research theory can be applied to some types of artificial plasma, or we will use another method to check the obtained physical quantities. As a result of studies using the electric probe method, the concentration of ions and electrons in low-temperature plasma (glow discharge) was determined. In laboratory conditions, a cylindrical electric probe can be used to record the volt-ampere characteristics. In addition, the energy of ions in a pulsed plasma flow was determined using a Faraday cup. The charges entering the Faraday cup collide with the surface of the inner electrode. As a result, we register the current generated in the electric circuit using an oscilloscope. There are several methods for determining the ion concentration using a Faraday cup. But we will use the theory associated with the

electric probe in studying low temperatures. In this paper, we will prove that plasma is a quasi-neutral medium using equations to calculate the composition of plasma.

Previously, a device for determining plasma parameters was prepared. During the work, it was found that if the probe shape was not prepared correctly, problems such as melting and sputtering would occur. This article presents the final version of the prepared probe design.

The laboratory sections of the article were entirely developed at the "Physical and Technical Faculty" of the Al-Farabi Kazakh National University.

Keywords: Plasma; ion concentration; quasi-neutral medium; Faraday cup; electric probe.

References

1. A.K. Seytkhanova, A.T. Nurberdiyev, S. Tamaev, B. Tasuov, K.Sh. Abidin, *Zharik agynyn parametrleri arkyly plazma temperaturasy bagalauga arналған qurylgyny azirleu* [Development of a device for estimating plasma temperature through radiation flux parameters], *Toraygyrov khabarsysy. Fizika, matematika zhane kompyuterlik gylymdar seriyasy* [Toraygyrov Bulletin. Series: Physics, Mathematics and Computer Science] №1, pp. 207–217 (2025). Available at: <https://vestnik-pm.tou.edu.kz/storage/journals/130.pdf>
2. Dosbolaev M.K., Tazhen A.B., *Plazmany zertteu adisteri* [Methods for Plasma Research.] (Kazak universiteti, Almaty, 2018 [Kazakh University, Almaty, 2018])
3. M.A. Lieberman, *Principles of plasma discharges and materials processing*, (New York, Wiley, 1994).
4. K.I. Oyama, C.Z.Cheng, *Langmuir probe, An introduction to space instrumentation*, pp.63-75 (2013). DOI:10.5047/aisi.010
5. E.V. Shun'ko, *Langmuir probe in theory and practice* (BrownWalker Press, Universal Publishers, 2008).
6. A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, M.I. Pshikov, E.A. Usenov, *Measurement of the velocity of pulsed plasma flow at the pw-7 installation*, *Herald of Kazakh-British technical university* 21(3), p.273-280(2024). DOI: 10.55452/1998-6688-2024-21-3-273-280
7. M.K. Dosbolayev, Zh.B. Igibayev, T. Ramazanov, *Study of coaxial pulsed plasma thruster with graphite propellant*, Conference: 2024 IEEE International Conference on Plasma. DOI:10.1109/ICOPS58192.2024.10627004
8. A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, Zh.B. Igibayev, A. Utegenov, *Investigation of the plasma column evolution and dynamics in the PW-7 plasma accelerator*, *Physical Sciences and Technology* 10(1) (2023). DOI:10.26577/phst.2023.v10.i1.06
9. Y.K. Kurilenkov, V.P. Tarakanov, A.V. Oginov, S.Y. Gus'kov, I.S. Samoylov, *On the Plasma Quasineutrality under Oscillatory Confinement Based on a Nanosecond Vacuum Discharge*, p.567-573 (2022). DOI: 10.1134/S1063780X22200132
10. V.S. Mukhovatov, V.D. Shafranov, *Plasma equilibrium in a Tokamak*, *Nucl. Fusion* 11 (1971). DOI 10.1088/0029-5515/11/6/005

Авторлар туралы мәлімет:

Сейтханова А.К. – PhD, Ә.Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан

Нурбердиев А.Т. – магистр, М.Х.Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан

Досболаев М.К. – доцент, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

Тажен А.Б. – Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің Эксперименттік физика және технология ғылыми-зерттеу институтының ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан

Сейтханова А.К. – PhD, Павлодарский педагогический университет им. А.Маргулана, Павлодар, Казахстан.

Нурбердиев А.Т. – магистр, Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан

Досболаев М.К. – доцент, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Тажен А.Б. – научный сотрудник Научно-исследовательского института экспериментальной физики и технологий Казахского национального университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

Seytkhanova A.K. – PhD, Pavlodar Pedagogical University named after A. Margulan, Pavlodar, Kazakhstan

Nurberdiev A.T. – Master, M.H. Dulati Taraz University, Taraz, Kazakhstan

Dosbolaev M.K. – Associate Professor, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

Tadzhen A.B. – Researcher, Research Institute of Experimental Physics and Technology, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



IRSTI 34.49.23
Scientific article

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-45-59>

Comparative Assessment of the Radiation Situation in Settlements Near the North Kazakhstan and Shu-Sarysu Uranium Provinces

M. Bakhtin¹, Ye. Kashkinbayev¹, M. Aumalikova*¹, D. Ibrayeva¹, A. Tazhedinova²,
N. Altayeva², S. Zhaumitbay¹

¹Institute of radiobiology and radiation protection, NCJSC "Astana medical university", Astana, Kazakhstan

²Medical Genetics and Molecular Biology Department, NCJSC "Astana Medical University", Astana, Kazakhstan

(E-mail: aumalikova.m@amu.kz)

Abstract. This paper presents a comparative assessment of the radiation situation in populated areas located near the North Kazakhstan and Shu-Sarysu uranium provinces. Using gamma spectrometry, pedestrian dosimetry, and radon monitoring, the study assesses gamma radiation levels, radon equilibrium equivalent volume activity, and results of radiospectrometry analyses of soil and water. Additionally, the influence of local geological and hydrogeological conditions, as well as historical mining activities, was analyzed to identify potential factors contributing to spatial heterogeneity in radiation indicators. The results indicate that in the territories of populated areas located near the two uranium provinces, in general, they remain within the natural background, but there are anomalous zones with excess radon EEVA values, and in some populated areas of the North Kazakhstan region, exceeding the limit values. Elevated concentrations of naturally occurring radionuclides were detected in certain soil and groundwater samples, suggesting localized sources of radiological impact. A comparison with historical monitoring data allowed for the identification of temporal trends and assessment of the effectiveness of existing environmental protection measures. The results emphasize the importance of continuous and comprehensive, systematic radiation monitoring programs in the territories of both mothballed and operating uranium mines to reliably protect public health and the environment.

Key words: Uranium mining; radiation exposure; radon; radiological monitoring; uranium province

Introduction

The Republic of Kazakhstan is a unique uranium ore region, accounting for approximately 30% of the world's uranium reserves. Kazakhstan ranks first in the world in uranium ore production. The major uranium deposits within Kazakhstan are grouped into six uranium

Received 26.04.2025. Revised 29.05.2025. Accepted 04.06.2025. Available online 25.06.2025.

¹ *the corresponding author

ore provinces: Shu-Sarysu, North Kazakhstan, Syrdarya, Ili, Caspian, and Balkhash provinces. The largest of these are the Shu-Sarysu province, which contains about 69.7%, and the North Kazakhstan province, which contains about 12.1% of Kazakhstan's total uranium reserves [1,2].

These provinces form the foundation of Kazakhstan's uranium industry, securing the country's leading position in global uranium production and export.

The intensive industrial development of the North Kazakhstan province began in the mid-1950s, almost simultaneously with its discovery and the commencement of large-scale geological exploration activities in Kazakhstan. The deposits of the North Kazakhstan uranium ore province were developed exclusively through mining (both underground and open-pit methods), which led to significant negative changes in the surrounding environment [3]. Currently, the territory of the North Kazakhstan and Akmolinsk regions hosts decommissioned uranium facilities and radioactive waste storage sites. It should be noted that the main work on the conservation and liquidation of uranium deposits in the North Kazakhstan region was completed as early as 2007 [4]. However, there are no monitoring activities for the radioecological condition of natural environment objects. As a result, the population living near these areas is increasingly exposed to radiation, potentially suffering chronic radiation-chemical effects from low doses of ionizing radiation, as well as other dangerous and harmful radioactive substances and industrial factors. This combination can significantly amplify the effects of low-level radiation exposure [5].

Uranium exploration and mining in the Shu-Sarysu province began to develop actively in the 1950s and 1960s. Initial geological exploration activities related to the search for uranium deposits began in the 1950s, when geologists in Kazakhstan started to investigate potential areas with uranium reserves, including the territory of the Shu-Sarysu region.

In the early 1970s, industrial uranium mining commenced based on the explored deposits. The Shu-Sarysu uranium province became a key region for uranium production in the country, and Kazakhstan as a whole began to take a leading position in the global market. As infrastructure and mining technologies developed, production volumes continued to grow. Subsequently, uranium mining in this region became not only a significant economic factor for the country but also an important element in the global energy system.

The Shu-Sarysu province accounts for 60.5% of Kazakhstan's total uranium reserves and resources. Currently, uranium is being mined through in-situ leaching at the Uvanas, Mynkuduk, Kanzhugan, Moinkum, Akdala, Budennovskoye, and Inkai deposits. However, information regarding the radiation situation in this region is limited. Researching to assess the radiation situation in the territory and nearby settlements is an important step in ensuring the safety of the population, protecting public health and the environment, as well as in taking timely measures in case of elevated radiation levels. Such studies allow for the identification of potential risks, the assessment of radiation impact on ecosystems, and the development of effective strategies to minimize possible consequences.

It is known that uranium's radiation effect on humans can lead to stochastic radiation effects, including oncological diseases, genetic disorders, and non-oncological somatic diseases [6,7]. According to the International Agency for Research on Cancer, cancer morbidity and mortality are important and objective criteria for assessing the impact of ionizing radiation [8,9]. It is known that prolonged exposure to uranium and its daughter products increases the

contribution of the radiation component. Based on the level of exposure (chronic effects of low doses), the mechanism of action (radiation-chemical), and the biological role of uranium in the life processes of organisms, the analysis is based on the results of long-term consequences and territories with varying uranium content in the environment [10].

This work aims to assess the radiation situation in the territories of settlements located near two major uranium provinces of Kazakhstan.

Materials and Methods

The study provides an assessment of the radiation situation and analyzes the results of the author's own research conducted in the territories of settlements located near decommissioned uranium mines and radioactive waste storage sites in North Kazakhstan: the settlement of Aksu, the settlement of Shantobe in the Akmola region, the settlement of Saumalkol in the North Kazakhstan region, and the territories of settlements located near uranium deposits: the settlements of Taukent, Taikonur, Shu, Zhuantobe, and Tasty in the Turkestan region (Fig. 1).



Figure 1. Locations of settlements and uranium provinces in Kazakhstan, showing the distribution of uranium reserves.

To assess the radiation situation, the following measurement methods were used:

Gamma scanning of the territory was conducted using a mobile automotive radiological laboratory "Gamma-Sensor" (SPC DOZA, Moscow, Russia) (Fig. 2). The spectrum acquisition time on the spectrometer was set to 15 s. With this acquisition time, the statistical deviation of the measured value of the equivalent dose rate (EDR) of gamma radiation at a given point from its root-mean-square value was no more than 0.005 $\mu\text{Sv/h}$ with a confidence level of 0.95. The vehicle speed during the survey was 6–10 km/h. The spectrometer was calibrated daily at the control point for energy, and the calibration for the dose rate and the values of the geodetic coordinates were checked simultaneously.



Figure 2. Mobile automotive radiological laboratory “Gamma-Sensor”

Pedestrian measurements of gamma background in background areas, in the territories of settlements, and outside the sanitary protection zones (SPZ) of decommissioned uranium deposits were performed using dosimeters DKS-AT-1123 (ATOMTEX Scientific Production Unitary Enterprise, Minsk, Republic of Belarus) and MKS-AT-1117M (ATOMTEX Scientific Production Unitary Enterprise, Minsk, Republic of Belarus) (Fig. 3). The dose rate measurements were conducted outdoors at a distance of 5 meters from the exterior walls, at a height of 1 meter. At each location, between 8 and 10 measurements were performed, and the average value was used for further analysis. The instrumental relative uncertainty of the DKS-AT-1123 dosimeters was 25%. All measurements were carried out in accordance with IAEA guidelines [11]. The relative uncertainty in the estimation of $H^*(10)$, considering the repeatability of in-situ measurements using the MKS-AT-1117M device, was approximately 20%. At each survey point, measurements of the ambient dose equivalent rate (EDR) were taken both at ground level and at a height of 1 meter.



Figure 3. Dosimeters DKS-AT-1123 and MKS-AT-1117M

The equivalent equilibrium volume activity of radon (EEVA) was measured using radon monitors "AlphaRad." The registration of alpha particle pulses from daughter products contained on the filter was carried out using a semiconductor alpha particle detector with an area of 20 cm². The AlphaRad Plus radon monitor (Fig. 4) utilizes a semiconductor detector to measure the equilibrium-equivalent volumetric activity (EEVA). This device detects alpha particles emitted by radon and its short-lived progeny, specifically ²¹⁸Po and ²¹⁴Po, enabling the determination of radon concentration and subsequent calculation of EEVA. The EEVA represents the activity concentration of radon progeny in equilibrium with radon gas in air and is expressed in Bq/m³. All measurements were conducted in accordance with ASTM D6327-10 [12].



Figure 4. AlphaRad Plus radon monitor

Indoor measurements were conducted during the summer season across all surveyed settlements to ensure consistency and enable subsequent comparison of the results. Laboratory analysis of environmental object samples for radionuclide content was conducted in the accredited testing laboratory of radiometry and radiochemistry at the Institute of Radiobiology and Radiation Protection.

Results

1. Radiation Situation in the Territories of Settlements Located Near Decommissioned Uranium Mines and Radioactive Waste Storage Sites in Northern Kazakhstan

The conducted studies revealed that there are localized contaminated areas in the surveyed settlements. Gamma scanning identified zones with EDR of gamma radiation levels, reaching up to 12 times higher than background values (0.15 µSv/h). The highest EDR levels were recorded near roadways and in the basements of residential buildings, which may be due to both the geological structure and the use of building materials with elevated radioactivity.

The concentration of equivalent equilibrium volume activity of radon (EEVA) in the studied residential and administrative buildings, in some cases, significantly exceeded the permissible

limits. According to the republican regulatory documents maximum permissible level of the EEVA of radon is 200 Bq/m^3 [13]. Among all sources of natural radioactivity, the main contribution to the annual effective dose of radiation to the population is made by radioactive gas, radon. Employees of the Institute of Radiobiology and Radiation Protection in the settlements of Aksu, Shantobe of the Akmola region, and Saumalkol of the North Kazakhstan region measured the EEVA of radon in residential premises in two seasons (winter and summer). In the summer period, the average EEVA of radon in residential and administrative premises of the settlement of Aksu was 144.3 Bq/m^3 , Shantobe 36.4 Bq/m^3 , Saumalkol 399.2 Bq/m^3 , with a standard value of 200 Bq/m^3 . In winter, the highest radon levels were recorded in the settlements of Saumalkol and Aksu, where the exceedances were 45 and 24 times, respectively. A clear correlation was observed between the radon concentration and the presence of cellars, ventilation levels, and seasonal temperature fluctuations, which underscores the need for continuous monitoring and the development of measures to reduce radon levels.

The results of the radon concentration analysis (EEVA) and the corresponding effective dose rate (EDR) presented in the figure are average values for all measurements taken in each settlement (Fig.5). In most of the studied samples, the EEVA values are within the permissible level (less than 200 Bq/m^3), and the EDR values are within the natural radiation background. However, there were anomalous zones that demonstrated a significant excess of both the average radon concentration (over 400 Bq/m^3) and the effective dose rate (over $0.30 \mu\text{Sv/h}$). However, the data shows sharp changes in values, with significant spikes, which suggests the presence of very high radon concentrations found in residential and administrative buildings.

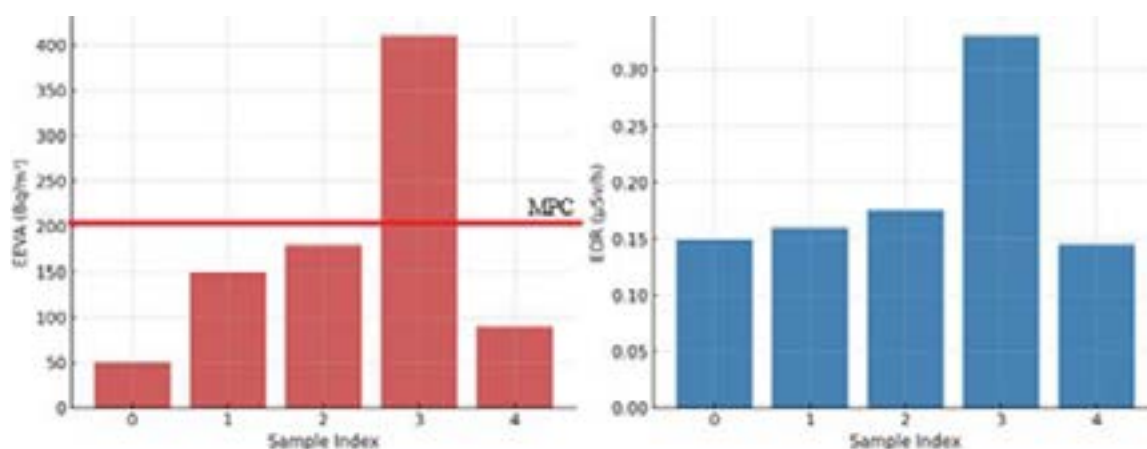


Figure 5. Regression function graph of North Kazakhstan settlements

The analysis of soil samples showed elevated levels of radionuclides, particularly ^{226}Ra and ^{232}Th . Worldwide range of radium-226: 12-120 Bq/kg, potassium-40: 100-1200 Bq/kg (UNSCEAR 2000). In the settlements of Shantobe and Aksu, the activity of ^{226}Ra exceeds the norm by 3.6 and 7.5 times, respectively, while in Saumalkol, the content of ^{232}Th was found to be 1.4 times higher than the permissible limits. The main factors contributing to this level of contamination are the residual effects of uranium and gold mining, as well as the possible use of radioactive contaminated materials in construction.

The water study revealed a significant exceedance of total alpha activity in water sources used by the population. The highest levels of radiation contamination were found in the wells of Saumalkol, where the exceedance of permissible values reached up to 7.6 times. In Shantobe, the exceedance was 1.6 times. However, it is worth noting that these waters are not used for drinking by the population but for livestock watering and garden irrigation. Nevertheless, this highlights the need for the implementation of filtration and purification systems, as well as more careful monitoring of the water supply.

Water samples were taken from wells and boreholes in the territories of the settlements. In the water samples taken from wells in the settlements of Saumalkol, the level of total alpha activity varies from 0.32 Bq/dm³ to 1.53 Bq/dm³, while the total beta activity ranges from 0.05 Bq/dm³ to 0.90 Bq/dm³. In the settlement of Novoukraitse, the water samples from a well (4 meters deep), located 2 km from the deposit, show that total alpha activity exceeds the permissible limit for drinking water by up to 7.6 times. The residents of these settlements consume water for drinking from both wells and a centralized supply. In the water samples collected from wells in the settlements of Aksu and Shantobe, the total alpha activity varied from 0.14 to 0.32 Bq/dm³, while the total beta activity ranged from 0.18 to 0.24 Bq/dm³. In the water sample from Shantobe, the level of alpha activity exceeded the permissible limit for drinking water by up to 1.6 times.

2. Radiation Situation in the Territories of Settlements Located Near Uranium Deposits in Southern Kazakhstan

During gamma scanning, the EDR of gamma radiation in the sanitary protection zones (SPZ) of the deposits varied from 0.06 to 0.10 µSv/h, which corresponds to the background value of the area. However, a radioactive contaminated site was identified in the area of the Mynkuduk uranium deposit, where EDR reached up to 0.56 µSv/h. In the settlements of Taukent, Taikonur, Shu, Zhuantobe, and Tasty in the Turkestan region, the average EDR is 0.08 µSv/h, which is within the background levels.

The values of EEVA in the settlements are as follows: in Taukent, it ranges from 5 to 160 Bq/m³; in Zhuantobe, from 1 to 35 Bq/m³; in Tasty, from 3 to 180 Bq/m³; in Qylty, from 4 to 62 Bq/m³; and in Shu, from 4 to 191 Bq/m³, with the republican maximum permissible value being 200 Bq/m³ [13]. The presented graphs reflect the average values of radon concentration in the air and the corresponding effective annual dose of radiation to the population in five settlements (Fig.6). According to the data obtained, in all samples the radon concentration is below the maximum permissible level (MPC = 200 Bq/m³). Also, the calculated values of the effective annual dose of radiation (EDR) in all settlements do not exceed the background level (less than 0.10 µSv/hour). Thus, based on the analysis results, it can be concluded that the radiation situation in the surveyed settlements is within the permissible values. However, it should be emphasized that these are the results of only the summer season, the studies will be continued and monitoring will be carried out in other seasons.

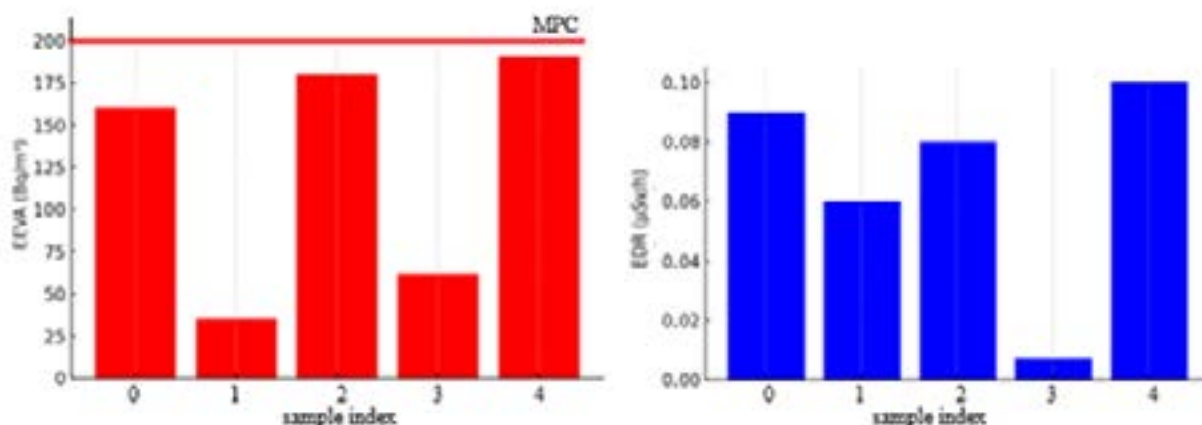


Figure 6. of South Kazakhstan settlements

In the soil samples taken from the settlements, the specific activity of natural radionuclides did not exceed the average national values and was within the permissible limits. Additionally, samples were collected from a radioactive-contaminated site. The analysis revealed that the specific activity of radium-226 was 1729.6 ± 173 Bq/kg, and potassium-40 was 746.6 ± 274.3 Bq/kg. Worldwide range of radium-226: 12–120 Bq/kg, potassium-40: 100–1200 Bq/kg (UNSCEAR 2000). The radium-226 value exceeds the average national value by 14.4 times, which necessitates further research to clarify the sources of contamination, assess its continued impact on the ecosystem and public health, and develop measures to minimize radiation exposure risks.

Water samples were taken from settlements and nearby rivers, such as the Sarysu and Shu rivers. During the study, 11 artesian wells were identified, and samples were collected for analysis. The study of water samples from settlements and rivers showed an average value of total alpha- and beta-emitting radionuclides, $\alpha = 0.03$ and $\beta = 0.05$. The results of the radiometric analysis of the artesian wells showed that the total activity of alpha- and beta-emitting radionuclides in the water ranged from $\alpha = 0.01$ to $\alpha = 0.05$ Bq/dm³ and from $\beta = 0.02$ to $\beta = 0.07$ Bq/dm³. The values of total activity in water samples taken in populated areas and along the Sarysu and Shu rivers did not exceed the maximum permissible value for alpha activity=0.2 and beta activity=1.

Discussion

According to the studies conducted in the territories of settlements near the decommissioned uranium mines and radioactive waste storage sites, there is much more pronounced contamination of the air (EDR), as well as soil, water, and radon levels. This is associated with the history of uranium mining and the use of radioactive building materials. In particular, in some settlements such as Saumalkol and Aksu, the radon concentration exceeds the permissible limits by several dozen times, indicating serious contamination. High levels of alpha activity in non-potable water have also been recorded. At the same time, soil contamination data show that the activity of radionuclides ²²⁶Ra and ²³²Th in certain localized areas of the settlements exceeds the average national values, which may be linked to the residual effects of uranium and

gold mining. It should be noted that uranium mining in the decommissioned uranium mines was carried out using the underground mining method, which is considered more environmentally harmful and leaves behind tailings. Thus, the studies reveal radiation contamination, requiring measures to minimize radiation exposure, such as stricter control over building materials and radon monitoring in residential buildings.

The radiation situation in the Shu-Sarysu uranium province and the nearby settlements is more stable. EDR in most of the settlements remains within background levels, with only a localized area near the Mynkuduk uranium deposit showing elevated gamma radiation levels. Radon concentrations in the air also vary, but overall remain within permissible limits, except in isolated cases. Water from rivers such as the Sarysu and Shu does not show significant radiation contamination, although further monitoring is required. Soil samples from the radioactive-contaminated site showed significant radiation activity, which requires further analysis. It should also be noted that uranium mining by the in-situ leaching method (ISL) impacts environmental contamination, especially of groundwater. The uranium left in the soil may remobilize, leading to the "rebound effect," which temporarily increases the amount of uranium released over a short period, creating a risk of further groundwater contamination[14-16].

Conclusion

Based on the studies conducted in settlements located near the uranium province of Northern Kazakhstan, the radon EEVA and EDR indicators are generally within the normal range, but there are anomalous areas that were found in the territories of the villages of Saumalkol and Aksu, where the radon concentration and alpha activity of water exceed the permissible limits. At the moment, uranium mines located in these territories are mothballed. However, the use of materials from the territories of mothballed uranium mines contributes to the excess of permissible values. The radiation situation in the Shu-Sarysu uranium province is more stable, and the radiation values remain within the background values. However, the in-situ leaching (ISL) method for extracting uranium can also create long-term environmental risks, such as uranium remobilization, leading to groundwater pollution. And this requires additional research. In the future, research will be continued on the complete radiochemical analysis of self-flowing wells and drinking water in the territories of the Shu-Sarysu province and nearby settlements.

Funding

This research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant number IRN AP23488056, "Assessment of the radiation situation and development of measures to reduce negative radiation factors on the environment in the Shu-Sarysu uranium province" (2024–2026).

The contribution of the authors

Bakhtin M. – conceptualization, project administration, supervision;

Kashkinbayev Ye. – methodology, data curation;

Aumalikova M. – laboratory analysis, resources, writing – original draft;

Ibrayeva D. – data acquisition, validation;

Tazhedinova A. – literature review;

Altayeva N. – literature review, editing;

Zhaumitbay S. – sampling.

The authors have no conflict of interest to declare, as all sources used were duly cited and acknowledged.

References

1. D. Ibrayeva, M. Bakhtin, Y. Kashkinbayev et al., *Radiation situation in the territories affected by mining activities in Stepnogorsk areas, Republic of Kazakhstan: pilot study*, *Radiat Prot Dosimetry* 189(4): pp.517-526(2020). DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa068>
2. A.V. Boytsov, *Development of the Global Uranium Industry – Challenges of the Time, Proceedings of the Fifth International Symposium "Uranium: Geology, Resources, Production"*: p. 11-22 (2021)
3. P.Kazymbet, A.Belonog, B.Imasheva, M.Bakhtin, M.Asylbekov, L.Ponyavina, V.Kurokhtin, *Comprehensive Radioecological Study of Uranium Mining Areas and Neighboring Settlements in Northern Kazakhstan*, *Astana Medical Journal* 3: p. 61-65 (2005)
4. *Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan "On the Approval of the Program for the Conservation of Uranium Mining Enterprises and the Elimination of the Consequences of Uranium Ore Development for 2001-2010"*: approved on July 25, 2001, No. 1006, Legal Reference System "Yurist" (2002).
5. F. Bekenova, S. Baydurin, A. Klodzinskiy, Z.Agibaeva *Increase in Relative Risks of Major Chronic Non-communicable Diseases Under Prolonged Radiation-Chemical Exposure*, *Astana Medical Journal* 7(43): p. 140-142(2007)
6. R.Havráňková, *Biological effects of ionizing radiation*, *Cas Lek Cesk.* Winter 159(7-8): p.258-260 (2020)
7. A. Ulanowski, J.C. Kaiser, U. Schneider, L. Walsh, *Lifetime radiation risk of stochastic effects – prospective evaluation for space flight or medicine*, *Ann ICRP* 49(1_suppl): p.200-212 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1177/0146645320956517>
- 8.E.A. Domina, O.L. Kopylenko, V.F. Chekhun, *Evaluation of current factors of radiation-associated carcinogenesis*. *Exp Oncol.* 11: p.151-160 (2023). DOI: 10.15407/exp-oncology.2023.02.151
9. I. Kulhanova, A. Znaor, K.D. Shield, M. Arnold, J. Vignat, M. Charafeddine, I. Fadhil, H. Fouad, A. Al-Omari, A. Saeed Al-Zahrani, A. El-Basmy, A. Shamseddine, F.I. Bray, I. Soerjomataram, *Proportion of cancers attributable to major lifestyle and environmental risk factors in the Eastern Mediterranean region*. *International Journal of Cancer*. Volume 146(3): p.646-656(2019). DOI: 10.1002/ijc.32284
10. A.F.Malenchenko, S.N.Sushko, A.S.Shaforost, *Mutagenic and Tumorigenic Effects of Natural Uranium*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus*. Biological Sciences Series 3: p. 111-118 (2011)
11. *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data*, IAEA-TECDOC-1363, IAEA (2003)
12. ASTM D6327; *10 Standard Test Method for Determination of Radon Decay Product Concentration and Working Level in Indoor Atmospheres by Active Sampling on a Filter*. ASTM International: West Conshohocken (2016)

13. On Approval of the Sanitary Rules "Sanitary and Epidemiological Requirements for Radiation-Hazardous Facilities", Order of the Minister of Health of the Republic of Kazakhstan No. QR DSM-90(2022)
14. E.Ruedig, T.E. Johnson, *An evaluation of health risk to the public as a consequence of in situ uranium mining in Wyoming, USA*, Journal of Environmental Radioactivity 150(215): p.170-178(2015)
15. R. M.Tripathi, S. K.Sahoo, V.N. Jha, A. H.Khan, V.D. Puranik, *Assessment of environmental radioactivity at uranium mining, processing and tailings management facility at Jaduguda, India*, Applied Radiation and Isotopes 66(11): p.1666-1670 (2008)
16. *Contamination Risks Associated with In situ-Recovery Mining for Uranium*, available at: <https://websites.umass.edu/natsci397a-eross/contamination-risks-associated-with-in-situ-recovery-mining-for-uranium/> (date of application: 03.02.2025)

**М. Бахтин¹, Е. Кашкинбаев¹, М. Аумаликова*¹, Д. Ибраева¹, А. Тәжединова², Н. Алтаева²,
С.Жаумитбай¹**

¹Радиобиология және радиациялық қорғаныс институты, «Астана медицина университеті» КеАҚ,
Астана, Қазақстан

²Медициналық генетика және молекулалық биология кафедрасы,
«Астана медицина университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан
(E-mail: aumalikova.m@amu.kz)

Солтүстік Қазақстан және Шу-Сарысу уран провинциялары маңындағы елді мекендердегі радиациялық жағдайды салыстырмалы бағалау

Аңдатпа. Бұл жұмыста Солтүстік Қазақстан және Шу-Сарысу уран провинциялары маңында орналасқан елді мекендердегі радиациялық жағдайға салыстырмалы бағалау жүргізілді. Көлікті гамма-спектрометрия, жаяу далалы гамма-түсірілім және радон мониторингін қолдану әдістері арқылы гамма-сәулелену деңгейлері, радонның тепе-тең көлемдік белсенділігі, сондай-ақ топырақ пен су сынамаларының радиоспектрометриялық талдауының нәтижелері зерттелді. Қосымша түрде зерттеліп отырған аумақтардағы радиациялық көрсеткіштердің кеңістіктік біркелкі еместігінің себептерін және ықтимал экологиялық қауіп аймақтарын анықтау мақсатында жергілікті геологиялық-гидрогеологиялық жағдайлардың, климаттық факторлардың және ұзақ уақыт жүргізілген тау-кен өндіру қызметінің әсері қарастырылды. Жасалынған зерттеу нәтижелері көрсеткендей, Солтүстік Қазақстан және Шу-Сарысу уран провинцияларының жанында орналасқан елді мекендердегі радиациялық фон жалпы алғанда нормативтік деңгейден аспайтыны анықталды. Алайда, кейбір аумақтарда радонның теңдік көлемдік белсенділігінің нормалық деңгейден асуы байқалды, сондай-ақ Солтүстік Қазақстан өңіріндегі елді мекендердің бірқатар аумақтарында санитарлық нормадан жоғары көрсеткіштер тіркелді. Жекелеген топырақ және су сынамаларында табиғи радионуклидтердің шоғырлануының жоғарылауы анықталып, радиациялық әсердің техногендік немесе табиғи локализацияланған көздерінің бар екенін көрсетеді. Архивтік және қазіргі деректерді салыстыру кеңістіктік-уақыттық үрдістерді анықтауға, сондай-ақ қолданыстағы табиғатты қорғау және санитарлық шаралардың тиімділігіне объективті және жан-жақты ғылыми баға беруге мүмкіндік

берді. Алынған нәтижелер жұмыс істеп тұрған және консервацияланған уран кен орындарының әсер аймақтарында халықтың денсаулығын сенімді қорғау, аумақтардың тұрақты әлеуметтік-экологиялық дамуын қамтамасыз ету және қоршаған ортаны ұзақ мерзімді сақтау үшін тұрақты, кешенді және жүйелі радиациялық мониторингтің қажеттілігін айқындайды.

Түйін сөздер: уран өндіру; радиациялық әсер; радон; радиациялық мониторинг; уран провинциясы

**М. Бахтин¹, Е. Кашкинбаев¹, М. Аумаликова^{*1}, Д. Ибраева¹, А. Тажединова², Н. Алтаева²,
С. Жаумитбай¹**

¹*Институт радиобиологии и радиационной защиты, НАО «Медицинский университет Астана»,
Астана, Казахстан*

²*Кафедра медицинской генетики и молекулярной биологии, НАО «Медицинский университет
Астана», Астана, Казахстан
(E-mail: aumalikova.m@amu.kz)*

Сравнительная оценка радиационной обстановки в населённых пунктах, расположенных вблизи урановых провинций Северного Казахстана и Шу-Сарысу

Аннотация. В данной статье представлена сравнительная оценка радиационной обстановки в населённых пунктах, расположенных вблизи Северо-Казахстанской и Шу-Сарысуьской урановых провинций. С использованием гамма-спектрометрии, пешеходной гамма-съёмки и мониторинга радона проведена оценка уровней гамма-излучения, объёмной равновесной объёмной активности радона, а также результатов радиоспектрометрического анализа проб почвы и воды. Дополнительно рассмотрено влияние местных геолого-гидрогеологических условий, климатических факторов и последствий длительной горнодобывающей деятельности с целью выявления причин пространственной неоднородности радиационных показателей и потенциальных зон экологического риска в границах исследуемых территорий. Результаты показали, что в целом радиационный фон в населённых пунктах, расположенных вблизи Северо-Казахстанской и Шу-Сарысуьской урановых провинций, остаётся в пределах нормативных значений. Однако были выявлены аномальные участки с локальными превышениями объёмной активности радона, а в ряде населённых пунктов Северо-Казахстанского региона зафиксированы значения, превышающие установленные санитарные нормы. В отдельных пробах почвы и пробах воды было обнаружено превышение содержания природных радионуклидов, что свидетельствует о наличии локализованных источников радиационного воздействия техногенного или природного происхождения. Сопоставление с архивными и современными данными позволило выявить пространственно-временные тенденции, а также провести объективную и всестороннюю научную оценку текущей эффективности природоохранных и санитарных мероприятий. Полученные результаты подчёркивают необходимость постоянного, комплексного и системного радиационного мониторинга для надёжной защиты здоровья населения, устойчивого социально-экологического развития территорий и долгосрочной охраны окружающей среды в зонах влияния действующих и законсервированных урановых месторождений.

Ключевые слова: уранодобыча; радиационное воздействие; радон; радиационный мониторинг; урановая провинция.

References

1. D. Ibrayeva, M. Bakhtin, Y. Kashkinbayev et al., *Radiation situation in the territories affected by mining activities in Stepnogorsk areas, Republic of Kazakhstan: pilot study, Radiat Prot Dosimetry* 189(4): pp.517-526(2020). DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa068>
2. A.V. Boytsov, *Development of the Global Uranium Industry – Challenges of the Time, Proceedings of the Fifth International Symposium "Uranium: Geology, Resources, Production"*: p. 11-22 (2021)
3. P.Kazymbet, A.Belonog, B.Imasheva, M.Bakhtin, M.Asylbekov, L.Ponyavina, V.Kurokhtin, *Comprehensive Radioecological Study of Uranium Mining Areas and Neighboring Settlements in Northern Kazakhstan*, Astana Medical Journal 3: p. 61-65 (2005)
4. *Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan "On the Approval of the Program for the Conservation of Uranium Mining Enterprises and the Elimination of the Consequences of Uranium Ore Development for 2001-2010"*: approved on July 25, 2001, No. 1006, Legal Reference System "Yurist" (2002).
5. F. Bekenova, S. Baydurin, A. Klodzinskiy, Z. Agibaeva *Increase in Relative Risks of Major Chronic Non-communicable Diseases Under Prolonged Radiation-Chemical Exposure*, Astana Medical Journal 7(43): p. 140-142(2007)
6. R. Havránková, *Biological effects of ionizing radiation*, Cas Lek Cesk. Winter 159(7-8): p.258-260 (2020)
7. A. Ulanowski, J.C. Kaiser, U. Schneider, L. Walsh, *Lifetime radiation risk of stochastic effects - prospective evaluation for space flight or medicine*, Ann ICRP 49(1_suppl): p.200-212 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1177/0146645320956517>
8. E.A. Domina, O.L. Kopylenko, V.F. Chekhun, *Evaluation of current factors of radiation-associated carcinogenesis*. Exp Oncol. 11: p.151-160 (2023). DOI: 10.15407/exp-oncology.2023.02.151
9. I. Kulhanova, A. Znaor, K.D. Shield, M. Arnold, J. Vignat, M. Charafeddine, I. Fadhil, H. Fouad, A. Al-Omari, A. Saeed Al-Zahrani, A. El-Basmy, A. Shamseddine, F.I. Bray, I. Soerjomataram, *Proportion of cancers attributable to major lifestyle and environmental risk factors in the Eastern Mediterranean region*. International Journal of Cancer. Volume 146(3): p.646-656(2019). DOI: 10.1002/ijc.32284
10. A.F. Malenchenko, S.N. Sushko, A.S. Shaforost, *Mutagenic and Tumorigenic Effects of Natural Uranium*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus*. Biological Sciences Series 3: p. 111-118 (2011)
11. *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data*, IAEA-TECDOC-1363, IAEA (2003)
12. *ASTM D6327; 10 Standard Test Method for Determination of Radon Decay Product Concentration and Working Level in Indoor Atmospheres by Active Sampling on a Filter*. ASTM International: West Conshohocken (2016)
13. *On Approval of the Sanitary Rules "Sanitary and Epidemiological Requirements for Radiation-Hazardous Facilities"*, Order of the Minister of Health of the Republic of Kazakhstan No. QR DSM-90(2022)
14. E. Ruedig, T.E. Johnson, *An evaluation of health risk to the public as a consequence of in situ uranium mining in Wyoming, USA*, *Journal of Environmental Radioactivity* 150(215): p.170-178(2015)

15. R. M.Tripathi, S. K.Sahoo, V. N. Jha, A. H.Khan, V. D. Puranik, *Assessment of environmental radioactivity at uranium mining, processing and tailings management facility at Jaduguda, India*, Applied Radiation and Isotopes 66(11): p.1666-1670 (2008)

16. *Contamination Risks Associated with In situ-Recovery Mining for Uranium*, available at: <https://websites.umass.edu/natsci397a-eross/contamination-risks-associated-with-in-situ-recovery-mining-for-uranium/> (date of application: 03.02.2025)

Information about the authors:

Bakhtin M. – Doctor of Biological Sciences, Professor, Director of the Institute of Radiobiology and Radiation Protection, NCJSC “Astana Medical University”, 49A Beibitshilik Str., Astana, Kazakhstan.

Kashkinbayev Ye. – PhD, Deputy Director of the Institute of Radiobiology and Radiation Protection, NCJSC “Astana Medical University”, 49A Beibitshilik Str., Astana, Kazakhstan.

Aumalikova M. – corresponding author, PhD, Head of the National Training Center with Reference Laboratory for Radiation Safety in Medicine, Institute of Radiobiology and Radiation Protection, NCJSC “Astana Medical University”, 49A Beibitshilik Str., Astana, Kazakhstan.

Ibrayeva D. – PhD, Chief Researcher of the Radiochemistry and Radiospectrometry Testing Laboratory, NCJSC “Astana Medical University”, 49A Beibitshilik Str., Astana, Kazakhstan

Tazhedinova A. – Master of Natural Sciences, Doctoral student, Department of Medical Genetics and Molecular Biology, NCJSC “Astana Medical University”, 49A Beibitshilik Str., Astana, Kazakhstan.

Altayeva N. – Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Medical Genetics and Molecular Biology, NCJSC “Astana Medical University”, 49A Beibitshilik Str., Astana, Kazakhstan.

Zhaumitbay S. – Master’s student, Institute of Radiobiology and Radiation Protection, NCJSC “Astana Medical University”, 49A Beibitshilik Str., Astana, Kazakhstan.

Бахтин М. – б.ғ.д., профессор, Радиобиология және радиациялық қорғау ҒЗИ директоры, КеАҚ «Астана медицина университеті», Бейбітшілік 49/А, Астана, Қазақстан.

Кашкинбаев Е. – PhD докторы, Радиобиология және радиациялық қорғау ҒЗИ директорының орынбасары, КеАҚ «Астана медицина университеті», Бейбітшілік 49/А, Астана, Қазақстан.

Аумаликова М. – хат-хабар авторы, PhD, Радиобиология және радиациялық қорғау ҒЗИ медицинадағы радиациялық қауіпсіздік жөніндегі референс зертханасы бар ұлттық оқу орталығының басшысы, КеАҚ «Астана медицина университеті», Бейбітшілік 49/А, Астана, Қазақстан.

Ибраева Д. – PhD, радиохимия және радиоспектрометрия сынақ зертханасының бас ғылыми қызметкері, КеАҚ «Астана медицина университеті», Бейбітшілік 49/А, Астана, Қазақстан.

Тажединова А. – жаратылыстану ғылымдары магистрі, медициналық генетика және молекулалық биология кафедра докторанты, КеАҚ «Астана медицина университеті», Бейбітшілік 49/А, Астана, Қазақстан.

Алтаева Н. – б.ғ.д., медициналық генетика және молекулалық биология кафедра меңгерушісі, КеАҚ «Астана медицина университеті», Бейбітшілік 49/А, Астана, Қазақстан.

Жәумітбай С. – Радиобиология және радиациялық қорғау ҒЗИ магистранты, КеАҚ «Астана медицина университеті», Бейбітшілік 49/А, Астана, Қазақстан.

Бахтин М. – д.б.н., профессор, директор НИИ радиобиологии и радиационной защиты, НАО «Астана медицинский университет», ул. Бейбітшілік, 49А, г. Астана, Казахстан.

Кашкинбаев Е. – PhD, заместитель директора НИИ радиобиологии и радиационной защиты, НАО «Астана медицинский университет», ул. Бейбітшілік, 49А, г. Астана, Казахстан.

Аумаликова М. – автор для корреспонденции, PhD, руководитель Национального учебного центра с референс-лабораторией по радиационной безопасности в медицине, НИИ радиобиологии и радиационной защиты, НАО «Астана медицинский университет», ул. Бейбітшілік, 49А, г. Астана, Казахстан.

Ибраева Д. – PhD, главный научный сотрудник испытательной лаборатории радиохимии и радиоспектрометрии, НИИ радиобиологии и радиационной защиты, НАО «Астана медицинский университет», ул. Бейбітшілік, 49А, г. Астана, Казахстан.

Тажединова А. – магистр естественных наук, докторант кафедры медицинской генетики и молекулярной биологии, НАО «Астана медицинский университет», ул. Бейбітшілік, 49А, г. Астана, Казахстан.

Алтаева Н. – доктор биологических наук, заведующая кафедрой медицинской генетики и молекулярной биологии, НАО «Астана медицинский университет», ул. Бейбітшілік, 49А, г. Астана, Казахстан.

Жаумитбай С. – магистрант НИИ радиобиологии и радиационной защиты, НАО «Астана медицинский университет», ул. Бейбітшілік, 49А, г. Астана, Казахстан.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



XҒТАР 539.1.01

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-60-76>

Ғылыми мақала

Уранның деформацияланған изотоптарының ядролық модельдеуіндегі әсерлесуші бозондар үлгісі

А. Дәлелханқызы^{1*}, Н. Қойлық¹, Г. Баймбетова², Г. Қаптағай¹, С. Тоқтарбай³,
А. Бейсебаева⁴, А. Көпенбаева¹

¹Қазақ ұлттық педагогикалық қыздар университеті, Алматы, Қазақстан

²Абай атындағы қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

³Әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

⁴Қ.И. Сатпаев атындағы қазақ ұлттық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

(E-mail: ainur1179@mail.ru)

Андатпа. Ядролық физика саласындағы өзекті әрі күрделі мәселелердің бірі – нуклондар арасындағы әсерлесу процестерін тұтас және толық қамтитын әмбебап теорияның әлі де қалыптаса қоймағандығында. Бұл өзара әрекеттесу құбылыстары айрықша күрделілікпен ерекшеленеді және оларды сипаттау үшін ядролық жүйелердің ішкі құрылымдық параметрлерін, соның ішінде потенциалдық өрістер мен нуклондардың орташаланған қозғалыс заңдылықтарын ескеру қажет. Ядролардың төмен энергия деңгейлеріндегі күй-кешендері, әдетте, белгілі бір модельдік тұжырымдамалар аясында қарастырылады. Мұндай модельдерде нуклондар орташа потенциалдық өрісте қозғалады деп есептеледі, әрі олардың арасындағы өзара әрекет тек қана екі бөлшек арасындағы күштермен шектеледі. Осыған ұқсас аналогияны электрондардың атом ішіндегі қозғалысынан көруге болады, дегенмен, ядролық күштер табиғаты жағынан мүлде өзгеше, яғни күшті және қысқа арақашықтықта әсер ететін сипатқа ие.

Ядро құрылымын зерттеудегі ерекше маңызды аспектілердің бірі – ұжымдық қозғалыстар, яғни нуклондардың бірлесе отырып орындайтын үйлесімді тербеліс немесе айналу процестері. Бұл қозғалыстар ядроның ішкі құрылымын сипаттайтын негізгі спектрлік параметрлерге тікелей ықпал етеді. Теориялық тұрғыдан алғанда, бұл құбылыстарды алғаш болып терең зерттеген О. Бор мен Б. Моттelson болды. Олар ядроның геометриялық пішінін сипаттайтын модельдер шеңберінде ұжымдық қозғалыстардың физикалық табиғатын түсіндіріп, деформациялық сипаттамалармен байланыстырды. Атап айтқанда, төмен энергия деңгейлерінде байқалатын бұл қозулардың квадрупольдік деформация параметрімен өзара тығыз байланыста екендігі дәлелденді.

Осы ғылыми жұмыс аясында біз бозондық модельдерге негізделген және SU(5) симметриясын пайдаланатын теориялық тәсілді қолданамыз. Мақ-

Жіберілді 06.05.2025. Өзгертілді 03.06.2025. Қабылданды 04.06.2025. Онлайн қол жетімді 25.06.2025.

¹ *хат-хабар үшін автор

сатымыз – сфероидтық пішінді Уран элементінің үш түрлі изотопының құрылымын сандық түрде сипаттау. Бұл ретте ядроның энергетикалық деңгейлері мен электромагниттік сәулелену ықтималдығын анықтайтын $B(E2)$ өтпелі ықтималдық параметрі есептеліп, алынған нәтижелерді қолда бар эксперименттік деректермен салыстырамыз. Зерттеу нәтижелері ядролық модельдердің дәлдігін бағалауға және ядролық құрылымдарды сипаттаудың тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: атом ядросы; спектрлер; гамма ауысу.

Кіріспе

Соңғы жылдары ядролық физика саласында күрделі ядролық жүйелердің төмен энергиялы күйлерін сипаттауға бағытталған жаңа теориялық тәсілдер қарқынды түрде дамып келеді. Осы бағыттардың ішінде айрықша назар аудартатыны – бозондық модельдерге негізделген формализм. Бұл әдістеме көп нуклонды жүйелердің ұжымдық динамикасын сипаттауда аса тиімді болып отыр. Әсіресе, бұл модель ядролардағы ұжымдық қозғалыстардың негізінде жатқан симметрияларды анықтау арқылы қарапайымнан күрделіге өтетін құрылымдарды жүйелі түсіндіруге мүмкіндік береді. Бастапқыда нуклондардың қозғалысы мен олардың кеңістікте орналасуы классикалық механикалық тұрғыда қарастырылса, қазіргі заманғы теориялар бұл қозғалыстардың деформацияланған ядролық конфигурациялар арқылы пайда болатынын көрсетіп отыр.

Бозондық модельдердің тиімділігі – олардың симметрия негізінде құрылған алгебралық құрылымдары мен Гамильтон операторы арқылы күрделі жүйелерді ықшам және нақты түрде сипаттай алатындығында. Бұл тәсіл арқылы ядролық құрылымның маңызды аспектілерінің бірі – энергетикалық деңгейлер мен ұжымдық тербелістердің арасындағы байланыстар ашылады. Жүйенің симметриялары $SU(6)$ сияқты унитарлық топтар арқылы анықталып, олардың ішкі құрылымы $SU(3)$ және $O(3)$ топтарына дейінгі асимптотикалық шектерге $SU(6) \supset SU(3) \supset O(3)$ жіктеледі. Бұл математикалық құрылым ядроның сферикалық, ротациялық және деформацияланған конфигурацияларын жүйелі түрде сипаттауға мүмкіндік береді.

Осыған байланысты аталған зерттеудің басты мақсаты – төмен энергиялы күйлердің симметриялық табиғатын түсіндіру және ядролық конфигурацияларды анықтауда бозондық модельдерді қолданудың аналитикалық мүмкіндіктерін көрсету. Бұл әдіс теориялық тұрғыдан ғана емес, тәжірибелік деректермен үйлесімділігімен де ерекшеленіп, ядролық физиканың заманауи мәселелерін шешуге тың серпін береді.

Әдіснама

$SU(6) \supset SU(3) \supset O(3)$ тізбегінің жалпылама сипаттамалары

Симметриялық тәсілдерді біз уран ядросының әртүрлі изотоптарын зерттеуде қолданамыз. Бұл ретте теориялық модель тек бастапқы деңгейдегі қозулармен шектеліп қоймай, екінші реттік кванттау әдістері арқылы толқындық функциялардың да сипатын

анықтауға мүмкіндік береді. Осылайша, кванттық күйлердің классификациясы мен олардың энергетикалық сипаттамалары нақты жүйеленіп, нәтижелерді эксперименттік деректермен салыстыруға қолайлы жағдай жасалады.

Осы модельге сәйкес пайдаланылатын гамильтонианның жалпылама түрі төмендегідей түрде беріледі:

$$H = \varepsilon N_d + \alpha_0 S_z S_z + \alpha_1 I I + \alpha_2 Q Q + \alpha_3 Q_3 M Q_3 M + \alpha_4 Q_4 M Q_4 M \quad (1.1)$$

Мұндағы әртүрлі операторлар бозондар арасындағы өзара әсерлесу сипатын, сондай-ақ олардың туындау және жойылу процестерін сипаттайды. Бұл операторлар негізінде келесі бозондық қосақтау операторы енгізіледі:

$$B_{ij} = b_i^+ b_j, \quad b_j = B_{ij}^+, \quad i, j = 1, \dots, A, \quad (1.2)$$

Бұл операторлар j күйіндегі бозонды i күйіне ауыстырады, олар өзара тұйық алгебра құру үшін

$$[B_{ij}, B_{kl}] = \delta_{jk} B_{il} - \delta_{il} B_{kj} \quad (1.3)$$

Кванттық бозондық кеңістіктердегі топтық симметрияларды сипаттайтын B_{ij} операторлары $U(G)$ унитарлық тобының генераторлары ретінде қарастырылады. Толық көпбозондық күй кеңістігін құру және ондағы күйлердің кванттық сипаттамаларын анықтау үшін, ішкі топтық құрылымға негізделген инвариантты тензорлық алгебра қажет. Бұл ішкі симметриялар көмегімен толық толқындық функцияларды конструкциялап, кванттық сандарды нақтылауға болады. Осы мақсатта біз үлкен $U(G)$ тобының ішкі редукциялық тармақталуын жүзеге асырып, редукциялық базистердің көмегімен жаңа функцияларды жүйелі түрде құруға мүмкіндік аламыз. Бұл ретте қай базис тізбегінің физикалық модельде шешуші рөл атқаратыны таңдалатын динамикалық механизммен тығыз байланысты.

Аталған редукциялық процедураны жүзеге асыруда біз (1.2) формуласында көрсетілген қосарланған операторларды, яғни мультипольдік дәрежесі (LM) болатын тензорлық операторларды қолданамыз. Бұл операторлар толық бұрыштық моменттер бойынша келесі түрде сипатталады:

$$B_{ij}^{LM} = B_{LM}(l_i x_i, l_j x_j) = (b_i, b_j)_{LM} = \sum_{m_1 m_2} (-)^{l_i + l_j + m_j} \sqrt{2L + 1} \begin{pmatrix} l_i & L & l_j \\ m_i & M & -m_j \end{pmatrix} B(l_i m_i x_i, l_j m_j x_j) \quad (1.4)$$

Мысал ретінде, толық бұрыштық момент операторын көрсетуге болады. Ол келесі түрде жазылады:

$$I_M = \sum_{l_x} (-)^{l^- + 1} \sqrt{\frac{l(l+1)(2l+1)}{3}} B_{1M}(l_x, l_x) \quad (1.5)$$

(1.5) формуласында келтірілгендей, бұрыштық моменттердің қосындысы нақты мультипольдік операторлар арқылы анықталады. Бұл операторлардың коммутаторлық

қасиеттерін (1.4) формуласына сүйене отырып тексеру мүмкіндігі де қарастырылады.

$$[B_{LM}^{ij}, B_{LM}^{ij}] = \sqrt{(2l+1)(2L+1) \sum_{\Lambda\lambda} (2\Lambda+1)(-)^{l_i+l_j+l'_i+l'_j}} \times \begin{pmatrix} \Lambda & L & L' \\ -\lambda & M & M' \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

$$\left[\delta_{ji}(-)^{l_i+L+L'+\Lambda} \begin{Bmatrix} L & L' & \Lambda \\ l'_j & l_i & l'_i \end{Bmatrix} B_{\Lambda\lambda}^{ij'} - \delta_{ij'}(-)^{l_i} \begin{Bmatrix} L & L' & \Lambda \\ l'_i & l_j & l_i \end{Bmatrix} B_{\Lambda\lambda}^{ij'} \right]$$

Ол операторларды мына түрде нормалап, Казимир операторын табамыз:

$$C_\Gamma = 2 \sum_{ijLM} (-)^M B_{LM}^-(ij) B_{L-M}^-(ij) \quad (1.7)$$

Кванттық механиканың күрделі жүйелерін талдауда маңызды рөл атқаратын операторлардың ішінде Казимир операторы ерекше орын алады. Формулада келтірілген (1.7), C_Γ арқылы белгіленген бұл оператор, әртүрлі кванттық күйлер арасындағы байланысты сипаттайтын $B_{LM}^-(ij)$ элементтерін қамтиды. Мұндағы қосынды j, j', L, M индекстері бойынша жүргізіледі, бұл оператордың қарастырылып отырған жүйенің толық сипаттамасын қамтуға бағытталғанын көрсетеді. $(-1)^{L-M}$ көбейткіші бұрыштық моменттің әртүрлі проекцияларының фазалық ерекшеліктерін ескереді.

Бозондық жүйелер үшін квазиспиндік операторлар ұғымы енгізіледі:

$$S_\Gamma = \sum_{lm} (-)^m b_{lm} b_{l-m}; \quad S_\Gamma^+ = \sum_{lm} b_{lm}^+ b_{l-m}^+ (-)^m \quad (1.8)$$

Енді, осы квазиспиндік операторларды пайдалана отырып, бастапқы Казимир операторын (1.9) түрінде қайта жазуға болады:

$$C_\Gamma = N(N + \Gamma - 2) - (S_\Gamma^+ S_\Gamma) \quad (1.9)$$

Гамильтониандарды тек қана кейбір инвариантты операторлар арқылы өрнектеген дұрыс болады. Ондай инвариант операторларды Казимир операторлары деп те атайды. Сондықтан осы түрін келтіре аламыз

$$S_\Gamma^+ S_\Gamma = (N - \nu)(N + \Gamma + \nu - 2) \quad (1.10)$$

Кванттық жүйелердегі бозондық операторлардың симметриялы қасиеттерін сипаттау үшін теңдеулер жүйесі пайдаланылады. Бұл жерде ν – бозондардың жалпы саны, яғни жүйедегі сенсорлық кванттар саны ретінде қарастырылады. Біз Γ – өлшемді кеңістікте жүйенің симметриялық құрылымын талдай отырып, ss - және d - бозондарды қамтитын кеңістіктерге назар аударамыз. Бұл жағдайда $l=0,2$ болатын бозондар қарастырылады. Мұнда $\Gamma=6$ деп алынған, себебі бір s - бозон және бес түрлі d - бозондық күй бар. Демек, жалпы кеңістіктің өлшемі алтыға тең болады.

Осы $d_{-2} d_{-1} d_0 d_{+1} d_{+2}$ кеңістікте әрекет ететін B^+ түріндегі бозондық операторлар саны $\Gamma^2=36$. Бұл операторлар $U(6)$ унитарлық симметриялы топты түзеді. Бұл топ кеңістіктің

ішкі құрылымын сипаттауға арналған және оны уақыт пен айналу симметриясына байланысты бірнеше ішкі топтарға бөлуге болады. Мұндай бөлініс симметриялық және антисимметриялық комбинацияларға негізделеді:

1) Симметриялық комбинациялар (жұптық операторлар)

$$B_{00}^{(+)}(00) = (S^+ S)^0 = N_s, \quad B_{00}^{(+)}(22) = \frac{1}{\sqrt{5}} (d^+ d)^0 = \frac{1}{\sqrt{5}} N_d; \quad (1.11)$$

Мұндағы N_s және N_d – сәйкесінше s – және d – бозондардың саны.
квадрупольдік (екінші ретті) операторлар ($L=2$):

$$Q_M^{(+)} = \frac{1}{2} (B_{2M}^{20} + B_{2M}^{02}) = \frac{1}{2} [S^+ d_M + (-)^M d_{-M}^+ S]_M^2, \quad Q_M = B_{2M}^{22} = (d^+ d)_M^2; \quad (1.12)$$

гексадекапольдік (төртінші ретті) операторлар:

$$Q_{4M} = B_{2M}^{22} = (d^+ d)_M^4; \quad (1.13)$$

он бес антисимметриялы комбинация: бұрыштық моменттің үш компоненті

$$I_M = -\sqrt{10} B_{1M}^{22} = -\sqrt{10} (d^+ d)_M^1 \quad (1.14)$$

квадрупольдік антисимметриялы оператор:

$$Q_M^{(-)} = \frac{i}{2} (B_{2M}^{20} - B_{2M}^{02}) = \frac{i}{2} [S^+ d_M - (-)^M d_{-M}^+ S]_M^2 \quad (1.15)$$

октаупольдік (үшінші ретті) оператордың жеті компоненті

$$Q_{3M} = B_{3M}^{22} = (d^+ d)_M^3 \quad (1.16)$$

Жоғарыда берілген (1.11)–(1.16) формулалар арқылы анықталған барлық операторлар эрмиттік (өз-өзіне комплекссоқтасқан) қасиетке ие, бұл олардың физикалық реалды шамаларға сәйкестігін қамтамасыз етеді. Эрмиттік шарт кванттық операторлардың өздік мәндерінің нақты болуын қамтамасыз етеді және бұл операторлар нақты физикалық шамаларды сипаттайды, яғни

$$Q_{LM}^+ = (-)^M Q_{L-M}$$

Алдында қарастырып өткен қосарланған операторларды енгізген соң, $SU(6)$ симметриялық тобына сәйкес келетін бозондық жүйенің гамильтонианын (1.1) – формасында жазу күрделіге айналады. Себебі бастапқы түрде s^+ , s операторлары тек жүйенің негізгі күйін сипаттауға мүмкіндік береді, ал олардың қатысуы басқа энергетикалық күйлерге қатысты ақпаратты шектейді. Сондықтан бастапқы форма (1.1) гамильтонианнан алынып тасталады. Дегенмен, жүйедегі бозондар саны – яғни, $N = N_s + N_d$ – тұрақты шама ретінде есепке алына береді. Осыған байланысты, бұрын

қолданылған Q_M^+ және Q_M операторларының орнына (1.12)-дегі өрнектерге арнайы түрде модификацияланған комбинациялар енгізіледі. Бұл жаңа операторлар симметрия мен операторлық алгебраны сақтап қалуға арналған. Атап айтқанда, келесі түрдегі өрнек енгізіледі:

$$Q'_M = B_{2M}^{20} + B_{2M}^{02} + \frac{\sqrt{7}}{2} Q_M \quad (1.17)$$

Жаңа енгізілген Q'_M операторларының өзара коммутациялық қатынастары мынадай алгебралық құрылымға бағынады:

$$[Q'_M, Q'_{M'}] = -\frac{3}{4}\sqrt{30}\Sigma_\lambda(-)^\lambda \begin{pmatrix} 2 & 2 & 1 \\ M & M & -\lambda \end{pmatrix} I_{\lambda'} \quad (1.18)$$

Электрлік квадрупольдік ауысу үдерісін сипаттайтын $T_k(E2)$ операторлары да мына түрде бейнеленеді:

$$T_k(E2) = q_1 \left[(d^+ s)_k^2 + (s^+ d)_k^{(2)} \right]_k^{(2)} + q_2 (d^+ d)_k^{(2)} = q_1 Q_\mu^+ + q_2 Q_\mu \quad (1.19)$$

Осылайша, бозондық операторлар жүйесінің алгебралық құрылымын және одан туындайтын гамильтонианның топтық симметриясын толық меңгеру – кванттық жүйенің энергетикалық спектрін (өздік мәндерін) және оларға сәйкес келетін кванттық күй функцияларын (өздік функцияларды) анықтауға мүмкіндік береді. Басқаша айтқанда, бұл кванттық механикадағы спектрлік есепті шешудің іргелі қадамы болып табылады. Мәселені аналитикалық жолмен шешу үшін біз үш түрлі асимптотикалық шекті – яғни жүйенің белгілі бір идеалдандырылған физикалық режимдерін – негізге аламыз. Мұндай шектерде есептеу едәуір жеңілдейді, өйткені күрделі өзара әрекеттесулер орнына жүйенің басым сипаттары ғана ескеріледі. Нәтижесінде, бұл әдістер атом ядроларының құрылымын зерттейтін ЭБМ (әлемдік бәсекеге қабілетті модельдер) шеңберінде тәжірибелік зерттеулермен тиімді біріктіріліп келеді.

Біздің жұмысымызда қарастырылатын негізгі мақсат – $U(6) \supset SU(3) \supset O(3)$ асимптотикалық шектерді қолдану арқылы кванттық жүйенің ықтимал күйлерін жүйелеу және сипаттау. Бұл үшін жүйенің ішкі симметрияларын бейнелейтін кіші алгебралар тұрғысынан тұйықталған операторлық құрылымдарға сүйене отырып, жүйенің күй кеңістігі толқындық функциялар арқылы класси-фикацияланады. Бұл тәсіл ротациялық күйдердің құрылымын, олардың энергия деңгейлерін және мүмкін болатын көшу процестерін терең түсінуге мүмкіндік береді.

Аналитикалық түрде алынған теориялық шамалар кейіннен тәжірибелік нәтижелермен салыстырылып, модельдің дұрыстығы мен қолданбалы тиімділігі тексеріледі. Айта кету керек, қарастырылып отырған симметриялы топ – 8 генератордан тұратын унитарлық топ. Оның үш генераторы толық бұрыштық моменттің кеңістіктегі проекцияларына сәйкес келеді, яғни бұл операторлар жүйенің кеңістіктегі айналу инварианттылығын қамтамасыз етеді:

$$I_\mu = -\sqrt{10} [b_{2\mu_1}^+ b_{2\mu_2}]_\mu^{(2)}, \quad (1.20)$$

ал, бесеуі квадрупольдің компоненттері:

$$Q_{\mu} = \sqrt{2} \left\{ B_{00}^{+} B_{2\mu}^{+} (-)^{\mu} B_{2-\mu}^{+} B_{00} \frac{\sqrt{7}}{2} [B_{2\mu_1}^{+}, B_{2\mu_2}^{+}]_{\mu}^{(2)} \right\} \quad (1.21)$$

Егер біз (1.20)-формуласына сәйкес берілген толық бұрыштық моменттің жеке компоненттерін жеке-дара қарастыратын болсақ, онда бұл операторлар үш өлшемді кеңістіктегі айналулар симметриясын сипаттайтын, кеңінен танымал $SO(3)$ тобының генераторлары екені анықталады. Басқаша айтқанда, бұл үш оператор кеңістіктік бұрыштық инварианттылықты қамтамасыз ететін симметрияларды жүзеге асырады.

Сонымен қатар, (1.20) және (1.21)-өрнектерінде анықталған сегіз оператор өзара жабық Ли алгебрасын құрайды, бұл – олардың коммутациялық қатынастарының нәтижесі бастапқы алгебраның шеңберінде қалатынын білдіреді:

$$\begin{aligned} [Q_{\mu}, Q_{\mu'}] &= \frac{3}{4} \sqrt{30} (-)^{\mu} \begin{pmatrix} 2 & 2 & 1 \\ \mu & \mu' & -\mu \end{pmatrix} I_{\mu} \\ [Q_{\mu}, Q_{\mu'}] &= \sqrt{30} (-)^{\mu+1} \begin{pmatrix} 2 & 2 & 2 \\ \mu & \mu' & \mu \end{pmatrix} Q_{\mu} \\ [I_{\mu}, I_{\mu'}] &= \sqrt{6} (-)^{\mu+1} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \mu & \mu' & \mu \end{pmatrix} I_{\mu} \end{aligned} \quad (1.22)$$

Сонда $SU(3)$ – симметриялы Гамильтониан

$$H = -\chi \sum_{\mu} Q_{\mu} Q_{-\mu} - \chi' I_{\mu}^2 \quad (1.23)$$

түрінде жазылып, оның өздік мәнін

$$E = -\chi C(\lambda, \mu) + \left(\frac{3}{4} \chi - \chi' \right) I_{\mu}^2 \quad (1.24)$$

теңдігі арқылы өрнектейміз.

Кванттық жүйенің сипаттамасын толықтай жүргізу үшін ең алдымен бозондардың жалпы саны N $SU(3)$ ерекше назар аудару қажет. Бұл шама $U(6)$ симметриялы тобының түрліше (λ, μ) көрсетулерінің кеңістіктегі көрінісін анықтайды. Басқаша айтқанда, N шамасы жүйенің конфигурациялық құрылымын топтық теория тұрғысынан классификациялаудың негізін қалайды. Осы көрсетулердің әрбіріне Казимир операторының $C(\lambda, \mu)$ белгілі бір меншікті мәні сәйкес келеді, ал бұл мән төмендегідей қатынаспен сипатталады:

$$C(\lambda, \mu) = \lambda(\lambda + 3) + \mu(\mu + 3) + \lambda \quad (1.25)$$

теңдігі арқылы жазылады.

Бұдан әрі біз кванттық күйлерді қарастырылып отырған операторлық тізбекке сәйкес жүйелеп сипаттауға кірісеміз. Бұл үшін $U(6)$ тобына тән симметриялы бейнелеуді оның $SU(3)$ топтарының (λ, μ) көрсетуі бойынша тізбектей жіктейміз.

Жүйелеудің әдістемесі ең қарапайым – нөлдік бозоннан басталып, біртіндеп бозон санының артуымен күрделенетін конфигурацияларға дейін жүргізіледі. Алдымен бозон жоқ күй үшін $[N=0]=(0,0)$; бір ғана бозоны бар күй үшін $[N=1]=(2,0)\oplus(1,0)$.

Ал егер күйде екі бозон бар болса онда Юнг схемасы:

$$[N=2]=((2,0)+(1,0))\oplus((2,0)+1,0)=(4,0)+(0,2)+(3,0)+(1,1)+(2,0) \quad (1.26)$$

Осы принципті сақтай отырып, үш, төрт және одан да көп бозондар қатысқан күйлер үшін Юнг диаграммаларын біртіндеп кеңейтіп, толық симметриялы көрсетулерді алуға болады. Осылайша, біз $U(6)$ тобының барлық мүмкін көрсетулеріне сәйкес келетін бозондық күйлердің толық жіктеуін құрамыз.

$$[N] = (2N, 0) \oplus (2N - 4, 2) \oplus \dots + \left\{ \begin{array}{l} 0, N \text{ (} N - \text{жұп)} \\ 2, N - 1 \text{ (} N - \text{тақ)} \end{array} \right\} + \dots \quad (1.27)$$

$$+ \oplus (2N - 2, 0) \oplus (2N - 4, 1) \oplus \dots (2N - 4, 0) \oplus \dots \oplus (2N - 6, 0) \oplus (2N - 10, 2) \oplus \dots$$

Бұл жерде екі ғана еркін параметр бар. Олар: $\chi = 5 \text{ кэВ}$, $\frac{3}{4}\chi - \chi' = 10 \text{ кэВ}$ шамасында таңдалып алынған.

Нәтижелер мен талқылау

Сфералық ядро құрылымындағы электромагниттік ауысулар және олардың Ru изотоптарына әсері

Зерттеу жұмысымызда $SU(3)$ симметриясының шектеулі нұсқасы аясындағы теориялық спектрлерде байқалатын ротациялық заңдылықтарды верификациялау мақсатында ауыр элементтер тобына жататын актиноидты ядролар объект ретінде қарастырылады. Атап айтқанда, атомдық массалары $A=234, 236, 238$ болатын жұп-жұп изотоптары бар Уран ядроларының энергетикалық күйлерінің құрылымы теориялық болжамдармен салыстырылмалы түрде талданады. Бұл салыстыру процесі ядролық спектроскопиядағы іргелі мәселелердің бірі болып табылады, себебі ол ядроішілік күштердің табиғаты мен ядролық құрылымның ерекшеліктерін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді.

Теориялық модельдегі болжамдарды эксперименттік мәліметтермен сәйкестендіру үшін екі негізгі параметр таңдап алынады. Бірінші параметр, $3/4 \chi - \chi'$, $(2N, 0)$ негізгі жолақтың бірінші қозған $2+$ деңгейінің энергия мәнімен салыстырыла отырып анықталады. Мұндағы χ және χ' теориялық модельдің өзіне тән параметрлері болып табылады және олар ядроішілік өзара әрекеттесулердің күшін сипаттайды. Екінші параметр, $\chi - \eta$, $(2N - 4, 2)$ жолақтың бірінші қозған $2+$ деңгейінің энергетикалық мәніне сәйкестендіріледі. Бұл жердегі η да теориялық модельдің құрамдас бөлігі ретінде енгізілген қосымша параметр болып табылады.

Бұл табылған параметрлер 2-кестеде берілген.

1-кесте. Уранның $^{234,236,238}\text{U}$ изотоптары үшін теорияның параметр мәндері

Ядро	N	χ (кэВ)	$\frac{3}{4}\chi - \chi'$ (кэВ)
^{234}U	13	5,40	6,67
^{236}U	14	5,67	6,57
^{238}U	15	5,72	6,50

Ауыр элементтердің изотоптық тізбегін зерттеу аясында жүргізілген спектроскопиялық талдау нәтижелері көрсеткендей, теориялық модельдегі сәйкестендірілген параметрлердің атомдық массаның өсуіне байланысты қарама-қарсы тенденциялары байқалады. Атап айтқанда, бірінші реттегі параметрдің мәні изотоптардың массалық сандары артқан сайын елеулі түрде өсу үрдісін танытса, екінші параметр керісінше, массалық санның ұлғаюымен біртіндеп төмендеу динамикасын көрсетеді. Бұл бағыланған корреляциялар ядроішілік өзара әрекеттесулердің массалық санға тәуелділігі туралы маңызды ақпарат береді.

Алынған оптималды параметрлер негізінде құрастырылған ядролық изотоптардың қозған күйлерінің энергетикалық спектрлері 2-суретте визуалды түрде ұсынылған. Теориялық есептеулер нәтижесінде алынған энергетикалық деңгейлердің орналасуы эксперименттік мәліметтермен жоғары дәрежеде үйлесімділік танытады. Дегенмен, қозған күйлердің спиндік мәндерінің өсуімен бірге теориялық және эксперименттік энергия шамалары арасындағы аздаған алшақтық байқалады. Бұл айырмашылық жоғары спиндік күйлердің құрылымын сипаттауда теориялық модельдің шектеулігін немесе қосымша әсерлердің маңыздылығын көрсетуі мүмкін. Тәжірибелік зерттеулерде β және γ жолақтарына тиесілі жоғары энергетикалық деңгейлер туралы мәліметтердің шектеулі болуы осы жолақтардың құрылымын толыққанды талдауды қиындатады.

Анықталған энергетикалық деңгейлердің толқындық функцияларын есептеу принципіалды қиындық тудырмайды және бұл функциялар ядроішілік құрылым туралы терең түсінік алуға мүмкіндік береді. Есептелген толқындық функцияларды пайдалана отырып, әртүрлі қозған күйлер арасындағы кванттық ауысулар нәтижесінде пайда болатын электромагниттік сәулеленудің интенсивтіліктерін болжауға болады.

Қарастырылып отырған теориялық формализмді ядролардағы электромагниттік ауысу процестеріне қолданудың ғылыми маңызы зор. Электромагниттік сәулеленудің интенсивтіліктерін дәл болжау арқылы теориялық модельде анықталған күйлердің толқындық функцияларының ақиқаттығын және оның қолданылу аясын эмпирикалық тұрғыдан тексеруге мүмкіндік туады. Бұл, өз кезегінде, ядролық құрылымның теориялық сипаттамасының сенімділігін арттырады $U(6)$ – тобы генераторлары арқылы $T(E_2)$ операторын

$$T_{\mu}(E_2) = q_1(B_{00}^{+}B_{2\mu} + (-)^{\mu}B_{2-\mu}^{+}B_{00}) + q_1[B_{2\mu 1}^{+}B_{2\mu 1}]_{\mu}^{(2)} = \alpha_2 Q_{\mu} \quad (2.1)$$

Мұндағы Q_{μ} – ядроның квадрупольдік операторы, α_2 – эффективтік E_2 – заряды.

Алынған өрнек бойынша $(2N,0)$ болуы үшін келтірілген матрицалық элемент $B(E2, I \rightarrow I-2)$ мәні:

$$B(E2, I \rightarrow I-2) = \alpha_2^2 \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{I(I+1)}{(2I+1)(2I-1)} \cdot (2N-I+2)(2N+I+1) \quad (2.2)$$

түрінде жазамыз..

Атом ядроларындағы электрлік квадрупольдік ауысуларды сипаттау мақсатында, біз $A=234,236,238$ болатын уран изотоптарына қатысты $B(E2)$ ықтималдық шамаларын есептік тұрғыда бағаладық. Бұл есептеулер алдыңғы тарауда қарастырылған теориялық модельдің негізінде жүргізілді. Алынған нәтижелер сәйкесінше қолда бар спектроскопиялық тәжірибелік деректермен салыстырылып, олардың арасындағы үйлесімділік деңгейі мұқият талданды. Жүргізілген салыстыру нәтижесінде, әсіресе негізгі ротациялық жолақтың төменгі спиндік күйлері арасындағы $E2$ ауысулары үшін есептік және өлшенген шамалар арасында жақсы сәйкестік байқалды.

Аталған уран изотоптарының ($^{234,236,238}\text{U}$) негізгі жолақ құрылымындағы ауысулардың ықтималдық шамалары 2-кестеде Вайскопф бірлігінде келтірілген. Есептеулерде тек бір еркін параметр пайдаланылды, ол нақты бір эксперименттік $E2$ ауысу мәнімен сәйкестендіру арқылы анықталды. Бұл параметрді таңдау есептік модельдің сенімділігін арттырды.

Алынған $B(E2)$ шамаларының энергетикалық күйге тәуелділігі төменнен жоғарыға қарай бастапқыда өсуімен, кейін белгілі бір максимумнан соң бәсеңдеуімен сипатталады. Мұндай бейсызық тәуелділік бөлшектер санының шектеулі болуымен немесе модельдік шектермен байланысты болуы ықтимал.

Егер ауысулар бойынша орташа ықтимал мәндерге сәйкес келетін тиімді заряд $2_1^+ \rightarrow 0_1^+$ параметрі таңдалғанда, теориялық және тәжірибелік мәндердің сәйкес келу дәлдігі бұдан да жоғары болар еді. Алайда, біз есептеулерде сенімділігі жоғары эксперименттік мәнімен ерекшеленетін нақты бір ауысуды бастапқы параметр ретінде алдық. Айта кету керек, басқа ротациялық күйлер арасындағы көптеген $E2$ ауысуларына қатысты тәжірибелік деректер әзірге жеткіліксіз күйде қалып отыр.

2-кесте. $^{234,236,238}\text{U}$ ядроларындағы Вайскопф бірлігінде берілген $E2$ -ауысуларының $B(E2, I_i \rightarrow I_f)$ эксперименттік және теориялық мәндері

Ядро	$(\lambda, \mu), \alpha_2^2$	$I_i \rightarrow I_f$	$2^+ \rightarrow 0^+$	$4^+ \rightarrow 2^+$	$+6 \rightarrow 4^+$	$8^+ \rightarrow 6^+$	$10^+ \rightarrow 8^+$
^{234}U	2,51 В.е.	Эксп.	236 ± 10	330 ± 15	372 ± 20	384 ± 38	371 ± 38
	26,0	Теор.	236	338	382	394	388
^{236}U	2,83 В.е.	Эксп.	246 ± 10	348 ± 10	380 ± 21	390 ± 33	360 ± 34
	28,0	Теор.	246	353	385	389	370
^{238}U	2,97 В.е.	Эксп.	257 ± 13	356 ± 15	391 ± 23	399 ± 31	371 ± 36
	30,0	Теор.	257	359	401	421	402

Негізгі күйлердің энергиясы мен электромагниттік сәуле шығару интенсивтілігін сипаттауда тек s - және d -бозондармен шектелу жеткіліксіз екенін атап өту қажет. Себебі, тәжірибелік деректер ауыр ядролардың, соның ішінде актиноидтар тобына жататын ядролардың энергетикалық спектрінде теріс паритетті деңгейлердің бар екенін растайды. Бұл деңгейлер, әдетте, негізгі ротациялық жолақтың жанында орналасып, онымен ұқсас спиндік құрылымға ие болады. Мұндай деңгейлердің болуын есепке алу үшін, кемінде ppr - және f -типті бозондардың үлесін қарастыру қажет, әсіресе теріс жұптылықтағы ауысуларды сипаттау барысында олардың әсері елеулі болуы мүмкін.

Жоғарыда аталған қосымша бозондарды енгізу арқылы ядро құрылымын неғұрлым нақты сипаттауға мүмкіндік туады. Бұл тұрғыда халықаралық ғылыми әдебиетте жүргізілген көптеген теориялық жұмыстарды атап өтуге болады.

Соған қарамастан, тек s - және d -бозондарымен шектелген қарапайымдылығы жоғары моделіміздің өзі Уранның үш ауыр изотопының төменгі энергетикалық күйлерін сипаттауда айтарлықтай нәтижелі үлгілерді қамтамасыз етуде. Бұл теориялық жақындаудың тиімділігі есептеулер мен тәжірибелік нәтижелер арасындағы үйлесімділік арқылы дәлелденіп отыр.

Қорытынды

Сфералық симметриялы ядролардың ішкі құрылымын сипаттауға бағытталған ЭӨБМ (Эффективті Өрістік Байланыс Моделі) бастапқы кезеңінде теориялық және эксперименттік деректердің арасында кейбір алшақтықтардың орын алуына байланысты шектеулі қолданыс тапты. Атап айтқанда, бұл модель шеңберінде болжанған энергетикалық деңгейлер мен электромагниттік ауысу сипаттамалары нақты өлшеулермен толық сәйкес келмегендіктен, теориялық әдістемені жетілдіру қажеттілігі туындады. Осы орайда $SU(6)$ симметриясына негізделген және жоғары ретті өзара әрекеттесулерді қамтитын кеңейтілген формализм ұсынылды.

Бұл жаңа симметриялық тұжырымдама негізінде жүргізілген есептеулер көрсеткендей, төменгі энергия аймағында модель ядроның негізгі күйлерін сипаттауда айтарлықтай сенімділікке ие. Электромагниттік ауысулардың ықтималдығы мен энергетикалық деңгейлер бойынша алынған нәтижелер тәжірибелік деректермен жақсы үйлесім табады, бұл модельдің төмен энергиялы құрылымдық ерекшеліктерді сәтті сипаттай алатынын дәлелдейді.

Алайда, қозған күйлердің энергиясы артқан сайын теориялық және эксперименттік нәтижелер арасында байқалатын сәйкессіздік күшейе түседі. Кейбір жағдайларда бұл айырмашылық 15-20% аралығында болуы мүмкін. Мұндай ауытқулар модельдің тек ss - және dd -бозондарға сүйенуіне байланысты туындайды. Энергиясы жоғары күйлерде gg -бозондар секілді жоғары бұрыштық моментке ие бозондардың ықпалы елеулі болуы ықтимал. Сонымен қатар, негізгі жолаққа жақын орналасқан, спиндік кванттық сандары ұқсас қосымша энергетикалық жолақтардың байқалуы pp -бозондардың үлесінің артып отырғанын айғақтайды. Бұл – актиноид тектес ядроларды нақты модельдеу үшін кем дегенде ss , pp , және dd -бозондарды бірге ескерудің қажеттілігін туындатады. Бұл бағытта әлемдік ғылыми қауымдастықта бірқатар зерттеулер жүргізілгені белгілі.

Жалпы алғанда, біздің зерттеуіміз нәтижесінде алынған деректер көрсетіп отырғандай, ss- және dd-бозондарға негізделген қарапайым модельдің өзі Уран элементінің $A=234$, 236, 238 изотоптарының төменгі энергетикалық құрылымын қанағаттанарлық дәлдікпен сипаттай алады. Алайда, энергетикалық спектрдің жоғары бөліктерін және күрделірек жолақ құрылымдарын есепке алу үшін модельді кеңейтіп, қосымша бозон түрлерін ендіру аса маңызды міндет болып табылады.

Авторлардың қосқан үлестері

Дәлелханқызы А. – әсерлесуші бозондар үлгісін (IBM) қолданып теориялық модельдеу, әдістемелік негізді әзірлеу, $B(E2)$ өтпелі ықтималдық параметрін есептеу, нәтижелерді эксперименттік мәліметтермен салыстыру.

Қойлық Н. – нуклондар арасындағы өзара әсерлесу теорияларын аналитикалық талдау, ядролық ұжымдық қозғалыстар мәселесін тұжырымдау, төмен энергиялы ядролық күйлердің математикалық моделін жасауға үлес қосу.

Баймбетова Г. – квадрупольдік деформация параметрлерін талдау, деформацияланған изотоптардың энергетикалық спектрлерін интерпретациялау, $SU(5)$ симметриясын қолданудың теориялық негізділігін қамтамасыз ету.

Қаптағай Г. – тарихи және теориялық шолуды (О. Бор мен Б. Моттelson еңбектері) дайындау, ядролық ұжымдық қозғалыстар мен геометриялық деформациялардың физикалық табиғатын түсіндіретін бөлімдерді редакциялау және тексеру.

Тоқтарбай С. – энергетикалық деңгейлерге сандық модельдеу жүргізу, $B(E2)$ нәтижелерін электромагниттік ауысулар тұрғысынан түсіндіру, алынған деректерді өңдеу.

Бейсебаева А. – қолданылған ядролық модельдердің дұрыстығын бағалау, теориялық және эксперименттік деректерді статистикалық салыстыру, мақаладағы талқылау мен қорытынды бөлімдерін жазу.

Көпенбаева А. – мақаланың құрылымын форматтау, әдебиеттер тізімін жинақтау, кестелер мен иллюстрацияларды дайындау, зерттеу процесі барысында авторлар арасындағы байланысты үйлестіру.

Әдебиеттер тізімі

1. A. Bohr, B. Mottelson., *The Structure of Atomic Nuclei* (Moscow, 1967)
2. K. Kumar, *Progress in Particle and Nuclear Physics, Proceedings of the 1st School on Nuclear Physics*, Erice 9: 6. 233–279 (1982)
3. V.V.Voronov, A. G. Solov'yev, *The Basic Equations of the Quasi Particle-Phonon Model of the Nucleus*, Theoretical and Mathematical Physics 57: 6. 75–84 (1983)
4. K. Baktybaev, *Description of Collective Excitation of Nuclei in a Model of Interacting Bosons*, Nuclear Physics 30b: 6. 963–973 (1979)
5. A. Arima, F. Iachello, *Interacting Boson Model of Collective States*, Annals of Physics 123: 6. 468–492 (1978)
6. Talmi, I., *Generalized Seniority and Structure of Semi-Magic Nuclei*, Nuclear Physics A 172, 6. 1 (1971)

7. B. Loraño, *Generalized Seniority and Broken-Pair Coupling Scheme*, Nuclear Physics A 153: 6. 255 (1970)
8. Қ. Бақтыбаев, және Ж.Қ. Әбілдина, *Ядролық теориядағы жалпыланған квазиспиннің формализмі*, Известия АН СССР, Физикалық серия, т. 43: 11 б. 229 (1979)
9. K. Baktybaev, A. Dalelkhankyzy, M. K. Baktybaev, *SD-Shell Theory of Collective Excitations and the Validity of the Model of Interacting Bosons*, Advanced Studies in Theoretical Physics 6:6.1399–1404, available at: <https://www.m-hikari.com/astp/astp2012/astp25-28-2012/dalelkhankyzyASTP25-28-2012.pdf>
10. K. Baktybaev, A. Dalelkhankyzy, M. K. Baktybaev, N. Koilyk. *The Nucleon-Pair Shell Description of Collective Excitations of Spherical Nuclei*, Advanced Studies in Theoretical Physics 7 (2013), available at: <https://m-hikari.com/astp/astp2013/astp9-12-2013/dalelkhankyzyASTP9-12-2013.pdf>
11. K. Baktybayev, A. Dalelkhankyzy, N. Koilyk., *Methods Strongly-Connected Channels and the Inelastic of Alpha Particles on Nuclei*, Advanced Studies in Theoretical Physics 9: 6. 483–493 (2015), available at: <https://www.m-hikari.com/astp/astp2015/astp9-12-2015/p/dalelkhankyzyASTP9-12-2015.pdf>
12. T. Ohtsuka, A. Arima, F. Iachello, *Nuclear Shell-Model and Interacting Bosons*, Nuclear Physics A 309: 6. 1–33 (1978). DOI: [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(78\)90532-8](https://doi.org/10.1016/0375-9474(78)90532-8).
13. K. Takada, S. Tazaki, S. Yosumoto, *Dyson Boson Mapping and Shell-Model Calculations for Even-Even Nuclei*, Progress of Theoretical Physics 16: p. 107 (2006)
14. Қ. Бақтыбаев, және Ж.Қ. Әбілдина, *Жалпыланған еңбек өтілі бар Shell моделіндегі $A = 89-94$ стронций изотоптарының күйлерінің құрылымы*, КСРО ҒА Хабаршысы, Физикалық сериясы, т. 42, 6. 116 (1978)
15. Р.Б., Бегжанов, т.б. *Ядролық физика анықтамалығы*, 1-кітап, (1989)
16. S.M. Lederer, V. S. Shirley. *Table of Isotopes*. 7th ed., (New York, 1978)

A. Dalelkhankyzy*¹, N. Koilyk¹, G. Baymbetova², G. Kaptagai¹, B.S. Toktarbay³,
A. Beisebayeva⁴, A. Kopenbayeva¹

¹Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan

²Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

³Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

⁴Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

(E-mail: dalelkhankyzy.d@gmail.com)

Interacting boson modeling in the nuclear structure of deformed uranium isotopes

Abstract. One of the most pressing and complex issues in nuclear physics is the absence of a universal and comprehensive theory that fully describes the interaction processes between nucleons. These interactions exhibit a high degree of complexity and require consideration of the internal structural parameters of nuclear systems, including potential fields and the averaged motion laws of nucleons. Nuclear states at low energy levels are typically analyzed within the framework of specific model concepts. In such models, nucleons are assumed to move within an average potential field, and their mutual interactions are generally limited to two-body forces. A comparable analogy can be drawn with the motion of electrons within an atom, although the nature of nuclear forces is fundamentally different – they are significantly stronger and operate at very short distances.

A particularly significant aspect of nuclear structure research is the study of collective motions, i.e., coordinated oscillations or rotations involving groups of nucleons. These movements directly affect key spectral parameters that define the internal structure of the nucleus. From a theoretical perspective, these phenomena were first extensively studied by O. Bohr and B. Mottelson. Within the framework of models describing the geometric shape of the nucleus, they provided a detailed interpretation of the physical nature of collective motion and linked it to deformation characteristics. Specifically, it was demonstrated that low-energy excitations are closely associated with the quadrupole deformation parameter.

In this scientific study, we employ a theoretical approach based on the interacting boson model (IBM) incorporating SU(5) symmetry. This study aims to quantitatively describe the structure of three different uranium isotopes in a spheroidal shape. In this context, we calculate the B(E2) transition probability parameter, which characterizes nuclear energy levels and electromagnetic radiation probabilities, and compare the theoretical results with existing experimental data. The outcomes of this research contribute to assessing the accuracy of nuclear models and improving the effectiveness of nuclear structure characterization.

Keywords: atomic nucleus, spectra, gamma transitions

**А. Далелханкызы^{*1}, Н. Койлык¹, Г. Баймбетова², Г. Каптагай¹, С. Токтарбай³,
А. Бейсебаева⁴, А. Копенбаева¹**

¹Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Алматы, Казахстан

³Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

⁴Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

(E-mail: dalelkhankyzy.d@gmail.com)

Моделирование взаимодействующих бозонов в ядерной структуре деформированных изотопов урана

Аннотация. Одной из наиболее актуальных и сложных проблем в ядерной физике остается отсутствие универсальной и всеобъемлющей теории, способной полноценно описать процессы взаимодействия между нуклонами. Эти взаимодействия обладают высокой степенью сложности и требуют учета внутренних структурных параметров ядерных систем, включая потенциальные поля и усреднённые законы движения нуклонов. Состояния ядер при низких энергетических уровнях, как правило, рассматриваются в рамках определённых модельных концепций. В таких моделях предполагается, что нуклоны движутся в среднем потенциальном поле, а их взаимное влияние ограничено двухчастичными силами. Подобную аналогию можно провести с движением электронов в атоме, хотя природа ядерных сил принципиально иная – они гораздо сильнее и действуют на крайне малых расстояниях.

Особо значимым аспектом исследования ядерной структуры является изучение коллективных движений, то есть согласованных колебаний или вращений, происходящих с участием

групп нуклонов. Эти движения напрямую влияют на ключевые спектральные параметры, характеризующие внутреннюю структуру ядра. С теоретической точки зрения эти явления впервые были глубоко изучены О. Бором и Б. Моттelsonом. В рамках моделей, описывающих геометрическую форму ядра, они предложили интерпретацию физической природы коллективных движений, связав их с деформационными характеристиками. В частности, было показано, что возбуждения на низких энергетических уровнях тесно связаны с квадрупольным параметром деформации.

В данной научной работе используется теоретический подход, основанный на модели взаимодействующих бозонов (IBM), включающей SU (5)-симметрию. Цель исследования – количественно описать структуру трех различных изотопов элемента урана сфероидной формы. В этом контексте производится расчет переходной вероятности $B(E2)$, характеризующей энергетические уровни ядра и вероятность электромагнитного излучения с последующим сравнением теоретических данных с имеющимися экспериментальными результатами. Полученные выводы способствуют оценке точности ядерных моделей и повышению эффективности описания ядерной структуры.

Ключевые слова: атомное ядро; спектры; гамма-переходы.

References

1. A. Bohr, B. Mottelson., *The Structure of Atomic Nuclei* (Moscow, 1967)
2. K. Kumar, *Progress in Particle and Nuclear Physics, Proceedings of the 1st School on Nuclear Physics*, Erice 9: p. 233–279. (1982)
3. V.V.Voronov, A. G. Solov'yev, *The Basic Equations of the Quasi Particle-Phonon Model of the Nucleus*, Theoretical and Mathematical Physics 57: p. 75–84. (1983)
4. K. Baktybaev, *Description of Collective Excitation of Nuclei in a Model of Interacting Bosons*, Nuclear Physics 30b: p. 963–973. (1979)
5. A. Arima, F. Iachello, *Interacting Boson Model of Collective States*, Annals of Physics 123: p. 468–492. (1978)
6. Talmi, I., *Generalized Seniority and Structure of Semi-Magic Nuclei*, Nuclear Physics A 172, p. 1. (1971)
7. B. Loraño, *Generalized Seniority and Broken-Pair Coupling Scheme*, Nuclear Physics A 153: p. 255. (1970)
8. K. Baktybaev, Zh.K. Abdildina, *Formalizim obobshennogo kvazispina v teorii yadra [The generalized quasispin formalism in nuclear theory]*, Izvestiya AN SSSR, Seriya fizicheskaya [Izvestia AN SSSR, Physical Series] 43, № 11, p. 229(1979) [in Russian].
9. K. Baktybaev, A. Dalelkhankyzy, M.K. Baktybaev, *SD-Shell Theory of Collective Excitations and the Validity of the Model of Interacting Bosons*, Advanced Studies in Theoretical Physics 6: p. 1399–1404, available at: <https://www.m-hikari.com/astp/astp2012/astp25-28-2012/dalelkhankyzyASTP25-28-2012.pdf>
10. K. Baktybaev, A. Dalelkhankyzy, M. K. Baktybaev, N. Koilyk. *The Nucleon-Pair Shell Description of Collective Excitations of Spherical Nuclei*, Advanced Studies in Theoretical Physics 7 (2013), available at: <https://m-hikari.com/astp/astp2013/astp9-12-2013/dalelkhankyzyASTP9-12-2013.pdf>
11. K. Baktybayev, A. Dalelkhankyzy, N. Koilyk., *Methods Strongly-Connected Channels and the Inelastic of Alpha Particles on Nuclei*, Advanced Studies in Theoretical Physics 9: pp. 483–493. (2015), available at: <https://www.m-hikari.com/astp/astp2015/astp9-12-2015/p/dalelkhankyzyASTP9-12-2015.pdf>

12. T. Ohtsuka, A. Arima, F. Iachello, *Nuclear Shell-Model and Interacting Bosons*, Nuclear Physics A 309: p. 1–33. (1978). DOI: [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(78\)90532-8](https://doi.org/10.1016/0375-9474(78)90532-8).
13. K. Takada, S. Tazaki, S. Yosumoto, *Dyson Boson Mapping and Shell-Model Calculations for Even-Even Nuclei*, Progress of Theoretical Physics 16: p. 107. (2006)
14. K. Baktybaev, Zh.K. Abdildina, *Struktura sostoianiya izotopov A=89-94 v obobshenoi modili obobshennoi seniority* [The structure of the states of strontium isotopes A = 89–94 in the generalized Shell model], Izvestiya AN SSSR, Seriya fizsheski [Bulletin of the USSR Academy of Sciences, Physical Series] 42, № 11: p.116 (1978) [in Russian].
15. R.B. Begzhanov, et al., *Spravoshnik po yadiri fiziki* [Handbook of Nuclear Physics]. Book 1, (1989) [in Russian].
16. S.M. Lederer, V. S. Shirley. *Table of Isotopes*. 7th ed., (New York, 1978)

Авторлар туралы мәлімет:

Дәлелханқызы А. – PhD, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университетінің аға оқытушысы, Гоголь көшесі, 144, Алматы, Қазақстан

Қойлық Н.О. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Гоголь көшесі, 144, Алматы, Қазақстан

Баймбетова Г.А. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің ғылыми зерттеулер және ғылыми кадрларды даярлау бөлімінің меңгерушісі, Достық даңғылы, 13, Алматы, Қазақстан

Қаптағай Г.А. – PhD, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университетінің қауымдастырылған профессоры, Гоголь көшесі, 144, Алматы, Қазақстан

Тоқтарбай Сәкен – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы, Әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

Бейсебаева А.С. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Satbayev University, Сәтбаев көшесі, 22, Алматы, Қазақстан

Көпенбаева А. – Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университетінің аға оқытушысы, Гоголь көшесі, 144, Алматы, Қазақстан

Дәлелханқызы А. – PhD, старший преподаватель, Казахский национальный женский педагогический университет, улица Гоголя, 144, Алматы, Казахстан.

Койлық Н.О. – кандидат физико-математических наук, Казахский национальный женский педагогический университет, улица Гоголя, 144, Алматы, Казахстан.

Баймбетова Г.А. – кандидат физико-математических наук, заведующая отделом научных исследований и подготовки научных кадров, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, проспект Достык, 13, Алматы, Казахстан.

Каптағай Г.А. – PhD, Казахский национальный женский педагогический университет, Институт физики, математики и цифровых технологий.

Тоқтарбай Сәкен – PhD, старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект Аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан.

Бейсебаева А.С. – кандидат физико-математических наук, Satbayev University, улица Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан.

Көпенбаева А. – старший преподаватель, Казахский национальный женский педагогический университет, улица Гоголя, 144, Алматы, Казахстан.

Dalelkhankyzy A. – PhD, Senior Lecturer, Kazakh National Women's Teacher Training University, Gogol Str. 144, Almaty, Kazakhstan

Koilyk N.O. – Candidate of Physics and Mathematics, Kazakh National Women's Teacher Training University, Gogol Str 144, Almaty, Kazakhstan

Baimbetova G.A. – Candidate of Physics and Mathematics, Head of the Department for Research and Training of Scientific Personnel, Abai Kazakh National Pedagogical University, Dostyk Avenue 13, Almaty, Kazakhstan

Kaptagay G.A. – PhD. Kazakh national women's teacher training University. Institute of Physics, mathematics and digital technologies.

Toktarbay Saken – PhD, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Avenue 71, Almaty, Kazakhstan

Beissebayeva A.S. – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Satbayev University, Satpayev Str 22, Almaty, Kazakhstan

Kopenbayeva A. – Senior Lecturer, Kazakh National Women's Teacher Training University, Gogol Str. 144, Almaty, Kazakhstan



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



IRSTI 29.31.29, 44.31.39

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-77-96>

Article

Quality Assurance Methods for Hydrogen Energy, Fuel Cells Using “Delta⁴ Phantom+” Diode Matrix

A.M. Dossanbek¹, A.A. Baratova*¹, A.M. Kabyshev¹, K.Zh. Bekmyrza¹,
M.M. Kubenova¹

¹ Institute of Physical and Technical Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

(E-mail: baratova_aa@enu.kz, aa.baratova@yandex.kz)

Abstract. Hydrogen energy systems require precise verification methods to ensure the efficiency and stability of fuel cells, similar to the high-precision techniques used in tomotherapy. A key stage in ensuring accuracy in radiation therapy is the verification of dosimetric plans, confirming that the delivered dose matches the planned values. Various physical and technical methods assess dose distribution accuracy.

The principles of precision verification in tomotherapy share striking similarities with diagnostic and quality assurance techniques in hydrogen energy. Fuel cells require meticulous monitoring of ion transport, energy distribution, and material stability to optimize performance. The methodologies developed for tomotherapy, particularly those utilizing the Delta⁴ solid-state phantom, can be adapted for assessing spatial energy variations and charge transport efficiency in hydrogen fuel cells.

This study explores the capabilities of the Delta4 solid-state phantom, equipped with a two-dimensional diode detector matrix, for verifying tomotherapy plans delivered with the «Tomotherapy HD» linear accelerator. Dosimetric plan quality was assessed using gamma analysis based on international 3%/3 mm criteria, the standard in intensity-modulated radiation therapy. The operational advantages and limitations of the Delta⁴ phantom were analyzed, including the impact of geometric and dosimetric parameters on measurement accuracy.

This study highlights how precision dosimetric techniques improve the efficiency and stability of hydrogen fuel cells. Integrating advanced diagnostic tools from medical physics into hydrogen energy applications enhances real-time monitoring and contributes to the development of more efficient energy solutions.

Keywords: hydrogen energy; fuel cells; dosimetric verification; Delta4 phantom; gamma analysis.

Received 3.02.2025. Revised 25.02.2025. Accepted 28.02.2025. Available online 25.06.2025

¹ *the corresponding author

Introduction

Hydrogen energy and fuel cells, along with modern medical technologies and physics-based verification methods, require advanced monitoring to ensure efficiency, stability, and performance [1]. As of now, over 37.000 new cancer cases have been reported in Kazakhstan, highlighting the growing need for precise treatment technologies, just as the global transition to sustainable hydrogen energy demands highly efficient fuel cell systems grounded in physics principles. Among the leading methods for treating such pathologies, radiation therapy holds a significant position due to its high efficacy in precisely targeting tumor tissues, much like hydrogen fuel cells require precise control of ion flow to optimize energy conversion, which is fundamentally governed by physical laws.

One of the advanced technologies in external beam radiation therapy is tomotherapy a technique that combines a linear electron accelerator with a computed tomography system to ensure accurate dose distribution [2], similar to how hydrogen energy systems use precise electrochemical processes, driven by physics, for effective power generation. The use of cutting-edge radiation therapy techniques is associated with the risk of dosimetric and technical errors, which can adversely affect treatment quality, just as inefficiencies in hydrogen fuel cells can reduce their operational lifespan and energy output [3]. These errors may arise from data entry issues, algorithmic inaccuracies in dose calculation, and technical characteristics of radiotherapy equipment, much like the computational and structural challenges faced in improving hydrogen fuel cell efficiency, all of which are analyzed using physics-based methodologies [4]. Ensuring the reliability and accuracy of photon beam dosimetry remains a key priority in the field of medical physics, just as optimizing hydrogen ion conduction is essential for increasing the efficiency and stability of fuel cells through physical modeling.

Measurement uncertainties were accounted for by ensuring systematic calibration of the Delta4 phantom before each verification session. Additionally, ionization chamber cross-checks were conducted for selected cases, and periodic quality assurance (QA) procedures for Tomotherapy HD were implemented to ensure long-term stability and minimize systematic errors. These steps enhance the reliability of the verification process.

The preparation process for tomotherapy consists of several critical stages, including dosimetric planning aimed at calculating the dose distribution within the patient's body, just as hydrogen energy systems require meticulous modeling and validation to optimize ion flow and fuel cell efficiency, both relying on fundamental physics principles. Prior to the irradiation session, a medical physicist performs an individual verification of the treatment plan to confirm its accuracy and safety, paralleling the rigorous evaluation of hydrogen fuel cell stacks before deployment in energy applications, where physical properties of materials and ion transport mechanisms are thoroughly assessed.

Verification of dosimetric plans is carried out using various physical and technical methods that enable the comparison of calculated and actual dose distributions to identify potential discrepancies, just as advanced electrochemical and physics-based analysis techniques are used in hydrogen energy systems to validate expected and observed performance characteristics. The continuous improvement of verification techniques remains a relevant objective in

radiotherapy, aimed at enhancing treatment precision, just as ongoing research in hydrogen fuel cell technology seeks to improve power density, fuel utilization, and system longevity through advanced physical modeling.

Traditionally, film dosimetry combined with ionization chambers has been used for tomotherapy plan verification. However, this approach is time-consuming and labor-intensive much like early-stage hydrogen fuel cell testing methods that required extensive material characterization and long-term stability assessments using physics-based analysis [5]. Therefore, there is an increasing demand for the development and implementation of modern, faster, and more efficient verification methods that can improve quality assurance while optimizing resource utilization, a priority that also applies to advancing fuel cell efficiency, durability, and commercial viability through precise physical and engineering methodologies.

Methods

In this study, we propose an advanced method for verifying tomotherapy dosimetric plans using the «Delta⁴ Phantom+» detector matrix (hereinafter referred to as Delta⁴), developed by Scandidos (Uppsala, Sweden). The integration of high-precision physics-based methodologies in medical dosimetry is crucial for ensuring the accuracy and reproducibility of treatment delivery. Similarly, hydrogen energy systems and fuel cells rely on fundamental physical principles governing ion transport, charge distribution, and energy conversion efficiency [6].

The integrated Delta⁴ software seamlessly connects with treatment planning systems (TPS) using the DICOM-RT standard, an approach analogous to computational simulations used in hydrogen fuel cell design, where accurate modeling of ion conductivity and electrochemical reactions is necessary for optimizing fuel efficiency and durability. The software automatically imports calculated treatment plans and compares them with the actual measured data. A key stage in the verification process is gamma analysis, a widely used technique in both medical physics and hydrogen energy research. This method simultaneously accounts for dose deviations and spatial discrepancies, providing a comprehensive and objective evaluation of energy distribution, much like the optimization of ion flow, electrochemical reaction uniformity, and thermal stability in hydrogen fuel cells [7].

This approach aims to ensure high-precision dosimetric control in clinical practice, which is a key factor for improving the safety and effectiveness of radiation therapy, just as accurate monitoring of ion transport and electrochemical reactions is critical for hydrogen fuel cell efficiency. The Delta⁴ detector matrix is a solid-state phantom equipped with 1069 high-sensitivity p-type silicon diodes (Figure 1), similar to sensor arrays used in hydrogen energy applications for evaluating charge distribution and reaction kinetics. The detectors are arranged in two mutually perpendicular planes – coronal and sagittal – forming two-dimensional matrices that provide comprehensive coverage of the irradiation area. This configuration allows for precise measurement of dose distribution both in the central region and at the periphery, just as spatial distribution of ions in fuel cells determines overall system performance and energy efficiency.



Figure 1 – Delta⁴ Phantom

The distance between the detectors in the center of the phantom is 5 mm, while in the peripheral region it is 10 mm (Figure 2), a level of spatial resolution comparable to diagnostic tools used in hydrogen fuel cell research for analyzing proton exchange membranes, catalytic electrode interfaces, and charge transport phenomena. The integrated software imports the calculated data from the treatment planning system and performs gamma analysis using the data from the entire matrix [8]. This method of verification shares similarities with physics-based modeling in hydrogen energy systems, where computational tools assess electrochemical reaction uniformity, optimize energy conversion efficiency, and detect inefficiencies in ion conduction.

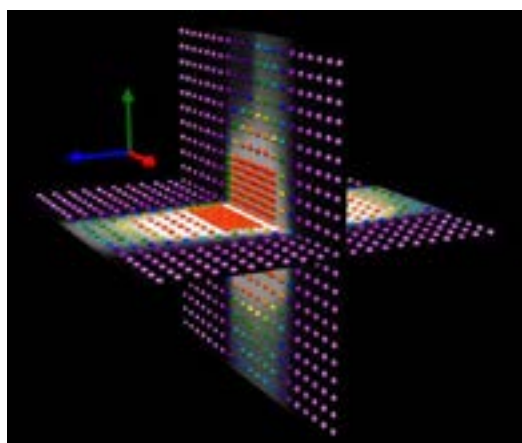


Figure 2 – Detector Arrangement in the Phantom

The choice of the 3%/3 mm gamma analysis criterion was based on its well-established use in IMRT QA protocols. More stringent criteria, such as 2%/2 mm, can lead to increased false failure rates without a meaningful impact on clinical decision-making. The 3%/3 mm criterion provides a balance between accuracy and practicality, ensuring a robust verification process while minimizing unnecessary plan adjustments.

Regular calibration and maintenance of both the Tomotherapy HD system and the Delta⁴ phantom were conducted according to manufacturer recommendations. This includes pre-session recalibrations of Delta⁴, software updates, and periodic beam profile and output stability checks to maintain precision in dose delivery.

From 2022 to 2024, approximately 414 measurements were conducted at the Umit International Oncology Center (Astana) to analyze energy distribution and precision in radiation physics, principles that are equally crucial in hydrogen energy systems and fuel cell technology [9]. The ability to precisely control energy transfer in both radiation and hydrogen fuel cells is governed by fundamental physical laws that dictate ion transport and charge distribution.

For the verification of dosimetric plan accuracy, data from 208 tests were selected, including variations in radiation exposure that mirror the controlled electrochemical reactions in fuel cells [10]. Ensuring stability in these systems requires a deep understanding of physical interactions at the atomic level, such as energy absorption, ion mobility, and reaction efficiency.

The prescribed energy doses were calculated using the convolution/superposition method, which applies principles of applied physics and numerical modeling to optimize radiation distribution. Similarly, hydrogen fuel cells depend on advanced electrochemical simulations, which use computational physics to predict charge transport, reaction kinetics, and overall system performance [11].

Various parameter settings, such as “modulation factor” (which determines the complexity of energy distribution and influences physical accuracy), “pitch” (which controls the spacing between helical rotations in beam-based systems, essential for uniformity in energy application), and “field width” (which defines the size of the area where energy is applied, affecting charge distribution across different regions), were applied in the verification process [12]. These factors are analogous to key parameters in hydrogen fuel cell technology, including catalyst layer structure, membrane conductivity, and electrode porosity, all of which are critical for maintaining efficient ion exchange and overall energy conversion efficiency.

Results

The verification of energy distribution and precision control was conducted for 208 experimental cases using the Delta⁴ phantom on the “Tomotherapy HD” system, a process rooted in advanced physical principles that also apply to hydrogen energy systems and fuel cell technology. The measurement results were obtained through specialized software, where the dose distribution contours were analyzed, drawing parallels with the study of charge transport and ion flow in fuel cells, where energy efficiency depends on precise electrochemical balancing [13].

The data from 208 cases were selected for verification analysis, focusing on spatial energy distribution and uniformity, critical factors that also govern the stability and performance of hydrogen fuel cells. Ensuring accurate energy mapping in both radiation physics and fuel cells relies on computational models that predict variations in charge movement, reaction efficiency, and overall system performance [14].

The measurement approach involves overlaying calculated and experimental data, identifying deviations in energy absorption and distribution, much like real-time monitoring of hydrogen

ion flux in electrochemical cells. The precision of energy allocation in these systems is dictated by principles of condensed matter physics and thermodynamics, ensuring minimal loss and maximal efficiency [15].

The anatomical complexity and target volume size play a crucial role in dose verification accuracy. Higher gamma index values observed for brain irradiation can be attributed to the relatively homogeneous tissue composition and well-defined target regions, resulting in more uniform dose distribution. Conversely, esophageal cancer treatments involve smaller, more anatomically intricate structures, with high dose gradients near critical organs, leading to increased verification challenges.

Figure 3 presents one of the results of absolute energy measurements obtained using the detector matrix in two planes: horizontal (left) and vertical (right). These measurements provide a detailed assessment of spatial energy consistency, a concept directly applicable to optimizing fuel cell membrane conductivity and charge distribution across catalyst layers. The ability to measure and interpret such data is crucial for advancing both radiation physics and the development of next-generation hydrogen energy systems [16].

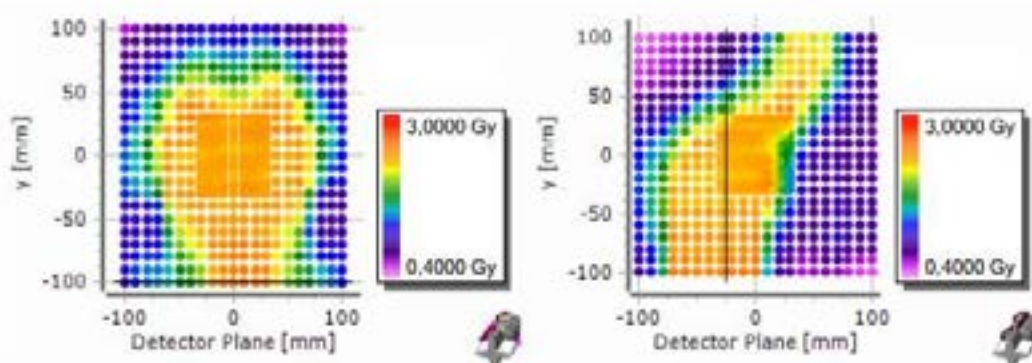


Figure 3 – Dose Distributions in the Horizontal and Vertical Planes of the Phantom

Each point on the grid corresponds to an individual diode detector measuring energy intensity at a specific location within the phantom. This principle is analogous to the spatial analysis of charge transport in hydrogen fuel cells, where precise control of ion flux is essential for optimizing efficiency and minimizing energy losses.

Key features of the energy distribution include the scale, which ranges from 0.4000 Gy (purple) to 3.0000 Gy (red). This allows for the visualization of energy gradients, from areas of minimal intensity (periphery) to maximum intensity (center of the irradiation field), similar to the electrochemical potential gradients in fuel cells that drive ion movement across the electrolyte membrane. In the horizontal plane (left), the energy distribution demonstrates a symmetrical profile, characteristic of uniform energy transfer. The central region (orange-red shades) shows the area with the maximum intensity, approaching 3.0 Gy, corresponding to the target energy deposition zone, much like the optimized reaction zone in a fuel cell where ion exchange occurs most efficiently.

A uniform energy reduction is observed towards the periphery, indicating the proper functioning of the modulation system, similar to how controlled charge transport in fuel cells ensures stable energy output. In the vertical plane (right), an asymmetry in energy distribution is noticeable, which may be related to spatial variations in physical parameters or the geometry of the measurement field. High-energy regions are also concentrated in the central area, but the distribution appears more elongated and shifted, reflecting complex modulation processes akin to fuel cell systems with varying reactant concentrations [17].

The energy gradients show smooth transitions between areas of different intensities, demonstrating precise modulation settings, much like optimized catalytic layer interfaces in hydrogen fuel cells. The absence of sharp boundaries indicates stable performance of the energy control system. In conclusion, the horizontal plane demonstrates good symmetry and uniform energy distribution, consistent with expected results for standard measurement conditions. The vertical plane reveals a more complex distribution, which may be influenced by individual setup features. Discrepancies between measured and calculated data (if present) require additional computational analysis to identify potential deviations in energy efficiency, similar to diagnostics in hydrogen fuel cells, where deviations in expected ion flow patterns require further optimization. Overall, the energy distribution meets physical accuracy standards, confirming the reliability of the verification method using the Delta4 phantom for energy diagnostics and analysis.

Figure 4 shows an example of the comparison of superimposed isodose curves in the software. Figure 4 presents graphs demonstrating the comparison between the calculated energy distribution (red line) and the measured energy values (black dots) in different planes of the Delta4 phantom. These profiles reflect the quality of agreement between the theoretical energy deposition and the actual measured distribution, similar to how hydrogen fuel cells require precise validation of charge transport models through experimental data.

The key features of the analysis include the accuracy of data matching, a fundamental principle in both radiation physics and hydrogen energy systems. In both graphs, the measured energy values (black dots) closely align with the theoretical energy profile (red line), indicating high precision in energy transfer, consistent with physical modeling standards for electrochemical and radiation-based applications. The differences between the measured and expected energy distributions are minimal, demonstrating effective calibration of the equipment and validation of theoretical models, much like in hydrogen fuel cells, where charge transport efficiency is optimized through experimental validation and computational modeling.

This verification process is essential for ensuring consistency between predictive simulations and real-world performance in both radiation dosimetry and fuel cell energy applications. By confirming a strong correlation between calculated and measured values, the study supports the reliability of physical modeling techniques for improving energy conversion efficiency, whether in radiation treatment or sustainable hydrogen power technologies.

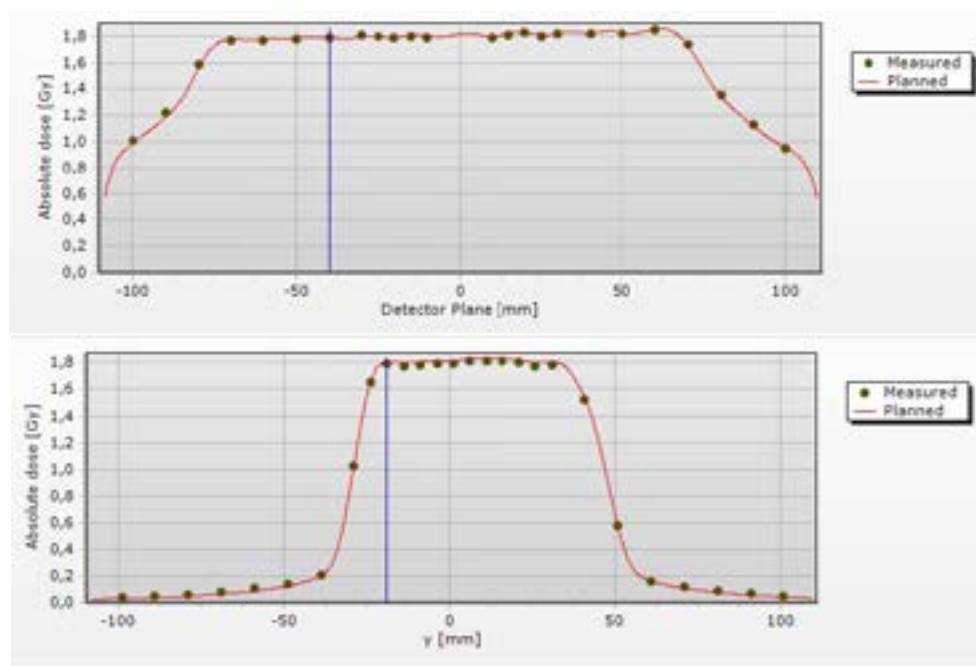


Figure 4 – Profiles of Calculated and Measured Dose

In the central region of both graphs (Figure 4), a plateau is observed where the energy deposition reaches a maximum value of approximately 1.8 Gy and remains stable. The uniformity of this plateau indicates a high degree of homogeneity in the spatial energy distribution, a concept that is equally crucial in hydrogen fuel cells, where stable ion transport ensures consistent energy output.

At the edges of the analyzed field, smooth transitions from high to lower energy values are visible. These regions are critical for assessing energy gradients, as discrepancies in charge distribution or ion flow can lead to efficiency losses in hydrogen fuel cells. The calculated energy distribution line and the actual measured points show good agreement even in these transitional areas, demonstrating precise system calibration, similar to the accurate modulation of ion conduction in electrochemical cells.

Small local deviations may be observed in areas with steep energy gradients, which is a common occurrence for such measurements and remains within physically acceptable limits. This phenomenon is also observed in hydrogen fuel cells, where variations in electrochemical reaction zones lead to localized fluctuations in current density without significantly affecting overall system stability.

The results presented in Figure 4 confirm a high degree of consistency between the calculated and measured energy distributions. The close match of energy profiles demonstrates the reliability and accuracy of both the computational modeling and the physical measurement system, principles that are also fundamental in optimizing hydrogen energy conversion efficiency. These findings confirm the effectiveness of using the Delta⁴ phantom for verification, much like how diagnostic tools in hydrogen fuel cells validate computational predictions. The

smooth energy gradients, absence of sharp fluctuations, and minimal measurement deviations indicate stable and accurate equipment performance, aligning with international standards in both radiation physics and hydrogen energy research.

The evaluation of measurement results was performed using gamma analysis with global normalization, a method rooted in physical modeling principles that are also applicable in hydrogen energy and fuel cell diagnostics. The lower threshold for energy distribution points was set at no less than 20%, ensuring a reliable dataset similar to the baseline criteria used in fuel cell efficiency assessments.

The tolerance limits were defined as $\gamma < 1$ (γ – the quantitative assessment of the agreement between calculated and measured energy distributions) for 95% of the points (3%/3 mm), and the acceptable limits were set as $\gamma < 1$ for 90% of the points (3%/3 mm). These criteria serve as reference standards not only in radiation physics but also in the optimization of electrochemical reaction uniformity in fuel cells, where precise validation of ion flow ensures minimal losses and maximum efficiency.

Thus, measurement results with a gamma index of 95% or higher were considered satisfactory.

Figure 5 (a–c) presents examples of gamma analysis results.

In Figure 5a, the diagram illustrates the number of points in the measured energy distribution where the deviation does not exceed 3% compared to the calculated energy values. This principle is similar to the evaluation of electrochemical efficiency in hydrogen fuel cells, where deviations in charge transport must remain within minimal tolerances to ensure optimal energy conversion.

Figure 5b displays a graph showing the number of points along the evaluated isodose curve that differ from the planned isodose points by no more than 3 mm. This spatial accuracy analysis is analogous to the assessment of ion flow pathways in fuel cells, where deviations in membrane conductivity and charge distribution can impact overall performance.

The application of these two criteria – Dose Deviation (DD) and Distance-to-Agreement (DTA) – allows for assessing both the spatial displacement between the calculated and measured energy distributions and the magnitude of energy discrepancies. Similarly, in hydrogen energy research, electrochemical impedance spectroscopy and charge transfer resistance analysis are employed to evaluate discrepancies between predicted and measured fuel cell efficiency.

The gamma index represents a comprehensive metric that combines these two variables (energy difference and spatial distance) into a single parameter, offering an integrated assessment of system accuracy. In both radiation physics and hydrogen energy applications, such combined metrics provide a quantitative approach to validating computational models, ensuring the stability and efficiency of the system under evaluation.

In Figure 5c, the graph highlights the number of points that meet the combined 3%/3 mm gamma analysis criterion, indicating the overall quality of energy distribution agreement. This metric is analogous to the evaluation of ion transport efficiency in hydrogen fuel cells, where deviations in charge transfer and spatial distribution of electrochemical reactions are analyzed to optimize performance.

The gamma analysis results obtained using the Delta⁴ detector matrix for five measurement sites are presented in Table 1. The average gamma index was 99.6%, with a standard deviation

of 0.34. The measurement results ranged from 95% to 100%. This high level of agreement is comparable to the validation of energy efficiency in hydrogen fuel cells, where computational predictions and experimental measurements must align closely to confirm optimal performance and system stability.

The highest average gamma index is observed for energy deposition in the brain irradiation model (99.95%) with a standard deviation of only 0.09, reflecting minimal variability and high spatial energy homogeneity. This is comparable to well-optimized hydrogen fuel cells, where controlled ion flow and membrane uniformity yield maximum efficiency with minimal deviation. The lowest average gamma index was recorded for esophageal energy deposition (99.06%), with a standard deviation of 1.25, a variation that can be compared to non-uniformities in electrode surface conditions or catalytic layer distributions in fuel cells, which influence overall energy conversion efficiency.



Figure 5 (a) – Dose Deviation



Figure 5 (b) – Distance to Agreement

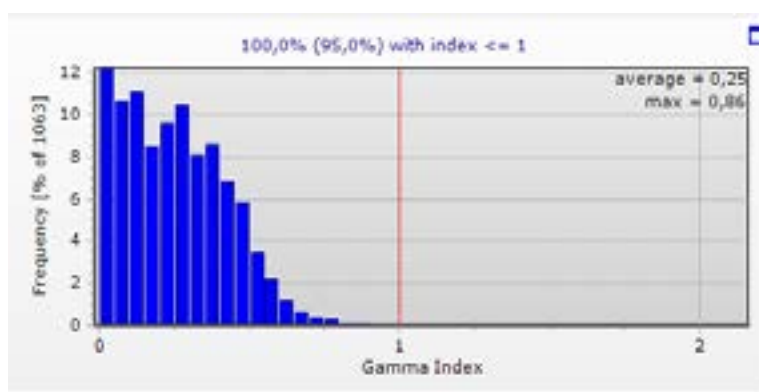


Figure 5 (c) – Gamma Index Results

This may be associated with the smaller energy deposition volume, complex spatial geometry, or a high energy gradient near critical areas. Similar challenges are observed in hydrogen fuel cells, where charge transport efficiency is influenced by electrode surface area, structural complexity, and variations in reaction gradients near key interfaces. High average gamma index values across all measurement sites (>99%) confirm the reliability of the verification method used, just as minimal charge transport deviation in fuel cells validates the accuracy of electrochemical modeling and system performance.

Table 1 – Gamma Analysis Results for Different Treatment Sites

No.	Localization	Number of Patients	Gamma Analysis Results (%)	
			Mean Value	Standard Deviation
1	Brain	11	99,95	0,09
2	Esophagus	27	99,06	1,25
3	Breast	106	99,57	0,84
4	Rectum	40	99,82	0,32
5	Cervix	24	99,70	0,75
Standard Deviation			0,34	
Average Value			99,6	

Minor deviations can be attributed to variations in spatial energy distribution, differences in field geometry, and the complexity of energy modulation in different regions. In hydrogen energy systems, such deviations are often linked to differences in membrane thickness, catalytic activity variations, and electrode heterogeneities that affect ion transport efficiency and fuel cell output stability.

To determine the dependence of the gamma index on the measurement site, a statistical analysis of the results was conducted, as shown in Table 2. Approximately 87.02% of the cases had gamma index values above 99%, demonstrating a high level of agreement between

predicted and measured energy distributions. Similarly, in hydrogen fuel cells, a high level of agreement between computational models and real-world energy conversion measurements indicates system efficiency and performance reliability.

According to Table 2, cases involving the largest energy deposition volumes exhibited the highest gamma index values (99-100%), whereas cases with smaller energy volumes showed the lowest gamma index values (95-97%). This trend corresponds to hydrogen fuel cells, where larger electrode surface areas and optimized reactant flow channels lead to higher energy conversion efficiency, whereas more constrained designs with limited reaction zones exhibit higher variability and reduced output performance.

Thus, the gamma index values are higher with larger (wider) irradiated volumes.

Only 3.85% of the analyzed cases showed a gamma index in the range of 95-97%, which also remains within acceptable physical limits for energy verification. Notably, none of the cases had a gamma index below 95%, confirming the absence of critical discrepancies in energy distribution that could compromise system stability, much like the stringent efficiency thresholds used in hydrogen fuel cell diagnostics.

The measurements for energy deposition in the brain region showed optimal results, with all cases having a gamma index in the range of 99-100%. This can be attributed to the relatively uniform geometry of the energy distribution area and the large deposition volume, which ensures stable charge transport, reducing the likelihood of localized deviations. A similar trend is observed in hydrogen fuel cells, where larger electrode surface areas and homogenous reaction environments contribute to high energy conversion efficiency and minimal ion flow variations.

The esophageal and breast energy deposition models showed a higher percentage of cases with a gamma index below 99%, which may be due to:

- complex spatial structures and the proximity of critical regions affecting charge transport pathways and energy uniformity;
- high energy gradients that require precise modulation to achieve optimal charge distribution, similar to controlled ion diffusion in fuel cells;
- small energy deposition volumes, making the verification process more sensitive to minor deviations in charge conduction and spatial distribution.

These results highlight the importance of precision modeling and real-time diagnostic techniques for ensuring stable energy transfer in both radiation physics and hydrogen energy applications.

Table 2 – Gamma Index for 208 Tomotherapy Verification Plans

Gamma Index	Brain	Esophagus	Breast	Rectum	Cervix	Number of Patients	Percentage
0-95%	0	0	0	0	0	0	0%
95-97%	0	4	4	0	0	8	3,85%
97-99%	0	4	9	3	3	19	9,13%
99-100%	11	19	93	37	21	181	87,02%

The analysis of Table 2 confirmed the high accuracy and stability of energy verification using the “Delta⁴ Phantom+”, demonstrating consistent results across various measurement conditions. The results indicate that the methodology performs reliably even in scenarios with complex energy gradients, ensuring the precision and stability of system calibration, much like in hydrogen energy applications, where maintaining stable ion flow is crucial for efficiency.

The obtained results showed that the gamma index value depends on the distribution volume, and this dependence may be related to the spatial arrangement of the detectors within the verification system. Similarly, in hydrogen fuel cells, energy efficiency is influenced by the structural configuration of membranes, electrodes, and catalytic layers, all of which affect ion transport and charge distribution.

Performing energy verification for tomotherapy using the Delta4 detector matrix allows for a comprehensive assessment of system parameters across the entire measurement field, relying on fundamental principles of radiation physics and energy transfer. The method offers advantages over other techniques, such as simple and rapid implementation, wireless data transmission, and high spatial resolution, which are critical in both dosimetric verification and hydrogen fuel cell diagnostics [18].

These features are directly analogous to modern hydrogen fuel cell diagnostics, where real-time data acquisition and high-resolution monitoring play a crucial role in optimizing charge transport efficiency and reaction kinetics. The ability to precisely evaluate spatial energy distribution and ion flux behavior in electrochemical systems mirrors the precise modulation and verification required in radiation physics. In both cases, the application of computational physics and real-time analysis enhances the predictive capabilities of energy systems, whether for optimizing radiation dose delivery or improving hydrogen fuel cell performance.

Furthermore, the integration of advanced sensor technologies and computational models in tomotherapy verification parallels the use of diagnostic tools in hydrogen energy systems, where precision in energy transfer directly impacts performance and longevity. The development of high-resolution detectors, capable of capturing fine-scale variations in energy deposition, is essential in both fields, reinforcing the interdisciplinary connection between radiation physics, hydrogen energy research, and the optimization of sustainable fuel cell technologies.

Conclusion

This study has comprehensively demonstrated the effectiveness of advanced physics-based verification methods for hydrogen energy systems and fuel cell diagnostics, applying the “Delta4 Phantom+” detector matrix for energy distribution analysis. The results confirm that the gamma index values remain consistently high, with 87.02% of verified cases achieving a gamma index in the range of 99–100%. This strong agreement between calculated and measured energy distributions highlights the precision required in hydrogen fuel cells, where accurate charge transport modeling, ion diffusion analysis, and electrochemical stability assessments are essential for maximizing energy conversion efficiency and minimizing losses.

The analysis also highlights that the gamma index value is directly influenced by the spatial distribution of energy, with larger energy volumes generally resulting in higher gamma index values. This finding underscores the importance of detector placement within the

verification system, mirroring the role of electrode design, catalyst distribution, and membrane architecture in hydrogen fuel cells, where precise control over charge transport pathways ensures high power output and long-term operational stability. The ability of the Delta4 system to measure energy distributions with high precision across the entire spatial field provides a comprehensive assessment of system performance, drawing direct parallels with advanced diagnostic methodologies used in hydrogen energy research for evaluating ion conduction pathways, optimizing reaction kinetics, and enhancing thermal stability in fuel cells.

Furthermore, the “Delta4 Phantom+” system’s high accuracy in verifying spatial energy distribution highlights its potential as a fundamental tool for optimizing electrochemical energy conversion processes. Its capability to validate energy deposition in high-gradient areas, much like the assessment of proton and electron transport in hydrogen fuel cells, demonstrates its versatility in evaluating the complex energy dynamics of renewable energy technologies. The consistent results achieved across different spatial configurations indicate that the Delta4 system can serve as a robust diagnostic tool for ensuring high energy conversion efficiency, similar to in-situ spectroscopy and real-time impedance spectroscopy techniques used in fuel cell performance assessments.

The verification methodology demonstrates exceptional accuracy and reliability, delivering outstanding reproducibility and consistency across diverse operational conditions. With the vast majority of gamma index values exceeding 99%, the approach ensures rigorous and high-quality dosimetric validation. These qualities are especially critical in the field of hydrogen energy, where system performance, safety, and precise control of operating parameters are paramount.

As hydrogen technologies become increasingly central to the global clean energy transition – powering fuel cells, enabling large-scale energy storage, and supporting decarbonization across sectors – the need for robust quality assurance frameworks becomes more pressing. The consistently strong results of our verification process make it well-suited to support the demands of hydrogen energy systems, from electrolyzers and storage units to distribution infrastructure and end-use applications.

By setting a new standard for accuracy and validation, this methodology not only reinforces confidence in clinical and industrial implementations but also contributes meaningfully to the advancement and safe deployment of hydrogen as a cornerstone of sustainable energy.

Funding

This research was funded by the grant with reference number BR21882359, provided by the Ministry of Science and Higher Education of Kazakhstan.

The contribution of the authors:

Dossanbek A.M. – development of the article concept, analysis of electrolyzer characteristics, participation in results interpretation and general editing of the manuscript.

Baratova A.A. – planning of the experimental section and adaptation of the methodology for using the “Delta⁴ Phantom+” device.

Kabyshev A.M. – description of fuel cells, energy systems used in the study, detailed description of the design and operating principles of the solid oxide fuel cells used in the study, as well as analysis of their integration into the hydrogen energy system.

Bekmyrza K.Zh. – organization of the study structure, data analysis, and preparation of the conclusion.

Kubenova M.M. – collection and processing of experimental data, preparation of graphical materials.

References

1. O.-H. Lin, X.-N. Xi, P.-N. Wang, B.-D. Wu, S.-M. Tian, *Review on hydrogen fuel cell condition monitoring and prediction methods*, International Journal of Hydrogen Energy, 44(11), p. 5488–5498 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.085>
2. V. Hernández, A. Ledo, M. Rodríguez, *Verification of dosimetric plans for intensity-modulated radiation therapy using the Delta4 phantom*, Physics in Medicine & Biology, 68(7), p. 2357–2365 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6560/acb1d2>
3. A. Valente, D. Iribarren, J. Dufour, *End of life of fuel cells and hydrogen products: From technologies to strategies*, International Journal of Hydrogen Energy, 44(38), p. 20965–20977 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.065>
4. K.A. Barchard, L.A. Pace, *Preventing human error: The impact of data entry methods on data accuracy and statistical results*, Computers in Human Behavior, 27(5), p. 1834–1839 (2011). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2011.04.004>
5. K.A. Kuterbekov, K.Zh. Bekmyrza, A.M. Kabyshev, M.M. Kubenova, A. Baratova, I. Abdullayeva, A. T. Ayalew, *Enhancement in fuel cells: PGM-free catalysts, nanostructured supports, and advanced membrane technology toward low-carbon emission*, International Journal of Low-Carbon Technologies, 20, p. 368–383 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaf008>
6. M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, D. Hissel, *Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 146, p. 111180 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>
7. Y. Chen, D. S. Oliver, D. Zhang, *Efficient Ensemble-Based Closed-Loop Production Optimization*, SPE Journal, 13(4), p. 634–645 (2008). DOI: <https://doi.org/10.2118/112873-PA>
8. M. Barroso, M. Reiter, J. Martins, *Verification of lung cancer treatment plans using the Delta⁴ phantom: A dosimetric and clinical evaluation*, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 15(5), p. 201–209 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.05.002>
9. I. Staffell, D. Scamman, A. V. Abad, P. Balcombe, P. E. Dodds, P. Ekins, N. Shah, K. R. Ward, *The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system*, Energy & Environmental Science, 12(2), p. 463–491 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>
10. J. Roth, J. Eller, F. N. Büchi, *Effects of Synchrotron Radiation on Fuel Cell Materials*, Journal of The Electrochemical Society, 159(8), p. F449–F455 (2012). DOI: <https://doi.org/10.1149/2.042208jes>
11. R.-A. Felseghi, E. Carcadea, M. S. Raboaca, C. N. Trufin, C. Filote, *Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications*, Energies, 12(23), p. 4593–4620 (2019). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12234593>
12. E. O. Popov, A. G. Kolosko, M. A. Chumak, S. V. Filippov, *Ten Approaches to Define the Field Emission Area*, Technical Physics, 64, p. 1530–1540 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784219100177>
13. A. Bhadra, J. W. Haverkort, *The optimal electrode pore size and channel width in electrochemical flow cells*, Journal of Power Sources, 579, Article 233240 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233240>

14. Z. Gong, B. Wang, Y. Xing, Y. Xu, Z. Qin, Y. Chen, F. Zhou, F. Gao, B. Li, Y. Yin, Q. Du, K. Jiao, *High-precision and efficiency diagnosis for polymer electrolyte membrane fuel cell based on physical mechanism and deep learning*, *eTransportation*, 18, Article 100275 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2023.100275>
15. C. Alvarado-Flores, F. Encina-Montoya, F. Tucça, R. Vega-Aguayo, J. Nimptsch, C. Oberti, C. Lüders, *Assessing the ecological risk of active principles used currently by freshwater fish farms*, *Science of The Total Environment*, 775, Article 144716 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144716>
16. M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, D. Hissel, *Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, p. 111180–111200 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>
17. R. R. Hernandez, S. B. Easter, M. L. Murphy-Mariscal, et al., *Environmental impacts of utility-scale solar energy*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, p. 766–769 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>
18. J. Li, Y. Zhang, W. Lee, *Feasibility of using Delta⁴ phantom for dosimetric verification of proton therapy treatment plans*, *Physics in Medicine & Biology*, 68(2), p. 59–68 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6560/acb1d2>

А.М. Досанбек¹, А.А. Баратова^{*1}, А.М. Кабышев¹, К.Ж. Бекмырза¹, М.М. Кубенова¹

¹Физика-техникалық ғылымдар институты,

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

(E-mail: baratova_aa@enu.kz, aa.baratova@yandex.kz)

«Delta⁴ Phantom+» құрылғысын сутекті энергетикада және отын элементтерінде қолдану

Аңдатпа. Қазіргі заманғы сутегі энергетикалық жүйелер жанармай элементтерінің тиімділігі мен тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін жоғары дәлдікті бақылау әдістерін талап етеді. Заряд тасымалының, энергияның таралуының және материалдардың тұрақтылығының есептелген және нақты параметрлерінің сәйкестігі өте маңызды, бұл томотерапияда дозиметриялық верификацияның қолданылуымен ұқсас.

Медициналық физикада қолданылатын дәл бақылау әдістері сутектік жанармай элементтеріндегі процестерді талдауға бейімделуі мүмкін. Жанармай элементтерінің тұрақты жұмыс істеуі ион тасымалын, белсенді аймақтағы энергия алмасуды және реакцияға қатысатын материалдардың сипаттамаларын бақылауға байланысты. Осы процестерді нақты бағалаудың перспективті әдістерінің бірі – Delta⁴ қатты күйдегі фантомын пайдалану, ол энергияның таралуын және заряд тасымалдау тиімділігін дәл анықтауға мүмкіндік береді.

Бұл зерттеуде екі өлшемді диодты детекторлар матрицасымен жабдықталған Delta⁴ фантомының топтивтік элементтермен ұқсас процестерді егжей-тегжейлі тексерудегі мүмкіндіктері зерттелді. Сутектік жүйелерде жоғары дәлдікті модельдеу мен бақылау маңызды, бұл 3%/3 мм халықаралық стандарттарына негізделген гамма-талдау әдістерімен ұқсас. Геометриялық және энергетикалық параметрлердің өлшеу дәлдігіне әсері сияқты Delta⁴ фантомының артықшылықтары мен шектеулері талданды.

Зерттеу нәтижелері медициналық физикада әзірленген озық бақылау әдістерін сутектік энергетикада тиімді қолдануға болатынын көрсетеді. Жанармай элементтерін нақты уақыт режимінде бақылау үшін жоғары дәлдікті диагностикалық құралдарды енгізу энергия шығындарын азайтуға, жүйелердің тиімділігі мен ұзақ мерзімділігін арттыруға, сондай-ақ тұрақты және сенімді сутектік энергетикалық шешімдерді әзірлеуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: сутегі энергетика, жанармай элементтері, дозиметриялық верификация, Delta⁴ фантомы, гамма-талдау.

А.М. Досанбек¹, А.А. Баратова*¹, А.М. Кабышев¹, К.Ж. Бекмырза¹, М.М. Кубенова¹

¹Институт физико-технических наук, Евразийский национальный университет

имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

(E-mail: baratova_aa@enu.kz, aa.baratova@yandex.kz)

Применение «Delta⁴ Phantom+» в водородной энергетике и топливных элементах

Аннотация. Современные водородные энергетические системы требуют высокоточных методов контроля для обеспечения стабильности и эффективности топливных элементов. Для этого необходимо строгое соответствие между расчетными и реальными параметрами переноса заряда, распределения энергии и устойчивости материалов, аналогично тому, как в томотерапии применяется дозиметрическая верификация для точного контроля лучевой нагрузки.

Принципы высокоточной верификации, разработанные для медицинской физики, могут быть адаптированы для анализа процессов в водородных топливных элементах. Оптимальная работа топливных элементов зависит от контроля движения ионов, энергообмена в активной зоне и характеристик материалов, участвующих в реакции. Одним из перспективных методов является использование твердотельного фантома Delta⁴, применяемого для точного анализа распределения энергии и эффективности зарядопереноса.

В данном исследовании изучены возможности применения фантома Delta⁴, оснащенного двухмерной матрицей диодных детекторов для детальной верификации процессов, аналогичных тем, что происходят в топливных элементах. Водородные системы требуют высокой точности в моделировании и контроле, аналогично гамма-анализа в дозиметрии, основанного на международных стандартах 3%/3 мм. Проанализированы эксплуатационные преимущества и ограничения данной методики, включая влияние геометрических и энергетических параметров на точность измерений.

Результаты исследования подтверждают, что передовые методы контроля, разработанные в медицинской физике, могут быть эффективно использованы в водородной энергетике. Интеграция высокоточных диагностических инструментов в процесс мониторинга топливных элементов позволяет минимизировать потери энергии, повысить эффективность и долговечность систем, а также создать более надежные и стабильные энергетические решения.

Ключевые слова: водородная энергетика, топливные элементы, дозиметрическая верификация, фантом Delta⁴, гамма-анализ.

References

1. O.-H. Lin, X.-N. Xi, P.-N. Wang, B.-D. Wu, S.-M. Tian, *Review on hydrogen fuel cell condition monitoring and prediction methods*, International Journal of Hydrogen Energy, 44(11), p. 5488–5498 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.085>
2. V. Hernández, A. Ledo, M. Rodríguez, *Verification of dosimetric plans for intensity-modulated radiation therapy using the Delta⁴ phantom*, Physics in Medicine & Biology, 68(7), p. 2357–2365 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6560/acb1d2>
3. A. Valente, D. Iribarren, J. Dufour, *End of life of fuel cells and hydrogen products: From technologies to strategies*, International Journal of Hydrogen Energy, 44(38), p. 20965–20977 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.065>
4. K.A. Barchard, L.A. Pace, *Preventing human error: The impact of data entry methods on data accuracy and statistical results*, Computers in Human Behavior, 27(5), p. 1834–1839 (2011). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2011.04.004>
5. K. A. Kuterbekov, K. Zh. Bekmyrza, A. M. Kabyshev, M. M. Kubenova, A. Baratova, I. Abdullayeva, A. T. Ayalew, *Enhancement in fuel cells: PGM-free catalysts, nanostructured supports, and advanced membrane technology toward low-carbon emission*, International Journal of Low-Carbon Technologies, 20, p. 368–383 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaf008>
6. M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, D. Hissel, *Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 146, p. 111180 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>
7. Y. Chen, D. S. Oliver, D. Zhang, *Efficient Ensemble-Based Closed-Loop Production Optimization*, SPE Journal, 13(4), p. 634–645 (2008). DOI: <https://doi.org/10.2118/112873-PA>
8. M. Barroso, M. Reiter, J. Martins, *Verification of lung cancer treatment plans using the Delta4 phantom: A dosimetric and clinical evaluation*, Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 15(5), p. 201–209 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.05.002>
9. I. Staffell, D. Scamman, A. V. Abad, P. Balcombe, P. E. Dodds, P. Ekins, N. Shah, K. R. Ward, *The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system*, Energy & Environmental Science, 12(2), p. 463–491 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>
10. J. Roth, J. Eller, F. N. Büchi, *Effects of Synchrotron Radiation on Fuel Cell Materials*, Journal of The Electrochemical Society, 159(8), p. F449–F455 (2012). DOI: <https://doi.org/10.1149/2.042208jes>
11. R.-A. Felseghi, E. Carcadea, M.S. Raboaca, C. N. Trufin, C. Filote, *Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications*, Energies, 12(23), p. 4593–4620 (2019). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12234593>
12. E. O. Popov, A. G. Kolosko, M. A. Chumak, S. V. Filippov, *Ten Approaches to Define the Field Emission Area*, Technical Physics, 64, p. 1530–1540 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784219100177>
13. A. Bhadra, J. W. Haverkort, *The optimal electrode pore size and channel width in electrochemical flow cells*, Journal of Power Sources, 579, Article 233240 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233240>
14. Z. Gong, B. Wang, Y. Xing, Y. Xu, Z. Qin, Y. Chen, F. Zhou, F. Gao, B. Li, Y. Yin, Q. Du, K. Jiao, *High-precision and efficiency diagnosis for polymer electrolyte membrane fuel cell based on physical mechanism and deep learning*, eTransportation, 18, Article 100275 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2023.100275>

15. C. Alvarado-Flores, F. Encina-Montoya, F. Tucça, R. Vega-Aguayo, J. Nimptsch, C. Oberti, C. Lüders, *Assessing the ecological risk of active principles used currently by freshwater fish farms*, Science of The Total Environment, 775, Article 144716 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144716>
16. M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, D. Hissel, *Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 146, p. 111180–111200 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>
17. R. R. Hernandez, S. B. Easter, M. L. Murphy-Mariscal, et al., *Environmental impacts of utility-scale solar energy*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29, p. 766–769 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>
18. J. Li, Y. Zhang, W. Lee, *Feasibility of using Delta⁴ phantom for dosimetric verification of proton therapy treatment plans*, Physics in Medicine & Biology, 68(2), p. 59–68 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6560/acb1d2>

Information about authors:

Dossanbek A.M. – Second-year master student of the program «7M05308 - Medical Physics», International Department of “Nuclear Physics, New Materials and Technologies”, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Baratova A.A. – corresponding author, candidate of physical and mathematical sciences, PhD, associate professor, International Department of “Nuclear Physics, New Materials and Technologies”, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Kabyshv A.M. – PhD, teacher-researcher, International Department of “Nuclear Physics, New Materials and Technologies”, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Bekmyrza K.Zh. – PhD, associate professor, teacher-researcher, Department of “Technical Physics”, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Kubenova M.M. – PhD, teacher-researcher, Department of “Standardization, Certification and Metrology”, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Досанбек А.М. – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» халықаралық кафедрасының «7M05308-Медициналық физика» мамандығы бойынша екінші курс магистранты, Астана, Қазақстан

Баратова А.А. – хат-хабар авторы, физика-математика ғылымдарының кандидаты, PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» халықаралық кафедрасының доценті, Астана, Қазақстан

Кабышев А.М. – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» халықаралық кафедрасының оқытушы-зерттеушісі, Астана, Қазақстан

Бекмырза К.Ж. – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «техникалық физика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, оқытушы-зерттеушісі Астана, Қазақстан

Кубенова М.М. – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасының оқытушы-зерттеушісі, Астана, Қазақстан.

Досанбек А.М. – магистрант второго года обучения специальности «7М05308-Медицинская физика» международной кафедры «Ядерной физики, новых материалов и технологий», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

Баратова А.А. – автор для корреспонденции, кандидат физико-математических наук, PhD, доцент международной кафедры «Ядерная физика, новые материалы и технологии», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

Кабышев А.М. – PhD, преподаватель-исследователь международной кафедры «Ядерная физика, новые материалы и технологии», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

Бекмырза К.Ж. – PhD, ассоциированный профессор, преподаватель-исследователь кафедры «Техническая физика», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

Кубенова М.М. – PhD, преподаватель-исследователь кафедры «Стандартизация, сертификация и метрология», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



МРНТИ 29.29.01

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-97-114>

Научная статья

Влияние комплексообразующей добавки на химический состав, микроструктуру и магнитные свойства электролитически осажденных пленок CoNi с аморфизующим агентом

Т.И. Зубарь¹, Н.Е. Андрейчик¹, Д.И. Тишкевич¹, А.В. Труханов^{*1}

¹ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Республика Беларусь

(E-mail:truhanov86@mail.ru)

Аннотация. Целью работы является определение влияния комплексообразующей добавки (сегнетова соль) при синтезе пленок CoNi с аморфизующим агентом (Р) на их химический состав, микроструктуру и магнитные свойства. Объекты исследования (пленки CoNiP) были синтезированы методом электролитического осаждения из электролитов двух типов: классический сульфатный электролит и сульфатный электролит с добавлением комплексообразователя сегнетовой соли ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Две группы пленок были получены в условиях варьирования плотностью тока осаждения (15-20-30 mA/cm^2). Задача модификации электролита и установления влияния комплексообразователя заключалась в управляемом изменении химического состава объектов исследований и, как следствие, магнитных характеристик. Установлено влияние введения сегнетовой соли на состав пленок CoNiP. Показано, что использование комплексообразующей добавки позволяет изменять концентрацию компонентов пленки в более широких диапазонах (Co от 63,6 ат. % до 74,8 ат. %; Ni от 23,1 ат. % до 19,5 ат. % и Р от 13,3 ат. % до 5,6 ат. %) при увеличении плотности тока от 15 до 30 mA/cm^2 по сравнению с образцами, синтезированными из классического электролита в том же диапазоне плотностей тока (Co от 80,5 ат. % до 82,0 ат. %; Ni от 14,5 ат. % до 13,3 ат. % и Р от 5,0 ат. % до 4,7 ат. %) соответственно. Показана корреляция состава пленок и их магнитных параметров в различных ориентациях внешнего магнитного поля. Полученные результаты расширяют понимание влияния особенностей электролитического синтеза пленок многокомпонентных сплавов на их структурные и магнитные характеристики.

Ключевые слова: магнитные пленки; сплав CoNi; электролитическое осаждение; микроструктура; магнитные свойства.

Поступила 26.05.2025. После доработки 29.05.2025. Принята к печати 29.05.2025. Доступно онлайн 25.06.2025.

¹ *автор для корреспонденции

Введение

Исследование магнитных материалов имеет огромное значение в современной науке и технике. Объекты исследований с магнитным упорядочением и кооперативными эффектами привлекают пристальное внимание многих ученых ввиду высокой научной значимости (корреляция особенностей получения, химического состава, структурных характеристик и физико-химических свойств) и практической направленности [1-6].

В последние десятилетия электрохимическое осаждение стало одним из самых популярных методов в области обработки поверхности материалов и нанотехнологий. Ввиду стремительного развития технологий и растущего интереса к функциональным материалам изучение различных пленок становится особенно актуальным и перспективным. Особый интерес представляют пленки на основе металлов переходной группы железа, таких, как Co и Ni [7-10]. Синтез пленок CoNiP осуществляется различными методами, преимущественно химическими и электрохимическими. Есть методы формирования пленок данной системы и физическими методами (магнетронное распыление, молекулярно-лучевая эпитаксия). Эти пленки обладают высокими магнитными, коррозионностойкими и каталитическими свойствами, что делает их перспективными для микроэлектроники, магнитных датчиков и катализаторов. Однако успешное производство пленок с оптимальными характеристиками требует глубокого понимания взаимосвязи между различными технологическими параметрами, такими, как состав электролита и плотность тока, и конечными характеристиками пленок, такими, как их состав, микроструктура и магнитные свойства.

Использование пленок на основе сплава CoNiP актуально в широком спектре технологических и научных областей, что делает их изучение чрезвычайно популярным. Высокие значения магнитной восприимчивости и намагниченности насыщения, которыми характеризуются пленки CoNiP, делают их перспективным материалом для использования в магнитных устройствах и электронных компонентах, таких, как датчики магнитного поля, головки магнитной записи, электромагнитные экраны, лазерные корпуса, приборы, а также устройства авиационной и космической техники [11-14]. Механические, физические и химические свойства пленок на основе переходных металлов могут быть полезны для их применения в качестве катализаторов различных химических реакций [15-17]. Также теоретически такие материалы могут быть использованы в области энергосберегающих технологий и накопления энергии [18-20]. Кроме того, пленки CoNiP могут быть использованы для создания микромеханических компонентов и применяются в микроэлектронике и оптике [21-23].

Изучение свойств пленок CoNiP и влияния на них различных параметров синтеза имеет большое научное значение и позволяет расширить понимание физических и химических процессов при электрохимическом осаждении. Оптимизация параметров процесса электрохимического осаждения, а также глубокое понимание взаимосвязи между технологией синтеза и составом пленки, микроструктурой и магнитными свойствами важны для разработки новых технологий производства и применения материалов.

Целью работы является определение влияния комплексообразующей добавки (сегнетова соль) при синтезе пленок CoNi с аморфизирующим агентом (Р) на их химический состав, микроструктуру и магнитные свойства. В процессе электрохимического осаждения на поверхности катода происходит множество физико-химических процессов: растворение и осаждение из раствора (пептизация и коагуляция коллоидов); электролитическая диссоциация; гидролиз; комплексообразование и другие химические реакции; подача и удаление компонентов реакции путем конвекции, диффузии и миграции; адсорбция; электрохимические реакции (переход через двойной слой); поверхностная диффузия; кристаллизация; пассивация и активация; диффузия и введение посторонних веществ. Все эти процессы влияют на структуру и свойства получаемых слоев покрытия. В ходе систематических исследований мы изучили закономерности и зависимости между параметрами синтеза и конечными характеристиками пленок CoNiP. Это позволило более точно определить оптимальные условия осаждения для получения пленок с заданными свойствами.

Экспериментальная часть

Объекты исследования (пленки CoNiP) были синтезированы методом электролитического осаждения из электролитов двух типов: классический сульфатный электролит и сульфатный электролит с добавлением комплексообразователя сегнетовой соли ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Две группы пленок были получены в условиях варьирования плотностью тока осаждения ($15\text{--}20\text{--}30 \text{ А/см}^2$). Были синтезированы 2 партии пленок из классического сульфатного электролита (электролит Б) и сульфатный электролит с добавлением комплексообразователя сегнетовой соли (Электролит А). Составы электролитов, а также параметры электрохимического осаждения приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры электрохимического осаждения при синтезе пленок CoNiP

Состав электролита, г/л	Образец	Плотность тока, мА/см^2	pH	T, °C	Время осаждения, мин
CoSO_4 – 150 NiSO_4 – 150 H_3BO_3 – 30 NaH_2PO_2 – 10 Na_2SO_4 – 60 Сахарин – 1 Сегнетова соль – 10	A15	15	2,3	50	60
	A20	20			
	A30	30			
CoSO_4 – 150 NiSO_4 – 150 H_3BO_3 – 30 NaH_2PO_2 – 10 Na_2SO_4 – 60 Сахарин – 1	B15	15			
	B20	20			
	B30	30			

Сульфаты никеля NiSO_4 и кобальта CoSO_4 использовались в качестве источников ионов никеля и кобальта соответственно. Гипофосфит натрия NaH_2PO_2 был введен в электролит как источник фосфора. Борная кислота H_3BO_3 использовалась в качестве буферной добавки. Борная кислота является широко распространенной буферной добавкой и используется при электрохимическом осаждении большого количества вариаций гальванических покрытий. Благодаря такому широкому использованию, влияние борной кислоты на процесс электрохимического осаждения хорошо изучен. Борная кислота позволяет поддерживать pH раствора в приэлектродной зоне во время процесса электрохимического осаждения. В электрохимии значение pH электролита играет ключевую роль в процессе формирования осадка. Понижение значения pH приводит к более активному выделению на катоде водорода, выход по току выделения металла при этом падает. Таким образом высокая кислотность электролита приводит к низким значениям выхода по току металла. Кроме того, выделяющийся на катоде водород может внедряться в структуру осадка и приводить к ухудшению качества покрытия. К дефектам покрытия, вызванным внедрением водорода в катодный осадок, можно отнести питтинг, вздутия покрытия, высокие внутренние напряжения и, соответственно, хрупкость и растрескивание покрытия. Повышение же значения pH электролита может привести к образованию гидроокисей. При пониженной кислотности электролита происходит значительное накопление гидроокисей у катода, что приводит к ухудшению качества осадка. Кроме того, выделение гидроокисей приводит к обеднению прикатодного слоя ионами металлов. Поэтому введение в электролит буферных добавок необходимо, особенно при осаждении сплавов из электролитов, включающих соли щелочных металлов, склонных к образованию гидроокисей. Сахарин $\text{C}_7\text{H}_5\text{NO}_3\text{S}$ был введен в электролит в качестве блескообразующей добавки. Сахарин также позволяет увеличить допустимый предел плотности тока. Кроме того, сахарин уменьшает внутренние напряжения покрытия, позволяя избежать растрескивания и прочих дефектов осадка. Калий-натрий виннокислый ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), также известный как сегнетова соль, ввели в электролит в качестве комплексообразователя. Сегнетова соль - распространенный в химической промышленности комплексообразователь. Сегнетова соль может способствовать формированию стабильных комплексов ионов никеля и кобальта, что повлияет на морфологию и свойства получаемых покрытий.

Также в электролит был введен сульфат натрия Na_2SO_4 (60 г/л) в качестве добавки, повышающей электропроводность электролита. Сульфат натрия в растворе распадается на ионы и способствует передаче электрического заряда. Поскольку ионы натрия (Na^+) и сульфата (SO_4^{2-}) обладают зарядом и могут свободно двигаться в растворе, добавление сульфата натрия в электролит повышает его электропроводность. Электропроводность определяет способность электролита проводить электрический ток. С увеличением электропроводности увеличивается способность электролита передавать заряды. Перенос ионов металла из объема раствора на поверхность электрода связан со скоростью ионного переноса. Поэтому добавление сульфата натрия обеспечивает более эффективную диффузию ионов металлов к поверхности катода и позволяет увеличить скорость осаждения.

Химический состав синтезированных пленочных образцов был определен методом энергодисперсионного анализа (EDX) с использованием спектрометра AZtec Life Advanced с приставкой Ultima Max 40 (Oxford Instruments, Bognor Regis, UK). Данный метод является прямым измерением и погрешность определяется гарантией производителя, согласно которой точность определения концентрации химических элементов не менее 99.5% в точке измерения. Микроструктуру пленочных образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) с использованием микроскопа Zeiss EVO 10 (Zeiss, Oberkochen, Germany). Погрешность измерения микроструктуры определяется гарантией производителя, согласно которой разрешающая способность составляет 1 нм. Магнитные свойства (полевые зависимости удельной намагниченности) были исследованы методом вибрационной магнитометрии (VSM) с использованием универсальной измерительной системы Liquid Helium Free High Field Measurement System (Cryogenic Limited, UK) в диапазоне полей до 35 кЭ при 300К. Используемый метод характеризуется высокой точностью при погрешности измерения намагниченности не ниже 1,5 % в случае значения намагниченности выше $\pm 10^{-6}$ А·м². Программно-аппаратный комплекс Liquid Helium Free High Field Measurement System (Cryogenic Limited, UK) позволяет автоматически проводить не менее 10 измерений в заданной точке магнитного поля в секунду с последующим обобщением и формированием среднего значения для повышения точности измерений магнитных свойств. Погрешность прямых измерений магнитных характеристик (значение удельной намагниченности) Δx или ее абсолютное значение вычислялось автоматически программно-аппаратным комплексом по формуле (согласно информации производителя):

$$\Delta x = \frac{t_{p,n} \sigma}{\sqrt{n}}$$

где $t_{p,n}$ – коэффициент Стьюдента, определяемый соответственно количеству измерений n и доверительной вероятностью P ;

σ – стандартное отклонение.

Результаты и обсуждение

1. Химический состав

Химический состав синтезированных пленочных образцов был определен методом энергодисперсионного анализа (EDX) с использованием спектрометра AZtec Life Advanced с приставкой Ultima Max 40 (Oxford Instruments, Bognor Regis, UK). Состав электрохимически осажденных образцов представлен на Рисунке 1.

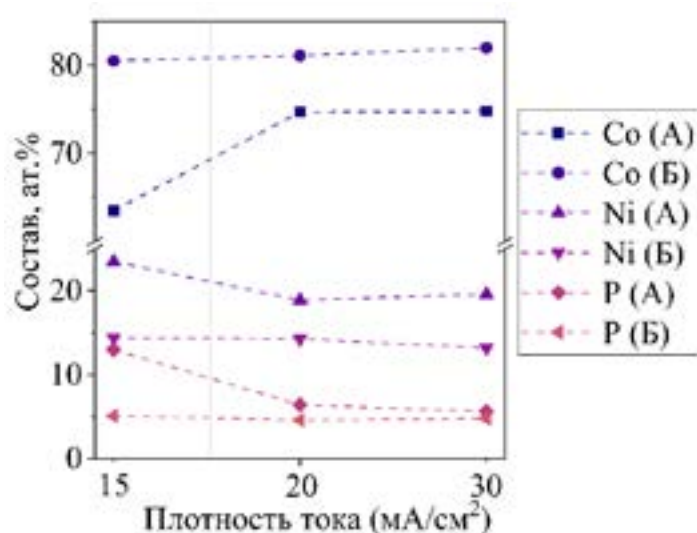


Рисунок 1. Состав пленочных образцов CoNiP (соотношение Co-Ni-P), синтезированных методом электролитического осаждения из электролитов А и Б в диапазоне плотностей тока от 15 до 30 мА/см².

Можно отметить, что, несмотря на одинаковую концентрацию солей никеля и кобальта в электролитах А и Б, для всех образцов отмечается высокое содержание кобальта (от 63,6 до 82 ат.%). Этот результат соответствовал стехиометрическому соотношению при формировании электролитов. Таким образом, подтверждено, что тройные сплавы CoNiP из сульфатных электролитов осаждаются по аномальному типу электрохимического осаждения. Обычно если в электролите имеются ионы нескольких металлов, то при электролизе, в первую очередь, выделяются металлы, обладающие более положительными потенциалами. Однако при электрохимическом осаждении аномального типа предпочтительно осаждается менее благородный металл, в нашем случае более электроотрицательный кобальт. В таком случае кобальт осаждается с деполяризацией, а никель со сверхполяризацией. Деполяризация разряда катиона металла при образовании сплава на катоде – это смещение потенциала разряда этого металла в положительную сторону по отношению к чистому металлу при одной и той же плотности тока. Сверхполяризация – это смещение потенциала разряда металла в отрицательную сторону по отношению к чистому металлу при одной и той же плотности тока. Таким образом, при осаждении тройного сплава CoNiP из сульфатного электролита происходит ускорение разряда ионов кобальта (деполяризация) с одновременным замедлением разряда ионов никеля (сверхполяризация).

Увеличению поляризации более электроположительного компонента могут содействовать различные факторы, такие, как: образование на поверхности катода адсорбционных пленок, тормозящих протекание одного из процессов разряда; связывание катионов металлов в комплексы; увеличение катодной плотности тока, приводящее к возрастанию химической поляризации более электроположительного компонента сплава. В нашем случае лимитирующим фактором выступает увеличение катодной плотности тока.

Из Рисунка 1 видно, что с увеличением плотности тока от 15 до 30 мА/см² приводит к увеличению концентрации кобальта и снижению концентрации никеля и фосфора в образцах. Данная тенденция отмечена для образцов двух партий (как электролит А, так и электролит Б). Показано, что изменение химического состава для образцов, синтезированных из электролита А, является более значительным по сравнению с образцами из электролита Б. Так, содержание основных компонентов пленок для электролита А изменялось более существенно при увеличении плотности тока (Co от 63,6 ат. % до 74,8 ат. %; Ni от 23,1 ат. % до 19,5 ат. % и P от 13,3 ат. % до 5,6 ат. %) по сравнению с образцами, синтезированными из электролита Б в том же диапазоне плотностей тока (Co от 80,5 ат. % до 82,0 ат. %; Ni от 14,5 ат. % до 13,3 ат. % и P от 5,0 ат. % до 4,7 ат. %), соответственно. Это указывает на возможность контролируемого изменения химического состава пленок в системе CoNiP в широких диапазонах при использовании комплексообразователя по сравнению с пленками, синтезированными из электролита без сегнетовой соли.

2. Микроструктура

Микроструктуру пленочных образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) с использованием микроскопа Zeiss EVO 10 (Zeiss, Oberkochen, Germany). Микроструктура полученных покрытий представлена на Рисунке 2. Из приведенных SEM-изображений можно увидеть следующую зависимость: с увеличением плотности тока микроструктура пленки становится мельче. Это известная зависимость, которая подтверждается практикой электрохимического осаждения металлов. Высокие плотности тока позволяют получать мелкокристаллические осадки, поскольку образование кристаллических зародышей протекает более интенсивно. При повышенных плотностях тока скорость образования зародышей оказывается больше скорости их роста.

У образцов, осажденных из электролита А, при плотностях тока 15 и 20 мА/см² наблюдается схожая микроструктура поверхности. Зерна совмещаются в агрегаты и стремятся к сферической форме. При дальнейшем повышении плотности тока до 30 мА/см² агрегаты принимают неправильную, далекую от сферической форму. При увеличении плотности тока до 30 мА/см² наблюдается уменьшение размера зерна, и пленка становится более мелкодисперсной и приобретает волокнистую структуру (форма зерен становится игольчатой).

Из SEM-снимков видно, что поверхность образцов, полученных из электролита Б при низких плотностях тока (15 мА/см²) сильно развита. Морфология поверхности представляет собой совокупность зерен с произвольной формой. Структура поверхности разупорядочена и сформирована из агрегатов различной формы. При дальнейшем увеличении плотности тока размер агрегатов резко снижается, структура поверхности становится волокнистой.

Металлы переходной группы железа выделяются из растворов с высоким перенапряжением. И могут образовывать мелкозернистые осадки с волокнистой структурой. Высокое перенапряжение при выделении этих металлов может быть связано с замедлением разряда ионов. Это может быть обусловлено адсорбцией на поверхности катода гидроокисей, замедляющих разряд ионов металла, что приводит к пассивации катода и увеличению перенапряжения.

К образованию гидроокисей с высокой вероятностью могло привести содержание в электролите сульфата натрия. Сульфат натрия в растворе диссоциирует и распадается на катион металла (Na^+) и отрицательно заряженный кислотный остаток (SO_4^{2-}). В присутствии ионов щелочных металлов значение pH прикатодного слоя в процессе электрохимического осаждения быстро возрастает. В прикатодном пространстве образуются гидроокиси.

На Рисунке 2 также показано изменение фактора формы (ФФ) зерен с изменением плотности тока и состава электролита. Форм-фактор в электрохимически осажденных покрытиях CoNiP был изучен с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NT-206 в контактном режиме. Этот режим адаптирован для высокоточной визуализации границ и форм отдельных зерен. ФФ был рассчитан с использованием данных АСМ- и SEM-изображений как отношение средней кратчайшей оси (а_{мин}) к средней наибольшей оси (а_{макс}) эллипсоида:

$$\text{ФФ} = a_{\text{мин}} / a_{\text{макс}}$$

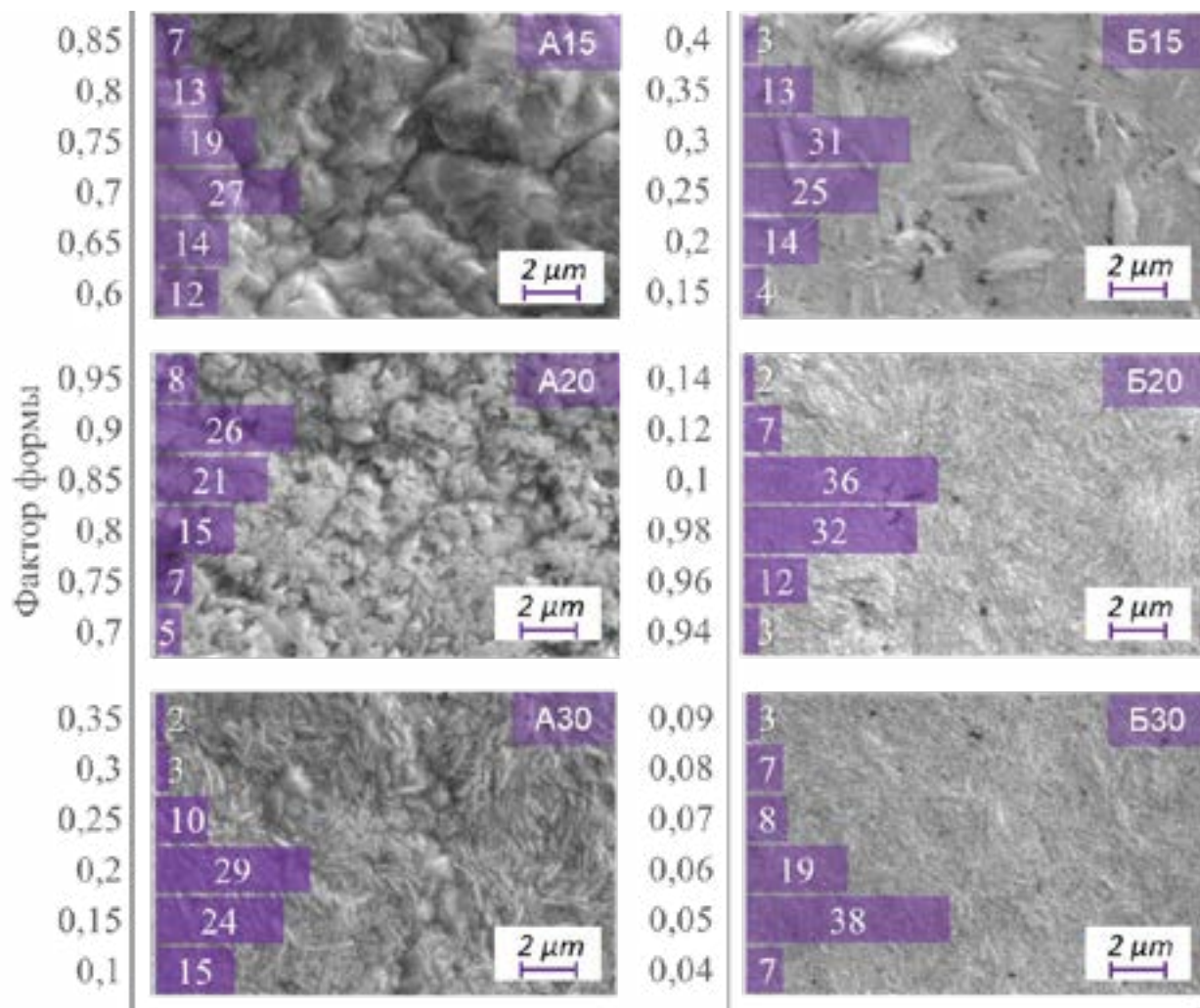


Рисунок 2. Микроструктура пленочных образцов CoNiP (SEM-изображения), синтезированных методом электролитического осаждения из электролитов А и Б в диапазоне плотностей тока от 15 до 30 мА/см².

Максимальная близость зерен к сферической форме ($\Phi\Phi = 0,9$) обнаружена для пленки A20, выращенной в электролите А. Заметное отклонение $\Phi\Phi$ от сферической формы наблюдалось при осаждении из электролита Б, а минимальное значение $\Phi\Phi = 0,05$ было обнаружено для покрытия Б30 осажденного из электролита Б.

Таким образом отмечено, что добавление комплексообразователя (сегнетова соль) в сульфатный электролит позволяет формировать пленки CoNiP с приближенными к сферической форме зернами при плотностях тока 15-20 mA/cm^2 , в то время, как в случае электролита Б данного факта не отмечено.

3. Магнитные свойства

Магнитные свойства (полевые зависимости удельной намагниченности) были исследованы методом вибрационной магнитометрии (VSM) с использованием универсальной измерительной системы Liquid Helium Free High Field Measurement System (Cryogenic Limited, UK) в диапазоне полей до 35 кЭ при 300К. Полевые зависимости удельной намагниченности для образцов, синтезированных из электролита А и Б, измеренных в параллельной ориентации внешнего магнитного поля (поле параллельно плоскости пленки), представлены на Рисунке 3. Зависимости удельной намагниченности в перпендикулярной ориентации представлены на Рисунке 4.

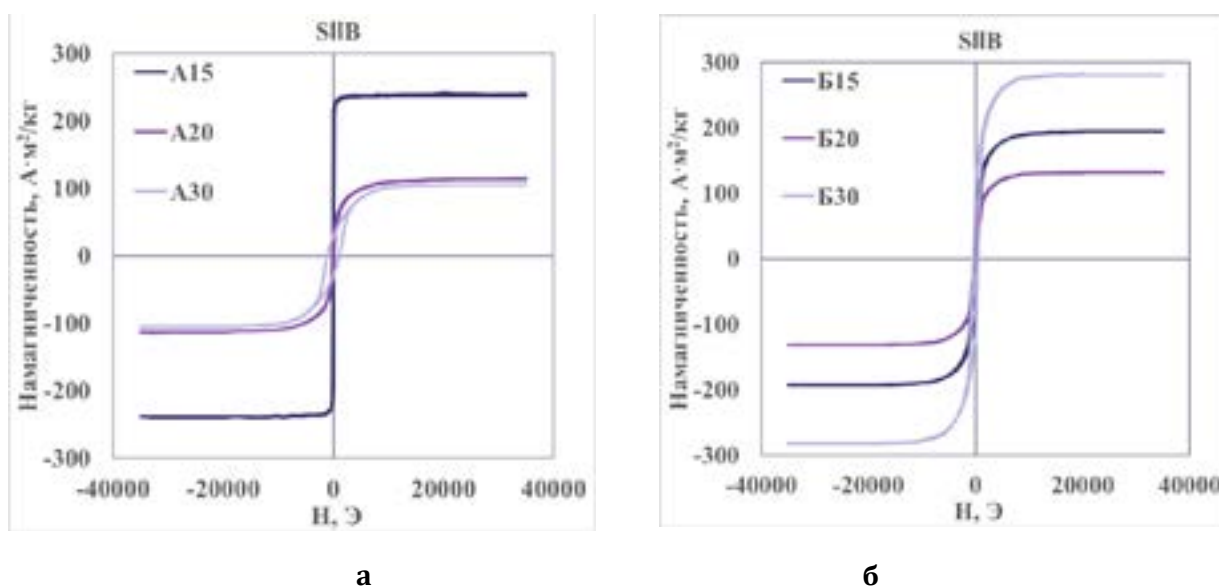


Рисунок 3. Полевые зависимости удельной намагниченности в параллельной ориентации для пленочных образцов CoNiP, синтезированных методом электролитического осаждения из электролитов А (а) и Б (б) в диапазоне плотностей тока от 15 до 30 mA/cm^2 .

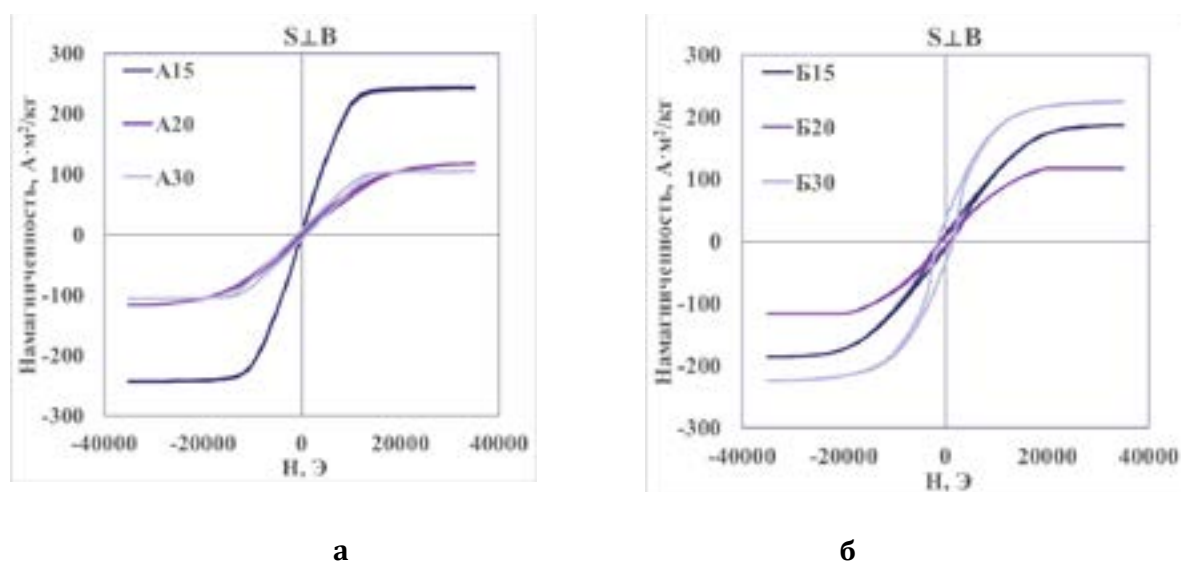


Рисунок 4. Полевые зависимости удельной намагниченности в перпендикулярной ориентации для пленочных образцов CoNiP, синтезированных методом электролитического осаждения из электролитов А (а) и Б (б) в диапазоне плотностей тока от 15 до 30 мА/см².

Для электролита А можно отметить значительное увеличение намагниченности насыщения в ряду уменьшения плотности тока $30 > 20 > 15$ мА/см² в полях как параллельно, так и перпендикулярно образцу. Так, показано, что в параллельной ориентации намагниченность насыщения для образца А15 (243 А·м²/кг) значительно превышает значения намагниченности для образцов А20 (104 А·м²/кг) и А30 (98 А·м²/кг). Что может быть обусловлено как особенностями микроструктуры (переход от крупнозернистой структуры к более мелкозернистой, иглообразной), так и возможным образованием второй магнитной фазы. Также следует отметить и значительное увеличение коэрцитивной силы для образцов, синтезированных из электролита А с увеличением плотности тока (Рисунок 3а). В то же время для электролита Б данная зависимость изменяется. В электролите Б можно отметить уменьшения намагниченности насыщения в ряду плотностей тока $30 > 15 > 20$ мА/см² в полях как параллельно, так и перпендикулярно образцу. Так, показано, что в параллельной ориентации намагниченность насыщения для образца Б30 (289 А·м²/кг) значительно превышает значения намагниченности для образцов Б15 (183 А·м²/кг) и Б20 (121 А·м²/кг). Следует отметить, что образец А15 характеризуется максимальной квадратностью петли и выходит в состояние магнитного насыщения в полях до 0,5 кЭ.

Следует отметить значительную разницу в петлях магнитного гистерезиса образцов в поле, параллельном образцу (Рисунок 3) и перпендикулярном (Рисунок 4). Из анализа характера полевых зависимостей удельной намагниченности можно сказать, что у образцов как из электролита А, так и из электролита Б ось легкого намагничивания находится в плоскости образца. Следует отметить схожий характер для кривых

магнитного гистерезиса для измерения в перпендикулярно-ориентированном поле. При этом отмечена тенденция уменьшения намагниченности насыщения по сравнению с параллельной ориентацией в особенности для образцов, синтезированных из электролита Б (Рисунок 4б).

Волокнистая структура вызывает появление ярко выраженной оси легкого намагничивания. Чем меньше значение ФФ, тем ярче выражена анизотропия магнитных свойств. Также можно заметить, что с появлением волокнистой структуры на петлях магнитного гистерезиса появляется уширение. Данное уширение может быть обусловлено наличием двух магнитных фаз с различным механизмом намагничивания. Для более детального анализа магнитной структуры (особенности намагничивания каждой из фаз), а также механизма межфазного взаимодействия будут проведены дальнейшие исследования в более широком диапазоне температур.

Заключение

С целью определения влияния комплексообразующей добавки (сегнетова соль) при синтезе пленок CoNi с аморфизирующим агентом (Р) на их химический состав, микроструктуру и магнитные свойства в широком диапазоне плотностей тока ($15-30 \text{ мА/см}^2$) были синтезированы пленки CoNiP. Пленки синтезированы методом электролитического осаждения из электролитов двух типов: классический сульфатный электролит (электролит Б) и сульфатный электролит с добавлением комплексообразователя сегнетовой соли (электролит А). Актуальность определения влияния добавления комплексообразователя обусловлена определением возможности контролируемого изменения химического состава объектов исследований, микроструктуры и, как следствие, магнитных характеристик.

Установлено, что при соразмерных концентрациях солей кобальта и никеля в образцах преобладает никель (от 63,6 ат.%; до 82,0 ат.%). При обсуждении отмечено, что вариация химического состава пленок является результатом суперпозиции двух конкурирующих факторов в электролите: деполяризация с одновременным замедлением разряда ионов никеля (сверхполяризация). Показано, что использование комплексообразующей добавки позволяет изменять концентрацию компонентов пленки в более широких диапазонах (Со от 63,6 ат.% до 74,8 ат.%; Ni от 23,1 ат.% до 19,5 ат.% и Р от 13,3 ат.% до 5,6 ат.%) при увеличении плотности тока от 15 до 30 мА/см^2 по сравнению с образцами, синтезированными из классического электролита в том же диапазоне плотностей тока (Со от 80,5 ат.% до 82,0 ат.%; Ni от 14,5 ат.% до 13,3 ат.% и Р от 5,0 ат.% до 4,7 ат.%), соответственно. Это указывает на возможность контролируемого изменения химического состава пленок в системе CoNiP в широких диапазонах при использовании комплексообразователя по сравнению с пленками, синтезированными из электролита без сегнетовой соли.

Проведен анализ эволюции микроструктуры образцов CoNiP. Установлено, что максимальная близость зерен к сферической форме (ФФ = 0,9) отмечена для пленки А20, выращенной в электролите А при плотности тока 20 мА/см^2 . Заметное отклонение ФФ от сферической формы наблюдалось при осаждении из электролита Б, а минимальное

значение $\Phi\Phi = 0,05$ было обнаружено для покрытия Б30 осажденного из электролита Б при плотности тока 30 мА/см^2 . Таким образом, отмечено, что добавление комплексообразователя (сегнетова соль) в сульфатный электролит позволяет формировать пленки CoNiP с приближенными к сферической форме зернами при плотностях тока $15\text{-}20 \text{ мА/см}^2$, в то время, как в случае электролита Б данного факта не отмечено.

Была обнаружена четкая корреляция между форм-фактором и анизотропией магнитных свойств магнитных пленок CoNiP. Показано, что при появлении волокнистой структуры и уменьшении форм-фактора в пленках образуются две фазы с различными механизмами намагничивания. Дальнейшие исследования будут посвящены определению механизма межфазного взаимодействия путем измерения температурных зависимостей удельной намагниченности в ZFC-FC-режимах. Необходимо отметить, что технологическая возможность управляемого изменения химического состава и, как следствие, магнитных характеристик пленочных образцов многокомпонентных сплавов путем варьирования составом электролита и плотностью тока открывает широкие возможности для практического использования результатов. Так, варьирование химическим составом в широких пределах в системе CoNiP позволит получать градиентные многослойные структуры с заданными магнитными характеристиками, изменяющимися по толщине структуры. Подобные структуры могут найти свое применение в качестве «подмагничивающих» слоев в сенсорных системах, устройствах спинтроники и электромагнитных экранах.

Благодарность, конфликт интересов

Исследования были выполнены при поддержке Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (No. 189/ГФ24-26 по теме No. AP23490338).

Вклад авторов

Зубарь Т.И., Андрейчик Н.Е., Тишкевич Д.И., Труханов А.В. – проведение анализа, обработка и интерпретация данных, подготовка иллюстраций, написание и редактирование текста статьи.

Список литературы

1. H. Zhai, X. Li, S. Yu, J. Wang, Y. Chang, J. Li, X. Cheng, L. Zhou, Y. Fang, T. Liu, X. Yu, M. Zhu, B. Li, W. Li, *Review on the 3D printing technology and application of magnetic materials*, Material-process-structure-application, Composites Part B: Engineering, 298 (2025).
2. A.V. Trukhanov, V.O. Turchenko, I.A. Bobrikov, S.V. Trukhanov, I.S. Kazakevich, A.M. Balagurov, *Crystal structure and magnetic properties of the $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$ ($x=0.1\text{--}1.2$) solid solutions*, J. Magn. Mater. 393: с. 253-259 (2015)
3. Z. Hongna, Z. Yue, Q. Haili, B. Huhe, Z. Ruifen, *Magnetic phosphate-based transition Metal-Containing porous Materials*, Recent Advances, synthetic Approaches, and applications, Inorganic Chemistry Communications 178(1) (2025).

4. A.V. Trukhanov, V.G. Kostishyn, L.V. Panina, V.V. Korovushkin, V.A. Turchenko, P. Thakur, A. Thakur, Y. Yang, D.A. Vinnik, E.S. Yakovenko, L.Yu. Matzui, E.L. Trukhanova, S.V. Trukhanov, *Control of electromagnetic properties in substituted M-type hexagonal ferrites*, J. Alloys Compd. 754: c. 247-256 (2018).
5. L. Liu, H. Wang, Y. Fu, L. Gao, Z. Yang, X. Zheng, Y. Chen, Y. Huang, X. Wang, X. Yi, Z. Dang, *Application of a superior magnetic hydroxy iron material for arsenic removal from soil*, Environmental Research, 274 (2025).
6. S.V. Trukhanov, A.V. Trukhanov, V.A. Turchenko, An.V. Trukhanov, E.L. Trukhanova, D.I. Tishkevich, V.M. Ivanov, T.I. Zubar, M. Salem, V.G. Kostishyn, L.V. Panina, D.A. Vinnik, S.A. Gudkova, *Polarization origin and iron positions in indium doped barium hexaferrites*, Ceram. Int. 44: c. 290-300 (2018).
7. Myung, N., & Nobe, K. *Electrodeposited iron group thin-film alloys: structure-property relationships*, Journal of the Electrochemical Society 148(3), (2001).
8. Kim, D., Park, D. Y., Yoo, B. Y., Sumodjo, P. T. A., Myung, N. V. *Magnetic properties of nanocrystalline iron group thin film alloys electrodeposited from sulfate and chloride baths*, Electrochimica Acta 48(7): c. 819-830 (2003).
9. Lebedeva, O., Fishgoit, L., Knyazev, A., Kultin, D., Kustov, L. *Electrodeposition of Iron Triad Metal Coatings*, Metals 13(4) (2023).
10. Li, S., & Yuan, Q. *Study on electrodeposition of CoNiW coating on 1045 steel as piston ring materials and its wear resistance performance*, International Journal of Electrochemical Science 18(1): c. 38-44 (2023).
11. Theis, M., Bill, T., Knoll, H., Starke, P., Saumer, M., *Electrochemical deposition of CoP and CoNiP as hard magnetic scales in a position measurement system*, Metals 12(2), (2022).
12. Kotnana, G., Cheng, Y., & Lin, C. C., *Triggering Magnets for Wiegand Sensor by Electrodeposited and Origami Magnetized CoNiP Micro-magnets* (2023)
13. Haque, M. S., Rahman, M. F., Zaman, M. M., Matin, M. A., Hakim, A. K. M. A., & Islam, M. F., *Fabrication of CoNiP Thin Films with Improved Magnetic Property for Application in MEMS*, Applied Mechanics and Materials 860: c. 87-92(2017).
14. Yu, Y., Wei, G., Ge, H., Jiang, L., & Sun, L., *CoNiMn magnetic films prepared by magnetic field induced codeposition technology*, Surface Engineering, 33(7): c. 483-491 (2017).
15. Wang, K., Zhao, R., Wang, Z., Zhang, X., Ouyang, A., Zhou, C., Chu, Y., *Controlled tuning the morphology of CoNiP catalysts with ultra-high activity for water splitting at large current densities in alkaline medium*, Applied Surface Science 626, (2023).
16. Wang, X., Xie, Y., Zhou, W., Wang, X., Cai, Z., Xing, Z., Pan, K., *The self-supported Zn-doped CoNiP microsphere/thorn hierarchical structures as efficient bifunctional catalysts for water splitting*, Electrochimica Acta 339, (2020).
17. Chen, Y., Feng, K., Yuan, G., Kang, Z., & Zhong, J., *Highly efficient CoNiP nanoboxes on graphene oxide for the hydrolysis of ammonia borane*. Chemical Engineering Journal 428, (2022).
18. Wang, X., Zhang, W., Yu, Q., Liu, X., Liang, Q., Meng, X., Wang, L. *Fe-doped CoNiP@ N-doped carbon nanosheet arrays for hydrazine oxidation assisting energy-saving seawater splitting*, Chemical Engineering Journal 446, (2022).
19. Qiao, L., Zhu, A., Liu, D., Feng, J., Chen, Y., Chen, M., Pan, H., *Crystalline phosphides/amorphous oxides composite for energy-saving hydrogen production assisted by efficient urea oxidation reaction*, Chemical Engineering Journal 454 (2023).
20. Abd El-Lateef, H. M., Khalaf, M. M., Alnajjar, A. O., Mohamed, I. M., *Facile synthesis of Co/Ni bimetallic phosphate as electrode material for urea fuel cells: Effect of synthetic strategy on the physicochemical and electrocatalytic behavior*, Fuel 334 (2023).

21. Jiang, Y., Chen, C. Y., Luo, X., Yamane, D., Mizoguchi, M., Kudo, O., Chang, T. F. M., *Electrodeposition and micro-mechanical property characterization of nickel-cobalt alloys toward design of MEMS components*. Electrochem 3(2): с.198-210, (2022).

22. Timoshkov, Y., Stognij, A., Timoshkov, V., Kurmashev, V., *Novel way of microreliefs fabrication for MEMS, In XV International Symposium on Advanced Display Technologies 6637*: с. 129-133.

23. Yang, H. H., Myung, N. V., Yee, J., Park, D. Y., Yoo, B. Y., Schwartz, M., Judy, J. W. *Ferromagnetic micromechanical magnetometer, Sensors and Actuators A: Physical* 97: с.88-97 (2002).

Т.И. Зубарь¹, Н.Е. Андрейчик¹, Д.И. Тишкевич¹, А.В. Труханов^{*1}

¹Беларусь Ұлттық ғылым академиясының Материалтану бойынша ғылыми-өндірістік орталығы, Беларусь Республикасы
(E-mail:truhanov86@mail.ru)

Комплекстүзуші қоспаның аморфтандыру агенті бар CoNi электролиттік тұнба пленкаларының химиялық құрамы, микроструктурасы және магниттік қасиеттеріне әсері

Андатпа. Бұл жұмыстың мақсаты – аморфтандыру агенті (P) бар CoNi пленкаларын синтездеу кезінде комплекстүзуші қоспа (сегнет тұзы) әсерін олардың химиялық құрамы, микроструктурасы және магниттік қасиеттері тұрғысынан зерттеу. Зерттеу нысандары (CoNiP пленкалары) екі түрлі электролиттен: дәстүрлі сульфатты электролиттен және комплекстүзуші ретінде сегнет тұзы ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) қосылған сульфатты электролиттен электролиттік тұндыру әдісімен синтезделді. Пленкалардың екі тобы 15, 20 және 30 mA/cm^2 ток тығыздығы жағдайында алынды. Электролитті модификациялау және комплекстүзушінің әсерін анықтау міндеті – зерттелетін нысандардың химиялық құрамын басқарып өзгерту және соның нәтижесінде олардың магниттік сипаттамаларын өзгерту болып табылды. CoNiP пленкаларының құрамына сегнет тұзын енгізудің әсері анықталды. Комплекстүзуші қоспаны қолдану пленка компоненттерінің концентрациясын кеңірек диапазонда өзгертуге мүмкіндік беретіні көрсетілді (ток тығыздығы 15-тен 30 mA/cm^2 -ге дейін артқанда: Co – 63,6 ат.%-тен 74,8 ат.%-ке дейін; Ni – 23,1 ат.%-тен 19,5 ат.%-ке дейін және P – 13,3 ат.%-тен 5,6 ат.%-ке дейін), бұл классикалық электролиттен алынған үлгілермен салыстырғанда (Co – 80,5 ат.%-тен 82,0 ат.%-ке дейін; Ni – 14,5 ат.%-тен 13,3 ат.%-ке дейін және P – 5,0 ат.%-тен 4,7 ат.%-ке дейін). Пленкалардың құрамы мен олардың магниттік параметрлері арасындағы корреляция сыртқы магнит өрісінің түрлі бағыттарында көрсетілді. Алынған нәтижелер көпкомпонентті қорытпалар пленкаларын электролиттік синтездеудің ерекшеліктері олардың құрылымдық және магниттік қасиеттеріне қалай әсер ететінін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: магниттік пленкалар; CoNi қорытпасы; электролиттік тұндыру; микроструктура; магниттік қасиеттер

T.I. Zubar¹, N.E. Andreichyk¹, D.I. Tishkevich¹, A.V. Trukhanov^{*1}

¹Scientific-Practical Materials Research Centre of the NAS of Belarus, Republic of Belarus
(E-mail:truhanov86@mail.ru)

Effect of a Complexing Additive on the Chemical Composition, Microstructure, and Magnetic Properties of Electrodeposited CoNi Films with an Amorphizing Agent

Abstract. The work aims to determine the influence of the complexing additive (Rochelle salt) in the synthesis of CoNi films with an amorphizing agent (P) on their chemical composition, microstructure, and magnetic properties. The objects of study (CoNiP films) were synthesized by electrolytic deposition from two types of electrolytes: a classic sulfate electrolyte and a sulfate electrolyte with the addition of the complexing agent Rochelle salt ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Two groups of films were obtained under conditions of varying the deposition current density (15-20-30 mA/cm²). The task of modifying the electrolyte and establishing the influence of the complexing agent consisted of a controlled change in the chemical composition of the objects of study and, as a consequence, the magnetic characteristics. The effect of the introduction of Rochelle salt on the composition of CoNiP films was established. It is shown that the use of a complexing additive allows changing the concentration of the film components in wider ranges (Co from 63.6 at.% to 74.8 at.%; Ni from 23.1 at.% to 19.5 at.% and P from 13.3 at.% to 5.6 at.%) with an increase in the current density from 15 to 30 mA/cm² in comparison with the samples synthesized from the classical electrolyte in the same range of current densities (Co from 80.5 at.% to 82.0 at.%; Ni from 14.5 at.% to 13.3 at.% and P from 5.0 at.% to 4.7 at.%), respectively. A correlation between the composition of the films and their magnetic parameters in different orientations of the external magnetic field is shown. The obtained results expand the understanding of the influence of the features of electrolytic synthesis of multicomponent alloy films on their structural and magnetic characteristics.

Keywords: magnetic films; CoNi alloy; electrodeposition; microstructure; magnetic properties.

References

1. H. Zhai, X. Li, S. Yu, J. Wang, Y. Chang, J. Li, X. Cheng, L. Zhou, Y. Fang, T. Liu, X. Yu, M. Zhu, B. Li, W. Li, *Review on the 3D printing technology and application of magnetic materials, Material-process-structure-application*, Composites Part B: Engineering, 298 (2025).
2. A.V. Trukhanov, V.O. Turchenko, I.A. Bobrikov, S.V. Trukhanov, I.S. Kazakevich, A.M. Balagurov, *Crystal structure and magnetic properties of the $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$ ($x=0.1-1.2$) solid solutions*, J. Magn. Mater. 393: pp. 253-259 (2015)
3. Z. Hongna, Z. Yue, Q. Haili, B. Huhe, Z. Ruifen, *Magnetic phosphate-based transition Metal-Containing porous Materials, Recent Advances, synthetic Approaches, and applications*, Inorganic Chemistry Communications 178(1) (2025).
4. A.V. Trukhanov, V.G. Kostishyn, L.V. Panina, V.V. Korovushkin, V.A. Turchenko, P. Thakur, A. Thakur, Y. Yang, D.A. Vinnik, E.S. Yakovenko, L.Yu. Matzui, E.L. Trukhanova, S.V. Trukhanov, *Control of electromagnetic properties in substituted M-type hexagonal ferrites*, J. Alloys Compd. 754: pp. 247-256 (2018).
5. L. Liu, H. Wang, Y. Fu, L. Gao, Z. Yang, X. Zheng, Y. Chen, Y. Huang, X. Wang, X. Yi, Z. Dang, *Application of a superior magnetic hydroxy iron material for arsenic removal from soil*, Environmental Research, 274 (2025).

6. S.V. Trukhanov, A.V. Trukhanov, V.A. Turchenko, An.V. Trukhanov, E.L. Trukhanova, D.I. Tishkevich, V.M. Ivanov, T.I. Zubar, M. Salem, V.G. Kostishyn, L.V. Panina, D.A. Vinnik, S.A. Gudkova, *Polarization origin and iron positions in indium doped barium hexaferrites*, Ceram. Int. 44: pp. 290-300 (2018).
7. Myung, N., & Nobe, K. *Electrodeposited iron group thin-film alloys: structure-property relationships*, Journal of the Electrochemical Society 148(3), (2001).
8. Kim, D., Park, D. Y., Yoo, B. Y., Sumodjo, P. T. A., Myung, N. V. *Magnetic properties of nanocrystalline iron group thin film alloys electrodeposited from sulfate and chloride baths*, Electrochimica Acta 48(7): pp. 819-830 (2003).
9. Lebedeva, O., Fishgoit, L., Knyazev, A., Kultin, D., Kustov, L. *Electrodeposition of Iron Triad Metal Coatings*, Metals 13(4) (2023).
10. Li, S., & Yuan, Q. *Study on electrodeposition of CoNiW coating on 1045 steel as piston ring materials and its wear resistance performance*, International Journal of Electrochemical Science 18(1): pp. 38-44 (2023).
11. Theis, M., Bill, T., Knoll, H., Starke, P., Saumer, M., *Electrochemical deposition of CoP and CoNiP as hard magnetic scales in a position measurement system*, Metals 12(2), (2022).
12. Kotnana, G., Cheng, Y., & Lin, C. C., *Triggering Magnets for Wiegand Sensor by Electrodeposited and Origami Magnetized CoNiP Micro-magnets* (2023)
13. Haque, M. S., Rahman, M. F., Zaman, M. M., Matin, M. A., Hakim, A. K. M. A., & Islam, M. F., *Fabrication of CoNiP Thin Films with Improved Magnetic Property for Application in MEMS*, Applied Mechanics and Materials 860: pp. 87-92(2017).
14. Yu, Y., Wei, G., Ge, H., Jiang, L., & Sun, L., *CoNiMn magnetic films prepared by magnetic field induced codeposition technology*, Surface Engineering, 33(7): pp. 483-491 (2017).
15. Wang, K., Zhao, R., Wang, Z., Zhang, X., Ouyang, A., Zhou, C., Chu, Y., *Controlled tuning the morphology of CoNiP catalysts with ultra-high activity for water splitting at large current densities in alkaline medium*, Applied Surface Science 626, (2023).
16. Wang, X., Xie, Y., Zhou, W., Wang, X., Cai, Z., Xing, Z., Pan, K., *The self-supported Zn-doped CoNiP microsphere/thorn hierarchical structures as efficient bifunctional catalysts for water splitting*, Electrochimica Acta 339, (2020).
17. Chen, Y., Feng, K., Yuan, G., Kang, Z., & Zhong, J., *Highly efficient CoNiP nanoboxes on graphene oxide for the hydrolysis of ammonia borane*. Chemical Engineering Journal 428, (2022).
18. Wang, X., Zhang, W., Yu, Q., Liu, X., Liang, Q., Meng, X., Wang, L. *Fe-doped CoNiP@ N-doped carbon nanosheet arrays for hydrazine oxidation assisting energy-saving seawater splitting*, Chemical Engineering Journal 446, (2022).
19. Qiao, L., Zhu, A., Liu, D., Feng, J., Chen, Y., Chen, M., Pan, H., *Crystalline phosphides/amorphous oxides composite for energy-saving hydrogen production assisted by efficient urea oxidation reaction*, Chemical Engineering Journal 454 (2023).
20. Abd El-Lateef, H. M., Khalaf, M. M., Alnajjar, A. O., Mohamed, I. M., *Facile synthesis of Co/Ni bimetallic phosphate as electrode material for urea fuel cells: Effect of synthetic strategy on the physicochemical and electrocatalytic behavior*, Fuel 334 (2023).
21. Jiang, Y., Chen, C. Y., Luo, X., Yamane, D., Mizoguchi, M., Kudo, O., Chang, T. F. M., *Electrodeposition and micro-mechanical property characterization of nickel-cobalt alloys toward design of MEMS components*. Electrochem 3(2): pp. 198-210, (2022).
22. Timoshkov, Y., Stognij, A., Timoshkov, V., Kurmashev, V., *Novel way of microreliefs fabrication for MEMS*, In XV International Symposium on Advanced Display Technologies 6637: pp. 129-133.

23. Yang, H. H., Myung, N. V., Yee, J., Park, D. Y., Yoo, B. Y., Schwartz, M., Judy, J. W. *Ferromagnetic micromechanical magnetometer, Sensors and Actuators A: Physical* 97: pp. 88-97 (2002).

Информация об авторах:

Зубарь Т.И. – ведущий научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, канд. физ.-мат. наук, доцент, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», 220072, г. Минск, ул. П.Бровки, 19, Республика Беларусь.

Андрейчик Н.Е. – научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, канд. хим. наук, доцент, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», 220072, г. Минск, ул. П.Бровки, 19, Республика Беларусь.

Тишкевич Д.И. – старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, канд. физ.-мат. наук, доцент, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», 220072, г. Минск, ул. П.Бровки, 19, Республика Беларусь.

Труханов А.В. – автор для корреспонденции, ведущий научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, докт. физ.-мат. наук, доцент, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», 220072, г. Минск, ул. П.Бровки, 19, Республика Беларусь.

Зубарь Т.И. – магнітнік қабыршақтар физикасы зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, «Беларусь ҰҒА Материалтану бойынша ғылыми-өндірістік орталығы» ММ, 220072, Минск қ., П.Бровки көшесі, 19 үй, Беларусь Республикасы

Андрейчик Н.Е. – магнітнік қабыршақтар физикасы зертханасының ғылыми қызметкері, химия ғылымдарының кандидаты, доцент, «Беларусь ҰҒА Материалтану бойынша ғылыми-өндірістік орталығы» ММ, 220072, Минск қ., П.Бровки көшесі, 19 үй, Беларусь Республикасы

Тишкевич Д.И. – магнітнік қабыршақтар физикасы зертханасының аға ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, «Беларусь ҰҒА Материалтану бойынша ғылыми-өндірістік орталығы» 220072, Минск қ., П.Бровки көшесі, 19 үй, Беларусь Республикасы

Труханов А.В. – хат-хабар авторы, магнітнік қабыршақтар физикасы зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының докторы, доцент, «Беларусь ҰҒА Материалтану бойынша ғылыми-өндірістік орталығы» ММ, 220072, Минск қ., П.Бровки көшесі, 19 үй, Беларусь Республикасы

Zubar T.I. – leading researcher of the magnetic films physics laboratory, PhD, Ass.Prof., Scientific-Practical Materials Research Centre of the NAS of Belarus, 220072, Minsk, 19 P. Brovki str., Republic of Belarus

Andreichyk N.E. – researcher of the magnetic films physics laboratory, PhD, Scientific-Practical Materials Research Centre of the NAS of Belarus, 220072, Minsk, 19 P. Brovki str., Republic of Belarus

Tishkevich D.I. – leading researcher of the magnetic films physics laboratory, PhD, Ass.Prof., Scientific-Practical Materials Research Centre of the NAS of Belarus, 220072, Minsk, 19 P. Brovki str., Republic of Belarus

Trukhanov A.V. – corresponding author, leading researcher of the magnetic films physics laboratory, Full Doctor, Ass.Prof., Scientific-Practical Materials Research Centre of the NAS of Belarus, 220072, Minsk, 19 P. Brovki str., Republic of Belarus



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



XҒТАР 37.23.17

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-115-135>

Шолу мақаласы

PM-2.5 аэрозольдеріндегі бериллий -7 (^7Be) атмосфералық белсенділігі: қолданылуы, тенденциялары және экологиялық перспективалары

А.О. Мухаметжанова¹, К.Ш. Жумадилов^{*1}, А.А. Баграмова¹, Ж.А. Байгазинов²,
Ж.О. Насилов¹, М.Т. Касымжанов¹, А.И. Иванников³, В.Ф. Степаненко³, М. Хоши⁴

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар халықаралық кафедрасы, Астана, Қазақстан

²"Ядролық технологиялар паркі" АҚ Қазақстан Республикасы, Курчатов қаласы, Абай облысы

³Ресей Федерациясының Денсаулық сақтау Министрлігінің «ФМЗО» Федералдық Мемлекеттік бюджеттік мекемесінің филиалы А.Ф. Цыба атындағы МРФО, Обнинск қаласы, Ресей Федерациясы

⁴Хиросима университеті, Хиросима, Жапония

(E-mail: zhumadilovk@gmail.com)

Аңдатпа. Мақалада PM2.5 аэрозоль бөлшектеріндегі космогендік бериллий-7 (^7Be) радионуклидінің атмосфералық белсенділігі туралы соңғы зерттеулердің егжей-тегжейлі талдауы келтірілген. Атмосфераның жоғары қабаттарында ғарыштық сәулелердің өзара әрекеттесуі нәтижесінде пайда болған ^7Be аэрозольдер мен онымен байланысты ластаушы заттардың тасымалдануы мен трансформациясын бақылау және тропосфера мен стратосфера арасындағы алмасу механизмдерін зерттеу үшін пайдаланылуы мүмкін сезімтал және бірегей трассер болып табылады. Шолу мақала ^7Be физикалық және химиялық қасиеттерін қарастырады, оны анықтаудың күрделі аналитикалық әдістерін, соның ішінде гамма-спектрометрияны сипаттайды және оның ауа-райына және PM2.5 негізгі көздеріне байланысты маусымдық және аймақтық ауытқуларын қарастырады. Шолу ауа сапасын бағалау, тәуекелдерді басқару және келісілген халықаралық атмосфераны бақылау және ластануды азайту стратегияларын әзірлеу үшін ^7Be пайдаланудың ғылыми және практикалық маңыздылығын көрсетеді. ^7Be -ді аэрозольдердің трансшекаралық тасымалын сандық анықтау және ұсақ бөлшектердің ластануының қоршаған ортаға және халықтың денсаулығына әсерін, бағалау құралы ретінде пайдалануға ерекше назар аударылады. Мақалада сонымен қатар атмосфералық бақылау желісі мен модельдеу жүйесіндегі ^7Be деректерінің интеграциясы талқыланады, соңғы жетістіктермен қатар қазіргі проблемалар баса айтылады.

Түйін сөздер: бериллий-7 (^7Be); аэрозольдер; PM2.5; атмосфералық мониторинг; экологиялық бағалау; радиоизотоптық индикаторлар; ластану тенденциялары.

Жіберілді 20.05.2025. Өзгертілді 02.06.2025. Қабылданды 02.06.2025. Онлайн қол жетімді 25.06.2025

¹ *хат-хабар авторы

Кіріспе

Атмосфералық ауаның ластануы адам денсаулығы мен климаттық жүйелерге тікелей әсер ететін жаһандық экологиялық проблемалардың бірі болып қала береді. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының (ДДҰ) мәліметтері бойынша, жер халқының 99%-ы PM2.5 тоқтатылған бөлшектерінің концентрациясы қауіпсіз деңгейден (5 мкг/м³) асатын жерлерде тұрады және жыл сайын ауаның ластануынан шамамен 7 миллион адам қайтыс болады [1]. Орталық Азиядағы жағдай ерекше алаңдатады: Душанбе, Ташкент және Бішкек қалалары өнеркәсіптік шығарындылармен, қатты отынды пайдаланумен және аэрозольдердің трансшекаралық тасымалымен байланысты PM2.5 деңгейі бойынша әлемдегі ең ластанған 30 астананың қатарына үнемі кіреді [2]. Атмосфералық процестерді бақылау контекстінде бериллий-7 (⁷Be) сияқты радионуклидтер шешуші рөл атқарады. ⁷Be аэрозоль бөлшектерінің бетіне адсорбцияланады, бұл оны PM2.5 динамикасын зерттеу үшін тамаша көрсеткіш етеді-өкпе альвеолалары мен қан ағымына ену қабілетіне байланысты денсаулыққа ең үлкен қауіп төндіретін фракция [1].

Бұл мақалада төменде көрсетілген тапсырмаларға бойынша шолу жасалынады:
маусымдық және географиялық вариация контекстіндегі ⁷Be механизмдерін талдау;
PM2.5-те ⁷Be анықтау әдістеріне шолу (гамма-спектрометрия, радиохимиялық талдау);
⁷Be концентрациясы, метеорологиялық факторлар және аэрозоль көздері арасындағы байланысты анықтау;

ластанудың трансшекаралық тасымалын болжаудағы және тәуекелдерді азайту стратегияларын әзірлеудегі ⁷Be рөлін бағалау.

Әдеби шолу. ⁷Be-нің физика-химиялық қасиеттері және оны анықтау әдістері

Бериллий-7 (⁷Be) – жартылай ыдырау кезеңі шамамен 53,3 күн болатын радиоактивті бериллий изотопы, ол атмосфераның жоғарғы қабаттарында ғарыштық сәулелердің азот, оттегі және көміртек ядроларымен өзара әрекеттесуі нәтижесінде түзіледі [3]. Оның түзілуінің негізгі механизмі – ғарыш текті жоғарыэнергиялық протондар мен нейтрондар атмосфера атомдарынан нуклондарды шығарып, ⁷Be элементін түзеді. ⁷Be-дің атмосферадағы концентрациясы геомагниттік ендікке, күн белсенділігіне және биіктікке байланысты, ал ең жоғары мәнге орта ендіктер мен тропосфераның жоғарғы қабаттарында жетеді [3]. Қысқа жартылай ыдырау кезеңі мен антропогендік көздердің болмауына байланысты ⁷Be – атмосфералық процестер мен аэрозоль тасымалын зерттеуге арналған бірегей табиғи маркер.

⁷Be-нің физика-химиялық қасиеттері оның атмосфералық аэрозольдердің бетіне адсорбциялануымен тығыз байланысты және негізінен PM2.5 фракциясында байқалады. Стратосферада түзілген ⁷Be диаметрі 2,5 мкм-ден кіші майда дисперсті бөлшектермен тез байланысады, бұл оның аэрозольдермен бірге тасымалдануын қамтамасыз етеді және атмосферадағы ластану динамикасы мен тік алмасуды зерттеуге мүмкіндік береді [4]. Сонымен қатар, ⁷Be жоғары химиялық тұрақтылыққа ие, ауадағы басқа компоненттермен белсенді реакцияларға түспейді, бұл оның бөлшектер құрамында шөгуге дейін сақталуын қамтамасыз етеді. Бериллий-7 (⁷Be) – атмосферадағы мөлшері антропогендік факторларға іс жүзінде тәуелсіз сирек радионуклидтердің бірі, бұл оны бірегей табиғи

индикаторға айналдырады [5]. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2000) деректеріне сәйкес, ^7Be түзілуінің жаһандық орташа деңгейі шамамен $810 \text{ атом}/\text{м}^2/\text{с}$, ал оның тропосферадағы орташа концентрациясы – $12,5 \text{ мБк}/\text{м}^3$ [5]. Оңтүстік Федералды Университеті мен Харьков физика-техникалық институтының зерттеулері фотоядерлік реакциялардың жалпы ^7Be балансына қосқан үлесі скалывание реакцияларымен салыстырғанда аса маңызды емес екенін көрсеткен, бірақ бұл механизмді толығымен жоққа шығаруға болмайды [6]. ^7Be түзілу жылдамдығы биіктікке ғана емес, ендікке де, сондай-ақ Жердің магнит өрісі арқылы ғарыштық сәулелер ағынын модуляциялайтын 11 жылдық күн циклінің фазасына байланысты өзгеріп отырады [5]. Осылайша, ^7Be – қысқа жартылай ыдырау кезеңі бар (53,3 күн) космогендік радионуклид, бұл оның белсенділігін және атмосфералық процестерге жоғары сезімталдығын қамтамасыз етеді. Оның түзілуі орта және жоғары ендіктер үшін жақсы зерттелген, бірақ Орталық Азия мен басқа континенттік аймақтар үшін нақты бағалаулар өте сирек кездеседі, бұл халықаралық зерттеулерде елеулі олқылық бар екенін көрсетеді.

Аэрозольдердегі ^7Be белсенділігін анықтау

^7Be белсенділігін аэрозольдерде анықтау негізінен гамма-спектрометрия әдісімен жүзеге асырылады, ол ^7Be ыдырауы кезінде шығарылатын $477,6 \text{ кэВ}$ энергияға тән гамма-сәулеленуді тіркеуге негізделген [4]. Талдау үшін NaI(Tl) негізіндегі сцинтилляциялық детекторлар және жоғары ажыратымдылықты жартылай өткізгіш HPGe (High-Purity Germanium) детекторлары қолданылады, себебі олар пикаралық ерекшелік пен дәлдігімен және жоғары сезімталдықты қамтамасыз етеді. Үлгілерді дайындау – аэрозольдерді сүзгілерге жинау, кейіннен кептіру және белсенділіктің жоғалуын азайту үшін герметизациялауды қамтиды. ^7Be -ні бөліп алу үшін радиохимиялық әдістер сирек қолданылады, өйткені олар күрделі және көп еңбек сіңіруді талап етеді, дегенмен төмен концентрацияларда қосымша дәлдік береді [4]. Қазіргі заманғы гамма-спектрометрия әдістері ^7Be -ні үнемі бақылауға мүмкіндік береді және нәтижелердің зертханалар арасындағы жоғары қайталанғыштығы мен салыстырмалылығын қамтамасыз етеді.

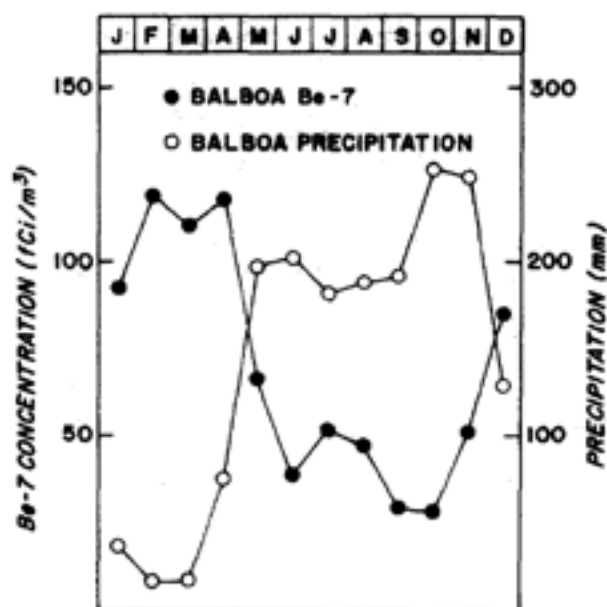
^7Be мен аэрозольдердің, әсіресе $\text{PM}_{2.5}$ байланысы

Түзілгеннен кейін ^7Be субмикрондық аэрозоль бөлшектеріне, негізінен $0,07\text{--}2 \text{ мкм}$ диапазонында, тез адсорбцияланады, бұл аэрозольдердің «аккумуляциялық» (accumulation) модуліне сәйкес келеді [5]. Бұл $\text{PM}_{2.5}$ фракциясы үшін өте маңызды, себебі бұл фракция диаметрі $2,5 \text{ мкм}$ -ден кіші бөлшектерді қамтиды және адамның тыныс алу жолдарына терең ену қабілетімен ерекшеленеді [7]. Әдебиет деректерінде ^7Be сорбцияланатын бөлшектердің аэродинамикалық диаметрі $0,33\text{--}1,15 \text{ мкм}$ -ге дейін ауытқитыны көрсетілген, бұл $\text{PM}_{2.5}$ диапазонын толығымен қамтиды [5]. Bondietti және авторластарының (1984, 1987) зерттеулері ^7Be аэрозольдер бетіне түзілуінен кейін бірден конденсацияланатынын, содан соң бөлшектердің коагуляциясы мен өсу процестеріне қатысатынын, бұл оның кейінгі таралуына және атмосферадан құрғақ немесе ылғалды тұндыру арқылы шығарылуына әсер ететінін көрсетті. Маңызды аспект – ^7Be басқа табиғи радионуклидтер (^{22}Na , ^{210}Pb) сияқты аэрозольдердің атмосферадағы өмір сүру уақытына, тұну жылдамдығына және өсімдіктермен сіңірілу тиімділігіне баға беру үшін

маркер ретінде қолданылуы мүмкін [5]. Алайда ^{7}Be -нің $\text{PM}_{2.5}$ ішіндегі таралуына арналған зерттеулердің көпшілігі Еуропа, Солтүстік Америка және Шығыс Азияда жүргізілген. Орталық Азия үшін, $\text{PM}_{2.5}$ ластану деңгейі жоғары болғанымен, мұндай жұмыстар өте аз, бұл аймақтық ерекшеліктерді жаһандық үрдістермен салыстыруды қиындатады.

Географиялық және маусымдық өзгергіштік

^{7}Be концентрациясы атмосферада географиялық және маусымдық айқын өзгергіштікке ие, бұл жаһандық (күн циклі, ендік, биіктік) және жергілікті (метеорологиялық жағдайлар, жауын-шашын) факторларға байланысты [8]. Еуропада (Бильбао, Испания) жүргізілген зерттеулерде ^{7}Be ең жоғары мәндері қаңтардан қыркүйекке дейін, ақпанда шарықтау шегімен және шілде–тамызда екінші максимуммен байқалатыны, ал ең төмен мәндер қарқынды жауын-шашын кезінде (қараша–желтоқсан) тіркелетіні көрсетілген. Бұл график түрінде де көрсетілген (1-сурет) [8]. ^{7}Be белсенділігі мен күн дақтарының саны арасындағы күшті теріс корреляция ($r = -0,93$) радионуклид генерациясына күн циклінің әсерін дәлелдейді.



Сурет 1. Балбоадағы орташа айлық концентрация ^{7}Be және орташа айлық жауын шашын
Ескерту: деректер негізінде жасалған [8]

Feely және авторлар (1989) анықтағандай, ^{7}Be радионуклидінің жер бетіне жақын ауадағы маусымдық ауытқулары кем дегенде төрт фактормен түсіндіріледі [8]:

Қыс мезгілінің соңында және көктемде стратосфералық ауаның тропосфераға тасымалдану жылдамдығының артуы;

Жылы кезеңде тропосфера тұрақтылығының төмендеуі, бұл тік алмасуға ықпал етеді;

Әсіресе жоғары ендіктерде ауа массаларының траекторияларының өзгеруі;

Аэрозольдердің шайылу жылдамдығын анықтайтын жауын-шашынның маусымдық тербелістері [8].

Солтүстік жартышарда ^7Be радионуклиді концентрациясының максимумдары көбінесе көктемде және жазда, ал минимумдары – күзде және қыста тіркеледі [9]. Оңтүстік жартышарда маусымдық шектер керісінше фазамен сипатталады. Орталық Азия үшін климаттың жоғары континенттілігіне қарамастан, мұндай заңдылықтар әзірге фрагментті түрде ғана сипатталған, бұл ұзақмерзімді мониторингтік зерттеулерді жүргізуді қажет етеді [10][8].

^7Be радионуклидин атмосфералық тасымалдау индикаторы ретінде пайдалану

^7Be табиғи трассер ретінде аэрозольдердің тасымалдану үдерістерін, стратосфера мен тропосфера арасындағы алмасуды зерттеуде, сондай-ақ бөлшектердің атмосферадағы өмір сүру уақытын бағалауда кеңінен қолданылады [11]. Оның табиғи шығу тегі және антропогендік көздердің болмауы фондық ағындарды жергілікті ластанулардан ажыратуға мүмкіндік береді. Martell (1970) және Young & Silker (1980) алғашқылардың бірі болып ^7Be аэрозольдердің тропосферада болу уақытына, тұну жылдамдығына және көлденең әрі тік тасымал ауқымдарына баға беруде қолдануға болатынын көрсетті. Қазіргі зерттеулерде ^7Be атмосфералық тасымалдау модельдерімен (мысалы, HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model), FLEXPART (FLEXible PARTicle dispersion model)) және спутниктік деректермен бірге трансшекаралық PM2.5 ағындарын бақылау, климаттық модельдерді верификациялау және ауаны ластау деңгейін төмендету шараларының тиімділігін бағалау мақсатында пайдаланылады [12][13].

Соңғы жылдары ^7Be деректерін басқа радионуклидтермен (^{210}Pb , ^{137}Cs) және химиялық маркерлермен біріктіру арқылы аэрозоль көздері мен тасымал жолдарын неғұрлым дәл сәйкестендіруге ерекше назар аударылуда. Мысалы, AERONET және EMEP мәліметтері негізінде жүргізілген зерттеулерде ^7Be және PM2.5 біріктірілген талдауы Сахарадан шаңның алысқа тасымалдану эпизодтарын, Сібірдегі өрттерді және Еуропа мен Шығыс Азиядағы трансшекаралық ластануды анықтауға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Алайда, Орталық Азияда Арал мен шөлдер сияқты ірі шаң көздерінің болуына қарамастан, ^7Be қолданып аэрозольдердің трассировкасын жүргізетін зерттеулер жоқтың қасы. Бұл PM2.5-тің аймақтық деңгейіне трансшекаралық тасымалдың үлесін бағалау мүмкіндігін шектейді және ауа сапасын басқарудың тиімді стратегияларын әзірлеуді қиындатады [10][8].

Аэрозольдердегі ^7Be -ні бақылау мен талдаудың заманауи әдістері

Соңғы жылдары ^7Be деректерін спутниктік мониторинг нәтижелерімен (MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)) және атмосфералық үдерістерді сандық модельдеумен біріктіру әдістері белсенді дамып келеді. Бұл аэрозольдердің кең ауқымды тасымалдану эпизодтарын бақылауға, ластанудың өршуін болжауға және PM2.5 деңгейін төмендетуге бағытталған табиғи және антропогендік шаралардың тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді [8]. Соған қарамастан, Орталық Азияны қоса алғанда, кейбір аймақтарда ^7Be мониторингінің дамыған желісі жоқ, бұл кешенді талдау жүргізу және халықаралық деректермен салыстыру мүмкіндіктерін едәуір шектейді. PM2.5 аэрозольдеріндегі ^7Be бойынша халықаралық зерттеулер аэрозольдердің түзілу, тасымалдану және тұну үдерістерін түсінуге, сондай-ақ атмосфералық мониторинг әдістерін дамытуға айтарлықтай үлес қосты. Әсіресе Еуропа, Солтүстік Америка және Шығыс Азия аймақтары

жақсызерттелген, онда ұзақ мерзімді бақылау қатарлары, дамыған станциялар желісі және модельдер мен спутниктік деректермен интеграция бар [10]. Шетелдік зерттеулердің күшті жақтарына мыналарды жатқызуға болады: ^{7}Be концентрацияларына әсер ететін факторларды кешенді талдау [8]; заманауи трассировка және модельдеу әдістерін пайдалану; ^{7}Be деректерін химиялық және радионуклидтік маркерлермен біріктіру [10]. Алайда шешілмеген мәселелер де бар: климаттық жағдайлары шекті аймақтардың (Орталық Азия, Таяу Шығыс, Африка) жеткіліксіз зерттелуі; климаттық трендтермен салыстыру үшін ұзақ мерзімді қатарлардың тапшылығы; PM2.5 жергілікті көздерінің ^{7}Be динамикасына әсеріне арналған зерттеулердің жетіспеушілігі. Жалпы алғанда, болашақ зерттеулерді дамыту үшін ^{7}Be мониторингінің географиясын кеңейту, оны басқа маркерлер мен модельдермен интеграциялау, сондай-ақ климаттық және антропогендік факторлардың радионуклидтің атмосферадағы таралуына әсерін тереңірек талдау қажет [9].

Зерттеу әдістемесі

Сүзу әдістері және сүзгі түрлері

PM2.5 аэрозольдерін іріктеу үшін әлемдік практикада автоматтандырылған және жартылай автоматтандырылған қондырғыларды пайдалана отырып сүзу әдістері кеңінен қолданылады. Негізгі принцип – диаметрі 2,5 мкм-ден кем бөлшектерді ұстап қалатын тесіктері бар сүзгілер арқылы ауаны өткізу [14][15]. Сүзгілердің ең кең таралған материалдарына мыналар жатады: *шыны талшықты сүзгілер* (мысалы, ФПП-15) – жоғары жинақтау тиімділігімен және төмен фондық белсенділігімен ерекшеленеді [16] [17]; *политетрафторэтилен* (PTFE) сүзгілері – гидрофобты, химиялық әсерлерге төзімді, бұл гравиметриялық талдау кезіндегі қателіктерді барынша азайтады (2-суретте жақсы көрсетілген) [18][19]; *кварц сүзгілері* – термиялық төзімді, органикалық көміртекті талдау үшін қолданылады [18][19].



Сурет 2. Сүзгілерді пайдалану әдісі

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [18]

PTFE және кварц сүзгілерін салыстыру нәтижесінде PM2.5-тің орташа концентрациясы PTFE-де 52,9%-ға төмен екені анықталды, бұл олардың гидрофобты қасиеттерімен түсіндіріледі, себебі бұл ылғалдылықтың әсерін азайтады [18].

Автоматтандырылған сынама алу станциялары

AirPhoton Automated Filter Sampling Station және Partisol® Plus 2025 сияқты автоматтандырылған жүйелер электронды басқару, сорғылар және ауа ағынын бақылау жүйелерімен (16,67 л/мин) жабдықталған, бұл сынама алуды стандарттауға мүмкіндік береді [14][17]. Бұл станциялар PM2.5 массалық концентрациясына гравиметриялық талдау жүргізу үшін үздіксіз 24-48 сағаттық сынама алуға мүмкіндік береді [17]. Артықшылықтары: адами фактордың әсерін азайту; сынама алу жағдайларын тұрақтандыру үшін температураны реттегіштермен біріктіру мүмкіндігі [17]. Еуропа мен АҚШ-та мұндай жүйелер EN 12341:2014 директивасы және Federal Reference Method (FRM) талаптарына сәйкес мониторингтің негізін құрайды [20].

Шектеулі ресурстары бар аймақтардағы қолмен басқарылатын әдістер

Жоғары технологиялық жабдықтарға қолжетімділігі шектеулі аймақтарда (мысалы, Қазақстан) қолмен басқарылатын мобильді қондырғылар қолданылады. Олар стандартты шыны талшықты сүзгілер мен вакуумды сорғыларды пайдаланады, бұл төмен шығынмен жеткілікті дәлдікті қамтамасыз етеді [16]. Мысалы: төмен көлемді LV сэмплерлер (Low Volume samplers) – 2–4 сағат бойы сынама алып, кейін зертханада өлшеу [18]; EPA (Environmental Protection Agency (АҚШ)) және ДДҰ (ВОЗ (Всемирная организация здравоохранения)) нұсқаулықтарына сәйкес келетін жеңілдетілген хаттамалар [20]. Қолмен басқарылатын әдістердің кемшіліктері: еңбек сыйымдылығы жоғары; тасымалдау кезінде сүзгілердің контаминация қаупі бар [16].

Әдіс таңдау бойынша ұсыныстар

Дәл әрі ұзақ мерзімді мониторинг үшін автоматтандырылған жүйелер (PTFE-сүзгілер + гравиметрия) тиімді [14].

Бюджеті шектеулі аймақтарда шыны талшықты сүзгілері бар қолмен басқарылатын LV-сэмплерлер қолайлы [18].

PM2.5-тің органикалық компоненттерін талдау үшін кварц сүзгілері оңтайлы [20].

PM2.5-ті іріктеу әдістері техникалық мүмкіндіктер мен зерттеу мақсаттарына байланысты өзгереді. Автоматтандырылған жүйелердің дамуы және хаттамалардың стандартталуы (EN 12341(European Norm 12341:2014), FRM) мәліметтердің дәлдігін арттырады, алайда дамушы елдерде қолмен басқарылатын әдістер өзектілігін сақтап отыр [17][20].

⁷Be анықтау әдістері

Талдаудың негізгі кезеңдері:

- Сынамаларды дайындау: аэрозольдер жиналған сүзгілерді кептіріп, белсенділіктің жоғалуын барынша азайту үшін герметикалық орау.
- Гамма-спектрлерді өлшеу: NaI(Tl) кристалдарына негізделген сцинтилляциялық детекторларды немесе жоғары энергия ажыратымдылығын қамтамасыз ететін HPGe (германиевые) жартылай өткізгіш детекторларды қолдану.
- Спектрометрлерді стандартты көздермен калибрлеу.

– Мәліметтерді өңдеу: мамандандырылған бағдарламаларда (мысалы, RAD (Radiological Assistance Software) Assist) пиковая энергияларды анықтап, ${}^7\text{Be}$ белсенділігін Бк/м³ бірлігінде есептеу.

Кейбір зерттеулерде ${}^7\text{Be}$ -ні сынамалардан бөліп алу үшін радиохимиялық әдістер де қолданылады, алайда олар еңбек шығыны жоғары болғандықтан, күнделікті мониторингте сирек пайдаланылады. Осыған байланысты 1 – кестеде PM2.5-те ${}^7\text{Be}$ қасиеттеріне байланысты салыстырмалы ақпарат көрсетілген.

1-кесте: PM2.5-те ${}^7\text{Be}$ іріктеу мен талдаудың негізгі әдістерін салыстыру

Әдіс	Сипаттау	Артықшылықтары	Шектеулер	Қазақстан үшін қолдану мүмкіндігі
Шыны Талшықты сүзгілерде сүзу	AFP-15 сүзгілері мен аналогтары арқылы аэрозольдерді таңдау	PM2.5 жинаудың қарапайымдылығы, қол жетімділігі, жоғары тиімділігі	Ұзақ жинау қажет, белсенділіктің жоғалуы мүмкін	Жоғары, көптеген зертханаларда бар
Автоматтандырылған станциялар	Ауа ағынын бақылайтын электр желдеткіші	Стандарттау, ұзақ үздіксіз жинау	Жоғары құны, техникалық қызмет көрсету қажеттілігі	Орташа, инвестицияны қажет етеді
Гамма-спектрометриясы NaI(Tl)	662 кэВ кезінде ~7-8% ажыратымдылығы бар сцинтилляциялық детекторлар	Қол жетімділік, жылдам талдау	Төмен ажыратымдылық, ықтимал кедергілер	Жоғары, жиі қолданылады
Гамма-спектрометриясы HPGe	Жоғары ажыратымдылықтағы жартылай өткізгіш детекторлар (~1-2 кэВ)	Жоғары дәлдік, шыңдарды бөлектеу	Құны, салқындату қажеттілігі	Шектеулі, мамандандырылған зертханаларды қажет етеді
Радиохимиялық талдау	Сынамалардан ${}^7\text{Be}$ химиялық оқшаулау	Жоғары сезімталдық, дәлдік	Талдаудың күрделілігі, ұзақтығы	Төмен, сирек қолданылады
Тасымалдау модельдері (HYSPLIT, FLEXPART)	Аэрозоль және ${}^7\text{Be}$ траекторияларын сандық модельдеу	Көлікті талдау, болжау	Метеодеректер мен есептеу ресурстарын қажет етеді	Мамандардың қатысуымен жоғары

Аэрозольдер мен ${}^7\text{Be}$ тасымалдау модельдерін қолдану

${}^7\text{Be}$ және PM2.5 динамикасын және көздерін талдау үшін көптеген елдерде атмосфералық тасымалдаудың сандық модельдері қолданылады, мысалы, HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) және FLEXPART. Бұл модельдер ауа

массаларының траекторияларын қалпына келтіруге, әртүрлі аймақтардың аэрозоль концентрацияларына қосқан үлесін бағалауға және ластану эпизодтарын болжауға мүмкіндік береді. ^7Be өлшеулерімен біріктірілген модельдерді пайдалану аэрозольдердің көздері мен тасымалдау жолдарын анықтау дәлдігін арттырады, бұл әсіресе Орталық Азия сияқты трансшекаралық ластануға ұшыраған аймақтар үшін маңызды.

Статистикалық өңдеу және деректерді талдау

Нәтижелерді өңдеу мыналарды қамтиды: ^7Be , PM2.5 концентрациялары мен метеорологиялық параметрлер (температура, ылғалдылық, жел жылдамдығы) арасындағы корреляциялық талдау; маусымдық және жылдық трендтік талдау – заңдылықтарды анықтау үшін; ластану көздерін бөлу үшін факторлық талдау және кластерлеу әдістерін қолдану; нәтижелерді халықаралық ауа сапасы стандарттарымен (ДДҰ (ВОЗ), ЕЕА) салыстыру.

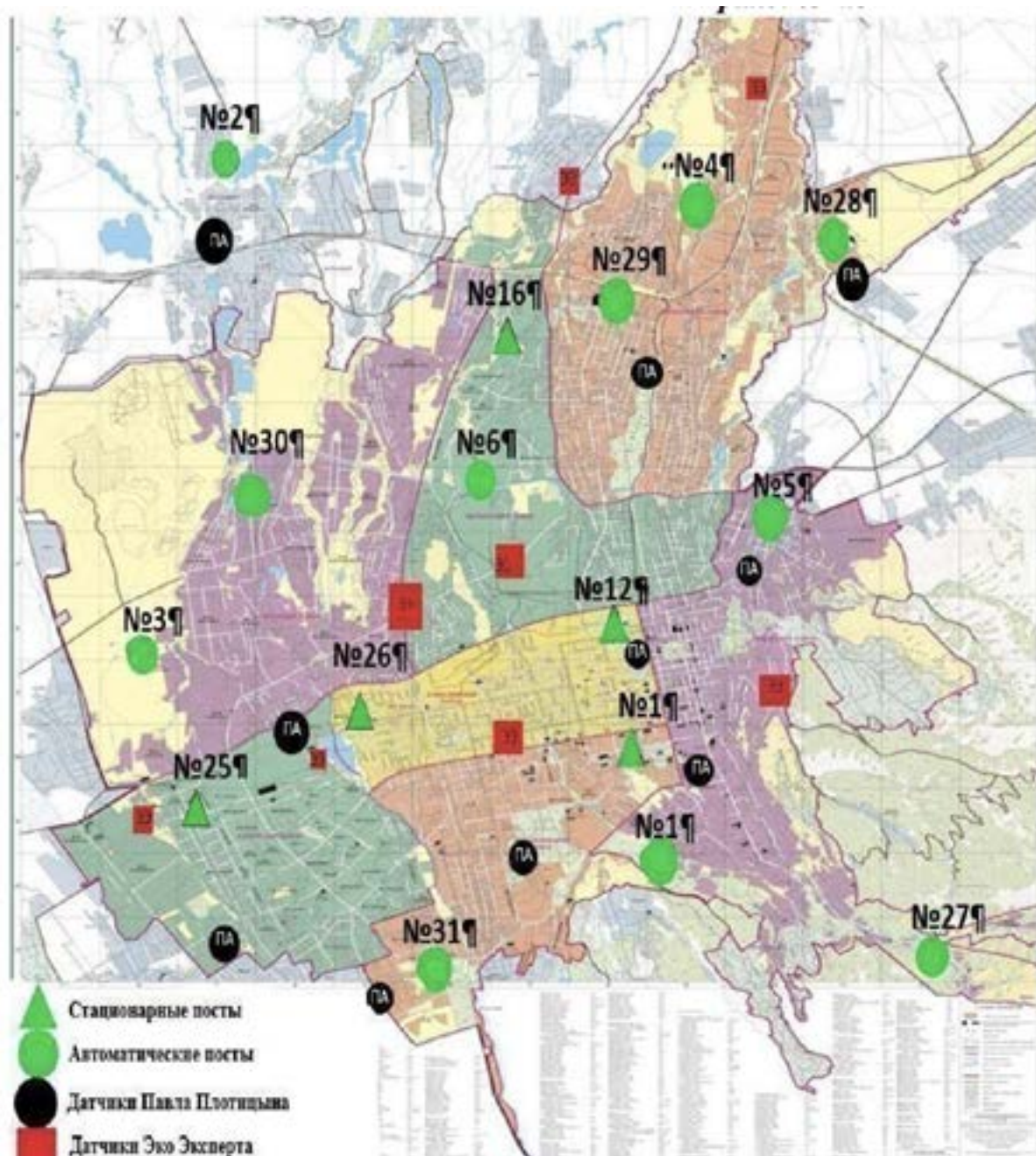
Қазіргі әдістердің жаңалығы мен дәлдігі

Аэрозольдердегі ^7Be -ні іріктеу және талдаудың қазіргі әдістері жоғары дәлдік пен сезімталдықпен ерекшеленеді, бұл детекторларды (HPGe) және атмосфералық үдерістерді модельдеуді қолдану арқылы жүзеге асады. Сынамаларды іріктеудің автоматтандырылуы және спектрлердің цифрлық өңделуі нақты уақыт режимінде деректер алуға мүмкіндік береді, бұл мониторинг пен болжау мүмкіндіктерін едәуір кеңейтеді. Атап айтқанда, Қазақстанда келесі біріктірілген әдістерді енгізу перспективалы болып табылады: қолжетімді фильтрациялық қондырғыларды пайдалану және кейіннен NaI(Tl) гамма-спектрометрлерінде талдау жүргізу, сондай-ақ HPGe-детекторларымен зертханаларды біртіндеп дамыту. HYSPLIT модельдерімен бірлесіп қолдану PM2.5 және ^7Be көздері мен тасымалын бағалау сапасын арттыруға мүмкіндік береді. Осылайша, PM2.5 құрамындағы ^7Be -ні зерттеуге арналған әдістемелік құралдар сынама алудың тексерілген және заманауи технологияларын, жоғары дәлдіктегі гамма-спектрометриялық талдауды және сандық модельдеуді қамтиды, бұл ^7Be -нің атмосфералық белсенділігін және оның экологиялық салдарын кешенді зерттеуге мүмкіндік береді.

Нәтижелер және пікірталас

Әр түрлі аймақтардағы PM2.5 құрамындағы ^7Be мазмұнының кеңістіктік және уақыттық тенденциялары PM2.5 аэрозольдеріндегі бериллий-7 (^7Be) концентрацияларын талдау айтарлықтай аймақтық және маусымдық өзгерістер бар екенін көрсетеді. Бұл өзгерістер жаһандық атмосфералық үдерістермен де, жергілікті ластану көздерімен де байланысты. Солтүстік Америкада, Еуропада және Азияда жүргізілген бірқатар зерттеулерде атмосфералық аэрозольдердегі ^7Be концентрациясы орта есеппен 3-тен 7 мБк/м³ аралығында өзгередіні анықталған. Мысалы, Детройт (АҚШ) және Уэльва (Испания) қалалары бойынша деректер шамамен 4,8-4,9 мБк/м³ деңгейінде, бұл Португалия мен Үндістандағы нәтижелермен салыстырылады, онда концентрациялар 4,0-6,9 мБк/м³ аралығында. Орталық Азияда, соның ішінде Қазақстанда, PM2.5 құрамындағы ^7Be тікелей өлшемдері әлі жеткіліксіз. Мысал ретінде Алматы қаласының атмосфералық ауасының ластануын бақылаудың стационарлық желісінің орналасу схемасы 3-суретте анық көрсетілген. Алайда PM2.5 концентрациясы бойынша мәліметтер ластанудың

жоғары деңгейін көрсетеді – Қазақстандағы $PM_{2.5}$ -тің жылдық орташа концентрациясы шамамен $22,2 \text{ мкг/м}^3$, бұл ДДҰ (ВОЗ) ұсынған нормадан 4 есе артық. Бұл $PM_{2.5}$ аэрозольдеріндегі ^{70}Se мазмұнының маусымдық және метеорологиялық жағдайларға, сондай-ақ трансшекаралық тасымал мен жергілікті шаң мен ластаушы көздердің әсеріне байланысты едәуір өзгеруі мүмкін екенін көрсетеді [21][22].



Сурет 3. Алматы қаласының атмосфералық ауасының ластануын бақылаудың стационарлық желісінің орналасу схемасы

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [21]

^7Be концентрациясының маусымдық трендтері және ауа циркуляциясымен байланысы

PM2.5 аэрозольдеріндегі ^7Be концентрациясының маусымдық динамикасы көктем мен жаз мезгілдерінде айқын максимумдармен сипатталады, бұл әртүрлі аймақтардағы мәліметтермен расталады. Мысалы, Севастопольде ^7Be концентрациясының маусымдық орташа мәні атмосфералық жауын-шашын мен аэрозольдерде көктем-жаз мезгілінде ең жоғары деңгейге жетсе, күз-қыс мезгілінде минимумға дейін төмендейді. Осындай маусымдық заңдылықтар Еуропада да байқалады, мұнда көктемгі шыңдар стратосфералық ауаның тропосфераға қарай күшейтілген тасымалымен және тік ауысу үдерісінің артуымен байланысты. Бұл деректер ^7Be концентрацияларының маусымдық ауытқулары ауа массаларының циркуляциясы мен метеорологиялық жағдайлармен тығыз байланысты деген гипотезаны растайды. Атап айтқанда, көктем мен жаз мезгілінде тік ауа алмасуының қарқындылығы ^7Be -нің атмосфераның жоғарғы қабаттарынан жер бетіне түсуіне ықпал етеді, бұл оның концентрациясының жоғарылауына алып келеді. Сонымен қатар, суық кезеңдегі жауын-шашын мен дымқыл тұнба аэрозольдердің шаюына себеп болып, ^7Be деңгейін төмендетеді. Осыған орай, ^7Be -ні бақылау ауа массаларының динамикасы мен тропосфера мен стратосфера арасындағы алмасу үдерістерінің индикаторы ретінде қолданылуы мүмкін, сондай-ақ PM2.5 ластануының маусымдық ерекшеліктерін анықтауға мүмкіндік береді.

PM2.5 көздерін анықтауға арналған ^7Be қолданылуы

^7Be өзінің ғарыштық (космогенді) табиғатына және антропогендік көздерінің болмауына байланысты PM2.5 аэрозольдерінің шығу тегі мен тасымалдану жолдарын бағалауға арналған табиғи маркер ретінде қызмет ете алады. Техногендік ластағыштардан, мысалы, цезий-137 (^{137}Cs) немесе қорғасын-210 (^{210}Pb) айырмашылығы – олар жергілікті өнеркәсіптік шығарындылар нәтижесінде жиналуы мүмкін, ал ^7Be ауа массаларының жаһандық және аймақтық тасымалдану үдерістерін көрсетеді. ^{137}Cs және ^{210}Pb -пен салыстыру кезінде ^7Be жаңа аэрозольдер үшін индикатор ретінде артықшылыққа ие, себебі оның жартылай ыдырау кезеңі 53,3 күнді құрайды, бұл атмосферада қысқа уақыт сақталатын аэрозольдерді бақылауға мүмкіндік береді. Ал ^{210}Pb жартылай ыдырау уақыты шамамен 22 жыл болғандықтан, ол ластағыштардың ұзақ мерзімді жиналуын және жергілікті шығарындыларды бағалауға жақсырақ жарайды. Осыған байланысты ^7Be трансшекаралық PM2.5 тасымалын анықтауға, сондай-ақ аэрозольдердің конденсация және коагуляция сияқты екінші реттік түзілу үдерістерін бағалауға арналған тиімді құрал бола алады. Бұл, әсіресе, өнеркәсіп қарқынды дамып жатқан және күрделі географиясы бар Қазақстан аймағы үшін маңызды. Яғни уақытылы көрсеткіштердің алынуы да маңызды, 4-суретте ҚР ауданында атмосфералық ауаның өзгерісін бақылайтын елді мекендердің орналасу орындары көрсетілген.



Сурет 4. Қазақстан Республикасының аумағында атмосфералық ауаның жай-күйін бақылайтын елді мекендердің орналасу схемасы

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [22]

Анықталған заңдылықтардың денсаулық пен қоршаған ортаға төнетін қауіптерді бағалауға әсері

PM_{2.5} құрамындағы ⁷Be-нің кеңістіктік-уақыттық үрдістерін түсіну экологиялық және санитарлық қауіптерді бағалау үшін тікелей маңызға ие. Себебі PM_{2.5} – тыныс алу және жүрек-қантамыр жүйесіне әсер ету тұрғысынан аэрозольдердің ең қауіпті фракцияларының бірі болып табылады. Осы бөлшектердің көздері мен таралу жолдарын білу ластануды азайтуға бағытталған неғұрлым тиімді шараларды әзірлеуге мүмкіндік береді. Қазақстан мен көршілес өңірлер бойынша деректер PM_{2.5} концентрацияларының жиі нормадан асып түсетінін көрсетеді, бұл экстремалды ластану жағдайларымен расталады. ⁷Be-ні индикатор ретінде пайдалану аймақтық және трансшекаралық көздердің үлесін нақтылауға мүмкіндік береді, бұл ауа сапасын жақсарту мен халықтың денсаулығын қорғауға бағытталған ұлттық бағдарламаларды әзірлеу үшін маңызды.

Халықаралық зерттеулермен салыстыру және жаһандық пен аймақтық ерекшеліктерді анықтау

Әлемнің әртүрлі өңірлерінен алынған деректерді салыстыру ⁷Be-нің PM_{2.5} құрамындағы концентрациялары мен олардың маусымдық ауытқуларының ұқсас сипатқа ие екенін, бірақ сонымен қатар әр өңірдің климаттық және антропогендік ерекшеліктерін бейнелейтінін көрсетеді. Еуропа мен Солтүстік Америкада, мұнда мониторинг желісі жақсы дамыған, ⁷Be-нің маусымдық шыңдары көктемгі тасымалдармен және жазғы тік ауысумен байланысты, ал минимумдар – күзгі-қысқы жауын-шашынмен байланысты.

Орталық Азияда, климаты анағұрлым континенталды және құрғақ болып келетін, шаңды дауылдар мен трансшекаралық тасымалдың әсері айқын байқалатын өңірде, ^7Be бойынша деректер әзірге шектеулі, бұл мониторингті кеңейтуді қажет етеді. Бұл өңірде ^7Be шаңды аэрозольдер мен антропогендік шығарындылардың әсерін бағалауға арналған аса сезімтал маркер бола алады деген болжам жасауға мүмкіндік береді. Жалпы салыстырмалы ақпарат 2-кестеде, факторлармен қарастырылған.

Кесте 2. PM2.5-Тегі ^7Be концентрациясын және әлемнің әртүрлі аймақтарындағы маусымдық трендтерді салыстыру

Аймақ	PM2.5-те ^7Be концентрациясы (мБк/м ³)	Маусымдық шыңдар	Әсер етудің негізгі факторлары
Детройт, США	4,8	Көктем, жаз	Тік алмасу, күн белсенділігі
Уэльва, Испания	4,9	Көктем, жаз	Ауа массаларын тасымалдау, жауын-шашын
Малага, Испания	4,2	Көктем, жаз	Климаттық ерекшеліктері, жауын-шашын
Мангалор, Индия	6,9	Көктем, жаз	Муссондық процестер, жергілікті көздер
Қазақстан	Деректер жоқ, PM2.5 - 22,2 мкг/м ³	Болжам бойынша көктем	Трансшекаралық тасымалдау, шаңды дауылдар

Шолудың деректері ^7Be элементі PM2.5 аэрозольдерінің динамикасын, олардың көздері мен таралу жолдарын зерттеу үшін тиімді табиғи индикатор болып табылатынын растайды. ^7Be концентрацияларының маусымдық шарықтау кезеңдері көктем мен жаз мезгілдеріндегі тік алмасудың күшеюімен және ауа массаларының циркуляциясымен байланысты, ал минимумдар – күзгі-қысқы жауын-шашын мен аэрозольдердің жуылып кетуімен байланысты. Сәйкесінше, ^7Be трансшекаралық тасымалдың және аэрозольдердің екінші реттік түзілу процестерінің үлесін бағалауға арналған сенімді маркер ретінде қолданылуы мүмкін, бұл ауа сапасы жоғары деңгейде ластанған өңірлер үшін, мысалы, Орталық Азия үшін аса өзекті. ^7Be бойынша алынған деректерді басқа радионуклидтік және химиялық индикаторлармен, сондай-ақ атмосфералық тасымалдау модельдерімен біріктіру экологиялық қауіптерді бағалау дәлдігін арттырып, ластануды азайту мен халықтың денсаулығын қорғауға бағытталған тиімдірек шараларды әзірлеуге мүмкіндік береді.

Қорытынды

Осы шолу мақаласында ^7Be изотопын PM2.5 аэрозоль бөлшектерінде бақылау атмосфералық тасымалдау, ластану көздері және маусымдық динамика туралы маңызды

мәліметтер беретінін көрсетеді. Бұл мәліметтер әсіресе Қазақстан мен Орталық Азия үшін аса өзекті. Аймақтағы тұрақты жоғары РМ2.5 деңгейі – жергілікті шығарындылармен қатар шекара аралық шаң тасымалының әсерінен туындайтын – өңірлік ерекшеліктерге бейімделген заманауи мониторинг әдістерінің қажеттілігін көрсетеді. ⁷Be изотопын метеорологиялық деректермен және модельдеумен бірге пайдалану аэрозольдердің таралу жолдарын қадағалау және алыс қашықтықтағы тасымал әсерін бағалау үшін жаһандық деңгейде тиімді әдіс ретінде танылған, алайда мұндай зерттеулер Қазақстанда әлі де сирек кездеседі. Аталған жетіспеушіліктердің орнын толтыру үшін ⁷Be бақылау желілерін кеңейту, үнемді үлгілеу және гамма-спектрометриялық әдістерді енгізу, сондай-ақ радионуклидтік деректерді химиялық маркерлермен және спутниктік бақылаулармен біріктіру қажет. Бұл қадамдар ластану көздерін дәл анықтауға және қауіп-қатерлерді бағалауға мүмкіндік береді, нәтижесінде ауа сапасын басқарудың ғылыми негізделген тәсілдері қамтамасыз етіледі. Соңында, ⁷Be изотопын Қазақстанда трассер ретінде жүйелі пайдалану РМ2.5 ластануының табиғатын терең түсінуге, өңірлік саясатты қалыптастыруға және қоғамдық денсаулық пен қоршаған ортаны қорғауға бағытталған нақты стратегияларды әзірлеуге елеулі үлес қоса алады.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Жұмыс 2024 жылғы 9 қыркүйектегі № 189/ГФ24-26 келісім бойынша Ғылым және жоғары білім министрлігінің АР23488651, ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру жобасының қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды, сондай-ақ Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары білім министрлігінің бағдарламалық-мақсаттық қаржыландыру шеңберінде жүзеге асырылды (BR27101493, 05.02.2025 ж. No 29/ПЦФ-25-26).

Авторлардың қосқан үлестері

Мухаметжанова А.О., Жумадилов К.Ш., Баграмова А.А. – зерттеу, әдістеме, түпнұсқалық жазу, бақылау, ресурстар, шолу;

Байгазинов Ж.А., Насилов Ж.О., Касымжанов М.Т., Иванников А.И., Степаненко В.Ф., Хоши М. – концептуализация, визуализация, редакциялау және қаржыландыру.

Әдебиеттер тізімі

1. Новые глобальные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха направлены на спасение миллионов жизней от загрязнения воздуха, Всемирная организация здравоохранения, қол жетімді адресі: <https://www.who.int/europe/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>

2. Central Asian countries join forces to combat air pollution – the first high-level political dialogue has started, қол жетімді адресі: <https://www.newscentralasia.net/2024/06/20/central-asian-countries-join-forces-to-combat-air-pollution-the-first-high-level-political-dialogue-has-started/>

3. Дымова О.А., Демышев С.Г. Вычислительный комплекс для моделирования состояния Черного моря, Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию

и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2018, с. 472–475 (2018), қол жетімді адресі: <https://vak.minobrnauki.gov.ru/advert/100041124>

4. Кременчуцкий Д.А. *Временная изменчивость отношения концентраций бериллия-7 в дождевых осадках и в атмосфере в Севастопольском регионе*, Морской гидрофизический журнал, Т. 40, № 2 (236), 271–283 б.(2024), қол жетімді адресі: <https://mgrfz.pf/static/assets/files/2024/02/20240207.pdf>

5. C. Papastefanou, *Beryllium-7 aerosols in ambient air*, Aerosol and Air Quality Research 9(2), 187–197 б. (2009). DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2008.09.0047>

6. Ученые ЮФУ исследовали механизмы образования радиоизотопа бериллия-7 в атмосфере, Южный федеральный университет, пресс-служба ЮФУ, қол жетімді адресі: <https://sfedu.ru/press-center/news/52305>

7. *Что такое взвешенные частицы PM 2.5 и действительно ли они опасны?*, қол жетімді адресі: https://kaz.breeeth.com/blog/ochistitelivozdukha/chto_takoe_chasticy_pm_25/

8. Feely H.W., Larsen R.J., Sanderson C.G. *Factors that cause seasonal variations in beryllium-7 concentrations in surface air*, Journal of Environmental Radioactivity 9(3), 223-249 б. (1989). DOI: [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(89\)90046-5](https://doi.org/10.1016/0265-931X(89)90046-5)

9. M.A. Hernández-Ceballos, et al., *Latitudinal variability of atmospheric ^7Be* , Tellus B, 68:29534 (2016). DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusb.v68.29534>

10. *CALIOP-Based Quantification of Central Asian Dust Transport*, қол жетімді адресі: <https://atmos.lzu.edu.cn/upload/1/cms/content/editor/1728612784824.pdf>

11. Alegría N. et al., *Meteorological factors controlling ^7Be activity concentrations in the atmospheric surface layer in Northern Spain*, Atmosphere 11(12), 1340 б. (2020). DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11121340>

12. H. Liu, et al., *Using ^7Be to assess cross-tropopause transport*, Atmos. Chem. Phys. 16, 4641–4659 б. (2016). DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-16-4641-2016>

13. S. Kikuchi, et al., *Size distribution of aerosols attached by ^7Be* , қол жетімді адресі: <https://indico.nucleares.unam.mx/event/4/session/82/contribution/559/material/slides/0.pdf>

14. *AirPhoton Automated Filter Sampling Station*, қол жетімді адресі: https://www.grasp-earth.com/wp-content/uploads/2023/11/airphoton_aeroexplorer_fact_sheet.pdf

15. *Envicontrol Automatic Sampling System*, қол жетімді адресі: <https://envicontrol.com/news/general/automatic-sampling-system-for-fine-particulate-matter>

16. *Guidelines for Manual Sampling & Analyses*, қол жетімді адресі: <https://mpcb.mizoram.gov.in/uploads/attachments/94d36b3ae1c0495183c24201c430d578/guidelines-for-the-measurement-of-ambient-air-pollutants-vol-i-manual-sampling-analyses.pdf>

17. *Washington State Department of Ecology, PM2.5 & PM10 2025 Sequential Sampler SOP*, қол жетімді адресі: <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1802020.pdf>

18. S. Sorn, et al., *Comparison of PM2.5 Mass Concentration from Two Filter Types*, қол жетімді адресі: https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/291513/1/2024_ET2-08.pdf

19. *INDAAF Aerosol Sampling Protocol*, қол жетімді адресі: <https://indaaf.obs-mip.fr/measurements/aerosol-2/>

20. Y. Wang, et al., *Effect of aerosol sampling conditions on PM2.5 accuracy*, J. Aerosol Sci., (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2022.106012>

21. Бюллетень состояния загрязнения окружающей среды: Алматы и Алматинская область, март 2025, Казгидромет, қол жетімді адресі: https://www.kazhydromet.kz/uploads/files_calendar/7873/file/67ffaa603b116almaty-i-almatinskaya-oblast-rus-2025-mart-1.pdf

22. Аналитический отчет по мониторингу качества воздуха в Казахстане, Кыргызстане, Узбекистане и Таджикистане, қол жетімді адресі: <https://ecounion.kz/wpcontent/uploads/2021/09/обн.Аналитика-мониторинга-воздуха-по-4-странам-Казахстан-Кыргызстан-Узбекистан-Таджикистан.pdf>

А.О. Мухаметжанова¹, К.Ш. Жумадилов^{*1}, А.А. Баграмова¹, Ж.А. Байгазинов², Ж.О. Насилов¹, М.Т. Касымжанов¹, А.И. Иванников³, В.Ф. Степаненко³, М. Хоши⁴

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,

Международная кафедра ядерной физики, новых материалов и технологий, Астана, Казахстан

²АО "Парк ядерных технологий" Республика Казахстан, Область Абай, г. Курчатова, ул. Курчатова, 18/1;

³Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «НМЗО» министерства здравоохранения Российской Федерации МРНЦ им. А. Ф. Цыба, г. Обнинск;

⁴Университет Хиросима, Хиросима, Япония

(E-mail: zhumadilovk@gmail.com)

Атмосферная активность бериллия-7 (⁷Be) в аэрозолях PM2.5: применение, тенденции и экологические перспективы

Аннотация. В статье представлен подробный анализ последних исследований атмосферной активности космогенного радионуклида бериллия-7 (⁷Be) в аэрозольных частицах PM2.5. Образующийся в высоких слоях атмосферы в результате взаимодействия космических лучей ⁷Be является чувствительным и уникальным трассером, который может быть использован для отслеживания переноса и трансформации аэрозолей и связанных с ними загрязняющих веществ, а также для изучения механизмов обмена между тропосферой и стратосферой. В обзоре рассматриваются физические и химические свойства ⁷Be, описываются сложные аналитические методы его обнаружения, включая гамма-спектрометрию, и рассматриваются его сезонные и региональные колебания в связи с погодными условиями и основными источниками PM2.5. В обзоре подчеркивается научная и практическая важность использования ⁷Be для оценки качества воздуха, управления рисками и разработки скоординированных международных стратегий мониторинга атмосферы и снижения загрязнения. Особое внимание уделено использованию ⁷Be в качестве инструмента для количественного определения трансграничного переноса аэрозолей и оценки последствий загрязнения мелкодисперсными частицами для окружающей среды и здоровья населения. В статье также обсуждается интеграция данных ⁷Be в сети атмосферного мониторинга и системы моделирования, подчеркиваются как последние достижения, так и текущие проблемы.

Ключевые слова: бериллий-7 (⁷Be); аэрозоли; PM2.5; атмосферный мониторинг; экологическая оценка; радиоизотопные индикаторы; тенденции загрязнения.

A.O. Mukhametzhanova¹, K.Sh. Zhumadilov^{*1}, A.A. Bagramova¹, Zh.A. Baigazinov²,
Zh.O. Nasilov¹, M.T. Kasymzhanov¹, A.I. Ivannikov³, V.F. Stepanenko³, M. Hoshi⁴

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University,

International department of nuclear physics, new materials and technologies, Astana, Kazakhstan

²JSC "Nuclear Technology Park"

Republic of Kazakhstan, Abai region, Kurchatov,

³Branch of the Federal State Budgetary Institution "NMZO " of the Ministry of Health of the Russian Federation A.F. Tsyba MRSC, Obninsk;

⁴Hiroshima University, Hiroshima, Japan

(E-mail: zhumadilovk@gmail.com)

Atmospheric Activity of Beryllium-7 (^7Be) in PM2.5 Aerosols: Applications, Trends, and Environmental Perspectives

Abstract. A thorough analysis of recent studies on the atmospheric activity of the cosmogenic radionuclide beryllium-7 (^7Be) in PM2.5 aerosol particles is given in this article. Produced in the high atmosphere by cosmic ray interactions, ^7Be is a sensitive and unique tracer that may be used to track the transport and transformation of aerosols and related contaminants, as well as to study exchange mechanisms between the troposphere and stratosphere. The review discusses the physical and chemical properties of ^7Be , describes sophisticated analytical techniques for its detection, including gamma spectrometry, and looks at its seasonal and regional fluctuation in connection to weather patterns and PM2.5 main sources. This review highlights the scientific and practical importance of using ^7Be in air quality assessment, risk management, and the development of coordinated international strategies for atmospheric monitoring and pollution mitigation. Specific attention is given to the use of ^7Be as a tool for quantifying transboundary aerosol transport and for assessing the environmental and public health implications of fine particulate pollution. The article also discusses the integration of ^7Be data into atmospheric monitoring networks and modeling frameworks, highlighting both recent advancements and ongoing challenges.

Keywords: beryllium-7 (^7Be), aerosols, PM2.5, atmospheric monitoring, environmental assessment, radioisotopic indicators, pollution trends.

References

1. Vsemirnaya organizaciya zdavoohraneniya. Novye global'nye rekomendacii VOZ po kachestvu vozduha napravleny na spasenie millionov zhiznej ot zagrjazneniya vozduha [New WHO global air quality guidelines aim to save millions of lives from air pollution], Vsemirnaya organizatsiya zdavoohraneniya [World Health Organization], available at: <https://www.who.int/europe/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution> [In Russian]
2. Central Asian countries join forces to combat air pollution – the first high-level political dialogue has started, available at: <https://www.newscentralasia.net/2024/06/20/central-asian-countries-join-forces-to-combat-air-pollution-the-first-high-level-political-dialogue-has-started/>
3. O.A. Dymova, S.G. Demyshev, Vychislitel'nyj kompleks dlya modelirovaniya sostojaniya Chernogo morja [Computational system for modeling the state of the Black Sea], Mezhdunarodnaja konferenciya

i shkola molodyh uchenykh po izmerenijam, modelirovaniyu i informacionnym sistemam dlja izuchenija okruzhajushhej sredy[International Conference and School for Young Scientists on Measurement, Modeling and Information Systems for Environmental Studies]: ENVIROMIS-2018, pp. 472–475 (2018), available at: <https://vak.minobrnauki.gov.ru/advert/100041124> [In Russian]

4. D.A. Kremenchuckij, *Vremennaja izmenchivost' otnoshenija koncentracij berillija-7 v dozhdevykh osadkah i v atmosfere v Sevastopol'skom regione*[Temporal variability of beryllium-7 concentration ratios in precipitation and in the atmosphere in the Sevastopol region], *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*[Marine Hydrophysical Journal] № 40(2), pp. 271–283 (2024), available at: <https://mrфж.рф/static/assets/files/2024/02/20240207.pdf> [In Russian]

5. C. Papastefanou, *Beryllium-7 aerosols in ambient air*, *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 9, No. 2, s. 187–197 (2009), <https://doi.org/10.4209/aaqr.2008.09.0047>

6. *Uchenye JuFU issledovali mehanizmy obrazovaniya radioizotopa berillija-7 v atmosfere* [Scientists of SFedU studied the mechanisms of formation of the beryllium-7 radioisotope in the atmosphere], *Yuzhnyy federal'nyy universitet, press-sluzhba JuFU* [Southern Federal University, SFedU Press Service], available at: <https://sfedu.ru/press-center/news/52305> [In Russian]

7. *Chto takoe vzveshennyye chasticy PM 2.5 i dejstvitel'no li oni opasny?* [What are PM2.5 suspended particles and are they really dangerous?], available at: https://kaz.breeeth.com/blog/ochistitelivozdukha/chto_takoe_chasticy_pm_25/ [In Russian]

8. Feely H.W., Larsen R.J., Sanderson C.G. *Factors that cause seasonal variations in beryllium-7 concentrations in surface air*, *Journal of Environmental Radioactivity* 9(3), pp. 223–249 (1989). DOI: [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(89\)90046-5](https://doi.org/10.1016/0265-931X(89)90046-5)

9. M.A. Hernández-Ceballos, et al., *Latitudinal variability of atmospheric ⁷Be*, *Tellus B*, 68:29534 (2016). DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusb.v68.29534>

10. *CALIOP-Based Quantification of Central Asian Dust Transport*, available at: <https://atmos.lzu.edu.cn/upload/1/cms/content/editor/1728612784824.pdf>

11. Alegría N. et al., *Meteorological factors controlling ⁷Be activity concentrations in the atmospheric surface layer in Northern Spain*, *Atmosphere* 11(12), pp.1340 (2020). DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11121340>

12. H. Liu, et al., *Using ⁷Be to assess cross-tropopause transport*, *Atmos. Chem. Phys.* 16, pp. 4641–4659 (2016). DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-16-4641-2016>

13. S. Kikuchi, et al., *Size distribution of aerosols attached by ⁷Be*, available at: <https://indico.nucleares.unam.mx/event/4/session/82/contribution/559/material/slides/0.pdf>

14. *AirPhoton Automated Filter Sampling Station*, available at: https://www.grasp-earth.com/wp-content/uploads/2023/11/airphoton_aeroexplorer_fact_sheet.pdf

15. *Envicontrol Automatic Sampling System*, available at: <https://envicontrol.com/news/general/automatic-sampling-system-for-fine-particulate-matter>

16. *Guidelines for Manual Sampling & Analyses*, available at: <https://mpcb.mizoram.gov.in/uploads/attachments/94d36b3ae1c0495183c24201c430d578/guidelines-for-the-measurement-of-ambient-air-pollutants-vol-i-manual-sampling-analyses.pdf>

17. *Washington State Department of Ecology, PM2.5 & PM10 2025 Sequential Sampler SOP*, available at: <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1802020.pdf>

18. S. Sorn, et al., *Comparison of PM2.5 Mass Concentration from Two Filter Types*, available at: https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/291513/1/2024_ET2-08.pdf

19. *INDAAF Aerosol Sampling Protocol*, available at: <https://indaaf.obs-mip.fr/measurements/aerosol-2/>

20. Y. Wang, et al., *Effect of aerosol sampling conditions on PM_{2.5} accuracy*, J. Aerosol Sci., (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2022.106012>

21. *Byulleten sostoyaniya zagryazneniya okruzhayushchey sredy: Almaty i Almatinskaya oblast, mart 2025* [Environmental Pollution Status Bulletin: Almaty and Almaty Region, March 2025], Kazgidromet[Kazhydromet], available at: https://www.kazhydromet.kz/uploads/files_calendar/7873/file/67ffaa603b116almaty-i-almatinskaya-oblast-rus-2025-mart-1.pdf [In Russian]

22. *Analiticheskiy otchet po monitoringu kachestva vozdukha v Kazakhstane, Kyrgyzstane, Uzbekistane i Tadzhikistane* [Analytical report on air quality monitoring in Kazakhstan, Kyrgyzstan, Uzbekistan, and Tajikistan], available at: <https://ecounion.kz/wpcontent/uploads/2021/09/обн.Аналитика-мониторинга-воздуха-по-4-странам-Казахстан-Кыргызстан-Узбекистан-Таджикистан.pdf> [In Russian]

Авторлар туралы мәліметтер:

Мұхаметжанова А.О. – ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар халықаралық кафедрасының магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш.13, 010000, Астана, Қазақстан

Жұмаділов Қ.Ш. – хат-хабар авторы, PhD, профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш.13, 010000, Астана, Қазақстан

Баграмова А.А. – ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының халықаралық кафедрасының оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш.13, 010000, Астана, Қазақстан

Байғазинов Ж.А. – PhD. «Ядролық технологиялар паркі» АҚ басқарма төрағасы, Курчатов көшесі 18/1, Курчатов қ., Абай облысы, Қазақстан

Насилов Ж.О. – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің докторанты, Қажымұқан көш.13, 010000, Астана, Қазақстан

Қасымжанов М.Т. – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің докторанты, Қажымұқан көш.13, 010000, Астана, Қазақстан

Иванников А.И. – биология ғылымдарының докторы, профессор, медициналық-экологиялық дозиметрия және радиациялық қауіпсіздік зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, А.Ф.Гумилев атындағы Цыба медициналық ғылыми-зерттеу орталығы – РФ Денсаулық сақтау министрлігінің «Ұлттық медициналық радиология ғылыми орталығы» Федералдық мемлекеттік бюджеттік мекемесінің филиалы, Ресей

Степаненко В.Ф. – биология ғылымдарының докторы, профессор, А.Ф.Цыба МРРК медициналық-экологиялық дозиметрия және радиациялық қауіпсіздік зертханасының меңгерушісі – РФ Денсаулық сақтау министрлігінің «Ұлттық радиология ғылыми-зерттеу орталығы» Федералдық мемлекеттік бюджеттік мекемесінің филиалы, Ресей

Хоши М. – Хиросима университетінің құрметті профессоры, Хиросима, Жапония.

Мухаметжанова А.О. – магистрант, международная кафедра ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Жумадилов К.Ш. – автор для корреспонденции, PhD, профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Баграмова А.А. – преподаватель международной кафедры «Ядерная физика, новые материалы и технологии», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Байгазинов Ж.А. – Ph.D. Председатель правления АО «Парк ядерных технологий», ул. Курчатова, 18/1, г. Курчатов, Область Абай, Казахстан.

Насилов Ж.О. – PhD докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Касымжанов М.Т. – PhD докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Иванников А.И. – доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории медико-экологической дозиметрии и радиационной безопасности МРНЦ имени А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Россия.

Степаненко В.Ф. – доктор биологических наук, профессор, заведующий лаборатории медико-экологической дозиметрии и радиационной безопасности МРНЦ имени А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Россия.

Хоши М. – почетный профессор Университета Хиросимы, Хиросима, Япония.

Mukhametzhanova A.O. – master's student, International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazymukan 13, 010000, Astana, Kazakhstan

Zhumadilov K.Sh. – corresponding author, PhD, professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazymukan 13, 010000, Astana, Kazakhstan.

Bagramova A.A. – lecturer in the International Department of the Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazymukan 13, 010000, Astana, Kazakhstan

Baygazinov Zh.A. – Ph.D. Chairman of the Board of JSC "Park of Nuclear Technologies", Kurchatov Street 18/1, Kurchatov, Abay Region, Kazakhstan

Nasilov Zh.O. – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazymukan Street, 13, 010000, Astana, Kazakhstan

Kasymzhanov M.T. – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazymukan Street, 13, 010000, Astana, Kazakhstan

Ivannikov A.I. – Doctor of Biological Sciences, Professor, Leading Researcher, Laboratory of Medical and Ecological Dosimetry and Radiation Safety, A.F. Tsyba Medical Research Center - branch of the Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Center of Radiology" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Russia

Stepanenko V.F. – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Medical and Environmental Dosimetry and Radiation Safety of the A.F. Tsyba MRRC - branch of the Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Center of Radiology" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Russia

Hoshi M. – Emeritus Professor, University of Hiroshima, Hiroshima, Japan.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



ХҒТАР 29.19.22

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-136-157>

Ғылыми мақала

Мырыш кешенді қосылыстарының сипаттамасы, синтездеу әдістері және құрылымдық-фазалық қасиеттерін зерттеу

С.А. Пазылбек^{1,2}, А. Карейва¹, Б.Е. Жакипбаев³, Д.К. Ескермесов⁴,
Б.З. Әбдіқадыр⁵, М.Т. Катбаева², У.А. Муратбекова⁵, Ж.К. Алипбекова⁶,
Ж.Т. Төлеуханова^{*4}

¹Вильнюс университеті, Вильнюс, Литва

²Ж.А. Тәшенев атындағы Университет, Шымкент, Қазақстан

³Академик Ә. Қуатбеков атындағы Халықтар достығы университеті, Шымкент, Қазақстан

⁴Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

⁵Ө. Жәнібеков атындағы Оңтүстік Қазақстан педагогикалық университеті, Шымкент, Қазақстан

⁶М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

(E-mail: ztoleukhanova@ektu.kz)

Аңдатпа. Бұл жұмыста аминқышқылдары бар мырыш кешендерін алу-дың: суда синтезделген $\text{Zn}(\text{Gly})_2$, суда және органикалық ортада синтезделген $\text{Zn}(\text{Pro})_2$ әртүрлі әдістері қарастырылды. Алынған қосылыстардың элементтік құрамы SEM-EDX әдісімен анықталып, ол бастапқы материал ретінде ZnCl_2 көмегімен синтезделген қосылыстарда реакциялардың пре-курсорлары бар екенін көрсетті. Рентгендік құрылымдық талдау аз мөл-шерде прекурсорлық қоспалары бар фазалық таза өнімдердің түзілуін көрсетті. ИҚ-Фурье спектроскопиясы қосылыстардың функционалды топтарын анықтауға мүмкіндік беріп, FTIR спектрлері бойынша оттегі мен сутегі арасындағы байланыс мырыш пен оттегі арасындағы коорди-нациялық байланыспен алмастырылатыны анықталды, ал шыңдардың үлкен немесе кіші толқындық сандарға ауысуы мырыш пен азот арасын-дағы координациялық байланыстың түзілуін дәлелдейді. SEM-суреттері әртүрлі әдістермен синтезделген қосылыс бөлшектерінің мөлшері мен пішінін анықтауға мүмкіндік берді. Органикалық ортада синтезделген күрделі мырыш-пролин кешенінің бөлшектері суда синтезделген бөлшек-терден айтарлықтай аз екенін көрсетті. Термогравиметриялық талдау $\text{Zn}(\text{Gly})_2$ қосылысында кристалдану суы бар екенін көрсетті, ал $\text{Zn}(\text{Pro})_2$ қосылысы ылғалданбаған. $\text{Zn}(\text{Gly})_2$ коммерциялық косметикалық өнімге (сарысу) консервант ретінде енгізілді. Мырыш-глицин кешені косметика-лық өнімдерді *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *E. coli* және *Candida albicans*-тен тиімді микробқа қарсы қорғауды, тіпті мырыш-гли-цин кешенінің ең төменгі концентрациясында (0,3%) да қамтамасыз етті.

Жіберілді 27.05.2025. Өзгертілді 31.05.2025. Қабылданды 02.06.2025. Онлайн қол жетімді 25.06.2025.

¹ *хат-хабар авторы

Aspergillus brasiliensis-ке қарсы мырыш-глицин кешені байқалмады, яғни бұл микроорганизмдердің колонияларының азаюы байқалмады немесе жеткіліксіз болды. Құрамында мырыш-глицин кешені бар косметикалық композицияларға фунгицидтік қасиеттері бар теріге пайдалы тағы бір ингредиентті қосу мақсатты консерванттарды пайдаланбайтын косметикалық өнімдерді жасау мүмкіндігін айқындады.

Түйін сөздер: мырыш-глицин, $\text{Zn}(\text{Gly})_2$, $\text{Zn}(\text{Pro})_2$, SEM-EDX, FTIR спектрі

Кіріспе

Косметика өнеркәсібі әлемдегі ең бәсекеге қабілетті салалардың бірі болып табылады және оның толып жатқан нарығы өндірушілерді тұтынушылардың қажеттіліктері мен үміттерін қанағаттандыру үшін үнемі жаңа өнім формулалары мен инновациялық шешімдерді іздеуге мәжбүр етеді. Соңғы уақытта тұтынушылар косметиканың құрамына, белсенді заттарға, ингредиенттерге көбірек қызығушылық танытуда. Тұтынушылар белгілі бір брендті емес, ингредиентті және оның өнімдегі концентрациясын жиі таңдайды [1-4].

Косметикалық өнімнің құрамындағы кейбір ингредиенттердің болуы немесе болмауы косметикалық өнімді сатып алу кезінде тұтынушының шешімін анықтай алады. Осыған феноксизтанол консерванты жақсы мысал бола алады, ол туралы әр түрлі жерлерде көптеген негізсіз теріс және әрдайым дұрыс емес ақпарат бар. Бұл косметика өнеркәсібіндегі ең жақсы теріге төзімді және ең тиімді консерванттардың бірі болып табылады. Феноксизтанол Еуропалық Одақта косметикалық рецепт бойынша қауіпсіз (1% дейін) ингредиент болып саналады және тіпті балаларға арналған өнімдерде қолдануға рұқсат етіледі. Феноксизтанолды әр түрлі сарысулар мен кремдерде ғана емес, сонымен қатар тіс пастасында, нәрестелерге арналған дымқыл майлықтарда қолданып және т.б. [5, 6] көптеген сұраныстар түскені белгілі. Компания тұтынушылардың пікірін тыңдап, оны көптеген өнімдерінен алып тастады. Косметика өнеркәсібінде қолданылатын басқа да негізді / негізсіз зиянды консерванттармен ұқсас жағдай: парабендер, диазолидинилмочевина, имидазолидинилмочевина, 2-бром-2-нитропропан-1,3-диол, хлорфенезин, триклозан. Косметикалық өнімдерді микробиологиялық ластанудан қорғаудың "Достық" баламалары қажет [7-12].

Құрамында мырыш бар қосылыстар көбінесе косметикалық өнімдердің құрамына белсенді немесе көмекші заттар ретінде қосылады. Мырыш қосылыстарының белгілі қасиеттері-олардың микробқа қарсы белсенділігі, май секрециясын тежеу болып табылады. Осы қасиеттерінің арқасында мырыш косметикалық және медициналық өнімдерде безеу, қайызғақ, дерматит, псориаз немесе экзема сияқты тері ауруларын/бұзылуларын емдеу үшін қолданылады [13]. Мырыш оксиді сонымен қатар минералды күннен қорғайтын кремдер мен сәндік косметиканың танымал ингредиенті болады. Косметика өнеркәсібінде әртүрлі мырыш қосылыстарын пайдалану жаңалық болмаса да, теріге пайдалы әртүрлі мырыш қосылыстарын табу әлі де жалғасуда [13]. Олардың

кейбіреулері мырыш пен аминқышқылдарының күрделі қосылыстары болып саналады. Адам терісінің коллагенін құрайтын негізгі амин қышқылы-глицинмен ($\text{Zn}(\text{Gly})_2$) және пролинмен ($\text{Zn}(\text{Pro})_2$) координациялық күрделі мырыш қосылыстары - косметикалық препараттарда өте сирек кездеседі. Мырыш-глицин кешені рецептурада қолдануға жарамды болғанымен, тым қымбат және оны жеткізушілер аз. Сонымен қатар, мырыш-пролин кешені әлі күнге дейін косметикалық формулаларда қолдануға рұқсат етілген ингредиенттер тізіміне енгізілмеген [14]. Бұл қосылыстар мырыш қосылыстарына тән қасиеттерімен ғана емес (микробқа қарсы белсенділік, майды бақылау), сонымен қатар глицин мен пролиннің пайдалы микробқа қарсы қасиеттерімен (тері коллагенін синтездеуге, терінің регенерациясы мен жазылуын ынталандыруға арналған құрылыс және стимуляторлық заттар) пайдалы болуы мүмкін [15]. Бұл кешендер қамтамасыз ете алатын ең маңызды нәрсе – бұл теріге пайдалы қасиеттер ғана емес, сонымен қатар өнімді микробиологиялық ластанудан қорғау – сақтау. Косметикалық өнімнің рецептурасына осы қосылыстардың тиісті концентрациясын таңдау және енгізу арқылы консерванттарды қолданудан аулақ болуға болады, бұл өнімнің өзін пайдалы ғана емес, сонымен қатар талғампаз тұтынушы үшін тартымды етеді.

Зерттеудің мақсаты ретінде мырыш-глицин және мырыш-пролин кешенді қосылыстарын синтездеу, коммерциялық синтез үшін синтездеу әдістерінің қолданылуын бағалау, синтезделген мырыш кешенді қосылыстарының косметикалық формулаларда көпфункционалды ингредиенттер (белсенді компонент және консервант) ретінде қолдануға жарамдылығын зерттеу.

Әдіснама

Металдардың үйлестіру химиясы контекстінде «кешен» немесе «күрделі қосылыс» термині лигандтармен қоршалған орталық металл атомын немесе ионын білдіреді [16-17]. Бұл дегеніміз орталық атом, бұл жағдайда мырыш, лигандтар деп аталатын қарама-қарсы белгінің бірнеше басқа молекулаларымен (аминқышқылдары) координациялық байланыс арқылы байланысады. Орталық атом-электронды акцептор, ал лигандтар-координациялық байланыс құру үшін берілуі мүмкін кем дегенде бір бос электрон жұбы бар электронды донорлар [18] болады. Zn^{2+} иондары үшін бос электронды жұптарды қабылдау қабілетінің арқасында мырыш әртүрлі лигандтармен комплекстер түзе алады. Комплекс түзілу реакциясында Zn^{2+} Льюис қышқылының рөлін атқарады, ал лигандтар Льюис негіздері болып табылады. Орталық металл ионына тікелей қосылған лигандтар кешеннің бастапқы координациялық сферасын құрайды және олардың саны орталық металл атомының координациялық саны деп аталады [17]. Бұл қосылыстарда Zn^{2+} координациялық саны 4 болады [13]. Көбінесе кешендерде катионның айналасында бірнеше амин қышқылы молекулалары болады. Лигандтардың орналасуы симметриялы болуы мүмкін, яғни катион инверсияның ортасында, ал аминқышқылдарының молекулалары бір-бірімен симметриялы байланысқан. Аминқышқылдары өте әмбебап лигандтар болып табылады, өйткені әрбір молекулада лигандтың қосылу атомдары ретінде әрекет ете алатын кем дегенде үш жоғары электрлік теріс атом (карбоксил

тобындағы екі оттегі атомы және амин тобындағы бір азот атомы) болады. Сондықтан әрбір амин қышқылы молекуласы катионмен бірнеше жолмен байланыса алады: монодентат, бидентат немесе тридентат лиганд ретінде [19]. Әдебиеттерде әдетте әрбір амин қышқылы-лиганд орталық атомның координациялық сферасында екі орынды иеленуі мүмкін – мырыш пен азот және мырыш пен оттегі арасында донорлық-акцепторлық байланыс түзетіні атап өтіледі [20]. Екі қосылу нүктесі бар мұндай лигандтар бидентат деп аталады [17]. Алынған күрделі қосылыстың сыртқы сферасы жоқ, өйткені орталық ионның оң заряды ішкі сферадағы лигандтың теріс зарядтарымен өтеледі. Сондықтан барлық күрделі қосылыс электронды бейтарап және ішкі кешен деп аталады [20].

Ішкі кешендердің тұрақтылығы сыртқы сфераның болмауымен де, орталық атомның екі лигандтан тұратын циклдік құрылымда болуымен де анықталады. Байланыстардың беріктігі кешеннің ерітіндіде іс жүзінде диссоциацияланбайтындығын анықтайды. Егер қандай да бір процесс барысында орталық атом мен лигандтар арасындағы байланыс үзілсе, кешен ыдырайды, егер жоқ болса, онда кешен тұрақты болып қалады [19]. Аминқышқылдарының молекулалары кешендердің жалғыз мүмкін лигандтары емес. Егер ерітінділерде басқа аниондар болса (мысалы, галогенидтер), олар қосымша лигандтар ретінде әрекет ете алады [19]. Күрделі қосылысты ерітіндіден кристалдану арқылы оқшаулауға болады. Бұл ерітіндіден қатты зат алу үшін кешен түзілгеннен кейінгі екінші кезең болып табылады [20].

Синтез әдістері. Күрделі қосылыстардың синтезі суда да, органикалық ортада да жүзеге асырылуы мүмкін. Кристалдану кезінде қатты заттар (кристалдар) басқа фазадан, әдетте ерітіндіден немесе балқымадан түзілетін процесс. Бұл процесс еріген заттың немесе алынған қосылыстың еріткіште ерігіштігі қандай да бір жолмен төмендегенде, әдетте салқындату, еріткіш-еріткіш қосу, еріткіштің бір бөлігін буландыру немесе химиялық реакция арқылы заттардың тұнбасы арқылы жүреді [21]. Кристалдану әдісі қажетті нәтижелерге қол жетімді жабдыққа, сондай-ақ таңдалған еріткіштегі ерігіштігі мен тұрақтылығына байланысты таңдалады. Бастапқыда қатты агрегаттық күйдегі прекурсорлар толығымен температура көтерілген кезде еріткіште ериді. Ерімейтін қоспаларды ыстық ерітіндіден сүзуге болады. Әрі қарай, салқындату немесе булану кезінде ерігіштік төмендейді, ерітінді қаныққан болады және өнім кристалданады. Ерігіштік төмендеген сайын кристалдар түзіліп, содан кейін өсетін нүктеге жетеді. Қатты өнімнің максималды мөлшерін алу үшін жүйе тепе-теңдікке жетуі керек. Әрі қарай өнім сүзіліп, кептіріледі. Кристалдардың өлшемдері бойынша таралуын тиісті кристалдану шарттары мен процесс параметрлерін мұқият таңдау арқылы оңтайландыруға және бақылауға болады. Су көбінесе сулы ерітінділерден кристалдардың пайда болуына қатысады. Кристалдану суы-металл кешенінің кристалдық құрылымында немесе металл катионымен тікелей байланыспаған тұзда болатын су молекулалары болып табылады. Кристалдану суын әдетте үлгіні қыздыру арқылы жоюға болады, бірақ қосылыстың кристалдық қасиеттері жиі жоғалады. Үлгідегі кристалдану суының мөлшерін термогравиметриялық талдау әдісімен анықтауға болады [22].

Судағы кешендердің синтезі. Реакция қарапайым шыны ыдыстар мен еріткіштерді қолдана отырып, қарапайым жағдайда жүреді. Аминқышқылдарының металл

кешендері суда еритін тұзынан алынған бос металл иондарының 1:2 қатынасындағы амин қышқылдарымен әрекеттесуі арқылы синтезделді [23-24]. Кешендер мырыштың бастапқы негізі ретінде $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ көмегімен синтезделеді. Авторлардың әдістемесі бойынша реакциялық ерітінді жоғары температурада қыздырылды, содан кейін күрделі қосылыс кристалдарын қалыптастыру үшін баяу буланды. Мырыш оксиді (ZnO) – косметикада кеңінен қолданылатын суда жақсы ерімейтін зат (2 мг/мл (20°C)). Дегенмен, ол күшті қышқылдарда еріп Zn^{2+} иондарын түзеді. Дезодорант құрамының патентінде көрсетілген күрделі мырыш қосылысын алу тәсілі реакция теңдеуі бойынша ерітіндіні жоғары температурада қыздыру арқылы ZnO -ның амин қышқылымен әрекеттесуі болып табылады: $\text{ZnO} + 2(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}) \rightarrow (\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO})_2\text{Zn} + \text{H}_2\text{O}$ (2). Реакцияланбаған ZnO сүзгіден өткізіліп, ерітіндіні кристалдануға қалдырылады [25].

Органикалық ортада мырыш-пролин кешенінің синтезі. Органикалық ортада талданатын аминқышқылдары бар кешендердің синтезі пролин жағдайында ғана мүмкін болады. Синтез барлық аминқышқылдарына қолданылмайды, өйткені олардың органикалық ортада ерігіштігі әртүрлі. Глицин функционалды топтардың полярлығына байланысты органикалық еріткіштерде нашар ериді [26]. $\text{Zn}(\text{Pro})_2$ – суда еритін, бірақ органикалық еріткіштердің көпшілігінде ерімейтін тиімді, тұрақты, арзан, улы емес Льюис қышқылының катализаторы болып табылады [27]. Ол сонымен қатар әртүрлі органикалық реакцияларды катализдей алады [28].

Материалдар мен реагенттер

Тәжірибелерде келесі реагенттер: глицин, $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ (99,0%, Chempur); L-пролин $\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_2$ (99,0%, Eurochemicals); мырыш хлориді ZnCl_2 (Eurochemicals); мырыш оксиді ZnO (Eurochemicals); мырыш ацетаты дигидраты $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (99,5%, Chempur); триэтиламин $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{N}$ (Eurochemicals); метанол CH_3OH (99,9%, Poch S.A.); мырыш глицинат моногидраты $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_4\text{Zn} \cdot \text{H}_2\text{O}$ (>97,0%, Eurochemicals) қолданылды.

№1 синтез, $\text{Zn}(\text{Gly})_2$. 1,2762 г (0,017 моль) глицин және 1,1584 г (0,0085 моль) ZnCl_2 5 мл ионсыздандырылған суда ерітілді. Қоспа 1 сағат бойы қарқынды араластыру арқылы 40°C температурада қыздырылды. Осыдан кейін мөлдір ерітінді тоңазытқышта (2-8°C) бір аптаға қойылды. Бір аптадан кейін пайда болған кристалдар сүзіліп, екі күн бойы 60°C температурада кептіріліп алынды.

№2 синтез, $\text{Zn}(\text{Gly})_2$. 2,5524 г (0,034 моль) глицин және 2,3169 г (0,017 моль) ZnCl_2 5 мл ионсыздандырылған суда ерітіліп, қоспасы қатты араластырылу барысында 60°C температурада 1 сағат бойы қыздырылды. Алынған кристалдар екі күн бойы 60°C температурада сүзіліп, кептіріліп алынды.

№3 синтез, $\text{Zn}(\text{Gly})_2$. 8,2577 г (0,11 моль) глицин ерітіп алынды. 75 мл ионсыздандырылған су мен мөлдір ерітіндіге 4,0690 г (0,05 моль) ZnO қосылды. Қоспаны қатты араластыру арқылы және 88°C температурада 30 минут қыздырылды. Ерімеген ZnO пайда болған кешен кристалдана бастағанға дейін сүзілді. Мөлдір ерітінді 0°C температурада салқындату үшін қалдырылды. Алынған кристалдар 12 сағат ішінде 50°C -та сүзіліп, кептірілді.

№4 синтез, $Zn(Gly)_2$. Алдымен мырыш гидроксиді синтезделді ($Zn(OH)_2$). 44 мл (1 моль) NaOH ерітіндісі дайындалды. Содан кейін бұл ерітіндіге 3 г (0,0220 моль) $ZnCl_2$ қосылды. Ақ тұнба бірден түзілу байқалады. Реакция қоспасы магниттік араластырғышта шамамен бір сағат бойы қатты араластырылды. Содан кейін тұнба сүзіліп, суық сумен жуылады және түні бойы ауада кептіріледі. 0,1988 г (2 ммоль) бұрын синтезделген $Zn(OH)_2$ 30 мл тазартылған суда дисперсияланады. Бөлек стаканда 0,3002 г (4 ммоль) глицин 20 мл тазартылған суда ерітіледі. Алынған мөлдір ерітінді дисперсияға құйылады және реакция қоспасы коллоид мөлдір болғанша бірнеше минут бойы 50°C температурада араластырылады. Содан кейін реакция қоспасын екі сағат бойы араластыруға рұқсат етіледі. Алынған ақ материал сүзіледі. Қалған мөлдір ерітінді бастапқы көлемнің үштен біріне дейін буланып, кристалдануға қалдырылады. 1-3 күннен кейін түскен ақ реакция өнімі сүзіліп, ауада кептіріледі.

№1 синтез, $Zn(Pro)_2$. Химиялық стаканға 10 мл метанол, 0,4997 г (4,34 ммоль) L-пролин және 0,6 мл триэтиламин қосылады. Ерітінді 10 мин араластырылады, содан кейін бөлме температурасында 0,4763 г (2,17 ммоль) мырыш ацетаты дигидраты ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$) қосылады. Реакция қоспасы магниттік араластырғышта 45 минут араластырылады, содан кейін ақ тұнба сүзіледі, метанолмен жуылады және 50°C температурада кептіріледі.

№2 синтез, $Zn(Pro)_2$. 12,6643 г (0,11 моль) L-пролин 75 мл ионсыздандырылған суда ериді. Мөлдір ерітіндіге 4,0690 г (0,05 моль) ZnO қосылады. Қоспа қатты араластырылады және 88°C температурада 30 минут қыздырылады. Ерімеген ZnO сүзіледі. Мөлдір ерітінді бастапқы көлемнің үштен біріне дейін баяу буланып, 0°C кезінде салқындауға қалдырылады. Алынған кристалдар 50°C температурада сүзіледі және кептіріледі.

№3 синтез, $Zn(Pro)_2$. 0,1988 г (2 ммоль) бұрын синтезделген $Zn(OH)_2$ 30 мл тазартылған суға ыдырайды. Бөлек стаканда 0,4605 г (4 ммоль) пролинді 20 мл тазартылған суда ерітіледі. Алынған мөлдір ерітінді дайындалған мырыш гидроксиді коллоидына құйылады және реакция қоспасы коллоид мөлдір болғанша бірнеше минут бойы 50°C температурада араластырылады. Содан кейін реакция қоспасын екі сағат бойы араластыруға рұқсат етіледі. Алынған ақ материал сүзіледі. Қалған мөлдір ерітінді бастапқы көлемнің үштен біріне дейін буланып, кристалдануға қалдырылады. 1-3 күннен кейін тұнған ақ қатты өнім сүзіліп, ауада кептіріледі.

Рентгендік құрылымдық талдау (XRD) Rigaku MiniFlexII дифрактометрінің көмегімен жүргізілді. Өлшеу $CuK\alpha_1$ сәулеленуімен үлгілерді жарықтандыру кезінде 5 градус/мин жылдамдықпен жүргізілді. SEM-нің суреттері Hitachi SU-70 сканерлейтін электронды микроскоптың көмегімен алынды. Энергиялық дисперсиялық спектроскопиялық (EDX) талдау вакуумдағы Hitachi-TM3000 сканерлеуші электронды микроскопында үлгілер көміртекті пленкаға бекітіліп жүргізілді. Фурье түрленуімен инфрақызыл спектроскопиялық (FTIR) талдау 4000-450 cm^{-1} диапазонындағы алмаз ұяшығындағы Bruker Alpha спектрометрінің көмегімен жүргізілді. TGA талдауы N_2 атмосферасындағы Perkin Elmer STA 6000 термоанализаторын қолдана отырып, температурасы 10 °C/мин жылдамдықпен көтеріліп 25-400°C температура диапазонында алынады.

Нәтижелер және талқылау

Жұмыс барысында мырыш-глицин және мырыш-пролин күрделі қосылыстары әртүрлі әдістермен синтезделді. Оларды синтездеу кезінде коммерциялық масштабта көбейтуге болатын синтез процесінің қарапайымдылығы, зиянды прекурсорларды/еріткіштерді пайдаланбау, синтезделген кешеннің тазалығы басым болды. Алынған қосылыстарды талдаудың мақсаты олардың құрылымын анықтау, олардың ең тазалығын коммерциялық косметикалық өнімнің рецептурасына енгізу және оның көпфункционалды ингредиент (белсенді ингредиент + консервант) ретінде жарамдылығын растау болды.

SEM (EDX)-талдау. Реакциялардың прекурсорларының болуын анықтау үшін синтезделген қосылыстарға элементтік талдау жүргізілді. Негізгі элемент-мырыш болып, талдаудан кейін элементтердің қысқаша мазмұны келесі элементтерді тапты: С, Al, О, Н, N. Алайда ұсынылған кестеден олар алынып тасталды, өйткені көміртегі қосылыстар бекітілген көміртекті пленкада және алюминий үлгі ұстағышында (науасында) бар екендігі ескеріліп, оттегі, азот және сутегі туралы шыққан мәліметтер сенімсіз деп танылды. Сондықтан нәтижелерді салыстыру үшін алдағы зерттеулерде басқа да әдістермен (мысалы, XPS немесе CHN талдауы) растау қарастырылған. Синтезделген қосылыстардағы элементтердің пайызы 1-кестеде келтірілген.

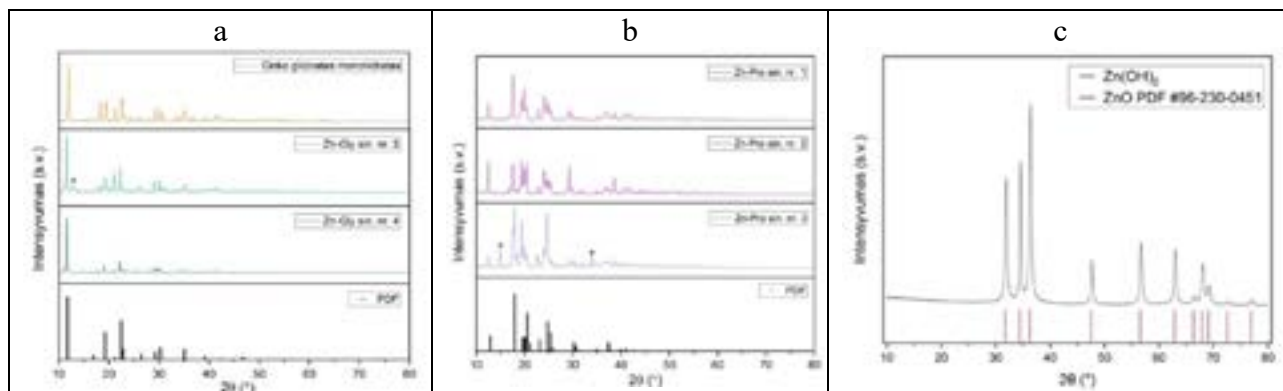
1-кесте. Қосылыстардың элементтік талдауы

Күрделі	Элементтер (%)
№1 синтезі, $Zn(Gly)_2$	Zn (43,327 %), Cl (56,673 %)
№2 синтезі, $Zn(Gly)_2$	Zn (50,663%), Cl (49,337%)
№3 синтезі, $Zn(Gly)_2$	Мырыш (100%)
№4 синтезі, $Zn(Gly)_2$	Zn (98,328%), Cl (1,672%)
№1 синтезі, $Zn(Pro)_2$	Мырыш (100%)
№2 синтезі, $Zn(Pro)_2$	Мырыш (100%)
№3 синтезі, $Zn(Pro)_2$	Мырыш (100%)

Ары қарай тек мырыш табылған қосылыстарды ғана зерттеу туралы шешім қабылданды.

Рентгендік құрылымдық талдау. Рентгендік құрылымдық талдау қосылыстардың кристалдық құрылымын, кристалдылығын, фазалық тазалығын, кристаллит өлшемін бағалауға және тіпті ықтимал қоспаларды анықтауға мүмкіндік береді. Дереккөз [16] негізінде PDF карталары ретінде қолданылатын анықтамалық модельдер жасалды. 1а-суретте $Zn(Gly)_2$ қосылыстарының №3 пен №4 синтездерінің рентгендік дифрактограммалары көрсетілген. Алынған қосылыстардың дифрактограммаларын PDF картасымен салыстырған кезде қоспа шыңы көрінеді (жұлдызшамен белгіленген). Анықталатын қоспалар реакцияның прекурсорларынан пайда болады. Әдебиетте ұсынылған сатып алынған қосылыстың да, мырыш-глицин кешенінің де дифрактограммасының шыңдары 1а-суреттегі шыңдарға сәйкес келетіні байқалды. PDF картасындағы пайда

болған басқада қосымша шыңдар қарқындылығы жағынан тым әлсіз және түсіндіру қиын екендігі көрінеді. Ал жақсы анықталған және жоғары қарқындылықтағы шыңдар ұсақ кристалды құрылымды түзетіндігін атап көрсетуге болады.



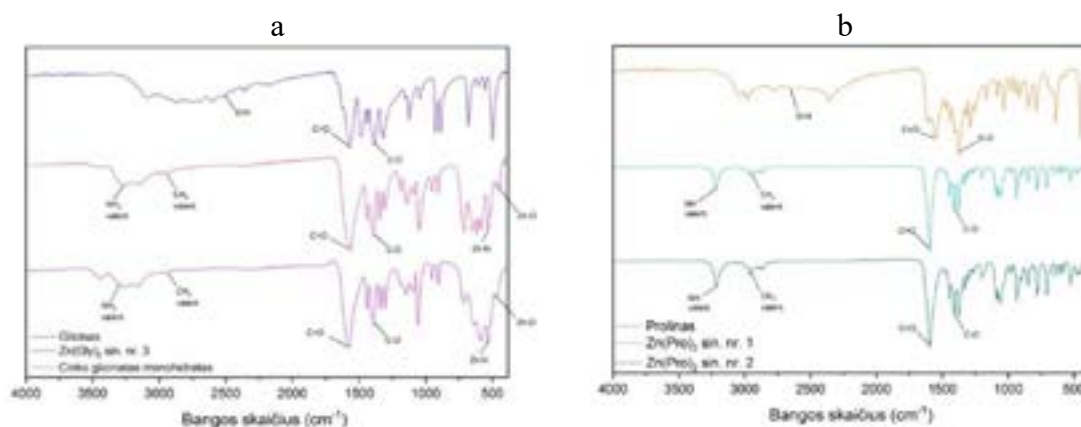
1-сурет. $\text{Zn}(\text{Gly})_2$ қосылысы №3,4 синтезі мен мырыш глицинаты моногидраты (а), $\text{Zn}(\text{Pro})_2$ қосылысы №1, 2, 3 синтезі (б) және $\text{Zn}(\text{OH})_2$ қосылысы (с) рентгендік дифрактограммасы

$\text{Zn}(\text{Pro})_2$ қосылысының №1,2,3 синтездерінің дифрактограммалары 1б-суретте көрсетілген. Ең белсенді қарқындылық шыңдары PDF картасында ұсынылған дифрактограммаларға, сондай-ақ басқа авторлардың зерттеу дифрактограммаларына сәйкес келетіні айқындалды. Көріп отырғаныңыздай әр түрлі синтез әдістерімен алынған барлық қосылыстардың шыңдарының қарқындылығы әр түрлі.

Әдебиеттерде ZnCl_2 -дың NaOH -пен реакциясы кезінде $\text{Zn}(\text{OH})_2$ түзілетіні көрсетілген, бірақ мұндай қосылыс тұрақсыз және рН негізгі аймағында бола алмайды [29]. Синтезделген қосылыстың рентгендік құрылымдық талдауын жүргізгеннен кейін шыңдар PDF картасындағы ZnO шыңдарына толық сәйкес келетіні 1с-суреттен анық көрінеді. Сондықтан $\text{Zn}(\text{OH})_2$ емес ZnO синтезделді. Осы екі прекурсорды қолданған кезде өте ұқсас реакция өнімдері алынды. Дифрактограммаларға сүйенсек, өнеркәсіптік синтез үшін таза болуы мүмкін коммерциялық ZnO қолданған жөн. Сондықтан $\text{Zn}(\text{OH})_2$ -ден синтезделген қосылыстардың құрылымы бұдан әрі қарастырылмайды.

FTIR талдау. ИҚ-Фурье спектроскопиялық талдау нәтижелері зерттелетін қосылыстардың функционалдық топтары мен құрылымдық өзгерістері туралы ақпарат береді. Қажетті қосылыстың пайда болғанын анықтау үшін алынған қосылыс пен прекурсордың спектрлері салыстырылады (бұл жағдайда аминқышқылдары). 2а-суретте көрсетілген глицин спектрінде карбоксил тобының жұтылуының едәуір кеңейтілген шыңын 3312-2170 cm^{-1} аралығында байқауға болады, ол күрделі қосылыстар спектрінде көрінбейді, өйткені О-Н байланысы оттегі мен металл арасындағы координациялық байланыспен ауыстырылады. Топтың тән шыңы – ол кеңеюге бейім және глицин спектріндегі N-H және C-H топтарының шыңдарымен қабаттасуы мүмкін. Кешен спектрінде симметриялы және асимметриялық валенттік тербелістердің шыңдары байқалды – NH_2 (3298 cm^{-1} және 3263 cm^{-1}), бұл амин тобының металмен өзара әрекеттесуін көрсетеді. Бір қызығы,

ИҚ-Фурье спектрінде кешендердің орталық металының оттегі мен азотпен әрекеттесу шыңдары да көрінеді. Zn-O байланысының тербелмелі шыңы 456 см^{-1} кезінде көрінеді, бұл үйлестіруге карбоксил тобы қатысқанын тағы бір рет көрсетеді. Zn-N байланысының валенттік тербелістерінің шыңы 581 см^{-1} байқалады. C=O және C-O шыңдары өзгеріссіз қалады, тек олар кешен спектріндегі кіші толқындық сандарға ауысады. Егер шыңдар кіші немесе үлкен толқындық сандарға ауысса, қосылыстағы металл мен азот арасындағы байланыс үйлестіру болып табылады деген қорытынды жасауға болады. ИҚ-Фурье талдауы металлоорганикалық қосылыстардың кристалдану суын да көрсете алады. Кристалдану суы O-H валенттік тербелістер, оны негізінен $1574,29\text{ см}^{-1}$ шыңда байқауға болады. Осыған тән шың 3000 см^{-1} -ден жоғары аймақта да пайда болады. Мырыш глицинаты моногидраты мен $\text{Zn}(\text{Gly})_2$ қосылысының №3 синтезінің ИҚ спектрі де жазылды (2а-сурет). Спектрдегі үш шыңның позициялары сәйкес келеді, бұл синтезделген қосылыстың құрылымын тағы бір рет растайды.

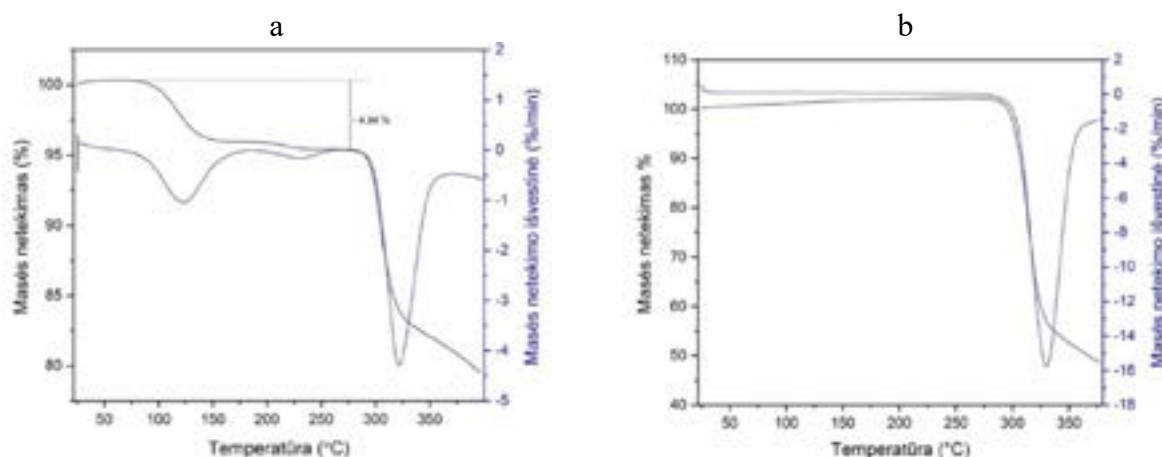


2-сурет. Глицин, $\text{Zn}(\text{Gly})_2$ қосылысы №3 синтезі мен мырыш глицинатының моногидраты (а) және пролин мен $\text{Zn}(\text{Pro})_2$ қосылысы №1,2 синтезінің (b) ИҚ-спектрлері

Мырыш пен пролиннің синтезделген күрделі қосылыстарының ИҚ спектрлері ішінара глицин кешендеріне ұқсас (2b-сурет). Глицин сияқты, пролин спектрінде ОН тобының COOH тербелістеріне жататын 3222 см^{-1} – 2033 см^{-1} аймағында кең жолағы бар. Қашан О-Н байланысы металл-оттегі байланысына өзгергенде NH шыңы 3220 см^{-1} кезінде пайда болады. Ол жалғыз, өйткені екінші ретті амин түзіліп, тек бір сутегімен әрекеттеседі. C-O және C=O шыңдары өзгерген жоқ, тек күрделі қосылыс спектріндегі үлкен толқындық сандарға ауысты, бұл металл мен азот арасындағы координациялық байланыстың пайда болуын білдіреді. Пролиннің күрделі қосылыстарындағы кристалдану суын анықтау глицинге қарағанда әлдеқайда күрделі, өйткені жоғары толқындық сандардағы шыңдар кеңеймеген және нақты анықталған.

Күрделі қосылыстардың термогравиметриялық талдауы N_2 атмосферасында үлгіні $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ тұрақты жылдамдықпен қыздыру арқылы жүргізілді. Мақсат – қосылыстардағы кристалдану суының мөлшерін анықтау және олардың температуралық тұрақтылығын

зерттеу. Температураның жоғарылауымен $\text{Zn}(\text{Gly})_2$ шамамен 150°C температурада тұрақтанғанға дейін массасын біртіндеп жоғалтады және 280°C дейін өзгеріссіз қалады (3а-сурет). Алайда, әдеби деректер 7,75% диссоциациялануы керек екенін көрсетеді, содан кейін ғана қосылыс моногидрат деп айтуға болады. Талдау мәліметтері бойынша кристалдану суы 0,64 моль құрайды. Бұл жағдайда қосылыстың жалпы формуласын стехиометриялық түрде көрсету қиын. Бөлінген кристалдану суының теориялық есептелгеннен аз мөлшері пештегі қосылыстың тым ұзақ кептірілуін туындауы мүмкін. Кейінірек 285°C температураға жеткеннен кейін, күрделі қосылыстың термиялық ыдырауына байланысты массаның күрт төмендеуі байқалды.



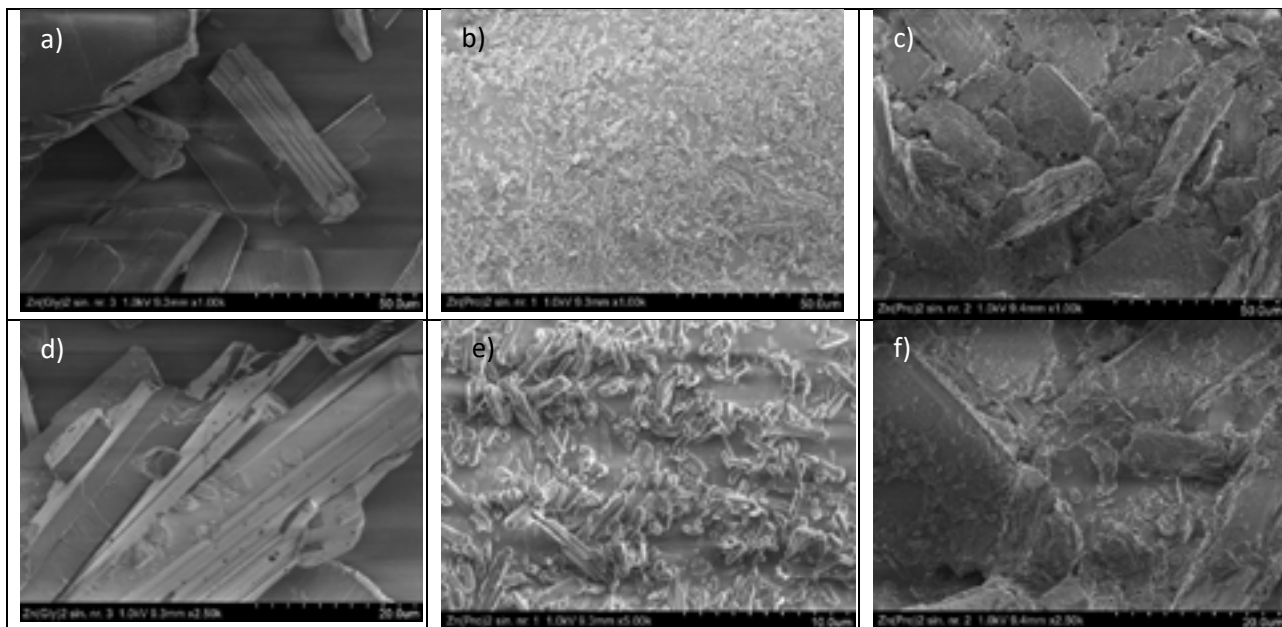
3-сурет. $\text{Zn}(\text{Gly})_2$ қосылысы №3 синтезінің (а) мен $\text{Zn}(\text{Pro})_2$ қосылысы №1 синтезінің (b) TG-DTG қисығы

Мырыш-пролинді кешенді қосылыс жағдайында тек термиялық тұрақтылық бағаланады (3б-сурет). Спектрде байқалғандай, бұл қосылыста кристалдану суы жоқ. Тек 300°C -ден бастап қосылыстың бұзылуы байқалады. Кристалдардың тазалығы қосылыстың балқу температурасына сәйкес келетін 360°C температурада нақты эндотермиялық шыңмен расталды.

SEM-талдау. Синтезделген қосылыстар бөлшектерінің морфологиясын бағалау үшін SEM зерттеу әдісі қолданылды (4-сурет). СЭМ суреттерінен әртүрлі синтез әдістерімен синтезделген қосылыстар арасындағы морфологиялық айырмашылықтарды көруге болады. 4-суреттің а) және d) көріністерінен мырыш-глицин кешені қосылысының бөлшектер мөлшерінің таралуы өте біркелкі емес екенін көруге болады. Олардың құрылымын атау қиын, олардың көпшілігінде ұсақ бөлшектермен қапталған жалпақ және өзек тәрізді кристалдар басым. Мырыш-пролинді кешенді қосылыс бірінші синтез әдісімен синтезделді (4-сурет b) және e)), бөлшектер әлдеқайда ұсақ екенін байқаймыз. Құрылымы бұзылған өзек тәрізді бөлшектердің түзілуі байқалады. $\text{Zn}(\text{Pro})_2$ қосылысының №2 синтезі (4-сурет c) және f)) мырыш-глицин кешені қосылысының құрылымына ұқсайды, өйткені ол сол әдіспен синтезделген. Бөлшектер де көлемді, бірақ кристалдылығы төмен. Бұл ерітіндінің кристалдар түзу үшін баяу булануына байланысты болуы мүмкін.

Синтезделген және талданған қосылыстарды әрі қарай зерттеу арқылы косметикада қолдануға болады. Осы мақсатқа жету үшін жұмыс барысында синтезделген мырыш-глицин кешенді қосылысы ($Zn(Gly)_2$, №3 синтезі) бар косметикалық өнім жасалды.

Косметикалық өнімнің рецепті косметика өнеркәсібінде синтезделген кешенді қолдану мүмкіндігін анықтау үшін ол косметикалық өнімнің рецептурасында қолданылды. Әдеби дереккөздерге сәйкес, мырыш-глицин кешенді қосылысы бактерия мен микробқа қарсы қасиеттерге ие. Осы себепті ол косметикалық формулалардағы терінің пайдалы белсенді компоненті ғана емес, сонымен қатар өнімнің микробиологиялық ластану мен төзімділігіне (сақталуына) оң әсер етуі мүмкін. Мырыш-пролин кешені әлі күнге дейін Еуропалық Одақ нарығына арналған косметикалық өнімдердің формулаларында қолдануға рұқсат етілмеген. Еуропалық Одақта қолданыстағы заңнамаға сәйкес, барлық косметикалық өнімдер косметикалық өнімдерді сақтаудың тиімділігін бағалайтын «SCCS» сынағынан өтуі керек [30]. Мырыш-глицин кешенінің косметикалық өнімнің микробиологиялық ластануы мен төзімділігіне және консервациялаудың тиімділігіне әсері кешенді қолданыстағы косметикалық рецептураға қосу арқылы бағаланды (рецепт құрамы: су, глицерин, пантенол, натрий гиалуронаты, лимон қышқылы, феноксиэтанол). Феноксиэтанол бастапқыда зерттеу үшін таңдалған препаратта консервант ретінде қолданылған. Ол мырыш глицинатымен алмастырылды және құрамында мырыш глицинатының әртүрлі концентрациясы (1%, 0,7%, 0,5%, 0,3%) бар төрт сарысу мен бір бақылау (мырыш глицинаты жоқ) үлгісі жасалды. Еуропалық Одақтың ережесіне сәйкес, косметика құрамында суда еритін мырыш тұздарын қолданған кезде мырыш мөлшері өнімнің салмағының 1%-нан аспауы керек [31].



4-сурет. $Zn(Gly)_2$, №3 синтезі - a), d); $Zn(Pro)_2$, №1 синтезі - b), e); $Zn(Pro)_2$, №1 - c), f) синтездерінің СЭМ суреттері

Мырыш-глицин кешенінің әртүрлі концентрациялары бар дайындалған прототиптер (үлгілер) сериясы LST EN ISO 11930:2019 стандартына сәйкес осы прототиптерді микробқа қарсы қорғаудың тиімділігін бағалау мақсатында Ұлттық Қоғамдық денсаулық сақтау зертханасында (Вильнюс, Литва) сыналды.

Микробқа қарсы қорғаныстың тиімділігін бағалау кезінде микробиологиялық таза өнімдер микроорганизмдердің дақылдарымен арнайы ластанған – *Escherichia coli* (ішек таяқшасы, грамтеріс таяқша тәрізді бактерия), *Candida albicans* (ақ саңырауқұлақ), *Aspergillus brasiliensis* (саңырауқұлақ), *Pseudomonas aeruginosa* (жасыл псевдомонада, грамтеріс, аэробты таяқша тәрізді бактерия), *Staphylococcus aureus* (алтын стафилококк, патогендік бактерия). Әрі қарай бақылау жүзеге асырылды және арнайы «жұқтырған» өнімдерде микроорганизмдер дақылдарының одан әрі өсуі/жойылуы бақыланды және бағаланды. Сынақтың сәтті болуы үшін микроорганизмдердің дақылдары толығымен жойылуы немесе Стандартта белгіленген жылдамдықпен жойылуы негізге алынды. Барлық прототиптерде микробқа қарсы ластанудың жоқтығына көз жеткізу үшін микробқа қарсы қорғаныстың тиімділігін бағалау үшін зерттеуді бастамас бұрын барлық тексерілген прототиптер (0% Zn-Gly, 0,3% Zn-Gly, 0,5% Zn-Gly, 0,7% Zn-Gly, 1% Zn-Gly) микробиологиялық сынақтар өткізілді. Тәжірибелік үлгілерде микробиологиялық ластану табылған жоқ.

Әрбір микроорганизм мәдениеті инкубацияланды, себілді және әртүрлі ортада әртүрлі жағдайларда бақыланды. Микроорганизмдердің дақылдарын өсіргеннен және микроорганизмдердің суспензияларын дайындағаннан кейін микроорганизмдердің суспензиясына бақылау жүргізілді (2-кесте), N (түзуші бірліктердің бағанасы) және N0 мәндері (уақыттың нөлдік сәтінде егілген микроорганизмдердің саны), $N_0 = N/100$ формула бойынша анықталады:

$$N = \frac{C}{V * d}$$

мұндағы C – екі шыныаяқта есептелген колониялардың орташа мәні; V – егу көлемі (егу ерітіндісі); d – сұйылту коэффициенті.

2-кесте. Зерттеуде пайдаланылған микроорганизмдердің суспензиясын бақылау

Микроорганизмдер	N cv/мл	N 0 cv/мл (N 0 =N/100)
<i>Кандида альбиканс</i>	$9,3 \times 10^7$	$9,3 \times 10^5$
<i>Бразилиялық аспергилл</i>	$4,9 \times 10^6$	$4,9 \times 10^4$
<i>Көк ірің таяқшасы</i>	$8,7 \times 10^8$	$8,7 \times 10^6$
<i>Алтын түсті стафилококк</i>	$7,2 \times 10^8$	$7,2 \times 10^6$
<i>Ішек таяқшасы</i>	$7,0 \times 10^8$	$7,0 \times 10^6$

Косметикалық өнімдердің микробқа қарсы қорғанысының тиімділігін зерттегеннен кейін мырыш-глицин кешені *Aspergillus brasiliensis* (зең) қоспағанда, сыналатын барлық микроорганизмдік дақылдарға жеткілікті тиімді микробқа қарсы әсер ететіні анықталды

(ISO стандартына сәйкес), яғни микробқа қарсы тиімділік, бірақ *Aspergillus brasiliensis*-ке қатысты фунгицидтік қасиеттерге ие емес. Мырыш-глицин кешенін пайдаланбаған прототипте микроорганизмдердің барлық штамдары байқалды (*Escherichia coli*, *Candida albicans*, *Aspergillus brasiliensis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*) колония түзетін бірліктер санының төмендеуі (азаюы) байқалмады немесе жеткіліксіз болды микробиологиялық қорғауды LST EN ISO 11930:2019 стандарты бойынша тиімді деп санауға болады.

Мырыш-глицин кешені қолданылған барлық прототиптерде (0,3%, 0,5%, 0,7%, 1%), *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* колониясын құрайтын бірліктердің жоғары тиімді төмендеуі байқалды. 7 күннен кейін құрамында мырыш-глицин кешені бар барлық прототиптерде аталған микроорганизмдердің барлық колониялары жоғалып кетті. Тиімділігі аз, бірақ үйлесімді *Candida albicans* санының азаюы болды. Мырыш-глицин 0,3% концентрациясында *Candida albicans* колониясын құрайтын бірліктердің саны 7 күнде 631 есе ($\log N_0 = 6,0$ -ден $\log N_{7d} = 3,3$ -ке дейін), ал 28 күнде 3164 есе ($\log N_{7d} = 3,3$) азайды.

Нәтижелер маңызды, өйткені мырыш-глицин кешені косметикалық өнімдерді микробиологиялық ластанудан тиімді микробқа қарсы қорғауды қамтамасыз ете алады деген гипотеза расталды. Мырыш-глицин кешені косметикалық өнім рецептурасындағы мырыш-глицин кешенінің ең төмен сыналған концентрациясында да (0,3%) *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* және *Candida albicans* микроорганизмдерінен тиімді микробқа қарсы қорғанысты қамтамасыз етуге мүмкіндік берді. Барлық сыналған прототиптерде мырыш-глицин кешенінің *Aspergillus brasiliensis*-ке қатысты фунгицидтік қасиеттері байқалмады, яғни бұл микроорганизмдердің колонияларының азаюы байқалмады немесе жеткіліксіз болды. Осы формулаларға фунгицидтік қасиеттері бар теріге пайдалы кез келген басқа ингредиентті енгізу арқылы консерванттарды мақсатты пайдаланудан аулақ болатын косметикалық өнімдерді жасауға болады, өйткені микробқа қарсы қорғаныстың тиімділігі басқа белсенді ингредиенттермен қамтамасыз етіледі.

Қорытынды

Зерттеу барысында мырыш пен аминқышқылдарының күрделі қосылыстарын алу-дың әртүрлі әдістері сыналды: $Zn(Gly)_2$ суда, $Zn(Pro)_2$ суда және органикалық ортада синтезделді.

SEM-EDX зерттеулері алынған қосылыстардың элементтік құрамын анықтады. Бұл талдау металлоганикалық қосылыстарды зерттеуде кеңінен қолданылмады, өйткені O, N, H элементтері туралы мәліметтер дәл емес. Дегенмен, $ZnCl_2$ -ден синтезделген қосылыстарда реакция прекурсорлары бар екені белгілі болды. Синтез әдісі жарамсыз деп танылды.

Рентгендік құрылымдық талдау қосылыстардың фазалық тазалығын көрсетіп, прекурсорлық қоспалар табылмады. Басқа авторлардың синтездеу әдісі де талданды және $Zn(OH)_2$ көрсетілген шарттарда алынбайтындығы дәлелденді, сондықтан осындай

алынған қосылыстар одан әрі талданбайды. ИҚ-Фурье спектроскопиясы қосылыстардың функционалды топтарын анықтауға мүмкіндік беріп, алынған спектрлер бойынша оттегі мен сутегі арасындағы байланыс мырыш пен оттегі арасындағы координациялық байланысқа ауысқаны анықталды, ал шыңдардың өзгеруі мырыш пен азот арасындағы координациялық байланыстың пайда болуын көрсетті.

СЭМ суреттері әртүрлі әдістермен синтезделген қосылыс бөлшектерінің мөлшері мен пішінін анықтауға мүмкіндік берді. Органикалық ортада синтезделген күрделі мырыш-пролин қосылысының бөлшектері суда синтезделген қосылыстарға қарағанда салыстырмалы түрде кішірек және кристалдылық дәрежесі жоғары екені белгілі болды. Термогравиметриялық талдау $\text{Zn}(\text{Gly})_2$ қосылысында кристалдану суы бар екенін көрсетті. Қосылыс молекуласына 0,64 моль H_2O молекулалары қосылған деп есептелді. Сондай-ақ $\text{Zn}(\text{Pro})_2$ қосылысы ылғалданбайтыны расталды.

Мырыш пен глицин амин қышқылы ZnO прекурсоры арқылы синтезделгенде коммерциялық іске асыруға қолайлы кешенді қосылыс түзетіні анықталды. Сондықтан бұл қосылыс көпфункционалды ингредиент (белсенді ингредиент+консервант) ретінде коммерциялық косметикалық өнімнің (Сарысудың) рецептурасына енгізілді. Мырыш-глицин кешені косметикалық өнімдерді *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* және *Candida albicans* микроорганизмдерінен тиімді микробқа қарсы қорғауды, тіпті сыналған прототиптер арасында мырыш-глицин кешенінің ең төмен сыналған концентрациясы (0,3%) болса да қамтамасыз ететіні байқалды. Барлық сыналған прототиптерде мырыш-глицин кешенінің *Aspergillus brasiliensis*-ке қатысты фунгицидтік қасиеттері байқалмады, яғни бұл микроорганизмдердің колонияларының азаюы байқалмады немесе жеткіліксіз болды. Құрамында мырыш-глицин кешені бар косметиканың құрамына фунгицидтік қасиеттері бар теріге пайдалы тағы бір ингредиент енгізу арқылы консерванттарды мақсатты пайдаланудан аулақ болатын косметикалық өнімдерді жасауға болатыны айқындалды, өйткені микробқа қарсы қорғаныстың тиімділігі төмендейді. Құрамындағы басқа белсенді заттармен қамтамасыз етіледі.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (грант № AP22683206).

Авторлар Вильнюс университеті, химия және геоғылымдар факультеті ұжымына (Вильнюс, Литва) ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізуге көмек бергені үшін алғыс білдіреді. Авторлар олардың мүдделер қақтығысы жоқ екенін баяндайды.

Авторлардың қосқан үлесі

Пазылбек С.А., Карейва А., Төлеуханова Ж.Т., Ескермесов Д.К. – түпнұсқа мәтінді жазу, авторлық қадағалау, әдістеме, зерттеу;

Жакипбаев Б.Е., Әбдіқадыр Б.З., Катбаева М.Т. – тұжырымдамалау, зерттеу, ресурстар;

Муратбекова У.А., Алипбекова Ж.К. – зерттеу, визуализация, шолу, редакциялау.

Әдебиеттер тізімі

1. K. Larson, *Shopper Demand For Clean Beauty And Increased Transparency Continues*, қол жетімді адресі: <https://www.forbes.com/sites/kristinlarson/2021/06/30/shopper-demand-for-clean-beauty-and-increased-transparency-continues/?sh=3d0194cb5402>
2. K. Chitrakorn, *Ingredients before brands: The new beauty consumer priority?* қол жетімді адресі: <https://www.voguebusiness.com/beauty/ingredients-before-brands-the-new-beauty-consumer-priority>
3. S. Hartmann, U. Klaschka, *Interested consumers' awareness of harmful chemicals in everyday products*, Environ Sci Eur. 29, 29 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-017-0127-8>
4. J. Ring, *Often misrepresented yet fundamental: the importance of understanding ingredients in cosmetics*, J Eur Acad Dermatol Venereol., 33 (Suppl 7), p. 3-4 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1111/jdv.15960>
5. B. Dréno, T. Zuberbier, C. Gelmetti, G. Gontijo, M. Marinovich, *Safety review of phenoxyethanol when used as a preservative in cosmetics*, J Eur Acad Dermatol Venereol., 33 (Suppl 7), p. 15-24 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1111/jdv.15944>
6. *Scientific Committee on Consumer Safety*. Opinion on Phenoxyethanol, The SCCS adopted this opinion at its 2nd plenary meeting on 6 October 2016, қол жетімді адресі: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/consumer_safety/docs/sccs_o_195.pdf
7. *Final amended report on the safety assessment of Methylparaben, Ethylparaben, Propylparaben, Isopropylparaben, Butylparaben, Isobutylparaben, and Benzylparaben as used in cosmetic products*, Int J Toxicol., 27 (Suppl 4), p. 1-82 (2008). DOI: <https://doi.org/10.1177/109158180802704s01>
8. O. Ryu, B.K. Park, M. Bang and etc., *Effects of Several Cosmetic Preservatives on ROS-Dependent Apoptosis of Rat Neural Progenitor Cells*, Biomolecules & Therapeutics (Seoul), 26(6), p. 608-615 (2018). DOI: <https://doi.org/10.4062/biomolther.2017.221>
9. E.M. Jackson, *Diazolidinyl Urea: A Toxicologic and Dermatologic Risk Assessment as a Preservative in Consumer Products*, Journal of Toxicology: Cutaneous and Ocular Toxicology, 14(1), p. 3-21 (2008), DOI: <https://doi.org/10.3109/15569529509057663>
10. K.A. Zug, E.M. Warshaw, J.F. Fowler Jr and etc., *Patch-test results of the North American Contact Dermatitis Group 2005-2006*, Dermatitis, 20(3), p. 149-60 (2009). DOI: <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.2310/6620.2009.08097>
11. J. Wang, Y. Liu, W.R. Kam, Y. Li, D.A. Sullivan, *Toxicity of the cosmetic preservatives parabens, phenoxyethanol and chlorphenesin on human meibomian gland epithelial cells*, Experimental Eye Research., 196, 108057 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exer.2020.108057>
12. L.M. Weatherly, J.A. Gosse, *Triclosan Exposure, Transformation, and Human Health Effects*, Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, 20(8), p. 447-469 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1080/10937404.2017.1399306>
13. M. Abendrot, U. Kalinowska-Lis, *Zinc-containing compounds for personal care applications*, Int J Cosmet Sci, 40 p. 319-327 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1111/ics.12463>
14. *Cosmetic ingredient database. CosIng – Glossary of ingredients*, қол жетімді адресі: https://ec.europa.eu/growth/sectors/cosmetics/cosmetic-ingredient-database_lt
15. L. Firth, *Super Amino Acids: Glycine and Proline*, қол жетімді адресі: <https://www.adashiko.com/blogs/news/super-amino-acids-glycine-and-proline>

16. M. Abendrot, L. Chęcińska, J. Kusz, and etc., *Zinc(II) complexes with amino acids for potential use in dermatology: synthesis, crystal structures and antibacterial activity*, *Molecules* 25(4), p. 951 (2020). DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25040951>
17. P.W. Atkins, T.L. Overton, J.P. Rourke, and etc., *Shriver and Atkins' Inorganic Chemistry*. 5th ed., Oxford University Press(Oxford, 2010), p. 824
18. G.A. Lawrance, *Introduction to Coordination Chemistry 1st ed.*(John Wiley & Sons Ltd, Great Britain, 2010), p. 304, қол жетімді адресі: <https://www.wiley.com/en-us/Introduction+to+Coordination+Chemistry-p-9781118681404>
19. M. Fleck, A.M. Petrosyan, *Salts of Amino Acids. 1st ed.*, (Springer Cham, Switzerland, 2014), p. 574, қол жетімді адресі: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06299-0>
20. A. Rauhvargers, *Reasons of complex compound formation*, қол жетімді адресі: http://aris.gusc.lv/GenChem93/12_ComplexComp.pdf
21. *Crystallization and Precipitation*, қол жетімді адресі: https://www.mt.com/us/en/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_Crystallization.html#overviewaf10
22. N.N. Greenwood, A. Earnshaw, *Chemistry of the Elements*. 2nd ed., (Butterworth Heinemann, 1997), p. 1364, қол жетімді адресі: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-30414-6>
23. B.I. Kharisov, *Direct Synthesis of Metal Complexes*. 1st ed., (Elsevier, 2018), p. 468, қол жетімді адресі: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00655-1>
24. S.A. Nastiti, Harmita, C. Jatmika, *Synthesis and analysis of zinc methionine, zinc glycine, copper leucine, and copper glycine complexes using atomic absorption spectrophotometry*, *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 10(1), p. 388–391 (2018). DOI: <https://doi.org/10.22159/ijap.2018.v10s1.86>
25. F.W. Marschner, *Deodorant composition, United States Patent №4565693* (1986), қол жетімді адресі: <https://patentimages.storage.googleapis.com/8c/d8/cd/e5df64fe96fdb5/US4565693.pdf>
26. T. E. Needham, *The Solubility of Amino Acids in Various Solvent Systems*, University of Rhode Island, p. 159 (1970). DOI: <https://doi.org/10.23860/diss-needham-thomas-1970>
27. A.R. de Oliveira, R. Katla, M.P.D. Rocha, T.B. Albuquerque and etc., *Zinc Di(l-prolinate)-Mediated Synthesis of α -Aminophosphonates under Mild Conditions*, *Synthesis*, 48, p. 4489-4494 (2016). DOI: 10.1055/s-0036-1588065
28. M. Kidwai, A. Jain, R. Poddar, *Zn[(L)proline]₂ in water: A new easily accessible and recyclable catalytic system for the synthesis of pyrazoles*, *Journal of Organometallic Chemistry*, 696, p. 1939-1944 (2011). DOI: 10.1016/j.jorgchem.2010.09.012
29. A. Krężel, W. Maret, *The biological inorganic chemistry of zinc ions*, *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 611, p. 3-19 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.04.010>
30. *The SCCS Notes of Guidance for the Testing of Cosmetic Ingredients and Their Safety Evaluation*, қол жетімді адресі: https://ec.europa.eu/health/system/files/2021-04/sccs_o_250_0.pdf 25
31. *Regulation (EC) No 1223/2009 of the European Parliament and of the Council of 30 November 2009 on cosmetic products*, қол жетімді адресі: <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1223&from=EN>

С.А. Пазылбек^{1,2}, А. Карейва¹, Б.Е. Жакипбаев³, Д.К. Ескермесов⁴, Б.З. Абдикадыр⁴,
М.Т. Катбаева², У.А. Муратбекова⁵, Ж.К. Алипбекова⁶, Ж.Т. Төлеуханова^{*4}

¹Вильнюсский университет, Вильнюс, Литва

²Университет имени Ж.А. Ташенева, Шымкент, Казахстан

³Университет дружбы народов имени академика А.Куатбекова, Шымкент, Казахстан

⁴НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева»,
Усть-Каменогорск, Казахстан

⁵Южно-Казахстанский педагогический университет имени О. Жанибекова, Шымкент, Казахстан

⁶Южно-Казахстанский университет имени М. Ауезова, Шымкент, Казахстан

(E-mail: ztoleukhanova@ektu.kz)

Исследование характеристик, методов синтеза и структурно-фазовых свойств цинковых комплексных соединений

Аннотация. В данной работе рассмотрены различные методы получения цинковых комплексов с аминокислотами: $\text{Zn}(\text{Gly})_2$, синтезированный в водной среде, и $\text{Zn}(\text{Pro})_2$, синтезированный как в водной, так и в органической среде. Элементный состав полученных соединений был определён методом SEM-EDX, что подтвердило наличие прекурсоров реакций в соединениях, синтезированных с использованием ZnCl_2 в качестве исходного материала. Рентгеноструктурный анализ показал образование фазово чистых продуктов с незначительным количеством примесей исходных веществ. ИК-Фурье спектроскопия позволила определить функциональные группы соединений; на основании FTIR-спектров установлено, что водородные связи между кислородом и водородом заменяются координационными связями между цинком и кислородом, а сдвиг полос в область более высоких или низких волновых чисел свидетельствует о формировании координационной связи между цинком и азотом. SEM-изображения позволили определить размеры и морфологию частиц соединений, синтезированных различными методами. Частицы комплексного цинк-пролинового соединения, полученного в органической среде, оказались значительно меньшими по размеру по сравнению с частицами, синтезированными в водной среде. Термогравиметрический анализ показал наличие кристаллизационной воды в соединении $\text{Zn}(\text{Gly})_2$, в то время как соединение $\text{Zn}(\text{Pro})_2$ оказалось безводным. $\text{Zn}(\text{Gly})_2$ был введён в состав коммерческого косметического продукта (сыворотки) в качестве консерванта. Цинк-глициновый комплекс обеспечил эффективную антимикробную защиту косметических средств от *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *E. coli* и *Candida albicans* даже при минимальной концентрации комплекса (0,3 %). Против *Aspergillus brasiliensis* активность цинк-глицинового комплекса не наблюдалась, то есть уменьшения количества колоний этих микроорганизмов не происходило или оно было недостаточным. Полученные результаты позволяют предположить, что добавление ещё одного полезного для кожи ингредиента с фунгицидными свойствами в косметические композиции, содержащие цинк-глициновый комплекс, открывает возможность создания косметических продуктов без использования традиционных консервантов.

Ключевые слова: цинк-глицин, $\text{Zn}(\text{Gly})_2$, $\text{Zn}(\text{Pro})_2$, SEM-EDX, спектр FTIR.

S.A. Pazylbek^{1,2}, A. Kareiva², B.Ye. Zhakipbayev³, D.K. Yeskermessov⁴, B.Z. Abdikadyr⁵,
M.T. Katbayeva², U.A. Muratbekova⁵, Zh.K. Alipbekova⁶, Zh.T. Toleukhanova^{*4}

¹Vilnius University, Vilnius, Lithuania

²Tashenev University, Shymkent, Kazakhstan

³Peoples' Friendship University named after Academician A. Kuatbekov, Shymkent, Kazakhstan

⁴NJSC "D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University", Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

⁵South Kazakhstan Pedagogical University named after O. Zhanibekov, Shymkent, Kazakhstan

⁶M.Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

(E-mail: ztoleukhanova@ektu.kz)

Investigation of the characteristics, synthesis methods, and structural-phase properties of zinc complex compounds

Abstract. This study investigated various methods for obtaining zinc complexes with amino acids, including Zn(Gly)₂ synthesized in aqueous medium, and Zn(Pro)₂ synthesized both in aqueous and organic media. The elemental composition of the obtained compounds was determined using SEM-EDX analysis, which revealed the presence of reaction precursors in the compounds synthesized with ZnCl₂ as a starting material. X-ray structural analysis confirmed the formation of phase-pure products containing only minor amounts of precursor impurities. FTIR spectroscopy enabled the identification of functional groups, and the spectra indicated that hydrogen bonding with oxygen was replaced by coordination bonding between zinc and oxygen. Furthermore, shifts in the wave numbers of the bands provided evidence for the formation of coordination bonds between zinc and nitrogen atoms. SEM images allowed for the assessment of particle shape and size, revealing that the zinc-proline complex synthesized in organic medium had significantly smaller particles than those synthesized in water. Thermogravimetric analysis showed the presence of crystallization water in the Zn(Gly)₂ compound, whereas the Zn(Pro)₂ complex was anhydrous. The Zn(Gly)₂ complex was incorporated as a preservative into a commercial cosmetic serum. The zinc-glycine complex demonstrated effective antimicrobial protection of the cosmetic product against *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *E. coli*, and *Candida albicans*, even at a minimum concentration of 0.3%. However, no significant activity was observed against *Aspergillus brasiliensis*, indicating either no reduction or insufficient reduction of fungal colonies. These results suggest the potential for developing preservative-free cosmetic products by adding skin-beneficial ingredients with fungicidal properties to the zinc-glycine-based cosmetic compositions.

Keywords: zinc-glycine, Zn(Gly)₂, Zn(Pro)₂, SEM-EDX, FTIR spectrum

References

1. K. Larson, *Shopper Demand For Clean Beauty And Increased Transparency Continues*, available at: <https://www.forbes.com/sites/kristinlarson/2021/06/30/shopper-demand-for-clean-beauty-and-increased-transparency-continues/?sh=3d0194cb5402>
2. K. Chitrakorn, *Ingredients before brands: The new beauty consumer priority?* available at: <https://www.voguebusiness.com/beauty/ingredients-before-brands-the-new-beauty-consumer-priority>

3. S. Hartmann, U. Klaschka, *Interested consumers' awareness of harmful chemicals in everyday products*, Environ Sci Eur. 29, 29 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-017-0127-8>
4. J. Ring, *Often misrepresented yet fundamental: the importance of understanding ingredients in cosmetics*, J Eur Acad Dermatol Venereol., 33 (Suppl 7), p. 3-4 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1111/jdv.15960>
5. B. Dréno, T. Zuberbier, C. Gelmetti, G. Gontijo, M. Marinovich, *Safety review of phenoxyethanol when used as a preservative in cosmetics*, J Eur Acad Dermatol Venereol., 33 (Suppl 7), p. 15-24 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1111/jdv.15944>
6. *Scientific Committee on Consumer Safety. Opinion on Phenoxyethanol, The SCCS adopted this opinion at its 2nd plenary meeting on 6 October 2016*, available at: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/consumer_safety/docs/sccs_o_195.pdf
7. *Final amended report on the safety assessment of Methylparaben, Ethylparaben, Propylparaben, Isopropylparaben, Butylparaben, Isobutylparaben, and Benzylparaben as used in cosmetic products*, Int J Toxicol., 27 (Suppl 4), p. 1-82 (2008). DOI: <https://doi.org/10.1177/109158180802704s01>
8. O. Ryu, B.K. Park, M. Bang and etc., *Effects of Several Cosmetic Preservatives on ROS-Dependent Apoptosis of Rat Neural Progenitor Cells*, Biomolecules & Therapeutics (Seoul), 26(6), p. 608-615 (2018). DOI: <https://doi.org/10.4062/biomolther.2017.221>
9. E.M. Jackson, *Diazolidinyl Urea: A Toxicologic and Dermatologic Risk Assessment as a Preservative in Consumer Products*, Journal of Toxicology: Cutaneous and Ocular Toxicology, 14(1), p. 3-21 (2008), DOI: <https://doi.org/10.3109/15569529509057663>
10. K.A. Zug, E.M. Warshaw, J.F. Fowler Jr and etc., *Patch-test results of the North American Contact Dermatitis Group 2005-2006*, Dermatitis, 20(3), p. 149-60 (2009). DOI: <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.2310/6620.2009.08097>
11. J. Wang, Y. Liu, W.R. Kam, Y. Li, D.A. Sullivan, *Toxicity of the cosmetic preservatives parabens, phenoxyethanol and chlorphenesin on human meibomian gland epithelial cells*, Experimental Eye Research., 196, 108057 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exer.2020.108057>
12. L.M. Weatherly, J.A. Gosse, *Triclosan Exposure, Transformation, and Human Health Effects*, Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, 20(8), p. 447-469 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1080/10937404.2017.1399306>
13. M. Abendrot, U. Kalinowska-Lis, *Zinc-containing compounds for personal care applications*, Int J Cosmet Sci, 40 p. 319-327 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1111/ics.12463>
14. *Cosmetic ingredient database. CosIng – Glossary of ingredients*, available at: https://ec.europa.eu/growth/sectors/cosmetics/cosmetic-ingredient-database_lt
15. L. Firth, *Super Amino Acids: Glycine and Proline*, available at: <https://www.adashiko.com/blogs/news/super-amino-acids-glycine-and-proline>
16. M. Abendrot, L. Chęcińska, J. Kusz, and etc., *Zinc(II) complexes with amino acids for potential use in dermatology: synthesis, crystal structures and antibacterial activity*, Molecules 25(4), p. 951 (2020). DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25040951>
17. P.W. Atkins, T.L. Overton, J.P. Rourke, and etc., *Shriver and Atkins' Inorganic Chemistry*. 5th ed., Oxford University Press(Oxford, 2010), p. 824
18. G.A. Lawrance, *Introduction to Coordination Chemistry 1st ed.*(John Wiley & Sons Ltd, Great Britain, 2010), p. 304, available at: <https://www.wiley.com/en-us/Introduction+to+Coordination+Chemistry-p-9781118681404>

19. M. Fleck, A.M. Petrosyan, *Salts of Amino Acids. 1st ed.*, (Springer Cham, Switzerland, 2014), p. 574, available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06299-0>
20. A. Rauhvargers, *Reasons of complex compound formation*, available at: http://aris.gusc.lv/GenChem93/12_ComplexComp.pdf
21. *Crystallization and Precipitation*, available at: https://www.mt.com/us/en/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_Crystllization.html#overviewaf10
22. N.N. Greenwood, A. Earnshaw, *Chemistry of the Elements*. 2nd ed., (Butterworth Heinemann, 1997), p. 1364, available at: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-30414-6>
23. B.I. Kharisov, *Direct Synthesis of Metal Complexes*. 1st ed., (Elsevier, 2018), p. 468, available at: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00655-1>
24. S.A. Nastiti, Harmita, C. Jatmika, *Synthesis and analysis of zinc methionine, zinc glycine, copper leucine, and copper glycine complexes using atomic absorption spectrophotometry*, International Journal of Applied Pharmaceutics, 10(1), p. 388–391 (2018). DOI: <https://doi.org/10.22159/ijap.2018.v10s1.86>
25. F.W. Marschner, *Deodorant composition, United States Patent №4565693* (1986), available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/8c/d8/cd/e5df64fe96fdb5/US4565693.pdf>
26. T. E. Needham, *The Solubility of Amino Acids in Various Solvent Systems*, University of Rhode Island, p. 159 (1970). DOI: <https://doi.org/10.23860/diss-needham-thomas-1970>
27. A.R. de Oliveira, R. Katla, M.P.D. Rocha, T.B. Albuquerque and etc., *Zinc Di(l-prolinate)-Mediated Synthesis of α -Aminophosphonates under Mild Conditions*, Synthesis, 48, p. 4489-4494 (2016). DOI: 10.1055/s-0036-1588065
28. M. Kidwai, A. Jain, R. Poddar, *Zn[(L)proline]₂ in water: A new easily accessible and recyclable catalytic system for the synthesis of pyrazoles*, Journal of Organometallic Chemistry, 696, p. 1939-1944 (2011). DOI: 10.1016/j.jorganchem.2010.09.012
29. A. Krężel, W. Maret, *The biological inorganic chemistry of zinc ions*, Archives of Biochemistry and Biophysics, 611, p. 3-19 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.04.010>
30. *The SCCS Notes of Guidance for the Testing of Cosmetic Ingredients and Their Safety Evaluation*, available at: https://ec.europa.eu/health/system/files/2021-04/sccs_o_250_0.pdf 25
31. *Regulation (EC) No 1223/2009 of the European Parliament and of the Council of 30 November 2009 on cosmetic products*, available at: <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1223&from=EN>

Авторлар туралы мәлімет:

Пазылбек С.А. – PhD, «математика және информатика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Ж.А.Тәшенев атындағы Университет, Қонаев даңғылы 21, 160012, Шымкент, Қазақстан

Карейва А. – академик, профессор, химия және геоғылым факультетінің деканы, Вильнюс университеті, Наугардуко көшесі 24, LT-03225, Вильнюс, Литва

Жақипбаев Б.Е. – PhD, қауымдастырылған профессор, Академик Ә.Қуатбеков атындағы Халықтар достығы университетінің Инженерлік-технологиялық хабтың бас ғылыми қызметкері, «мұнай және құрылыс өндірісі» кафедрасының профессоры, Төле би көшесі 32, 160000, Шымкент, Қазақстан

Ескермесов Д.К. – PhD, Физика орталығының қауымдастырылған профессоры, КЕАҚ «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» Халықаралық Инженерия Мектебінің жетекші ғылыми қызметкері, Серікбаев көшесі 19, 070004, Өскемен, Қазақстан

Әбдіқадыр Б.З. – PhD, физика кафедрасының аға оқытушысы, Ө. Жәнібеков ат. Оңтүстік Қазақстан Педагогикалық Университеті, Байтұрсынов көшесі 13, 160012, Шымкент, Қазақстан

Катбаева М.Т. – «математика және информатика» кафедрасының аға оқытушысы, Ж.А.Тәшенев атындағы Университет, Қонаев даңғылы 21, 160012, Шымкент, Қазақстан

Муратбекова У.А. – «математика» кафедрасының магистр оқытушысы, Ө.Жәнібеков атындағы Оңтүстік Қазақстан педагогикалық университеті, Байтұрсынов көшесі 13, Шымкент қ., Қазақстан.

Алипбекова Ж.К. – PhD, «физика» кафедрасының аға оқытушысы, жаратылыстану ғылымдары мен педагогика факультеті, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Тәуке хан даңғылы 5, Шымкент 160012, Қазақстан.

Төлеуханова Ж.Т. – хат-хабар авторы, КЕАҚ «Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» Халықаралық Инженерия Мектебінің аға оқытушысы, Серікбаев көшесі 19, 070004, Өскемен, Қазақстан

Пазылбек С.А. – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Математика и информатика», Университет имени Ж.А. Ташенева, проспект Кунаева, 21, 160012, Шымкент, Казахстан.

А. Карейва – академик, профессор, декан факультета химии и геонаук, Вильнюсский университет, ул. Наугардуко 24, LT-03225, Вильнюс, Литва.

Жакупбаев Б.Е. – PhD, ассоциированный профессор, главный научный сотрудник Инженерно-технологического хаба, профессор кафедры «Нефтяное и строительное производство» Университета дружбы народов имени академика А.Куатбекова, улица Толе би, 32, 160000, Шымкент, Казахстан.

Ескермесов Д.К. – PhD, ассоциированный профессор Центра физики, ведущий научный сотрудник Международной школы инженерии НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева», ул. Серикбаева, 19, 070004, Усть-Каменогорск, Казахстан.

Абдиқадыр Б.З. – PhD, старший преподаватель кафедры физики, Южно-Казахстанский педагогический университет им. О. Жанибеков, ул. Байтұрсынова, 13, 160012, Шымкент, Казахстан.

Катбаева М.Т. – старший преподаватель кафедры «Математика и информатика», Университет имени Ж.А. Ташенева, проспект Кунаева, 21, 160012, Шымкент, Казахстан.

Муратбекова У.А. – преподаватель кафедры «Математика», Южно-Казахстанский педагогический университет имени О. Жанибекова, Шымкент, Казахстан, ул. Байтұрсынова, 13, г. Шымкент, Казахстан.

Алипбекова Ж.К. – PhD, старший преподаватель кафедры «Физика», факультет естественные науки и педагогика, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауезова, просп. Тауке хана 5, Шымкент 160012, Казахстан.

Төлеуханова Ж.Т. – автор для корреспонденции, старший преподаватель Международной школы инженерии НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева», ул. Серикбаева 19, 070004, Усть-Каменогорск, Казахстан.

Pazylbek S.A. – PhD, Associate Professor, Department of "Mathematics and Informatics", Tashenev University, Kunaev Avenue 21, 160012, Shymkent, Kazakhstan.

Kareiva A. – Academician, Professor, Dean of the Faculty of Chemistry and Geosciences, Vilnius University, Naugarduko Str. 24, LT-03225, Vilnius, Lithuania.

Zhakipbayev B.Ye. – PhD, Associate Professor, Chief Researcher, Engineering and Technology Hub, Professor, Department “Oil and Construction Production”, Peoples' Friendship University named after Academician A. Kuatbekov, Tole bi Str. 32, 160000, Shymkent, Kazakhstan.

Yeskermessov D.K. – PhD, Associate Professor, Center of Physics, Leading Researcher, International School of Engineering of the NJSC “D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University”, 19 Serikbayev str., 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

Abdikadyr B.Z. – PhD, Senior lecturer, Department of Physics, South Kazakhstan Pedagogical University named after O. Zhanibekov, Baitursynov str. 13, 160012, Shymkent city, Kazakhstan.

Katbayeva M.T. – Senior Lecturer, Department of "Mathematics and Informatics", Tashenev University, Kunaev Avenue 21, 160012, Shymkent, Kazakhstan.

Muratbekova U.A. – Lecturer, Department of Mathematics, South Kazakhstan Pedagogical University named after O. Zhanibekov, Baitursynov str.13, Shymkent, Kazakhstan.

Alipbekova Zh.K. – PhD, Senior lecturer, Department of Physics, M. Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Avenue 5, Shymkent 160012, Kazakhstan.

Toleukhanova Zh.T. – correspondence author, project manager, Senior lecturer, International School of Engineering of the NJSC “D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University”, 19 Serikbayev str., 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



ХҒТАР 29.15.39

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-158-176>

Ғылыми мақала

Көп нуклондық берілу реакцияларын зерттеу үшін SHELS кинематикалық сепараторын және GABRIELA детекторлық жүйесін пайдалану

Б.С. Сайлаубеков^{*1,2,3,5}, А.И. Свирихин^{3,4}, М.С. Тезекбаева^{1,3,4,5}, Х.М.Девараджа^{1,3},
А.Қ. Әжібеков^{1,3}, А.В. Исаев^{3,4}, Р.С. Мухин³, Ю.А. Попов^{3,4}

¹Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

³Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей

⁴Дубна мемлекеттік университеті, Дубна Ресей

⁵Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

(E-mail: bsailaybekov@jinr.ru)

Аңдатпа. Біріккен ядролық зерттеулер институтының (БЯЗИ) Ядролық реакциялар Зертханасында (ЯРЗ) SHELS сепараторында $Z \geq 82$ болатын ауыр ядролардың жаңа изотоптарын синтездеу, олардың радиоактивті ыдырау қасиеттерін және түзілу көлденең қималарын зерттеу бойынша тәжірибелер жүргізілуде. Бұл зерттеулердің мақсаты – радиоактивті ыдырау қасиеттері мен ауыр ядролардың қалыптасу процестерін анықтайтын ауыр элементтер ядроларының құрылымындағы жаңа заңдылықтарды зерттеу. Бұл зерттеулер ядролық тұрақтылықтың теориялық модельдерін жетілдіру, ұзақ өмір сүретін аса ауыр изотоптарды анықтау және ядролық технологиялар саласындағы практикалық қосымшаларды әзірлеу үшін аса маңызды.

Жұмыста негізгі назар тәжірибе әдістемесіне – көп нуклондық берілу реакцияларын зерттеу үшін GABRIELA детекторлық жүйесі мен SHELS кинематикалық сепараторын қолдануға аударылады.

Атап айтқанда, SHELS сепараторы мен GABRIELA комбинияланған детекторлық жүйесін пайдаланып жүргізілген, нысана ядроларына қарағанда протон саны жоғары ядролардың түзілуіне әкелетін, $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ көп нуклондық берілу реакцияларын зерттеу нәтижелері ұсынылады.

Жылдамдық фильтрі SHELS көмегімен осындай тәжірибелерді жүргізу көп нуклондық берілу реакцияларын зерттеуде кинематикалық сепараторлардың мүмкіндіктерін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, жұмыста сипатталған зерттеу әдістері ауыр және аса ауыр ядролардың радиоактивті ыдырау қасиеттерін тәжірибелік зерттеуде сәтті қолданылып келеді.

Түйін сөздер: кинематикалық сепаратор; детекторлық жүйе; көп нуклондық берілу реакциясы; ауыр ядролар; α -ыдырау.

Жіберілді 06.05.2025. Өзгертілді 02.06.2025. Қабылданды 03.06.2025. Онлайн қол жетімді 25.06.2025.

¹ *хат-хабар авторы

Кіріспе

Ядролық физиканың негізгі мәселелерінің бірі – $Z \geq 100$ аймағындағы жаңа нуклидтердің қасиеттері, $Z \geq 82$ аймағында β -тұрақтылық сызығынан алыс орналасқан жаңа ядролардың қасиеттері мен ауыр ядролар құрылымының заңдылықтарын зерттеу бойынша деректер алу. Бұл тақырып ядролық материяның макро-микроскопиялық қасиеттерін зерттеу, бұл қасиеттердің ядроның ішкі құрылымымен байланысын анықтау, радиоактивті ыдыраудың жаңа экзотикалық түрлерін іздеу, ауыр элементтердің тұрақтылығын зерттеу және аса ауыр ядроларды синтездеудің жаңа тәсілдерін табу мақсатында өзекті болып табылады.

Экзотикалық ядролар әдетте нысананың фрагментациясы немесе бөлінуі арқылы, сондай-ақ кулондық кедергі энергиясы деңгейіндегі толық бірігу реакцияларында алынады. Бұл әдістер мен сәулелердің қол жетімді интенсивтілігі нуклидтер кестесінің қазіргі шекараларын анықтайды. Зерттелмеген аймақтарға жетудің тағы бір тәсілі – көп нуклондық берілу (КНБ) реакциялары. Принцип бойынша, олар $Z > 92$ болатын нейтрондық-артық және нейтрондық-тапшылық изотоптарды алуға мүмкіндік береді. Бұл зерттеулер әлемнің түрлі зертханаларында өзектілікке ие болды. Тиісті бөліп алу және тіркеу әдістері, сондай-ақ теориялық базалар әзірленуде. Қазіргі таңға дейін алынған нәтижелер КНБ реакцияларының негізінен жаңа трансурани изотоптарын синтездеу үшін перспективті әдіс екенін көрсетті.

Қазіргі уақытта $Z \geq 82$ болатын, тұрақтылық сызығының нейтрондық және протондық шекараларына жақын немесе сол бағытта орналасқан элементтердің экзотикалық изотоптарын алу үшін фрагментация, уату, КНБ және ауыр ядролардың толық бірігу реакцияларын пайдалану ең тиімді әдістер болып табылады. Трансурани ядроларының көпшілігі әдетте ауыр иондармен бірігу реакцияларында алынады. Алайда, тұрақтылық алқабының нейтрондық-артық жағындағы ауыр және аса ауыр изотоптар бірігу реакциялары арқылы алуға келмейді. Бұл ауыр ядролар аймағында нейтрондар санының протондар санына қатынасы өсіп, $A = 250$ аймағында 1.6 мәніне жетуімен түсіндіріледі. Бұл өзгерісті ядролық күштердің қысқа қашықтықта әсер ету сипатын және массалық сан өскен сайын протондардың кулондық әсерінің артуын ескере отырып түсіну оңай. Ауыр ядролар энергетикалық тұрғыдан тұрақты болу үшін протондар санына (Z) қарағанда нейтрондар санының (N) көп болуы тиіс. Қазіргі сәтте фермийден оганесонға дейінгі элементтердің тәжірибелік синтезделген изотоптары негізінен нейтрондық-тапшылық болып табылады.

Бүгінгі таңда сәтті тәжірибелік зерттеулер [1-5] мен жаңа модельдік есептеулер [6-8] ауыр иондардың үдетілген сәулелері мен ауыр ядролы нысаналар арасындағы КНБ реакциялары арқылы ауыр экзотикалық ядроларды синтездеуге жаңа мүмкіндіктер ашып отыр. Жақында SHIP (Separator for Heavy Ion reaction Products) [9] жылдамдық фильтрінде өткізілген зерттеулер [4-5] терең серпімсіз КНБ реакцияларының жаңа нейтрондық-тапшылық және нейтрондық-артық изотоптарды синтездеу үшін пайдаланылуы мүмкіндігін растады. Әртүрлі модельдермен жасалған КНБ реакцияларының теориялық болжамдары [7-8] $Z \geq 104$ болатын нейтрондық-артық өте ауыр ядроларды синтездеуді орталық соқтығысуларға (терең серпімсіз соқтығысуларға)

жақын аймақта жүзеге асыруға болатынын анық көрсетеді. Ядролар картасында нейтрондық-артық жағында орналасқан белгілі $Z \geq 104$ болатын ядролардың көпшілігі тікелей синтезбен алынбаған, олар ыстық бірігу реакцияларында [10] синтезделген ауыр ядролардың α -ыдырау тізбектерінің өнімдері болып табылады. КНБ реакциялары осы және басқа да жаңа ядроларды тікелей синтездеудің әдісіне айналуы мүмкін. КНБ реакцияларының қолданылуы туралы толық ақпаратты [5] жұмысынан табуға болады.

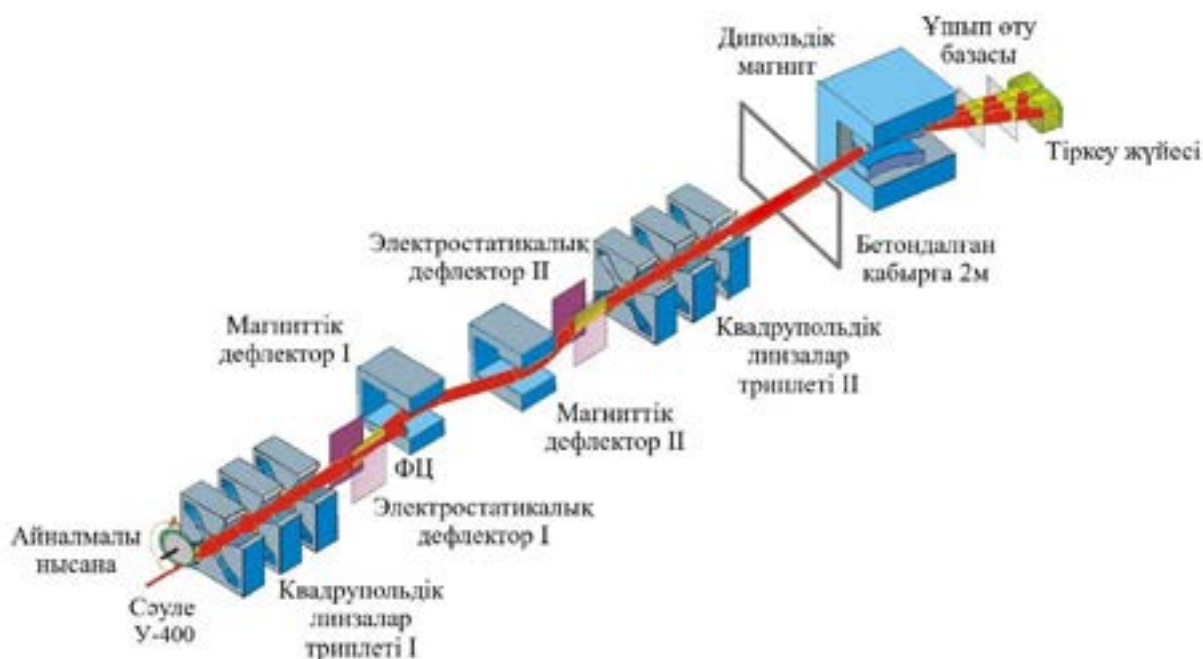
Зерттеу әдіснамасы

1. Тәжірибелік қондырғы сипаттамасы

SHELS кинематикалық сепараторы

SHELS [13] (Separator for Heavy Element Spectroscopy) кинематикалық сепараторы QQQ-E-D-D-E-QQQ сызбасы бойынша жобаланған (мұнда Q – квадрупольдік линза, E – электростатикалық дефлектор, D – дипольдік магнит), БЯЗИ ЯРЛ-дағы ауыр ионды сәулелермен қамтамасыз ететін У-400 үдеткішінің 3-арнасында орналасқан. Бұл қондырғы ВАСИЛИСА [11-12] электростатикалық сепараторын терең жаңарту нәтижесінде пайда болды, онда ядролық реакция өнімдерін электрлік қаттылық бойынша емес, SHIP жылдамдық фильтріне ұқсас, жылдамдық бойынша бөліп алу енгізілді.

Екі кезеңді сепарация және фокустайтын элементтері бар схеманы таңдау нысана ядросы мен ауыр иондардың асимметриялық комбинациясынан туындайтын толық бірігу реакцияларының өнімдерін тасымалдау тиімділігін арттыру қажеттілігімен байланысты. Бұл фондық өнімдерді жоғары деңгейде төмендетумен қатар, фокальдік жазықтықта күрделі детекторлық жүйелерді қолдануға мүмкіндік береді. Сепаратор сызбанұсқасы 1-суретте көрсетілген, ал негізгі сипаттамалары 1-кестеде келтірілген.

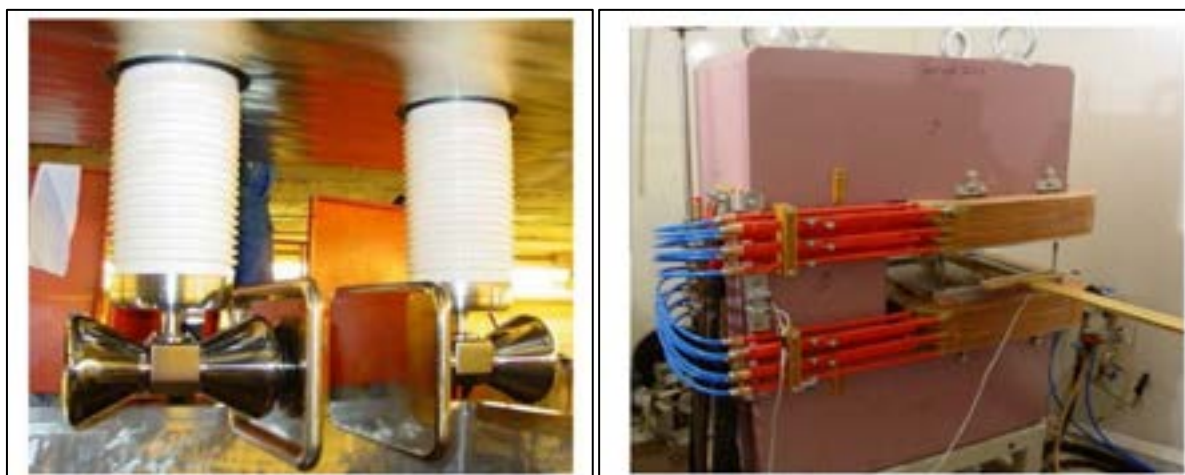


1-сурет. SHELS сепараторының сызбанұсқасы [13]

Ескерту: [13] деректер негізінде құрастырылған

Сепараторда зарядталған иондардың үдетілген сәулесімен сәулеленетін айналмалы нысана бар. Магниттік квадрупольдік линзалардың бірінші триплеті нысанадан шығатын реакция өнімдерін фокустау үшін арналған. Сепарациялайтын бөлігі екі элементтен тұрады, олар тоғысатын-айқасқан электрлік және магниттік өрістер, бұл "жылдамдық фильтрі" ретінде белгілі. Нысананың ядроларымен әрекеттеспейтін сәуле иондары бірінші дефлекторда ауытқымайды және Фарадей цилиндрінде тежеледі.

Сепаратордағы жылдамдық фильтрлері айналы-симметриялы түрде орналасқан. Әрбір фильтр дипольдік магнит пен екі параллель пластинадан тұратын электростатикалық дефлектордан тұрады (2-сурет). Фильтрлердің осылай орналасуы кезінде магнит өрісіндегі ауытқу бұрышы электр өрісіндегі ауытқу бұрышына сызықты тәуелді болады. Дефлекторлардың кернеуін және дипольдердің ток күшін реттеу арқылы ауытқу бұрыштарын өзгерте отырып, ұшып өтетін иондарды дисперсия және жылдамдық диапазоны бойынша бөліп алуға болады. Иондардың екі жылдамдық фильтрі арқылы ұшу траекториясы S-пішінді болады.



2-сурет. Сол панель: электростатикалық дефлектор; Оң панель: дипольдік магнит [13]

Ескерту: [13] деректер негізінде құрастырылған

Электростатикалық дефлекторлардың пластиналарын бекіту конструкциясы олардың арасындағы қашықтықты 10 см-ден 20 см-ге дейін реттеуге мүмкіндік береді. Симметриялы реакцияларды, мысалы, $^{136}\text{Xe} + ^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{272}\text{Hs}^*$, зерттеу кезінде электростатикалық өрістің кернеулігін 40 кВ/см-ге жеткізу үшін пластиналарды 10 см-ге дейін жылжытуға болады. Асимметриялы комбинациялар үшін пластиналар арасындағы қашықтық 20 см деңгейінде бекітіледі, бұл кезде дефлекторлардың тиімді ұзындығы 66 см-ді құрайды.

Екінші квадрупольдік линзалар триплеті қайтарма ядроларды фокальдік детекторларға фокустау үшін арналған. Фокальдік жазықтықта детекторлық жүйе орналасқан, оның алдында қосымша 8-градустық дипольдік магнит орнатылған. Бұл магнит қайтарма ядроларды (ҚЯ) шашыраған сәулелерден қосымша тазарту үшін қолданылады. Детекторлық жүйе мен үдетілген сәуле орналасқан эксперименттік залдың арасы 2 метрлік

бетон қабырғамен бөлінген, бұл өз кезегінде детектор орналасқан аймақтағы фондық белсенділікті айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді. Қондырғының ион-оптикалық осінің ұзындығы (нысанадан детекторларға дейін) 12.8 метрді құрайды, ал реакция өнімдерінің ұшу уақыты бірнеше микросекундқа тең. Үдетілген ^{48}Ca және ^{50}Ti сәулелерімен реакциялар нәтижесінде пайда болатын ҚЯ-ды тасымалдау тиімділігі 20%-дан 40%-ға дейін жетеді [14]. Жеңіл ^{22}Ne ионы үшін (асимметриялық комбинациялар) жаңартылған сепараторда ҚЯ-ды тасымалдаудың тәжірибе түрінде анықталған тиімділігі (3.5–6)% құрайды [15]. Сепаратордың толық сипаттамасын [13] жұмысынан табуға болады.

Ертеректе SHELS сепараторында КНБ реакцияларын зерттеу бойынша тесттік тәжірибелер жүргізілді. Осы тәжірибелерде алынған ең төменгі қима ≈ 10 пб/ср (SHELS қабылдау бұрышына сәйкес) шамасында болды, ол 5 сағаттық сәулелену уақытында қол жеткізілді [5]. SHELS-тің деректерді айтарлықтай тез жинайтын жүйесі жартылай ыдырау периоды ~ 1 мкс-қа дейін болатын ядроларды тіркеуге мүмкіндік береді. Ядроларды тіркеу SHELS сепараторының фокальдік жазықтығында орналасқан жоғары сезімтал GABRIELA детекторлық жүйесі арқылы жүзеге асырылады.

1-кесте. SHELS сепараторының негізгі бөліктерінің сипаттамалары [13]

Квадрупольдік линзалар	
Өрістің максималды градиенті	13 Т/м
Эффективті ұзындығы	38 см
Апертураның радиусы	10 см
Электростатикалық дефлектор	
Өрістің максималды кернеулігі	40 кВ/см
Эффективті ұзындығы	65.7 см
Пластиналар арасындағы қашықтық	10-20 см
Номиналды ауытқу бұрышы	8°
Дипольдік магниттер D22	
Өрістің максималды градиенті	0.8 Т
Эффективті ұзындығы	59.7 см
Полюстер арасындағы алшақтық	13.5 см
Номиналды ауытқу бұрышы	22°
Дипольдік магнит D8	
Өрістің максималды градиенті	0.2 кВ/см
Эффективті ұзындығы	58.8 см
Полюстер арасындағы алшақтық	14 см
Номиналды ауытқу бұрышы	8°

Ескерту: [13] деректер негізінде құрастырылған

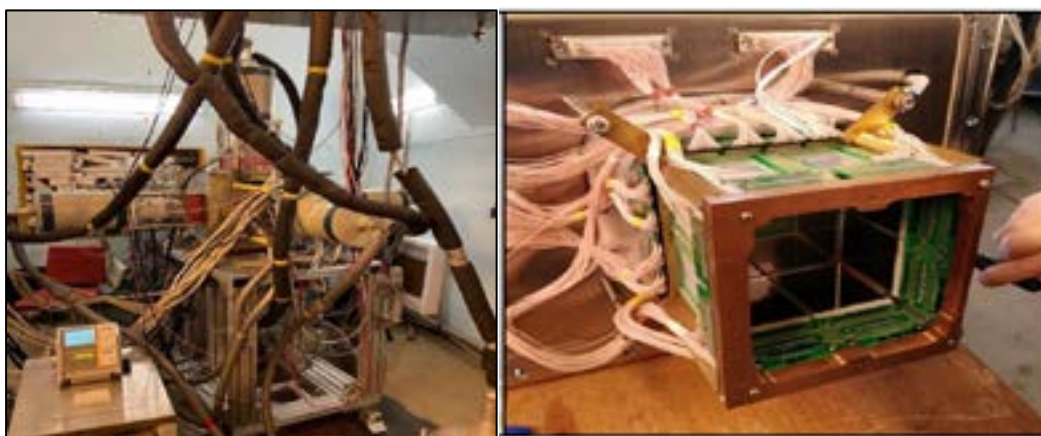
GABRIELA детекторлық жүйесі

Заманауи тәжірибелердің өзекті мәселесі – үдетілген ауыр иондар мен нысана ядролары арасындағы реакция нәтижесінде пайда болатын өнімдер шығаратын α -бөлшектер

мен γ -кванттарды тіркеу болып табылады. Бұл тарауда SHELS кинематикалық сепараторындағы тәжірибелерде кремнийлік және германийлік жартылай өткізгіш детекторларын қолдану қарастырылады. Жоғары сезімтал детекторлық жүйенің негізгі міндеті – сепаратордың фокальдік жазықтығындағы ҚЯ, аналық және ұрпақ (материнское и дочернее) ядролардың α -, β -, γ -ыдырауларын тіркеу болып табылады.

GABRIELA детекторлық жүйесі [16-17] – кремнийлік және германийлік детекторлардан тұратын күрделі құрылым (3-сурет, сол жақ панель, толық жинақ). Оған 4п геометриясына жақын тік бұрышты «шұңқыр» құрайтын кремний детекторлары кіреді. Бұл шұңқырдың түбі фокальдік екі жақты кремнийлік стрипті DSSD (Double-Sided Silicon Strip Detector) детекторы болып табылады. Бұл фокальдік детектордың конфигурациясы 128×128 стриптен тұрады, ал белсенді аймақтың өлшемі $100 \times 100 \text{ мм}^2$, қалыңдығы 500 мкм.

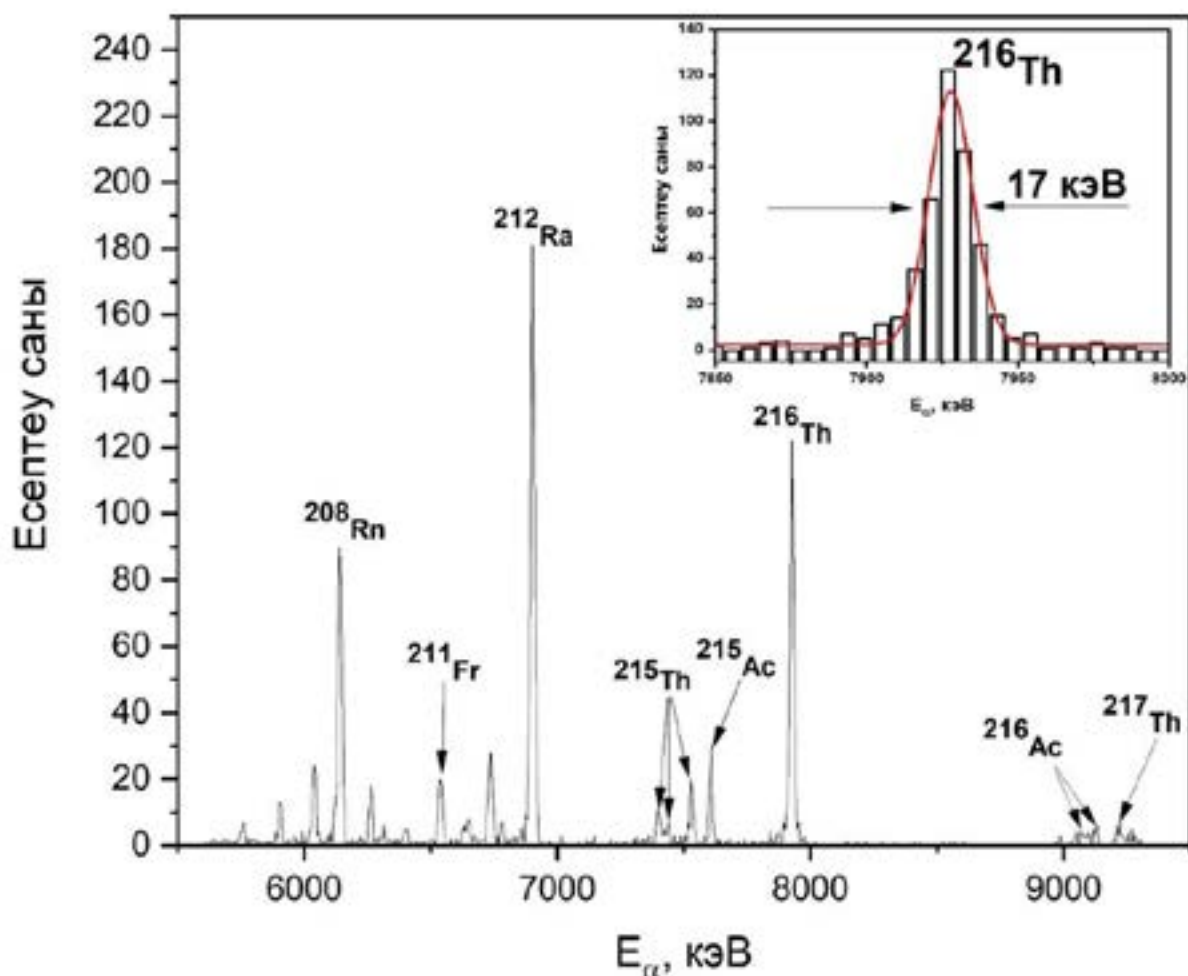
Фокальдік детекторға перпендикуляр сегіз кремнийлік жартылай өткізгіш детекторлары орналасқан (3-сурет, оң жақ панель, кремнийлік шұңқыр). Бүйірлік детекторлардың конфигурациясы 16×16 стрип, өлшемі $50 \times 60 \text{ мм}^2$, қалыңдығы 700 мкм. Олар фокальдік детектордың әр жағында жұптап орнатылған: жалпы 16 стрип параллель және 32 стрип перпендикуляр бағытта.



3-сурет. Сол панель: GABRIELA детектор жүйесінің толық жинағы. Оң панель: Түбінде фокальдік DSSD детекторы бар кремнийлік шұңқыр

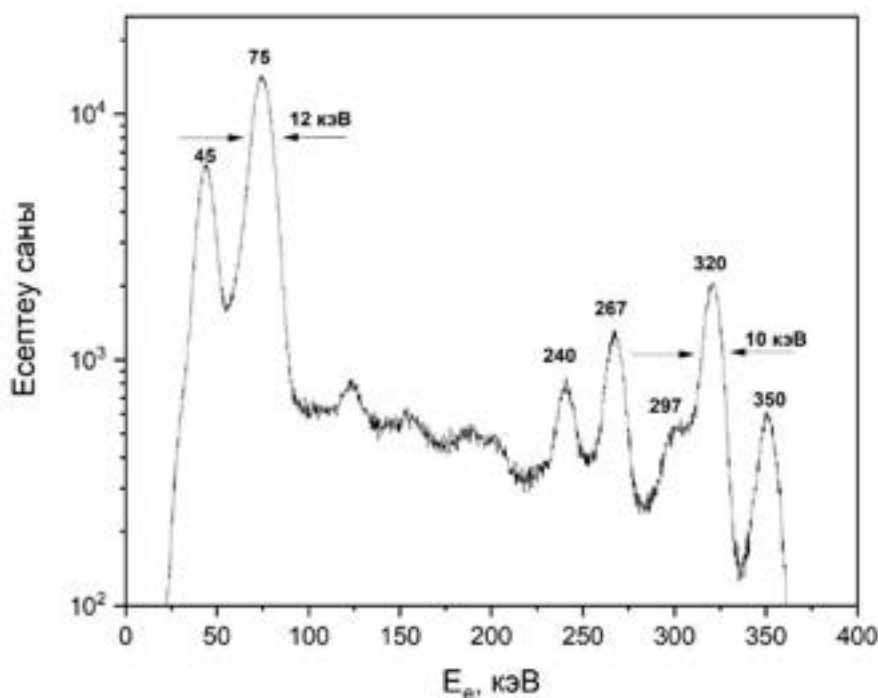
Кремнийлік «шұңқырдың» айналасына өте таза германийден (HPGe) жасалған төрт коаксиалды монокристалды цилиндрлік үлкен көлемді детектор, сонымен қатар, фокальдік DSSD детекторына максималды жақын (артқы жағында) бір Clover-детектор [18] қойылған.

Фокальдік детектордың α -бөлшектерді тіркеу тиімділігі 50% құрайды, ал спонтанды бөліну жарықшақтарының кем дегенде біреуін тіркеу тиімділігі 100% жетеді. Фокальдік DSSD детекторының энергиялық ажыратымдылығы 6–10 МэВ диапазонындағы α -бөлшектер үшін шамамен 15-25 кэВ құрайды. Кремнийлік детекторларды мөлшерлеу үшін түсетін сәуле түріне және эксперимент мақсаттарына байланысты әртүрлі тесттік реакциялар қолданылады. 4-суретте SHELS кинематикалық сепараторындағы $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$ КНБ реакциясы экспериментінде қолданылған $^{50}\text{Ti} + ^{170}\text{Er}$ тесттік реакциясында фокальдік DSSD детекторда тіркелген α -бөлшектердің энергиялық спектрі көрсетілген.



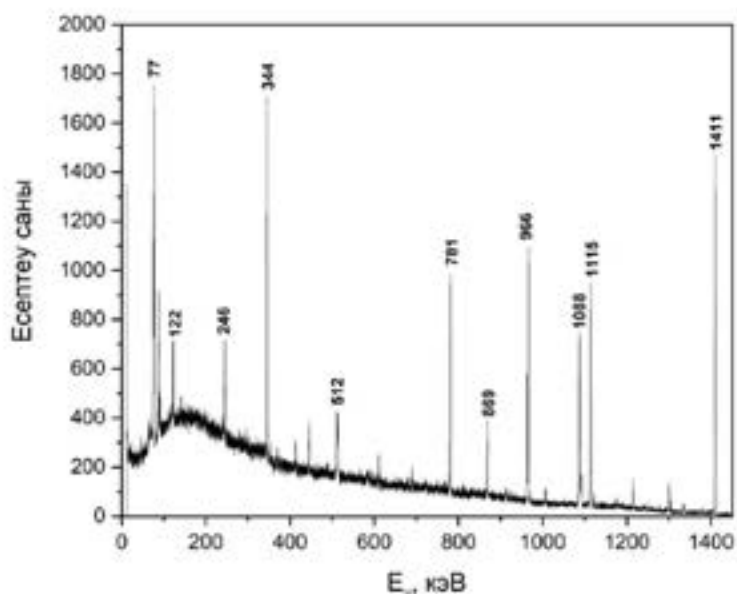
4-сурет. Фокальдік DSSD детекторының бір стрипында тіркелген $^{50}\text{Ti} + ^{170}\text{Er}$ тесттік реакциясының α -бөлшектерінің энергиялық спектрі. Оң жақ жоғары терезеде ^{216}Th (7922 кэВ) шыңының талдауы көрсетілген, энергиялық ажыратымдылық 17 кэВ-ті құрайды

Қосымша сызықтық күшейткіштерді пайдалана отырып, жүйені электрондарды тіркеу режиміне ауыстыруға болады, бұл детекторды β -ыдырау және кешіктірілген нейтрондар эмиссиясы немесе кешіктірілген бөліну сияқты үдерістерді зерттеу үшін қолдануға мүмкіндік береді. Бұл контекстте бүйірлік детекторларды мөлшерлеу үшін ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu стандартты көздері жиі қолданылады. 5-суретте бүйірлік детекторларда ^{133}Ba көзінен тіркелген конверсиялық электрондардың (КЭ) энергиялық спектрі көрсетілген.



5-сурет. Бүйірлік детекторлардың бір стрипында тіркелген ^{133}Ba көзінің конверсиялық электрондарының энергиялық спектрі. Энергиялық ажыратымдылық КЭ үшін 10-12 кэВ-ті құрайды

Германийлік детекторлар ^{60}Co , ^{152}Eu сияқты стандартты көздер арқылы мөлшерленеді. Детекторды қосымша мөлшерлеу және γ -кванттарды тіркеу тиімділігін анықтау үшін белгілі изомерлік ыдырауы бар ядролар түзілетін тесттік реакциялар қолданылады. 6-суретте ^{152}Eu көзінің γ -кванттарының энергиялық спектрі көрсетілген.



6-сурет. ^{152}Eu көзінің γ -кванттарының энергиялық спектрі. Энергиялық ажыратымдылық γ -кванттар үшін 2-3 кэВ-ті құрайды

2. Тәжірибе сипаттамасы

БЯЗИ ЯРЛ-да SHELS сепараторында $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ КНБ реакцияларын зерттеу бойынша эксперименттер жүргізілді. ^{48}Ca , ^{50}Ti және ^{40}Ar ауыр ионды сәулелері У-400 үдеткіші арқылы шығарылды. Айналмалы нысандар ^{208}PbS (^{208}Pb изотопы бойынша тазалық дәрежесі 99.57%) және $^{209}\text{Bi}_2\text{O}_3$ (^{209}Bi изотопы бойынша тазалық дәрежесі 99.99%) 1.5 мкм қалыңдықтағы титандық субстратына жабынды ретінде бекітілді. 2-кестеде қолданылған нысаналардың сипаттамалары және түсетін сәулелердің нысана ортасындағы энергиясы көрсетілген. Эксперименттер мен олардан алынған нәтижелер туралы толық ақпаратты [19] мақаласынан табуға болады. Бұл жұмыста негізгі назар SHELS кинематикалық сепараторының ион-оптикалық элементтерінің баптауларына аударылады.

2-кесте. Қолданылған нысаналардың сипаттамалары және түскен сәулелердің нысана ортасындағы энергиясы

Реакция	$^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$	$^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$	$^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$
Нысана ортасындағы сәуленің энергиясы, МэВ	236 ± 2.4	243 ± 2.4	194 ± 2
Нысана материалы	^{208}PbS	^{208}PbS	Bi_2O_3
Нысана қалыңдығы, мкг/см ²	500 ± 50	437 ± 50	526 ± 50
Нысананың титандық субстрат қалыңдығы, мкм	1.5	1.5	1.5

SHELS жылдамдық фильтрі сәуле осіне қатысты төмен бұрышпен ($\pm 4^\circ$) қозғалған КНБ реакцияларының нысанаға ұқсас өнімдерін ұшу барысында бөліп алу үшін қолданылады. Сәуле-нысана комбинациясына және сәуле энергиясына байланысты нысанаға ұқсас КНБ өнімдерінің жылдамдығы құрама ядро жылдамдығынан v_{CN} шамамен 1.5 есе жоғары болды. SHELS-тің электрлік және магниттік өрістері КНБ реакция нәтижесінде туындайтын жылдамдықтары ($1.1 - 1.8$) v_{CN} болатын өнімдерді бөліп алу үшін бапталды. Басқа жылдамдықтағы реакция өнімдері сәуле тоқтатқышы көмегімен тежелді.

КНБ реакция өнімдерінің нысанадан фокальдік детекторларға трансмиссиясын максимизациялау мақсатында сепаратор элементтерінің оптималды параметрлерін анықтау үшін VASFIT [20] қосымшасы қолданылады. Бұл қосымшада бөлшектердің сепаратор арқылы ұшуын модельдеу үшін Монте-Карло әдісі пайдаланылады. 3-кестеде Q1 - ... - Q6 магниттік квадрупольдік линзалардағы токтың мәндері, E1 – E2 электростатикалық дефлекторларындағы кернеу, D22 магниттік дефлекторларындағы токтар және D8 ауытқытушы дипольдік магниттің тогы көрсетілген. Электростатикалық дефлектор пластиналарында жерге төзімділікті арттыру үшін симметриялы кернеу қолданылады – бір пластинаға оң, ал екіншісіне теріс потенциал беріледі.

3-кесте. SHELS сепараторының ион-оптикалық элементтерінің параметрлері

Ион-оптикалық элемент	$^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$	$^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$	$^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$
Q1	196.4 А	886 А	164.4 А

Q2	148.1 A	777 A	139.2 A
Q3	64.8 A	373 A	59.1 A
Q4	189.1 A	137 A	190.8 A
Q5	429.5 A	351 A	429.1 A
Q6	288.3 A	253 A	288.4 A
E1	(40-160)* кВ	125, 145, 165 кВ	120, 135, 150 кВ
E2	(40-160)* кВ	125, 145, 165 кВ	120, 135, 150 кВ
D22-1	532.1 A	504 A	493.2 A
D22-2	532.1 A	504 A	493.2 A
D8	430 A	449 A	400.3 A

*мәндер 10 кВ қадаммен өзгертіліп отырды

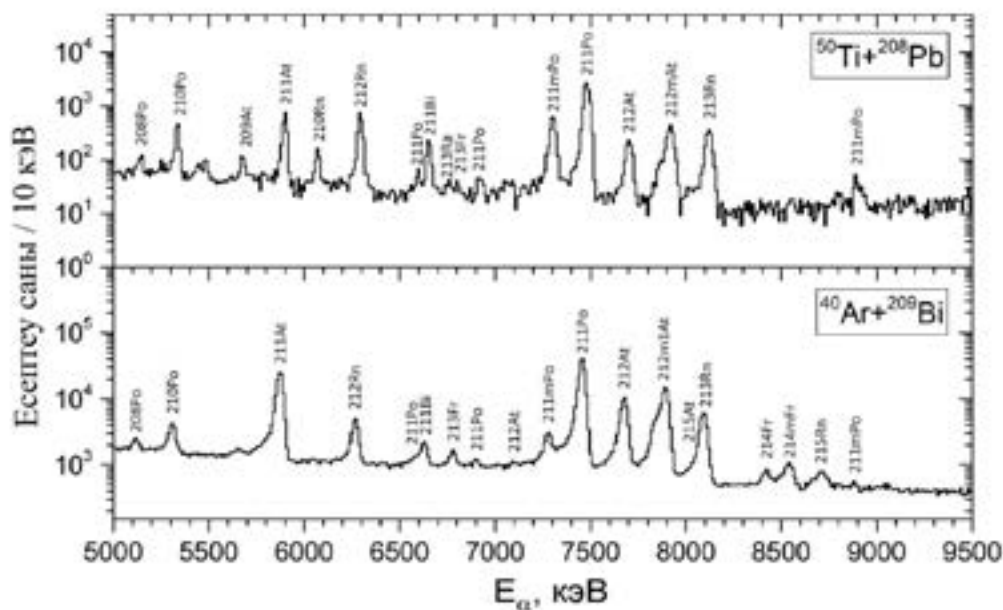
Сепарациядан кейін нысанадан ұшып шыққан және сепаратор арқылы өткен өнімдер сепаратордың фокальдік жазықтығында орналасқан GABRIELA детекторлық жүйесі арқылы тіркеледі. Бұл тәжірибеде сепаратордың детекторлық жүйесі екі старт-стоп уақыттық ұшу детекторынан, кремнийлік жартылай өткізгіш детекторлар жиынтығынан және бір Clover түріндегі γ -детектордан тұрды.

Сепараторда жүргізілетін әдеттегі тәжірибелерде алынатын КНБ реакция өнімдерін сәйкестендіру олардың α -ыдырау энергиясы, өмір сүру ұзақтығы және ұрпақ өнімдерімен корреляциясын табу арқылы жүзеге асырылады. Соңғы жағдайда сәйкестендіру фокальдік жазықтықтағы DSSD детекторының бірдей пикселінде тіркелген және α -ыдыраудың генетикалық тізбегіне жататын ядролардың уақыт бойынша корреляцияланған бірізді α -ыдыраулары арқылы жүргізіледі.

Спонтанды бөліну изотоптарының қасиеттерін зерттеуге бағытталған тәжірибелерде негізгі сәйкестендіру әдісі ретінде фокальдік DSSD детекторында бөліну жарықшақтарына тән үлкен амплитудалы сигналдарды (30-40 МэВ-тан жоғары) тікелей бақылау қолданылады. «ҚЯ-жарықшақ» корреляциясын іздеу әдісі бөлінетін ядролардың жартылай ыдырау периоды анықтауға және нысананың қоспа изотоптарында пайда болатын спонтанды бөлінудің қажетсіз өнімдерінен құтылуға мүмкіндік береді.

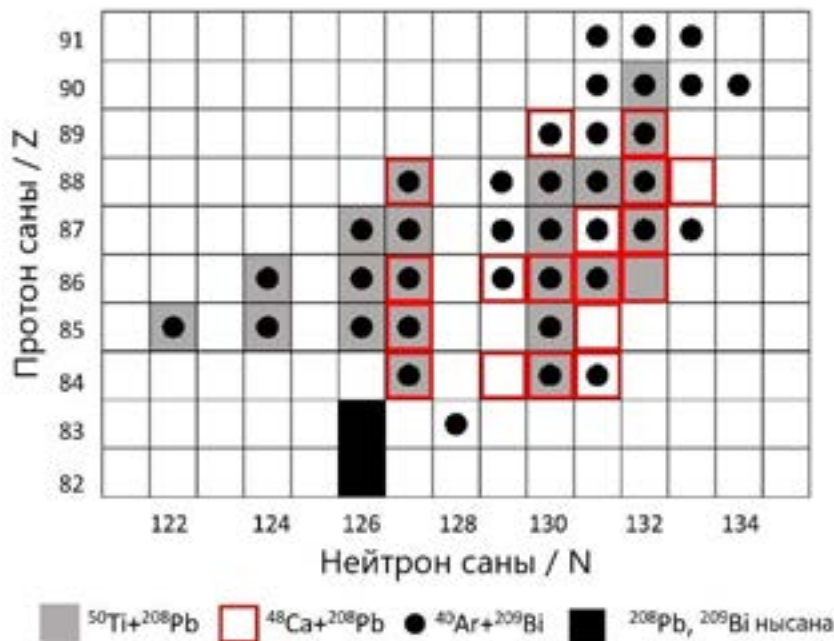
Нәтижелер мен талқылау

$^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$ және $^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}$ КНБ реакцияларында өлшенген α -спектрлер 7-суретте көрсетілген [19]. Олар қорғасын (Pb) және висмут (Bi) нысана ядроларынан тыс түзілген әртүрлі ядролардың орналасқанын көрсетеді. Ядроларды сәйкестендіру және іздеу үшін ҚЯ- α және α - α корреляциялық талдау әдісі қолданылды. Үш КНБ реакциялары нәтижесінде тіркелген массалары нысана ядроларынан ауыр өнімдердің жиынтығы 8-суретте берілген. Протондар саны нысана ядроларына қарағанда сегізге, ал нейтрондар саны жетіге дейін артық болатын изотоптар байқалды. Бұл жерде атап өтетін нәрсе: КНБ реакция өнімдеріндегі нейтрондар санына тек қана берілген нейтрондар саны ғана емес, сонымен қатар қозған бастапқы КНБ өнімдерінен шыққан нейтрондар да кіреді.



7-сурет. $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ и $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ КНБ реакцияларында алынған нысанаға ұқсас өнімдердің өлшенген α -спектрлері. Деректер $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ КНБ реакция өнімдері үшін 11.4 сағат және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ реакциясы үшін 18 сағат бойы жиналды [19]

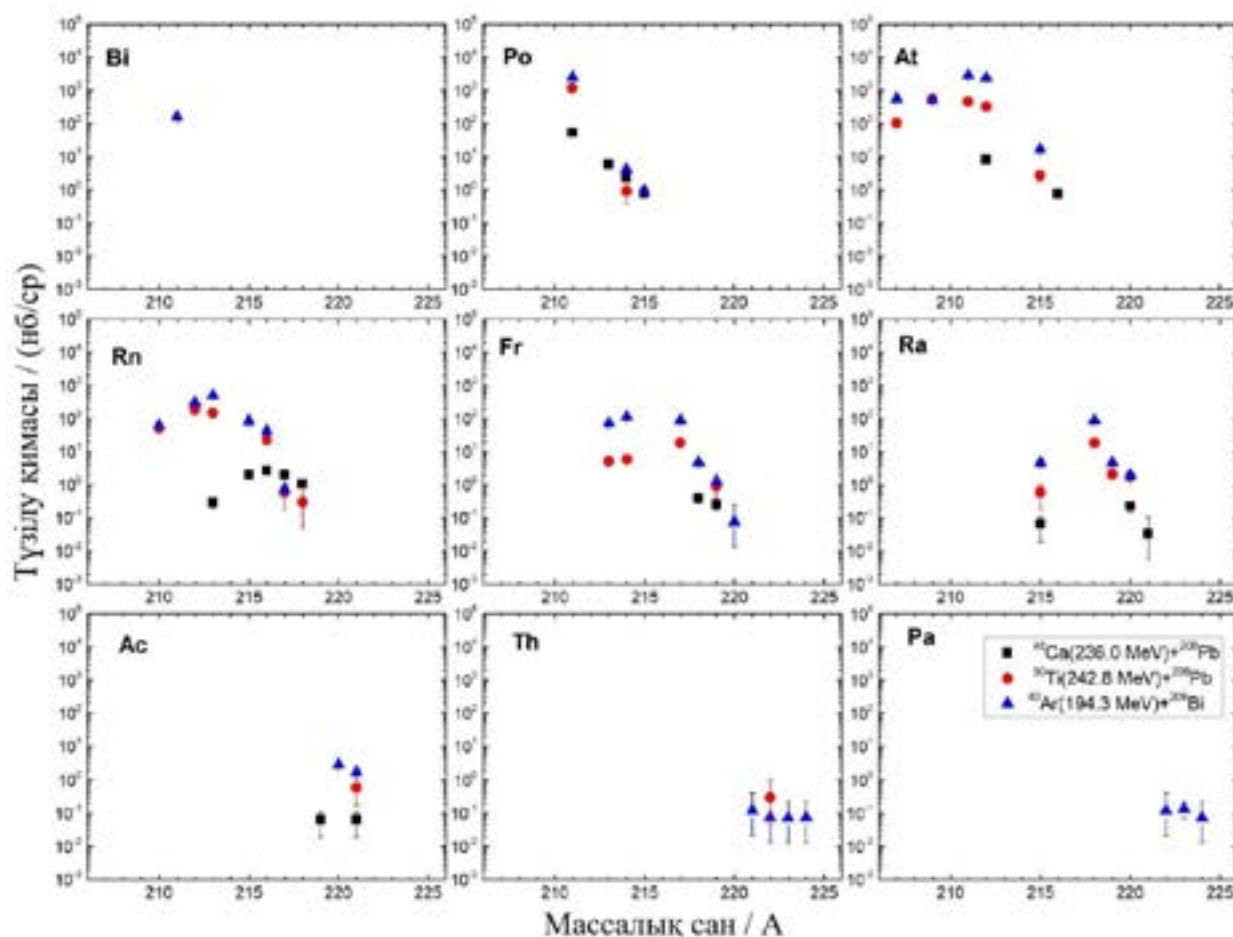
Ескерту: [19] деректер негізінде құрастырылған



8-сурет. Ядролар диаграммасында $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ (сұр түсті шаршылар), $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ (қызыл ашық шаршылар) және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ (қара шеңберлер) КНБ реакциялары нәтижесінде тіркелген нуклидтердің орналасу аймағы көрсетілген. Боялған қара шаршылар ^{208}Pb және ^{209}Bi нысаналарының орналасқан жерлерін көрсетеді [19]

Ескерту: [19] деректер негізінде құрастырылған

Сондай-ақ, зерттеліп отырған КНБ реакциялары кезінде туындайтын SHELS сепараторының бұрыштық акцептансына сәйкес болатын (15 мср) өнімдердің түзілу қималары алынды (9-сурет). Өлшенген ең төменгі қима 50 пб/ср деңгейінде болды, ондай мән өнімдердің жылдамдығы, сәуле интенсивтілігі және нысана қалыңдығы параметрлеріне сәйкес бес сағаттық дерек жинау кезінде қол жеткізілді.



9-сурет. $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{48}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ КНБ реакцияларында алынған Bi-тан Pa-қа дейінгі элементтердің изотоптары үшін массалық саннан тәуелді КНБ өнімдерінің түзілу қималары. Суретті оңай қабылдау үшін нүктелер сызықтармен қосылды [19]

Ескерту: [19] деректер негізінде құрастырылған

Қорытынды

$^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ және $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ КНБ реакцияларының өнімдерін SHELS сепараторы көмегімен зерттеу бұл әдістің КНБ сирек ауыр өнімдерін бақылау үшін потенциалын көрсетті. SHELS арнайы КНБ реакцияларын зерттеуге арналмаса да, ол қималары 1 нб дейін болатын өнімдерді өлшеуге болатын сезімталдығын көрсетті. Бұл басқа әдістермен алынған нәтижелерден бірнеше есе жоғары. Осы жұмыста қолданылған инструменталды

әдістерді ауыр ион үдеткіштерінде КНБ реакциялары нәтижесінде алынатын өте ауыр элементтердің спонтанды бөліну қасиеттерін зерттеу үшін сәтті қолдануға болады деп сеніммен айта аламыз.

SNELS сепараторында жасалған GABRIELA детекторлық жүйесі трансурани ядролардың құрылымын зерттеу бойынша тәжірибелердің тиімділігін шетелдік аналогтармен салыстырғанда айтарлықтай арттырды. Бұл жүйе трансурани ядролардың құрылымын зерттеуге және жаңа ауыр нуклидтерді тіркеуге арналған күшті комбиниралған әдіс болып табылады. Жобада қойылған міндеттерді орындау заманауи теориялар мен есептеу әдістерінің физикалық негізділігін бағалау үшін қажетті маңызды ақпаратты алуды қамтамасыз етеді. Ұсынылған эксперименталды әдістер мен тәсілдер физикалық және техникалық тұрғыдан ең заманауи болып табылады. Айтарлықтай қаржылық және интеллектуалдық салымдар қажет болса да, ауыр иондар физикасындағы бұл бағыттар динамикалық түрде дамуда, сонымен қатар осындай зерттеулер жүргізуге қажетті үдеткіштік базасы бар ядролық-физикалық орталықтарда жоғары басымдылыққа ие.

БЯЗИ ЯРЛ-да КНБ реакцияларының өнімдерін сепарациялау және тіркеу әдістерін дамыту аясында, бірігу/берілу реакцияларынан алынатын өнімдердің жоғары трансмиссиясына бағытталған, сондай-ақ ауыр ядроларды тіркеудің заманауи әдістерін қамтитын У-400 үдеткішін жаңартумен (У-400Р) қатар STAR [21] (Separator for TransActinide Research) деп аталатын жаңа кинематикалық сепараторды жасау идеясы ұсынылды. Негізінен, жаңа сепаратор сәулеленудің жоғары интенсивтілігіне, фонды жоғары деңгейде басуға, толық бірігу және КНБ реакцияларында түзілетін ауыр және өте ауыр ядроларды жоғары дәрежеде өткізу қабілетіне, сондай-ақ барлық ыдырау модалары мен ядролардың массаларын өлшеуге бейімделген болады деп жоспарлануда.

Сонымен қатар, STAR сепараторын түсетін сәуленің осіне қатысты бұруға мүмкіндік болады, бұл өз кезегінде КНБ реакцияларында кең бұрыштық таралымда туындайтын өнімдерді зерттеуге идеалды болып есептеледі. Сепарациядан кейін, ізделінетін ядролардың ыдырау қасиеттеріне сүйене отырып, корреляциялық талдау әдісін қолданып, имплантацияланған ядроларды анықтауға мүмкіндік беретін детекторлық жүйелер көмегімен зерттеулер жүргізуге болады.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің (№АР19577048 грант) қаржылық қолдауымен жүзеге асырылуда.

Авторлардың қосқан үлесі

Сайлаубеков Б.С. – жұмыстың барлық аспектілері үшін жауапты болуға келісім беру, мәтін жазу және оның мазмұнын сыни тұрғыдан қарау, зерттеу нәтижелерін жинау, талдау, зерттеу жұмысын жүргізу.

Свирихин А.И. – деректердің дұрыстығына, мақаланың барлық бөліктерінің тұтастығына байланысты мәселелерді реттеу, жариялау үшін мақаланың соңғы нұсқасын бекіту, зерттеу жұмысын жүргізу.

Тезекбаева М.С. – идея қалыптастыру, негізгі мақсаттар мен идеяларды дамыту, мақаланың рәсімделуіне елеулі үлес, зерттеу жұмысын жүргізу.

Девараджа Х.М. – зерттеу нәтижелеріне статистикалық талдау жүргізу, деректерді және дәлелдемелерді жинау, алынған деректерді түсіндіру, зерттеу жұмысын жүргізу.

Әжібеков А.Қ. – зерттеу жұмыстарын қаржыландыру мәселелерін реттеу, деректердің дұрыстығына көз жеткізу.

Исаев А.В. – мақаланың барлық бөліктерінің тұтастығына байланысты мәселелерді реттеу және мазмұнын сыни тұрғыдан қайта қарау, деректердің дұрыстығына көз жеткізу, зерттеу жұмысын жүргізу.

Мухин Р.С. – мәтіннің мазмұнын сыни тұрғыда қайта қарау, деректердің біртұтастығына мән беру.

Попов Ю.А. – зерттеу жұмысын өткізуге дайындық жұмыстарын жасау және техникалық тұрғыда қамтамасыз ету, зерттеу жұмысын жүргізу.

Әдебиеттер тізімі

1. D.C. Hoffman et al., *Excitation functions for production of heavy actinides from interactions of ^{40}Ca and ^{48}Ca ions with ^{248}Cm* , Phys. Rev. C 31(5), p.1763-1769 (1985). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.31.1763>
2. A. Türler et al., *Actinide production from the interactions of ^{40}Ca and ^{44}Ca with ^{248}Cm and a comparison with the $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ system*, Phys. Rev. C 46(4), p.1364-1382 (1992). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.46.1364>
3. E. K. Hulet et al., *Spontaneous fission properties of ^{258}Fm , ^{259}Md , ^{260}Md , ^{258}No and $^{260}\text{[104]}$: Bimodal fission*, Phys. Rev. C 40(2), p.770–784 (1989). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.40.770>
4. S.Heinz et al., *Synthesis of new transuranium isotopes in multinucleon transfer reactions using a velocity filter*, Eur. Phys. J. A 52 (3), p.1-9 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16278-7>
5. H.M. Devaraja et al., *The Study of Multi-Nucleon Transfer Reactions for Synthesis of New Heavy and Superheavy Nuclei*, Physics of Particles and Nuclei Letters 19(2), p.693–716 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477122060085>
6. V.Zagrebaev and W.Greiner, *New way for the production of heavy neutron-rich nuclei*, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 35(12), p.125103 (2008). DOI: [10.1088/0954-3899/35/12/125103](https://doi.org/10.1088/0954-3899/35/12/125103)
7. V.Zagrebaev and W.Greiner, *New ideas on the production of heavy and superheavy neutron rich nuclei*, Nuclear Physics A 834(1-4), p.366c-369c (2010). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2010.01.041>
8. V. V. Saiko and A. V. Karpov, *Analysis of multinucleon transfer reactions with spherical and statically deformed nuclei using a Langevin-type approach*, Phys. Rev. C 99(1), p.014613 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.99.014613>
9. G. Münzenberg, W. Faust, S. Hofmann, P. Armbruster, K. Güttner, H. Ewald, *The velocity filter SHIP, a separator of unslowed heavy ion fusion products*, Nuclear Instruments and Methods 161(1), p.65-82 (1979). DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90362-8](https://doi.org/10.1016/0029-554X(79)90362-8)
10. Yu.Ts. Oganessian and V.K. Utyonkov, *Superheavy nuclei from ^{48}Ca -induced reactions*, Nuclear Physics A 944(3), p.62-98 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2015.07.003>
11. Yeremin A. V. et al., *The Vassilissa facility for electrostatic separation and study of complete fusion reaction products*, Nucl. Instr. Meth. A 274(2), p.528-532 (1989). DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)90185-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)90185-X)
12. Yeremin A. V. et al, *The kinematic separator VASSILISSA performance and experimental results*, Nucl. Instr. Meth. A 350(1), p.608-617 (1994). DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)91265-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)91265-3)

13. Popeko A.G. et al., *Separator for Heavy Element Spectroscopy - Velocity filter SHELS*, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. Elsevier B 376(2), p.140–143 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.03.045>
14. Yeremin A. V. et al., *Experimental tests of the modernized VASSILISSA separator (SHELS) with the use of accelerated 50Ti ions*, Phys. Part. Nucl. Lett. 12(1), p.43–47 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477115010082>
15. Yeremin A. V. et al., *First experimental tests of the modernized VASSILISSA separator*, Phys. Part. Nucl. Lett. 12(1), p.35–42 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477115010070>
16. A. G. Popeko et al., *GABRIELA setup for nuclear spectroscopy of the transfermium element isotopes at the VASSILISSA separator*, Phys. At. Nucl. 69(7), p.1183–1187 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778806070143>
17. Hauschild K. et al., *GABRIELA: A New Detector Array for γ -Ray and Conversion Electron Spectroscopy of Transfermium Elements*, Nucl. Instr. Meth. A 560(1), p. 388–394 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.01.107>
18. G. Duchene, F.A. Beck, P.J. Twin, G. de France, D. Curien, L. Han, C.W. Beausang, M.A. Bentley, P.J. Nolan, J. Simpson, *The Clover: a new generation of composite Ge detectors*, Nucl. Instrum. Methods A 432(4), p.90-110 (1999). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00277-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00277-6)
19. Devaraja et al., *Systematic studies to produce heavy above-target nuclides in multinucleon transfer reactions*, Physics Letters B 862(3), p.139353 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2025.139353>
20. Popeko A.G., Malyshev O.N., Yeremin A.V., Hofmann S, *Monte-Carlo optimization of the transmission of recoil separators*, Nucl. Instr. and Meth. A 427(2), p.166-169 (1999). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01561-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01561-7)
21. A. Yeremin, *Prospects of investigation of multinucleon transfer reactions, Proceedings of the Programme Advisory Committee for Nuclear Physics 51st Meeting*, Dubna, Russia (2020)

Б.С. Сайлаубеков^{*1,2,3,5}, А.И. Свирихин^{3,4}, М.С. Тезекбаева^{1,3,4,5}, Х.М. Девараджа^{1,3},
А.К. Ажибеков^{1,3}, А.В. Исаев^{3,4}, Р.С. Мухин³, Ю.А. Попов^{3,4}

¹Кызылординский университет имени Коркыт ата, Кызылорда, Казахстан

²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴Государственный университет Дубна, Дубна, Россия

⁵Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

(E-mail: bsailaybekov@jinr.ru)

Использование кинематического сепаратора SHELS и детектирующей системы GABRIELA для изучения реакций многонуклонных передач

Аннотация. В Лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) на сепараторе SHELS проводятся эксперименты по синтезу новых изотопов тяжелых ядер с $Z \geq 82$, исследованию свойств их радиоактивного распада и поперечных сечений

образования с целью изучения новых закономерностей структуры ядер тяжелых элементов, определяющих свойства радиоактивного распада и процессы формирования тяжелых ядер. Эти исследования важны для развития моделей ядерной стабильности, поиска долгоживущих сверхтяжелых изотопов и возможных практических применений в ядерной энергетике.

Основное внимание в работе будет уделено методике эксперимента – использованию детектирующей системы GABRIELA и кинематического сепаратора SHELS для исследования реакций многонуклонных передач.

В частности, будут представлены результаты экспериментов, проведенных на сепараторе SHELS с комбинированной детектирующей системой GABRIELA по изучению реакций многонуклонных передач $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$, $^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$ и $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$, которые ведут к образованию ядер с числом протонов выше, чем у ядер мишени.

Проведение подобных экспериментов с использованием фильтра скоростей SHELS позволит лучше понять потенциал кинематических сепараторов для исследования реакций многонуклонных передач. При этом описанные в работе методы исследования успешно применяются в экспериментальном изучении свойств радиоактивного распада тяжелых и сверхтяжелых ядер.

Ключевые слова: кинематический сепаратор; детектирующая система; реакция многонуклонных передач; тяжелые ядра; α -распад.

**B.S. Sailaubekov^{*1,2,3,5}, A.I. Svirikhin^{3,4}, M.S. Tezekbayeva^{1,3,4,5}, H.M. Devaraja^{1,3}, A.K. Azhibekov^{1,3},
A.V. Isaev^{3,4}, R.S. Mukhin³, Yu.A. Popov^{3,4}**

¹*Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan*

²*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

³*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

⁴*Dubna State University, Dubna, Russia*

⁵*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

(E-mail: bsailaybekov@jinr.ru)

Use of SHELS kinematic separator and GABRIELA detection system for studying multinucleon transfer reactions

Abstract. At Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research (FLNR JINR), experiments are conducted using the SHELS separator to synthesize new isotopes of heavy nuclei with $Z \geq 82$, study their radioactive decay properties, and measure production cross-sections. These efforts aim to uncover new patterns in the structure of heavy nuclei that govern radioactive decay and the processes involved in the formation of heavy elements. This research is essential for refining theoretical models of nuclear stability, discovering long-lived superheavy isotopes, and exploring potential applications in nuclear technology.

This work focuses on the experimental methodology – the application of the GABRIELA detection system and the SHELS kinematic separator to investigate multinucleon transfer reactions.

In particular, we present results from experiments performed at the SHELS separator with the combined GABRIELA detection system for studying multinucleon transfer reactions in $^{48}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$,

$^{50}\text{Ti}+^{208}\text{Pb}$, and $^{40}\text{Ar}+^{209}\text{Bi}$ systems, which lead to the formation of nuclei with proton numbers higher than the target nuclei.

Conducting such experiments with the SHELS velocity filter will enhance our understanding of the potential of kinematic separators for studying multinucleon transfer reactions. The methodologies described here have been successfully applied in experimental investigations of the radioactive decay properties of heavy and superheavy nuclei.

Keywords: kinematic separator; detection system; multinucleon transfer reaction; heavy nuclei; α -decay.

References

1. D.C. Hoffman et al., *Excitation functions for production of heavy actinides from interactions of ^{40}Ca and ^{48}Ca ions with ^{248}Cm* , Phys. Rev. C 31(5), p.1763-1769 (1985), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.31.1763>
2. A. Türler et al., *Actinide production from the interactions of ^{40}Ca and ^{44}Ca with ^{248}Cm and a comparison with the $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ system*, Phys. Rev. C 46(4), p.1364-1382 (1992), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.46.1364>
3. E. K. Hulet et al., *Spontaneous fission properties of ^{258}Fm , ^{259}Md , ^{260}Md , ^{258}No and $^{260}\text{[104]}$: Bimodal fission*, Phys. Rev. C 40(2), p.770-784 (1989), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.40.770>
4. S. Heinz et al., *Synthesis of new transuranium isotopes in multinucleon transfer reactions using a velocity filter*, Eur. Phys. J. A 52 (3), p.1-9 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16278-7>
5. H.M. Devaraja et al., *The Study of Multi-Nucleon Transfer Reactions for Synthesis of New Heavy and Superheavy Nuclei*, Physics of Particles and Nuclei Letters 19(2), p.693-716 (2022), DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477122060085>
6. V. Zagrebaev and W. Greiner, *New way for the production of heavy neutron-rich nuclei*, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 35(12), p.125103 (2008), DOI: [10.1088/0954-3899/35/12/125103](https://doi.org/10.1088/0954-3899/35/12/125103)
7. V. Zagrebaev and W. Greiner, *New ideas on the production of heavy and superheavy neutron rich nuclei*, Nuclear Physics A 834(1-4), p.366c-369c (2010), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2010.01.041>
8. V. V. Saiko and A. V. Karpov, *Analysis of multinucleon transfer reactions with spherical and statically deformed nuclei using a Langevin-type approach*, Phys. Rev. C 99(1), p.014613 (2019), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.99.014613>
9. G. Münzenberg, W. Faust, S. Hofmann, P. Armbruster, K. Güttner, H. Ewald, *The velocity filter SHIP, a separator of unslowed heavy ion fusion products*, Nuclear Instruments and Methods 161(1), p.65-82 (1979), DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90362-8](https://doi.org/10.1016/0029-554X(79)90362-8)
10. Yu. Ts. Oganessian and V.K. Utyonkov, *Superheavy nuclei from ^{48}Ca -induced reactions*, Nuclear Physics A 944(3), p.62-98 (2015), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2015.07.003>
11. Yeremin A. V. et al., *The Vassilissa facility for electrostatic separation and study of complete fusion reaction products*, Nucl. Instr. Meth. A 274(2), p.528-532 (1989), DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)90185-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)90185-X)
12. Yeremin A. V. et al, *The kinematic separator VASSILISSA performance and experimental results*, Nucl. Instr. Meth. A 350(1), p.608-617 (1994), DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)91265-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)91265-3)
13. Popeko A.G. et al., *Separator for Heavy ELEMENT Spectroscopy - Velocity filter SHELS*, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. Elsevier B 376(2), p.140-143 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.03.045>

14. Yeremin A. V. et al., *Experimental tests of the modernized VASSILISSA separator (SHELS) with the use of accelerated 50Ti ions*, Phys. Part. Nucl. Lett. 12(1), p.43–47 (2015), DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477115010082>
15. Yeremin A. V. et al., *First experimental tests of the modernized VASSILISSA separator*, Phys. Part. Nucl. Lett. 12(1), p.35–42 (2015), DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477115010070>
16. A.G. Popeko et al., *GABRIELA setup for nuclear spectroscopy of the transfermium element isotopes at the VASSILISSA separator*, Phys. At. Nucl. 69(7), p.1183–1187 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778806070143>
17. Hauschild K. et al., *GABRIELA: A New Detector Array for γ -Ray and Conversion Electron Spectroscopy of Transfermium Elements*, Nucl. Instr. Meth. A 560(1), p. 388–394 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.01.107>
18. G. Duchene, F.A. Beck, P.J. Twin, G. de France, D. Curien, L. Han, C.W. Beausang, M.A. Bentley, P.J. Nolan, J. Simpson, *The Clover: a new generation of composite Ge detectors*, Nucl. Instrum. Methods A 432(4), p.90–110 (1999), DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00277-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00277-6)
19. Devaraja et al., *Systematic studies to produce heavy above-target nuclides in multinucleon transfer reactions*, Physics Letters B 862(3), p.139353 (2025), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2025.139353>
20. Popeko A.G., Malyshev O.N., Yeremin A.V., Hofmann S., *Monte-Carlo optimization of the transmission of recoil separators*, Nucl. Instr. and Meth. A 427(2), p.166–169 (1999), DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01561-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01561-7)
21. A. Yeremin, *Prospects of investigation of multinucleon transfer reactions*, *Proceedings of the Programme Advisory Committee for Nuclear Physics 51st Meeting*, Dubna, Russia (2020)

Авторлар туралы мәлімет:

Сайлаубеков Б.С. – хат-хабар авторы, PhD докторанты, кіші ғылыми қызметкер, жоба орындаушысы, Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Әйтеке би көшесі, 29А, 120014, Қызылорда, Қазақстан

Свирихин А.И. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, сектор басшысы, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей

Тезекбаева М.С. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, ғылыми қызметкер, жоба орындаушысы, Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Әйтеке би көшесі, 29А, 120014, Қызылорда, Қазақстан

Девараджа Х.М. – PhD, жетекші ғылыми қызметкер, жоба орындаушысы, Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Әйтеке би көшесі, 29А, 120014, Қызылорда, Қазақстан

Әжібеков А.Қ. – PhD, жоба жетекшісі, Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Әйтеке би көшесі, 29А, 120014, Қызылорда, Қазақстан

Исаев А.В. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, топ басшысы, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей

Мухин Р.С. – кіші ғылыми қызметкер, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей

Попов Ю.А. – топ басшысы, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио-Кюри көшесі, 6, 141980, Дубна, Ресей

Сайлаубеков Б.С. – автор для корреспонденции, докторант PhD, младший научный сотрудник, исполнитель проекта, Кызылординский университет имени Коркыт ата, улица Айтеке би, 29А, 120014, Кызылорда, Казахстан

Свирихин А.И. – кандидат физико-математических наук, начальник сектора, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия

Тезекбаева М.С. – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, исполнитель проекта, Кызылординский университет имени Коркыт ата, улица Айтеке би, 29А, 120014, Кызылорда, Казахстан

Девараджа Х.М. – PhD, ведущий научный сотрудник, исполнитель проекта, Кызылординский университет имени Коркыт ата, улица Айтеке би, 29А, 120014, Кызылорда, Казахстан

Ажібеков А.Қ. – PhD, руководитель проекта, Кызылординский университет имени Коркыт ата, улица Айтеке би, 29А, 120014, Кызылорда, Казахстан

Исаев А.В. – кандидат физико-математических наук, начальник группы, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия

Мухин Р.С. – младший научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия

Попов Ю.А. – начальник группы, Объединенный институт ядерных исследований, улица Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Россия

Sailaubekov B.S. – corresponding author, PhD student, junior researcher, project executor, Korkyt Ata Kyzylorda University, 29A Aiteke bi street, 120014, Kyzylorda, Kazakhstan

Svirikhin A.I. – PhD in physics, head of sector, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia

Tezekbayeva M.S. – PhD in physics, researcher, project executor, Korkyt Ata Kyzylorda University, 29A Aiteke bi street, 120014, Kyzylorda, Kazakhstan

Devaraja H.M. – PhD in physics, leading researcher, project executor, Korkyt Ata Kyzylorda University, 29A Aiteke bi street, 120014, Kyzylorda, Kazakhstan

Azhibekov A.Q. – PhD in physics, project manager, Korkyt Ata Kyzylorda University, 29A Aiteke bi street, 120014, Kyzylorda, Kazakhstan

Isaev A.V. – PhD in physics, head of group, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia

Mukhin R.S. – junior researcher, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia

Popov Yu.A. – head of group, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie street, 141980, Dubna, Russia



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



ХҒТАР 29.19.22; 29.19.04

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-177-191>

Ғылыми мақала

Жартылай Гейслер матрицасындағы толық Гейслер қорытпасының нанобөлшектерін модельдеу: құрылымдық және электрондық қасиеттерін зерттеу

Н.С. Солтанбек¹, Ф.У. Абуова¹, Т.М. Инербаев¹, А.У. Абуова¹, Ж.Е. Зәкиева²,
Т.Н. Жанғазы¹, Б.Н. Нұрмаханбетова¹, Н.А. Мерәлі^{1*}

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Астана Халықаралық Университеті, Астана, Қазақстан

(E-mail: nurpeis.93@mail.ru)

Аңдатпа. Материалтану саласында соңғы уақытта Гейслер және жартылай Гейслер типтес қосылыстарға қызығушылық арта түсуде. Себебі олардың магниттік, спинтрондық әрі термоэлектрлік қасиеттері бұл материалдарды болашақ технологиялар үшін перспективті етеді. Осы зерттеу аясында $\text{Ti}_2\text{Pt}_4\text{AlSb}$ және $\text{V}_2\text{Ni}_4\text{AlSb}$ толық фазалы қосылысын жартылай гейслерлік $\text{Ti}_2\text{Pt}_2\text{AlSb}$ және $\text{V}_2\text{Ni}_2\text{AlSb}$ матрицасына енгізу арқылы алынған наноқұрылымның құрылымы мен электрондық қасиеттері жан-жақты қарастырылды. Есептеулер кванттық механикаға негізделген, алғашқы принциптер әдістерімен жүргізілді. Модельдеу кезінде $3 \times 2 \times 1$ өлшемдегі суперұяшық пайдаланылып, нәтижесінде нанобөлшек мөлшері шамамен 8,3%-ды құрады – бұл нақты материалдардағы типтік концентрацияларға сай келеді және бөлшектердің өзара әсерін елемеге мүмкіндік береді. Зерттеу барысында тордың қайта құрылу үдерістері мен электрондық күй тығыздығындағы өзгерістер байқалды. Алынған мәліметтер толық және жартылай фазалар арасындағы шекараның табиғатын тереңірек түсінуге сеп болады әрі олардың өзара әрекеттесу механизмдерін бағалауға жол ашады. Бұл зерттеу Heusler типтес наноқұрылымды материалдарды мақсатты жобалауға бағытталған теориялық база ретінде қызмет етеді. Қорытындылар болашақта жаңа, айрықша қасиеттерге ие материалдар жасауға негіз бола алады. Сонымен қатар, жұмыс материалдардың құрылымдық күрделілігі мен олардың функционалдық мінездемелері арасындағы байланысты терең ұғынуға жол ашады.

Түйін сөздер: Гейслер қорытпалары; электрондық құрылым; наноқұрылымдау; наноқұрылымды Гейслер қосылыстары; жартылай Гейслер қорытпалары; суперұяшық.

Жіберілді 10.05.2025. Өзгертілді 20.05.2025. Қабылданды 29.05.2025. Онлайн қол жетімді 25.06.2025.

¹ *хат-хабар авторы

Кіріспе

Бүгінгі материалтану ғылымында Гейслер және жартылай Гейслер типіндегі қосылыстарға деген қызығушылық айрықша артып отыр. Бұл қосылыстардың магниттік, спинтрондық және термоэлектрлік ерекшеліктері оларды заманауи технологиялық құрылғыларда қолдануға жол ашады [1]. Әсіресе олардың электрондық құрылымын дәл бақылау мүмкіндігі – спинтрондық жады құрылғыларынан бастап, магнит өрісіне сезімтал сенсорлар мен энергияны тиімді түрлендіретін жүйелерге дейін – жаңа буындағы материалдарды жасауда маңызды орын алады [2-4]. Соңғы уақытта бұл бағыттағы зерттеулердің ішінде наноқұрылымды Гейслер материалдары ерекше өзектілікке ие болды. Бір фазалы қосылыстың өте ұсақ бөлшектерін басқа фазалық матрицаға ендіру арқылы алынатын күрделі наноқұрылымдар – қазіргі ғылыми қызығушылықтың өзегіне айналған. Мұндай құрылымдар материалдың ішкі қасиеттеріне – оның торлық құрылымынан бастап, электрондық күйіне және магниттік қасиеттеріне дейін – айтарлықтай әсер етіп, оның жалпы функционалдығын арттыруға мүмкіндік береді.

Осы жұмыста құрылым ретінде $3 \times 2 \times 1$ өлшемді суперұяшық пайдаланылды. Мұндай өлшемді таңдау кездейсоқ емес – бұл жағдайда жүйеде нанобөлшектердің шоғырлану мөлшері шамамен 8,3%-ды құрайды. Аталған мән шынайы материалдардағы нанобөлшектер үлесіне жақын, әрі олардың арасындағы өзара әрекеттесулерді елеусіз деңгейге дейін төмендетеді. Осылайша, жүйеде жеке нанобөлшектің өзіндік қасиеттерін айқын бағалауға мүмкіндік туады. Жобаның басты мақсаты – толық фазалы қосылыстан тұратын нанобөлшектің жартылай гейслерлік матрицаға ықпалын анықтау. Әсіресе, нанобөлшек енгізілген аймақтағы кристалдық тордың құрылымдық өзгерістері, атомаралық байланыстардың қайта қалыптасуы, сондай-ақ жүйедегі жергілікті және жалпы электрондық күй тығыздығындағы ауытқулар негізгі назарда болды [5-9]. Мұндай өзгерістер материалдың магниттік, өткізгіштік және термоэлектрлік сипаттамаларын айтарлықтай өзгертуі мүмкін. Бұл зерттеу нәтижелері толық және жартылай Гейслер фазалары арасындағы шекаралық өзара байланыстардың табиғатын терең түсінуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, нанобөлшек пен матрица арасындағы интерфейстегі құрылымдық сәйкессіздік пен оның туындататын физикалық эффектілері де ерекше назарда болды [10]. Мұндай наноқұрылымданған жүйелердің күрделілігіне қарамастан, оларды мақсатты түрде жобалау арқылы жаңа функционалдық мүмкіндіктерге жол ашылады. Жалпы алғанда, бұл жұмыс наноқұрылымды композиттік материалдарды, соның ішінде Гейслер қосылыстары негізіндегі күрделі жүйелерді жобалаудағы маңызды теориялық қадамдардың біріне жатады. Зерттеу барысында алынған нәтижелер болашақта ерекше қасиеттерге ие материалдарды жасауға, сонымен қатар құрылым мен функция арасындағы терең байланыстарды ашуға үлес қосады деп сеніммен айтуға болады.

Осыған орай, құрамында ванадий немесе титан элементтері бар наноқұрылымды қосылыстарды мақсатты түрде жобалау – қазіргі заманғы материалтанудың маңызды міндеттерінің бірі. Мұндай материалдар болашақта энергияны түрлендіру, магнит

өрісін анықтайтын сенсорлар, сондай-ақ спинтрондық құрылғылар үшін негіз бола алады. Зерттеу бағыты ретінде ванадий енгізілген жартылай гейслерлік құрылымдар мен олардың электрондық және құрылымдық бейімделу ерекшеліктері ерекше назарға алынады. Бұл бағыттағы іргелі түсініктер болашақта жоғары тиімділікке ие жаңа буын құрылғыларын жасауға негіз бола алады.

Әдіснама

Бұл зерттеуде кванттық-механикалық есептеулер тығыздық функционалы теориясы (DFT) әдістемесі негізінде *Vienna Ab-initio Simulation Package* (VASP) бағдарламалық пакеті арқылы жүргізілді. Алмасу-корреляциялық әсерлерді сипаттау үшін *Perdew –Burke –Ernzerhof* (PBE) функционалы шеңберіндегі жалпыланған градиентті жуықтау (GGA) қолданылды [11]. Барлық есептеулерде жазық толқындар негізіндегі энергия кесілу мәні 700 эВ деңгейінде орнатылды [12]. Бриллюэн аймағының интеграциясы *Monkhorst-Pack* схемасы бойынша $3 \times 2 \times 1$ өлшемді k -нүктелер торы арқылы жүзеге асырылды. Бұл параметрлер жиынтығы толық энергия бойынша жақсы шоғырлану (конвергенция) нәтижелерін көрсетті. Энергияның шоғырлану дәлдігі әр атом үшін 10^{-7} эВ шегінде орнатылды.

Бұл әдістер иондардағы локализацияланған зарядтарды дәл бағалауға және жүйедегі электрондық тығыздықтың бөліну сипатын түсінуге мүмкіндік береді. Осы есептеу параметрлері негізінде алынған нәтижелер құрылымдық және электрондық қасиеттерді сенімді сипаттауға мүмкіндік береді.

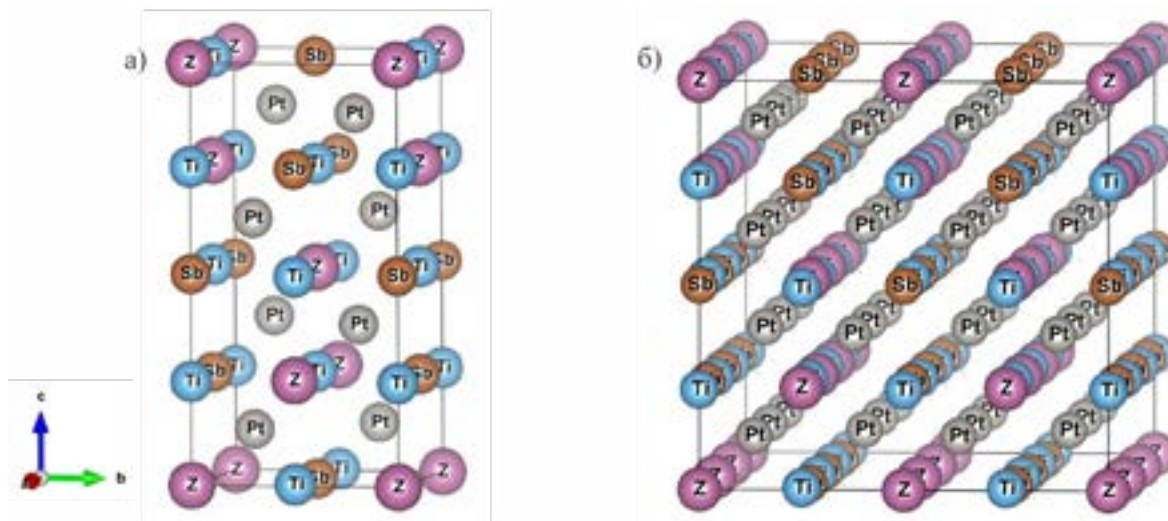
Нәтижелер мен талқылау

Құрылымдық қасиеттері

Құрамында өтпелі металдар, соның ішінде ванадий (V) немесе титан (Ti) бар қосылыстар ерекше зерттеушілік қызығушылық тудырады. Ванадийдің атомдық радиусы, электрондық конфигурациясы мен байланыстыру қабілеті оны қорытпалар құрамында тиімді қоспа ретінде пайдалануға мүмкіндік береді. Ол тор құрылымын тұрақтандырумен қатар, электрондық күй тығыздығына әсер етіп, материалдың өткізгіштік, магниттік және термоэлектрлік сипаттамаларын өзгертеді. Соңғы жылдары ванадий мен титан қосылған нанокұрылымды жүйелердің қасиеттерін модельдеу мен тәжірибелік тұрғыда зерттеу өзекті бағыттардың біріне айналды. Мұндай жүйелерде атомдық деңгейде пайда болатын интерфейстер мен құрылымдық қайта құрулар материалдың жалпы қасиеттеріне тікелей әсер етеді. Мысалы, ванадий мен иондарының матрицадағы орналасуы және олардың айналасындағы атомдармен өзара әрекеттесуі кристалдық тордың симметриясын бұзып, жаңа физикалық құбылыстардың туындауына себеп болуы мүмкін.

Аталмыш жұмыста қарастырылатын Гейслер қорытпаларының құрылымдық сызбалары 1-суретте көрсетілген. Атомдар тікбұрышты параллелепипедтік супер-ұяшықта орналасқан. Әр атом түрі (Ti, Pt, Al, Sb) кеңістікте нақты торлық орындарды

алады. Суперұяшық көлемі $3 \times 2 \times 1$ базалық ұяшыққа сәйкес келеді. Матрицаның көп бөлігін жартылай Гейслер $\text{Ti}_2\text{Pt}_2\text{AlSb}$ құрайды. Матрица ішінде аз көлемде толық қосылыс $\text{Ti}_2\text{Pt}_4\text{AlSb}$ түріндегі нанобөлшек орналасқан. Берілген суперұяшықтың өлшемдері шамамен ($a = 18.35$) Å, ($b = 12.24$) Å және ($c = 12.22$) Å құрайды. Суперұяшықта жалпы 144 атом орналасқан, олардың ішінде: 48 Ti атомы, 24 Sb атомы, 52 Pt атомы, 24 Al атомы. Кристалдық құрылым тікбұрышты тор түрінде, барлық бұрыштары 90° тең, яғни ортогоналды жүйеге жатады.



1-сурет. Гейслер қорытпасының наноқұрылымдануы: а) қос жартылай Гейслер қорытпасы; б) наноқұрылымданған Гейслер қорытпасы.

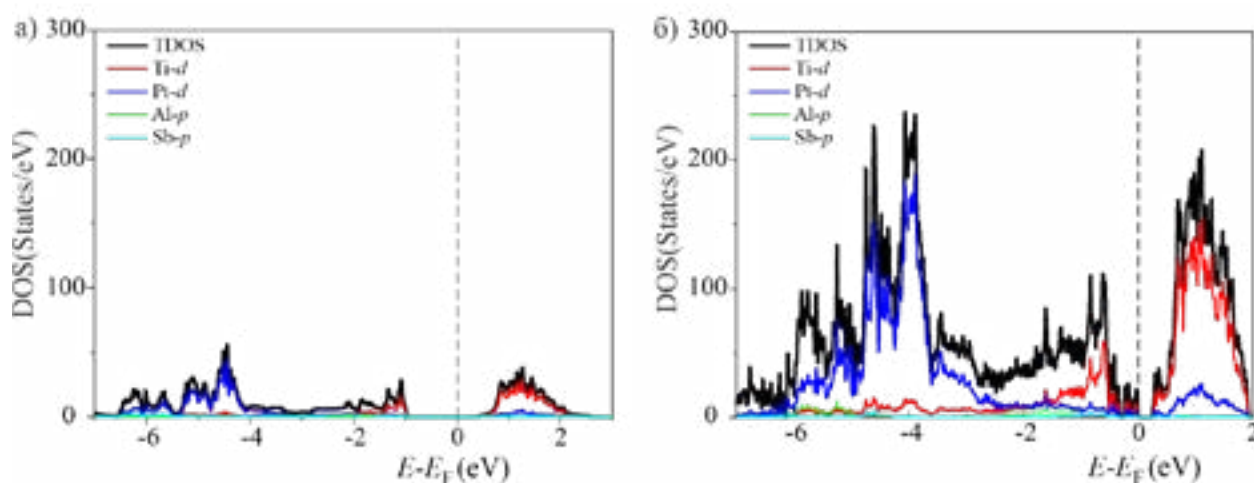
Атомдардың орналасу ерекшеліктеріне келетін болсақ, стандартты жартылай Гейслер құрылымында Ti, Pt және Al/Sb атомдары белгілі бір симметриялық орындарды алып, біркелкі периодтылық құрайды. Бұл жағдайда Pt және Al/Sb атомдары тордағы белгілі бір қабаттарда әртүрлі орналасады. Классикалық жартылай Гейслер қосылыстары (мысалы, TiPtSb) немесе қосарлы Гейслерлер ($\text{Ti}_2\text{Pt}_2\text{Z}$) әдетте біркелкі химиялық құрамы мен жоғары симметриялы құрылымды көрсетеді. Бұл жағдайда ұсынылған жүйе бірнеше ерекшелікке ие: Матрица ішінде локальді фазалық ауысу жүреді (толық қосылыс нанобөлшек пайда болады). Қарастырылатын екінші қос Гейслер құрылымы үшін, 1-суретте көрсетілген Ti атомдары V атомдарымен, Pt атомдары Ni атомдарымен алмастырылады.

Атомдардың орналасу реті бұзылса, нанобөлшек пен матрица шекарасында құрылымдық деформация байқалады. Электрондық қасиеттер локальді түрде өзгеруі мүмкін (мысалы, энергетикалық тыйым салынған аймақтың тарылуы немесе жаңа энергетикалық күйлердің пайда болуы). Құрылымның жалпы симметриясы классикалық фазаларға қарағанда төмендейді. Мұндай наноқұрылымдар материалдың магниттік, спинтрондық және электрондық қасиеттерін бақылау үшін үлкен әлеуетке ие. Әсіресе, наноқұрылымдар арқасында жаңа кванттық эффектілер немесе локальді

өткізгіштік аймақтары пайда болуы мүмкін, бұл болашақ спинтрондық және сенсорлық құрылғылар үшін маңызды.

Электрондық қасиеттері

Зерттелген Гейслер қорытпаларының электрондық құрылымдары 2-суретте көрсетілген. Келтірілген графикте нанокұрылымданған $\text{Ti}_2\text{Pt}_2\text{AlSb}$ қосылысының жартылай гейслерлік $\text{Ti}_2\text{Pt}_4\text{AlSb}$ матрицасындағы күйлік тығыздықтарының (TDOS және PDOS) үлестірімі көрсетілген. Жалпы тығыздықтың күйлік тығыздығы (TDOS) қара сызықпен берілсе, атомдық орбитальдар бойынша проекцияланған тығыздықтар: Ti элементінің d-орбитальдары (қызыл), Pt элементінің d-орбитальдары (көк), Al элементінің p-орбитальдары (жасыл), ал Sb элементінің p-орбитальдары (ашық көк) түрінде көрсетілген.



2-сурет. Нанокұрылымдану үрдісінің Гейслер қорытпасының электрондық қасиеттеріне әсері а) қос жартылай $\text{Ti}_2\text{Pt}_2\text{AlSb}$ Гейслер қорытпасының электрондық құрылымы; б) нанокұрылымданған $\text{Ti}_2\text{Pt}_4\text{AlSb}$ Гейслер қорытпасының электрондық құрылымы.

Энергия диапазонында -6 -дан $+2$ эВ-қа дейінгі аралықта TDOS-тың күрт өзгерістері байқалады. Валенттік зонаның негізгі бөлігін -6 -дан 0 эВ-қа дейінгі аралықта Pt-d орбитальдары басым құрайды, бұл Pt элементінің валенттік күйге айтарлықтай үлес қосатынын көрсетеді. Өткізгіштік зонаның төменгі бөлігінде, 0 эВ-тен жоғары аймақта Ti-d орбитальдарының айтарлықтай үлесі байқалады, бұл Ti атомдарының өткізгіштік қасиеттерге әсерін көрсетеді.

Ферми деңгейі маңындағы тығыздықтың жоғары мәні электрондардың жоғары концентрациясын көрсетеді, бұл материалдың металлдық қасиетке ие екенін растайды. Сонымен қатар, нанокұрылымның енгізілуі кезінде пайда болатын электрондық күй тығыздығының асимметриясы нанобөлшек пен матрица арасындағы интерфейстік әсерлерге байланысты болуы мүмкін. Бұл құбылыс Бадер зарядының қайта бөлінуімен және тор құрылымының локалдық бұрмалануымен байланысты.

Осылайша, бұл нәтиже $\text{Ti}_2\text{Pt}_2\text{AlSb}$ нанобөлшектерінің $\text{Ti}_2\text{Pt}_4\text{AlSb}$ матрицасына енгізілуі материалдың электрондық құрылымына елеулі өзгерістер енгізетінін және бұл өзгерістер функционалдық қасиеттерді басқаруда маңызды рөл атқара алатынын көрсетеді.

Алайда ұсынылған суперұяшықта ерекше аймақ – Pt атомдарының жергілікті концентрациясының артуымен сипатталатын нанобөлшек пайда болады. Бұл нанобөлшек көлемі аз ғана (~8,3%) болғанымен, өзінің локальді құрылымын өзгертеді және толық қосылыс $\text{Ti}_2\text{Pt}_4\text{AlSb}$ сипатында болады. Басқаша айтқанда, суперұяшық ішінде жартылай Гейслер матрицасына ендірілген толық қосылыс нанобөлшегі модельденген.

Қарапайым Ti_2PtAlSb қосылысының электрондық құрылымынан көрініп тұрғандай, Ферми деңгейі маңында айқын электрондық күй тығыздығы жоқ, бұл материалдың жартылайөткізгіштік қасиеттерге ие екенін көрсетеді. Энергетикалық тыйым салынған аймақ шамамен 0.4-0.5 эВ шамасында, бұл валенттік және өткізгіштік зоналар арасында нақты энергетикалық алшақтық бар екенін білдіреді. Бұл құрылымда Pt-d орбитальдары валенттік зонаның төменгі бөлігінде басым болса, Ti-d орбитальдары өткізгіштік зонада маңызды рөл атқарады. Ал нанокұрылымданған $\text{Ti}_2\text{Pt}_2\text{AlSb}/\text{Ti}_2\text{Pt}_4\text{AlSb}$ жүйесінде Ферми деңгейінде айқын TDOS мәндері байқалады, бұл материалдың жартылайөткізгіштік қасиеттерінің жойылып, металлдық сипатқа ие болғанын көрсетеді. Сонымен қатар, TDOS максимумдары жоғарылаған, бұл электрон күй тығыздығының артқанын білдіреді. Бұл құбылыс нанокұрылымдар мен матрица арасында пайда болатын интерфейстік әсерлер мен құрылымдық ауытқуларға байланысты.

Сондай-ақ, нанокұрылымдық жүйеде Ферми деңгейінің маңында Ti-d орбитальдарының басымдығы артып, өткізгіштікке қосатын үлесі айқын байқалады. Бұл электрондардың локализациясының төмендеуіне және тасымал сипаттамаларының жақсаруына ықпал етеді.

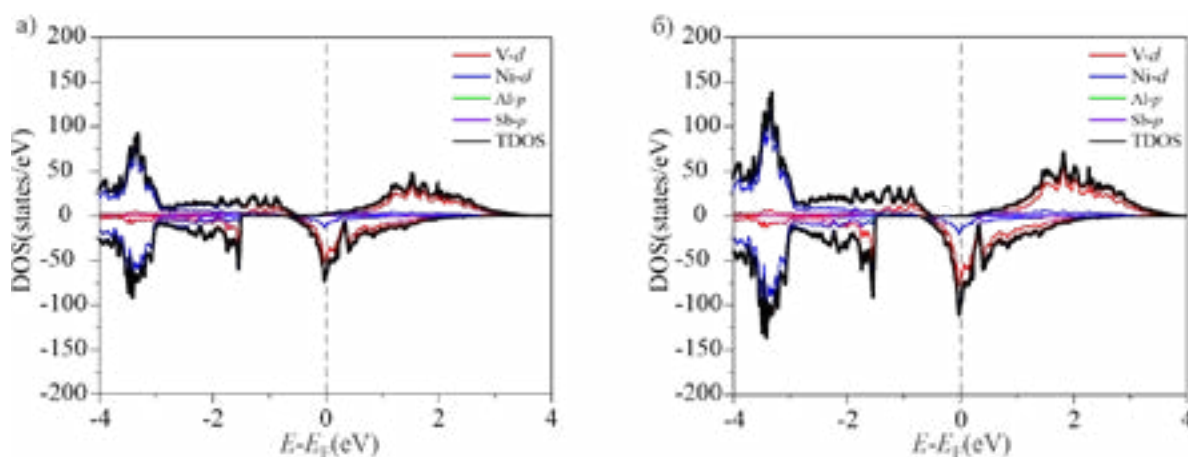
Нанокұрылымдандыру Ti_2PtAlSb қосылысының электрондық құрылымын елеулі өзгертеді: жартылайөткізгіштік қасиеттер біртіндеп жойылып, материал металл тәрізді күйге көшеді. Бұл өзгеріс электрондық күй тығыздығының өсуімен, интерфейстік аймақтардағы күй тығыздығының қосылуымен және орбитальдық будандасудың өзгеруімен байланысты. Мұндай ерекшеліктер бұл жүйені электрондық құрылғыларда, әсіресе термоэлектрлік және спинтроникалық құрылымдарда қолдану үшін әлеуетті кандидат ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Ti_2PtAlSb негізіндегі материалдарды нанокұрылымдандыру олардың бастапқы электрондық қасиеттерін түбегейлі өзгерте алады. Бұл процесс нәтижесінде жартылайөткізгіштік сипаттар біртіндеп әлсіреп, материал электр өткізгіштігі жоғары, металл тәрізді күйге ауысады. Мұндай түрлену – тек құрылымдық деңгейде емес, сонымен қатар электрондық күй тығыздығының өзгеруі арқылы да іске асады. Атап айтқанда, нанокұрылымданған аймақтарда интерфейстер шегінде күй тығыздықтарының қабаттасуы байқалады, бұл өз кезегінде орбитальдық будандасу механизмінің қайта құрылуына ықпал етеді.

Мұндай өзгерістер кездейсоқ емес – олар материал ішіндегі атомаралық байланыстардың конфигурациясымен және энергетикалық деңгейлердің қайта бөлінуімен тығыз байланысты. Интерфейстік аймақтарда байқалатын электрондардың жинақталуы, әсіресе, электрон тасымалдануы мен заряд бөліну үдерістерінде ерекше рөл атқарады. Бұл жағдай материалдың энергетикалық спектрін кеңейтіп, оны таза жартылайөткізгіштерге тән шектеулерден шығарып, металдық сипатқа біртіндеп

жақындатады. Осылайша алынған құрылымдық-электрондық бейімделу материалды практикалық тұрғыдан алғанда тартымды етеді. Әсіресе, бұл ерекшеліктер термоэлектрлік және спинтроникалық құрылғыларда жоғары тиімділікпен жұмыс істеуге қабілетті материалдарды жасауға жол ашады. Электрон ағынын дәл бақылау, спин күйін тұрақты басқару, және жылу мен электр энергиясы арасындағы түрлендіру тиімділігін арттыру – осы бағыттағы негізгі міндеттердің бірі. Ti_2PtAlSb қосылысына жүргізілген наноқұрылымдық бейімдеулер нәтижесінде мұндай міндеттерді орындауға лайық платформалар қалыптасуы әбден мүмкін. Осы себепті, бұл материалды әрі қарай да зерттеу – тек академиялық қызығушылық қана емес, сонымен бірге нақты қолданбалы инженерлік мақсаттарға бағытталған маңызды қадам болып саналады. Нәтижесінде, Ti_2PtAlSb сияқты жүйелердің наноқұрылымдық модификациясы олардың функционалдық мүмкіндіктерін кеңейтіп, жаңа буын құрылғыларын жобалауда теориялық және практикалық негіз қалыптастыра алады.

$\text{V}_2\text{Ni}_2\text{AlSb}$ қос жартылай Гейслер қорытпасы қазіргі заманғы функционалды материалдар қатарына жатады және оның электрондық, магниттік және құрылымдық қасиеттері перспективалы технологиялық салаларда кеңінен қолдануға мүмкіндік береді. Электрондық құрылым сипаттамасы 3-суретте көрсетілген. Бұл зерттеу жұмысында аталмыш қорытпаның электрондық құрылымы наноқұрылымдандыру процесінен кейінгі жағдайында талданып, оның қасиеттеріндегі өзгерістер ғылыми тұрғыда сипатталды. Алғашқы фазада алынған $\text{V}_2\text{Ni}_2\text{AlSb}$ қорытпасының электрондық құрылымы симметриялы жартылай металлдық сипатқа ие екендігі белгілі болды. Электрондық тасымалдың әртүрлілік қасиеттері спин-жоғары және спин-төмен бағыттарында анық байқалады. Спиндік поляризацияның айқын көрінісі бұл материалдың спинтроникалық құрылғыларға лайық екенін көрсетеді. Қалыпты жағдайда бұл қорытпа толықтай жартылай металл болып табылмаса да, оның энергетикалық аймақтарында өтпелі энергетикалық тыйым салынған аймақ байқалады, бұл оның термоэлектрлік құрылғыларда да тиімді қолданылатынын дәлелдейді.



3-сурет. Наноқұрылымдану үрдісінің Гейслер қорытпасының электрондық қасиеттеріне әсері а) $\text{V}_2\text{Ni}_2\text{AlSb}$ қос жартылай Гейслер қорытпасының электрондық құрылымы; б) наноқұрылымданған $\text{V}_2\text{Ni}_2\text{AlSb}$ Гейслер қорытпасының электрондық құрылымы.

Зерттеудің келесі кезеңінде аталмыш қорытпаға нанокұрылымдандыру әдісі қолданылды. Бұл әдіс құрылымдық өлшемдердің наноөлшем деңгейіне дейін төмендетілуін және нәтижесінде электрондық тасымал мен тығыздық күйінің (DOS) күрделі өзгерістерге ұшырауын қамтиды. Жүргізілген есептеулер бойынша, нанокұрылымдандырылған V_2Ni_2AlSb қорытпасында электрондық тығыздықтың өсуі байқалды, әсіресе Ферми деңгейі маңында. Бұл жағдай кванттық шектеулердің әсерінен энергетикалық деңгейлердің тығыз орналасуымен түсіндіріледі. Сонымен қатар, нанокұрылымдандырудың тағы бір маңызды әсері – энергетикалық тыйым салынған аймақтың (band gap) кеңеюі немесе пайда болуы. Егер бастапқы фазада бұл аймақ кең емес немесе мүлде байқалмаса, нанокұрылымдан кейінгі құрылымда спин-төмен бағытында айқын тыйым салынған аймақ пайда болғаны анықталды. Бұл жағдай қорытпаның жартылай металдық қасиетін күшейтіп, оны жоғары тиімділікпен спинтрондық құрылғыларда қолдануға мүмкіндік береді.

Орбитальдық проекцияларды (PDOS) талдау нәтижелері көрсеткендей, Ферми деңгейі маңындағы күй тығыздығының артуына негізінен Ti және Pt элементтерінің *d*-орбитальдарының будандасуы әсер етеді. Атап айтқанда, Ti-*d* және Pt-*d* орбитальдарының арасында энергетикалық деңгейлердің тығыздығының артуы байқалады. Бұл құбылыс нанокұрылымдандыру нәтижесінде пайда болған жергілікті құрылымдық бұзылыстармен және интерфейстік аймақтағы электрондардың локализациясымен тікелей байланысты. Мұндай қайта құрылулардың нәтижесінде жаңа энергетикалық күйлер қалыптасып, күй тығыздығы артады.

Электрондық тасымалдау сипаттамаларынан бөлек, нанокұрылымдандырылған V_2Ni_2AlSb қорытпасы өткізгіштік қасиеттері бойынша да оң өзгерістер көрсетті. Мұндай нанокұрылымдандырылған Гейслер қорытпаларының қолдану салалары өте кең: Спинтроника: Спин-тәуелді өткізгіштік пен жоғары спиндік поляризациясы бұл материалды спиндік инжекторлар, магниттік туннельдік қосқыштар және MRAM құрылғыларына пайдалануға мүмкіндік береді. Термоэлектрлік құрылғылар: Ферми деңгейіндегі күй тығыздығының артуы және торлық жылу өткізгіштіктің азаюы нәтижесінде, бұл қорытпа энергияны жылудан электр энергиясына түрлендіру құрылғыларында (мысалы, қалдық жылу энергиясын пайдаланатын генераторлар) тиімді болады. Нанозлектроника: Нанокұрылымдандыру нәтижесінде алынған жоғары электрондық қозғалғыштық пен энергетикалық күй тығыздығының өзгерісі бұл материалды жоғары өнімді транзисторлар мен сенсорларға бейімдеуге мүмкіндік береді. Кванттық құрылғылар: Энергетикалық аймақтардың кванттық өлшемдерге сәйкес өзгеруі нәтижесінде, бұл материал кванттық компьютерлер мен басқа да кванттық құрылғыларда қолдануға бейімделуі мүмкін.

Жоғарыда келтірілген нәтижелер V_2Ni_2AlSb қорытпасының нанокұрылымдық модификациясы оның электрондық құрылымын айтарлықтай өзгертетінін, және бұл өзгерістер практикалық қолдану үшін қолайлы екендігін дәлелдейді. Бұған дейінгі зерттеулерде де нанокұрылымдау әдетте Ферми деңгейі маңындағы саңылаудың кішіреюіне әкеліп соғатыны анықталған [13,14]. Сонымен қатар, бұл қорытпа болашақта жаңа буынды функционалды материалдарды әзірлеу үшін негіз бола алады.

Осылайша, жүргізілген зерттеу жұмысы наноқұрылымдандыру әдісінің Гейслер типті қорытпалардың электрондық қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететіндігін көрсетіп қана қоймай, оның функционалдық қолдану мүмкіндіктерін кеңейтетінін де дәлелдейді. Болашақ зерттеулер бұл бағытты одан әрі тереңдетіп, нақты құрылғылар деңгейінде іске асыруға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Осы жұмыста алғашқы принциптерге негізделген есептеулер арқылы Ti_2Pt_2ZSb ($Z = Al, Ga, In$) қос металдық жартылай Гейслер қорытпаларының құрылымдық, электрондық, серпімділік және термодинамикалық қасиеттері жан-жақты зерттелді. Зерттеу нәтижелері бұл қорытпалардың барлығы да термодинамикалық және механикалық тұрғыдан тұрақты екенін көрсетті. Олардың барлығы да оң энергия мен тұрақты Фон күй қисықтарына ие, бұл динамикалық тұрақтылықты дәлелдейді.

Электрондық құрылымдарды зерттеу барысында Ti_2Pt_2ZSb қорытпаларының жартылай өткізгіштік немесе металдық қасиет көрсетуі химиялық құрам мен құрылымға тәуелді екендігі анықталды. Ерекше назар наноқұрылымданған Ti_2Pt_2AlSb қорытпасына аударылды. Оның электрондық күй тығыздығы (DOS) мен тасымал сипаттамалары кәдімгі $Ti_2PtAlSb$ қосылысына қарағанда айтарлықтай өзгергені байқалды. Наноқұрылымдандыру нәтижесінде Ферми деңгейінің маңындағы электрон күй тығыздығы артқан және тыйым салынған аймақ жойылып, металдық қасиет қалыптасқан. Бұл құбылыс құрылымдағы интерфейстік әсерлер мен орбитальдық будандасу салдарынан туындайды. Бұл қасиеттер электрон тасымалдаудың жоғарылауына және спинтрондық құрылғыларға бейімділікке оң әсер етеді.

Жалпы алғанда, жүргізілген зерттеу жұмысы Ti_2Pt_2ZSb қосылыстарының құрылымдық, электрондық және механикалық сипаттамаларының жан-жақты бейнесін ұсынды және олардың термоэлектрлік және спинтроникалық құрылғыларда қолдану үшін әлеуетті материалдар екенін көрсетті. Сонымен қатар, наноқұрылымдандырудың электрондық қасиеттерге тигізетін әсері ғылыми тұрғыдан дәлелденіп, болашақ зерттеулер үшін бағыт беретін маңызды нәтижелер ұсынылды. Бұл зерттеу нәтижелері болашақта жаңа функционалдық материалдарды жобалау мен жетілдіруде ғылыми негіз бола алады.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Бұл зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі 2024-2026 жылдарға арналған «Жас Ғалым» AP22683528 «Гейслер қорытпалары негізінде термоэлектрлік және спинтрондық материалдарды компьютерлік жобалау» жобасы аясында қаржыландырылды. Авторлар осы мақалада баяндалған жұмысқа әсер етуі мүмкін белгілі бәсекелес қаржылық мүдделері немесе жеке қарым-қатынастары жоқ екенін хабарлайды.

Авторлардың қосқан үлесі

Солтанбек Н.С. – мақаланың тұжырымдамасына немесе рәсімделуіне елеулі үлес қосу, мәтін жазу және оның мазмұнын сыни тұрғыдан қайта қарау;

Мерәлі Н.С. – зерттеу нәтижелерін жинау, мәтін жазу және оның мазмұнын сыни тұрғыдан қайта қарау;

Зәкиева Ж.Е., Жанғазы Т.Н., Нұрмаханбетова Б.Н. – алынған нәтижелерді талдау және түсіндіру;

Абуова А.У., Инербаев Т.М. – жариялау үшін мақаланың соңғы нұсқасын бекіту;

Абуова Ф.У. – жұмыстың барлық аспектілері үшін жауапты болуға келісім беру, деректердің дұрыстығына және мақаланың барлық бөліктерінің тұтастығына байланысты мәселелерді зерттеу және шешу.

Әдебиеттер тізімі

1. S. Anand, M. Wood, Y. Xia, C. Wolverton, G. J. Snyder, *Double half-Heuslers*, *Joule* 3(5), p. 1226–1238 (2019)
2. W.G. Zeier, J. Schmitt, G. Hautier, U. Aydemir, Z.M. Gibbs, C. Felser, G.J. Snyder, *Engineering half-Heusler thermoelectric materials using Zintl chemistry*, *Nature Reviews Materials* 1(6), p. 1–10 (2016)
3. T. Zhu, Y. Liu, C. Fu, J.P. Heremans, J.G. Snyder, X. Zhao, *Compromise and synergy in high-efficiency thermoelectric materials*, *Advanced Materials* 29(14), p. 1605884 (2017), Wiley Online Library
4. Y. Rached, M. Caid, M. Merabet, S. Benalia, H. Rached, L. Djoudi, M. Mokhtari, D. Rached, *A comprehensive computational investigations on the physical properties of TiX_{Sb} ($X: Ru, Pt$) half-Heusler alloys and $Ti_2RuPtSb_2$ double half-Heusler*, *International Journal of Quantum Chemistry* 122(9), p. e26875 (2022), Wiley Online Library
5. K. Bouhadjer, M. Boudjelal, M. Matougui, S. Bentata, T. Lantri, M. Batouche, T. Seddik, R. Khenata, B. Bouadjemi, S. Bin Omran et al., *Structural, optoelectronic, thermodynamic and thermoelectric properties of double half-Heusler (DHH) $Ti_2FeNiSb_2$ and Ti_2Ni_2InSb compounds: A TB-mBJ study*, *Chinese Journal of Physics* 85, p. 508–523 (2023), Elsevier
6. H. Ding, X. Li, Y. Feng, B. Wu, *Electronic structure, magnetism and disorder effect in double half-Heusler alloy $Mn_2FeCoSi_2$* , *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 555, p. 169367 (2022), Elsevier
7. O. Douinat, A. Boucherdoud, A. Seghier, M. Houari, S. Mesbah, T. Lantri, B. Bestani, *Theoretical investigation of the physical, mechanical, and thermal properties of $Zr_2XB_{Ni_2}$ ($X: Al, Ga$) double half-Heusler alloys*, *Journal of Materials Research* 38(20), p. 4509–4521 (2023), Springer
8. R. Hasan, T. Park, S. Kim, H.-S. Kim, S. Jo, K.H. Lee, *Enhanced Thermoelectric Properties of $Ti_2FeNiSb_2$ Double Half-Heusler Compound by Sn Doping*, *Advanced Energy and Sustainability Research* 3(4), p. 2100206 (2022), Wiley Online Library
9. M.A. Hassan, A. El-Khouly, E.M. Elsehly, E.N. Almutib, S.K. Elshamndy, I. Serhienko, E.V. Argunov, A. Sedegov, D. Karpenkov, D. Pashkova et al., *Transport and thermoelectric properties of melt spinning synthesized $M_2FeNiSb_2$ ($M= Ti, Hf$) double half-Heusler alloys*, *Materials Research Bulletin* 164, p. 112246 (2023), Elsevier
10. M. Diaf, H. Righi, H. Rached, D. Rached, R. Beddiaf, *Ab initio study of the properties of $Ti_2PdFe(Ru)Sb_2$ double half-Heusler semiconducting alloys*, *Journal of Electronic Materials* 52(10), p. 6514–6529 (2023), Springer

11. Z. Charifi, H. Baaziz, Ş. Uğur, G. Uğur, *Prediction of the electronic structure, optical and vibrational properties of $\text{ScXCo}_2\text{Sb}_2$ ($X = \text{V, Nb and Ta}$) double half-Heusler alloys: a theoretical study*, Indian Journal of Physics 97(2), p. 413–428 (2023), Springer
12. M. Boudjelal, K. Bouhadjer, M. Matougui, S. Bentata, V. Srivastava, S. Bin-Omran, R. Khenata, *Ab initio prediction of the structural, optoelectronic and thermoelectric properties of double half-Heusler (DHH) $\text{ScXRh}_2\text{Bi}_2$ ($X = \text{Nb, Ta}$) alloys DFT study results*, Indian Journal of Physics, p. 1–14 (2024), Springer
13. J. Carrete, N. Mingo, S. Wang, S. Curtarolo, *Nanograined Half-Heusler Semiconductors as Advanced Thermoelectrics: An Ab Initio High-Throughput Statistical Study*, Advanced Functional Materials 24(47), p. 7427–7432 (2014), Wiley Online Library
14. C. Wang, J. Meyer, N. Teichert, A. Auge, E. Rausch, B. Balke, A. Hütten, G.H. Fecher, C. Felser, *Heusler nanoparticles for spintronics and ferromagnetic shape memory alloys*, Journal of Vacuum Science & Technology B 32(2), p. 1–10 (2014), AIP Publishing

**Н.С. Солтанбек¹, Ф.У. Абуова¹, Т.М. Инербаев¹, А.У. Абуова¹, Ж.Е. Закиева², Т.Н. Жангазы¹,
Б.Н. Нурмаханбетова¹, Н.А. Мерали^{1*}**

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан

²Международный университет Астана, Астана, Казахстан
(E-mail: nurpeis.93@mail.ru)

Моделирование наночастиц полного соединения Гейслера в матрице сплава полу-Гейслера: исследование структурных и электронных свойств

Аннотация. Гейслер и полугейслеровские соединения находятся в центре внимания современной материаловедческой науки благодаря своим уникальным магнитным, спинтронным и термоэлектрическим свойствам. Основной целью данной работы является исследование структуры и электронной природы наноструктуры, полученной путем внедрения полной фазы $\text{Ti}_2\text{Pt}_4\text{AlSb}$ в матрицу $\text{Ti}_2\text{Pt}_2\text{AlSb}$ полугейслеровского типа. Исследование выполнено методами первого принципа с использованием квантово-механического моделирования. В качестве модели использована суперячейка размером $3 \times 2 \times 1$, позволяющая смоделировать концентрацию наночастиц около 8,3%, что соответствует реальным условиям наноструктурированных материалов.

В ходе работы проанализированы особенности перестройки кристаллической решетки вокруг наночастицы, перераспределение Бадер-зарядов, а также локальные и общие изменения плотности электронных состояний. Полученные результаты позволяют глубже понять характер интерфейса между фазами и дают представление о механизмах взаимодействия. Работа вносит вклад в развитие подходов к целенаправленному проектированию композитных наноструктурированных материалов на основе гейслеровских соединений с улучшенными функциональными характеристиками. Кроме того, данные расчетные результаты могут быть полезны при разработке новых материалов с заданными магнитными, электронными и тепловыми свойствами, а также для понимания связи между структурной сложностью и функциональностью материала.

Ключевые слова: сплавы Гейслера; электронная структура; наноструктура, наноструктурированные соединения Гейслера; сплавы полу-Гейслера; суперячейка.

N.S. Soltanbek¹, F.U. Abuova¹, T.M. Inerbayev¹, A.U. Abuova¹, Zh.Y. Zakiyeva², T.N. Zhangazy¹,
B.N. Nurmakhambetova¹, N.A. Merali*¹

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Astana International University, Astana, Kazakhstan

(E-mail: nurpeis.93@mail.ru)

Modeling of full-Heusler alloy nanoparticles embedded in a half-Heusler matrix: Investigation of structural and electronic properties

Abstract. Heusler and half-Heusler compounds are at the forefront of modern materials science due to their unique magnetic, spintronic, and thermoelectric properties. The main objective of this work is to investigate the structure and electronic nature of a nanostructure formed by embedding a full-Heusler $\text{Ti}_2\text{Pt}_4\text{AlSb}$ phase into a $\text{Ti}_2\text{Pt}_2\text{AlSb}$ half-Heusler matrix. The study was conducted using first-principles methods based on quantum-mechanical modeling. A $3 \times 2 \times 1$ supercell was used as the model, allowing for the simulation of a nanoparticle concentration of approximately 8.3%, which corresponds to realistic conditions in nanostructured materials.

During the study, the features of crystal lattice reconstruction around the nanoparticle, Bader charge redistribution, as well as local and total changes in the electronic density of states were analyzed. The obtained results provide deeper insight into the nature of the interface between the phases and offer an understanding of the interaction mechanisms. This work contributes to the development of approaches for the targeted design of composite nanostructured materials based on Heusler compounds with enhanced functional properties. Furthermore, the computational results may be useful in the development of new materials with tailored magnetic, electronic, and thermal properties, as well as for understanding the relationship between structural complexity and material functionality.

Keywords: Heusler alloys; electronic structure; nanostructure; nanostructured Heusler compounds; half-Heusler alloys; supercell.

References

1. S. Anand, M. Wood, Y. Xia, C. Wolverton, G. J. Snyder, *Double half-Heuslers*, *Joule* 3(5), p. 1226–1238 (2019)
2. W.G. Zeier, J. Schmitt, G. Hautier, U. Aydemir, Z.M. Gibbs, C. Felser, G.J. Snyder, *Engineering half-Heusler thermoelectric materials using Zintl chemistry*, *Nature Reviews Materials* 1(6), p. 1–10 (2016)
3. T. Zhu, Y. Liu, C. Fu, J.P. Heremans, J.G. Snyder, X. Zhao, *Compromise and synergy in high-efficiency thermoelectric materials*, *Advanced Materials* 29(14), p. 1605884 (2017)
4. Y. Rached, M. Caid, M. Merabet, S. Benalia, H. Rached, L. Djoudi, M. Mokhtari, D. Rached, *A comprehensive computational investigations on the physical properties of TiXSb (X: Ru, Pt) half-Heusler alloys and $\text{Ti}_2\text{RuPtSb}_2$ double half-Heusler*, *International Journal of Quantum Chemistry* 122(9), p. e26875 (2022)

5. K. Bouhadjer, M. Boudjelal, M. Matougui, S. Bentata, T. Lantri, M. Batouche, T. Seddik, R. Khenata, B. Bouadjemi, S. Bin Omran et al., *Structural, optoelectronic, thermodynamic and thermoelectric properties of double half-Heusler (DHH) $Ti_2FeNiSb_2$ and Ti_2Ni_2InSb compounds: A TB-mBJ study*, Chinese Journal of Physics 85, p. 508–523 (2023)
6. H. Ding, X. Li, Y. Feng, B. Wu, *Electronic structure, magnetism and disorder effect in double half-Heusler alloy $Mn_2FeCoSi_2$* , Journal of Magnetism and Magnetic Materials 555, p. 169367 (2022)
7. O. Douinat, A. Boucherdoud, A. Seghier, M. Houari, S. Mesbah, T. Lantri, B. Bestani, *Theoretical investigation of the physical, mechanical, and thermal properties of Zr_2XBiNi_2 (X: Al, Ga) double half-Heusler alloys*, Journal of Materials Research 38(20), p. 4509–4521 (2023)
8. R. Hasan, T. Park, S. Kim, H.-S. Kim, S. Jo, K.H. Lee, *Enhanced Thermoelectric Properties of $Ti_2FeNiSb_2$ Double Half-Heusler Compound by Sn Doping*, Advanced Energy and Sustainability Research 3(4), p. 2100206 (2022)
9. M.A. Hassan, A. El-Khouly, E.M. Elsehly, E.N. Almutib, S.K. Elshamndy, I. Serhienko, E.V. Argunov, A. Sedegov, D. Karpenkov, D. Pashkova et al., *Transport and thermoelectric properties of melt spinning synthesized $M_2FeNiSb_2$ (M= Ti, Hf) double half-Heusler alloys*, Materials Research Bulletin 164, p. 112246 (2023)
10. M. Diaf, H. Righi, H. Rached, D. Rached, R. Beddiaf, *Ab initio study of the properties of Ti_2PdFe (Ru) Sb_2 double half-Heusler semiconducting alloys*, Journal of Electronic Materials 52(10), p. 6514–6529 (2023),
11. Z. Charifi, H. Baaziz, Ş. Uğur, G. Uğur, *Prediction of the electronic structure, optical and vibrational properties of $ScXCo_2Sb_2$ (X= V, Nb and Ta) double half-Heusler alloys: a theoretical study*, Indian Journal of Physics 97(2), p. 413–428 (2023)
12. M. Boudjelal, K. Bouhadjer, M. Matougui, S. Bentata, V. Srivastava, S. Bin-Omran, R. Khenata, *Ab initio prediction of the structural, optoelectronic and thermoelectric properties of double half-Heusler (DHH) $ScXRh_2Bi_2$ (X= Nb, Ta) alloys DFT study results*, Indian Journal of Physics, p. 1–14 (2024)
13. J. Carrete, N. Mingo, S. Wang, S. Curtarolo, *Nanograined Half-Heusler Semiconductors as Advanced Thermoelectrics: An Ab Initio High-Throughput Statistical Study*, Advanced Functional Materials 24(47), p. 7427–7432 (2014)
14. C. Wang, J. Meyer, N. Teichert, A. Auge, E. Rausch, B. Balke, A. Hütten, G.H. Fecher, C. Felser, *Heusler nanoparticles for spintronics and ferromagnetic shape memory alloys*, Journal of Vacuum Science & Technology B 32(2), p. 1–10 (2014)

Авторлар туралы мәлімет:

Солтанбек Н.С. – докторант, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының докторанты, Қажымұқан, 11, 010000, Астана, Қазақстан

Мерәлі Н.А. – хат-хабар авторы, жоба жетекшісі, PhD, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, техникалық физика кафедрасының аға оқытушысы, Қажымұқан көшесі, 11, 010000, Астана, Қазақстан

Абуова Ф.У. – PhD, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қажымұқан, 11, 010000, Астана, Қазақстан

Абуова А.У. – PhD, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, техникалық физика кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қажымұқан, 11, 010000, Астана, Қазақстан

Инербаев Т.М. – ф-м.ғ.к., Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, техникалық физика кафедрасының доценті, Қажымұқан, 11, 010000, Астана, Қазақстан

Жакиева Ж.Е. – PhD, Астана Халықаралық университетінің оқытушысы

Жанғазы Т.Н. – Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының магистранты, Қажымұқан, 11, 010000, Астана, Қазақстан

Нұрмаханбетова Б.Н. – Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының студенті, Қажымұқан, 11, 010000, Астана, Қазақстан

Солтанбек Н.С. – докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, ул.Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан

Мерәлі Н.А. – автор для корреспонденции, руководитель проекта, PhD, старший преподаватель кафедры технической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, ул. Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан

Абуова Ф.У. – PhD, ассоциированный профессор кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан

Абуова А.У. – PhD, ассоциированный профессор кафедры технической физики, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, ул.Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан

Инербаев Т.М. – к. ф-м. н., доцент кафедры технической физики, Евразийский национальный университет имени Л. Н.Гумилева, ул.Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан

Закиева Ж.Е. – PhD, преподаватель, Международный университет Астана

Жанғазы Т.Н. – магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, ул.Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан

Нұрмаханбетова Б.Н. – студент-бакалавр, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, ул. Кажымукана, 11, 010000, Астана, Казахстан

Soltanbek N.S. – doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 11 Kazhymukan str, 010000, Astana, Kazakhstan

Merali N.A. – corresponding author, project leader, PhD in technical science, senior lecturer, department of technical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 11 Kazhymukan str, 010000, Astana, Kazakhstan

Abuova F.U. – PhD, Associate Professor, Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 11 Kazhymukan str, 010000, Astana, Kazakhstan

Abuova A.U. – PhD, Associate Professor, Department of Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 11 Kazhymukan str, 010000, Astana, Kazakhstan

Inerbaev T.M. – Associate Professor, Department of Technical Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 11 Kazhymukan str, 010000, Astana, Kazakhstan

Zakiyeva Zh.Y. – PhD, Lecturer, Astana International University

Zhangazy T.N. – master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 11 Kazhymukan str., 010000, Astana, Kazakhstan

Nurmakhambetova B.N. – bachelor student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 11 Kazhymukan str., 010000, Astana, Kazakhstan



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



МРНТИ 29.15.19, 29.03.47

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-151-2-192-206>

Научная статья

Методика измерения альфа-спектров реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ на быстрых нейтронах при помощи ионизационной камеры

И.А. Чупраков^{1,2*}, Ю.М. Гледенов², Э. Сансарбаяр^{2,3}, А.К. Бекбаев^{1,2,4},
Б. Мухаметулы^{1,2,4}, Е.С. Коршиков⁴, Н.Т. Темербулатова^{1,2}

¹РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³Национальный университет Монголии, Улан-Батор, Монголия

⁴Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

(E-mail: *nitro-chupa@mail.ru)

Аннотация. В данной работе представлена экспериментальная методика измерения одномерных и двумерных спектров альфа-частиц реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ с использованием двухсекционной ионизационной камеры с сеткой на быстрых нейтронах. Актуальность исследования обусловлена растущим интересом к ядерным реакциям с участием нейтронов в контексте развития новых ядерных технологий, радиационной безопасности и астрофизических исследований. В частности, реакция $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ играет важную роль в процессах нуклеосинтеза в звездах и при расчетах радиационной защиты ядерных установок. Экспериментальные исследования проведены на ускорителе Ван де Граафа ЭГ-5 (ЛНФ ОИЯИ, Дубна) с использованием квазимоноэнергетических нейтронов, генерируемых в реакции $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$. В качестве мишеней применялись тонкие образцы аденина. Для контроля нейтронного потока использовались два детектора на основе высокообогащенного $^{238}\text{U}_3\text{O}_8$, расположенные непосредственно в рабочем объеме камеры. Проведено моделирование эксперимента, которое позволило учесть все основные факторы, влияющие на форму спектров, подбору оптимальных рабочих условий и тем самым повысить достоверность полученных результатов. Экспериментальные спектры сопоставлены с результатами моделирования, выполненного в среде MATLAB с учетом реальной геометрии установки. Полученные результаты представляют интерес для ядерной физики и прикладных исследований, связанных с взаимодействием быстрых нейтронов с азотсодержащими соединениями.

Ключевые слова: быстрые нейтроны; спектры альфа частиц; детектор; ядерные реакции с нейтронами; сечения реакции.

Поступила 30.04.2025. После доработки 30.05.2025. Принята к печати 02.06.2025. Доступно онлайн 25.06.2025.

¹ *автор для корреспонденции

Введение

Актуальность исследования реакций с испусканием заряженных частиц при помощи быстрых нейтронов представляет большой интерес как для прикладных задач (например, в проектировании и оценке повреждений энергетических установок), так и для фундаментальной ядерной физики, понимания протекания астрофизических процессов, моделирования ядерных процессов [1-3]. Особую сложность представляет описание реакций с участием заряженных частиц, таких, как (n, α) и (n, p) . Для проверки и улучшения различных теоретических моделей необходимо большое количество данных, полученных экспериментальным путем.

Однако на сегодняшний день данные о полных сечениях, энергетических спектрах заряженных частиц и их угловых распределениях в области энергии нейтронов от 1-10 МэВ и интересующих ядер очень мало. Согласно современным данным [4-13], большинство исследований (n, α) -реакций в диапазоне энергий нейтронов $\sim 1-10$ МэВ проводилось методом активационного анализа, который не позволяет измерить энергетические спектры и угловые распределения испускаемых частиц. Между тем именно эти данные критически важны для оценки радиационного повреждения конструкционных материалов реакторов, связанного с накоплением гелия и водорода.

Современные реакторы в настоящее время работают на оксидном топливе, однако рассматривается переход на более безопасное и экономичное топливо для реакторов IV поколения [14,15]. Одним из таких перспективных топлив являются нитриды, обладающие лучшей теплопроводностью по сравнению с оксидами, а также высокой температурой плавления, что повышает их устойчивость в процессе эксплуатации. Поскольку в активной зоне реактора может содержаться значительное количество азота, особенно важным становится уточнение параметров для реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)$. Существующие экспериментальные данные по сечениям ключевых реакций накопления гелия ($^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$) и водорода ($^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$) показывают существенные расхождения. В рамках данной работы мы исследуем первую из них. В предыдущих исследованиях [16] изучалась реакция $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ в интервале энергий нейтронов от 1,3 до 8,0 МэВ. Точность полученных значений сечения реакции, согласно указанным работам, находится в пределах 20-40%. В данной работе ставится задача проведения измерений энергетических спектров (как одномерных, так и двумерных) с применением двухсекционной ионизационной камеры сеточного типа.

Методология

Детали эксперимента

На рисунке 1 представлена схематично экспериментальная установка, которая расположена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединённого института ядерных исследований. Она включает в себя три ключевые части: источник квази-моноэнергетических нейтронов, детектор заряженных частицы, в частности α -частиц, с размещёнными образцами, а также монитор, предназначенный для счета быстрых нейтронов.

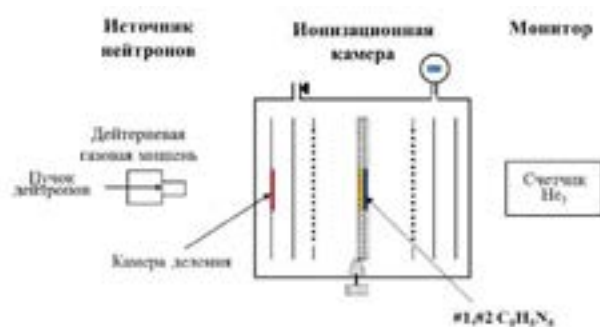


Рисунок 1. Схематический чертеж экспериментальной установки.

Источник нейтронов

Квазимоноэнергетические нейтроны генерировались в результате реакции $2\text{H}(\text{d},\text{n})3\text{He}$, происходящей в дейтериевой газовой мишени. Газовая нейтрон-производящая мишень представляет собой цилиндр длиной 2,0 см. Между вакуумным каналом ускорителя ЭГ-5 и цилиндром установлена разделительная тонкая молибденовая фольга толщиной 6 мкм. Давление в нейтрон-производящей мишени 2,5 атм., а ток падающего дейтериевого пучка, направленного на фольгу, составлял 2,5-3,0 мкА. Поток нейтронов, получаемых в этих условиях, составлял порядка $6,5 \times 10^5$ нейтронов/см²*с.

Детектор заряженных частиц

Для регистрации заряженных частиц в эксперименте используется двухсекционная ионизационная камера с сеткой и общим катодом, которая использовалась в работах [17-19]. Внутреннее устройство детектора, включая катод с размещёнными образцами, представлено на рисунке 2. Камера выполнена в цилиндрическом корпусе из нержавеющей стали и оснащена пятью сигнальными и пятью высоковольтными вакуумными разъёмами. Также предусмотрен механизм, позволяющий заменять образцы внутри камеры без нарушения её герметичности. Конструкция катода рассчитана на размещение до пяти пар образцов, которые можно оперативно заменять в ходе измерений. Это обеспечивает проведение экспериментов в строго одинаковых условиях для всех образцов. Основным рабочим газом в камере служит криптон, с добавлением примерно 3% метана (CH_4) для улучшения характеристик газа. Одним из главных преимуществ данной версии спектрометра является возможность быстрой смены мишеней без вскрытия камеры и изменения её рабочих параметров. Такой подход позволяет рационально использовать время пучка и эффективно расходовать дорогостоящие рабочие газы, такие, как Kr, Xe и CF_4 . Внутренний вид камеры без кожуха показан на рисунке 2.

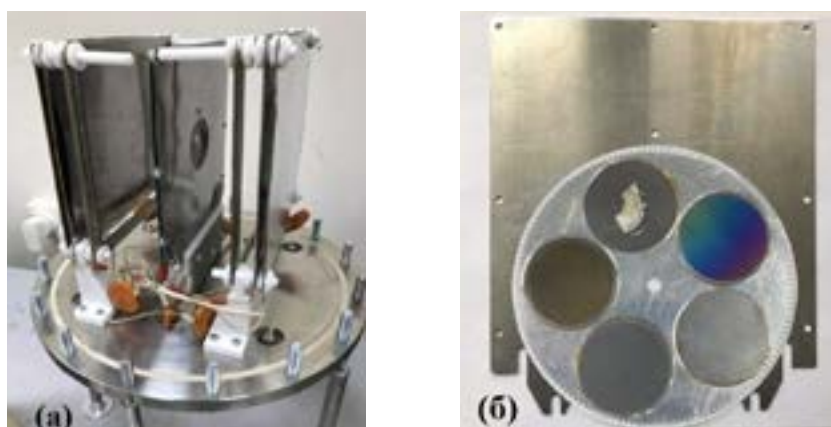


Рисунок 2. (а) Двухсекционная ионизационная камера с сеткой, смонтированная на днище при снятом корпусе и (б) строение катода с установленными образцами.

Мониторы нейтронного потока и измерения абсолютного нейтронного потока.

Для измерения абсолютного нейтронного потока на каждой энергии нейтронов проводились отдельные эксперименты с использованием реакции $^{238}\text{U}(n,f)$. Образец урана с содержанием ^{238}U не менее 99,999% устанавливался точно в том же месте и имел такие же размеры, как и исследуемые образцы, что обеспечивало идентичные условия облучения. Одновременно с этим проводилась калибровка камеры деления и длинного счётчика на основе ^3He , которые применялись для мониторинга нейтронного потока в процессе эксперимента. Оба метода показали очень близкие и согласующиеся между собой результаты, что подтверждает надёжность измерений.

Образцы

Конструкция катода позволяет размещать 5 образцов с одной стороны и 5 – с другой. Исследуемые образцы аденина ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$) были расположены на обеих сторонах диска. Параметры каждой мишени из аденина и схема компоновки катода приведены в таблице 1. Для измерения потока нейтронов в позиции исследуемого образца размещался эталонный образец ^{238}U с обогащением 99,999%. Для измерения фона использовалась подложка из тантала (Ta). Исследуемое вещество аденин было нанесено на идентичную танталовую подложку методом напыления.

Таблица 1. Информация о прямых и обратных мишенях на устройстве смены образцов

Мишень	Вперед	Назад	Назначение
1	α - источник (^{234}U , 4.77 MeV; ^{238}U , 4.20 MeV)	α - источник (^{234}U , 4.77 MeV; ^{238}U , 4.20 MeV)	Калибровка энергии, определение линии 90°
2	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$ 44мм. диаметр, 144,7 мг/см ²	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$ 44 мм. диаметр, 154,6 мг/см ²	Измерение вперед
3	Тантал 0.1 мм, 48 мм. диаметр	Тантал 0.1 мм, 48 мм. диаметр	Фоновые измерения

4	^{238}U 308 99.999%, 44 мм. диаметр , NU=1.74E19	Тантал 0.1 mm, 48 мм. диаметр	Определение нейтронно- го потока
---	--	----------------------------------	-------------------------------------

Электроника α спектрометра

Сигналы, поступающие с катода и анодов ионизационной камеры, усиливались и оцифровывались с помощью специализированных оцифровщиков формы импульсов. В эксперименте использовалась система сбора, накопления и обработки данных на базе платформы PXI, оснащённая оцифровщиком PXIE-4. Система PXI включала в себя шасси NI PXI-1031 с установленным контроллером NI PXI-8820, а также высокоскоростной оцифровщик PXIE-4, разработанный компанией XIA [20]. Блок-схема используемой электронной аппаратуры представлена на рисунке 3.

В процессе работы два сигнала с анодов и один – с общего катода после прохождения через зарядочувствительные предусилители и быстрые усилители подавались на три канала оцифровщика. Четвёртый канал предназначался для подключения счётчика нейтронов, применяемого при измерениях нейтронного потока.

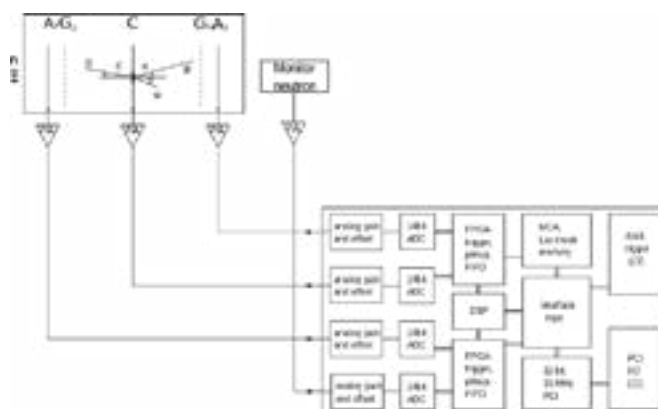


Рисунок 3. Функциональная блок-схема сбора и обработки сигналов Pixie-4

Симуляция измерений альфа-спектров реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$

Перед началом нашего эксперимента мы провели детальные предварительные расчёты, чтобы предсказать ожидаемые спектры. Для этого использовали программное обеспечение, разработанное на платформе Matlab, а также информацию о сечениях, угловых и энергетических распределениях, полученную из пакета Talys 1.9.[21]. Геометрия установки была точно воспроизведена по схеме, изображённой на рисунке 6. В качестве исследуемого образца мы выбрали аденин с толщиной 100 и 200 мкг/см², что позволило исследовать влияние массы образца на результаты. В эксперименте использовались газовые смеси, такие, как Kr+3% CO₂, 5% водорода (H₂) и ксенон с 5% водорода. Кроме того, мы рассмотрели смесь Kr+5% N₂ для экспериментов с газообразным образцом. Энергетический диапазон нейтронов от 4,0 до 6,0 МэВ был выбран для исследования реакции, характерных для данного интервала энергий.

На рисунке 4 представлены расчетные одномерные спектры α частиц из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ для энергии нейтронов $E_n = 5$ МэВ. В ходе расчетов установлены ожидаемые положения событий от $^{14}\text{N}(n, \alpha)$ реакции, а также потенциальные фоновые процессы, которые могут затруднить анализ экспериментальных результатов. Также на рисунке 4 показано влияние фоновых реакций. Рисунки 7 и 8 предоставляют более подробную информацию о рассчитанных двумерных катодно-анодных спектрах. На рисунке 5 показаны результаты для направления "вперед" как с учётом фоновых реакций, так и без них. Рисунок 6 демонстрирует аналогичные данные для направления "назад". Полученные результаты подчеркивают важность предварительного моделирования для успешного проведения экспериментов и их последующей интерпретации. Проведённые расчёты служат основой для дальнейших исследований и анализа данных.

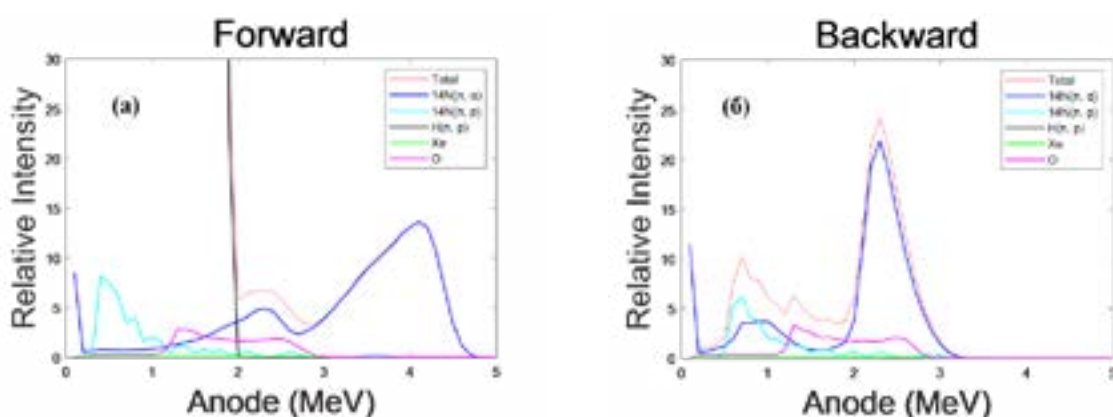


Рисунок 4. (а) Одномерный расчетный спектр α частиц из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ в направлении «вперед» и (б) в направлении «назад» при $E_n = 5,0$ МэВ.

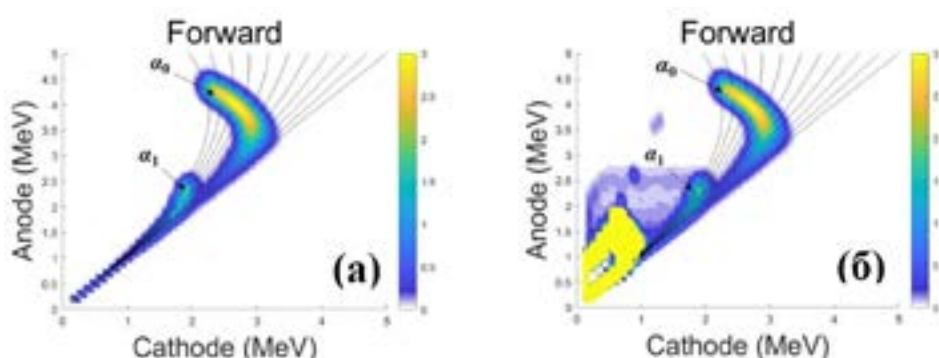


Рисунок 5. Двумерный расчетный спектр α частиц из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ при $E_n = 5,0$ МэВ, направление «вперед» (а); (б) с добавлением вклада фоновых реакций.

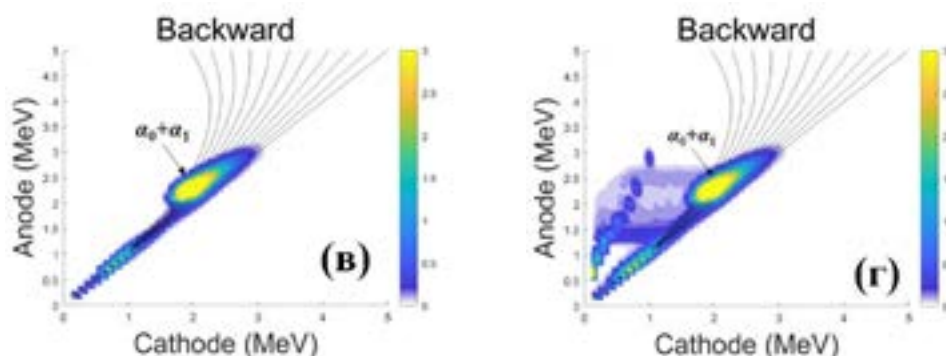


Рисунок 6. Двумерный расчетный спектр α частиц из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ при $E_n = 5,0$ МэВ, (в) направление «назад»; (г) с добавлением вклада фоновых реакций.

Измерение альфа-спектров реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$

Методика измерения и обработки экспериментальных данных может быть продемонстрирована на примере измерений реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ проведенных при энергиях нейтронов: 4,5; 5,0; 5,25 и 5,3 МэВ. Схема эксперимента показана на рисунке 1. В качестве рабочего газа использовалась готовая смесь $\text{Kr} + 3\%\text{CH}_4$ при давлении 0,7 атм. Катод ИК содержит диск с пятью позициями для образцов, которые устанавливались подложками друг к другу в каждую из них. Все образцы диаметром 44 мм нанесены на танталовую подложку толщиной 0,1 мм и диаметром 48 мм. В трех из пяти позиций установлены 2 пиковый α источник, образцы аденина ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$, толщиной 196 и 195 мкг/см²) и Та подложки, в четвертой образец ^{238}U (содержание более 99,999%, $\text{NU}=2,064 \cdot 10^{19}$).

Для каждой энергии выполнено 5 серий измерений:

- 1) Калибровка аппаратуры с использованием 2 пикового α источника (рисунок 9) - 20 мин. Первая линия с энергией 4,22 МэВ принадлежит α - частицам ^{238}U , а вторая линия с энергией 4,77 МэВ α - частицам ^{234}U , соответственно.
- 2) Измерение с ^{14}N образцом – 2 часа;
- 3) Измерение фона (Та подложка) – 3 часа;
- 4) Измерение с образцом ^{238}U – 1 час;
- 5) Повторное измерение с α источником для проверки стабильности аппаратуры.

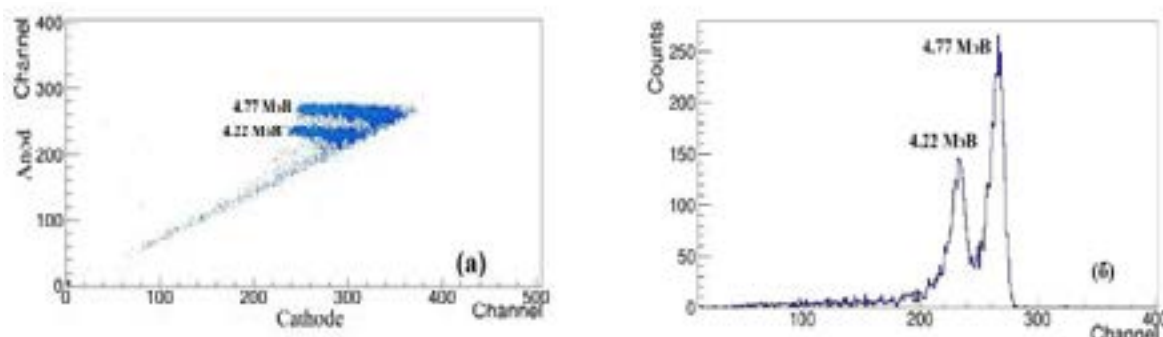


Рисунок 7. (а) измеренный двумерный анод-катод спектр и (б) линейный спектр от компанд α – источника natU.

Сигналы от осколков деления камеры деления подавались в систему сбора данных при измерении переднего плана, фона и реакции $^{238}\text{U}(n, f)$. Во всех измерениях длинный счетчик ^3He также использовался в качестве монитора потока нейтронов. Анализ данных показал, что результаты контроля нейтронного пучка с помощью длинного счетчика и камеры деления весьма близки.

Результаты

На рисунке 8 представлены измеренные экспериментальные анод-катод двумерные спектры из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ без вычитания фона (а) в направлении «вперед» и в направлении «назад» (б), а на рисунке 9 - двумерные спектры за вычетом фона. На рисунке 10 приведены анодные спектры при $E_n = 5,3$ МэВ. Из рисунка 8 видно, что значительный вклад в альфа-спектр вносят фоновые реакции от рабочего газа (протоны отдачи от добавки метана) и от твердого образца аденина. С использованием обычно применяемых смесей рабочих газов на основе аргона, криптона, метана... часто не удается в эксперименте выделить искомые события из исследуемой реакции из-за перекрытия спектров продуктами реакций на рабочем газе, являющимися в нашем случае дополнительным фоном. В направлении «вперед» удалось успешно разделить искомые события от фоновых, в отличие от направления «назад», где это оказалось более сложной задачей. Так, в направлении «назад» полученные спектры хорошо согласуются с расчетными, что показывает влияние кинематического эффекта для легких ядер. Отдельные измерения фона существенно помогли выделить искомые события, а моделирование повысило точность и надёжность полученных результатов.

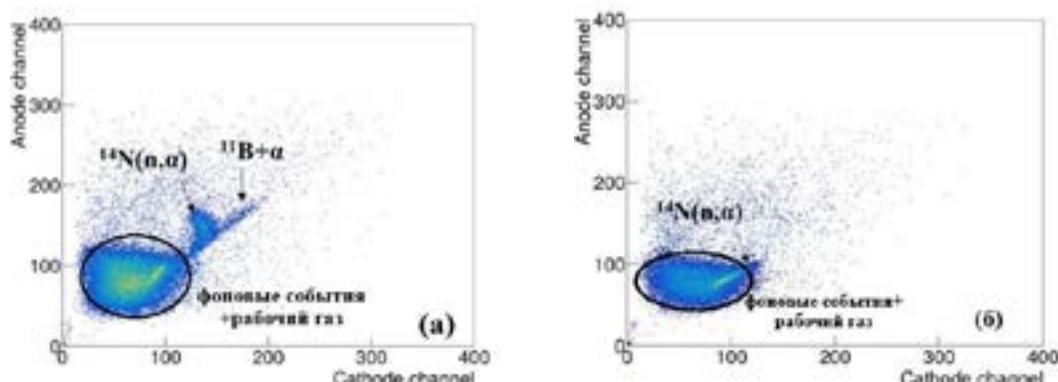


Рисунок 8. Анод-катод двумерные спектры из реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ без вычитания фона (а) в направлении «вперед» и (б) в направлении «назад» при $E_n = 5,3$ МэВ.

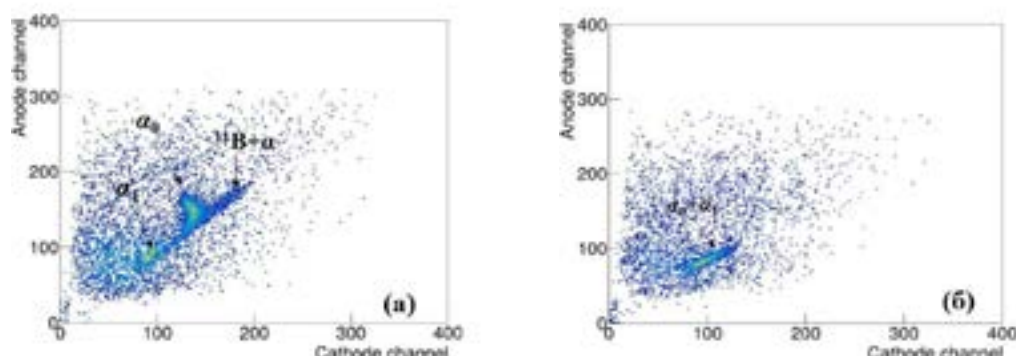


Рисунок 9. Анод-катод двумерный спектр из реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ за вычетом фона при $E_n = 5,3$ МэВ (а) в направлении «вперед» и (б) в направлении «назад».

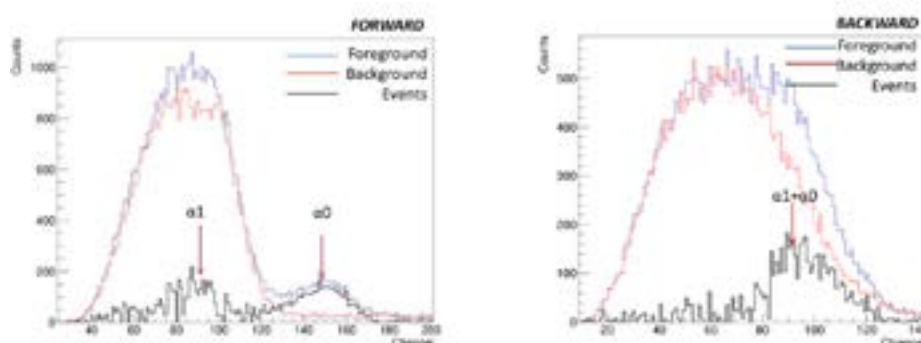


Рисунок 10. Анодный спектр реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ при $E_n = 5,3$ МэВ.

Заключение

В ходе эксперимента были проведены измерения реакции $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ в диапазоне энергий нейтронов 4,5–5,3 МэВ с использованием тонких твёрдых образцов аденина. В качестве рабочего газа применялась готовая смесь Kr с 3%CH₄. В эксперименте надёжно зарегистрированы α_0 -переходы, а также получены указания на возможное наличие α_1 -переходов. Точность определения интенсивности нейтронного потока составила 2–3%. Экспериментальные спектры хорошо согласуются с результатами моделирования в Matlab, что подтверждает корректность методики измерений. Однако для более точного анализа требуется дополнительное исследование с газообразным образцом, обеспечивающим чёткое разделение α -переходов. Используемая система детектирования позволяет регистрировать спектры α -частиц для переходов на различные уровни дочернего ядра, а также анализировать угловое распределение продуктов реакции. Это открывает перспективу для точного определения сечений реакций с быстрыми нейтронами, что важно для дальнейших исследований в области ядерной физики.

Благодарность, конфликт интересов

Работа выполнена в рамках проекта (грант №BR21881930) при поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов

Чупраков И.А. – существенный вклад в концепцию и дизайн работы; анализ и интерпретация результатов работы, а также написание основного текста научной статьи;

Гледенов Ю.М. – руководство по исследованию, утверждение окончательного варианта статьи для публикации;

Энхболд С. – анализ и интерпретация результатов работы, написание текста;

Бекбаев А.К. – теоретические расчеты и анализ результатов работы;

Мухаметулы Б. – участие в эксперименте, выполнение задач по сбору данных, их предварительная обработка и анализ;

Коршиков Е.С. – проведение эксперимента, подготовка экспериментального оборудования и запуск системы сбора данных, организация и контроль сбора данных во время всего эксперимента.

Темербулатова Н.Т. – подготовка и изготовления исследуемых образцов.

Список литературы

1. Yu.M. Gledenov, M. Sedysheva, G. Zhang et al. *Investigation of (n,α) Reaction for Rare-Earth Elements in the MeV Neutron Energy Region*, Journal of the Korean physical society 59(2), p.1693–1696(2011). DOI: <https://doi.org/10.3938/jkps.59.1693>

2. U. Kannan, *Perspectives on nuclear data for advanced reactor design and analysis*, Life Cycle Reliab Saf Eng 9, p.135–146(2020). DOI: <https://doi.org/10.1007/s41872-020-00120-5>

3. F. Käppeler, R. Gallino, S. Bisterzo, W. Aoki, *The s Process: Nuclear Physics, Stellar Models, and Observations*, Reviews of Modern Physics, 83(1), p.157–193(2011). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.83.157>

4. EXFOR. *Experimental Nuclear Reaction Data*, <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>. (дата обращения: 20.01.2025)

5. *Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VIII.0*, <http://www-nds.iaea.org/exfor/endl.html>. (дата обращения: 15.01.2025)

6. D.A. Brown, M.B. Chadwick, R. Capote et al., *ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data*, Nucl. Data Sheets 148, p.114–124(2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.02.001>

7. M.B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský et al., *ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data*, Nucl. Data Sheets, 112(12), p.2887–2996(2011). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>

8. JEFF-3.3. <https://www.oecd-neo.org/dbdata/jeff/jeff33/index.html#neutrons> (дата обращения: 20.01.2025).

9. Y.L. Yan, J.S. Zhang, J.F. Duan. *The database of nuclear physics*. <http://www.nuclear.csdb.cn/pingjia.html> (дата обращения: 15.01.2025)

10. ADS-2.0. <https://wwwnds.iaea.org/exfor/servlet/E4sGetTabSect?SectID=14236409&req=2833&PenSectID=19357937&json> (дата обращения: 20.01.2025).

11. A.J. Koning, D. Rochman, J. Ch. Sublet et al. *TENDL: Complete Nuclear Data Library for Innovative Nuclear Science and Technology*, Nucl. Data Sheets, 155, p.1–55(2019)0. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2019.01.002>
12. O. Iwamoto, N. Iwamoto, K. Shibata, et al. *Status of JENDL*, EPJ Web of Conferences 2020. DOI: <https://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/E4sGetTabSect?SectID=14620406&req=2833&PenSectID=19396258>.
13. H.D. Lemmel, P.K. McLaughlin, BROND-2.2. *Russian evaluated neutron reaction data library. Summary documentation* (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1994) (дата обращения: 15.01.2025).
- 14 C. Ekberg, D.R. Costa, M. Hedberg et al., *Nitride fuel for Gen IV nuclear power systems*, J. Radioanal. Nucl.
15. R.D. Syarifah, Z. Su'ud, K. Basar et al., *Comparison of uranium plutonium nitride (U-Pu-N) and thorium nitride (Th-N) fuel for 500 MWth gas-cooled fast reactor (GFR) long life without refueling*, Int. J. Energy Res., 42(1) (2018). DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3923>
16. V.A. Khryachkov, I.P. Bondarenko, B.D. Kuzminov et al. *(n,α) reactions cross section research at IPPE*, EPJ Web of Conferences, 21 (2012). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20122103005>
17. G. Zhang, Yu. M. Gledenov, G. Khuukhenkhuu, M. V Sedysheva, P. J. Szalanski, J. Liu, H. Wu, X. Liu, J. Chen, and V. A. Stolupin, Cross sections of the $^{67}\text{Zn}(n,\alpha)^{64}\text{Ni}$ reaction at 4.0, 5.0, and 6.0 MeV, Phys. Rev. C, 82, p.054619(2010). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.82.054619>
18. E. Sansarbayer, Yu. M. Gledenov, I. Chuprakov, G. Khuukhenkhuu, G. S. Ahmadov, L. Krupa, G. Zhang, J. Haoyu, Z. Cui, Y.Hu, J. Liu, N. Battsooj, I. Wilhelm, M. Solar, R. Sykora, and Z. Kohout Cross sections for the $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$ reaction in the 3.3–5.3 MeV neutron energy region, Phys. Rev. C, 104, p.044620(2021). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.044620>
19. G.Zhang, E. Sansarbayer, Yu. M. Gledenov, G. Khuukhenkhuu, L. Krupa, Gustova N. S., Voronyuk M. G., Chuprakov I., Battsooj N., et.al, Cross sections of the $^{91}\text{Zr}(n,\alpha)^{88}\text{Sr}$ reaction in the 3.9–5.3 MeV neutron energy region, Phys. Rev. C, 106, p.064602(2022). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.106.064602>
20. https://www.xia.com/dfg_products.html (дата обращения: 15.01.2025) -
21. J. Koning, S. Hilaire, and S. Goriely, TALYS-1.9 (2017), <http://www.TALYS.eu>. (дата обращения: 15.01.2025).

И.А. Чупраков^{1,2*}, Ю.М. Гледенов², Э. Сансарбаяр^{2,3}, А.К. Бекбаев^{1,2,4},

Б. Мұхаметұлы^{1,2,4}, Е.С. Коршиков⁴, Н.Т. Темербулатова^{1,2}

¹РГП Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

²Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей

³Моңғолия ұлттық университеті, Ұлан-Батор, Моңғолия

⁴Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

(E-mail: nitro-chupa@mail.ru)

Иондау камерасы арқылы жылдам нейтрондарда $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ реакциясының альфа-спектрлерін өлшеу әдістемесі

Аңдатпа. Бұл жұмыста жедел нейтрондарды қолданып, торлы қос бөлікті иондалу камерасы арқылы $^{14}\text{N}(n,\alpha)^{11}\text{B}$ реакциясынан туындайтын альфа-бөлшектердің бір өлшемді және екі

өлшемді спектрлерін өлшеу әдістемесі ұсынылған. Зерттеудің өзектілігі нейтрондар қатысатын ядролық реакцияларға қызығушылықтың артуымен, жаңа ядролық технологиялардың дамуы, радиациялық қауіпсіздік және астрофизикалық зерттеулер контекстінде байланысты. Тәжірибелік зерттеулер Дубнадағы БҰҒЗИ БНФЗ-да орналасқан ЭГ-5 Ван де Грааф үдеткішінде $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ реакциясы арқылы алынған жартылай моноэнергетикалық нейтрондарды пайдаланып жүргізілді. Нысан ретінде жұқа аденин үлгілері қолданылды. Нейтрон ағынын бақылау үшін камераның жұмыс көлеміне орналастырылған жоғары байытылған $^{238}\text{U}_3\text{O}_8$ негізіндегі екі детектор пайдаланылды. Эксперименттің модельдеуі жүргізілді, бұл спектрлердің формасына әсер ететін барлық негізгі факторларды ескеруге, оңтайлы жұмыс шарттарын таңдауға мүмкіндік берді және осылайша алынған нәтижелердің нақтылығын арттырды. Эксперименттік спектрлер MATLAB ортасында қондырғының нақты геометриясын есепке ала отырып алынған модельдеу нәтижелерімен салыстырылды. Алынған нәтижелер ядролық физикаға және азот қосылыстарымен жедел нейтрондардың өзара әрекеттесуіне байланысты қолданбалы зерттеулер үшін қызығушылық тудырады.

Түйін сөздер: жылдам нейтрондар, альфа бөлшектерінің спектрлері, детектор, нейтрондармен ядролық реакциялар, реакция қималары.

I.A. Chuprakov^{1,2*}, Yu.M. Gledenov², E. Sansarbayar^{2,3}, A.K. Bekbayev^{1,2,4},
B. Mukhametuly^{1,2,4}, E.S. Korshikov⁴, N.T. Temerbulatova^{1,2}

¹*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

³*National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia*

⁴*Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

(E-mail: nitro-chupa@mail.ru)

Method of measuring alpha spectra of the reaction $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ on fast neutrons using an ionization chamber

Abstract. This work presents an experimental method for measuring one-dimensional and two-dimensional spectra of alpha particles from the $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ reaction using a two-section gridded ionization chamber with fast neutrons. The relevance of the research stems from the growing interest in nuclear reactions involving neutrons in the context of the development of new nuclear technologies, radiation safety, and astrophysical studies. In particular, the $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$ reaction plays an important role in nucleosynthesis processes in stars and radiation shielding calculations for nuclear facilities. Experimental studies were conducted on the EG-5 Van de Graaff accelerator (FLNP JINR, Dubna) using quasi-monoenergetic neutrons generated in the $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$ reaction. Thin adenine samples were used as targets. Two detectors based on highly enriched $^{238}\text{U}_3\text{O}_8$ were used to control the neutron flux, located directly in the chamber's working volume. A simulation of the experiment was carried out, which made it possible to take into account all the main factors affecting the shape of the spectra, to select optimal operating conditions, and thereby increase the reliability of the results. Experimental spectra are compared with the results of modeling performed in the MATLAB environment, taking into account the

real geometry of the setup. The results obtained are of interest for nuclear physics and applied research related to the interaction of fast neutrons with nitrogen-containing compounds.

Key words: fast neutrons, alpha particle spectra, detector, nuclear reactions with neutrons, reaction cross-sections.

References

1. Yu.M. Gledenov, M. Sedysheva, G. Zhang et al. *Investigation of (n,α) Reaction for Rare-Earth Elements in the MeV Neutron Energy Region*, Journal of the Korean physical society 59(2), p.1693–1696(2011). DOI: <https://doi.org/10.3938/jkps.59.1693>
2. U. Kannan, *Perspectives on nuclear data for advanced reactor design and analysis, Life Cycle Reliab Saf Eng* 9, p.135–146(2020). DOI: <https://doi.org/10.1007/s41872-020-00120-5>
3. F. Käppeler, R. Gallino, S. Bisterzo, W. Aoki, *The s Process: Nuclear Physics, Stellar Models, and Observations*, Reviews of Modern Physics, 83(1), p.157–193(2011). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.83.157>
4. EXFOR. Experimental Nuclear Reaction Data, <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm> [cited 2025 20 January]
5. *Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VIII.0*, <http://www-nds.iaea.org/exfor/endl.html> [cited 2025 15 January]
6. D.A. Brown, M.B. Chadwick, R. Capote et al., ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data, Nucl. Data Sheets 148, p.114–124(2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.02.001>
7. M.B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský et al., *ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data*, Nucl. Data Sheets, 112(12), p.2887–2996(2011). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
8. JEFF-3.3., <https://www.oecd-neo.org/dbdata/jeff/jeff33/index.html#neutrons> [cited 2025 20 January]
9. Y.L. Yan, J.S. Zhang, J.F. Duan. *The database of nuclear physics*. <http://www.nuclear.csdb.cn/pingjia.html>.
10. ADS-2.0, <https://wwwnds.iaea.org/exfor/servlet/E4sGetTabSect?SectID=14236409&req=2833&PenSectID=19357937&json> [cited 2025 20 January]
11. A.J. Koning, D. Rochman, J. Ch. Sublet et al. *TENDL: Complete Nuclear Data Library for Innovative Nuclear Science and Technology*, Nucl. Data Sheets, 155, p.1–55(2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2019.01.002>.
12. O. Iwamoto, N. Iwamoto, K. Shibata, et al. *Status of JENDL*, EPJ Web of Conferences 2020. DOI: <https://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/E4sGetTabSect?SectID=14620406&req=2833&PenSectID=19396258>.
13. H.D. Lemmel, P.K. McLaughlin, BROND-2.2. *Russian evaluated neutron reaction data library. Summary documentation* (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1994)
14. C. Ekberg, D.R. Costa, M. Hedberg et al., *Nitride fuel for Gen IV nuclear power systems*, J. Radioanal. Nucl. Chem, 318(3) (2018). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6316-0>
15. R.D. Syarifah, Z. Su'ud, K. Basar et al., *Comparison of uranium plutonium nitride (U-Pu-N) and thorium nitride (Th-N) fuel for 500 MWth gas-cooled fast reactor (GFR) long life without refueling*, Int. J. Energy Res., 42(1) (2018). DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3923>

16. V.A. Khryachkov, I.P. Bondarenko, B.D. Kuzminov et al. *(n,α) reactions cross section research at IPPE, EPJ Web of Conferences 21(2012)*. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20122103005>
17. G. Zhang, Yu. M. Gledenov, G. Khuukhenkhuu, M. V Sedysheva, P. J. Szalanski, J. Liu, H. Wu, X. Liu, J. Chen, and V. A. Stolupin, Cross sections of the $^{67}\text{Zn}(n, \alpha)^{64}\text{Ni}$ reaction at 4.0, 5.0, and 6.0 MeV, *Phys. Rev. C*, 82, p.054619(2010). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.82.054619>
18. E. Sansarbayer, Yu. M. Gledenov, I. Chuprakov, G. Khuukhenkhuu, G. S. Ahmadov, L. Krupa, G. Zhang, J. Haoyu, Z. Cui, Y. Hu, J. Liu, N. Battsooj, I. Wilhelm, M. Solar, R. Sykora, and Z. Kohout Cross sections for the $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$ reaction in the 3.3–5.3 MeV neutron energy region, *Phys. Rev. C*, 104, p.044620(2021). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.044620>
19. G. Zhang, E. Sansarbayer, Yu. M. Gledenov, G. Khuukhenkhuu, L. Krupa, Gustova N. S., Voronyuk M. G., Chuprakov I., Battsooj N., et.al, Cross sections of the $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ reaction in the 3.9–5.3 MeV neutron energy region, *Phys. Rev. C*, 106, p.064602(2022). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.106.064602>
20. https://www.xia.com/dfg_products.html [cited 2025 15 January]
21. J. Koning, S. Hilaire, and S. Goriely, TALYS-1.9 (2017), <http://www.TALYS.eu>, [cited 2025 15 January]

Сведения об авторах:

Чупраков И.А. – автор для корреспонденции, PhD, старший научный сотрудник РГП «Институт ядерной физики», ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан

Гledenov Ю.М. – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, 141980, г. Дубна, Россия

Энхболд С. – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Дубна, Россия

Бекбаев А.К. – PhD, заместитель главного инженера комплекса ВВР-К, РГП «Институт ядерной физики», ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан

Мухаметулы Б. – PhD, старший научный сотрудник, РГП «Институт ядерной физики», ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан

Коршиков Е.С. – PhD, ведущий научный сотрудник, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект аль-Фараби, 71, 050038, Алматы, Казахстан

Темербулатова Н.Т. – младший научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Дубна, Россия

Chuprakov I. – corresponding author, PhD, Senior Researcher, Institute of Nuclear Physics, Ibragimov str., 1, 050032, Almaty, Kazakhstan.

Gledenov Yu.M. – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Dubna, Russia.

Enkhbold S. – candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia.

Bekbaev A.K. – PhD, Deputy Chief Engineer of the BBP-K Complex, Institute of Nuclear Physics, st. Ibragimova, 1, 050032, Almaty, Kazakhstan.

Mukhametuly B. – PhD, Senior Researcher, Institute of Nuclear Physics, Ibragimova st., 1, 050032, Almaty, Kazakhstan.

Korshikov E.S. – PhD, Leading Researcher, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Avenue, 71, 050038, Almaty, Kazakhstan.

Temerbulatova N.T. – Junior Researcher, Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Dubna, Russia

Чупраков И.А. – хат-хабар авторы, PhD, "Ядролық физика институты" РМК аға ғылыми қызметкері, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан

Гледенов Ю.М. – физика-математика ғылымдарының докторы, жетекші ғылыми қызметкер Біріккен ядролық зерттеулер институты, 141980, Дубна, Ресей

Энхболд С. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, ғылыми қызметкер, Біріккен ядролық зерттеулер институты, 141980, Дубна, Ресей

Бекбаев А.К. – PhD, ВВР-К кешені бас инженерінің орынбасары, "Ядролық физика институты" РМК, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан

Мұхаметұлы Б. – PhD, аға ғылыми қызметкер, "Ядролық физика институты" РМК, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан

Коршиков Е.С. – PhD, жетекші ғылыми қызметкер, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Әл-Фараби даңғылы, 71, 050038, Алматы, Қазақстан.

Темербулатова Н.Т. – кіші ғылыми қызметкер, Біріккен ядролық зерттеулер институты, 141980, Дубна, Ресей



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Бас редакторы: К.Ш. Жумадилов
Компьютерде беттеген: Д. Нурушева

Авторларға арналған нұсқаулықтар,
жарияланым этикасы журнал сайтында берілген: <http://bulphysast.enu.kz>

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы.
Физика. Астрономия сериясы.
№2(151)/2025 – Астана: ЕҰУ. – 207 б.
Шартты б.т. – 25,8. Таралымы – сұраныс бойынша
Басуға қол қойылды: 30.06.2025 ж.
Ашық қолданыстағы электронды нұсқа: <http://bulphysast.enu.kz>

Мазмұнына типография жауап бермейді

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2.
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті Тел.: +7(71-72) 70-95-00 (ішкі 31-410)
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің баспасында басылды.