

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

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

# ХАБАРШЫСЫ

---

**BULLETIN**

of L.N. Gumilyov Eurasian  
National University

**ВЕСТНИК**

Евразийского национального  
университета имени Л.Н. Гумилева

**ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ** сериясы

**PHYSICS. ASTRONOMY** Series

Серия **ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ**

№3(132)/2020

1995 жылдан бастап шығады

Founded in 1995

Издается с 1995 года

Жылына 4 рет шығады

Published 4 times a year

Выходит 4 раза в год

**Нұр-Сұлтан, 2020**

**Nur-Sultan, 2020**

**Нур-Султан, 2020**

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

*Бас редактордың орынбасары*

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

*Редакция алқасы*

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

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

*Журнал менеджері:* Г. Мендыбаева

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

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

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

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігінде 27.03.2018ж.

№16999-ж тіркеу куәлігімен тіркелген.

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

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

© Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

*Editor-in-Chief*

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

*Deputy Editor-in-Chief*

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

*Editorial Board*

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

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

*Managing Editor:* G. Mendybayeva

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

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

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

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

Registration certificate №16999-ж from 27.03.2018.

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

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

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

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

*Зам. главного редактора*

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

*Редакционная коллегия*

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

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

Тел.: (7172) 709-500 (вн. 31-428)

E-mail: vest\_phys@enu.kz

*Менеджер журнала:* Г. Мендыбаева

**Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева.**

**Серия ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ**

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

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

Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан.

Регистрационное свидетельство №16999-ж от 27.03.2018г.

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

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

© Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

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

№3(132)/2020

МАЗМҰНЫ

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

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

№3(132)/2020

CONTENTS

---

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

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

№3(132)/2020

СОДЕРЖАНИЕ

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

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Физика. Астрономия сериясы, 2020, том 132, №3, 14-24 беттер  
<http://bulphysast.enu.kz>, E-mail: vest\_phys@enu.kz

**МРНТИ: 29.29.39; 29.29.31**

И. Горлачев<sup>1</sup>, Н. Глущенко<sup>1</sup>, И. Иванов<sup>1,2</sup>, А. Киреев<sup>1</sup>, А. Курахмедов<sup>1,2</sup>, А. Платов<sup>1</sup>,  
Е. Самбаев<sup>1,2</sup>, М. Здоровец<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан*

<sup>2</sup> *Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан*

<sup>3</sup> *Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*

(E-mail: <sup>1</sup> [Igor.Gorlachev@gmail.com](mailto:Igor.Gorlachev@gmail.com), <sup>1</sup> [Taylor\\_d86@mail.ru](mailto:Taylor_d86@mail.ru), <sup>1,2</sup> [Igor.Ivanov.inp@gmail.com](mailto:Igor.Ivanov.inp@gmail.com),

<sup>1</sup> [Kireyev.Aleks@gmail.com](mailto:Kireyev.Aleks@gmail.com), <sup>1,2</sup> [Kurahmedov1992@mail.ru](mailto:Kurahmedov1992@mail.ru), <sup>1</sup> [Platov@inp.kz](mailto:Platov@inp.kz),

<sup>1,2</sup> [Sambayev.Ernaz@gmail.com](mailto:Sambayev.Ernaz@gmail.com), <sup>1,2,3</sup> [MZdorovets@gmail.com](mailto:MZdorovets@gmail.com))

### **Пределы определения PIXE метода при возбуждении атомов мишени тяжелыми ионами<sup>1</sup>**

**Аннотация:** В результате проведенных исследований были измерены пределы определения метода PIXE при бомбардировке пленки PET Hostaphan толщиной 12 мкм ускоренными пучками  $C^{2+}$ ,  $O^{2+}$ ,  $N^{2+}$ ,  $Ne^{3+}$ ,  $Ar^{6+}$ ,  $Kr^{13+}$  и  $Xe^{20+}$  с энергией 1 МэВ/нуклон и пучками  $C^{2+}$ ,  $O^{3+}$ ,  $N^{3+}$ ,  $Ne^{4+}$ ,  $Ar^{7+}$ ,  $Kr^{14+}$  и  $Xe^{22+}$  с энергией 1.6 МэВ/нуклон. Пределы определения были рассчитаны для K-линий химических элементов Ti, Cr, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb и L-линий Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Ta, W, Pb, Bi.

Было установлено, что из двух использованных энергий наибольшая чувствительность достигается для энергии ускоренных частиц 1.6 МэВ/нуклон. При этом для элементов с  $Z < 30$  и  $Z > 51$  оптимальным ионом для анализа микроэлементного состава образца на основе PET пленки является неон, а для элементов в диапазоне  $30 \leq Z \leq 51$  - кислород.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для развития на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 количественного анализа элементного состава воздушных аэрозолей при использовании PET пленки в качестве матрицы фильтров. Они позволяют оптимизировать выбор типа ускоренной частицы и ее энергию для получения наилучших пределов определения метода PIXE.

**Ключевые слова:** сечения выхода рентгеновского излучения; PIXE, предел определения.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2020-132-3-14-24>

Поступила: 21.05.2020/ Допущена к опубликованию: 21.09.2020

**Введение.** Индуцированное ускоренными ионами рентгеновское излучение, известное как particle induced x-ray emission (PIXE), является хорошо развитой аналитической техникой на основе ускорителей заряженных частиц [1]. PIXE использует возбуждение характеристического рентгеновского излучения при столкновении заряженных частиц с атомами исследуемых образцов для анализа их элементного состава, включая микроэлементы. Как правило, исследования с использованием PIXE выполняются на ускоренных легких ионах, обычно протонах с энергией от 1 МэВ до 3 МэВ и ионах гелия, для которых сечения ионизации рентгеновского излучения K- и L-оболочек достаточно хорошо известны с ошибкой в пределах нескольких процентов [2, 3]. Это объясняется главным образом тем фактом, что в ионизации внутренних оболочек атомов мишени легкими ионами доминируют одиночные процессы ионизации, и, следовательно, многоэлектронными аспектами ион-атомного взаимодействия можно пренебречь.

Тем не менее, в последнее время растет интерес к применению тяжелых ионов для анализа с помощью метода PIXE. Это объясняется тем, что чувствительность метода сильно зависит от сечений ионизации, которые пропорциональны квадрату заряда налетающей частицы. Таким образом, можно предположить, что применение пучков тяжелых ионов позволит существенно

<sup>1</sup>Работа выполнена в рамках Программы грантового финансирования МОН РК по теме № AP05130492



улучшить чувствительность анализа методом PIXE. Так, Ozafrán et. al. использовали пучки  $^{16}\text{O}$  и  $^{12}\text{C}$  для анализа элементного состава образцов тяжелой воды, отобранных на атомной электростанции [4, 5]. При этом был получен предел определения менее 0.01 ppb (part per billion) для элементов в диапазоне от Cr до Zn. В работах [6, 7] показана возможность анализа на пучках тяжелых ионов элементного состава воздушных аэрозолей.

При использовании метода PIXE на тяжелых ионах исследователям приходится сталкиваться с задачей выбора типа и энергии налетающей частицы. Как правило, основным критерием в этом случае может служить предел определения метода, т. е. минимально определяемое содержание химического элемента  $\text{MDL}_C$ , выход характеристического рентгеновского излучения, от которого соответствует минимально определяемой интенсивности  $\text{MDL}_Y$  отдельного пика, соответствующего этому элементу. Предел определения  $\text{MDL}_Y$  для интенсивности отдельного пика в рентгеновском спектре при условии отсутствия спектральных наложений определяется статистической неопределенностью фона в регионе спектра, соответствующем этому пику. Статистический критерий, используемый нами, состоит в измерении минимальной площади пика, которая может быть надежно определена с вероятностью 99.7% как:  $\text{MDL}_Y = 3\sigma$ , где  $\sigma$  - стандартное отклонение фона; т.е.  $\text{MDL}_Y = 3\sqrt{N_B}$ , где  $N_B$  - число фоновых импульсов в области пика. Более тяжелые и высокоэнергетичные снаряды, с одной стороны, порождают больше рентгеновских квантов, улучшая предел определения PIXE. Однако, с другой стороны, при этом также увеличивается и уровень фона, ограничивающий предел определения методики. Кроме того, использование частиц тяжелее неона приводит к появлению в спектре характеристических рентгеновских K-линий, испускаемых самим ионом. Для снарядов тяжелее криптона в спектре помимо K-линий налетающей частицы будет присутствовать еще и характеристические L-линии. Для целей аналитического применения метода PIXE на тяжелых ионах рентгеновские линии налетающей частицы будут служить дополнительным параметром, ухудшающим предел определения метода. Тем не менее, наличие конкурирующих факторов в разной степени влияющих на чувствительность метода PIXE на тяжелых ионах приводит к необходимости оценки и сравнения пределов определения для разных типов и энергий налетающих ионов.

Цель наших исследований состояла в получении пределов определения метода PIXE при облучении ускоренными ионами C, O, N, Ne, Ar, Kr и Xe с энергиями 1 МэВ/нуклон и 1.6 МэВ/нуклон PET Hostaphan - пленки толщиной 12 мкм (производства Mitsubishi Polyester Film). Выбор типа пленки обусловлен возможностью использования подложки такого типа в качестве воздушного фильтра для отбора и исследования элементного состава воздушных аэрозолей.

На основании полученных значений  $\text{MDL}_Y$  были рассчитаны минимально определяемые содержания элементов  $\text{MDL}_C$  в мкг/см<sup>2</sup>. В этом случае при расчетах использовались сечения выхода характеристического рентгеновского излучения, измеренные нами ранее [8-13].

**Экспериментальная часть.** Исследования проводились на тяжелоионном циклотроне ДЦ-60 Института ядерной физики в г. Нур-Султан, позволяющем ускорять частицы от Li до Xe с энергиями от 0.7 до 1.75 МэВ/нуклон. В экспериментах по измерению пределов определения использовались ускоренные пучки  $\text{C}^{2+}$ ,  $\text{O}^{2+}$ ,  $\text{N}^{2+}$ ,  $\text{Ne}^{3+}$ ,  $\text{Ar}^{6+}$ ,  $\text{Kr}^{13+}$  и  $\text{Xe}^{20+}$  с энергией 1 МэВ/нуклон и пучки  $\text{C}^{2+}$ ,  $\text{O}^{3+}$ ,  $\text{N}^{3+}$ ,  $\text{Ne}^{4+}$ ,  $\text{Ar}^{7+}$ ,  $\text{Kr}^{14+}$  и  $\text{Xe}^{22+}$  с энергией 1.6 МэВ/нуклон. Токи пучков на мишени в экспериментах составляли от 0.1 до 10 нА в зависимости от типа и энергии ускоренных частиц.

Мишенная камера, используемая для проведения исследований, изготовлена из цельного блока алюминия с внутренним диаметром - 430 мм и внутренней высотой - 200 мм. Основание камеры имеет толщину 50 мм для обеспечения стабильной поддерживающей базы для манипуляторов мишени, детекторов, коллиматора пучка и турбомолекулярного насоса. Вакуумный шлюз для загрузки мишени располагается на крышке камеры; он обеспечивает быструю (меньше чем за 5 минут) смену держателей мишени без нарушения высокого вакуума в камере. Камера оснащена смотровым окном и видеокамерой для регулирования положения мишени.

Основой вакуумной системы мишенной камеры являются турбомолекулярный насос производительностью 250 л/с и форвакуумным насосом с минимальной производительностью 190 л/мин. Управляемые электромагнитные и пневматические затворы с соответствующими контроллерами и средствами измерения обеспечивают автоматическую откачку камеры или напуск воздуха.

Для регистрации рентгеновского излучения использовался Si(Li) детектор с активной площадью 12 мм<sup>2</sup> и энергетическим разрешением 135 эВ на линии 5.9 кэВ. При регистрации К-линий Ti, Cr, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb и L-линий Ta, W, Pb, Bi перед детектором располагался майларовый поглотитель толщиной 0.1 мм для поглощения низкоэнергетических рентгеновских квантов. L-линии Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb детектировались без майларового поглотителя.

Были выбраны следующие геометрические параметры эксперимента: расстояние от мишени до Si(Li) детектора - 90 мм, расстояние от мишени до цилиндра Фарадея - 150 мм, расстояние от мишени до поверхностно-барьерного детектора монитора пучка - 130 мм, угол между пучком и нормалью к мишени - 0°, угол между нормалью к мишени и Si(Li) детектором - 32°.

**Результаты и обсуждения.** Одним из основных определяющих факторов при оценке пределов определения метода PIXE является уровень фона в месте положения анализируемых рентгеновских пиков. Этот фон устанавливает предел чувствительности, который может быть получен, поскольку для распознавания характеристического рентгеновского пика он должен подниматься над фоном статистически значимым образом.

Мы использовали общее понятие для предела определения выхода рентгеновского излучения MDL<sub>γ</sub>:

$$MDL_{\gamma} = 3\sqrt{N_B}$$

где  $N_B$  - число фоновых импульсов в интервале полной ширины на полувысоте в районе исследуемого рентгеновского пика.

Основными источниками фонового рентгеновского излучения являются:

- 1) тормозное излучение от вторичных электронов,
- 2) тормозное излучение налетающей частицы,
- 3) комптоновское рассеяние высокоэнергетического  $\gamma$ -излучения, являющегося продуктом ядерных реакций в материале мишени.

Наибольшее фоновое излучение происходит из-за выбивания вторичных электронов, которые являются составной частью процесса возбуждения. Таким образом, большие выходы рентгеновского излучения приводят к пропорционально большим выходам вторичных электронов, которые обуславливают тормозное излучение внутри мишени. Спектр фонового тормозного излучения свободных электронов ограничивается низкоэнергетичным регионом, и его максимальная энергия  $T_m$  пропорциональна максимальной скорости, которая может быть передана от налетающей частицы с массой  $M_{proj}$  и энергией  $E$  свободному электрону массой  $m_e$  [14]:  $T_m = 4m_e E / M_{proj}$ . Рассматривая это равенство в контексте многоэлементного микроанализа, выявляются некоторые ограничения:

а. Из-за высокого уровня фона серьезные ограничения можно ожидать на энергиях, близких или ниже  $T_m$ .

б. Так как значение  $T_m$  меняется линейно от  $E$ /нуклон налетающей частицы, оптимизация отношения сигнал/шум критически зависит от правильности выбора энергии и типа налетающей частицы.

с. Значение  $T_m$  для всех практических целей не зависит от химического состава образца.

Тормозное излучение ионов возникает в результате их кулоновского взаимодействия с атомным ядром мишени. Интенсивность этого излучения определяется квантово-механической теорией дипольного излучения [15], согласно которой ионы генерируют излучение подобно электронам при их рассеянии на ядрах атомов. Но для ионов вероятность испускания тормозного излучения меньше примерно в  $(M_{proj}/m_e)^2$ , чем для электронов. Масса самого легкого иона (протона) больше массы электрона в 1836 раз. Поэтому следует ожидать, что в области характеристических линий элементов с малыми атомными номерами тормозное

излучение вторичных электронов многократно превышает тормозное излучение ионов, которое становится определяющим только при энергиях рентгеновского излучения выше 10 кэВ, где ионизационная способность ионов оказывается не столь эффективной.

Третий тип излучения столь же фундаментален, как и первые два, в том смысле, что ионный пучок, при определенных условиях, в материале образца будет возбуждать ядерные реакции, сопровождающиеся испусканием  $\gamma$ -квантов. Это приводит к образованию высокоэнергетического хвоста в рентгеновском спектре из-за комптоновского рассеяния в детекторе или в окружающих его устройствах (мишенная камера, фильтры, мишенодержатель и др.). Комптоновское рассеяние, которое преобразует  $\gamma$ -лучи в непрерывный фон в рентгеновской области, зависит от материала детектора и его ближнего окружения. По своей форме этот фон напоминает тормозное излучение иона, выход которого выражается в слабой зависимости от энергии рентгеновского излучения. Количество производимого  $\gamma$ -излучения сильно зависит от концентраций в матрице облучаемого образца легких элементов, имеющих особенно высокие сечения выхода  $\gamma$ -квантов. Помимо облучаемого образца источником  $\gamma$ -фона могут быть материалы устройств канала транспортировки и мишенной камеры, имеющие прямой контакт с ускоренным ионным пучком - входные коллиматоры, цилиндр Фарадея и др.

Полные ширины на полувысоте рентгеновских пиков были определены нами из спектров, полученных при измерении сечений выходов рентгеновского излучения, индуцированного ионами O, N, Ne, Ar, Kr, Xe и C [8-13]. При этом не учитывалась тонкая структура рентгеновских пиков. Таким образом, были определены полные ширины на полувысоте для K-линий Ti, Cr, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb и L-линий Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb Ta, W, Pb, Bi.

Для каждого типа и энергии налетающего иона измерение MDL $\gamma$  производилось дважды - с поглотителем (для всех K-линий и L-линий Ta, W, Pb и Bi) и без поглотителя (для всех остальных L-линий). В качестве поглотителя для уменьшения вклада низкоэнергетичной рентгеновской составляющей спектра использовалась майларовая пленка толщиной 100 мкм.

Для расчета минимально определяемых содержаний элементов MDL $C$  мы использовали ту же формулу, что и при расчете сечений выхода рентгеновского излучения для ионов Ar, Kr и Xe [10-12]:

$$\sigma_x = \frac{N_x m}{d \varepsilon_x N_p N_0}$$

где  $N_x$  и  $N_p$  - зарегистрированное количество рентгеновских квантов и число ионов, упавших на образец, соответственно;  $M$  (г/моль) - молярная масса анализируемого элемента;  $d$  (г/см<sup>2</sup>) - толщина мишени;  $\varepsilon_x(E_x)$  эффективность Si(Li) детектора в зависимости от энергии рентгеновского излучения  $E_x$ ;  $N_0$  (1/моль) - число Авогадро. При переходе к MDL  $N_x$  трансформируется в MDL $\gamma$ , а  $d$  в MDL $C$ . Тогда формула для расчета MDL $C$  может быть записана в виде:

$$MDL_C = \frac{MDL_\gamma M}{\sigma_x \varepsilon_x N_p N_0}$$

Для измерения количества упавших на образец частиц (параметр  $N_p$  в формуле (2)) был разработан подход, основанный на использовании в качестве монитора пучка молибденовой сетки с 500 нм слоем висмута на поверхности. Причины и особенности использования такого подхода описаны в статье [11].

Сечения выхода характеристического рентгеновского излучения для ионов C, O, N, Ne, Ar, Kr и Xe с энергиями 1 МэВ/нуклон и 1.6 МэВ/нуклон, используемые в формуле (2) для расчета минимально определяемых содержаний элементов, были измеренные нами ранее [8-13].

Эффективность регистрации рентгеновского детектора определялась с использованием калибровочных радиоактивных источников <sup>152</sup>Eu, <sup>154</sup>Eu, <sup>155</sup>Eu, <sup>133</sup>Ba, <sup>109</sup>Cd, <sup>57</sup>Co, <sup>241</sup>Am и <sup>55</sup>Fe. Измеренные и рассчитанные кривые представлены на рисунке 1. Набор калибровочных источников перекрывал рентгеновский диапазон от 5.9 (<sup>55</sup>Fe) до 45 кэВ (<sup>152</sup>Eu). Точки в диапазоне 1 - 5.9 кэВ без поглотителя были рассчитаны с учетом поглощения

рентгена в 200 нм защитном окне и 100 нм мертвом слое детектора. Точки в диапазоне 3 - 20 кэВ с фильтром рассчитывались из массового коэффициента ослабления рентгена в майларовом поглотителе. Окончательно эффективности интерполировались по методу наименьших квадратов с оцененной ошибкой 7%.

В соответствии с формулой (2) были рассчитаны пределы определения метода PIXE для К-линий (рисунки 2 и 3) и L-линий (рисунки 4 и 6) определяемых элементов.

Как следует из рисунка 2, при энергии налетающих частиц 1 МэВ/нуклон наилучшие пределы определения метода PIXE в наших экспериментальных условиях достигаются при бомбардировке PET пленки ускоренным пучком азота. В этом случае наименьшее значение параметра  $MDL_C$  составляет  $6.4 \text{ нг/см}^2$  и соответствует титану. При увеличении энергии ионов до 1.6 МэВ/нуклон предпочтительным с точки зрения предела определения становится неон (рисунок 3) -  $MDL_C$  для титана в этом случае составляет  $2.2 \text{ нг/см}^2$ . Это объясняется, по-видимому, тем, что при увеличении энергии легких ионов возрастает фон, обусловленный комптоновским рассеянием  $\gamma$ -квантов от ядерных реакций в материале мишени. Для более тяжелых частиц, таких как неон, ядерные реакции дают гораздо меньший вклад в фоновую составляющую спектра. Столь значимое влияние комптоновского рассеяния на предел определения объясняется тем, что энергетический регион рентгеновских линий К-переходов для элементов от титана до сурьмы лежит в диапазоне от 4.5 кэВ до 30 кэВ, что выше граничной энергии  $T_m$  тормозного излучения вторичных электронов. В этом энергетической области вклад в общий фон тормозного излучения электронов сильно падает и доминирующими факторами, определяющими уровень фона, становятся тормозное излучение иона и комптоновское рассеяние  $\gamma$ -квантов.

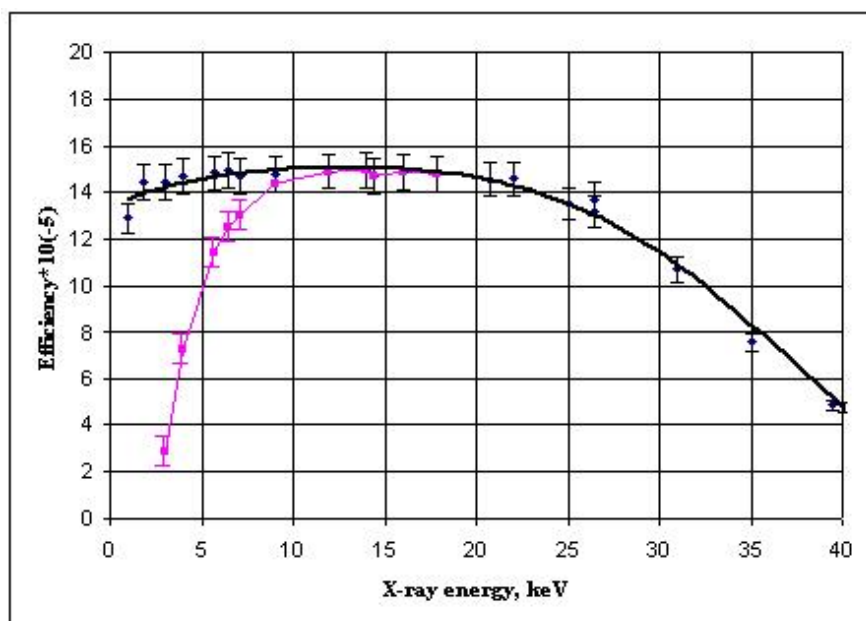


Рисунок 1 – Измеренные эффективности регистрации рентгеновского излучения с майларовым поглотителем толщиной 0.1 мм (розовые квадраты) и без поглотителя (черные ромбы)

Как следует из рисунков 2 и 3, несмотря на большие сечения выхода характеристического рентгеновского излучения для тяжелых ионов, таких как аргон, криптон и ксенон, пределы определения для них гораздо хуже, чем в случае легких ионов. Это объясняется тем, что при бомбардировке тяжелыми ионами, в спектре помимо характеристических пиков от элементов мишени, присутствуют линии, соответствующие налетающей частице. В случае аргона это  $K_{\alpha}$ -линия с энергией 3.0 кэВ и  $K_{\beta}$ -линия с энергией 3.2 кэВ. Для ионов криптона и ксенона в спектре помимо линий, соответствующих К переходам, присутствуют еще и L-линии. Их энергии составляют для ионов криптона: L - 1.6 кэВ,  $K_{\alpha}$  - 12.7 кэВ,  $K_{\beta}$  - 14.1 кэВ; для ионов ксенона: L - 4.1 кэВ,  $K_{\alpha}$  - 29.8 кэВ,  $K_{\beta}$  - 33.6 кэВ. Все эти паразитные пики служат дополнительным источником фона, ухудшающим предел определения метода.

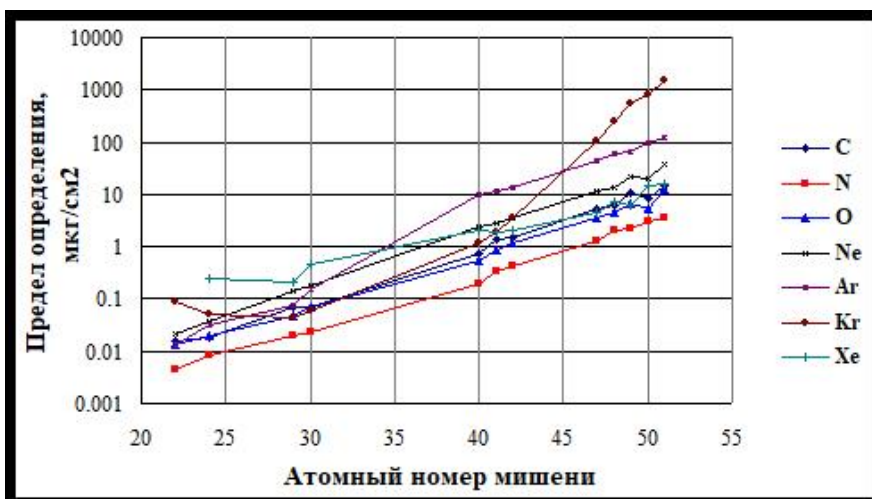


Рисунок 2 – Пределы определения метода PIXE ( $MDL_C$ ) для К-линий определяемых элементов. Энергия ускоренных пучков 1.0 МэВ/нуклон

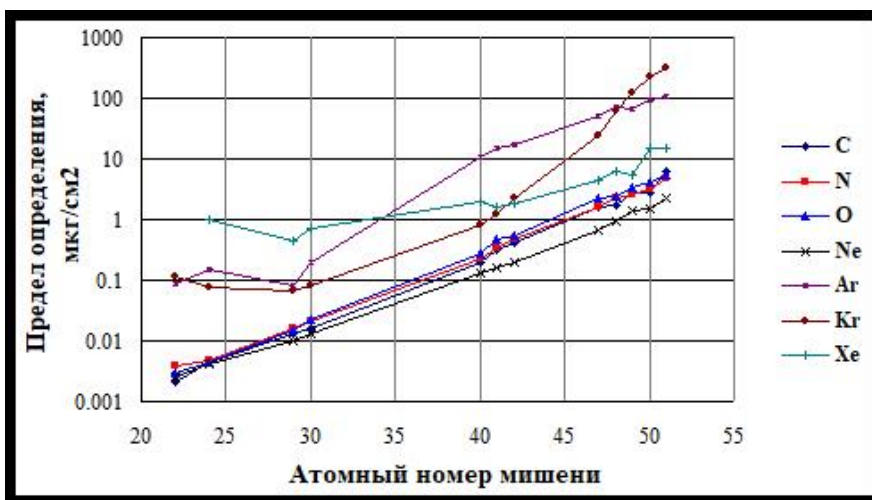


Рисунок 3 – Пределы определения метода PIXE ( $MDL_C$ ) для К-линий определяемых элементов. Энергия ускоренных пучков 1.6 МэВ/нуклон

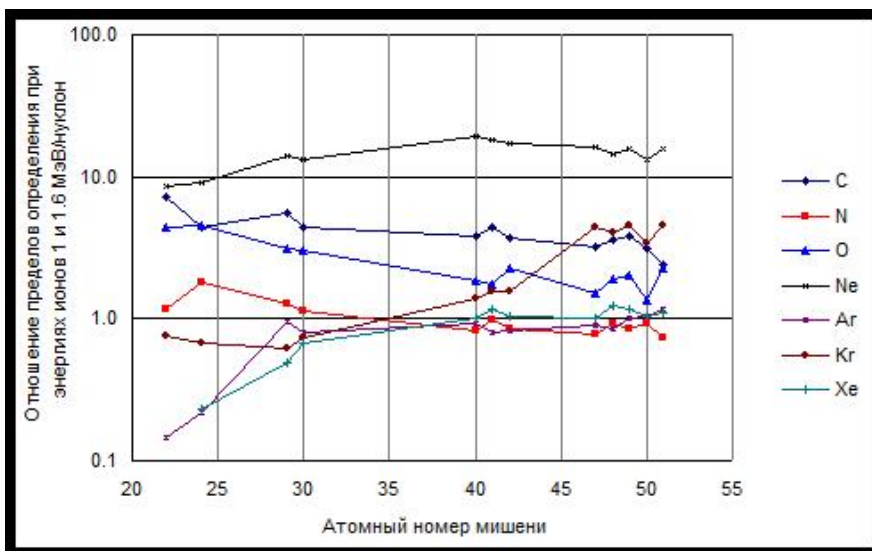


Рисунок 4 – Отношение пределов определения  $MDL_C$  (1 МэВ/нуклон)/ $MDL_C$  (1.6 МэВ/нуклон)

На рисунке 4 показаны отношения пределов определения метода PIXE для K переходов определяемых элементов при энергии ионов 1 МэВ/нуклон и 1.6 МэВ/нуклон. Как следует из рисунка 4, наиболее чувствительными к изменению энергии являются пределы определения для ионов неона. В этом случае увеличение энергии с 1 МэВ/нуклон до 1.6 МэВ/нуклон приводит к улучшению предела определения более чем в 10 раз. Для азота MDL<sub>C</sub> практически не зависит от энергии, что объясняется возрастанием сечения выхода флуоресценции пропорционально уровню фона. Для ионов С и О увеличение энергии сопровождается улучшением предела определения, но не столь кардинально, как для неона. Для ионов Ag и Xe в случае химических элементов с низким Z пределы определения при энергии 1 МэВ/нуклон лучше, чем при 1.6 МэВ/нуклон, и сравниваются для элементов с Z>30. Наконец, для криптона при Z<30 MDL<sub>C</sub> лучше для энергии ионов 1 МэВ/нуклон, а при Z>30, напротив, энергия 1.6 МэВ/нуклон становится предпочтительной.

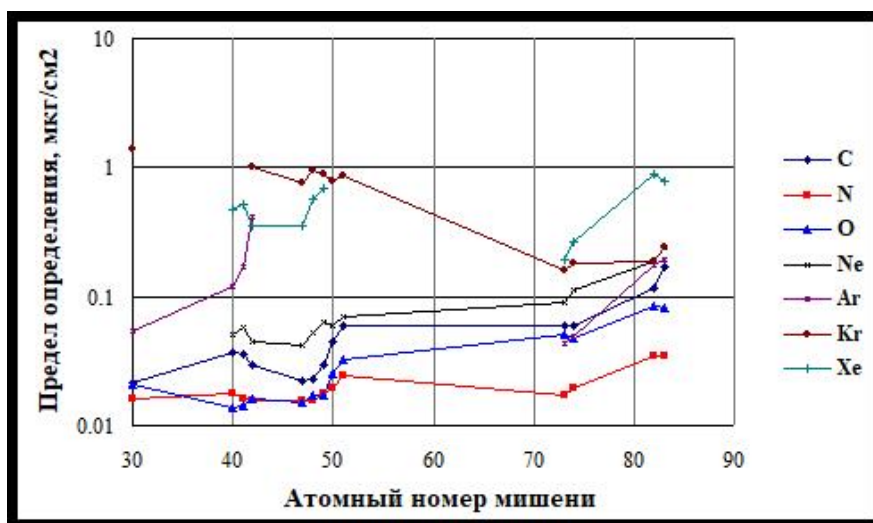


Рисунок 5 – Пределы определения метода PIXE (MDL<sub>C</sub>) для L-линий определяемых элементов. Энергия ускоренных пучков 1.0 МэВ/нуклон

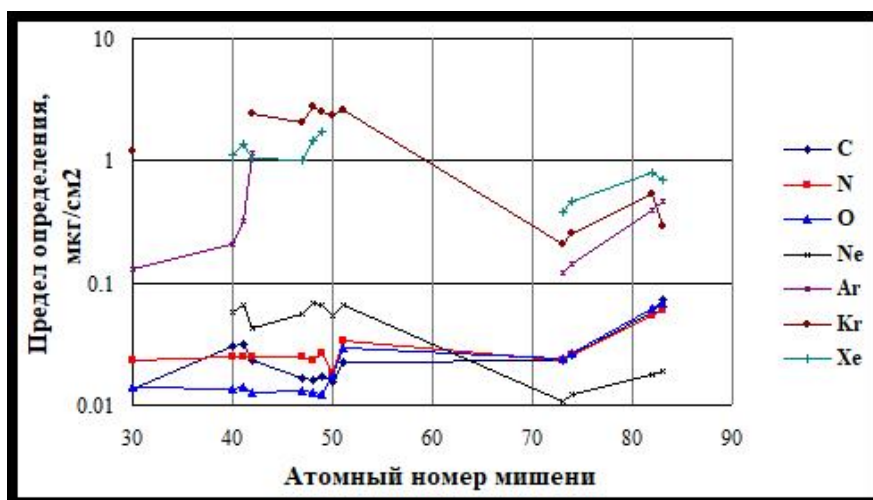


Рисунок 6 – Пределы определения метода PIXE (MDL<sub>C</sub>) для L-линий определяемых элементов. Энергия ускоренных пучков 1.6 МэВ/нуклон

Для L-линий весь диапазон определяемых элементов можно разбить на две области.

L-линии Ta, W, Рb и Vi находятся в энергетическом регионе от 8.2 кэВ до 13.0 кэВ, который совпадает с энергетической областью K-линий. Здесь также доминирующими составляющими фона являются тормозное излучение иона и комптоновское рассеяние  $\gamma$ -квантов. Как следует

из рисунков 5 и, так же, как и в случае К-линий, при энергии ионов 1 МэВ/нуклон наилучшие пределы определения достигаются для ионов азота, а при энергии 1.6 МэВ/нуклон - для ионов неона.

В случае низкоэнергетичных L-линий, соответствующих химическим элементам от Zn до Sb, доминирующим источником фона является тормозное излучение свободных электронов. Эти L-линии находятся в энергетическом диапазоне от 1 кэВ до 3.6 кэВ. Из-за больших спектральных наложений не были измерены пределы определения для L-линий следующих элементов: в случае ускоренного неона - Zn; для аргона - Ag, Cd, In, Sn, Sb; для криптона - Zr, Nb и для ксенона - Zn, Sn, Sb. Как следует из рисунков 5 и 6, наилучшие пределы определения достигаются при энергии 1 МэВ/нуклон - для ускоренных ионов азота и кислорода, а при энергии ионов 1.6 МэВ/нуклон - для пучка кислорода.

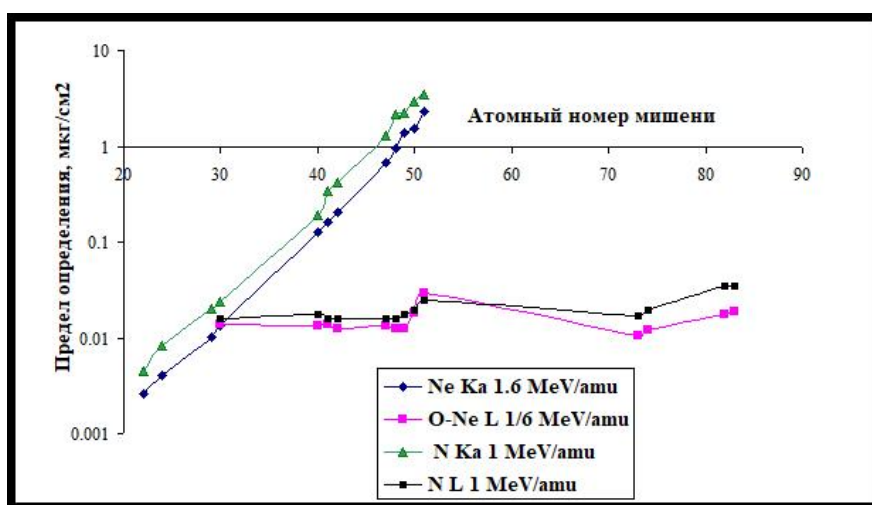


Рисунок 7 – Сравнение пределов определения для K- и L- линий

На рисунке 7 показано сравнение пределов определения для K- и L-линий. Как можно заметить из рисунка 7, для элементов с  $Z < 30$  доступны только K-линии, а для элементов с  $Z > 51$  - только L-линии. В диапазоне элементов  $30 \leq Z \leq 51$  предпочтительными с точки зрения пределов определения являются L-переходы. Для элементов с  $Z < 30$  оптимальным ионом для анализа микроэлементного состава образца на основе PET пленки является неон с энергией 1.6 МэВ/нуклон. Для элементов с  $Z \geq 30$  предпочтительной в основном также является энергия 1.6 МэВ/нуклон. Однако при  $30 \leq Z \leq 51$  оптимальным ионом является кислород, а при  $Z > 51$  - неон.

Все приведенные выше рассуждения справедливы в случае отсутствия спектральных наложений между близко расположенными в спектре рентгеновскими линиями. Однако при анализе реальных образцов спектральные наложения является достаточно распространенным явлением. В наибольшей степени это проявляется при анализе L- и M-линий от химических элементов, присутствующих в исследуемых образцах. Поэтому окончательный выбор того, какие переходы использовать для расчета содержания химических элементов, приходится принимать в каждом случае индивидуально.

**Выводы.** В результате проведенных исследований были измерены пределы определения метода PIXE при бомбардировке пленки PET Hostaphan толщиной 12 мкм ускоренными пучками  $C^{2+}$ ,  $O^{2+}$ ,  $N^{2+}$ ,  $Ne^{3+}$ ,  $Ar^{6+}$ ,  $Kr^{13+}$  и  $Xe^{20+}$  с энергией 1 МэВ/нуклон и пучками  $C^{2+}$ ,  $O^{3+}$ ,  $N^{3+}$ ,  $Ne^{4+}$ ,  $Ar^{7+}$ ,  $Kr^{14+}$  и  $Xe^{22+}$  с энергией 1.6 МэВ/нуклон. Пределы определения были рассчитаны для K-линий химических элементов Ti, Cr, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb и L-линий Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Ta, W, Pb, Bi.

Полученные результаты показывают, что при энергии налетающих частиц 1 МэВ/нуклон наилучшие пределы определения метода PIXE в наших экспериментальных условиях в случае K-линий достигаются при бомбардировке PET пленки ускоренным пучком азота ( $6.4 \text{ нг/см}^2$ ),

а при энергии 1.6 МэВ/нуклон - пучком неона ( $2.2 \text{ нг/см}^2$ ). Несмотря на большие сечения выхода характеристического рентгеновского излучения для тяжелых ионов, таких как аргон, криптон и ксенон, пределы определения для них гораздо хуже, чем в случае более легких ионов. Это объясняется тем, что при бомбардировке тяжелыми ионами, в спектре помимо характеристических пиков от элементов мишени, присутствуют линии соответствующие налетающей частице.

Наиболее чувствительными к изменению энергии являются пределы определения для ионов неона. В этом случае увеличение энергии с 1 МэВ/нуклон до 1.6 МэВ/нуклон приводит к улучшению предела определения более чем в 10 раз.

В случае низкоэнергетичных L-линий, соответствующих химическим элементам от Zn до Sb, наилучшие пределы определения достигаются при энергии 1 МэВ/нуклон - для ускоренных ионов азота и кислорода, а при энергии ионов 1.6 МэВ/нуклон - для пучка кислорода.

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что для элементов с  $Z < 30$  оптимальным ионом для анализа микроэлементного состава образца на основе PЕТ пленки является неон с энергией 1.6 МэВ/нуклон. Для элементов с  $Z \geq 30$  предпочтительной также является энергия 1.6 МэВ/нуклон. Однако при  $30 \leq Z \leq 51$  оптимальным ионом является кислород, а при  $Z > 51$  - неон.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для развития на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 в г. Астана количественного анализа воздушных аэрозолей при использовании PЕТ-пленки в качестве матрицы фильтров. Они позволяют оптимизировать выбор типа ускоренной частицы и ее энергию для получения наилучших пределов определения метода PIXE.

## Список литературы

- Johansson I. S., Campbell J., Malmqvist K. Particle-Induced X-ray Emission Spectrometry (PIXE).- Wiley-Interscience. - 1995, 451 p.
- Orlić I., Sow C., Tang S. Experimental L-Shell X-Ray Production and Ionization Cross Sections for Proton Impact // At. Data Nucl. Data Tables. - 1994. - Vol. 56. - № 1. - P. 159-210.
- Miranda J., Lapicki G. Experimental cross sections for L-shell x-ray production and ionization by protons // At. Data Nucl. Data Tables. - 2014. - Vol. 100. - P. 651-780.
- Ozafrán M.J., Vázquez M.E., Kreiner A.J., Debray M.E., Kesque J.M., Romo A.S.M.A., Pomar C., Somacal H., Davidson M., Davidson J. PIXE analysis of heavy water from a nuclear power plant // Nucl. Instr. and Meth. B. - 1993. - Vol. 74. - № 4. - P. 542-544.
- Ozafrán M.J., Vázquez M.E., Romo A.S.M.A., Cardona M.A., Debray M.E., Hojman D., Kesque J.M., Kreiner A.J., Menendez J.J., Somacal H., Davidson J., Davidson M. Heavy ion induced X-ray emission work at the TANDAR laboratory in Buenos Aires // Nucl. Instr. and Meth. B. - 1995. - Vol. 99. - № 1-4. - P. 384-386.
- Morata D., Polvé M., Valdés A., Belmar M., Dinator M.I., Silva M., Leiva M.A., Aigouy T., Morales J.R. Characterisation of aerosol from Santiago, Chile: an integrated PIXE-SEM-EDX study // Environ. Geol. - 2008. - Vol. 56. - P. 81-95.
- Micheletti M.I., Murruni L.G., Debray M.E., Rosenbusch M., Graf M., Ávila Cadena G., Vitale P., Davidson J., Somacal H. Elemental analysis of aerosols collected at the Pierre Auger Cosmic Ray Observatory with PIXE technique complemented with SEM/EDX // Nucl. Instr. and Meth. B. - 2012. - Vol. 288. - P. 10-17.
- Batyrbekov E., Gluchshenko N., Gorlachev I., Ivanov I., Platov A. X-ray production cross section for K-, L- and M-shell by 14 MeV and 19.6 MeV nitrogen // Nucl. Instr. And Meth. B. - 2014. - Vol. 330. - P. 86-90.
- Gorlachev I., Gluchshenko N., Ivanov I., Kireyev A., Kozin S., Kurakhmedov A., Platov A., Zdorovets M. K-, L- and M-shell X-ray productions induced by oxygen ions in the 0.8–1.6 MeV/amu range // Nucl. Instr. And Meth. B. - 2016. - Vol. 381. - P. 34-38.
- Gluchshenko N., Gorlachev I., Ivanov I., Kireyev A., Kozin S., Kurakhmedov A., Platov A., Zdorovets M. K-, L- and M-shell X-ray productions induced by argon ions in the 0.8-1.6 MeV/amu range // Nucl. Instr. and Meth. B. - 2016. - Vol. 372. - P. 1-6.
- Gorlachev I., Gluchshenko N., Ivanov I., Kireyev A., Alexandrenko V., Kurakhmedov A., Platov A., Zdorovets M. K-, L- and M-shell X-ray productions induced by krypton ions in the 0.8–1.6 MeV/amu range // Nucl. Instr. And Meth. B. - 2017. - Vol. 407. - P. 86-91.
- Gorlachev I., Alexandrenko V., Gluchshenko N., Ivanov I., Kireyev A., Krasnopyorova M., Kurakhmedov A., Platov A., Zdorovets M. K-, L- and M-shell x-ray productions induced by xenon ions // Nucl. Instr. And Meth. B. - 2018. - Vol. 430. - P. 31-35.



- Gorlachev I., Gluchshenko N., Ivanov I., Kireyev A., Krasnopyorova M., Kurakhmedov A., Platov A., Zdorovets M. X-ray production cross sections induced by neon ions // Nucl. Instr. And Meth. B. - 2019. - Vol. 448. - P. 19-25.
- Swietlicki E., Bohgard M. PIXE detection limits for some aerosol collection substrates by excitation with protons and  $^4\text{He}^{2+}$  ions from a 3 MV tandem accelerator // Nucl. Instr. And Meth. B. - 1984. - Vol. 3. - P. 441-445.
- Folkmann F., Gaarde C., Huus T. and Kemp K. Proton induced X-ray emission as a tool for trace element analysis // Nucl. Instr. And Meth. - 1974. - Vol. 116. - P. 487-499.

И. Горлачев<sup>1</sup>, Н. Глущенко<sup>1</sup>, И. Иванов<sup>1,2</sup>, А. Киреев<sup>1</sup>, А. Курахмедов<sup>1,2</sup>, А. Платов<sup>1</sup>,  
Е. Самбаев<sup>1,2</sup>, М. Здоровец<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup> Гумилев Л.Н. атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

<sup>3</sup> Урал федералды университеті, Екатеринбург, Ресей

### Нысаналы атомдарды ауыр иондармен қоздыруға арналған PIXE әдісінің шектері

**Аннотация.** Зерттеу нәтижесінде қалыңдығы 12 мкм PET Hostaphan пленкасын  $\text{C}^{2+}$ ,  $\text{O}^{2+}$ ,  $\text{N}^{2+}$ ,  $\text{Ne}^{3+}$ ,  $\text{Ar}^{6+}$ ,  $\text{Kr}^{13+}$  және  $\text{Xe}^{20+}$  энергиясы 1 МэВ/нуклон және  $\text{C}^{2+}$ ,  $\text{O}^{3+}$ ,  $\text{N}^{3+}$ ,  $\text{Ne}^{4+}$ ,  $\text{Ar}^{7+}$ ,  $\text{Kr}^{14+}$  және  $\text{Xe}^{22+}$  энергиясы 1,6 МэВ/нуклон иондарымен сәулесу арқылы PIXE әдісінің шегі анықталды. Жұмыста Ti, Cr, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb K-сызықтардың және Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Ta, W, Pb, Bi L-сызықтарының анықтау шегі есептелді.

Пайдаланылған екі энергияның ішіндегі ең жоғары сезімталдық 1,6 МэВ/нуклонның жылдамдатылған бөлшектер энергиясы үшін қолжетімді екендігі анықталды. Бұл жағдайда  $Z < 30$  және  $Z > 51$  элементтері үшін ПЭТ пленкасы негізінде үлгінің микроэлемент құрамын талдау үшін оңтайлы ион - неон, ал  $30 \leq Z \leq 51$  диапазонындағы элементтер үшін - кислород.

Алынған нәтижелер болашақта ПЭТ пленкасын сүзгі матрицасы ретінде қолдана отырып, DC-60 ауыр ион үдеткішіндегі ауа аэрозольдерінің элементтік құрамына сандық талдау жасау үшін қолданыла алады. Олар PIXE әдісін анықтауда ең жақсы шектерді алу үшін үдетілген бөлшек түрін және оның энергиясын таңдауды оңтайландыруға мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** рентген сәулелерінің қималары, PIXE, анықтау шегі.

I. Gorlachev<sup>1</sup>, N. Gluchshenko<sup>1</sup>, I. Ivanov<sup>1,2</sup>, A. Kireev<sup>1</sup>, A. Kurakhmedov<sup>1,2</sup>, A. Platov<sup>1</sup>,  
Ye. Sambayev<sup>1,2</sup>, M.V. Zdorovets<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> The Institute of Nuclear Physics of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup> L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>3</sup> Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

### The limits of the PIXE method for excitation of target atoms by heavy ions

**Abstract.** As a result of the studies, the limits of the PIXE method were measured by the irradiation of a 12- $\mu\text{m}$  thick PET Hostaphan film with accelerated beams of  $\text{C}^{2+}$ ,  $\text{O}^{2+}$ ,  $\text{N}^{2+}$ ,  $\text{Ne}^{3+}$ ,  $\text{Ar}^{6+}$ ,  $\text{Kr}^{13+}$  and  $\text{Xe}^{20+}$  with an energy of 1 MeV/nucleon and beams of  $\text{C}^{2+}$ ,  $\text{O}^{3+}$ ,  $\text{N}^{3+}$ ,  $\text{Ne}^{4+}$ ,  $\text{Ar}^{7+}$ ,  $\text{Kr}^{14+}$  and  $\text{Xe}^{22+}$  with an energy of 1.6 MeV/nucleon. The limits of determination were calculated for the K-lines of the chemical elements Ti, Cr, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb and L-lines of Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Ta, W, Pb, Bi.

It was found that the highest sensitivity is achieved for the accelerated particle energy of 1.6 MeV/nucleon. In this case, for elements with  $Z < 30$  and  $Z > 51$ , the optimal ion for the analysis of the microelement composition of the sample based on the PET film is neon, and for elements in the range  $30 \leq Z \leq 51$  - are oxygen.

The results can be used in the future to develop a quantitative analysis of the elemental composition of air aerosols on a heavy ion accelerator DC-60 using a PET film as a filter matrix. They allow you to optimize the choice of the type of accelerated particle and its energy to obtain the best limits for determining the PIXE method.

**Keywords:** X-ray cross sections, PIXE, limit of definition.

## References

- Johansson I. S., Campbell J., Malmqvist K. Particle-Induced X-ray Emission Spectrometry (PIXE) (Wiley-Interscience, 1995, 451 p.).
- Orlić I., Sow C., Tang S. Experimental L-Shell X-Ray Production and Ionization Cross Sections for Proton Impact, At. Data Nucl. Data Tables, 1(56), 159-210 (1994).
- Miranda J., Lapicki G. Experimental cross sections for L-shell x-ray production and ionization by protons, At. Data Nucl. Data Tables, 100, 651-780 (2014).
- Ozafrán M.J., Vázquez M.E., Kreiner A.J., Debray M.E., Kesque J.M., Romo A.S.M.A., Pomar C., Somacal H., Davidson M., Davidson J. PIXE analysis of heavy water from a nuclear power plant, Nucl. Instr. and Meth. B, 4(74), 542-544 (1993).
- Ozafrán M.J., Vázquez M.E., Romo A.S.M.A., Cardona M.A., Debray M.E., Hojman D., Kesque J.M., Kreiner A.J., Menendez J.J., Somacal H., Davidson J., Davidson M. Heavy ion induced X-ray emission work at the TANDAR laboratory in Buenos Aires, Nucl. Instr. and Meth. B, 1-4(99), 384-386 (1995).

- 6 Morata D., Polvé M., Valdés A., Belmar M., Dinator M.I., Silva M., Leiva M.A., Aigouy T., Morales J.R. Characterisation of aerosol from Santiago, Chile: an integrated PIXE–SEM–EDX study, *Environ. Geol.*, 56, 81-95 (2008).
- 7 Micheletti M.I., Murrini L.G., Debray M.E., Rosenbusch M., Graf M., Ávila Cadena G., Vitale P., Davidson J., Somacal H. Elemental analysis of aerosols collected at the Pierre Auger Cosmic Ray Observatory with PIXE technique complemented with SEM/EDX, *Nucl. Instr. and Meth. B.*, 288, 10-17 (2012).
- 8 Batyrbekov E., Gluchshenko N., Gorlachev I., Ivanov I., Platov A. X-ray production cross section for K-, L- and M-shell by 14 MeV and 19.6 MeV nitrogen, *Nucl. Instr. And Meth. B.*, 330, 86-90 (2014).
- 9 Gorlachev I., Gluchshenko N., Ivanov I., Kireyev A., Kozin S., Kurakhmedov A., Platov A., Zdorovets M. K-, L- and M-shell X-ray productions induced by oxygen ions in the 0.8–1.6 MeV/amu range, *Nucl. Instr. And Meth. B.*, 381, 34-38 (2016).
- 10 Gluchshenko N., Gorlachev I., Ivanov I., Kireyev A., Kozin S., Kurakhmedov A., Platov A., Zdorovets M. K-, L- and M-shell X-ray productions induced by argon ions in the 0.8–1.6 MeV/amu range, *Nucl. Instr. and Meth. B.*, 372, 1-6 (2016).
- 11 Gorlachev I., Gluchshenko N., Ivanov I., Kireyev A., Alexandrenko V., Kurakhmedov A., Platov A., Zdorovets M. K-, L- and M-shell X-ray productions induced by krypton ions in the 0.8–1.6 MeV/amu range, *Nucl. Instr. And Meth. B.*, 407, 86-91 (2017).
- 12 Gorlachev I., Alexandrenko V., Gluchshenko N., Ivanov I., Kireyev A., Krasnopyorova M., Kurakhmedov A., Platov A., Zdorovets M. K-, L- and M-shell x-ray productions induced by xenon ions, *Nucl. Instr. And Meth. B.*, 430, 31-35 (2018).
- 13 Gorlachev I., Gluchshenko N., Ivanov I., Kireyev A., Krasnopyorova M., Kurakhmedov A., Platov A., Zdorovets M. X-ray production cross sections induced by neon ions, *Nucl. Instr. And Meth. B.*, 448, 19-25 (2019).
- 14 Swietlicki E., Bohgard M. PIXE detection limits for some aerosol collection substrates by excitation with protons and  $^4\text{He}^{2+}$  ions from a 3 MV tandem accelerator, *Nucl. Instr. And Meth. B.*, 3, 441-445 (1984).
- 15 Folkmann F., Gaarde C., Huus T. and Kemp K. Prton induced X-ray emission as a tool for trace element analysis, *Nucl. Instr. And Meth.*, 116, 487-499 (1974).

**Сведения об авторах:**

*Горлачев И.Д.* – **основной автор**, кандидат физико-математических наук, начальник аналитической группы, Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова, 1, Алматы, Казахстан.

*Глуценко Н.* – начальник центра комплексных экологических исследований, Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова, 1, Алматы, Казахстан.

*Иванов И.А.* – начальник циклотрона ДЦ-60, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Киреев А.* – начальник ускорителя УКП-2-1, Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова, 1, Алматы, Казахстан.

*Курахмедов А.Е.* – начальник технологической службы циклотрона ДЦ-60, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Платов А.* – старший научный сотрудник, Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова, 1, Алматы, Казахстан.

*Самбаев Е.К.* – начальник ВЧ систем и ЭЦР источника, Астанинский филиал Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Здоровец М.В.* – кандидат физико-математических наук, доцент международной кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, директор Астанинского филиала Института ядерной физики, пр. Абылай хана, 2/1, Нур-Султан, Казахстан.

*Gorlachev I.D.* - **main author**, Candidate of physical and mathematical sciences, Head of the Analytical Group, Institute of Nuclear Physics, Ibragimov str., 1, Almaty, Kazakhstan.

*Gluchshenko N.* - Head of the Integrated Environmental Studies Center, Institute of Nuclear Physics, Ibragimov str., 1, Almaty, Kazakhstan.

*Ivanov I.A.* - Head of DC-60 cyclotron, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, Abylai Khan ave., 2/1, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Kireyev A.* - Head of UKP-2-1 ascelerator, Institute of Nuclear Physics, Ibragimov str., 1, Almaty, Kazakhstan.

*Kurakhmedov A.Ye.* - Head of technologycal service of DC-60 cycloton, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, Abylai Khan ave., 2/1, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Platov A.* - Senior researcher, Institute of Nuclear Physics, Ibragimov str., 1, Almaty, Kazakhstan.

*Sambayev Ye.K.* - Head of HF systems an ECR source, Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, Abylai Khan ave., 2/1, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Zdorovets M.V.* - candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor at the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies of the Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, director of the Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, Abylai Khan ave., 2/1, Nur-Sultan, Kazakhstan.